

Д. І. Вельміскін, Б. В. Перелигін

Розповсюдження радіохвиль



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Д. І. ВЕЛЬМІСКІН

Б.В. ПЕРЕЛИГІН

РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РАДІОХВИЛЬ

Конспект лекцій

Одеса – 2007

ББК 32. 845
В 28
УДК 621. 371

Друкується за рішенням Вченої ради Одеського державного екологічного університету (протокол № 8 від 28.09.2006 р.).

Вельміскін Д.І., Перелигін Б.В.

Розповсюдження радіохвиль: Конспект лекцій. –Одеса, Вид-во "ТЕС", 2007.-67 с.

В конспекті лекцій розглянуті умови розповсюдження радіохвиль в різних шарах атмосфери. Конспект лекцій використовується для студентів денної та заочної форми навчання, напрямку "Гідрометеорологія".

© Одеський державний
екологічний університет, 2007

ЗМІСТ

стор.

1	Загальні питання розповсюдження радіохвиль.....	5
1.1	Діапазони радіохвиль.....	5
1.2	Класифікація радіохвиль за способом розповсюдження.....	5
1.3	Прямі хвилі у вільному просторі.....	9
1.4	Втрати розповсюдження.....	12
1.5	Діюча довжина антени.....	12
1.6	Поглинання (ослаблення) сигналу, множник ослаблення.....	13
1.7	Спотворення (викривлення) сигналів.....	14
2	Розповсюдження земних хвиль над плоскою Землею.....	16
2.1	Електричні параметри різних видів поверхні Землі.....	16
2.2	Підняті антени.....	17
2.3	Інтерференційна структура множника ослаблення в напрямку траси.....	20
2.4	Інтерференційна структура множника ослаблення в просторі.....	23
2.5	Наближені межові умови Леонтовича.....	25
2.6	Структура поля хвилі в пункті приймання.....	26
2.7	Антени, розташовані безпосередньо на межі розподілу.....	28
2.8	Неоднорідний ґрунт, берегова рефракція.....	32
3	Розповсюдження радіохвиль над сферичною Землею.....	34
3.1	Урахування сферичності у межах прямої видимості.....	34
3.2	Урахування кривизни Землі при користуванні інтерференційними формулами.....	35
3.3	Область застосовності інтерференційних формул.....	37
3.4	Розповсюдження радіохвиль над однорідною гладкою сферичною поверхнею Землі.....	37
3.5	Розповсюдження радіохвиль над неоднорідною сферичною поверхнею Землі.....	38
4	Розповсюдження тропосферних хвиль.....	40
4.1	Склад і будова атмосфери.....	40
4.2	Електричні параметри тропосфери, коефіцієнт заломлення тропосфери.....	41
4.3	Явище атмосферної рефракції.....	42
4.4	Види рефракції, надрефракція.....	44
4.5	Вплив рефракції на дальність прямої видимості і поправку на висоту, еквівалентний радіус Землі.....	47
4.6	Ослаблення (загасання) радіохвиль у тропосфері.....	48

4.7	Флуктуаційні процеси в тропосфері, тропосферне розповсюдження, вплив сезонних, кліматичних і метеорологічних умов.....	49
5	Розповсюдження іоносферних хвиль.....	52
5.1	Склад і будова верхніх шарів атмосфери, механізм і джерела іонізації.....	52
5.2	Простий прошарок і структура реальної іоносфери.....	53
5.3	Електричні параметри іоносфери, фазова і групова швидкості радіохвиль в іоносфері.....	54
5.4	Заломлення і відбиття радіохвиль в іоносфері.....	56
6	Особливості розповсюдження іоносферних хвиль різних діапазонів.....	60
7	Передача метеорологічної інформації через космос.....	66
7.1	Загальні принципи поглинання радіохвиль у міжпланетному і міжзоряному просторі.....	66
7.2	Передача метеорологічної інформації за допомогою штучних супутників Землі, вибір оптимальних частот для космічних ліній зв'язку.....	66
7.3	Особливості розповсюдження радіохвиль у космічному просторі.....	67

І ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РАДІОХВИЛЬ

1.1 Діапазони радіохвиль

Радіохвилі (РХ) – електромагнітні хвилі в діапазоні частот від 0,001 до 10^{12} Гц. Весь спектр РХ поділяють умовно по десятковому принципу на окремі діапазони (табл.1.1).

Таблиця 1.1 – Діапазони радіохвиль

Діапазон			Частота, Гц	λ , м
РХ ІЗ і ЗВ частот			$3 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^3$	$10^{11} - 10^5$
НДХ			$3 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^4$	$10^5 - 10^4$
ДХ			$3 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5$	$10^4 - 10^3$
СХ			$3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^6$	$10^3 - 10^2$
КХ			$3 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7$	100-10
УКР.	мх		$3 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^8$	10-1
	НВЧ	дмх	$3 \cdot 10^8 - 3 \cdot 10^9$	1- 10^{-1}
		смх	$3 \cdot 10^9 - 3 \cdot 10^{10}$	$10^{-1} - 10^{-2}$
	ммх		$3 \cdot 10^{10} - 3 \cdot 10^{11}$	$10^{-2} - 10^{-3}$
ОРХ	ІЧ-промені		$3 \cdot 10^{11} - 4 \cdot 10^{14}$	$10^{-3} - 75 \cdot 10^{-8}$
	Видимі промені		$4 \cdot 10^{14} - 75 \cdot 10^{13}$	$75 \cdot 10^{-8} - 10^{-7}$
	УФ-промені		$75 \cdot 10^{13} - 3 \cdot 10^{15}$	$4 \cdot 10^{-7} - 10^{-7}$

1.2 Класифікація радіохвиль за способом розповсюдження

Постійне удосконалення техніки дозволяє розширювати класифікаційні параметри.

РХ, що поширюються в однорідному або слабо неоднорідному середовищі (наприклад у космічному просторі) по прямолінійних траєкторіях (або близьких до них) називають вільно розповсюджуваними або прямими хвилями.



Рис. 1.1 – Прямі хвилі

У більшості випадків маємо радіотраси уздовж поверхні Землі, а її близькість виявляється у виді 3-х чинників:

- вплив близькості і сферичної форми Землі
- вплив неоднорідності тропосфери (до 15 км)
- вплив іоносфери (від 60 до 600 км).

РХ, що поширюються в безпосередній близькості від поверхні Землі і обгинають частково опуклість земної кулі внаслідок явища дифракції, називаються земними або поверхневими хвилями.

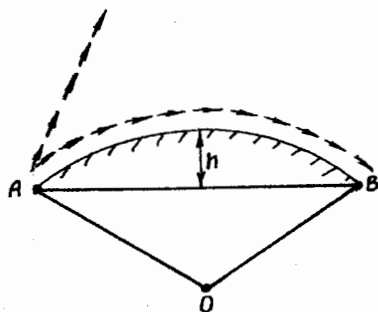


Рис. 1.2 – Земні хвилі

- напівпровідна поверхня викривляє структуру РХ,
- поглинається частина РХ,
- дифракція через сферичну форму Землі:

$L, \text{км}$	1	5	10	50	100	500	1000	5000
$h, \text{км}$	0,031	0,78	3,1	78	310	7800	$3,1 \cdot 10^4$	$3,75 \cdot 10^5$

РХ, що поширюються на значні відстані (до 1000км) за рахунок розсіювання в тропосфері і направляючої (хвильовідної) дії тропосфери називаються тропосферними хвилями. Як тропосферні можуть поширюватися хвилі з $\lambda < 10 \text{ м}$ (ці хвилі слабо дифрагують).

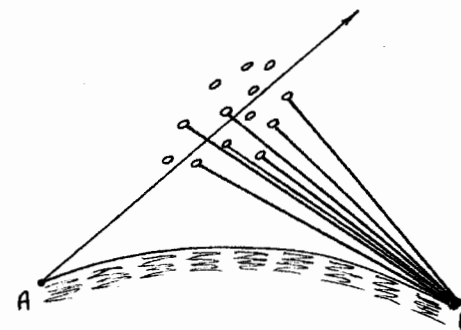


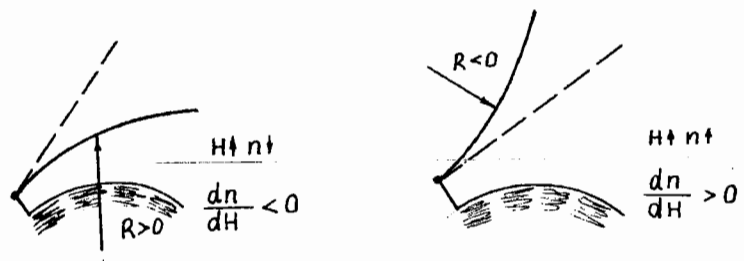
Рис. 1.3 – Тропосферні хвилі

Тропосфера неоднорідна, під дією метеофакторів спостерігаються як суцільні, так і локальні зміни коефіцієнта заломлення.

При визначених метеоумовах у приземному прошарку виникають області різкого зменшення коефіцієнта заломлення з висотою і це дозволяє хвилям із $\lambda < 3 \text{ м}$ поширюватися до 800-1000км за рахунок хвильовідної дії тропосфери.

Міжнародна комісія з аеронавігації в 1925 р. прийняла критерій нормальної тропосфери: $P_0 = 0,1013 \text{ МПа}$; $T = 288 \text{ К}$; $S = 69\%$; $H < 11 \text{ км}$.

РХ, що поширюються на великі відстані і обгинають земну кулю в результаті однократного або багатократного відбиття від іоносфери (у діапазоні хвиль $> 10 \text{ м}$), а також хвилі, що розсіюються на неоднорідностях іоносфери і відбиваються від іонізованих слідів метеорів (у діапазоні метрових хвиль), називаються іоносферними або просторовими хвилями.



Позитивна рефракція

Негативна рефракція



Позитивна рефракція



Позитивна рефракція

Рис. 1.4 – Явище рефракції

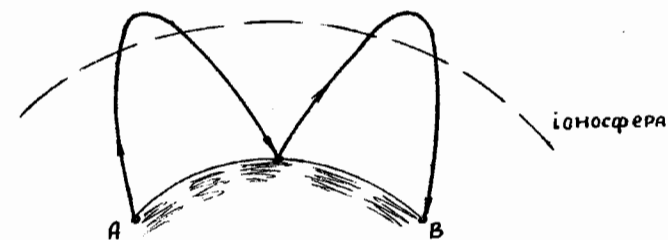


Рис. 1.5 – Іоносферні хвилі

Межі:	тропосфери	північ	7-10 км,
		південь	7-10 км,
		екватор	до 18 км,
	стратосфери		до 60 км,
	іоносфери		60-600 км, по відношенню

до РХ поводить себе як напівпровідне середовище.

Від іоносфери відбиваються хвилі з $\lambda > 10$ м (за винятком НДХ – вони можуть поширюватися уздовж силових ліній магнітного поля Землі).

При однократному відбитті дальність може бути до 4000 км.

На метеорних слідах можуть розсіюватися хвилі з λ і менше 10 м.

1.3 Прямі хвилі у вільному просторі

У вільному просторі (однорідне середовище, що не поглинає, із відносною діелектричною $\epsilon_r = 1$ проникністю) розміщений ізотропний випромінювач – уявний точковий випромінювач, що рівномірно випромінює у всіх напрямках.

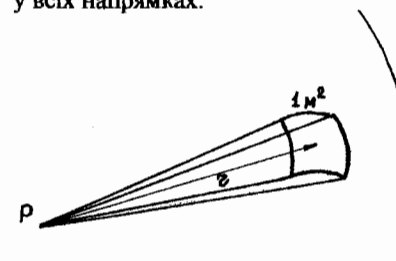


Рис.1.6 – Ізотропний випромінювач

Нехай P_1 – випромінювана потужність.
Знайдемо вектор Пойнтинга для такого джерела:

$$\Pi = \frac{P_1}{4\pi r^2}.$$

Середнє за період чисельне значення вектора Пойнтинга:

$$\Pi = E_g H_g,$$

де $H_g = E_g/120\pi$; 120π , – хвильовий опір вільного простору.
Підставивши, одержимо:

$$\Pi = \frac{E_g^2}{120\pi}.$$

Прирівнявши, одержимо:

$$\frac{P_1}{4\pi r^2} = \frac{E_g^2}{120\pi} \rightarrow E_g = \sqrt{\frac{30P_1}{r}}.$$

Випромінювачі мають визначений коефіцієнт спрямованої дії (КСД) D у порівнянні з ізотропними випромінювачами. D показує в скільки разів варто збільшити потужність, що підводиться до ізотропної антени, щоб вона створювала таку ж напруженість поля, що і спрямована – це КСД або коефіцієнт спрямованості (КС).

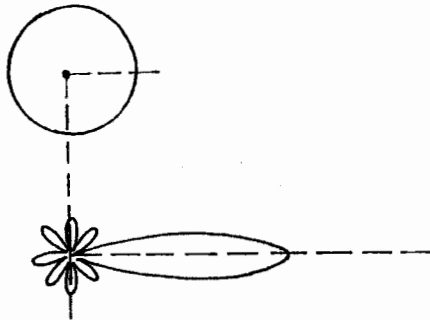


Рис.1.7 – Ізотропна і спрямована антени

Таким чином, спрямована антена – це антена, що створює в D раз більшу потужність, і тоді:

$$E_g = \sqrt{\frac{30P_1 D_1}{r}} \text{ – діюче значення,}$$

або

$$E_m = \sqrt{\frac{60P_1 D_1}{r}} \text{ – амплітудне значення.}$$

Миттєве значення напруженості електричного поля радіохвилі можна записати:

$$E = \frac{\sqrt{60P_1 D_1}}{r} \cos \omega \left(t - \frac{r}{c} \right) = \frac{\sqrt{60P_1 D_1}}{r} \cos \omega t - kr$$

де $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$ – хвильовий множник

Це ж значення можна уявити в символічному запису:

$$E = \frac{\sqrt{60P_1 D_1}}{r} e^{j \omega t - kr}.$$

Зручно користуватися і такою формулою:

$$E_g = \frac{173 \sqrt{P_1 D_1}}{r},$$

$$E_m = \frac{245 \sqrt{P_1 D_1}}{r}.$$

Тривалий час було прийнято оцінювати умови РРХ напруженістю електричного поля, утворюваного радіопередавальним пристроєм (РПП), в місці прийому для діапазонів довгих, середніх і коротких хвиль (ДХ, СХ, КХ). Для діапазону ультракоротких хвиль (УКХ) зручніше характеризувати умови прийому потужністю, утворюваною РПП на вході приймального пристрою, необхідною для упевненого прийому сигналів.

