

Аналіз і синтез випромінюючих систем

**Поширення радіохвиль
у вільному просторі**

Загальні положення

Радіохвиля – електромагнітний хвильовий процес у середовищі, яке розділяє передавальну та приймальну антени.

Можна навіть сказати, що передавач та приймач з'єднано деякою “позаапаратною” лінією передачі – “радіолінією”.

Склад будь-якої радіолінії: передавальна антена; середовище; приймальна антена.

Створювані передавачем електромагнітні коливання випромінюють за допомогою антени у вигляді радіохвиль. Ці хвилі поширюються у середовищі, а потім сприймаються приймальною антеною. На відміну від проводового зв'язку, у радіолінії зв'язуючою ланкою є не проводи, а природне середовище – атмосфера, земний простір чи космічний простір.

Для передачі інформації використовують радіосигнали, які є радіохвилями, у яких амплітуда та (або) частота змінюються за певним законом. Зазвичай радіосигнали отримують шляхом модулювання у передавачі високочастотних електромагнітних коливань низькочастотними. Тому **радіосигнал характеризують несучою частотою, формою обвідної амплітуди та законом її зміни.**

Загальні положення

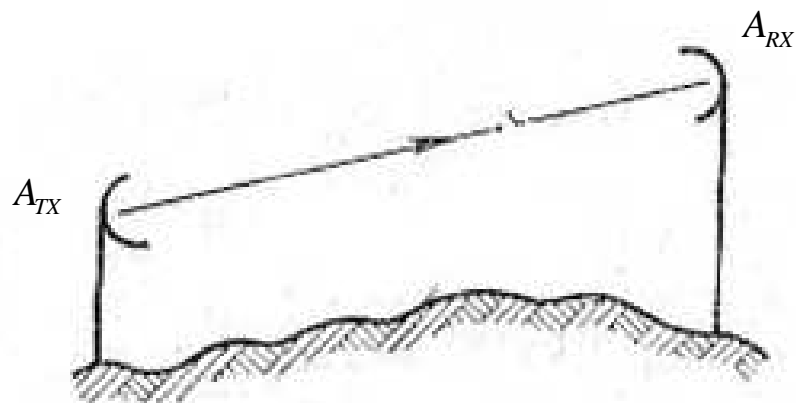
Радіолінії поділяють на дві групи:

- первинні;**
- вторинні.**

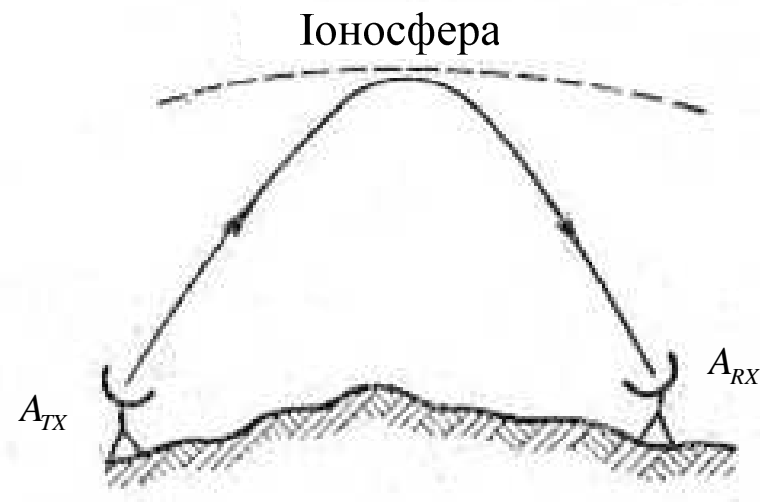
У випадку **первинної радіолінії** інформацію закладають у радіосигнал під час формування його передавальною станцією.

Зміни, які вносить середовище до характеристик радіосигналу під час його поширення (наприклад, внаслідок розсіяння на неоднорідностях атмосфери, різних об'єктах, перешкодах), є завадами для прийому цього радіосигналу та виділення з нього інформації.

