



# 第3讲 电磁波的发射与传播

## 1. 关于天线的事情

**天线：**发射与接收电磁波的装置

- ◆ 天线是我们在这个世界上的电子眼和电子耳；
- ◆ 天线让我们与世界紧密相连；
- ◆ 天线对于当下的人类文明不可或缺。

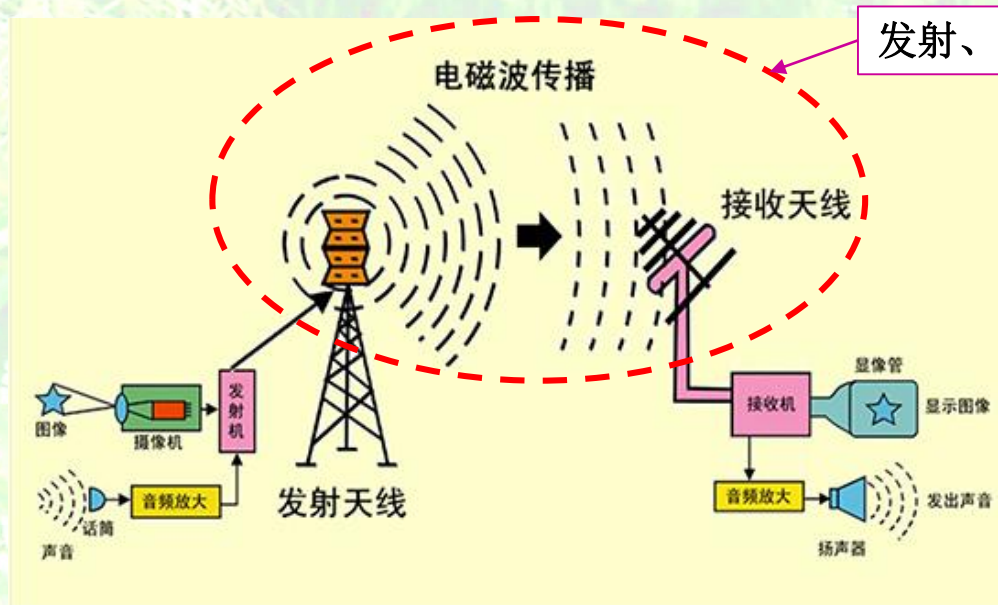


赫兹

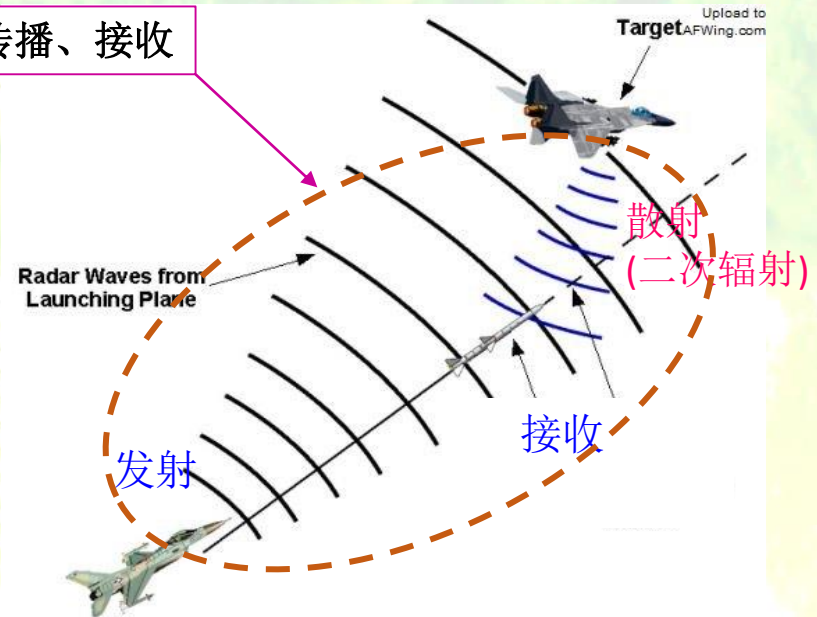
Hertz在1886年证实了电磁波



赫兹的实验装置



发射、传播、接收





# 第3讲 电磁波的发射与传播

我国的天线产业年产值： $>1000$ 亿元？

- ◆ 通信基站天线：每年250万副，产值~300亿元
- ◆ 移动终端天线：10 亿副，产值~100亿元
- ◆ 广播电视天线：
- ◆ 陆地雷达天线：
- ◆ 舰载通信/雷达天线：
- ◆ 机载通信/雷达天线：
- ◆ 弹载天线：
- ◆ 星载天线：
- ◆ 其他科研&开发用途天线：

各企业的射频系统部负责射频  
前端研发（天线、振荡器、混  
频器、滤波器、放大器）



通信基站天线



手机天线



气象雷达天线



电视接收天线

长波广播和对舰艇、潜艇通信天线





# 第3讲 电磁波的发射与传播

## 谁在生产/研制天线？

- ◆ 基站与移动：安菲诺、圣韵、安岗、杰盛康、飞创、斯凯克斯、加利 .....
- ◆ 机载：中电集团14所，航天23所 ....
- ◆ 舰载：中电集团54所 .....
- ◆ 星载：航天504所 .....
- ◆ 弹载：航天一院 .....
- ◆ 大学：成电、西电、清华、东南 ....



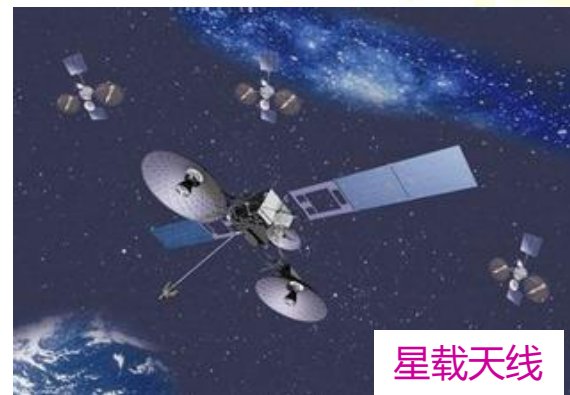
陆地雷达天线



机载天线



舰载天线



星载天线

弹载天线





# 第3讲 电磁波的发射与传播

## 天线简史

- ◆ 1864, J. C. Maxwell, 预言电磁波的存在, 光也是电磁波;
- ◆ 1886, H. R. Hertz, 在实验室中产生并检测到电磁波;
- ◆ 1901, G. Marconi, 进行了跨大西洋试验, 从英国到美国;
- ◆ 1940's, 第二次世界大战发明了雷达, 开创了天线发展新纪元;
- ◆ 1960's--1990's, 由于计算机的发展与应用, 使得复杂结构的分析与设计成为可能, 发明了各种类型的天线, 包括各种机载、舰载、星载天线, 以及气象雷达和射电天文天线等。
- ◆ 1990's 以后, 个人无线通信的蓬勃发展, 促进了小天线的发展。

文献:

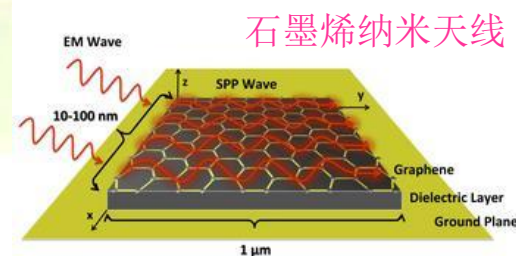
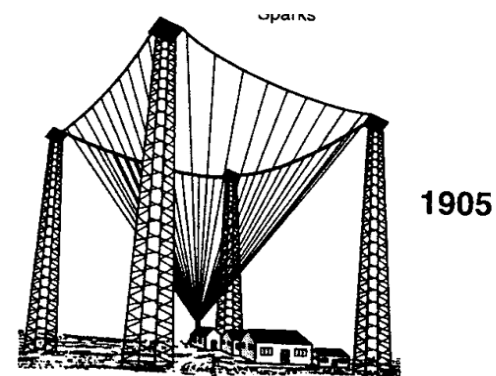
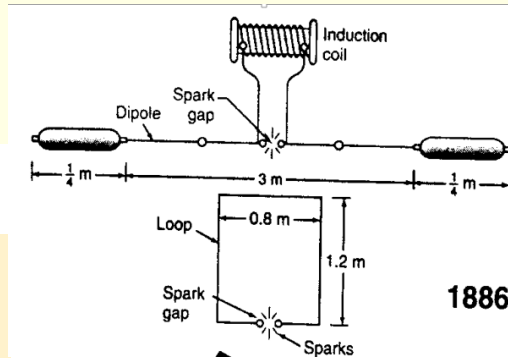
- ◆ S. Stutzman, "Bibliography for Antennas," *IEEE Antennas Propagat. Mag.*, vol.32, pp.54-57, August 1990.

国际“天线与传播”领域最权威的杂志



IEEE TRANSACTIONS ON  
**ANTENNAS AND  
PROPAGATION**

A PUBLICATION OF THE IEEE ANTENNAS AND PROPAGATION SOCIETY







## 第3讲 电磁波的发射与传播



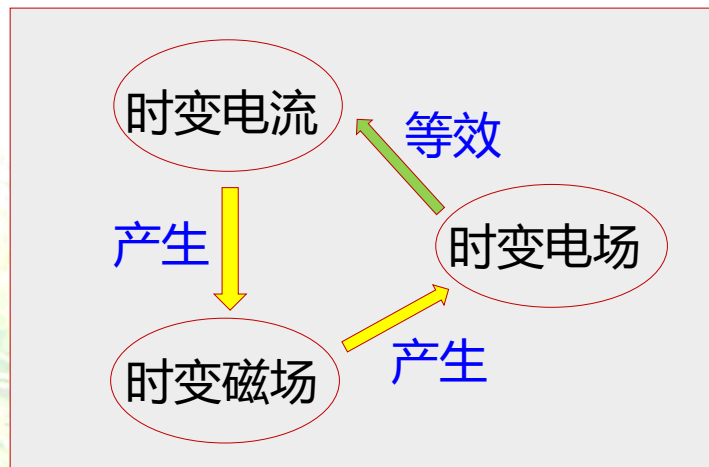
我国建造的世界最大射电天文望远镜（贵州平塘）



# 第3讲

## 电磁波的发射与传播

### 2. 电磁辐射条件和场区划分



时变电流产生时变磁场

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_c + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \end{cases}$$

时变电场可以看成是时变电流，产生时变磁场

时变磁场产生时变电场

因此，时变电流是产生时变电磁场（电磁波）的条件；因为  $\mathbf{J} = \rho \mathbf{v}$ ；所以变速（加速）运动的电荷是产生电磁波的条件。但是电磁波一旦产生，则源无须继续存在，因为时变电场与时变电流等效。

- ◆ 典型的时变电流就是交变交流，即交流会产生产生电磁辐射
- ◆ 直流电在通过导线的拐角处以及在开关通断瞬间会产生电磁辐射



# 第3讲 电磁波的发射与传播

## ◆ 局域分布电流源产生的电磁场

考虑“时谐场”。对任何物理量

$$f(\mathbf{r}, t) = A \cos(\omega t + \varphi) = \text{Re} [F(\mathbf{r}, \omega) e^{j\omega t}]$$

则 
$$\begin{cases} |F(\mathbf{r}, \omega)| = A \\ \arg[F(\mathbf{r}, \omega)] = \varphi \end{cases}$$

$$f(\mathbf{r}, t) \xleftrightarrow{\text{一一对应}} F(\mathbf{r}, \omega)$$

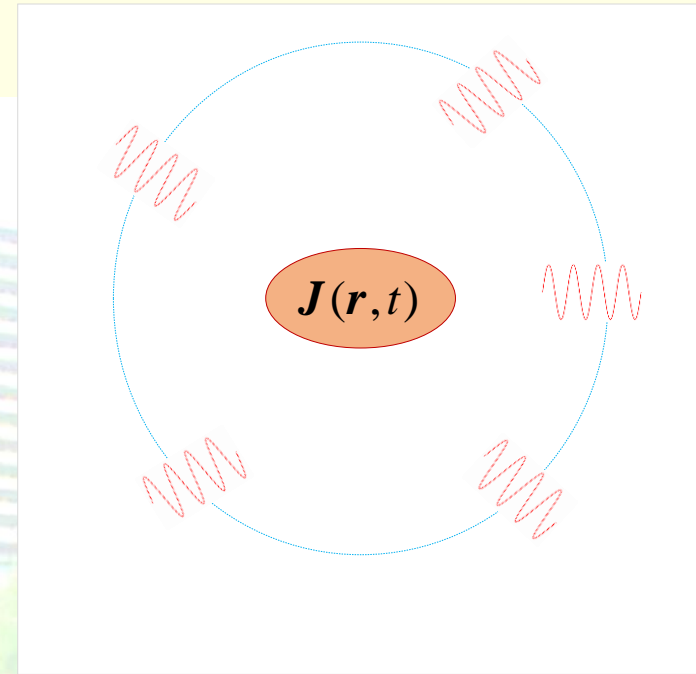
局域分布电流源产生的电磁场:

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \mu_0 \int_V G(R) \mathbf{J}(\mathbf{r}') dV' \quad G(R) = \frac{e^{-jk_0 R}}{4\pi R}, \quad R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|, \quad k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = \frac{\omega}{c}$$

$$\begin{cases} \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{A} + \frac{\nabla \nabla \cdot \mathbf{A}}{j\omega \epsilon_0 \mu_0} \triangleq -\mathcal{L}(\mathbf{J}) & \mathcal{L}(\mathbf{X}) = jk_0 \int_V \left[ G(R) \mathbf{X}(\mathbf{r}') + \frac{1}{k_0^2} \nabla G(R) \nabla' \cdot \mathbf{X}(\mathbf{r}') \right] dV' \\ \mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{A} \triangleq -\mathcal{K}(\mathbf{J}) & \mathcal{K}(\mathbf{X}) = \int_V [\mathbf{X}(\mathbf{r}') \times \nabla G(R)] dV' \end{cases}$$