Для цього потрібно знати спрямованість приймальної антени D_2 .

З теорії антен відомо, що ефективна поверхня (ЕП) антени A , тобто площа, із якої приймальна антена витягує енергію РХ, яка надходить до неї виражається формулою:

тоді

$$A_2 = \frac{D_2 \lambda^2}{4\pi},$$

$$P_2 = \frac{P_1 D_1}{4\pi r^2}$$

і

$$P_2 = P_1 A_2 = \frac{P_1 D_1 D_2 \lambda^2}{(4\pi r)^2}.$$

1.4 Втрати розповсюдження

$$L_{CB} = \frac{P_1}{P_2} = \frac{(4\pi r)^2}{\lambda^2} \frac{\lambda}{D_1 D_2}$$

де L_{CB} – втрати у вільному просторі.

Щоб не враховувати вплив антени, вважають антени ізотропними ($D_1 = D_2 = 1$)

$$L_{OCB} = \frac{(4\pi r)^2}{\lambda^2}$$

або в дБ:

$$L_{CB} = 10 \lg L_{CB} = 20 \lg (4\pi r) - 20 \lg \lambda - D_1 - D_2$$

$$L_{OCB} = 10 \lg L_{OCB} = 20 \lg (4\pi r) - 20 \lg \lambda$$

1.5 Діюча довжина антени

Випромінювач вважають елементарним. I_g – діюче значення струму в електричному випромінювачі, В – пункт прийому.

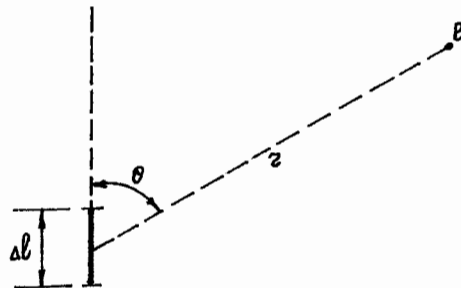


Рис.1.8 – Елементарний випромінювач

Тоді

$$E_g = \frac{60\pi I_g \Delta l}{\lambda r} \sin \theta.$$

Цю формулу можна використовувати для знаходження поля випромінювачів кінцевої довжини. Для цього довжину випромінювача Δl заміняють діючою довжиною антени l_g .

$$E_g = \frac{60\pi I_g l_g}{\lambda r}.$$

1.6 Поглинання (послаблення) сигналу. Множник послаблення

РРХ над Землею пов'язано з послабленням через ряд втрат у товщі Землі – дифракційні втрати; послаблення і розсіювання в тропосфері, іоносфері.

Послаблення хвиль у реальних умовах у порівнянні з вільним простором характеризується значенням F, називаним множителем (функцією) послаблення:

$$E_g = \frac{173\sqrt{P_1 D_1}}{r} F,$$

F – може бути незмінним або змінюватися в часі і просторі.

$$P_2 = \frac{P_1 D_1}{4\pi r^2} F^2,$$

$$P = 8 \cdot 10^4 \frac{P_1 D_1}{r^2} F_1^2,$$

$$L = \frac{P_1}{P_2} = \frac{L_{CB}}{F^2} = \frac{(4\pi r)^2}{(\lambda F)^2} \frac{1}{D_1 D_2}.$$

Основні втрати

$$L = \frac{L_{CB}}{F^2} = \frac{(4\pi)^2}{(\lambda F)^2}.$$

$$L = 10 \lg L = L_{\text{св}} - 20 \lg F = 20 \lg(4\pi r) - 20 \lg \lambda - F - D_1 - D_2,$$

$$L_o = 10 \lg L_o = L_{\text{осв}} - 20 \lg F = 20 \lg(4\pi^2) - 20 \lg \lambda - F.$$

Ці формули використовують при розрахунку ліній зв'язку.

$$P_1 D_1 D_2 = \left(\frac{4\pi r}{\lambda F} \right)^2 P_2.$$

Оптимізацію проводять за різними параметрами.

Задачі можуть вирішуватися в $\log$ варіанті рівнянь, при цьому потужності виражаються в дБ стосовно потужності 1 Вт.

Позначимо

$$10 \lg P_2 = P_2; \quad 10 \lg P_1 = P_1.$$

тоді

$$P_1 + D_1 + D_2 = P_2 + 20 \lg(4\pi r) - 20 \lg \lambda - F,$$

$$P_1 + D_1 + D_2 = P_2 + L_{\text{осв}} - F,$$

$$P_1 + D_1 + D_2 = P_2 + L$$

Ці формули спрощують розрахунки радіоліній.

1.7 Спотворення (викривлення) сигналів

Представлення F постійною величиною — ідеалізація. Процес розповсюдження складніше.

Змінюються: діелектричні параметри Землі (ϵ , σ); тропосфера (ϵ , σ) (не провідна); іоносфера (ϵ , σ), ϵ — діелектрична проникність, σ — електрична провідність.

Зміни призводять до багатопроменевості. Багатопроменевість при прийомі призводить до завмирань сигналів (фединги).

При немонохроматичному сигналі (із широким спектром) і рухомих неоднорідностях виникають доплерівські зміни частоти.

Власні шуми, шуми атмосфери також носять флюктуаційний характер.

Для того, щоб радіолокація і радіозв'язок працювали стійко, необхідно:

- середня потужність прийнятого сигналу в певне число разів перевищувала потужність шумів;
- викривлення, які виникли в процесі РРХ не перевищували встановлених норм.

Питання для самоконтролю:

- 1 Яка область діапазону електромагнітних коливань називається радіохвилями?
- 2 Класифікація радіохвиль по діапазонах.
- 3 Вільне розповсюдження радіохвиль і його практичне значення.
- 4 Види радіоліній і їх призначення.
- 5 За рахунок яких чинників відбувається втрата енергії радіохвилі, що розповсюджується?

2 РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗЕМНИХ ХВИЛЬ НАД ПЛОСКОЮ ЗЕМЛЕЮ

2.1 Електричні параметри різних видів поверхні Землі

Розповсюдження земних РХ відбувається безпосередньо над поверхнею Землі, що є напівпровідною. Тому необхідно знання електричних параметрів різних видів поверхні Землі, їх урахування.

Велика частина поверхні (71%) вода. З погляду електричних властивостей (діелектричної проникності і питомої електричної провідності) розрізняти потрібно солону воду морів і океанів, озер, річок. Поверхня може бути дзеркально гладкою і бути покрита хвилями різної висоти (до десяти метрів). Подібну картину утворюють льоди.

Грунт: вологий, у виді полів, лук, ріллі; такий ж, але покритий чагарниками і деревами; сухий у виді пісків; горбкуватий з рослинністю; скелястий без рослинності і т.п.

При вивченні особливостей розподілу земних хвиль доводиться ідеалізувати умови, у яких протікають процеси РРХ і в глибину Землі. Реальний плодючий ґрунт замінюють уявленим однорідним, що робить таку ж дію поглинання, як і реальний ґрунт. При практичних розрахунках задовільняються тим, що беруть до уваги тільки різкі зміни в умовах РРХ (берегова лінія, межа поле-ліс і т.п.)

Різновиди земної поверхні можна розбити на 2 групи: поверхні, що характеризуються незначними нерівностями, тому їх можна замінити складеною поверхнею з тими ж електричними параметрами; поверхні, що мають значні нерівності і котрі повинно замінити згладженою поверхнею з еквівалентними електричними параметрами.

Існують спеціальні карти ґрунтів. Є вони і для України.

В таблиці 2.1 наведені електричні характеристики різних видів поверхні Землі.

Таблиця 2.1 – Електричні характеристики земної поверхні (для діапазону СХ)

	Діапазон характеристик		Середні значення	
	ϵ	$\sigma, \text{См/м}$	ϵ	$\sigma, \text{См/м}$
Морська вода	80	1-4,3	80	4
Прісна вода	80	$10^{-3} - 2,4 \cdot 10^{-2}$	80	10^{-3}
Вологий ґрунт	10-30	$3 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-2}$	10	10^{-2}
Сухий ґрунт	3-6	$1,1 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-3}$	4	10^{-3}
Ліси			еквів.	10^{-3}
Значні міста			зна-ня	$7,5 \cdot 10^{-4}$
Гориста місцевість				$7,4 \cdot 10^{-4}$

2.2 Підняті антени

Цей випадок найбільш простий для розгляду: невеличкі відстані між антенами, зневажається кривизна Землі; поверхня плоска, напівпровідна і однорідна по всій трасі.

Під "піднесеною" антеною розуміють: живлення антени фідером, що не випромінює; $h > \lambda$.

В цьому випадку рішення задачі знаходження множника ослаблення, що зводиться до рішення рівнянь Максвелла, стосовно до даних граничних умов, можна значно спростити: напруженість електричного поля в точці розташування приймальної антени можна знайти методами геометричної оптики.

Постановка задачі:

- Дано: r – відстань між основами антен;
 h_1, h_2 – висота відповідно передавальної і приймальної антен;
 P_1 – потужність, випромінювана передавальною антеною;
 D_1, D_2 – КСД відповідно передавальної і приймальної антен;
 λ – довжина хвилі;
 ϵ_r – відносна діелектрична проникність ґрунту;
 σ – електрична провідність ґрунту;
 вид поляризації.

Знайти: F – множник ослаблення за допомогою формули про напруженість поля в точці прийому:

$$E_g = \frac{173 \sqrt{P_1 D_1}}{r} F,$$

або про потужність в точці прийому

$$P_2 = \frac{6,33 \cdot 10^3 P_1 D_1 D_2 \lambda^2}{r^2} F^2.$$

У 1922 р Введенський Б.О. доказав, що електричне поле радіохвилі в точці В є результатом інтерференції прямого і відбитого променів.

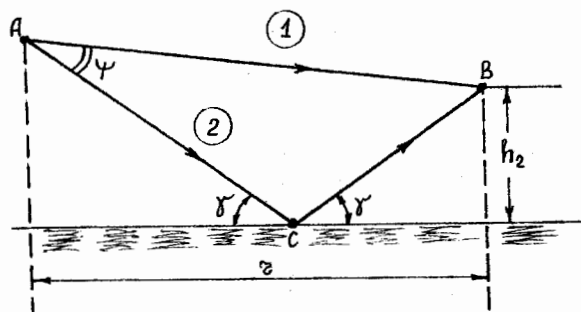


Рис.2.1 – Хід прямого і відбитого від Землі променів

Результуюче поле буде у вигляді суми миттєвих значень напруженості поля прямого променя

$$E_1 = \frac{245\sqrt{P_1 D_1}}{r_1} e^{j\omega t}$$

і відбитого від поверхні Землі

$$E_2 = -\frac{245\sqrt{P_1 D_1}}{r_2} e^{j\left(\omega t - \frac{\pi}{\lambda} \Delta r\right)}$$

де $r_1 = AB$, $r_2 = AC + CB$, $\Delta r = r_2 - r_1$; $R = R e^{j\theta}$ – комплексний коефіцієнт відбиття від Землі.

Додатково пояснимо формули:

- обмежимося випадком, коли $h \ll r$, в цьому випадку ψ і γ дуже малі і складають частки градусів;
- промені (1) і (2) також випромінюються практично в одному напрямку, тому для E_1 і E_2 використовується одне і теж D_1 .
- відбитий промінь (2) проходить більшу відстань, чим промінь (1), хоча і не набагато, через $h \ll r$.

Тоді

$$E_2 = R \frac{245\sqrt{P_1 D_1}}{(r_2 + \Delta r)} e^{j\left(\omega t - \frac{\pi}{\lambda} \Delta r\right)}$$

Врахуємо, що $\Delta r \ll r$ і підсумуємо

$$E = E_1 + E_2 = \frac{245\sqrt{P_1 D_1}}{r} (1 + R e^{-j\beta}) e^{j\omega t},$$

де $\beta = \theta + \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r$.

Уявимо:

$$1 + R e^{-j\beta} = 1 + R \cos \beta - j R \sin \beta = \sqrt{1 + 2R \cos \beta + R^2} e^{-j\varphi},$$

де $\tan \varphi = \frac{R \sin \beta}{1 + R \cos \beta}$,

і тоді

$$E = \frac{245\sqrt{P_1 D_1} \sqrt{1 + 2R \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r\right) + R^2}}{r} e^{j\omega t - \varphi}$$

(для діючого значення E_g коефіцієнт дорівнює 173).

Порівняємо цю формулу з вихідною і побачимо, що

$$F = \sqrt{1 + 2R \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r\right) + R^2}$$

У цьому виразі три невідомі розміри: модуль коефіцієнтів відбиття R ; кут втрати фази при відбитті θ ; різниця ходу променів Δr .

Для визначення R і θ , необхідно знати кут ковзання γ , вид поляризації і електричні константи відбиваючої поверхні. Їх визначають за графіками для сухого і вологого ґрунтів, морської води, для вертикальної і горизонтальної поляризації.

Таким чином, залишаються невідомими кут ковзання γ і різниця променів Δr .

Розв'язуючи тригонометричну задачу по рисунку

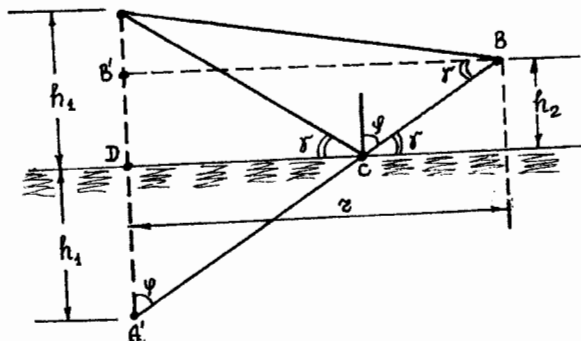


Рис.2.2 – Хід променів

одержимо:

$$\gamma \approx \frac{h_1 + h_2}{r}, \quad \Delta r = r_2 - r_1 \approx \frac{2h_1 h_2}{r}.$$

Підставимо отримані значення у вираз для F, одержимо:

$$F = \sqrt{1 + 2R \cos\left(\theta + \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda r}\right) + R^2}.$$

присутня явна залежність від γ .

Крім того R і θ також залежать від γ , тому що в міру зміни γ змінюється r , також R і θ .

2.3 Інтерференційна структура множника ослаблення в напрямку траси

Аналіз виразу F:

$$\begin{aligned} \gamma &= \text{var}, \\ h_1 h_2 &= \text{const} \end{aligned}$$

F послідовно проходить ряд максимумів і мінімумів, коли $\cos = +1$ і $\cos = -1$.

