

课程内容体系

天线

第1章 天线基础知识

- 专题一：基本辐射元
- 专题二：天线的电参数
- 专题三：对称振子
- 专题四：有关天线阵

第2章 简单线天线

专题五：简单线天线

第3章 行波天线

第4章 非频变天线

专题六：宽带天线

第5章 缝隙天线与微带天线

专题七：缝隙天线与微带天线

第8章 面天线

专题八：面天线

第6章:手机天线

第9章:新型天线

专题九：移动通信天线进展及天线设计软件简介



电波传播

第10章 电波传播的基础知识

第11章 地面波传播

第12章 天波传播

第13章 视距传播

专题十：电波传播基础知识

专题十一：三种常用的电波传播方式



专题十、电波传播基础知识

(第十章)



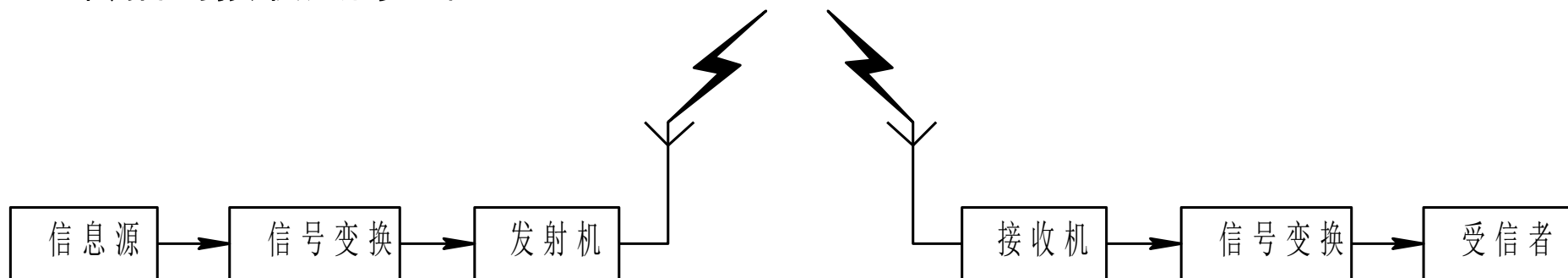
无线电波：

频率从几十赫兹到300GHz频谱范围内的电磁波

无线电波传播（Radio-wave Propagation）：

无线电波在媒质（如地表、地球大气层或宇宙空间）中的传播过程。

即，无线电波通过介质或介质分界面的连续折射或反射，由发射点传播到接收点的过程。



无线电通信系统框图

➤ 电波传播理论：

关于无线电波在地球、地球大气层和宇宙空间中传播过程的理论。

➤ 电波传播已形成电子学的一个分支

- 研究无线电波与媒质间的相互作用，阐明其物理机理；
- 计算传播过程中的各种特性参量；
- 为各种电子系统工程方案论证、最佳工作条件选择和传播误差修正等提供数据和资料。



内 容

- 一 . 电波传播概论
- 二 . 电波传播的电道计算
- 三 . 电波传播的菲涅尔区
- 四 . 传输媒质对电波传播的影响



一、电波传播概论

1. 电磁波谱
2. 历史情况
3. 研究方法
4. 基本分类
5. 与其他学科的关系
6. 基本应用
7. 发展动向

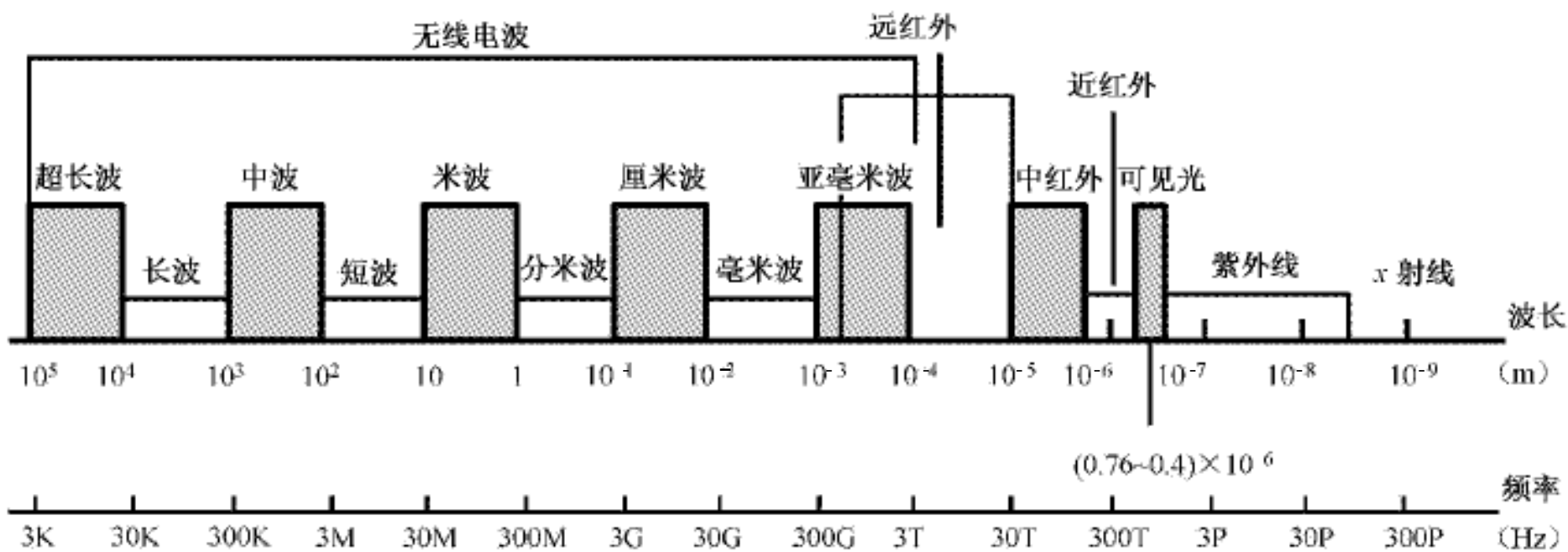


1. 电磁波谱

- 电磁波波谱的范围极其宽广，是一种巨大的资源。
- 电波传播的研究是开拓利用这些资源的重要方面。
- 根据无线电波的波长（或频率）把无线电波划分为各种不同的波段（或频段）。