特别地，对辐射远场:

$$\begin{cases} \mathbf{A}(r, \theta, \phi) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \mathbf{N}(\theta, \phi) \\ \mathbf{N}(\theta, \phi) = \int_V \mathbf{J}(\mathbf{r}') e^{jk_0 \hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}'} dV' \end{cases} \quad \begin{cases} \mathbf{E} = -j\omega [(\hat{\mathbf{r}} \times \mathbf{A}) \times \hat{\mathbf{r}}] \\ \mathbf{H} = -j \frac{k_0}{\mu_0} (\hat{\mathbf{r}} \times \mathbf{A}) = \frac{1}{Z_0} \hat{\mathbf{r}} \times \mathbf{E} \end{cases}$$

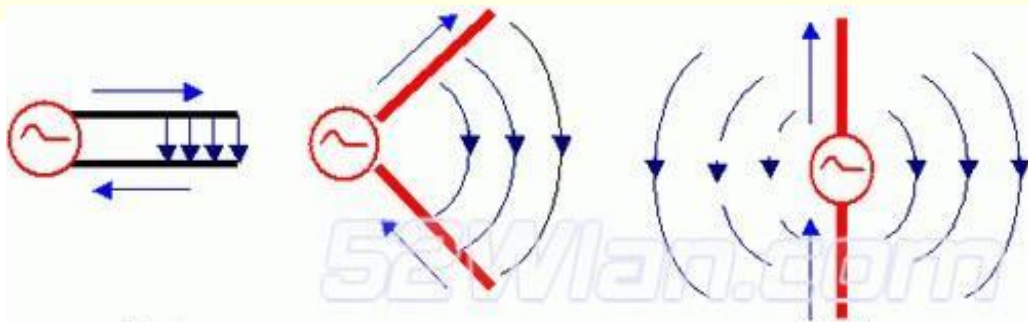






# 第3讲 电磁波的发射与传播

- ◆ 一对振荡的电荷/电偶极子/  
电流元是基本的辐射单元



**电流元：**  $(I_0 dl)$   $\mathbf{J} dV' = (I_0 dl) \hat{z}$

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \mu_0 (I_0 dl) G(\mathbf{r}) \hat{z}$$

$$E_r = Z_0 \frac{jk_0}{2\pi} (I_0 dl) \cos \theta \left[ \frac{1}{jk_0 r} + \frac{1}{(jk_0 r)^2} \right] \frac{e^{-jk_0 r}}{r}$$

$$E_\theta = Z_0 \frac{jk_0}{4\pi} (I_0 dl) \sin \theta \left[ 1 + \frac{1}{jk_0 r} + \frac{1}{(jk_0 r)^2} \right] \frac{e^{-jk_0 r}}{r}$$

$$H_\phi = \frac{jk_0}{4\pi} (I_0 dl) \sin \theta \left( 1 + \frac{1}{jk_0 r} \right) \frac{e^{-jk_0 r}}{r}$$

**中场：**  $k_0 r \sim 1$

$$S_r = \frac{1}{2} E_\theta H_\phi^* \propto \frac{1}{r^2} \left[ 1 - \frac{1}{(jk_0 r)^3} \right]$$

**近场：**  $k_0 r \ll 1$

$$E_r \propto \frac{j}{r^3} \quad E_\theta \propto \frac{j}{r^3} \quad H_\phi \propto \frac{1}{r^2}$$

$$S_r = \frac{1}{2} E_\theta H_\phi^* = \text{纯虚数} \quad \text{不向外辐射能量}$$

**远场：**  $k_0 r \gg 1$

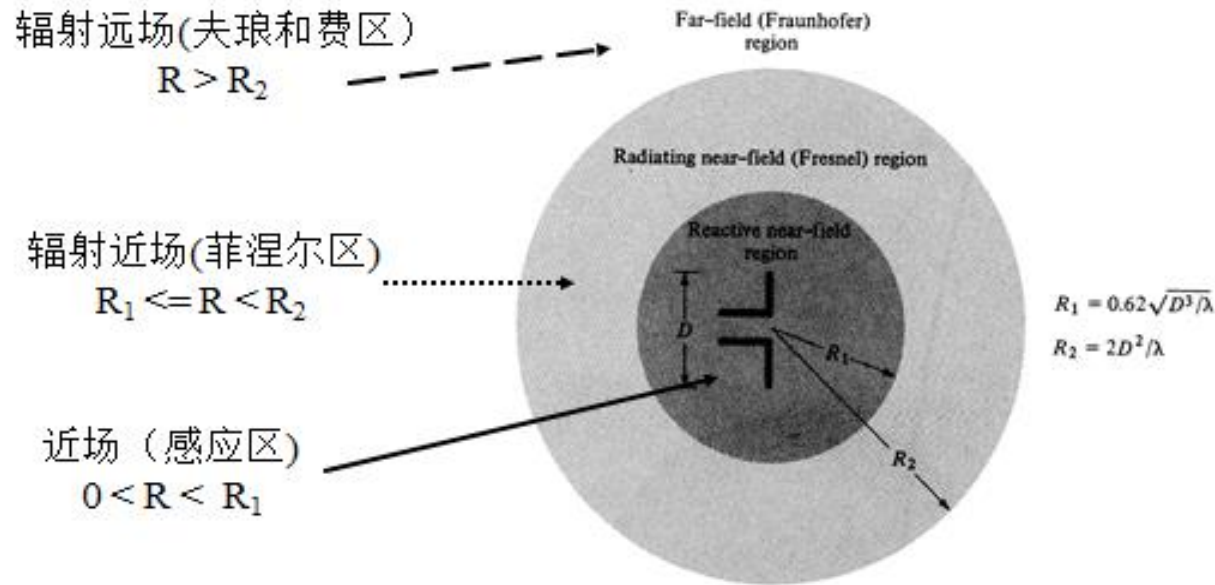
$$E_r \propto \frac{1}{r^2} \quad E_\theta \propto \frac{j}{r} \quad H_\phi \propto \frac{j}{r}$$

$$S_r = \frac{1}{2} E_\theta H_\phi^* = \text{实数} \quad \text{向外辐射能量}$$



# 第3讲 电磁波的发射与传播

## ◆ 天线场区划分



对于天线设计:

- ◆ 近场涉及到天线“匹配”，即能量能否被有效地辐射出去
- ◆ 远场涉及到辐射的“波束”形状能否满足应用需要
- ◆ 中场区的场分布更复杂，在受限场地实验研究中需注意

对任何天线，如果天线结构上的电流分布或包围结构的一个封闭面上的等效电流分布已知，则辐射远场可计算：

$$\begin{cases} N(\theta, \phi) = \int_V \mathbf{J}(\mathbf{r}') e^{jk_0 \hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}'} dV' \\ \mathbf{A}(r, \theta, \phi) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} N(\theta, \phi) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \mathbf{E} = -j\omega [(\hat{\mathbf{r}} \times \mathbf{A}) \times \hat{\mathbf{r}}] \\ \mathbf{H} = -j \frac{k_0}{\mu_0} (\hat{\mathbf{r}} \times \mathbf{A}) = \frac{1}{Z_0} \hat{\mathbf{r}} \times \mathbf{E} \end{cases}$$



# 第3讲 电磁波的发射与传播

## 3. 天线的基本参数及物理含义

(a) 辐射强度：通过单位立体角的辐射功率

$$U(\theta, \phi) = \frac{dP_{\text{rad}}}{d\Omega} = r^2 S_r = \frac{Z_0}{8\lambda^2} (|N_\theta|^2 + |N_\phi|^2)$$