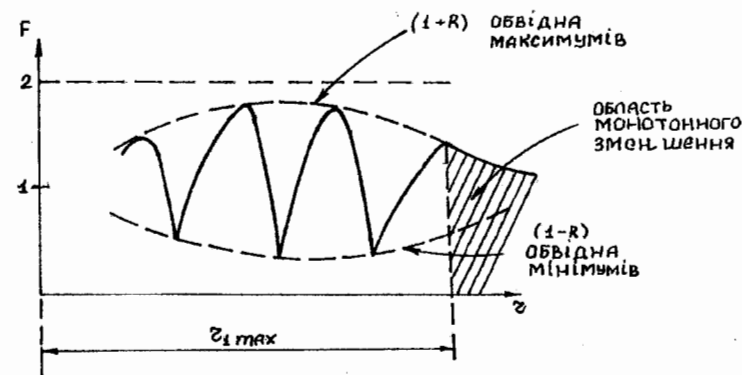


Рис.2.3 – Структура множника в напрямку траси

В такому випадку F можна назвати "множником ослаблення" лише умовно, тому що в максимумах він більше 1.

Аналіз показує, що структура електричного поля носить інтерференційний характер і тому вираз для напруженості електричного поля E_g називається "інтерференційною формулою":

$$E_g = \frac{173\sqrt{P_1 D_1}}{r} \sqrt{1 + 2R \cos\left(\theta + \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda r}\right) + R^2}.$$

У багатьох випадках вираз для F можна спростити. При малих γ для більшості видів поверхні Землі, що зустрічаються, $R \approx 1$, а $\theta = 180^\circ$.

Тому можна одержати:

$$F = 2 \left| \sin \frac{\pi}{\lambda} \Delta r \right| = 2 \left| \sin \frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda r} \right|$$

або

$$F = 2 \left| \sin \left(\frac{0,36 h_1 h_2}{r \lambda} \right) \right|.$$

Тоді

$$E_g = \frac{346\sqrt{P_1 D_1}}{r} \left| \sin \left(\frac{0,36 h_1 h_2}{r \lambda} \right) \right|.$$

Відстані, яким відповідають максимуми, визначаються з умови

$$\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda r} = \frac{\pi}{2} 2n+1, \quad n=0,1,2,\dots$$

Звідси

$$r = \frac{4h_1 h_2}{\lambda (n+1)}$$

Місце розташування мінімумів визначається з умови

$$\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda r} = \pi (n+1), \quad n=0,1,2,\dots$$

Звідси

$$r = \frac{2h_1 h_2}{\lambda (n+1)}$$

Для цього випадку структура поля в напрямку траси прийме вигляд:

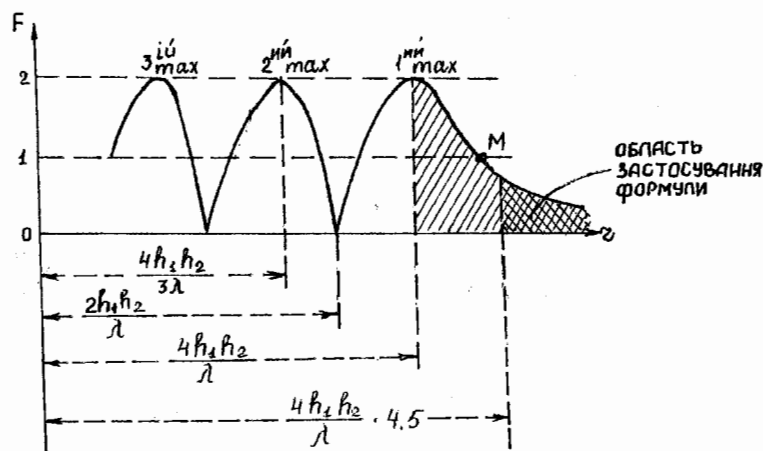


Рис.2.4 – Реальна структура поля в напрямку траси

2.4 Інтерференційна структура множника ослаблення в просторі

Розташування на висоті h_1 ізотропного випромінювача над плоскою поверхнею призводить до утворення у вертикальній площині пелюсткової діаграми направленості (ДН) (за аналогією із системою дискретних випромінювачів у теорії антен):

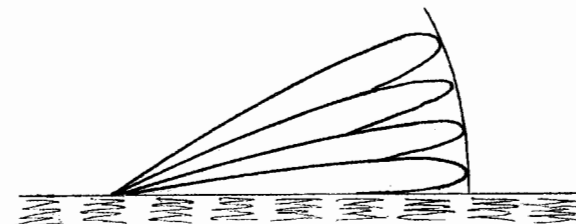


Рис.2.5 – Пелюстковий характер ДН

Цю аналогію видно з рисунка:

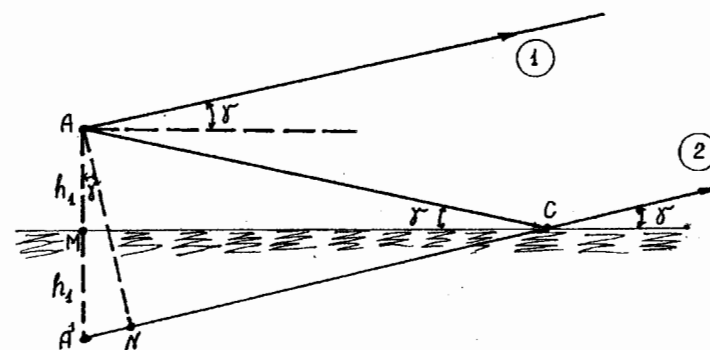


Рис.2.6 – Хід променів при формуванні ДН

В цьому випадку вираз для множника ослаблення набере вигляду:

$$F = 2 \left| \sin \frac{\pi 2h}{\lambda} \sin \gamma \right| = 2 \left| \sin n\pi \sin \gamma \right|,$$

де
$$n = \frac{2 h_1}{\lambda}$$

Аналіз виразу показує, що результуюча ДН буде мати n максимумів у ДН ізотропної антени в межах одного квадранта, наприклад:



Рис.2.7 – Результуюча ДН

В багатьох випадках цю формулу можна спростити. Наприклад, якщо аргумент зовнішнього синусу $< 20^\circ$, тобто

$$\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda r} \leq \frac{\pi}{9} \text{ або } h_1 h_2 \leq \frac{r \lambda}{18},$$

тоді значення $\sin$ можна замінити його аргументом і множник ослаблення буде дорівнювати:

$$F = \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda r}.$$

Отримаємо

$$E_g = \frac{2,18 \sqrt{P_1 D_1 h_1 h_2}}{r^2 \lambda}.$$

Це фундаментальна формула для розрахунку УКХ ліній зв'язку.

Припущення про існування в місці прийому прямого і відбитого від Землі променів є лише наближеним трактуванням. Дифракційний процес РРХ набагато складніше і виправдовує себе тільки у випадку піднятих антен, коли висота підйому в декілька разів перевищує довжину хвилі. Якщо цього немає, то треба враховувати дифракційні процеси, тобто вплив плоской напівпровідної поверхні Землі на РРХ і тоді застосовують други методи знаходження поля в місці прийому.

2.5 Наближені граничні умови Леонтовича

Точне розв'язання задачі про РРХ земних хвиль полягає в наступному:

- складають рівняння Максвела для верхнього середовища – повітря;
- укладають рівняння Максвела для нижнього середовища – землі;
- знаходять розв'язки цих рівнянь, що задовольняють межові умови (тобто умови на поверхні поділу двох середовищ), особливості розташування випромінювача.

М.О. Леонтович у 1944 році показав, що розв'язання задачі про РРХ земних хвиль можна істотно спростити, якщо точні межові умови замінити наближеними співвідношеннями або імпедансними умовами (умовами Леонтовича).

Вони полягають в тому, що умови вважаються справедливими тільки для тих випадків, коли модуль комплексної відносної діелектричної проникності багато більше за одиницю, тобто

$$\sqrt{\epsilon^2 + 60\lambda\sigma^2} \geq 1,$$

ϵ – діелектрична проникність ґрунту,

σ – питома електрична провідність.

Замість точних межових умов

$$\left. \begin{aligned} E_{1r} &= E_{2r} \\ H_{1r} &= H_{2r} \end{aligned} \right\} \text{при } Z = 0$$

використовуємо наближені межові умови

$$\left. \begin{aligned} E_{1z}\epsilon_{1K} &= E_{2z}\epsilon_{2K} \\ H_{1z}\mu_1 &= H_{2z}\mu_2 \end{aligned} \right\} \text{при } Z = 0$$

Умови Леонтовича еквівалентні вимозі того, щоб довжина хвилі в товщі була значно менше ніж довжина хвилі в повітрі. Для реальних типів ґрунтів ця умова майже завжди виконується і тому не має обмеженого характеру.

Сутність граничних умов Леонтовича полягає в тому, що співвідношення між горизонтальними складовими напруженостей електричного і магнітного полів на межі поділу в першому середовищі визначається параметрами другого середовища. Крім того, радіохвилі, що виникають в напівпровідному середовищі, являють собою плоскі хвилі, що поширюються всередину середовища в напрямку нормалі до межі

поділу і зазнають поглинання, обумовленого параметрами другого середовища.

2.6 Структура поля хвилі в пункті прийому

Нехай g – велике, тоді фронт хвилі можна вважати плоским в районі приймальної антени.

Відомо: вертикальна складова електричного поля в повітрі

$$E_{1Z} = E_{1Zm} e^{j\omega t}$$

Знайти: інші складові напруженості ЕМП в обох середовищах.

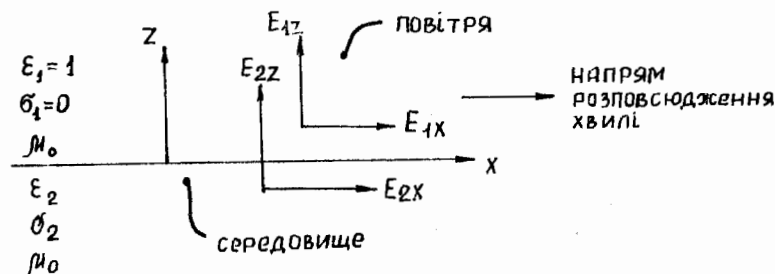


Рис.2.8 – Постановка задачі

Розв'язання навіть цієї простої задачі пов'язано зі значними математичними труднощами. Необхідно дослідити граничні умови Леонтовича. В цьому випадку треба розв'язати рівняння Максвелла для повітря, застосувавши до них зазначені умови. Це розв'язання добре відомо. Наведемо його результат:

$$E_{1X} = \frac{E_{1Z}}{\sqrt{\epsilon_K}}, \text{ при } Z=0; \quad E_{1X} = \frac{E_{1Z}}{\sqrt{\epsilon - j60\lambda\sigma}}$$

Перетворивши, одержимо:

$$E_{1X} = \frac{E_{1Zm}}{\sqrt{\epsilon^2 + 60\lambda\sigma^2}} e^{j\left(\omega t + \frac{\alpha}{2}\right)},$$

$$\text{де } \alpha = \arctg \frac{60\lambda\sigma}{\epsilon}$$

В тому числі хвиля на межі поділу середовищ уже не є поперечною, як в однорідному середовищі, а має подовжену (горизонтальну) складову. Її амплітуда значно менше вертикальної складової і зсунута відносно неї за фазою, причому горизонтальна складова тим менше, чим більше провідність ґрунту і чим довше хвиля.

Використовуючи умови Леонтовича, одержимо розв'язок для ґрунту:

$$E_{2X} = \frac{E_{1Z}}{\epsilon - j60\lambda\sigma} \quad \text{або} \quad E_{2X} = \frac{E_{1Zm}}{\sqrt{\epsilon^2 + (60\lambda\sigma)^2}} e^{j\omega t + \alpha},$$

$$E_{2X} = E_{1X} = \frac{E_{1Zm}}{\sqrt{\epsilon^2 + 60\lambda\sigma^2}} e^{j\left(\omega t + \frac{\lambda}{2}\right)},$$

$$H_{1Y} = H_{2Y} = -\frac{E_{1Zm}}{120\pi} e^{j\omega t},$$

$$\text{де } \alpha = \arctg \frac{60\lambda\sigma}{\epsilon}$$

Аналіз цих рівнянь показує:

– подовження складової напруженості ЕА поля ЕМХ в повітрі зрушена за фазою відносно вертикальної, тому поле вважається еліптично поляризованим у вертикальній площині, тобто хвиля перестає бути плоскою;

– якщо в ґрунті переважають струми зсуву ($\epsilon \gg 60\lambda\sigma$), то кут зсуву за фазою $\rightarrow 0$, і навпаки, якщо в ґрунті переважають струми провідності, то кут $\rightarrow \frac{\alpha}{2}$, тобто $\kappa \rightarrow \frac{\pi}{4}$;

– при параметрах ґрунтів, що найбільш часто зустрічаються, ексцентриситет еліпса поляризації дуже великий і можна вважати, що електричне поле плоско поляризоване і результуючий вектор напруженості поля орієнтований в напрямку великої осі еліпса.

У цьому випадку можна говорити про «нахил фронту хвилі». Кут нахилу ψ результуючого вектора напруженості електричного поля відносно нормалі до площини поділу визначається

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{E_{1Xm}}{E_{1Z}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon^2 + 60\lambda\sigma^2}}$$

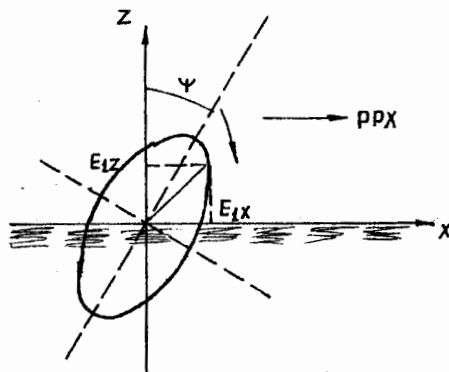


Рис.2.9 – Нахил фронту хвилі

2.7 Антени, що розташовані безпосередньо на межі розподілу

Подібне положення типове для діапазонів СДХ, ДХ і СХ. Крім того, в цьому випадку не береться до уваги кривизна Землі, тому ця методика застосовується тільки для невеличких відстаней.

Розглянемо ідеальний випадок, коли поверхня Землі є ідеальним провідником (тобто $I_{\text{пров}} \gg I_{\text{зсуву}}$).