无线电波在电磁波谱中的位置



无线电波段的划分

波段名	亚毫米波 Sub-mm	毫米波	厘米波	分米波	超短波 Metric wave	短波 SW	中波 MW	长波 LW	甚长波	特长波	超长波	极长波
		微波 (Microwave)										
波长 λ	0.1~1 mm	1~10 mm	1~10 cm	10~100 cm	1~10 m	10~100 m	100~1000 m	1~10 km	10~100 km	100~1000 km	10 ³ ~10 ⁴ km	10 ⁴ km 以上
频率 f	3000~300 GHz	300~30 GHz	30~3 GHz	3000~300 MHz	300~30 MHz	30~3 MHz	3000~300 kHz	300~30 kHz	30~3 kHz	3000~300 Hz	300~30 Hz	30 Hz 以下
频段名		EHF 极高频	SHF 超高频	UHF 特高频	VHF 甚高频	HF 高频	MF 中频	LF 低频	VLF 甚低频	ULF 特低频	SLF 超低频	ELF 极低频



无线电波段划分对应的典型应用

波段、频段名称		波长、频率范围	典型应用
极长波 极低频(ELF)		1 Mm~100 km 30~300 Hz	电力
超长波 甚低频(VLF)		100~10 km 3~30 kHz	导航、声纳
长波 低频(LF)		10~1 km 30~300 kHz	导航、无线电信标
中波 中频(MF)		1 km~100 m 300~3000 kHz	调幅广播、海上无线电、 海岸警戒通信、侧向
短波 高频(HF)		100~10 m 3~30 MHz	调幅广播、通信、 业余无线电
超短波 甚高频(VHF)		10~1 m 30~300 MHz	调频广播、电视、 移动通信、导航
微波	分米波 特高波(UHF)	100~10 cm 300~3000 MHz	广播电视、移动通信、卫星 定位导航、无线局域网
	厘米波 超高频(SHF)	10~1 cm 3~30GHz	卫星广播、卫星电视、 卫星通信、机载雷达、无线局域网
	毫米波 极高频(EHF)	10~1 mm 30~300 GHz	通信、雷达、射电天文、 实验研究
	亚毫米波 超极高频(SEHF)	1~0.75 mm 300~400 GHz	

2. 历史情况

➤ 对电波传播的研究最早可以追溯到1864年。

- 麦克斯韦在《电磁场的动力学理论》中建立[麦克斯韦方程组](#)，并预言了电磁波的存在。
- 1887年，赫兹用实验演示证实了电磁波的存在。
- 19世纪90年代，俄国的A.C.波波夫和意大利的G.马可尼都各自进行了多次电波传播试验。

✓ 电离层的发现是电波传播发展史上的另一个重要里程碑。

- 1919年 G.N.沃森的在短的波长上进行远距离试验表明，必须假设存在电离层，才能满意地解释实验事实。
- 1924年以后，E.V.阿普顿和M.A.F.巴尼特在英国，G.布赖特和M.A.图夫在美国用实验方法证实了电离层的存在。
- 1931年，S.查普曼提出了电离层的形成理论。



电波传播的国际合作

✓ 国际上设立了专门的研究组织

- 在国际无线电咨询委员会(CCIR)中设有第5组“非电离媒质中的传播”和第6组“电离媒质中的电波传播”;
- 在国际无线电科学联合会(URSI)中设有F委员会“遥感和波的传播”和G委员会“电离层无线电和传播”等。

✓ 中国早在1936年就开始了电离层的探测

- 中国电波传播研究所专门从事电波环境特性观测和研究的国家级专业研究所;
- 独家拥有国家电波环境观测站网和电波环境数据资源的单位, 是国家授权的电离层骚扰预报业务发布机构。
- 在北京、满洲里、重庆、广州等18个城市以及南北极等六个国家和地区设有常年电波环境观测站, 构成国家唯一的电波环境观测研究网。



3. 研究方法

✓ 理论研究

- 根据媒质的物理模型,对媒质或者媒质分界面的时空变化采用一定的数学模型加以描述, 研究传播特性就归结为求解电磁方程组的数学问题。

✓ 实验观测

- 通过大量的实地观测, 探测媒质的结构, 监视媒质的变化,积累传播特性的数据资料,从中总结出电波传播的规律。
- 电波传播观测一般在实际的环境、有代表性的不同地区进行。在同一地区的实验, 又须积累较长时间的资料, 才能反映出传播特性和媒质特性随时间、空间的变化规律。

✓ 计算机模拟

- 用计算机模拟介质特性的变化和传播过程
- 部分克服理论方法中媒质模型理想化和方程式求解困难所带来的局限性
- 部分弥补观测实验方法需要耗费大量人力、物力和时间的不足。