(b) 辐射功率：通过所有方向辐射的总功率

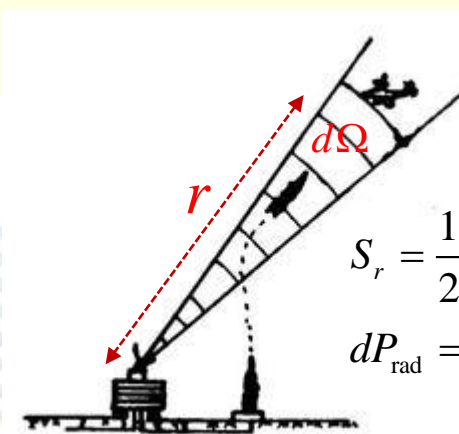
$$P_{\text{rad}} = \int U(\theta, \phi) d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \phi) (\sin \theta d\theta d\phi)$$

(c) 方向性：辐射强度与平均辐射强度之比

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{P_{\text{rad}} / 4\pi} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{\text{rad}}}$$

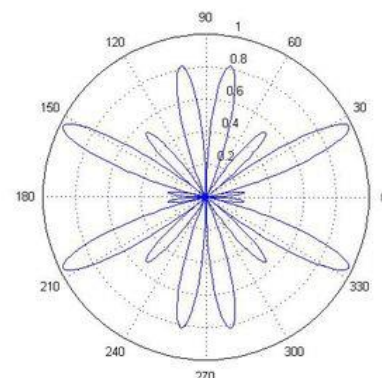
(d) 增益：辐射强度与参考辐射强度之比，参考强度是假设发射机提供的功率被各向均匀辐射出去的强度

$$G(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{P_{\text{in}} / 4\pi} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{\text{in}}}$$



$$S_r = \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*]$$

$$dP_{\text{rad}} = S_r (r^2 d\Omega)$$



辐射方向性

被辐射出去的功率

$$P_{\text{rad}} = \eta P_{\text{in}}$$

发射机提供的功率

天线效率



# 第3讲 电磁波的发射与传播

(e) **波束立体角**：如果全部辐射功率以最大辐射强度辐射所占用的立体角

$$\Omega = \frac{P_{\text{rad}}}{U_{\text{max}}}$$

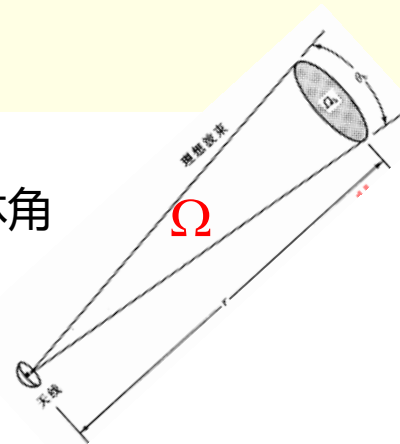
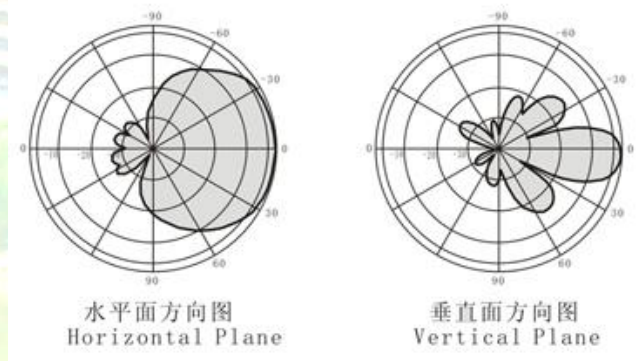
覆盖整个空间需要的波束数量：

$$M = \frac{4\pi}{\Omega} = \frac{P_{\text{rad}}}{U_{\text{max}}} = \frac{4\pi U_{\text{max}}}{P_{\text{rad}}} = D_{\text{max}}$$

(f) **方向图**：描述辐射场特性的空间图形  
(比如归一化增益方向图)

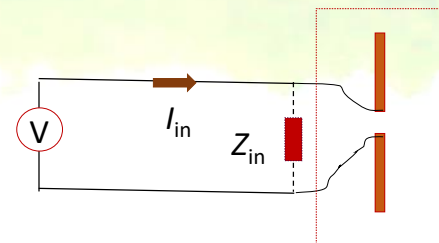
**E-平面**：最大辐射方向与电场矢量方向所确定的平面

**H-平面**：最大辐射方向与磁场矢量方向所确定的平面



(g) **输入阻抗**：天线馈电端口电压与电流之比，  
或者是电场与磁场之比。

$$Z_{\text{in}} = V / I_{\text{in}}$$



(h) **工作带宽**：某一特性满足某一准则下的工作频率范围（某一特性：如输入阻抗、方向图；某一准则：如输入阻抗变换或方向图恶化50%）



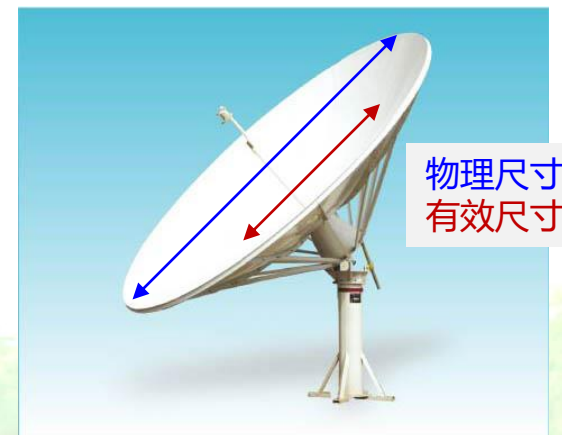


# 第3讲 电磁波的发射与传播

(i) **有效面积**：接收天线负载上所获得的功率与入射波功率流密度成正比，这个比例系数称为天线的有效面积

$$P_T = A_e \cdot S_i \quad A_e = \frac{P_T}{S_i}$$

$$\begin{cases} A_e = \text{天线有效面积} \\ P_T = \text{负载上获得的功率} \\ S_i = \text{入射波功率流密度} \end{cases}$$



◆ 任何一部天线的最大有效面和最大方向性具有如下关系：

$$A_{em} = \frac{\lambda^2}{4\pi} D_{\max}$$

最大有效面积 = 孔径效率 \* 物理面积

$$A_{em} = \eta A_p$$

线天线没有明确的物理面积，但是可以有很大的有效面积！

这个公式把天线的物理参数与电性能参数连接起来！

方向性越强（波束越尖细），要求天线有效面积越大。

设一地面卫星接收天线的增益要求达到40dB, 问天线的最小直径多少？(1) C波 (4GHz), (2) K波段 (20GHz)

$$\lambda_1 = \frac{c}{f_1} = 7.5 \text{ cm}, \quad \lambda_2 = \frac{c}{f_2} = 1.5 \text{ cm}$$

$$\begin{cases} A_1 = \frac{\lambda_1^2}{4\pi} \times 10^{40/10} = 44762 \text{ cm}^2 \\ d_1 = 2\sqrt{A_1 / \pi} = 239 \text{ cm} \end{cases}$$