Приклади первинних радіоліній



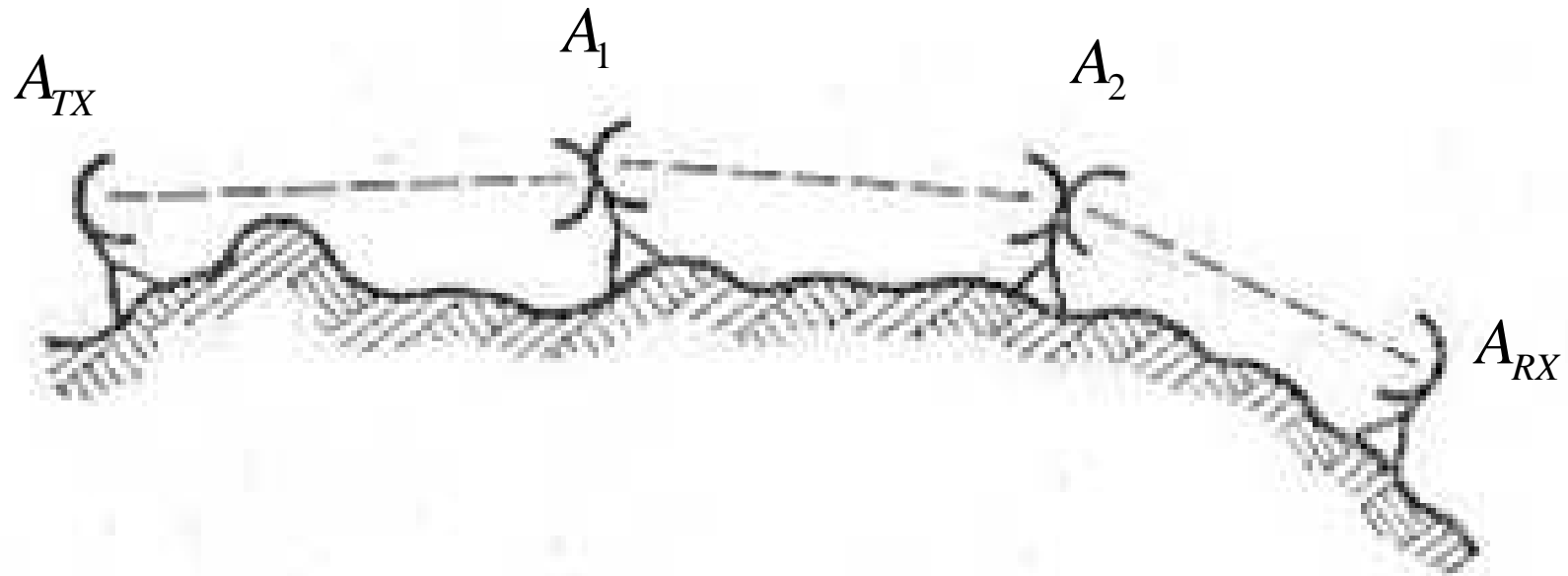
Випромінений передавальною антеною радіосигнал потрапляє безпосередньо на приймальну антену



Радіохвилі, випромінені передавальною антеною, досягають приймальної антени завдяки їх відбиттю від іоносфери

Радіохвилі можуть також досягати приймальної антени шляхом поширення поблизу поверхні Землі або її дифракційного огинання, рефракції у тропосфері тощо.