● 结合运用、互相配合、互相补充



4. 基本分类

◆按电波频率(波段)划分和按媒质划分

◆不同波长（或频率）的无线电波，传播特性往往不同，应用于通信的范围也不相同。

✓ 按频率分类：

极长波传播、超长波传播、长波传播、中波传播、短波传播、超短波传播、微波传播和毫米波传播等；

✓ 按媒质分类：

地下电波传播、地波传播、对流层电波传播、电离层电波传播和磁层电磁波等。



5. 与其他学科的关系

- 电波传播的基本理论出发点是电磁理论，即麦克斯韦方程组和来源于物理学中的电动力学。
- 电波传播以地球物理、气象学、大气物理和空间物理等为物理基础。
- 电波传播是电子学的一个分支学科，同电子学中其他分支的关系非常密切。
- 电波传播探测需利用通信、雷达、无线电导航和天线等技术设备，数据处理和测试控制须利用电子计算机，同时，电波传播的研究成果也为这些系统设计、运转和参数预报服务。
- 电波传播已成为地球物理、气象学、大气物理、空间物理以及天文等方面常用而又极其重要的观测手段之一。
- 无线电波用于气象和天文，形成了新的学科——无线电气象学和射电天文学。
- 电波传播理论与数学联系密切
- 利用场论和数学物理方法和数理统计等方面最新的结果，同时又促进这些方面的发展。



6. 基本应用

电波传播在无线电系统中的应用非常广泛，几乎所有的无线电系统都要涉及电波传播问题，都要利用电波传播的规律以及有关公式、图表、数据和资料等。

- 早期的电波传播研是为了建立和改善无线电通信而开展起来的。
- 随着电子技术的发展，电子系统工程日新月异，提出各种各样的电波传播问题
- 这些实际应用中的问题，成了电波传播研究的出发点和动力，促使电波传播研究向前发展。
- 电波传播每一新的发现和进展，也都为电子系统工程开辟新的技术途径。

● 电波传播对电子系统工程起着技术基础的作用



● 电波传播对电子系统工程起着技术基础的作用。

- 电子系统工作频段需要根据系统技术指标和电波传播特性来选择。
- 电子系统必须考虑的另一电波传播问题是传播衰减预计。
- 电子系统的电路设计在很大程度上是电波传播条件设计。

如通信站址选择、天线架设高度和仰角的确定以及如何采取有效的分集接收措施以减轻衰落等，都要根据电波传播规律来进行。

- 系统设备的设计还要适应传播信道的特性。

例如，传输容量或传输速率都不能超过传播信道所容许的限度。



7. 发展动向

- ① 随着科学技术的发展，电波传播正在进一步扩展研究和应用领域。例如，电磁波的生物效应、地震过程中的电磁现象等。
- ② 建立更加完善和更加精确的电波监测系统，获取更加完整的媒质和传播特性数据。
- ③ 总结出更加接近实际的数学模型，利用电子计算机，迅速提供环境数据和电波预测数据。
- ④ 更加密切地同地球物理、空间物理、天体物理、大气物理等的研究相结合，发挥电波传播在这些物理研究中的作用。