Антенна, розташована на плоскій поверхні, має КСД D , випромінює потужність P_1 . Тобто, вона еквівалентна ізотропному випромінювачу з потужністю $P_1 D_1$. Якщо б така антенна була у вільному просторі, то енергія хвилі, що випромінюється нею, розподілялася по поверхні сфери, а оскільки провідна поверхня відтінняє половину сфери, то електромагнітна хвиля (ЕМХ) розподілиться за півсфери.

Отже, Π зменшиться в 2 рази, E також зменшиться, але в $\sqrt{2}$ разів.

$$\Pi = 1,6 \cdot 10^5 \frac{P_1 D_1}{r^2};$$

$$E_g = \frac{245 \sqrt{P_1 D_1}}{r}.$$

Це формула ідеальної радіопередачі.

Для вертикальної антени над ідеально провідною поверхнею формула має вигляд:

$$E_g = \frac{120 \pi h_g I_g}{\lambda r}.$$

Горизонтальний випромінювач над такою поверхнею має інші характеристики:

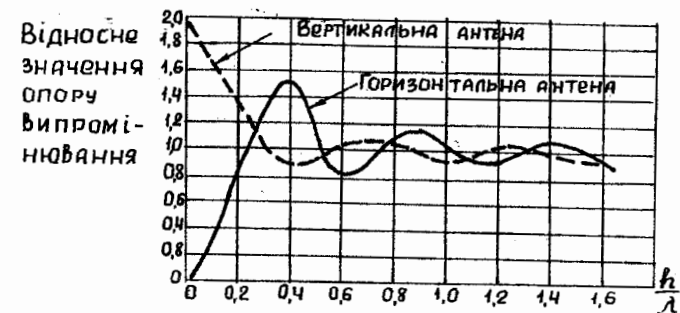


Рис.2.10 – Відносне значення опору випромінювання

Розглянемо реальний випадок, коли Земля плоска і напівпровідна. Постановка задачі:



Рис.2.11 – Постановка задачі

Необхідно визначити значення множника ослаблення F_1 стосовно формули ідеальної радіопередачі.

Якщо відомо F_1 , можна визначити

$$E_g = \frac{245\sqrt{P_1 D_1}}{r} F_1, \text{ - ф-ла Шулейкіна - Ван-дер-Поля}$$

$$F_1 = F_1(x),$$

де x -- "чисельна відстань"

$$x = \frac{r}{s} = \frac{\pi r}{\lambda} \left| \frac{\epsilon_K}{\epsilon_K^2} \right|,$$

де

$$s = |S| = \frac{1}{\pi} \left| \frac{\epsilon_K^2}{\epsilon_K - 1} \right| \text{ - мірило відстаней}$$

Підставивши ϵ_K , одержимо

$$s = \frac{\lambda [\epsilon^2 + 60\lambda\sigma^2]}{\pi \sqrt{\epsilon - 1^2 + 60\lambda\sigma^2}},$$

$$x = \frac{\pi x}{\lambda} \frac{\sqrt{\epsilon - 1^2 + 60\lambda\sigma^2}}{\epsilon^2 + 60\lambda\sigma^2}.$$

Якщо $\epsilon \gg 1$, то $(\epsilon - 1)^2 \approx \epsilon^2$ і тоді

$$s \approx \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\epsilon^2 + 60\lambda\sigma^2}, \quad x \approx \frac{\pi r}{\lambda} \frac{1}{\sqrt{\epsilon^2 + 60\lambda\sigma^2}}.$$

Якщо $60\lambda\sigma \gg \epsilon$ (т.е. $I_{\text{пров}} \gg I_{\text{зе}}$), тоді

$$S \approx \frac{60\lambda^2\sigma}{\pi}, \quad x = \frac{\pi r}{60\lambda^2\sigma} = \frac{100\pi r}{6\lambda^2\sigma}$$

Якщо $60\lambda\sigma \ll \epsilon$ (т.е. $I_{\text{пров}} \ll I_{\text{зе}}$), тоді

$$S \approx \frac{\lambda\epsilon}{\pi}, \text{ м} \quad x = \frac{\pi r}{\lambda\epsilon} = \frac{1000\pi r}{\lambda\epsilon}$$

Бероуз за цих формул склав таблиці і графіки:

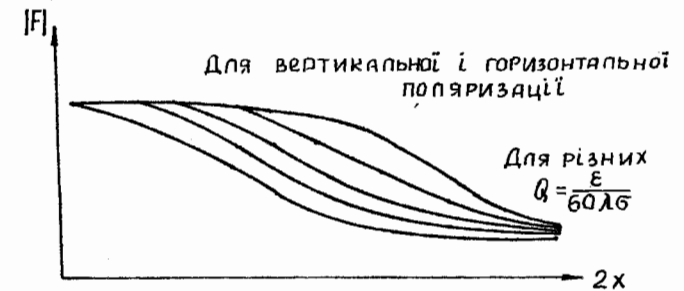


Рис.2.12 – Криві Бероуза

Без них можна значення F_1 обчислити приблизно:

$$F_1 = \frac{2 + 0,3x}{2 + x + 0,6x^2},$$

а якщо $x > 25$, то формула ще більше спрощується

$$F_1 \approx \frac{1}{2x}.$$

В цьому випадку вплив напівпровідної землі позначиться в тому, наприклад, що для вертикального випромінювача, що створює в точці спостереження напруженість вертикальної складової

$$E_{zg} = \frac{120\pi \lg I_g}{\lambda r \sqrt{\epsilon^2 + (60\lambda\sigma)^2}} F_1,$$

з'явиться горизонтальна складова електричного поля з напруженістю

$$E_{xg} = \frac{120\pi \lg I_g}{\lambda r \sqrt{\epsilon^2 + (60\lambda\sigma)^2}} F_1,$$

і ця складова вже на невеликих відстанях від випромінювача є великою.

Аналогічна картина і для горизонтального випромінювача, тільки складові поміняються місцями.

2.8 Неоднорідний ґрунт, берегова рефракція

Загальне рішення отримане в ряді робіт Г.О.Гринберга, В.О.Фока, Є.Л. Фейнберга.

Вважається $[\epsilon] \gg 1$ і застосовуються межові умови Леонтовича.

1 випадок:

РХ частину шляху r проходять над сушею, а частину шляху r_2 – над морем ($\sigma \gg 1$), крім того, якщо $x_{1\eta} \gg 1$, тоді множник ослаблення

$$F = \frac{1}{2x_{1\eta+r_2}} \sqrt{1 + \frac{4}{\pi} x_{1\eta+r_2} \frac{r_2}{\eta}} \dots$$

За ним побудуємо графіки.

2 випадок:

визначається множник ослаблення в загальному випадку, коли обидва ґрунти мають кінцеву провідність, і якщо чисельні відстані для обох ґрунтів великі, то $x_{2\eta} \gg 1$, то

$$F \approx \frac{\sqrt{S_1 S_2}}{2(r_1 + r_2)},$$

де $S_1 = \frac{60\lambda^2\sigma_1}{\pi}$ – масштаб відстані для ґрунту 1 виду,

$S_2 = \frac{60\lambda^2\sigma_2}{\pi}$ – масштаб відстані для ґрунту 2 виду,

або

$$F \approx \frac{1}{2\sqrt{\frac{\eta+r_2}{s_1} \frac{\eta+r_2}{s_2}}}$$

Виразимо S через x

$$F \approx \frac{1}{2\sqrt{x_{1\eta+r_2} x_{2\eta+r_2}}}$$

при $x \gg 1$ $F \approx \frac{1}{2}x$ отже:

$$F \approx \sqrt{F_{1\eta+r_2} F_{2\eta+r_2}}$$

тобто середньому геометричному множників ослаблення, обчислених для однорідних трас довжини $(r_1 + r_2)$ з параметрами 1 і 2 ґрунтів.

Аналогічні розрахунки множника ослаблення були проведені Фейнбергом для трьох послідовних ділянок із різною провідністю, причому крайні були однаковими з однієї довжини (типу море – суша – море і суша – море – суша). Аналіз одержаних результатів показав, що коли до передавача і приймача прилягає суша, то навіть невеличкі ділянки суші викликають різке і значне зменшення множника ослаблення. Різке його ослаблення настає тільки тоді, коли суша впритул підходить до РПП або РПРП.

В тому числі, при поширенні земних хвиль внесене окремою ділянкою ослаблення (поглинання) залежить від місця розташування ділянки на трасі. Найбільше поглинання викликають ділянки, що прилягають безпосередньо до антен РПП і РПРП, тобто поблизу них РХ поширюються в безпосередній близькості від Землі та відчувають поглинальну дію ґрунту. А при видаленні від РПП РХ як би піднімаються над Землею і відчувають менший вплив Землі.

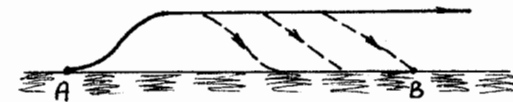


Рис.2.13 – Розповсюдження РХ над неоднорідним ґрунтом

Питання для самоперевірки

- 1 Вплив спрямованості антени на розмір вектора Пойнтинга і напруженість поля в пункті прийому.
- 2 Що таке піднята антена?
- 3 У яких діапазонах хвиль застосовуються підняті антени?
- 4 Еквівалентні параметри ґрунту.
- 5 Вплив близькості поверхні Землі на поле в пункті прийому.
- 6 Залежність множника ослаблення від відстані.
- 7 Залежність множника ослаблення від кута місця.
- 8 Структура радіохвилі в пункті прийому.

3 РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РАДІОХВИЛЬ НАД СФЕРИЧНОЮ ЗЕМЛЕЮ

3.1 Урахування сферичності на межах прямої видимості

При урахуванні розповсюдження земних хвиль при переході від плоскої Землі до сферичної виникає питання, чи знаходяться передавальна і приймальна антени на межах прямої видимості.

Нехай антена А – піднята, а антена С – у землі. Отже, потрібно знайти дальність обрію.

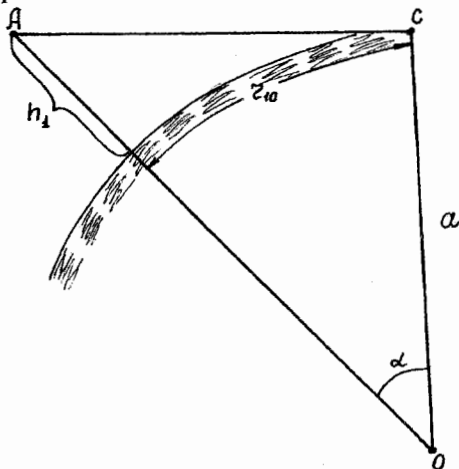


Рис.3.1 – Визначення дальності обрію

Тут $a = 6,37 \cdot 10^6 \text{ м}$. З $\Delta OAC \Rightarrow \cos \alpha = \frac{a}{(a+h_1)} \approx 1 - \frac{h_1}{a}$ через малість h_1 у розкладанні достатньо двох членів і, тому що α дуже малий,

$$\cos \alpha \approx 1 - \frac{\alpha^2}{2},$$

одержимо:

$$\alpha = \frac{r_{10}}{a} = \sqrt{\frac{2h_1}{a}},$$

звідси

$$r_{10} = \sqrt{2ah_1},$$

підставляючи а, одержимо

$$r_{10} = 3,57 \sqrt{h_1}.$$

Якщо обидві антени підняті, то аналогічно попередньому випадку, одержимо:

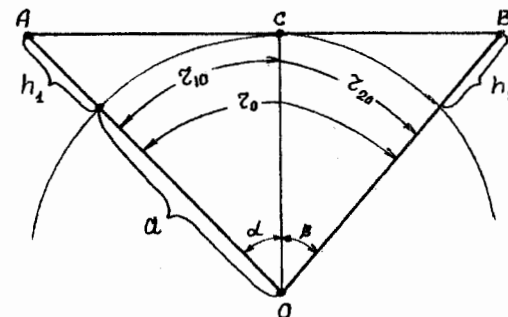


Рис.3.2 – Дальність прямої видимості при піднятих антенах

$$r_0 = r_{10} + r_{20} = \sqrt{2a} \sqrt{h_1} + \sqrt{h_2},$$

$$r_0 = 3,57 \sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}.$$

3.2 Урахування кривизни Землі при користуванні інтерференційними формулами

В цьому випадку розглядається варіант РРХ, коли довжина лінії зв'язку менше відстані прямої видимості. Кривизна Землі подвійним чином впливає на процес РРХ в межах прямої видимості:

– при заданих значеннях висот передавальної і приймальної антен абсолютне значення різності ходу між прямим і відбитим від Землі променями відрізняється від різності ходу, що розраховується за формулою для плоскої Землі,

– внаслідок того, що хвилі у розглянутому випадку відбиваються не від плоскої, а від опуклої напівпровідної поверхні, процес відбиття супроводжується розсіюванням енергії, що призводить до ослаблення відбитої хвилі.

Урахування кривизни Землі при користуванні інтерференційними формулами зводиться до знаходження приведених висот h_1' і h_2' за відомими значеннями r , h_1 , h_2 .

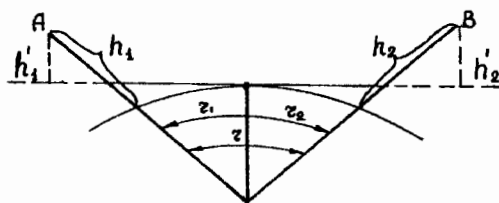


Рис.3.3 – Приведені висоти

В кінцевому вигляді

$$h_1' = h_1 - \frac{r_1^2}{12,8}$$

$$h_2' = h_2 - \frac{r_2^2}{12,8}$$

При практичних розрахунках за допомогою інтерференційних формул, в які входять різниця ходу променів Δr , коефіцієнт відбиття R і кут втрати фази Θ при відбитті, слід пам'ятати, що в виразах для Δr і кута ковзання γ геометричні висоти h_1 і h_2 слід замінювати приведеними:

$$\gamma \approx \frac{h_1' + h_2'}{r},$$

$$\Delta r \approx \frac{2h_1' h_2'}{r}.$$

Щодо кривизни Землі, то цей вплив дуже малий і при інженерних розрахунках може не братися до уваги.

Добуток висот $h_1' \cdot h_2'$ визначається за спеціальними графіками.

