

专题十一：三种常用的电波传播方

（第十一、十二、十三章）

一．地面波传播

二．天波传播

三．视距传播



专题十一：三种常用的电波传播方式

- 电波传播特性同时取决于媒质结构特性和电波特征参量；
- 对于一定频率和极化的电波与特定媒质条件相匹配，将存在某种占优势的传播方式；
- 在各种传播方式中，媒质的电参数（包括介电常数、磁导率与电导率）的空间分布和时间变化及边界状态，是传播特性的决定性因素；



传播方式

- (1) 地波传播：射线① 由发射天线沿地表传播
(适用于长波至米波 近距传播)
- (2) 天波传播：射线② 由发射天线向天空辐射，在电离层内经过连续折射，返回地面的传播
(适用于短波 远距传播)
- (3) 视距传播：射线③ 在发射天线和接收天线的直视距离
(无障碍物阻挡) 内的传播
(适用于米波至微波 视距传播)

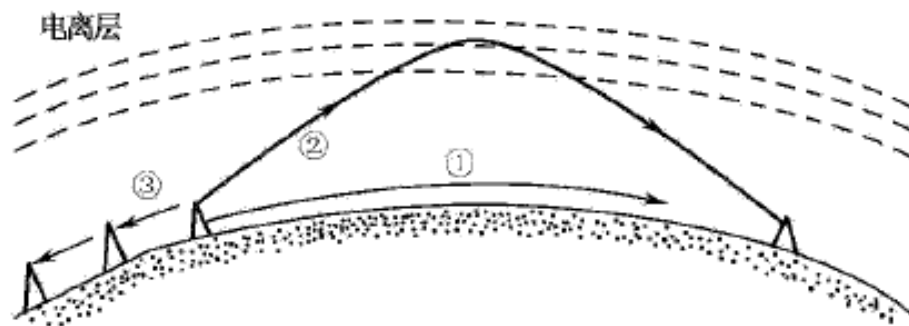


图 5.24 无线电波传播的基本方式

一. 地面波传播

地面波传播：无线电波沿地球表面传播的传播方式；

- 当天线低架于地面，且最大辐射方向沿地面时，这时主要是地面波传播。
- 在长、中波波段和短波的低频段（ $10^3 \sim 10^6$ Hz）均可用这种传播方式。



一、地面波传播

1. 地面对电波传播的影响
2. 波前倾斜现象
3. 地面波传播特性

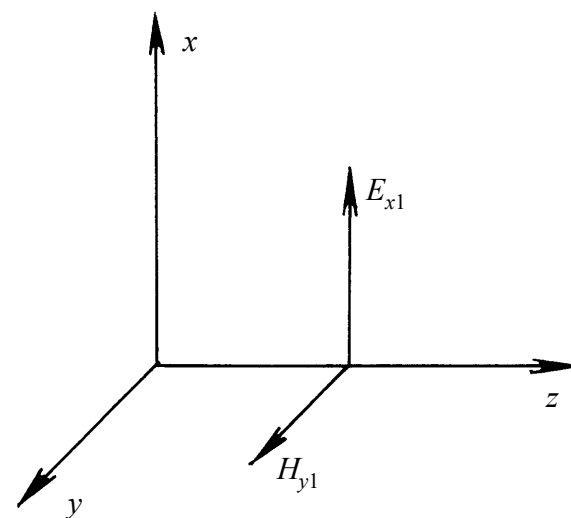


1. 地面对电波传播的影响

- 由于地表面的导电性质，会存在电波吸收；
- 由于地球表面呈现球形，使电波传播的路径按绕射的方式进行；
因此适用于长波、中波及短波低端
- 地面波传播与电波的极化有关，理论计算和实验证明地面波传播宜采用垂直极化波。