内 容

- 一 . 电波传播概论
- 二 . 电波传播的电道计算
- 三 . 电波传播的菲涅尔区
- 四 . 传输媒质对电波传播的影响



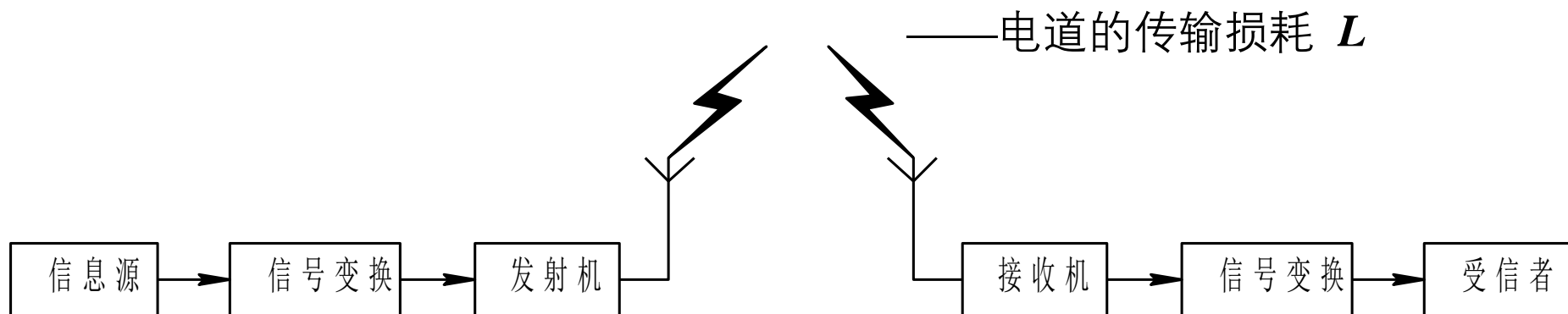
二、电波传播的电道计算



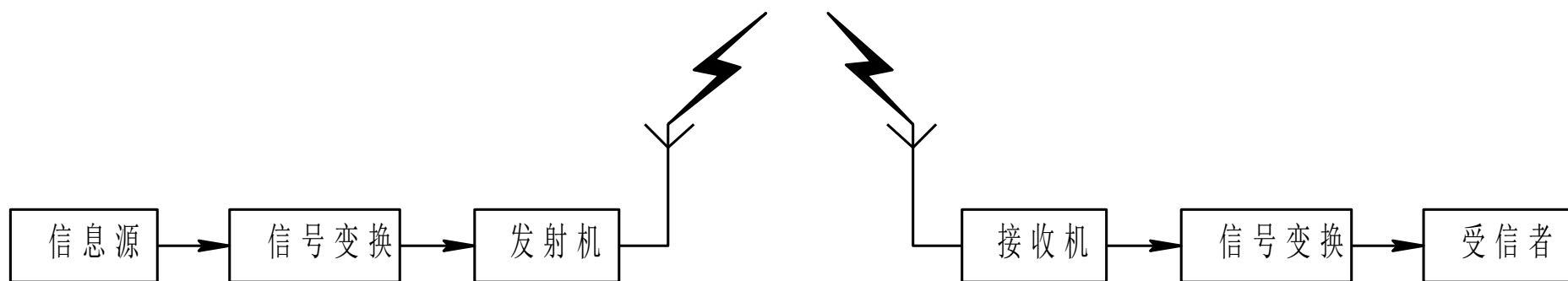
有相距 R 的A、B两地，分别架设了增益为 $G_A(G_T)$ 及 $G_B(G_R)$ 的同一频段工作的天线，当A地发射机向天线提供的输入功率为 P_{in} 时，辐射功率为 P_r ，B地的接收天线能向接收机输出的功率 P_L 有多少？

二、电波传播的电道计算

1. 自由空间电波传播的损耗 L_0
2. 传输媒质对电波的衰减损耗 L_F
3. 实际媒质中天线间的功率传输



1.自由空间电波传播的损耗 L_0



自由空间：充满均匀无耗媒质的无限大空间。

自由空间的传播损耗 L_0 ：

当发射天线和接收天线的方向系数都为1时，发射天线的辐射功率与接收天线的最佳接收功率的比值

$$L_0 = \frac{P_r}{P_L} \quad L_0 = 10 \lg \frac{P_r}{P_L} \quad dB$$

接收天线的接收功率： $P_L = S_{av} A_e = \frac{P_r}{4\pi r^2} \frac{\lambda^2}{4\pi} = \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 P_r$

故, $L_0 = 10 \lg \frac{P_r}{P_L} = 20 \lg \frac{4\pi r}{\lambda}$

$$\begin{aligned} L_0 &= 32.45 + 20 \lg f(\text{MHZ}) + 20 \lg r(\text{km}) \\ &= 121.98 - 20 \lg \lambda(\text{cm}) + 20 \lg r(\text{km}) \end{aligned}$$



自由空间电波传播的损耗 L_0 :

$$\begin{aligned} L_0 &= 32.45 + 20\lg f(\text{MHZ}) + 20\lg r(\text{km}) \\ &= 121.98 - 20\lg \lambda(\text{cm}) + 20\lg r(\text{km}) \end{aligned}$$

结论:

若不考虑天线的因素, 则自由空间中的传输损耗, 是球面波在传播的过程中随着距离的增大, 能量自然扩散而引起的, 它反映了球面波的扩散损耗。



2. 传输媒质对电波的衰减损耗 L_F

- 电波在实际的媒质（信道）中传播时是有能量损耗的，这将导致电波的衰减。

定义衰减因子A：实际情况下的接收点场强

与自由空间传播的场强之比 $A = \left| \frac{E}{E_0} \right|$

相应的衰减损耗 L_F ：
$$L_F = 20 \lg \frac{1}{A} = 20 \lg \left| \frac{E_0}{E} \right|$$

结论：

传输媒质的损耗与工作频率、传播距离、媒质电参数、地貌地物、传播方式等因素有关；

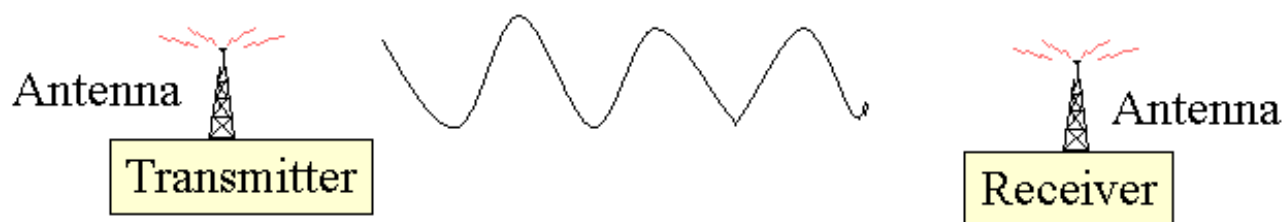


● 路径传输损耗(基本传输损耗) L_b

$$L_b = L_0 + L_F \quad dB$$



二、电波传播的电道计算



有相距 R 的A、B两地，分别架设了增益为 $G_A(G_T)$ 及 $G_B(G_R)$ 的同一频段工作的天线，当A地发射机向天线提供的输入功率为 P_{in} 时，辐射功率为 P_r ，B地的接收天线能向接收机输出的功率 P_L 有多少？

电道的传输损耗 L (Propagation Loss):

发射天线输入功率与接收天线输出功率(满足匹配条件)之比

$$L = \frac{P_{in}}{p_L} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \cdot \frac{1}{A^2 G_r G_L}$$

$$L = L_0 + L_F - G_r - G_L \quad (dB)$$

结论:

1. 在路径传输损耗为客观存在的前提下, 降低传输损耗的重要措施就是提高收发天线的增益系数。
2. 不同的传播方式、传播媒质, 信道的传输损耗不同。



例1. 在同步卫星与地面的通信系统中，卫星位于36000 km高度，工作频率为4 GHz，。若卫星上发射天线在接收天线方向上的增益系数为11.4 dB，地面站抛物面接收天线增益系数为50 dB。
试计算总传输损耗。

解： 电波的自由空间传播损耗为：

$$\begin{aligned} L_0 &= 32.45 + 20 \lg f(\text{MHz}) + 20 \lg r(\text{km}) \\ &= 32.45 + 20 \times \lg 4000 + 20 \times \lg 36\,000 = 195.58 \text{ dB} \end{aligned}$$

总传输损耗：

$$L = L_0 - G_r - G_L = 195.58 - 11.4 - 50 = 134.18 \text{ dB}$$



例2. 已知某通信系统工作频率为900MHz,通信距离为15 km, 计算自由空间的传播损耗。如果频率降低为450MHz, 传播损耗有如何变化?