3.3 Область застосовності інтерференційних формул

Для відстаней $r \rightarrow r_0$ інтерференційні формули незастосовні, оскільки множник ослаблення дорівнює 0. Однак цього бути не може, оскільки з досвіду відомо, що поле земної хвилі існує не тільки на межі прямої видимості, але і на значно більших відстанях. Дійсно, пряма і відбита хвилі на відстані прямої видимості зливаються в загальний потік енергії і для визначення результуючого поля необхідно перейти від грубих методів геометричної оптики до більш точних електродинамічних методів дослідження. Поле на межі прямої видимості, а також на менших відстанях повинно визначатися за дифракційними формулами. При грубих розрахунках прийнято вважати, що інтерференційними формулами можна користуватись до відстаней $r \leq 0,7r_0$ або майже до $r \leq 0,8r_0$.

3.4 РРХ над однорідною гладкою сферичною поверхнею Землі

При визначенні засобу, яким слід враховувати вплив кривизни Землі на процеси РРХ при піднятих антенах, прийнято розбивати трасу лінії радіозв'язку на 3 ділянки:

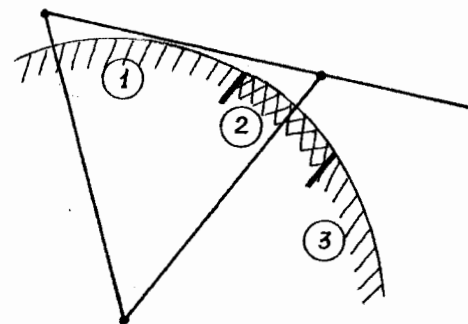


Рис.3.4 – Ділянки РРХ

1 – зона освітленості, 2 – зона півтіні, 3 – зона тіні

В зоні освітленості антени знаходяться в умовах прямої видимості, в зоні тіні – поза межами видимості. Зона півтіні розділяє дві основних зони і її межі знаходяться в межах $0,8r_0 \dots 1,2r_0$.

В зоні освітленості застосовані інтерференційні формули.

В області тіні поле можна розрахувати за найбільш простими, так називаними одночленними дифракційними формулами Фока:

$$F = 2\sqrt{\pi x} \left(\frac{e^{j\pi t_1}}{t_1 + q^2} \right) \left| \frac{h_2(t_1 + y_1)}{h_2(t_1)} \right| \left| \frac{h_2(t_1 + y_2)}{h_2(t_1)} \right|,$$

де $x = \frac{r}{L}$ – відносна відстань;

$y_1 = \frac{h_1}{H}$, $y_2 = \frac{h_2}{H}$ – відносні висоти антен;

L – масштаб відстаней;

H – масштаб висот;

q – параметр, що враховує властивості напівпровідної поверхні;

$h_2(t)$ – функція Ері;

$H_{1/3}^{(2)}$ – функція Ханкеля другого роду порядку 1/3.

Якщо обидві антени знаходяться на рівні Землі, що характерно для ДХ, СХ і КХ, то висотні множники дорівнюють 1 і формула спрощується:

$$|F| = 2\sqrt{\pi x} \left| \frac{e^{j\pi t_1}}{t_1 + q^2} \right|.$$

3.5 РРХ над неоднорідною сферичною поверхнею Землі

Калінін Ю.К. і Фейнберг Є.Л. встановили:

– вплив "злітної" і "посадкової" площадок виражено не так різко, як при розповсюдженні над плоскою поверхнею;

– поглинання і зсув фази на проміжних ділянках розповсюдження накопичуються майже адитивно і переносяться в точку прийому.

Таким чином, у випадку плоскої поверхні енергія радіохвилі в основному розповсюджувалася на деякій висоті над поверхнею Землі, зазнаючи помітне поглинання тільки в межах "злітної" і "посадкової" площадок, а при урахуванні кривизни Землі процес розповсюдження можна розглядати як ковзання радіохвилі уздовж поверхні Землі. Кінцеві ділянки траси відіграють важливу роль у процесі розповсюдження, проте не настільки виріпальну, як у випадку плоскої Землі.

Питання для самоперевірки

- 1 Як змінюється діаграма спрямованості випромінювача, розмішеного поблизу поверхні Землі?
- 2 Зміни складового поля в повітрі і під землею.
- 3 Еліпс поляризації.
- 4 Поле антени, розташованої безпосередньо на поверхні Землі.
- 5 Урахування сферичності Землі при РРХ в межах прямої видимості.
- 6 Поширення РХ над сферичною Землею.
- 7 Поширення РХ над неоднорідним ґрунтом.

4 РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ТРОПОСФЕРНИХ ХВИЛЬ

4.1 Склад і будова атмосфери

Атмосферу Землі поділяють на три шари – тропосферу, стратосферу та іоносферу (рис.4.1).

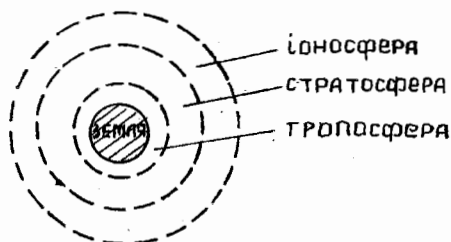


Рис.4.1 – Шари атмосфери

Тропосфера – нижній шар атмосфери висотою до 10-12 км над середніми широтами (над полюсами нижче, над екватором вище).

Стратосфера – середній шар висотою до 60 км.

Ці два шари складаються з молекулярного азоту (78%), молекулярного кисню, водню, вуглекислого газу та інших домішок. Але в тропосфері значно більше парів води, а в стратосфері більше кількість озону. Це визначає особливості їх нагріву, тропосфера нагрівається від поверхні землі і тому температура її з висотою зменшується. Нагрівання стратосфери пояснюється головним чином поглинанням ультрафіолетових променів озоном, тому температура в ній із ростом висоти збільшується, а потім знову падає (до 50 км зростає концентрація озону, а потім знову падає).

Іоносфера – верхній шар атмосфери, має протяжність до 5 земних радіусів. Газу в прошарку іонізовані, велика кількість електронів і іонів. Температура іоносфери зростає з висотою, досягаючи (2000-3000) К на висоті 500-600 км.

Тропосфера і стратосфера утворюють нейтросферу. Тому закономірності РРХ в них, в основному, однакові. Але в тропосфері метеорологічні зміни значно більш інтенсивні, тому процес РРХ тут більш складний. Це дозволяє дослідження РРХ в неіонізованій частині атмосфери обмежити розглядом процесів у тропосфері.

4.2 Електричні параметри тропосфери, коефіцієнт заломлення тропосфери

Характер РРХ у тропосфері визначається її станом. Стан тропосфери визначається її фізичними характеристиками – температурою, тиском, вологістю, які змінюються зі зміною погоди.

Для з'ясування впливів метеоумов на РРХ встановимо зв'язок між метеорологічними параметрами тропосфери і її електричними параметрами.

Електричними параметрами тропосфери є: питома провідність σ , відносні магнітна проникність μ і діелектрична проникність ϵ .

Роздивимося вплив кожного з цих параметрів на РРХ.

Провідність газів тропосфери у всіх діапазонах, за винятком міліметрового, практично дорівнює нулю.

Абсолютна магнітна проникність у всій атмосфері

$$\mu_a = \mu_0, \text{ тобто } \mu = 1$$

Діелектрична проникність змінюється з висотою. Вона залежить від температури, вологості і тиску і з висотою зменшується.

При проходженні електромагнітних хвиль (ЕМХ) крізь газу, під впливом змінного електричного поля (ЕП) відбувається їх поляризація, що характеризується вектором поляризації.

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E}$$

де $\chi = \epsilon - 1$ – електрична сприйнятливості речовини. Вона кількісно характеризує взаємодію двох форм матерії – речовини і електромагнітне поле (ЕМП).

Відповідно до молекулярної теорії речовини, якщо молекули не мають постійного дипольного моменту, то

$$\chi = \frac{A \cdot P}{T^0},$$

а якщо молекули мають постійні дипольні моменти, то

$$\chi = \frac{B \cdot P}{T^0},$$

де P – тиск,

T^0 – абсолютна температура,

$A = 155,2 \cdot 10^{-6}$ і $B = 7,4 \cdot 10^{-4}$ – визначені постійні коефіцієнти.

Молекули всіх газів тропосфери, крім парів води, не мають постійного дипольного моменту, а пари води мають його.

Сприйнятливість суміші газів дорівнює сумі сприйнятливостей окремих газів. Тому

$$\chi = \varepsilon - 1 = \frac{AP}{T^0} + \frac{Bl}{T^0},$$

де l – тиск водяної пари в мілібарах.

Очевидно, що діелектрична проникність залежить від температури, тиску, вологості (від неї залежить тиск водяних парів), а вони змінюються в часі і від точки до точки, тобто тропосфера – середовище неоднорідне.

Якщо $n = \sqrt{\varepsilon}$, тоді

$$\varepsilon - 1 = n^2 - 1 = (n-1)(n+1) \approx 2(n-1).$$

Використовуючи ці вирази, можна одержати

$$n = 1 + \frac{79 \cdot 10^{-6}}{T^0} \left(P + \frac{4810l}{T^0} \right).$$

Звідси, коефіцієнт заломлення в тропосфері – функція метеоумов.

4.3 Явище атмосферної рефракції

Розіб'ємо умовно тропосферу на шари. Вважаємо в межах кожного прошарку $\varepsilon = \text{const}$. Звичайно з висотою ε зменшується.

$$\varepsilon_1 > \varepsilon_2 > \varepsilon_3.$$

За законом заломлення

$$\frac{\sin \varphi_2}{\sin \varphi_1} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_2}} = \frac{n_1}{n_2}.$$

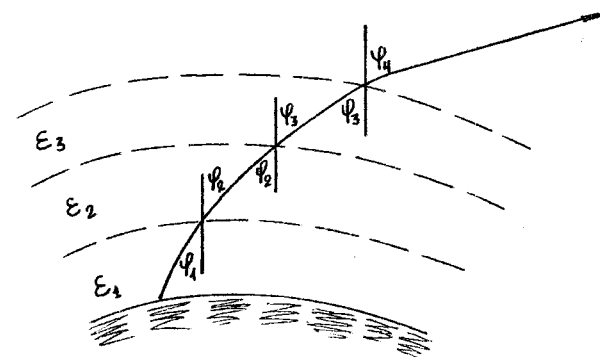


Рис.4.2 – Хід променя в тропосфері

Тому $\varphi_1 < \varphi_2 < \varphi_3 \dots$ і промінь іде по ламаній лінії. Але реально шарів немає; тиск, температура і вологість змінюються плавно, через що плавно змінюється і n . Тому траєкторія променя – плавна крива.

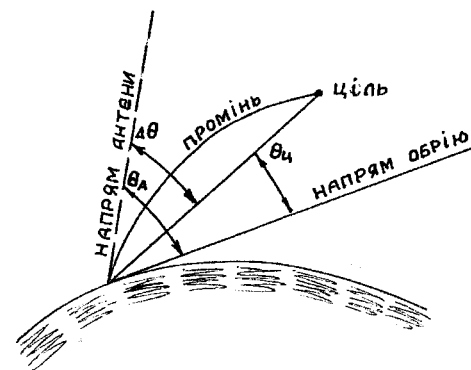


Рис.4.3 – Хід променя в реальній тропосфері

Викривлення променя і є явищем тропосферної рефракції.

Рефракція створює помилку у визначенні кута місця цілі, а отже і у визначенні висоти цілі. Її треба враховувати. Рефракція впливає і на дальність дії РЛС.

4.4 Види рефракції, надрефракція

Ступінь викривлення траєкторії радіохвилі в тропосфері характеризують радіусом кривизни променя.

$$R = -\frac{1}{\frac{dn}{dh}}$$

де $\frac{dn}{dh}$ — градієнт коефіцієнта заломлення по висоті.

Види рефракції класифікуються в залежності від градієнта n по висоті.

а) Позитивна рефракція

Коефіцієнт заломлення зменшується з висотою. Фазова швидкість хвилі $v_{\phi} = \frac{c}{n}$ із зростанням h збільшується, верхня межа фронту хвилі рухається швидше за нижню, траєкторія наближається до землі, радіус кривизни позитивний (траєкторія обернена опуклістю нагору), рефракція називається позитивною.

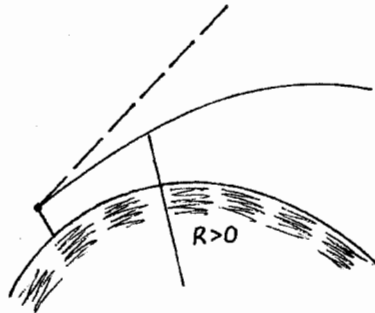


Рис.4.4 – Позитивна рефракція

Чим більше градієнт, тим більше викривлення променя.

Три часткових випадка:

1 Нормальна рефракція

$$\frac{dn}{dh} = -4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}$$

виникає при нормальному стані тропосфери, тобто коли T^0 та l убувають із висотою за лінійним законом:

В цьому випадку радіус кривизни променя

$$R = \frac{10^8}{4} = 25000 \text{ км} \approx 4R_3.$$

2 Критична рефракція

$$\frac{dn}{dh} = -\frac{1}{R_3} = -1,57 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1}.$$

Кривизна променя дорівнює кривизні земної поверхні. Дальність дії РЛС могла б бути необмеженою.

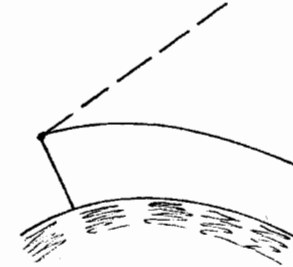


Рис.4.5 – Критична рефракція

3 Надрефракція

$$\frac{dn}{dh} < -1,57 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1}.$$

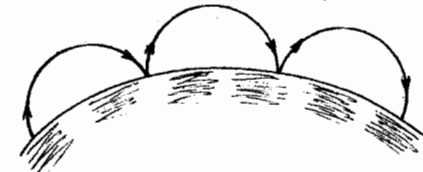


Рис.4.6 – Надрефракція

Кривизна променя більше кривизни Землі. Промінь після повного внутрішнього відбиття в тропосфері повертається на Землю, може відбитися від неї і т.д. Виникає "атмосферний хвилевід" – утворюється наддалеке РРХ на багато сотень кілометрів. Можливо утворення такого "атмосферного хвилеводу" і вище земної поверхні. Це явище нерегулярне, тому його не можна використовувати. Воно створює перешкоди за рахунок різкого збільшення поля від далеких станцій.

Надrefракція виникає при температурній інверсії, коли розташовані вище шари повітря тепліші за нижні. Вона спостерігається в прибережних районах, тому що тут влітку в ранкові часи нижні прошарки повітря більш охолоджені і насичені вологою, чим верхні.