2. 波前倾斜现象

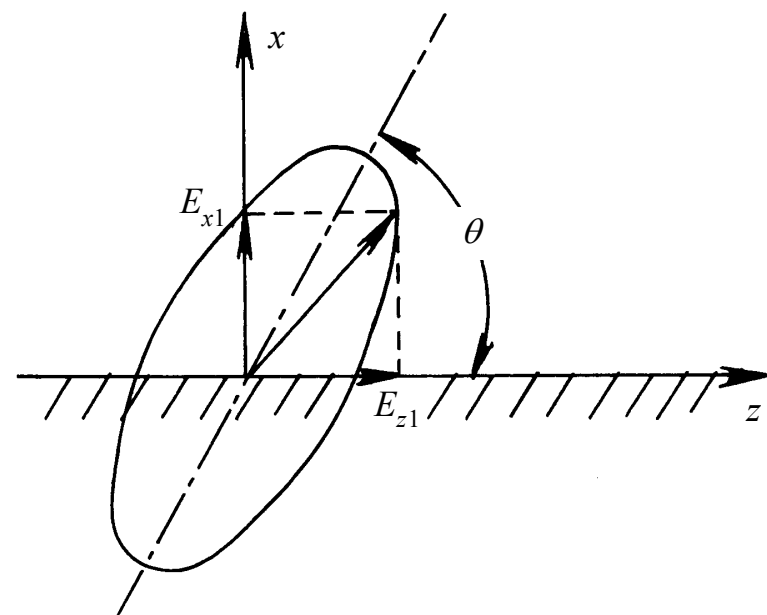


理想导电地面的场结构

- 设有一直立天线架设于地面之上
- 辐射的垂直极化波沿地面传播时
- 若大地是理想导体, 则接收天线接收到的仍是垂直极化波。

专题十一：三种常用的电波传播方式

- 实际大地是非理想导电媒质
- 垂直极化波的电场沿地面传播时，就在地面感应出电流，从而产生欧姆损耗，造成大地对电波的吸收；
- 并沿地表面形成较小的电场水平分量，致使**波前倾斜**，并变为**椭圆极化波**；
- 波前的倾斜程度反映了大地对电波的吸收程度。



非理想导电地面的场结构

3. 地面波传播特性

1. 地面波传播采用垂直极化波，天线多采用直立天线的形式；
2. 地面波的波前倾斜现象具有实用意义。
3. 地面上电场为椭圆极化波；
4. 地面波在传播过程中有衰减
当地面的电导率越大或电波频率越低，地面对电波的吸收越小。
地面波传播特别适用于长波、超长波波段。
5. 地面波传播比较稳定；
6. 地面波传播有绕射损耗；



二. 天波传播 (电离层电波传播)

天波传播:

从发射天线发出的电波在高空被电离层反射后到达接收点的传播方式;

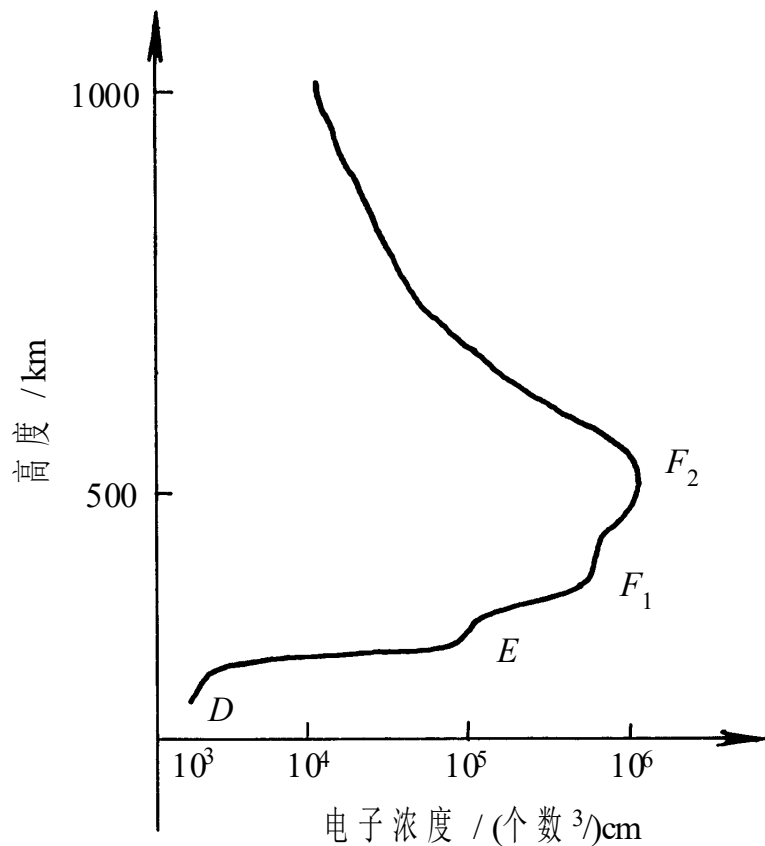
主要用于中波和短波波段。

1. 电离层概况

- 电离层是地球高空大气层的一部分, 从离地面60km的高度一直延伸到1000 km的高空。
- 由于电离层电子密度不是均匀分布的, 因此, 按电子密度随高度的变化相应地分为D, E, F1, F2四层, 每一个区域的电子浓度都有一个最大值, 如图 所示。