解：由自由空间的传播损耗：

$$\begin{aligned} L_0 &= 32.45 + 20 \lg f(\text{MHz}) + 20 \lg r(\text{km}) \\ &= 32.45 + 20 \times \lg 900 + 20 \times \lg 15 = 115.05 \text{ dB} \end{aligned}$$

由自由空间的传播损耗表达式可以看出，当频率降低一半时，自由空间的传播损耗将降低： $20\lg 2 = 6\text{dB}$



例3 (P.229 例10-2-1)

某微波中继站通信的段距为50km，工作波长为7.5cm，收发天线的增益系数都为45dB，馈线与分路系统一端的损耗为3.6dB，该路径的衰减因子为0.7。

计算电道的总传输损耗。

解： 已知 $r = 50\text{km}$ $\lambda = 7.5\text{cm}$ $L_0 = 121.98 - 20\lg \lambda(\text{cm}) + 20\lg r(\text{km})$

路径的衰减因子为0.7 $A = 0.7$ $L_F = 20\lg \frac{1}{A}$

$$G_r = 45\text{dB} \quad G_L = 45\text{dB}$$

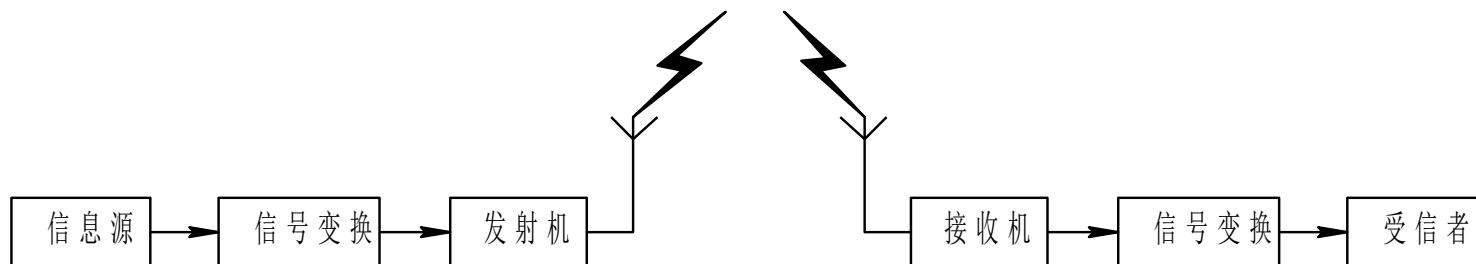
$$L = L_0 + L_F - G_r - G_L \quad (\text{dB})$$



例3 (P.229 例10-2-1)

某微波中继站通信的段距为50km，工作波长为7.5cm，收发天线的增益系数都为45dB，馈线与分路系统一端的损耗为3.6dB，该路径的衰减因子为0.7。

计算电道的总传输损耗；若发射天线的输入功率为10W,求受信电平。



无线电通信系统框图

$$L = L_0 + L_F - G_r - G_L \quad (dB)$$

$$L = L_0 + L_F + 3.6 - G_r + 3.6 - G_L \quad (dB)$$

专题十：电波传播基础知识

解：自由空间传播损耗为

$$L_0 = 121.98 + 20 \lg r(\text{km}) - 20 \lg \lambda(\text{cm}) = 121.98 + 20 \times \lg 50 - 20 \times \lg 7.5 = 138.46 \text{ dB}$$

考虑到馈线及分路系统两端损耗后，该电道的总传输损耗为

$$L = L_0 + L_F + 3.6 - G_r + 3.6 - G_L = 138.46 - 20 \lg 0.7 - 2 \times 45 + 2 \times 3.6 = 58.8 \text{ dB}$$

$$\text{又} \quad L = \frac{P_{in}}{P_L} \qquad L_F = 20 \lg \frac{1}{A}$$

$$\text{即: } L(\text{dB}) = P_{in}(\text{dBm}) - P_L(\text{dBm})$$

$$\text{其中, 发射天线输入功率 } P_{in} = 10\text{W} = 40\text{dBm}$$

于是，收信电平即接收天线的输出功率为：

$$P_L(\text{dBm}) = P_{in}(\text{dBm}) - L(\text{dB}) = 40 - 58.8 = -18.8\text{dBm}$$