Надrefракція пояснює таке явище як міражі. В основі міражів реальна місцевість, предмети, що знаходяться дуже далеко від спостерігача; їх зображення передається далеко завдяки особливим умовам в атмосфері. Таким чином, міражі – це не гра надприродних сил, а явище цілком закономірне, що виявляється в матеріальному середовищі – повітрі. На Венері надrefракція спостерігається завжди, тому що там тиск дуже швидко падає з висотою.

б) Негативна refракція

$$\frac{dn}{dn} > 0.$$

n збільшується з висотою, траєкторія обернена опуклістю вниз (радіус кривизни спрямований вниз)

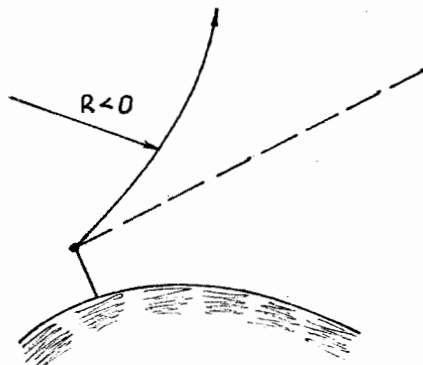


Рис.4.7 – Негативна refракція

4.5 Вплив refракції на дальність прямої видимості і поправку у висоту, еквівалентний радіус Землі

Вплив refракції на дальність прямої видимості (ДПВ) враховують методом еквівалентного радіуса Землі.

Ідея – замінити криволінійну траєкторію променя деякою розрахунковою, але прямолінійною. Це дозволить використовувати для розрахунку поля ті ж формули, що і без врахування refракції. Вплив же refракції будемо вважати розрахунковим, еквівалентним радіусом Землі.

При цьому вважаємо, що "випрямлений" промінь проходить над еквівалентною землею кулею на тій же висоті, що і криволінійний промінь над реальною землею поверхнею.

В цьому випадку різниця кривизна не повинна змінитися:

$$\frac{1}{R_3} = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{\infty}.$$

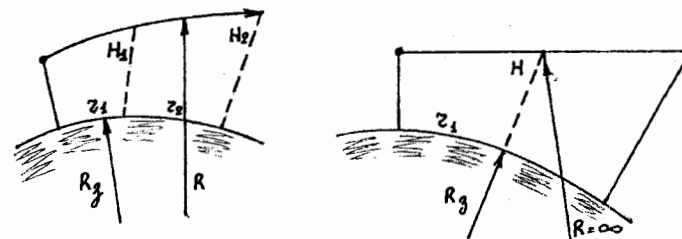


Рис.4.8 – Еквівалентний радіус Землі

Звідси

$$R_E = \frac{R R_3}{R - R_3} = \frac{R_3}{R - R_3}.$$

Для нормальної refракції

$$\frac{1}{R} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ км}^{-1}$$

$$R_3 = 6370 \text{ км.}$$

Тоді $R_E = 8500$ км.

Замінивши у формулі для ДПВ R_3 на R_E , одержимо

$$R_E = 4,12 \sqrt{h} + \sqrt{H} \dots$$

Врахування поправки у висоту:

замінивши у формулі $\Delta H R_3$ на R_E , одержимо

$$\Delta H = \frac{r^2}{2R_E} = \frac{r^2}{17}.$$

4.6 Ослаблення (загасання) радіохвиль у тропосфері

РХ в атмосфері ослабляється через поглинання і розсіювання. Це відбувається в газах атмосфери і гідрометеорах.

Поглинання буває резонансне і нерезонансне.

1 Резонансне (рис.4.9) відбувається в газах атмосфери, в молекулах кисню та у водяному парі. Молекули кисню мають електричний момент, молекули води – магнітний. ЕМХ викликає коливання цих молекул, витрачаючи роботу, її енергія зменшується.

В кисні велике поглинання спостерігається на $\lambda=0,25$ см і $0,5$ см в парах води $\lambda=1,25$ см.

2 Нерезонансне поглинання відбувається у всіх гідрометеорах, особливо в дощі. Ступінь поглинання залежить від інтенсивності дощу (рис.4.9).

Розсіювання.

Хвиля викликає повторне випромінювання частинок, напрямок якого не збігається з наявним. В основному, розсіювання відбувається на гідрометеорах; на молекулах повітря воно слабке, ним нехтують. В гідрометеорах великий коефіцієнт заломлення, а у повітря він малий ($=1$).

Поглинання і розсіювання розділити важко, тому їх враховують разом.

Загасання враховують за допомогою коефіцієнта загасання α , який визначають за графіками в довідниках, виходячи з умов (рис.4.9) $w=\alpha L$.

Загасають хвилі всіх діапазонів, але практично загасання варто враховувати для хвиль з довжиною хвилі $\lambda \leq 10$.

ПОГЛИНАННЯ + РОЗСІЮВАННЯ = ЗАГАСАННЯ.

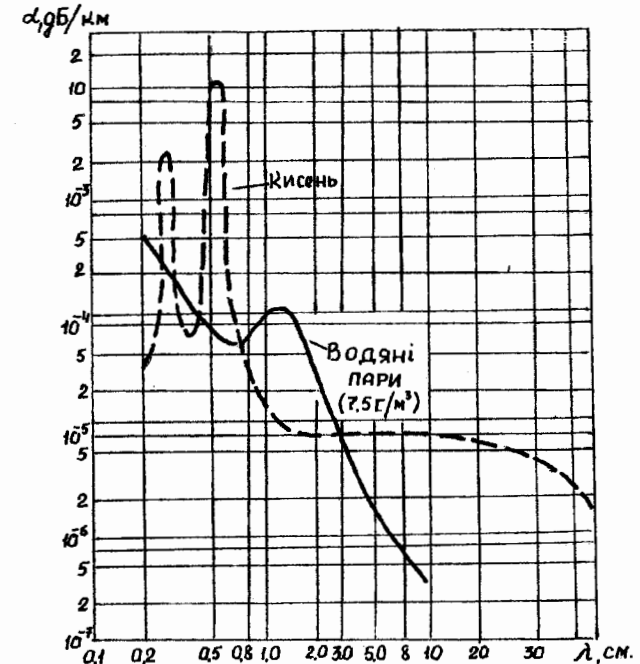


Рис.4.9 – Ослаблення радіохвиль

4.7 Флюктуаційні процеси в тропосфері, завмирання, дальнє тропосферне розповсюдження (ДТР), вплив сезонних, кліматичних і метеорологічних умов

Численні спостереження показують, що напруженість поля на відстані 100-1000 км від передавача (в області тіні) більше значень, обумовлених дифракційною теорією. Одна з причин цього явища – надрефракція. Але надрефракція явище рідкісне і нерегулярне.

Основною причиною регулярного високого рівня поля УКХ далеко за обрієм є розсіювання РХ на неоднорідностях атмосфери.

Це явище називають дальнім тропосферним розсіюванням радіохвиль (ДТР).

Рівень поля ДТР може перевищувати рівень дифракційного поля в 10^4 разів.

Наявність ДТР в УКХ-діапазоні на відстанях, набагато більших за ДПВ, дозволяє використовувати це явище для радіозв'язку в УКХ-діапазоні на великій відстані.

Основна причина ДТР – турбулентні неоднорідності тропосфери. Вони виникають і зникають в результаті упорядкованого вихрового (турбулентного) руху повітряних мас. Основні закономірності такого руху були розроблені вченими Колмогоровим і Обушовим у 1941 р.

Через турбулентний рух повітря діелектрична проникність тропосфери є стає неоднорідною, неоднорідності тропосфери мають розміри від міліметрів до десятків метрів. Ці розміри порівнянні з довжиною хвилі λ для УКВ-діапазону. Тому розсіювання спостерігається саме в УКХ-діапазоні. ДТР спостерігається на метрових, дециметрових, сантиметрових і міліметрових хвилях.

Експерименти показали, що найбільший рівень сигналу при ДТР на дециметрових хвилях.

При ДТР максимуми ДН передавальних та приймальних антен спрямовують на лінію обрію (рис.4.10).

При ДТР спостерігають замирання сигналу до 20 дБ. Вони бувають швидкі з періодом (0,1-10)с і повільні з періодом від 10 хв до декількох годин.

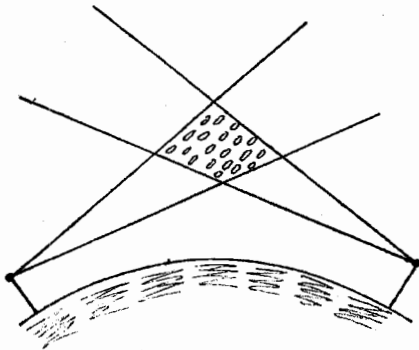


Рис.4.10 – Дальнє тропосферне розповсюдження

Причина швидких замирань – інтерференція хвиль, що приходять і різних точок розсіюючого об'єму. Причини повільних замирань – повільні зміни погоди.

Для боротьби зі швидкими замираннями застосовують декілька рознесених антен або багатопроменеві антени.

Через інтерференцію багатьох променів, що приходять розсіюючого об'єму, при ДТР відбувається викривлення сигналу.

Переваги ДТР ліній:

- значно менше рівень взаємних перешкод;
- не впливають атмосферні перешкоди;
- велика скритність переговорів (утруднене прослуховування).

Питання для самоперевірки

- 1 Висота тропосфери і визначальні чинники.
- 2 Розподіл тиску, температури і вологості за висотами тропосфери.
- 3 Нормальна тропосфера і її властивості.
- 4 Нормальна рефракція.
- 5 Критична рефракція.
- 6 Надрефракція.
- 7 Негативна рефракція.
- 8 Вплив рефракції на дальність прямої видимості.
- 9 Вплив рефракції на поправку у висоту.

5 РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ІОНОСФЕРНИХ ХВИЛЬ

5.1 Склад і будова верхніх шарів атмосфери, механізм і джерела іонізації

Іоносфера істотно впливає на РРХ всіх діапазонів. Але на поширення хвиль різних діапазонів вона впливає по-різному. Завдяки іоносфері, радіохвилі поширюються навколо Землі на дуже великі відстані, навіть при малих потужностях передавачів. Припущення про вплив верхньої частини атмосфери на РРХ вперше було висловлено в 1902 р. після здійснення трансатлантичного радіозв'язку. Майже одночасно Кеннелі (США) і Хевісайд (Англія) припустили, що у верхніх шарах атмосфери є позитивні і негативні іони. Ці іони утворюють провідний шар – іоносферу, від якої і відбиваються радіохвилі.

Іоносфера – верхня частина земної атмосфери від висот 60 км до декількох радіусів Землі (20000-25000 км). Верхня межа встановлена, порівняно, нещодавно за допомогою ШСЗ, до цього вважалося, що вона складає 500-600 км.

Основні особливості іоносфери такі:

1 Ионосфера має шарувату будову речовини, тому що на висотах більше 90 км немає сильних вертикальних і горизонтальних потоків, немає перемішування. Гази (в основному азот і кисень) можуть знаходитися в молекулярному і атомарному стані.

2 В іоносфері існує високий ступінь концентрації вільних електронів і іонів. Речовина іоносфери знаходиться в четвертому, плазменому стані. Ступінь іонізації характеризується електронною концентрацією N_e , що показує число вільних електронів в одиниці об'єму.

3 Є декілька максимумів N_e на різних висотах, що називаються прошарками іоносфери і позначаються буквами D, E, F₁, F₂. Зі збільшенням висоти N_e в шарах збільшується.

Іонізація газів іоносфери відбувається за допомогою електромагнітних випромінювань і за допомогою частинок, що рухаються.

Природними джерелами іонізації іоносфери є:

1 Рентгенівське і жорстке ультрафіолетове випромінювання Сонця. Це основне джерело іонізації.

2 Корпускулярне випромінювання Сонця. Його дія приблизно в 2 рази менше дії першого джерела.

3 Випромінювання зірок. Його дія складає 10^{-4} від дії першого чинника.

4 Космічні промені високої енергії. Їх дія складає 10^{-8} від дії ультрафіолетових променів Сонця.

5 Метеорна речовина, попадаючи в атмосферу, розігрівається та іонізує газ.

Стан іоносфери безупинно змінюється – періодично і випадково. Періодичні зміни – добові, сезонні, 11-річні і 100-річні. 11-річні і 100-річні зміни пов'язані з періодичністю сонячної активності. Добові зміни пов'язані з тим, що з настанням темноти електронна концентрація N_e в прошарках E і F₂ поступово зменшується, а в прошарках D і F₁ дуже швидко відбувається повна деіонізація.

Випадкові зміни N_e відбуваються через сонячні спалахи, збудження магнітного поля Землі, вторгнення в атмосферу метеорних потоків.

5.2 Простий прошарок і структура реальної іоносфери

Припустимо, що атмосфера однорідна за складом. Інтенсивність всіх іонізуючих чинників із проникненням всередину атмосфери, зменшується (крива I_n на рис.5.1), тому що їх енергія витрачається на іонізацію молекул газу. Спочатку їх енергія велика, але на великих висотах щільність газів (крива ρ) мала. Тому електронна концентрація N_e мала. Нижче щільність газів збільшується, енергія іонізуючих чинників ще достатньо велика, тому N_e зростає. Але потім, хоча щільність газів із зменшенням висоти зростає, інтенсивність іонізуючих чинників послаблена і N_e зменшується.

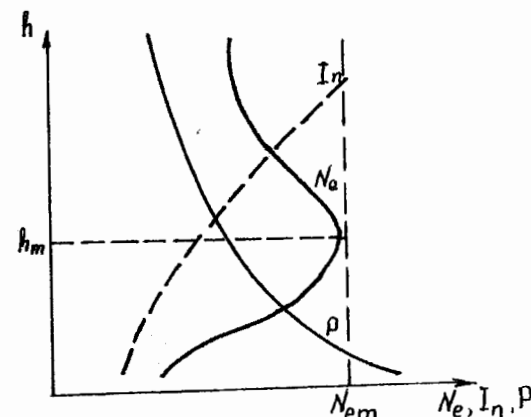


Рис.5.1 – Структура іоносфери

Таким чином, в однорідній за складом атмосфері концентрація електронів N_e в залежності від висоти має яскраво виражений максимум. Такий розподіл по висоті називається "простим шаром".

В дійсності до складу атмосфери входить ряд газів. Під дією різноманітних іонізуючих чинників, що мають різну проникаючу спроможність, утворюється ряд більш-менш помітних максимумів N_e , тобто ряд іонізованих шарів.