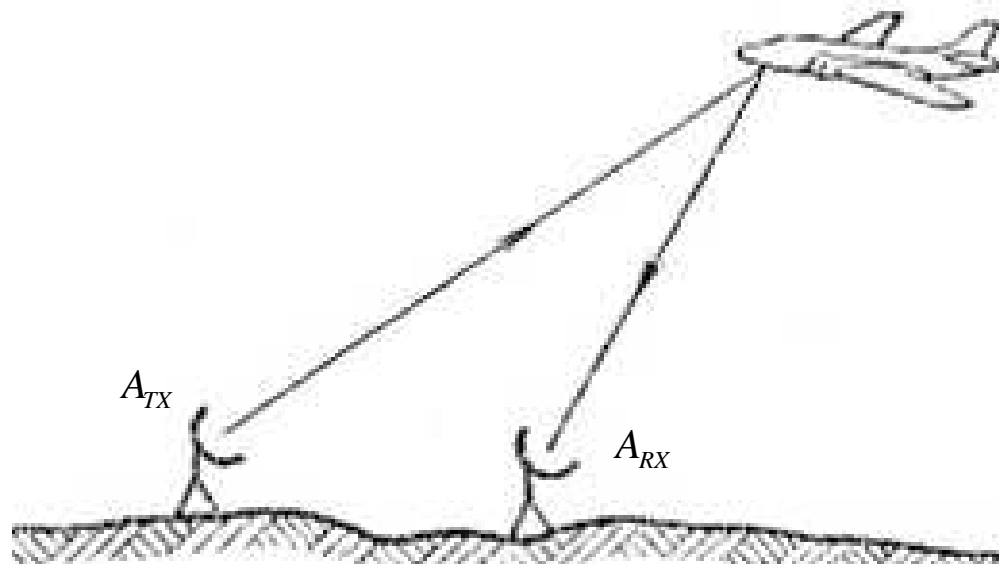
Приклади первинних радіоліній



Радіорелейна лінія зв'язку є послідовним ланцюжком найпростіших первинних радіоліній.

Первинною радіолінією також є радіолінія зв'язку наземної радіостанції з різноманітними літальними, у т.ч. космічними апаратами.

Приклади вторинних радіоліній



У **вторинних радіолініях** випромінюваний передавальною антеною радіосигнал не несе інформації, і він безпосередньо не потрапляє у пункт прийому.

Випромінені радіохвилі, поширюючись у середовищі, потрапляють на штучний (наприклад, літак) чи природний (наприклад, грозова хмара) об'єкт, який за електромагнітними параметрами відрізняється від навколишнього середовища.

Приклади вторинних радіоліній

Випромінені радіохвилі, поширюючись у середовищі, потрапляють на штучний (наприклад, літак) чи природний (наприклад, грозова хмара) об'єкт, який за електромагнітними параметрами відрізняється від навколишнього середовища. Такий об'єкт розсіює падаючі радіохвилі у різних напрямках, тобто створює електромагнітне поле, яке і впливає на приймальну антену. Про наявність об'єкта та його параметри роблять висновок за характеристиками, набутими цим сигналом під впливом цього об'єкта.

У таких радіолініях всю інформацію отримують не з первинного (падаючого) електромагнітного поля, а з вторинного (розсіяного) поля.

Вторинні радіолінії найчастіше використовують у радіолокації. У РЛС приймальний і передавальний пристрій часто розташовують в одному пункті, при цьому для випромінювання та прийому зазвичай використовують одну антену.

Склад і будова атмосфери

Склад і будова атмосфери

Основні ділянки (області) атмосфери:

- **тропосфера** (до 12...18 км від поверхні Землі);
- **стратосфера** (от верхней границы тропосферы до 60 км);
- **іоносфера** (від 60 км до верхньої границі атмосфери, яка становить приблизно 20000 км).

Межі між цими ділянками змінюються за висотою, залежно від пори року, часу доби, географічного району та ряду інших факторів!!!

Склад і будова атмосфери

Склад газу у тропосфері та стратосфері такий самий, як поблизу поверхні Землі: азот приблизно 78 % об'єму, молекулярний кисень 24 %, аргон 0,33 %, вуглекислий газ 0,03 %, водень, метан та інші гази містяться у ще менших кількостях. У тропосфері також міститься водяна пара, процентний вміст якої зменшується з висотою, та залежить від метеорологічних умов, змінюючись у межах 0...4 %. У тропосфері відбувається активне перемішування газів завдяки домінуючим тут повітряним течіям.

В іоносфері під впливом сонячної радіації відбувається дисоціація кисню та азоту, внаслідок чого з'являються атомарні складові цих газів, гази не перемішуються та розташовуються шарами відповідно до їхньої молекулярної маси. Крім цього, починаючи приблизно з висоти орієнтовно 60 км, гази іонізовані, внаслідок чого тут є значна кількість вільних електронів та іонів.