专题十一：三种常用的电波传播方式



电离层电子密度的高度分布

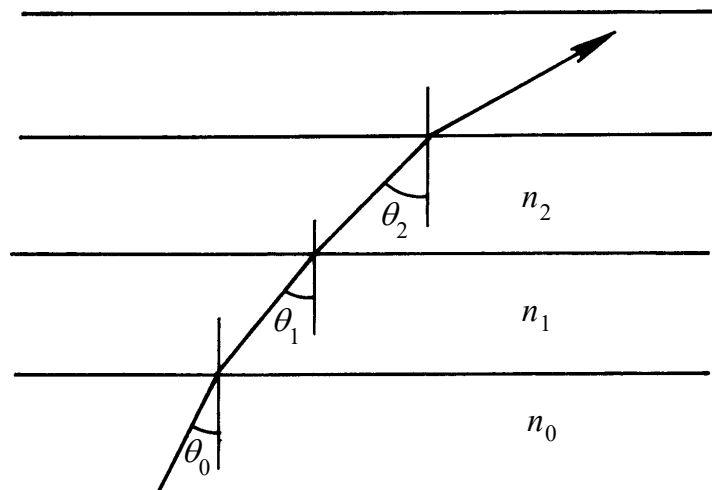
电离层主要是太阳的紫外辐射形成的, 因此其电子密度与日照密切相关:

- 白天大, 晚间小, 而且晚间D层消失;
- 电离层电子密度又随四季不同而发生变化;
- 太阳的骚动与黑子活动也对电离层电子密度产生很大影响;