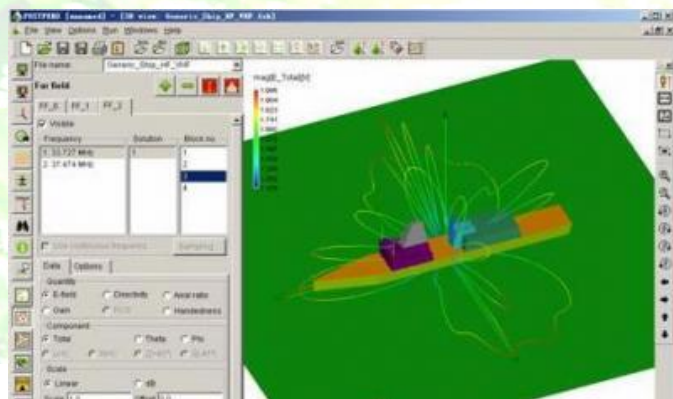
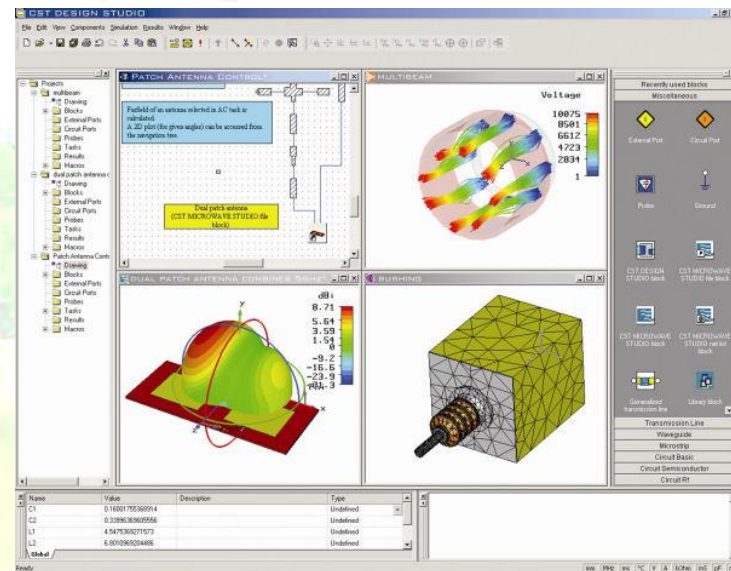
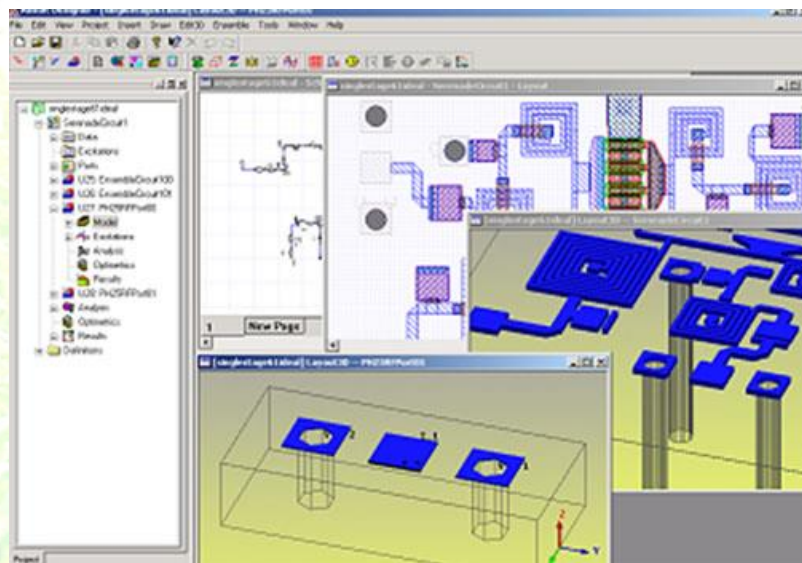
$$d_2 = d_1 / 5 = 48 \text{ cm}$$



# 第3讲 电磁波的发射与传播

## 4. 关于天线设计问题

现在有丰富的电磁软件可以用于天线与射频前端分析设计，比如 HFSS (High Frequency Structure Simulator)、CST (Computer Simulation Technology)、FEKO (任意复杂电磁场计算)。这些国外软件每年在中国攫取超过 1 亿元。



### 天线分类

- ◆ 按结构：线天线、面天线、孔径天线、微带天线、阵列天线
- ◆ 按频率：窄带、宽带、超宽带、脉冲、频率无关天线
- ◆ 按用途：手机、终端、基站、广播/电视、机载....

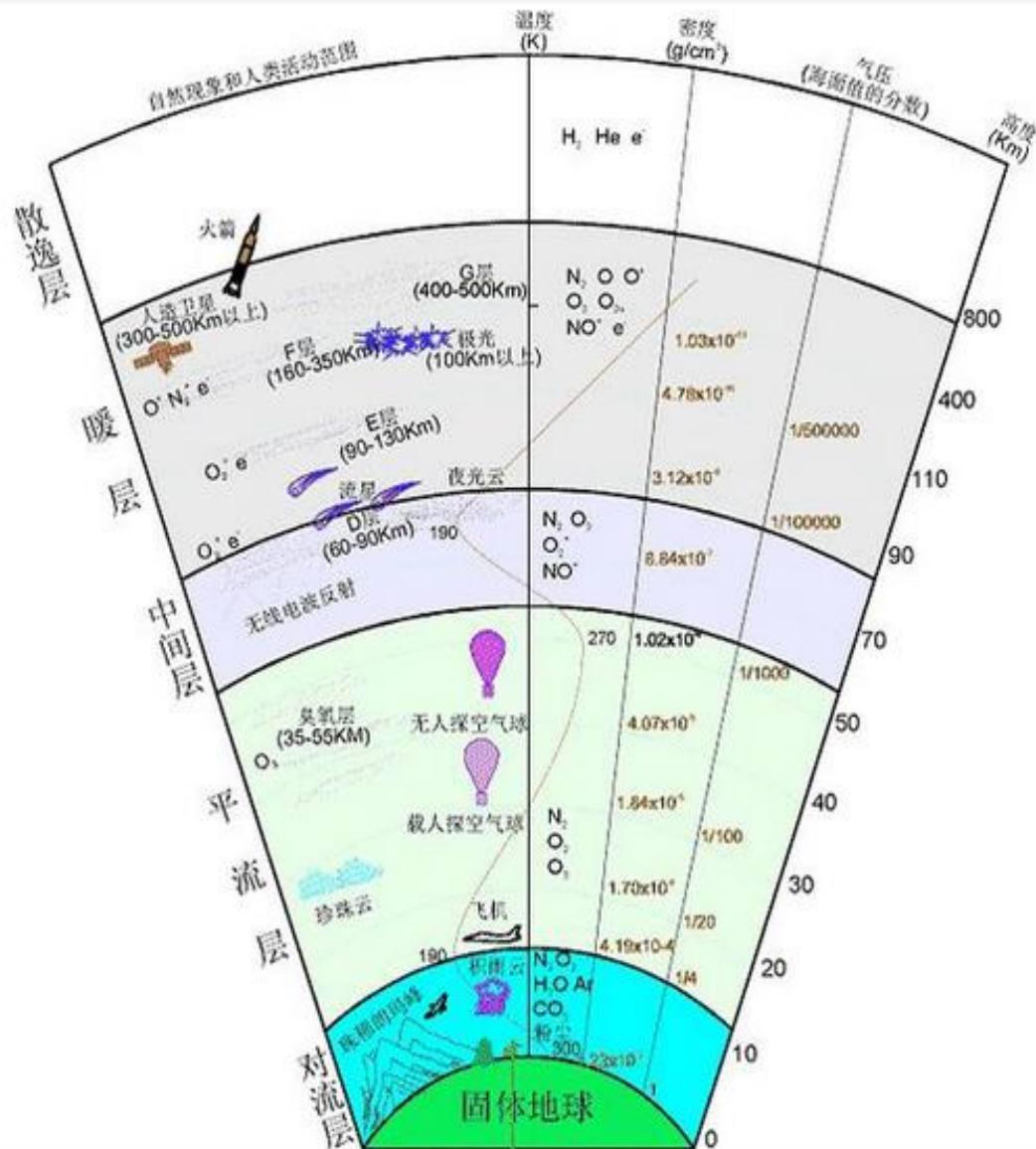
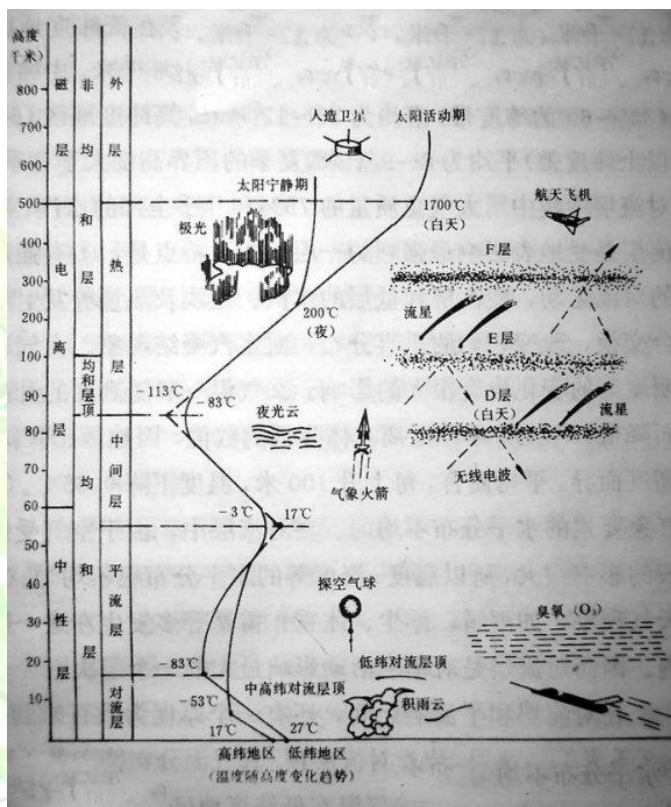