Густина атмосфери N_M характеризують кількістю молекул, яка міститься в одному кубичному сантиметрі повітря на даній висоті над рівнем моря, та пов'язана з тиском p (Па) та абсолютною температурою T співвідношенням:

$$N_M = p/kT \quad (\text{k - стала Больцмана}).$$

Склад і будова атмосфери

Густина атмосфери за постійної температури змінюється з висотою так само, як і атмосферний тиск. В однорідній за складом атмосфері тиск змінюється з висотою h за барометричною формулою:

$$p = p_0 \exp(-Mgh/RT),$$

p_0 - тиск поблизу поверхні Землі;

$R = 8,32$ Дж/град·моль - універсальна газова стала;

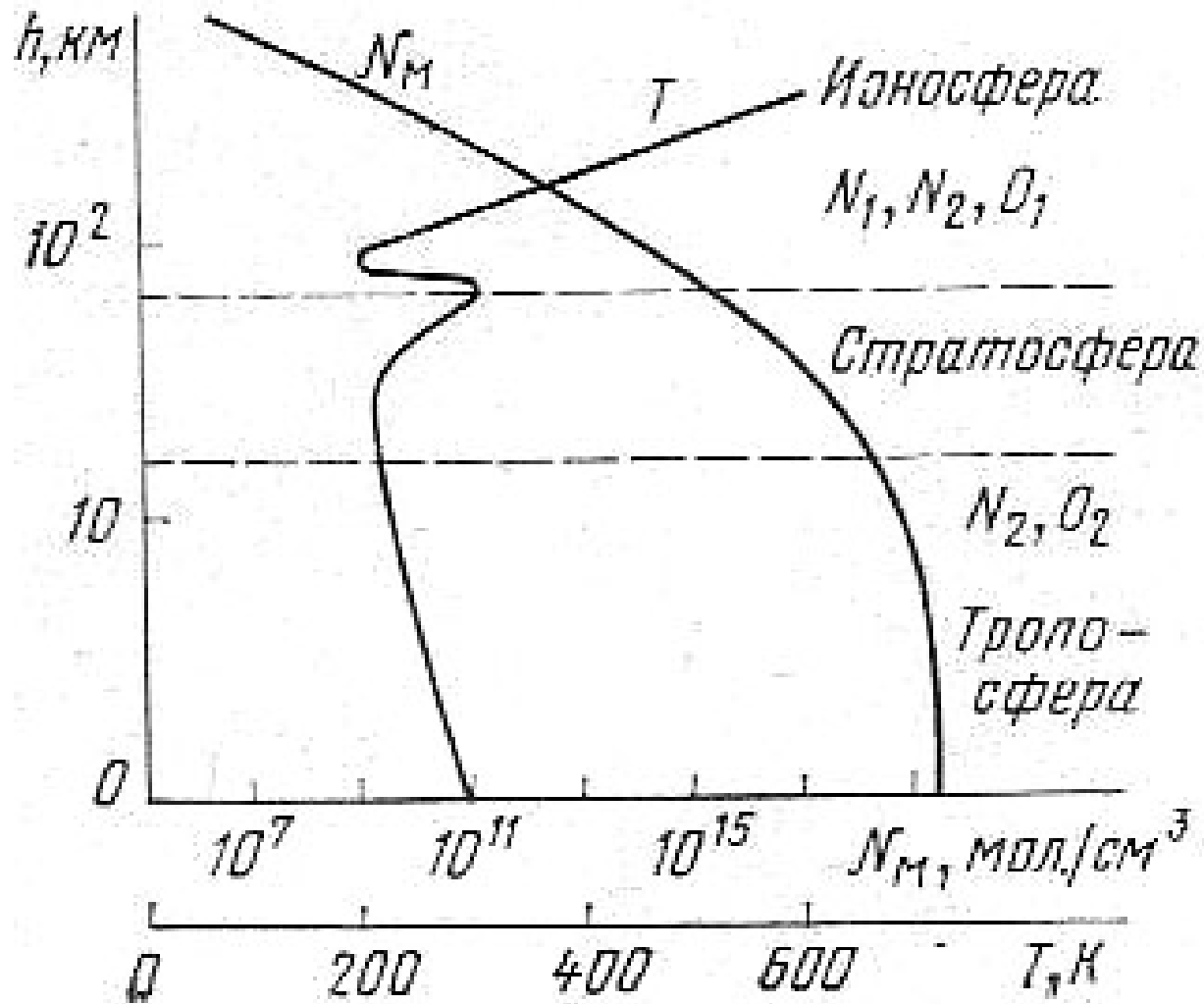
T - абсолютна температура;

M - маса грам - молекули газу;

g - прискорення сили тяжіння

В дійсності склад повітря змінюється з висотою, що спричиняє відхилення розподілу тиску та густини за висотою від барометричної формули – див. наступний слайд.