2. 无线电波在电离层中的传播

可将电离层分成许多薄片层, 每一薄片层的电子密度是均匀的, 但彼此是不等的。



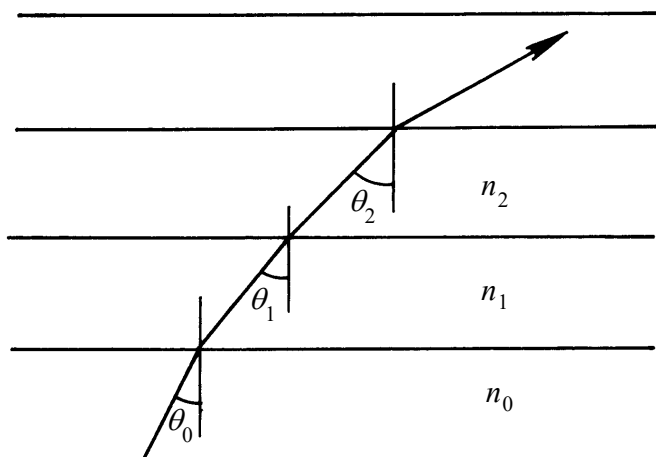
专题十一：三种常用的电波传播方式

当电波入射到空气—电离层界面时，由于电离层折射率小于空气折射率，折射角大于入射角，射线要向下偏折。

当电波进入电离层后，由于电子密度随高度的增加而逐渐增大，因此各薄片层的折射率依次变小，电波将连续下折，直至到达某一高度处电波开始折回地面。

- 电离层对电波的反射实质上是电波在电离层中连续折射的结果。

电波从电离层内反射下来的条件：



电离层对电波的连续折射

$$\sin \theta_0 = \sqrt{1 - \frac{80.8 N_i}{f^2}}$$

$$f = \sqrt{80.8 N_i} \sec \theta_0$$

上式揭示了天波传播时，电波频率 $f(\text{Hz})$ 与入射角 θ_0 和电波折回处的电子密度 N_i （电子数/ m^3 ）三者之间的关系。



几个概念：

(1) 最高可用频率

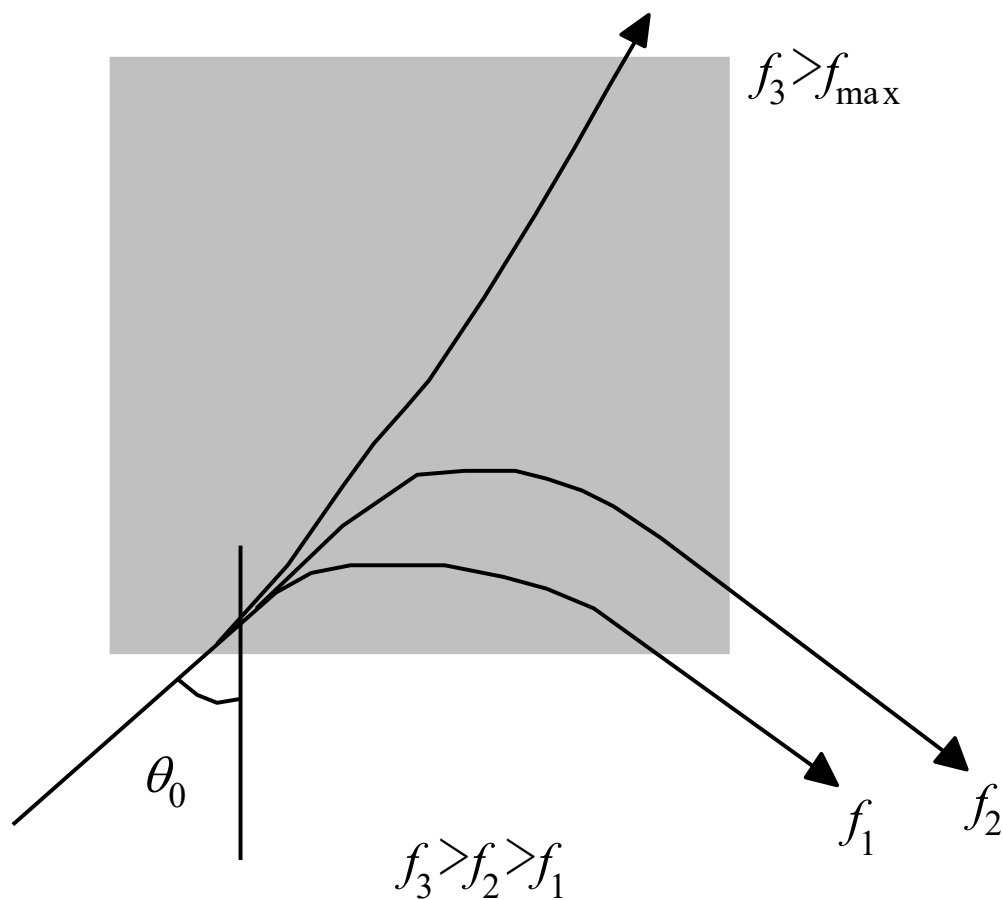
当电波以 θ_0 角度入射时, 电离层能把电波“反射”回来的最高可用频率为

$$f_{\max} = \sqrt{80.8 N_{\max}} \sec \theta_0 \quad (N_{\max} \text{ 为电离层的最大电子密度})$$

- 当电波入射角 θ_0 一定时, 随着频率的增高, 电波反射后所到达的距离越远。
- 当电波工作频率高于 f_{\max} 时, 由于电离层不存在比 N_{\max} 更大的电子密度, 因此电波不能被电离层“反射”回来而穿出电离层, 这正是超短波和微波不能以天波传播的原因。



专题十一：三种常用的电波传播方式



θ_0 一定而频率不同的射线

(2) 天波静区

电离层能把频率为 $f(\text{Hz})$ 的电波“反射”回来的最小入射角 $\theta_{0\min}$ 为

$$\theta_{0\min} = \arcsin \sqrt{1 - \frac{80.8N_{\max}}{f^2}}$$

- ◆当电波频率一定时, 射线对电离层的入射角 θ_0 越小, 电波需要到达电子浓度较高的地方才能被反射回来, 且通信距离越近;
- ◆当入射角 $\theta_0 < \theta_{0\min}$ 时, 则电波能被电离层“反射”回来所需的电子密度超出实际存在的 N_{\max} 值, 于是电波穿出电离层。
- ◆由于入射角 $\theta_0 < \theta_{0\min}$ 的电波不能被电离层“反射”回来, 使得以发射天线为中心的、一定半径的区域内就不可能有天波到达, 从而形成了**天波的静区**。