5.3 Електричні параметри іоносфери, фазова і групова швидкості радіохвиль в іоносфері

Наявність великого числа вільних електронів впливає на властивості іоносфери. Вирази, що описують відносну діелектричну проникність, коефіцієнт заломлення і провідність іоносфери, відповідно мають вигляд:

$$\varepsilon_v = 1 - 80,8 \frac{N_e}{f^2}$$

$$n_u = \sqrt{1 - 80,8 \frac{N_e}{f^2}}$$

$$\sigma_u = 7 \cdot 10^{-10} \frac{N_e v}{f^2},$$

де v – число зіткнень електронів із молекулами в одну секунду.

Видно, що ε_v , n_u і σ_u – функції частоти і електронної концентрації.

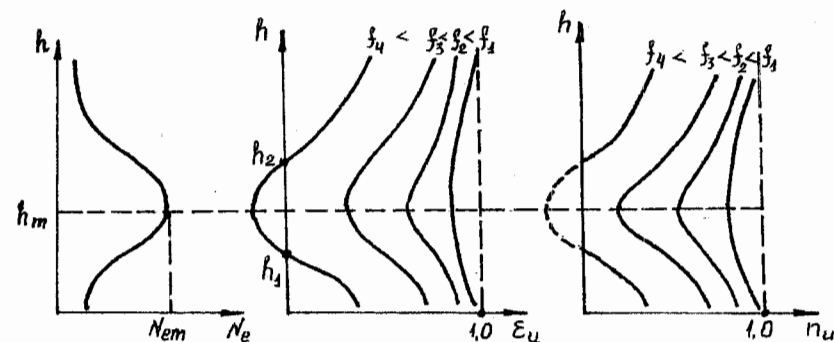


Рис. 5.2 – Залежність характеристик іоносфери від електронної концентрації і частоти

З формул і графіків можна зробити такі висновки:

1 Внаслідок залежності N_e від висоти, ε_u , n_u і σ_u змінюються з висотою, тобто іоносфера – електрично неоднорідне середовище.

2 Зі збільшенням частоти неоднорідність іоносфери виявляється меншою мірою.

3 Фазова і групова швидкості – функції коефіцієнта заломлення:

$$v_\phi = \frac{c}{n}; v_{gr} = cn.$$

Але в іоносфері n залежить від f . Отже, в іоносфері v_ϕ і v_{gr} залежать від частоти, тобто іоносфера – диспергуюче середовище: із зростанням частоти v_ϕ зменшується (нормальна дисперсія). Дисперсія призводить до викривлення форми сигналу. Ці викривлення тим сильніше, чим сильніше виражена дисперсія, чим ширше спектр сигналу і більше довжина шляху, який проходить хвиля в іоносфері. Викривлення форми сигналу впливає на точність визначення дальності. В діапазоні сантиметрових і дециметрових хвиль викривлення сигналів малі, тому що $f \gg 80,8 N_e$.

4 З виразу для σ очевидно, що зі збільшенням f і зменшенням v (тобто зі зменшенням щільності атмосфери) провідність, а отже і загасання, внесені іоносферою, зменшуються. Виходить, більш короткі хвилі проходять іоносферу з меншим поглинанням.

5.4 Заломлення і відбиття радіохвиль в іоносфері

Іоносфера – середовище неоднорідне. Це призводить до розповсюдження радіохвиль за криволінійними траєкторіями. За певних умов радіохвилі можуть відбитися іоносферою на землю.

Знайдемо умови, при котрих це відбувається.

Розглянемо випадок сферично шаруватого середовища.

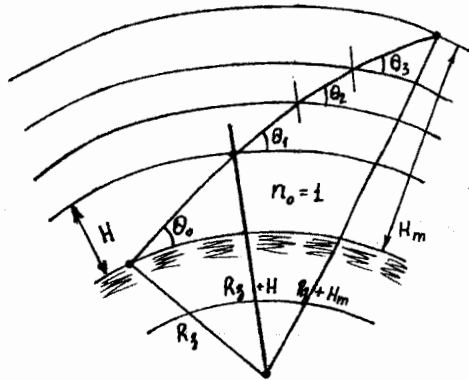


Рис.5.3 – Сферично шарувата іоносфера

Показник заломлення n_i залишається постійним в межах кожного прошарку і змінюється при переході від прошарку до прошарку. Нехай $n_1 > n_2 > n_3 \dots > n_m$.

На іоносферу падає промінь, кут висоти якого при $h=0$ дорівнює θ_0 . Переходячи з прошарку в прошарок по мірі зростання h , промінь заломлюється, а кут θ зменшується. При деякій висоті h_m кут θ_m може дорівнювати нулю, відбудеться повне внутрішнє відбиття. Для знаходження умов відбиття променя від іоносфери використовуємо метод променевої оптики.

Рівняння променя в сферично шаруватому середовищі має вигляд:

$$n_0 R_3 \cos \theta_0 = n_1 r_1 \cos \theta_1 = \dots = n_m r_m \cos \theta_m$$

Нехай повне внутрішнє відбиття відбувається в m -ном прошарку. В цьому випадку кут повного внутрішнього відбиття дорівнює 90° , а кут $\theta_m = 0$.

Тоді $\cos \theta_m = 1$.

Зазначимо $n_m = n_u$; $h_m = H$; $r_m = R_3 + H$

Візьмемо $n_0 = 1$.

Тоді отримаємо

$$R_3 \cos \theta_0 = n_u (R_3 + H).$$

Поділимо на R_3 і використаємо рівняння.

Тоді

$$\cos \theta_0 = \left(1 + \frac{H}{R_3} \right) \sqrt{1 - 80,8 \frac{N_e}{f^2}}.$$

Це – умова відбиття радіохвиль від іоносфери. Вона зв'язує між собою кут висоти θ_0 , частоту f , висоту прошарку H , від якого відбувається відбиття, і концентрацію електронів на цій висоті $N_e(H)$.

Проведемо аналіз. Зі зростанням θ_0 значення $\cos \theta_0$ зменшується. Для зберігання рівності повинна зменшуватися права частина. Перший співмножник правої частини впливає слабо, тому що H змінюється в порівнянні з R_3 мало. Основні впливи робить другий співмножник. Щоб він зменшувався, необхідні зростання другої складової, тобто при $f = \text{const}$ повинна зростати N_e . А це можливо, якщо зростає висота відбиваючого прошарку, тому що N_e зростає з висотою до $N_{\text{стат.}}$. Якщо ж значення $N_{\text{стат.}}$ буде недостатньо для задоволення рівності, то хвиля не відіб'ється від іоносфери.

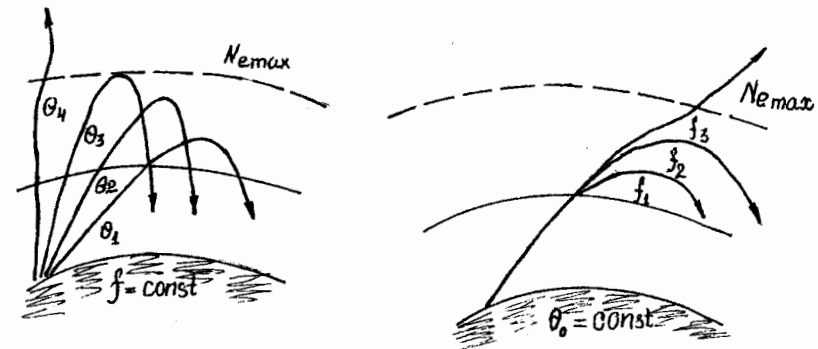


Рис.5.4 – Умови відбиття РХ від іоносфери

З ростом кута θ_0 , висота шару H за інших рівних умов збільшується. Щоб рівність не порушилася з ростом частоти f , друга складова під коренем повинна залишатися постійною. Для цього із зростанням f повинна зростати електронна концентрація N_e , тобто відбиття хвилі повинне відбуватися від більш високого шару. Так відбувається доти,

поки не буде досягнутий прошарок з $N_{\text{стакт.}}$. При достатньо високих частотах $N_{\text{стакт.}}$ вже недостатньо для того, щоб другий доданок під коренем залишився постійним. Тоді рівність порушується, а хвиля проходить крізь іоносферу.

Зі збільшенням частоти при постійному куті θ РХ відбивається від все більш високих прошарків. При достатньо високих частотах РХ не відбивається, а іде за межі іоносфери.

Знайдемо частоти, при яких відбувається відбиття

$$f_{\text{отр}} \leq \sqrt{\frac{80,8N_e}{1 - \cos^2 \theta + H/R_3}}$$

При $f > f_{\text{отр}}$ хвилі проходять крізь іоносферу, не відбиваючись від неї.

Розглянемо два окремих випадки.

Нехай

1 $\theta = 90^\circ$, тобто промінь падає на іоносферу вертикально. Це найгірші умови для відбиття. Тоді найбільша частота, при якій ще можливе відбиття

$$f = \sqrt{80,8N_e} = f_{\text{кр}}$$

Це критична частота, тобто, та максимальна частота, при якій ще відбувається відбиття вертикального променя від даної області іоносфери.

Очевидно, що $f_{\text{кр}}$ залежить від N_e . В кожному прошарку своє значення N_e , тому і своє значення $f_{\text{кр}}$:

$$f_{\text{крD}} = 0,1 \div 0,7 \text{ МГц}$$

$$f_{\text{крE}} = 3 \div 4 \text{ МГц}$$

$$f_{\text{крF}_1} = 5 \div 6 \text{ МГц}$$

$$f_{\text{крF}_2} = \begin{cases} 9 \text{ МГц влітку} \\ 12 \text{ МГц взимку} \end{cases}$$

Найбільша $f_{\text{кр}}(f_{\text{крF}_2})$ – критична частота всієї іоносфери $f_{\text{крп}}$. В залежності від стану Сонця, пори року, доби N_e і $f_{\text{крп}}$ помітно змінюються.

2 $\theta_0 = 0$. Від іоносфери в цьому випадку відбиваються хвилі більш високої частоти. Частота, при якій промінь, дотичний до землі, ще може відбитися від іоносфери із заданим значенням N_e , називається максимальною.

$$f_{\text{макс}} = \frac{\sqrt{80,8N_e}}{\sqrt{1 - 1/\left(1 + \frac{H}{R_3}\right)^2}} \approx f_{\text{кр}} \sqrt{\frac{R_3}{2H}}$$

Висота прошарку з максимальною N_e – $H = (350 \div 450)$ км. Тоді $f_{\text{макс}} = (3 \div 4)f_{\text{кр}}$. Весь спектр радіочастот можна розділити на три діапазони (рис.5.5):

$f < f_{\text{кр}}$ Радіохвилі завжди відбиваються від іоносфери	$f_{\text{кр}} < f < f_{\text{макс}}$ радіохвилі відбиваються при малих θ , при великих θ не відбиваються	$f > f_{\text{макс}}$ радіохвилі від іоносфери не відбиваються
--	---	--

Рис.5.5 – Частоти відбиття РХ від іоносфери

Таким чином:

1 $f_{\text{крп}} \leq (9 \div 12)$, що відповідає $\lambda_{\text{кр}} \geq (25 \div 33)$. Отже, РХ із $\lambda > (25 \div 33)$ м не проходять через іоносферу ні при яких умовах (завжди відбиваються).

2 $f_{\text{макс}} \geq (37 \div 43)$, тобто $\lambda_{\text{мін}} (7 \div 8)$ м. Отже РХ із $\lambda_{\text{мін}} (7 \div 8)$ м від іоносфери не відбиваються і проходять у космічний простір.

3 Хвилі довжиною $(7 \div 8)$ м $(\lambda < (25 \div 33)$ м) або відбиваються, або не відбиваються від іоносфери в залежності від кута θ_0 .

Питання для самоперевірки

- 1 Яка частина земної атмосфери належить до іоносфери?
- 2 Що розуміється під простим прошарком іоносфери?
- 3 Властивості іоносфери як середовища.
- 4 Іонізовані прошарки іоносфери і їх параметри.
- 5 Фізична сутність відбиття РХ від іоносфери.
- 6 Ефекти РРХ, що мають місце в іоносфері.
- 7 Критична частота іоносфери.
- 8 Максимально застосовна частота.
- 9 Сутність явища рефракції в шаруватій іоносфері.

6 Особливості розповсюдження іоносферних хвиль різних діапазонів

Радіохвилі, що поширюються навколо земної кулі, доцільно розділити на два види: поверхневі (уздовж поверхні Землі); просторові (із відбиттям від іоносфери).

а) Поширення УКХ ($\lambda \leq 10$).

Поверхневі хвилі сильно поглинаються землею. Вони практично поширюються на дальність прямої видимості. Дифракція дуже слабка.

Просторові хвилі в звичайних умовах, за винятком невеличких довгохвильових їх частин ($\lambda = 8-10$ вдень в максимум сонячної активності) від іоносфери не відбиваються. Іоносфера для цих хвиль радіопрозора. При проходженні крізь іоносферу, промені УКХ зазнають викривлення, що призводить до рівнобіжного зсуву шляху поширення (рис.6.1).

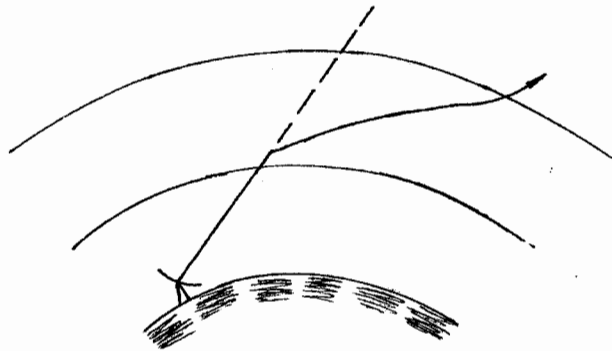


Рис.6.1 – Розповсюдження УКХ

Це призводить до помилки у визначенні кутових координат і дальності до цілей, що високо летять.

При поширенні УКХ в іоносфері загасання мале, тому що провідність обернено пропорційна квадрату частоти.

б) Поширення КХ ($\lambda = 10-100$).

Поверхневі хвилі цього діапазону сильно поглинаються землею, тому дальність їх поширення не перевищує декількох сотень кілометрів.

Просторові хвилі відбиваються від іоносфери. За рахунок багатократного відбиття короткі хвилі можуть проходити десятки тисяч кілометрів (реально декілька тисяч кілометрів).

КХ відбиваються від прошарку F_2 . При цьому шар Е хвилі проходять два рази і ослабляються в ньому (рис.6.2).