Склад і будова атмосфери



Будова, склад і густина атмосфери

Склад і будова атмосфери

Залежність температури повітря від висоти над поверхнею Землі, яку показано на рисунку (слайд 12), також змінюється немонотонно.

У тропосфері повітря нагрівається від поверхні Землі, нагрітої Сонцем, зазвичай температура у цій ділянці спадає з висотою, десь 5...6 К/км. Проте іноді на невеликих інтервалах висот спостерігається локальне збільшення температури з висотою, яке називають *температурна інверсія*. На верхній границі тропосфери припиняється падіння температури. **В іоносфері** значення температури збільшується з висотою, оскільки тут нагрівання повітря відбувається за рахунок випромінювання Сонця. Максимум у кривій розподілу температур на висоті 50...60 км пояснюється присутністю шару озону, який поглинає ультрафіолетове випромінювання Сонця.

Електричні параметри атмосфери

Електричні параметри тропосфери визначають тиск, температура та вологість. Температура, вологість і тиск тропосфери змінюються зі зміною метеорологічних умов.

Тому для проведення розрахунків радіоліній використовують модель, так званої **нормальної атмосфери**, параметри якої відповідають середньому стану тропосфери; атмосферний тиск поблизу поверхні Землі приймають 0,01 МПа, який зі збільшенням висоти зменшується на 12 Па/км; температура поблизу поверхні Землі $T=288$ К і зі збільшенням висоти зменшується на 5,5 град/км; відносна вологість 60 % і не змінюється з висотою. Верхню границю нормальної атмосфери прийнято на рівні висоти 11 км.

У тропосфері крім регулярних сезонних і добових змін параметрів відбуваються неперервні випадкові зміни, спричинені неперервним переміщенням повітря як вертикальними, так і горизонтальними потоками. Швидкості руху повітря при цьому часто виявляються значними, так що рух носить вихровий, турбулентний характер. При турбулентному русі повітря швидкість потоку повітря на окремих ділянках відрізняється від середньої швидкості. Тому і густина повітря в окремих об'ємах тропосфери відрізняється від середнього значення. Причому ці відхилення неперервно змінюються – флюктуують зі зміною швидкості повітряних течій.

Електричні параметри атмосфери

Електричні параметри іоносфери визначає присутність електронів та іонів.

Електронна щільність N_e [ел/см³] – кількість електронів, яка міститься в одиниці об'єму повітря.

Іоносфера в цілому є квазінейтральною, тобто кількість наявних у ній додатніх зарядів дорівнює кількості негативних зарядів. Для того, щоб відбулась іонізація газу, потрібно виконати певну роботу, яку називають “робота іонізації”. Основним джерелом, яке дає енергію для іонізації іоносфери, є Сонце, яке випромінює широкий спектр електромагнітних коливань, а також потоки заряджених частинок.

Крім цього, джерелом іонізуючого випромінювання є зірки, а також метеори, які вторгаються у земну атмосферу зі швидкостями 11...73 км/с, створюючи на висоті 80...100 км місцеву іонізацію: за метеором утворюється хвіст іонізованого газу, який швидко розширюється та розсіюється, існуючи в атмосфері від однієї до декількох секунд.

Електричні параметри атмосфери

Одночасно з появу нових електронів в іоносфері частина наявних електронів рекомбінує з додатними іонами, а також приєднується до нейтральних молекул. Після припинення дії джерела іонізації (наприклад, з заходом Сонця) електронна густина постійно зменшується, причому тим швидше, чим щільніша атмосфера. Детальніше ці питання вивчає наука аерономія.