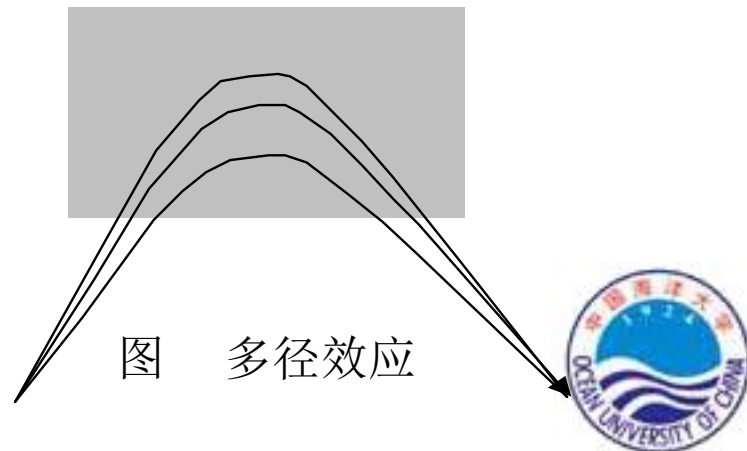


(3) 多径效应

◆ 由于天线射向电离层的是一束电波射线，各根射线的入射角稍有不同，它们将在不同的高度上被“反射”回来，因而有多条路径到达接收点，这种现象称为**多径传输**。

◆ 电离层的电子密度随气候不时发生起伏，引起各射线路径也不时变化，这样，各射线间的波程差也不断变化，从而使接收点的合成场的大小发生波动，这种由多径传输引起的接收点场强的起伏变化称为**多径效应**。

- 多径效应造成了信号的衰落。



(4) 最佳工作频率 f_{opt}

- 电离层中自由电子的运动将耗散电波的能量, 使电波发生衰减, 但电离层对电波的吸收主要是D层和E层。

因此, 为了减小电离层对电波的吸收, 天波传播应尽可能采用较高的工作频率。

- 然而当工作频率过高时, 电波需到达电子密度很大的地方才能被“反射”回来, 这就大大增长了电波的电离层中的传播距离, 随之也增大了电离层对电波的衰减。

通常取**最佳工作频率** f_{opt} 为

$$f_{\text{opt}}=0.85f_{\text{max}}$$

- 电离层的D层对电波的吸收是很严重的, 夜晚, D层消失, 致使天波信号增强, 这正是晚上能接收到更多短波电台的原因。



● 天波通信的特点:

① 频率的选择很重要，频率太高，电波穿透电离层射向太空；频率太低，电离层吸收太大，以致不能保证必要的信噪比。因此，通信频率必须选择在最佳频率附近。

为了通信可靠，必须在不同时刻使用不同的频率。但为了避免换频的次数太多，通常一日之内使用两个（日频和夜频）或三个频率。

② 天波传播的随机多径效应严重，多径时延较大，信道带宽较窄。

因此，对传输信号的带宽有很大限制，特别是对于数字通信来说，为了保证通信质量，在接收时必须采用相应的抗多径措施。



③ **天波传播不太稳定，衰落严重**，在设计电路时必须考虑衰落影响，使电路设计留有足够的电平余量。

④ **电离层所能反射的频率范围是有限的，一般是短波范围**。由于波段范围较窄，因此短波电台特别拥挤，电台间的干扰很大，尤其是夜间；由于电离层吸收减小，电波传播条件有所改善，台间干扰更大。

