

Chapter 13 天波传播

Sky wave ~~propagation~~ propagation.

一、大气层结构

1. 对流层 (Troposphere) (0-20 km)

这一层主要对电波有吸收、衰减、折射、反射、~~散射~~ 散射、衍射等影响。

2. 平流层 (Stratosphere) (20-50 km)

3. 电离层 (Ionosphere) (50-300 km)

4. ~~磁层~~ 磁层 (Magnetosphere)

二、电离层 (Ionosphere)

分为 D、E、F 三层

~~1. D 层~~

1. D 层 (50-70 km)

2. E 层 (70-100 km)

它是能够折射/反射辐射波的大气层的最低层

等离子体密度达到最大相对值

对电波传输的影响白天比晚上强，夏天比冬天强。

3. F 层 (300-1000 km)

等离子体密度再次达到相对最大值。

~~F 层分为 F1 和 F2 两个子层~~

F 层在白天会分为 F1 和 F2 两个子层，在晚上这两层又会重新合并。

三、电离层中的电波传播

1. 电离层中的垂直传播

定义电离层中的等离子体谐振频率、频率 ω 、 f ，则电离层的介电常数

写作

(1) 介电常数

$$\epsilon_r = 1 - \frac{Ne^2}{\omega^2 m \epsilon_0} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} = 1 - \frac{f_p^2}{f^2}$$

N = 电子密度 (每立方米的电子数)

Number per cubic meter

m = 电子质量

(2) 电场

在无耗等离子体环境中，平面波的传播电场为：

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-j\omega \sqrt{\mu \epsilon_0 \epsilon_r} z} = \vec{E}_0 e^{-j\omega \sqrt{\mu \epsilon_0} \sqrt{1 - \left(\frac{f_p}{f}\right)^2} z}$$

传播常数

$$k_c = \omega \sqrt{\mu \epsilon_0 \epsilon_r} = k_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f_p}{f}\right)^2} \\ = k_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f_p}{f}\right)^2}$$

因此，电离层中的平面波电场可以简化为

$$E = E_0 e^{-j k_c z}$$

• 讨论： f 和 f_p 的关系

① $f > f_p$: k_c 是个实数，波沿期望的方向向空间传播

② $f < f_p$: k_c 是个虚数，波沿初始方向上辐射衰减剧烈。

③ $f = f_p$: $k_c = 0$ ，被称为截止频率 (critical frequency)，用 f_c 表示



13) 求 f_c

垂直发射的电磁波, 若电磁波频率小于 f_c , 电磁波将无法穿过电离层并反射回地球。

$$f_c = 9\sqrt{N}$$

电子密度

[例1]: Electron density in F layer is equal to 5×10^{11} electron per cubic meter.

1. Find the approximate height of this layer.

2. Calculate f_c .

解: 1. 根据图中所示 (Fig. 13.4)

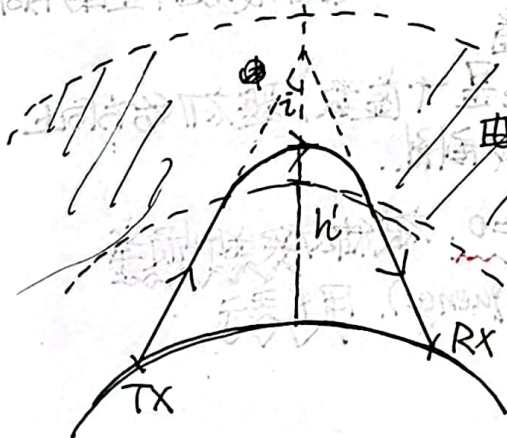
根据 $N = 5 \times 10^{11}$ 找到对应的 F 层可能的高度范围

$$h_{min} = 200 \text{ km} \quad h_{max} = 400 \text{ km}$$

$$2. f_c = 9\sqrt{N} \approx \cancel{6.3 \text{ MHz}} \rightarrow 6.3 \text{ MHz}$$

超过 6.3 MHz 以上的电磁波可以穿过

2. 电离层中的斜向 (inclined) 传播

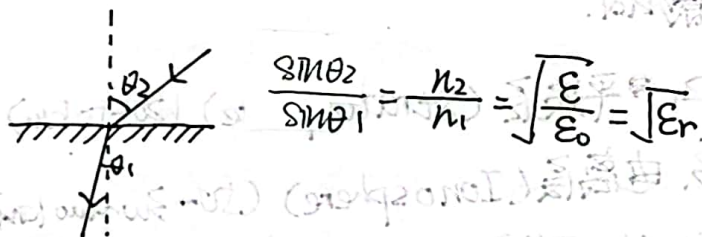


反射发生在一个虚点上, 其高度用 h' 表示。该高度的值取决于频率 f 和入射波的仰角 θ_i 。

确定最大可用频率 (maximum usable frequency) (MUF)