Будова іоносфери

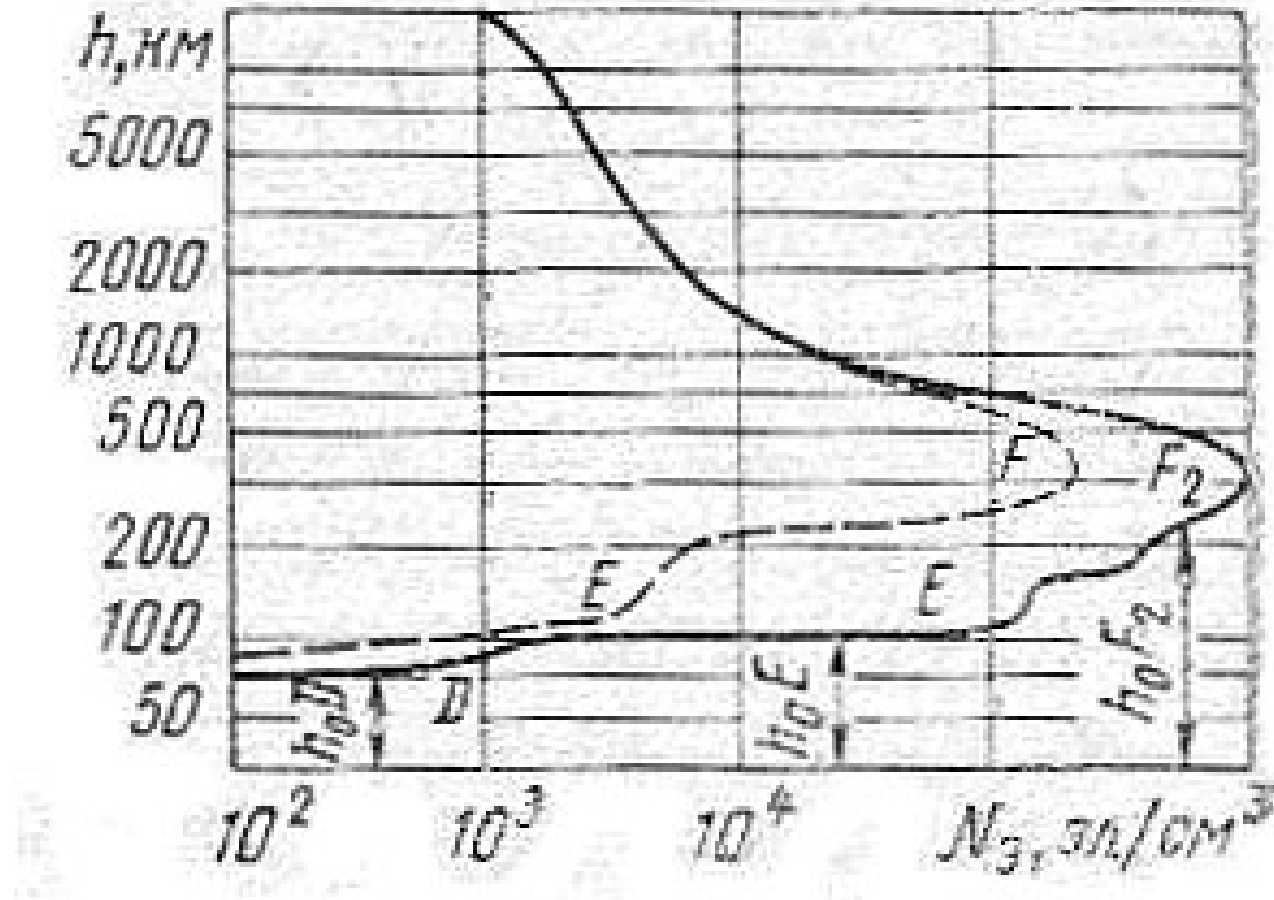
На висоті 250...400 км розташовано основний максимум іонізації, який має назву "*шар* F_2 ". Ділянку іоносфери, нижчу за основний максимум, називають внутрішньою іоносферою, а ділянку, яка вища за цей максимум – зовнішня іоносфера.

У внутрішній іоносфері є декілька неяскраво виражених максимуми іонізації, які позначають як D, E, F_1, F_2 - наст. слайд.

Іоносферні шарі характеризують:

- електронною щільністю у максимумі іонізації $N_{e\max}$;
- висотою нижньої границі шару h_0 ;
- кількістю ударів електрона V з важкими частинками протягом 1 с, які відбуваються у процесі теплового руху електрона.