作业： P.232

2、3



内 容

- 一 . 电波传播概论
- 二 . 电波传播的电道计算
- 三 . 电波传播的菲涅尔区
- 四 . 传输媒质对电波传播的影响

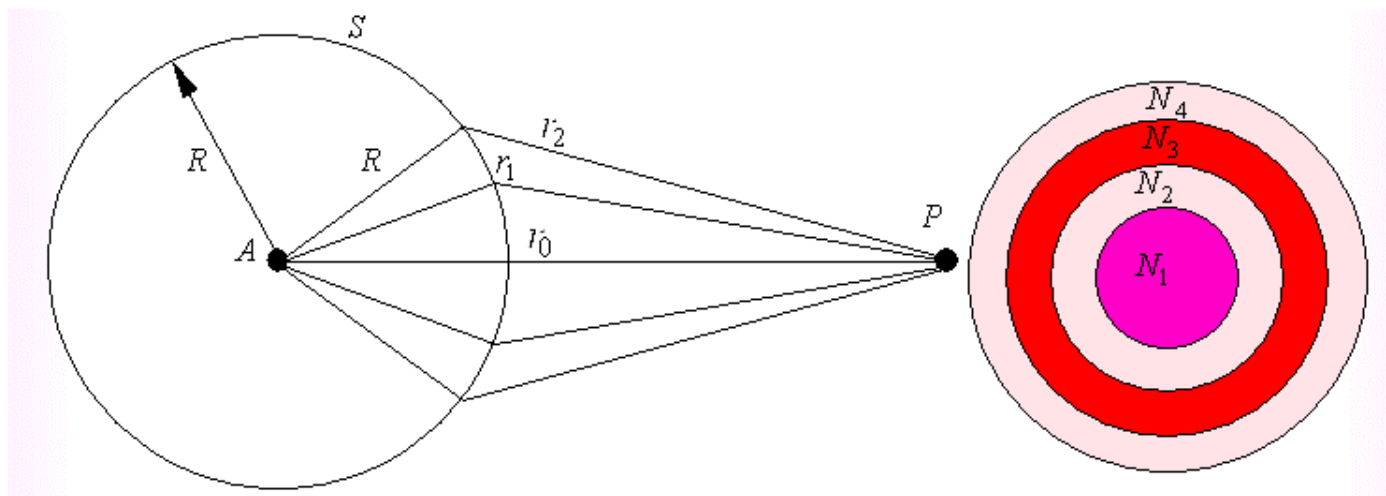


三、电波传播的菲涅尔区

- 菲涅尔半波带
- 第一菲涅尔区
- 第一菲涅尔区的半径
- 第一菲涅尔椭球



三、电波传播的菲涅尔区



- 菲涅尔半波带

剖面图

迎视图

(环形带 N_n , $n=1,2,3\cdots$)

$$\left. \begin{aligned} R + r_1 &= R + r_0 + \lambda / 2 \\ R + r_2 &= R + r_0 + 2(\lambda / 2) \\ &\vdots \\ R + r_n &= R + r_0 + n(\lambda / 2) \end{aligned} \right\}$$

● 第一菲涅尔区

$$E_1 > E_2 > E_3 > \dots E_n > E_{n+1} > \dots$$

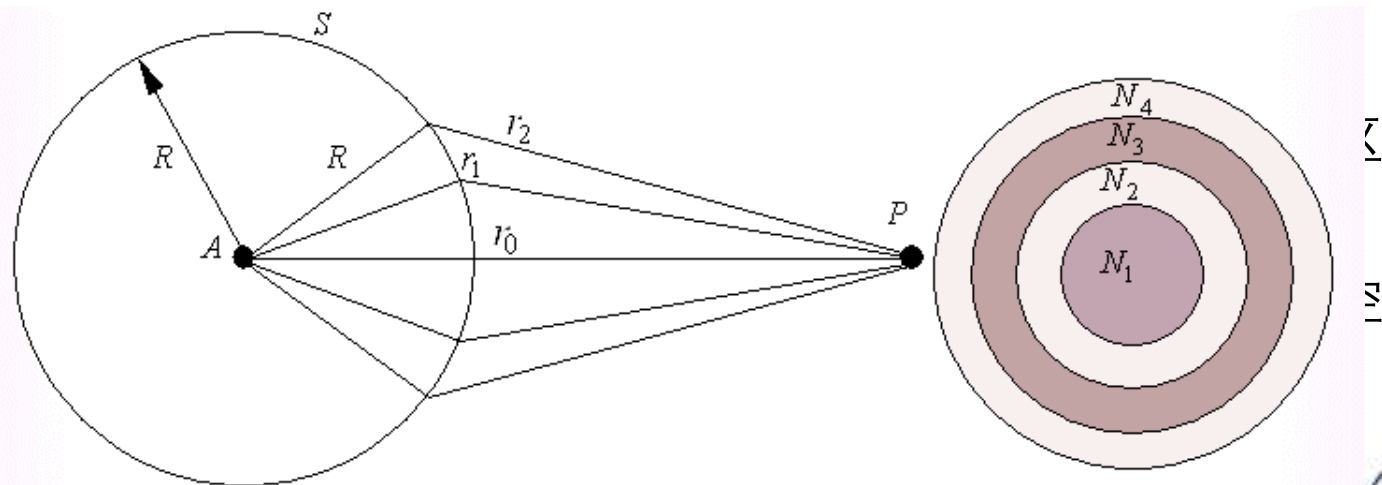
$$E = E_1 - E_2 + E_3 - E_4 + \dots$$

$$E = \frac{E_1}{2} + \left(\frac{E_1}{2} - E_2 + \frac{E_3}{2}\right) + \left(\frac{E_3}{2} - E_4 + \frac{E_5}{2}\right) + \left(\frac{E_5}{2} - E_6 + \frac{E_7}{2}\right) + \dots$$