# 第3讲 电磁波的发射与传播

## 5. 电波传播方式

### ◆ 基本环境--大气分层



国内谁在研究电波传播？

- ✓ 中电集团22所 .....
- ✓ 电子科大、西电、武汉大学

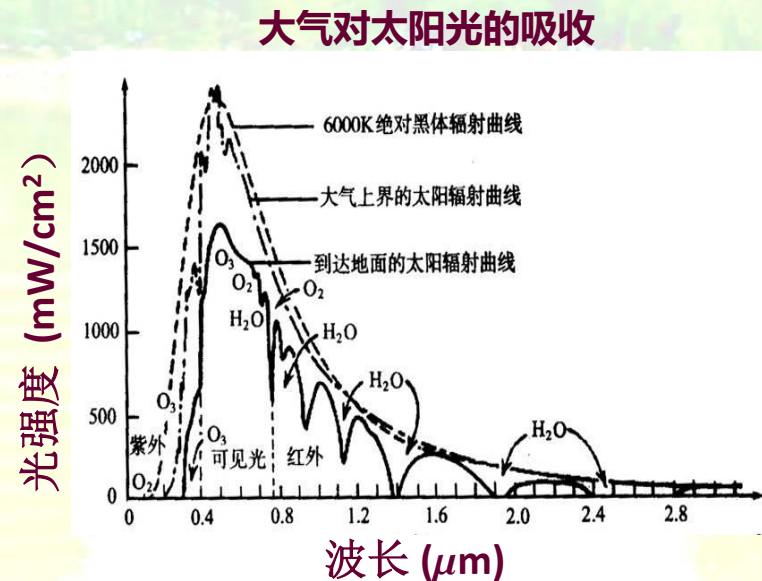
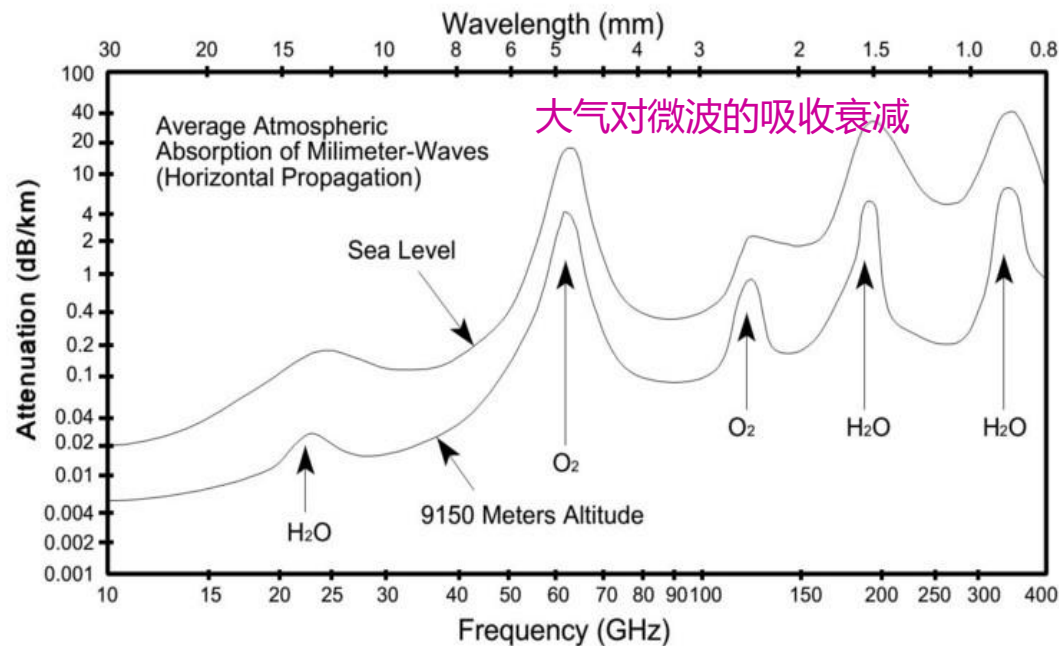
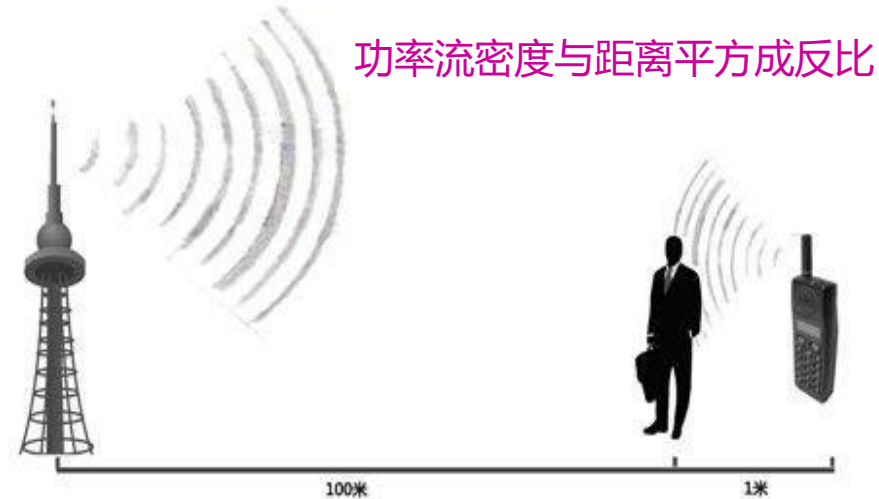