Електричні параметри атмосфери



Розподіл електронної щільності іоносфери

Електричні параметри атмосфери

Регулярна шарувата структура іоносфери місцями порушується, особливо в роки максимуму сонячної активності. Має місце нерегулярна зміна інтенсивності потоку заряджених частинок, випромінюваних Сонцем. Іноді густина потоку сильно збільшується і заряджені частинки, які потрапляють в атмосферу Землі, рухаючись по спіралях у напрямку силових ліній земного магнітного поля до полярних районів, порушують нормальний режим іонізованих шарів, спричиняючи так звані **іоносферно-магнітні бурі**, які можуть тривати від декількох годин до двох діб, особливо часто такі бурі трапляються у приполярних районах.

Часом на Сонці відбуваються спалахи інтенсивності ультрафіолетового випромінювання, яке має велику проникну здатність, оскільки містить хвилі, коротші, ніж 0,1 мкм та спричиняють підвищену іонізацію шару *D* іоносфери, яка може тривати від хвилини до декількох годин.

Крім регулярних шарів, в іоносфері на висоті 90...110 км час від часу утворюється спорадичний (нерегулярний) шар який E_c , є скупченням іонізованого газу значно більшої електронної щільності, ніж густина навколишнього середовища на цій же висоті. Цей шар з'являється над порівняно невеликою територією (приблизно 100*100 км) і може переміщуватись під дією домінуючих в іоносфері вітрів.

Електричні параметри атмосфери

Іоносфера неоднорідна за своєю будовою, та у горизонтальному напрямі вона містить слабкі об'ємні неоднорідності, які утворюються в результаті неперервного згущення та розрідження іонізації, нерегулярної як у часі, так і у просторі. Ці неоднорідності є деякими областями з електронною густиною, відмінною від середнього значення електронної густини на даній висоті іоносфери. Розміри неоднорідностей лежать у дуже широких межах – від декількох метрів до декількох кілометрів. На висотах 60...80 км у шарі D домінують дрібні неоднорідності розміром до десятків метрів, у шарі E – неоднорідності розміром 200...300 м, а у шарі F – неоднорідності розмірами до декількох кілометрів, які мають продовгувату форму та витягнуті уздовж силових ліній магнітного поля Землі. Відхилення електронної густини цих неоднорідностей від середнього значення електронної густини навколишнього іонізованого газу становить 0,1...1 %. Під впливом вітру неоднорідності іоносфери переміщуються зі швидкістю, яка не перевищує 1...2 м/с.

Рівняння ідеальної радіолінії

Вільний простір – однорідне ізотропне непоглинаюче середовище, з відносною діелектричною проникністю, яка дорівнює одиниці.

У такому середовищі радіохвилі поширюються прямолінійно і з постійною швидкістю. Такого середовища не існує, проте співвідношення, які отримують при розв'язанні задач поширення радіохвиль у такому найпростішому випадку, є вихідними.

Вплив реальних середовищ на поширення радіохвиль враховують шляхом введення у ці співвідношення відповідних множників.

Напруженість електричного поля (амплитудне значення) поля випромінювання деякої передавальної антени:

$$E_m(\theta, \varphi, r) = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{D(\theta, \varphi) P_\Sigma W_0}{2\pi}} = [W_0 = 120\pi \text{ Ом}] = \frac{1}{r} \sqrt{60 D(\theta, \varphi) P_\Sigma}$$

$D(\theta, \varphi)$ - КСД передавальної антени;

P_Σ - випромінювана передавальною антеною потужність.

Рівняння ідеальної радіолінії

Потужність на виході приймальної антени:

$$P_{RX} = P_{TX} \frac{D_{RX}(\theta_{TX}, \varphi_{TX}) \cdot D_{TX}(\theta_{RX}, \varphi_{RX}) \cdot \lambda^2}{(4\pi r)^2},$$

P_{TX} - випромінювана антеною передавача потужність;

$D_{RX}(\theta_{TX}, \varphi_{TX})$ - КСД антени приймача у напрямку на антену передавача;

$D_{TX}(\theta_{RX}, \varphi_{RX})$ - КСД антени передавача у напрямку на антену приймача;

λ - довжина хвилі

r - відстань між передавальною та приймальною антенами.

Для реальної радіолінії:

$$P_{RX} = F^2(r) P_{TX} \frac{D_{RX}(\theta_{TX}, \varphi_{TX}) \cdot D_{TX}(\theta_{RX}, \varphi_{RX}) \cdot \lambda^2}{(4\pi r)^2},$$

$F(r)$ - множник послаблення.