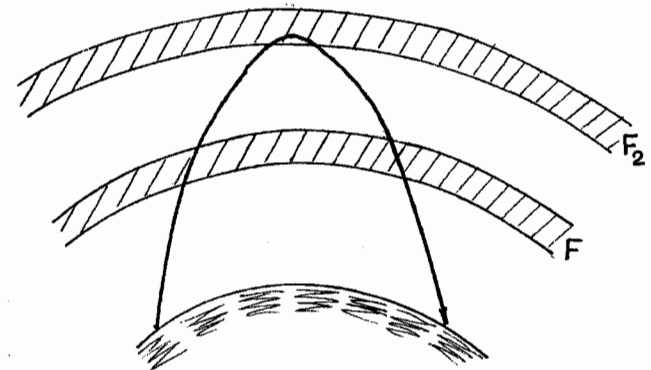


Рис.6.2 – Розповсюдження КХ

Вдень лодається загасання в прошарку Д. Для зменшення загасання збільшують частоту радіосигналів. Концентрація електронів прошарку Е та F_2 різна в різний час доби: вдень вона більше, вночі – менше. Тому для зв'язку на великі відстані застосовуються:

- денні хвилі $\lambda = 10-25$ м;
- нічні хвилі $\lambda = 35-70$ м;
- проміжні хвилі $\lambda = 25-35$ м для зв'язку ранком і ввечері.

Характерними рисами поширення КХ є:

- завмирання,
- зони мовчання,
- радіолуна,
- ефект Кабанова.

1 Завмирання пояснюються флуктуаціями N_e в іоносфері і розсіюванням радіохвиль неоднорідностями іоносфери (рис.6.3)

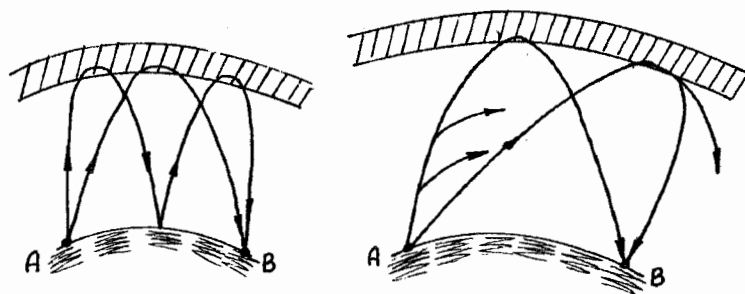


Рис.6.3 – Завмирання і розсіювання РХ

Крім того мають місце поляризаційні завмирання через ефект Фарадея.

2 Зона мовчання – область, в якій радіоприймання на даній частоті неможливе (рис.6.4).

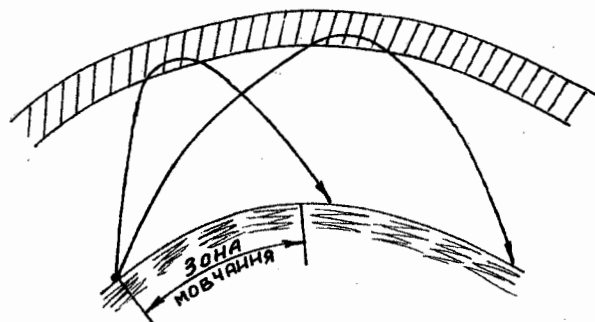


Рис.6.4 – Зона мовчання

Мінімальні відстані від передавача до точки падіння відбитого променя визначає радіус зони мовчання на даній частоті.

3 Радіолуна. В точці прийому крім основного сигналу можуть прийти ще декілька сигналів після різної кількості відбиття. Розрізняють ближню (рис.6.5 а), пряму (рис.6.5 б) і зворотню (рис.6.5 в) радіолуну.

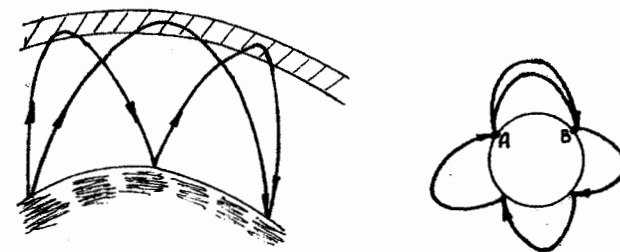


Рис.6.5 – Радіолуна

Радіолуна заважає на дальностях 10-15 тис. км. Для поліпшення прийому застосовують направлені антени.

4 Ефект Кабанова полягає в тому, що радіохвилі відбиваючись від іоносфери, падають на Землю, де розсіюються нерівностями земної поверхні у всіх напрямках, в тому числі і в зворотному напрямку.

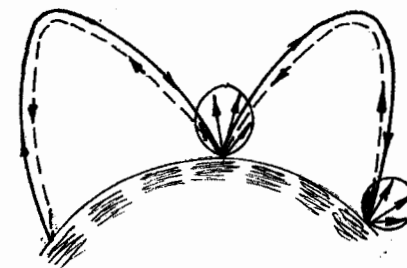


Рис.6.6 – Ефект Кабанова

Частина розсіяної енергії, яка дорівнює 1% по тому ж шляху повертається до РЛС. Довжина одного «стрибка» складає 3000-4000 км. Сигнал може бути прийнятий і після декількох «стрибків» із відстані 10-12 тис.км.

Ефект Кабанова використовується для:

- дослідження параметрів іоносфери зворотно-похилим зондуванням;
- визначення меж зон мовчання і поглинання РХ на шляху;
- радіолокаційного виявлення старту МБР, ядерних вибухів і інших цілей на дальностях до 12000 км.

в) Поширення СХ ($\lambda = 100 - 1000$).

Поверхневі хвилі поширюються на дальність 700-1000 км.

Просторові хвилі відбиваються від прошарку Е и можуть поширюватися на десятки тисяч кілометрів. В денні часи хвилі проходять прошарок Д два рази і сильно в ньому поглинаються. Тому вдень середні хвилі поширюються тільки як поверхневі хвилі. Вночі прошарок Д руйнується і основне значення одержують хвилі, відбиті від іоносфери.

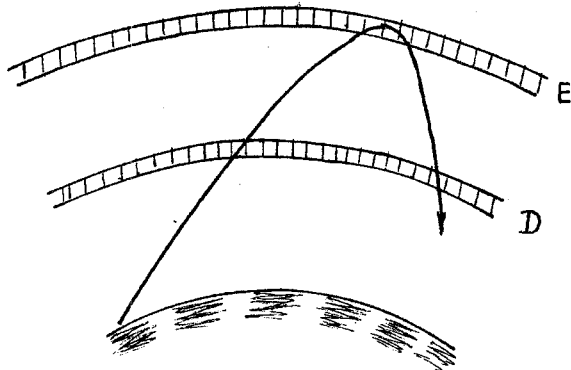


Рис.6.7 – Розповсюдження СХ

При поширенні СХ мають місце сильні інтерференційні замирання (просторові і поверхневі хвилі накладаються одна на одну, виникають пульсації).

В діапазоні СХ сильно позначається вплив атмосферних і промислових завад.

г) Поширення ДХ ($\lambda = 1 - 10$) і НДХ ($\lambda > 10$).

Поверхневі хвилі поширюються до 3000 км.

Просторова хвиля відбивається від самого нижнього прошарку іоносфери (вдень – від прошарку Д, вночі – від прошарку Е). Земля в цьому діапазоні – добрий провідник. Тому процес поширення ДХ має хвилевідний характер (хвилевід, утворений іоносферою і поверхнею Землі), що забезпечує добрий радіозв'язок на великі відстані, незважаючи на помітний вплив атмосферних завад.

д) Особливості РРХ дм- і см-діапазонів.

Радіохвилі (РХ) цього діапазону від іонізованої області атмосфери не відбиваються і в ній не розсіюються, тому поширюватися не можуть. Крім того, ці РХ майже не заломлюються і легко проходять крізь

іоносферу. Завдяки цьому ці РХ можуть поширюватися як прямі і знаходять застосування в космічному зв'язку.

РХ дм-діапазону практично не зазнають ні молекулярного поглинання, ні поглинання в гідрометеорах. Поглинання в гідрометеорах стає помітним на хвилях коротше 3-5 см. Поглинання в парах води, тобто молекулярне поглинання, стає помітним тільки на хвилі 1,35 см, тобто в найнижчій межі см-діапазону. Тому молекулярне поглинання можна практично не враховувати.

е) Особливості РРХ мм-діапазону.

На їх поширення іоносфера не впливає. Тропосфера викликає рефракцію, викривлення траєкторії. Гідрометеори у вигляді дощу, туману, граду, снігу і т.д. викликають дуже сильне поглинання. При сильному дощі і тумані практично не поширюються. РРХ сильно молекулярно поглинаються в газах і при відсутності гідрометеорів, в першу чергу у водяних парах і в кисні повітря. Є тільки 4 зони прозорості у районах 1,2 мм ($\delta = 0,7$), 2 ($\delta = 0,3$), 3 ($\delta = 0,22$), 8,6 ($\delta = 0,07$).

Сильне молекулярне поглинання і повне припинення РРХ мм-діапазону під час дощу і туману обмежують можливість застосування їх в наземних лініях радіозв'язку, тобто при поширенні як земних хвиль. Але вони можуть знайти широке застосування в космічних лініях зв'язку, поза тропосферою, в умовах відсутності гроз і водяних парів.

ж) Особливості РРХ оптичного діапазону.

Ці РХ можуть поширюватися тільки як земні і вільно розповсюджені. Під дією атмосферної рефракції їхня траєкторія викривлюється в 2 рази менше, ніж для УКХ ($R \approx 50000$) проти $R_{\text{зем}} = 25000$).

Сильний дощ, туман, снігопад цілком порушують їх поширення. Сильне поглинання викликають димка та імла.

При відсутності опадів, зв'язок на цих хвилях можливий при дальностях від 0,4 до 20 км, тільки в межах "вікон прозорості".

Ці хвилі застосовні тільки в тих районах, де опади спостерігаються вкрай рідко, а також в космосі.

Питання для самоперевірки

- 1 Поширення УКХ.
- 2 Поширення КХ.
- 3 Поширення СХ.
- 4 Поширення ДХ і НДХ.
- 5 Особливості РРХ дм- і см-діапазонів.
- 6 Особливості РРХ мм-діапазону.

7 ПЕРЕДАЧА МЕТЕОРОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ЧЕРЕЗ КОСМОС

7.1 Загальні принципи, поглинання РХ у міжпланетному і міжзоряному просторі

В цьому випадку необхідно застосовувати хвилі, що легко проникають крізь атмосферу Землі по практично прямолінійних траєкторіях.

Щільність міжзоряного газу складає ≈ 1 на відміну від поверхні Землі, де щільність досягає $2,7 \times 10^{29}$. Температура кінетичного газу складає $\approx 100K$ і поблизу зірок досягає $10^6 K$.

До складу входить водень, гелій і деякі метали, а також найпростіші сполуки CH , CN , крім того і пил з розмірами 10^{-4} , 10^{-3} .

На підставі досліджень виведена формула для коефіцієнта поглинання РХ в міжзоряному газі

$$\alpha = \frac{16\pi^2 e^6 N^2 \ln \frac{2rT^{5/2}}{2,115e^2 m^{1/2} \omega}}{3\sqrt{2} r T m^{5/2} \omega^2 c},$$

де e – заряд електрона, m – маса електрона, N – електронна концентрація, T – абсолютна температура, r – постійна Больцмана, ω – колова частота, c – швидкість світла.

7.2 Передача метеорологічної інформації за допомогою штучних супутників Землі, вибір оптимальних частот для космічних ліній зв'язку

Нижня межа смуги оптимальних частот для цих цілей обумовлена властивостями іоносфери (особливо в роки сонячної активності пропарком E_s) і складає розмір 65...70 МГц.

З боку високих частот обмеження вносять тропосфера, тому що частоти > 10 МГц в ній зазнають помітне поглинання в дощі і тумані.

Здавалося б, що оптимальні частоти лежать в межах (70-10) МГц. Але це не зовсім так, тому що:

– частоти, що належать до максимально застосовних частот (МЗЧ), хоча і проходять крізь атмосферу, але зазнають при цьому суттєвого поглинання, причому чим більше f , тим менше поглинання.

– при проходженні крізь іонізовану область атмосфери подовжня складова магнітного поля Землі викликає поворот площини поляризації. А при безупинних флуктуаціях електронної концентрації, площина поляризації хаотично флюктує в орієнтуванні. Тому до частот 1,42 ГГц необхідно застосовувати РХ із коловою поляризацією, від 1,4 до 4 ГГц ці втрати визначають за спеціальними графіками, а для частот > 4 ГГц ними нехтують.

Таким чином, 4 ГГц і являють собою нижню межу оптимальних частот.

Верхня межа має порядок 10-12 ГГц через поглинання в опадах.

7.3 Особливості РРХ у космічному просторі

Їх три:

– незвичний вплив на траєкторію променя атмосферної рефракції, що потребує користування спеціальними таблицями і іонограмами для введення поправки на істинне положення космічного об'єкта при радіозв'язку;

– явище доплерівської зміни частоти, що потребує знання відносної швидкості супутника для врахування її впливу, але за допомогою сучасних ЕОМ ця проблема легко розв'язна;

– набагато більший, ніж у звичайних умовах, час затримки сигналу при розповсюдженні, що в деяких випадках необхідно враховувати при двосторонньому обміні метеоданими.

Питання для самоперевірки

- 1 Види космічних радіоліній та їх значення для сучасної науки і техніки.
- 2 Врахування взаємного впливу космічних і земних радіоліній.
- 3 Особливості космічних радіоліній.

ЛІТЕРАТУРА

- 1 Грудинская Г.П. Распространение радиоволн. – М.: Высшая школа, 1975.
- 2 Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. – М.: Сов. радио, 1972.
- 3 Красюк Н.П., Дымович Н.Д. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Высшая школа, 1974.
- 4 Справочник по теоретическим основам радиоэлектроники. Под. ред. Б.Х. Кривицкого. Том 1. – М.: Энергия, 1977.

Навчальне видання

Вельміскін Дмитро Іванович

Перелигін Борис Вікторович

“Розповсюдження радіохвиль”

Конспект лекцій

Підписано до друку 10.02.07 р. Формат 60х84/16 Папір офсетний.
Ум. друк. арк.4.5 Тираж 50 прим. Замовлення 107
Видавництво та друкарня "ТЕС"(Свідоцтво ДК № 771)
Одеса, Канатна 81/2.

Надруковано з готового оригінал-макета

Одеський державний екологічний університет
85016, Одеса, Львівська, 15