# 第3讲 电磁波的发射与传播

## ◆ 影响电波传播的主要因素：

- ◆ 距离衰减（波束扩散）
- ◆ 大气吸收衰减
- ◆ 陆地/海洋边界
- ◆ 大气分层边界
- ◆ 地形和建筑物

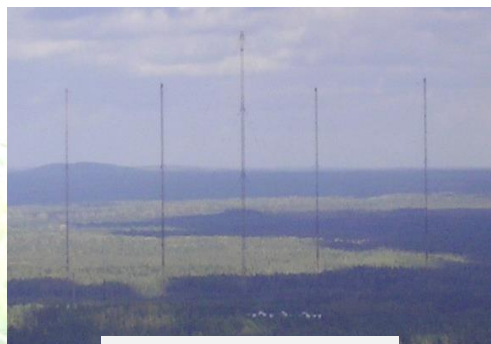


✓ 大气对频率10GHz以下的电磁波几乎不衰减！

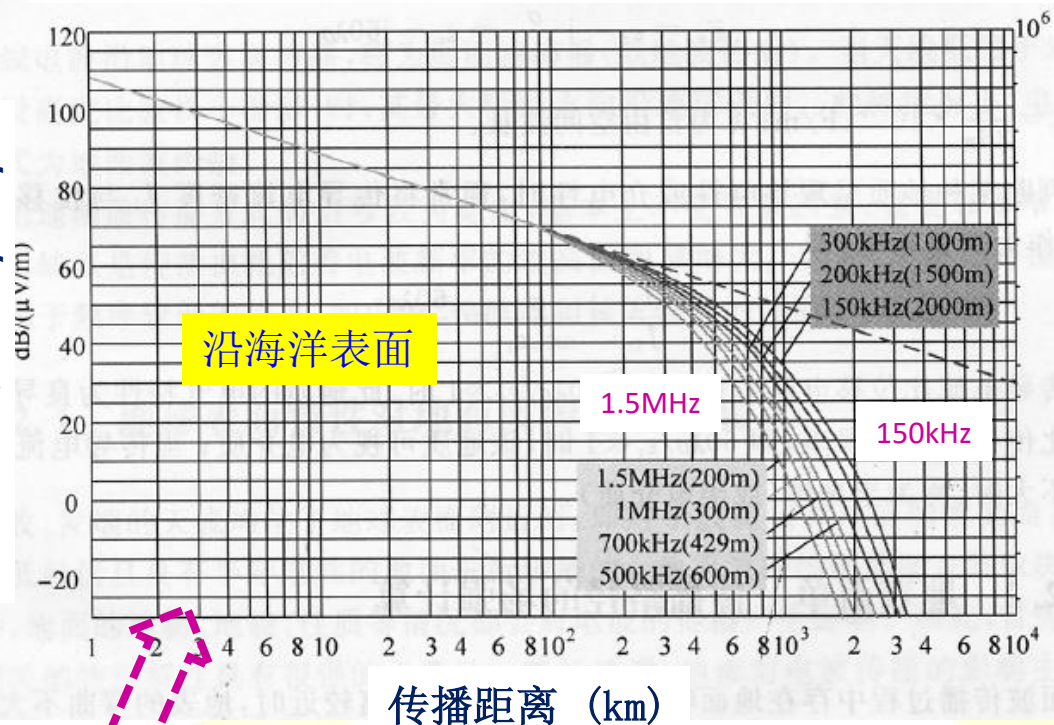
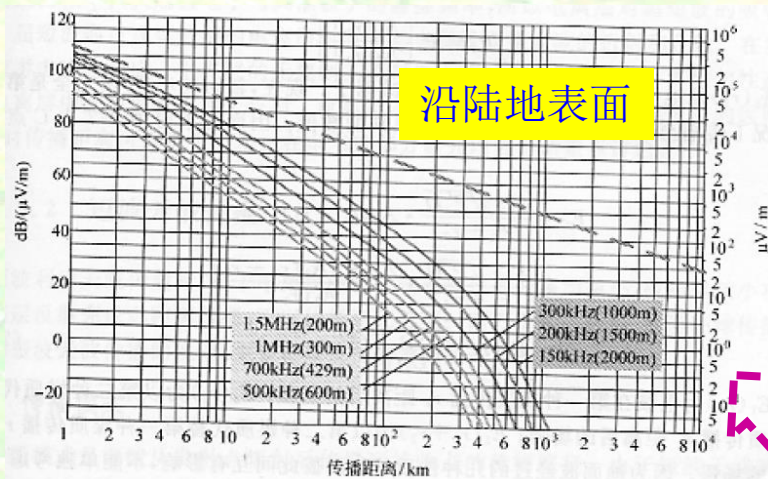
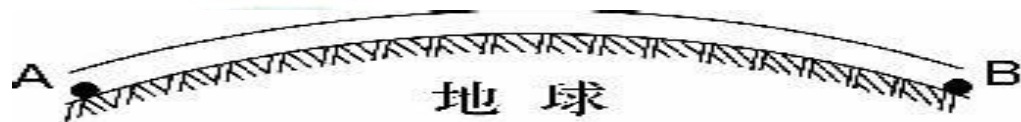


# 第3讲 电磁波的发射与传播

◆ 地波传播：沿陆地/海洋表面传播，距离几百千米至几千千米  
( 频率150kHz~1.5MHz, 波长200m~2000m )



长波地波天线

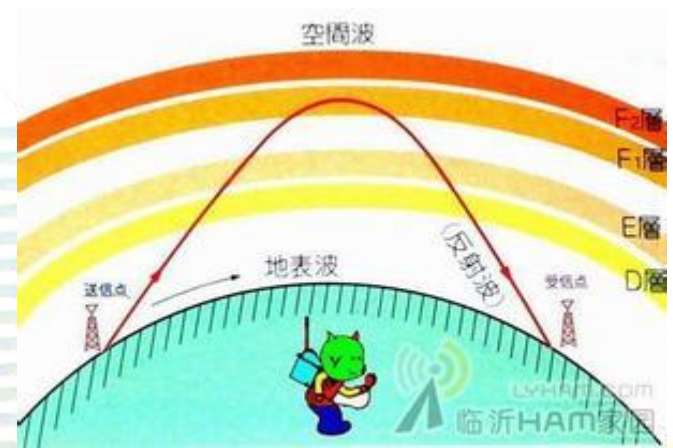


✓ 已经绘制了许多这样的曲线可供利用 ( 对不同陆地、海洋情况 )



# 第3讲 电磁波的发射与传播

- ◆ **天波传播**：主要是利用电离层反射进行传播，包括E层(~110km)和F层(~300km); E层一次反射(一跳)传播2000km, F层一次反射传播4000km；因此天波传播距离可超过 1 万千米。



## 天波传播主要模式

传播距离(km)	可能模式
0~2000	1E, 1F, 2E
2000~4000	2E, 1F, 2F, 1F1E
4000~6000	3E, 4E, 2F, 3F, 4F, 1E1F, 2E1F
6000~8000	4E, 2F, 3F, 4F, 1E2F, 2E2F
.....	.....