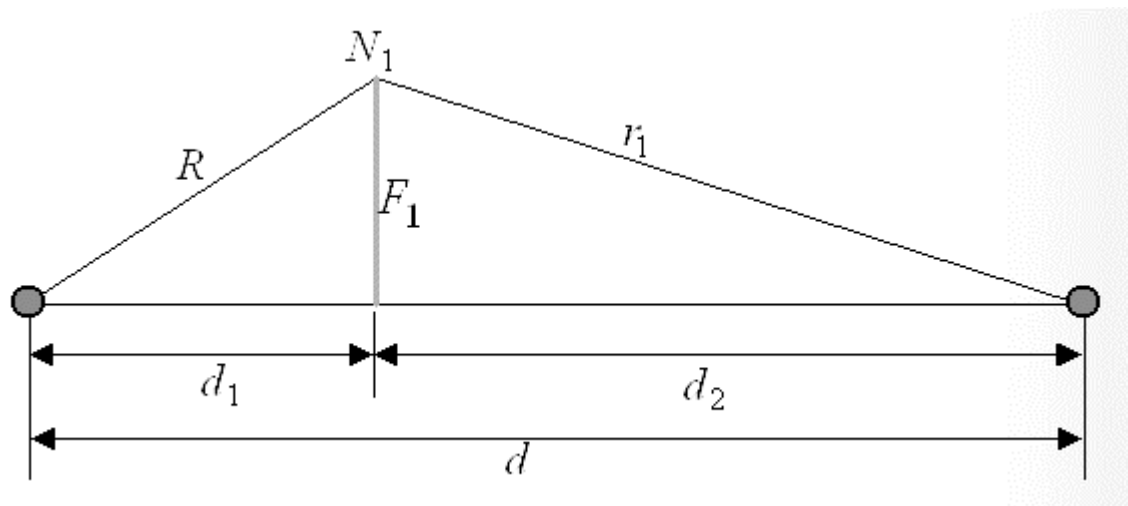
$$E \approx \frac{E_1}{2}$$

结 论

1. 在自由传播的
2. 只要中间传播



- 第一菲涅尔区的半径



$$\sqrt{F_1^2 + d_1^2} + \sqrt{F_1^2 + d_2^2} = d + \lambda/2$$

$$d_1 \gg F_1 \quad d_2 \gg F_1 \Rightarrow F_1 = \sqrt{\frac{d_1 d_2 \lambda}{d}}$$

$$F_{1\max} = \frac{1}{2} \sqrt{d\lambda}$$

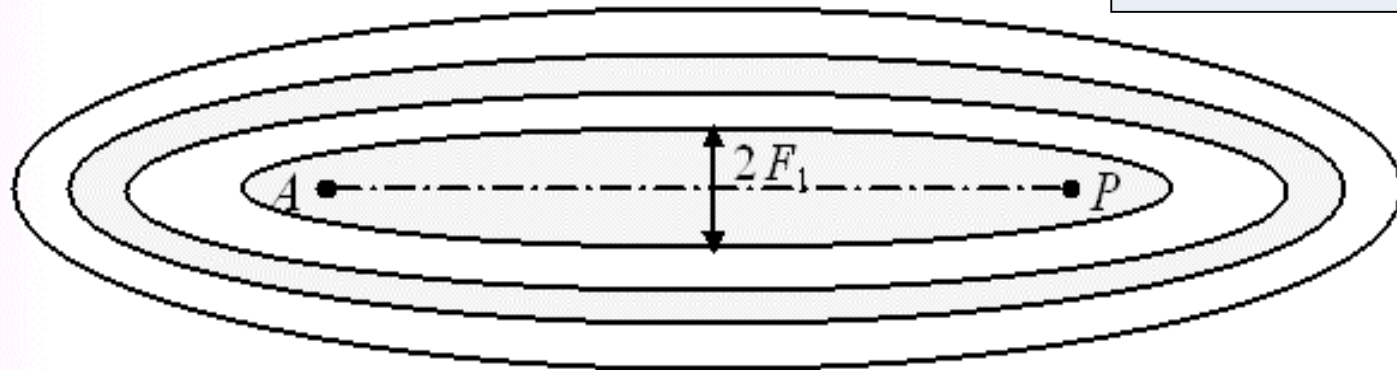
第一菲涅尔椭球：

- 划分菲涅尔半波带的球面是任意选取的；
- 球面半径变化时，菲涅尔区的尺寸变化，但几何定义不变，即以收发两点为焦点的椭球；
- 考虑以传播路径为轴线的旋转对称性，不同位置的同一菲涅尔半波带的外围轮廓是以收发两点为焦点的旋转椭球。