$$\text{由于: } \sin \theta_z = \sin \theta_i \times \sqrt{\epsilon_r}$$

[补充] 利用波的折射



当 $\theta_i = 90^\circ$ 时, 波将返回地表

$$\sin^2 \theta_z = \epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

$$1 - \cos^2 \theta_z = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} = 1 - \frac{81N}{f^2}$$

$$f = \sqrt{\frac{81N}{\cos^2 \theta_z}} = f_c \cdot \sec \theta_i$$

$$\text{故 } \text{MUF} = f_c \cdot \sec \theta_i$$

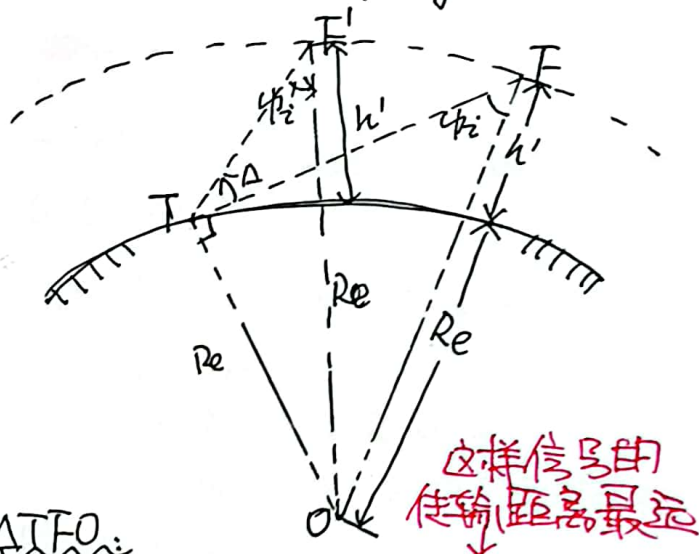
[例2]: 利用例1的 f_c , calculate the maximum usable frequency for 45° elevation angle of radiation.

$$\text{解: } f = f_c \times \sec \theta_i = 6.3 \times \sqrt{2} = 8.883 \text{ MHz}$$



Chapter 13 天波传播

3. 最佳使用频率 (Optimum usage frequency)



ATFO:

首先假设发射方向与地球表面相切

$$MUF = f_c \times \sec \chi_i$$

$$\chi_i = \arcsin\left(\frac{Re}{Re+h'}\right)$$

由于 $Re = 6370 \text{ km}$ $h' = 200 - 400 \text{ km}$

故 $\chi_i \approx 74^\circ$

$$MUF = f_c \times \sec 74^\circ = 3.6 f_c$$

ATFO: 考虑发射有倾角的情况

使用正弦定理

$$\frac{\sin \chi_i'}{Re} = \frac{\sin(90^\circ + \Delta)}{Re+h'}$$

$$\sin \chi_i' = \frac{Re}{Re+h'} \sin(90^\circ + \Delta) = \frac{Re}{Re+h'} \cos(\Delta)$$

此时: $MUF = f_c \cdot \sec \chi_i'$

• 在高频 (HF) 通信中, 由于电离层电子密度的变化及其他的影响, 使用 MUF 作为正常操作的频率选择便不可靠, 因此引入最佳使用频率 (OUF).

OUF 的值通常是 MUF 的 50% ~ 80% 之间

$$OUF = MUF \times (50\% \sim 80\%)$$

[注]: 若题目中没有告诉百分比, 按取 80%

[例]:

1. Calculate the maximum usable frequency for $TEC = 10^{17} \text{ el/m}^2$. Assume that the thickness of F layer is 200 km

2. Determine the optimum usable frequency.

3. If the waves at the frequency of 11 and 23 MHz radiate with elevation angle of 30° , determine whether they can provide a reliable communication or not.

解:

$$1. TEC = H \times \bar{N} = 200 \times 10^3 \times \bar{N} = 10^{17}$$

$$\Rightarrow \bar{N} = 5 \times 10^{11} \text{ el/m}^3$$

$$\bullet f_c = 9 \sqrt{\bar{N}} = 6.3 \text{ MHz}$$

$$2. OUF < 3.6 f_c \times 80\% = 18.145 \text{ MHz}$$

3. For the elevation angle of antenna equal to 30° , the maximum usable frequency is

$$\Delta = 30^\circ \Rightarrow \sin \chi_i' = \frac{6370}{6670} \cos(30^\circ) = 0.827$$

$$\chi_i' = \arcsin(0.827) = 56^\circ$$

$$MUF(30^\circ) = f_c \times \sec 56^\circ = 11.27 \text{ MHz}$$

Therefore 11 MHz \rightarrow Yes

23 MHz \rightarrow No