⑤ 由于天波传播是靠高空电离层的反射，因而受地面的吸收及障碍物的影响较小，也就是说这种传播方式的**传输损耗较小，因此能以较小功率进行远距离通信**。

⑥ **天波通信，特别是短波通信**，建立迅速，机动性好，设备简单，是短波天波传播的优点之一。



三. 视距传播

视距传播：

电波依靠发射天线与接收天线之间的直视的传播方式；

发射天线和接收天线处于相互**能看见**的视线距离内。

- 视距传播分为地—地视距传播、地—空视距传播。
- 地面通信、卫星通信以及雷达等都可以采用这种传播方式；
- 主要用于超短波和微波波段的电波传播；

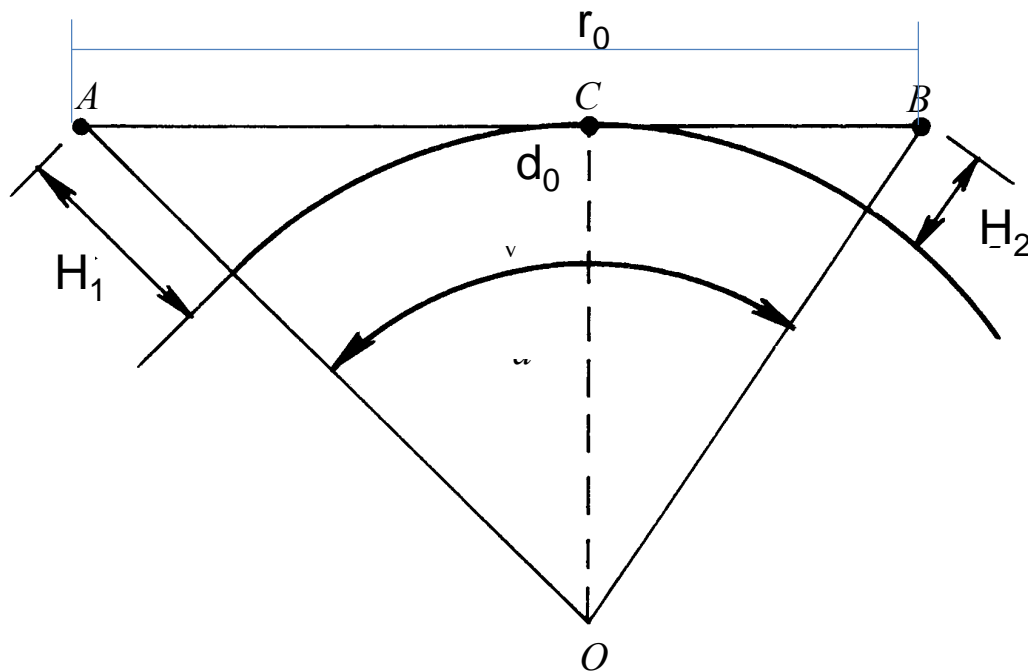


专题十一：三种常用的电波传播方式

1. 视线距离 (视距)

距离 d_0 为收、发天线高度分别为 H_2 和 H_1 时的视线极限距离, 简称视距。

$$r_0 = 3.57(\sqrt{H_1} + \sqrt{H_2}) \text{ (km)}$$



专题十一：三种常用的电波传播方式

- 视距传播时, 电波是在地球周围的大气中传播的, 大气对电波产生折射与衰减。
- 由于大气层是非均匀媒质, 其压力、温度与湿度都随高度而变化, 大气层的介电常数是高度的函数。
- 在标准大气压下, 大气层的介电常数 ε_r 随高度增加而减小, 并逐渐趋近于1。



专题十一：三种常用的电波传播方式

当考虑大气的不均匀性对电波传播轨迹的影响时, 视距公式修正为

$$r_0 = 4.12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \times 10^3(m)$$

在收发天线架高一定的条件下, 实际通信距离 d 与 r_0 相比, 由三种情况:

- ① $d < 0.7r_0$, 接收点处于亮区, 该区域称为**照明区**,
- ② $r > 1.2r_0$, 接收点处于阴影区, 该区域称为**阴影区**,
- ③ $0.7r_0 < r < 1.2r_0$, 接收点处于半阴影区, 该区域称为**半阴影区**;



2. 大气对电波的衰减

大气对电波的衰减主要来自**两个方面**。

- 一方面是云、雾、雨等小水滴对电波的热吸收及水分子、氧分子对电波的谐振吸收。热吸收与小水滴的浓度有关, 谐振吸收与工作波长有关。
- 另一方面是云、雾、雨等小水滴对电波的散射, 散射衰减与小水滴半径的六次方成正比, 与波长的四次方成反比。
- 当工作波长短于5cm时, 就应该考虑大气层对电波的衰减, 尤其当工作波长短于3cm时, 大气层对电波的衰减将趋于严重。
- 10千兆赫以上的频率, 由降雨引起的电波衰减在大多数情况下是可观的。
- 在地面和卫星通信线路的设计中都要考虑由降雨引起的衰减。



结 论

在通信信道路径的设计和选择时, 要尽可能地利用起伏不平的地形或地物, 使反射波场强削弱或改变反射波的传播方向, 使其不能到达接收点, 以保证接收点场强稳定。