第一菲涅尔椭球为电波传播的主要通道

$$F_{1\max} = \frac{1}{2} \sqrt{d\lambda}$$

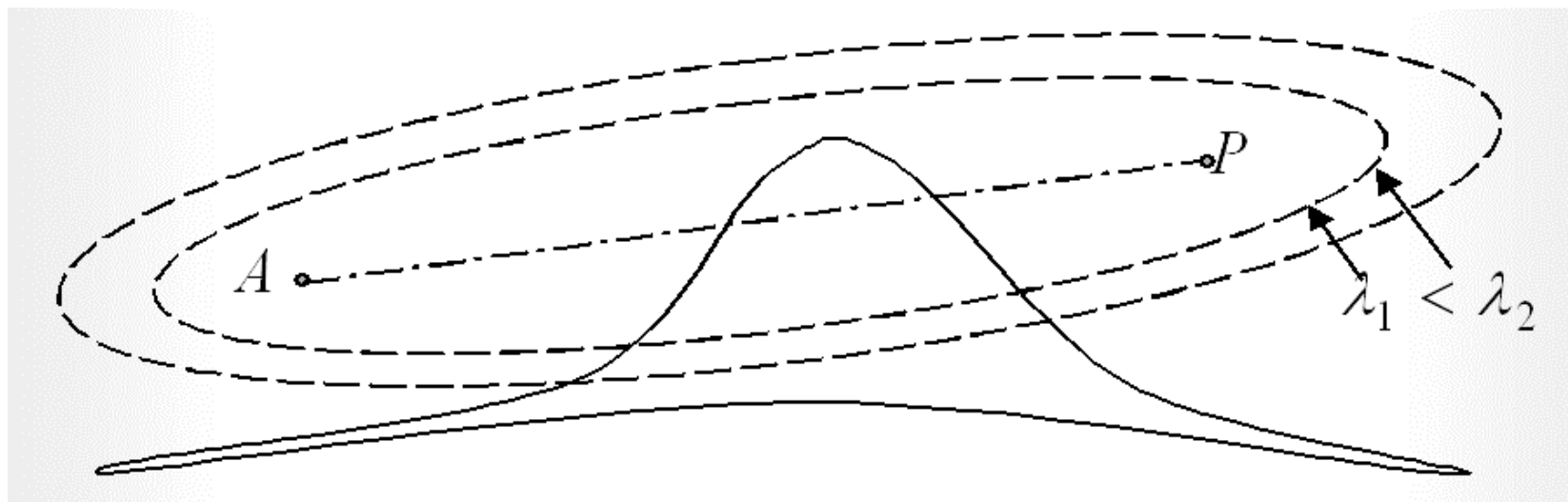


讨论：

1. 波长越短第一菲涅尔区半径越小，对应的第一菲涅尔椭球越细长；
例如光学波段纯粹的射线传播；
1. 当地形地貌中的凸出物未进入第一菲涅尔椭球，则收发两点之间可视为自由空间传播；
2. 即使凸出物并未挡住收发两点间的几何射线，但已进入第一菲涅尔椭球，则收发两点之间不能视为自由空间传播；

• 电波绕射现象

电波在传播过程中能够绕过障碍物到达接收点的现象。



结论：

$$F_{1\max} = \frac{1}{2} \sqrt{d\lambda}$$

- 障碍物高度一定时，电波波长越长，电波传播的主要通道横截面积越大相对遮挡面积就越小，接收点的场强就越大，因此波长越长（频率越低），则绕射能力越强。

四、传输媒质对电波传播的影响

- (1) 传输媒质对电波的衰减损耗 L_F
- (2) 衰落现象
- (3) 传输失真
- (4) 电波传播方向的变化



(1) 传输媒质对电波的衰减损耗 L_F

$$L_F = 20\lg \frac{1}{A} = 20\lg \left| \frac{E_0}{E} \right|$$

结论:

传输媒质的损耗与工作频率、传播距离、媒质电参数、地貌地物、传播方式等因素有关;



(2) 衰落现象

衰落：指信号电平随时间的随机起伏。

根据引起衰落的原因,可分为吸收型衰落和干涉型衰落。



衰落

吸收型衰落： 由于传输媒质电参数的变化, 使得信号在媒质中的衰减发生相应的变化而引起的。

- 由于气象的随机性, 这种吸收的强弱也有起伏, 形成信号的衰落。
- 由这种原因引起的信号电平的变化较慢, 所以称为**慢衰落**;

干涉型衰落： 主要是由随机多径干涉现象引起的。

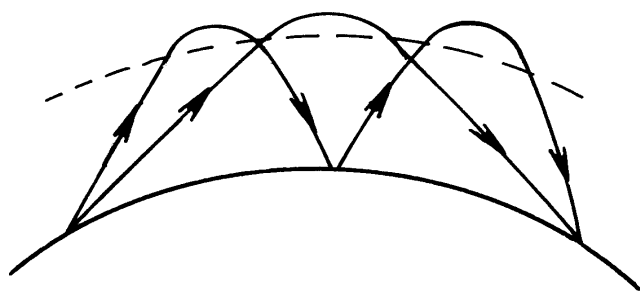
- 这种起伏的周期很短, 信号电平变化很快, 故称为**快衰落**;
- 在移动通信信道中表现得明显;

- 信号的衰落现象严重影响电波传播的**稳定性**和系统的**可靠性**, 需要采取有效措施 (如分集接收等) 来加以克服。

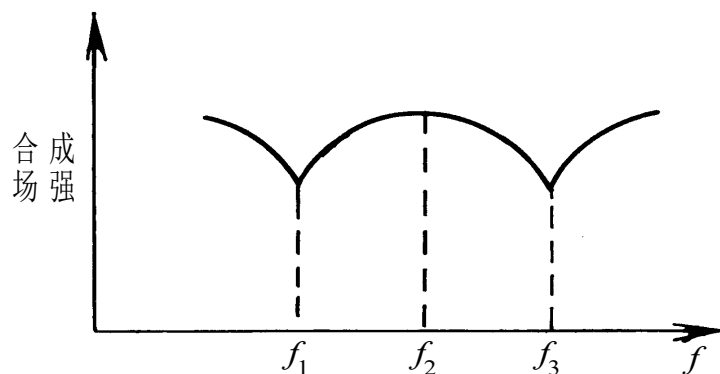


(3) 传输失真

- 无线电波通过媒质还会产生失真： 振幅失真和相位失真。
- 产生失真的原因： 媒质的色散效应、 随机多径传输效应。



(a)



(b)

多径传输效应

(4) 电波传播方向的变化

- 当电波在无限大的均匀、线性媒质内传播时, 射线是沿直线传播的。
- 电波传播实际所经历的空间场所是复杂多样的:
 - 不同媒质的分界处将使电波**折射**、**反射**;
 - 媒质中的不均匀体将使电波产生**散射**;
 - 球形地面和障碍物将使电波产生**绕射**;
 - 某些**传输媒质的时变性**使射线轨迹随机变化, 使得到达接收天线处的射线入射角随机起伏, 使接收信号产生严重的衰落。



- 电波在各种特定媒质中传播的过程中，各种媒质效应对信息传输的质量和可靠性常常产生严重的影响；
- 各种媒质中各频段电磁波的传播效应是电波传播研究的主要对象。

三种常用的电波传播方式：

一． 地面波传播

二． 天波传播

三． 视距传播



作业 (第10章 电波传播的基础知识)

P.232 2、3 、 4、 6