1E = 从E层一次反射

2E = 从E层二次反射+从地面一次反射

1E1F = 从E层一次反射+从地面一次反射+从F层一次反射

- ◆ 电离层受太阳活动控制，存在不稳定性，因此天波信道/信号不够稳定；
- ◆ 电离层除反射信号外也吸收部分信号，地面也是如此；
- ◆ 利用电离层传播需选择合适的频率，频率太高电波会穿透电离层，频率太低电离层和地面的吸收可能太大。





# 第3讲 电磁波的发射与传播

## ◆ 视距传播

视线距离：

$$\begin{cases} r_{10} = \sqrt{(R + H_1)^2 - R^2} \\ r_{20} = \sqrt{(R + H_2)^2 - R^2} \end{cases}$$

$$r_0 = r_{10} + r_{20} = \sqrt{2R} \left( \sqrt{H_1} + \sqrt{H_2} \right)$$

若  $H_1=H_2=50$  m,  $R=6370$  km, 则  $r_0 \approx 50$  km

视距传播的主要干扰之一来自地面的反射，  
可根据反射区的地层参数计算反射波强度：

反射区中心：

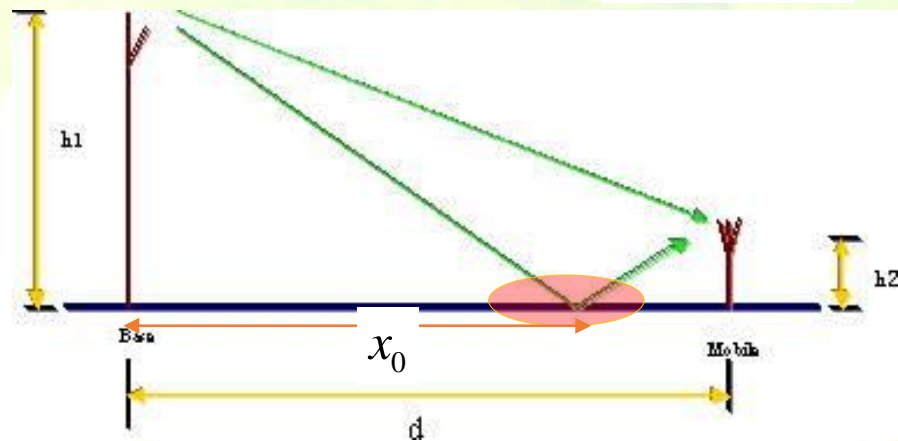
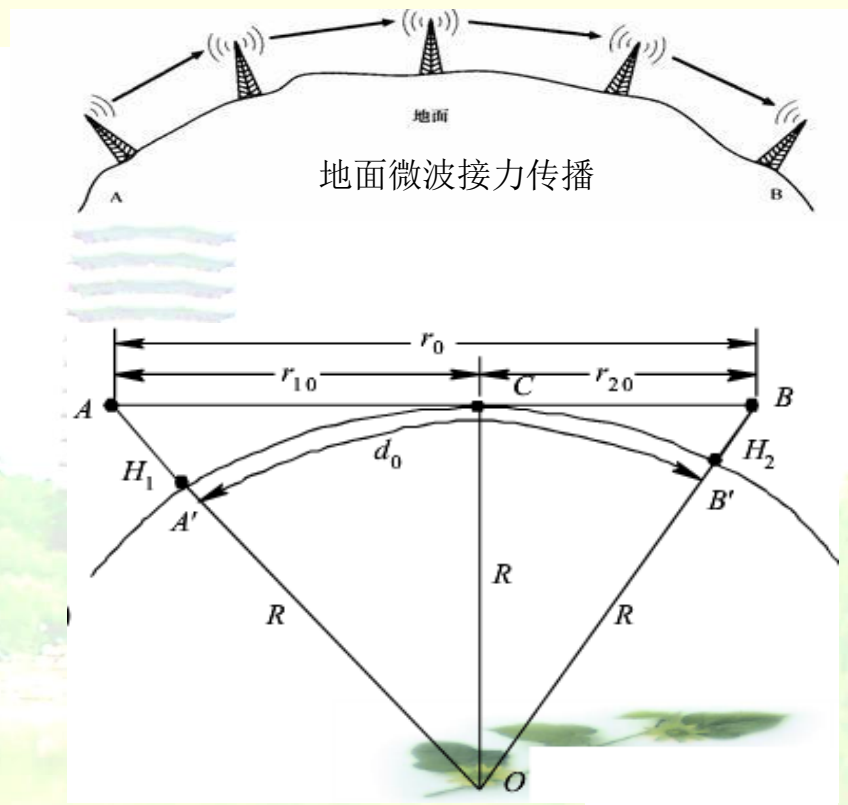
$$x_0 = \frac{d}{2} \cdot \frac{\lambda d + 2H_1(H_1 + H_2)}{\lambda d + (H_1 + H_2)^2}$$

反射区椭圆长轴：

$$a = \frac{d}{2} \cdot \frac{[\lambda d(\lambda d + 4H_1H_2)]^{1/2}}{\lambda d + (H_1 + H_2)^2}$$

反射区椭圆短轴：

$$b \approx \frac{a}{d} \cdot \sqrt{\lambda d + (H_1 + H_2)^2}$$

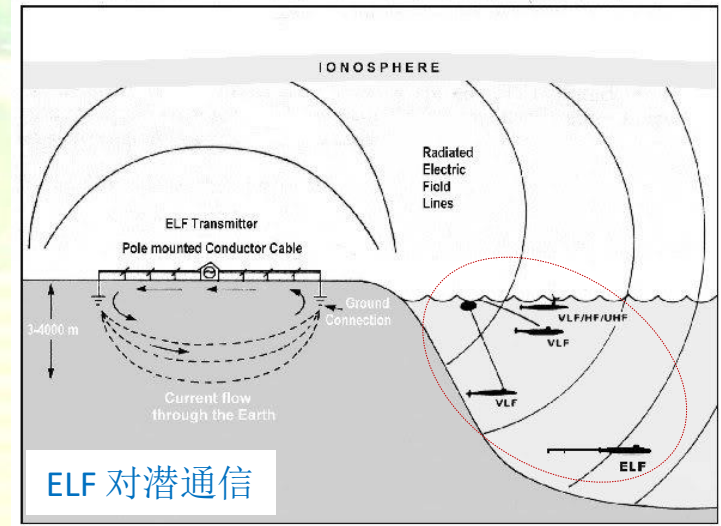
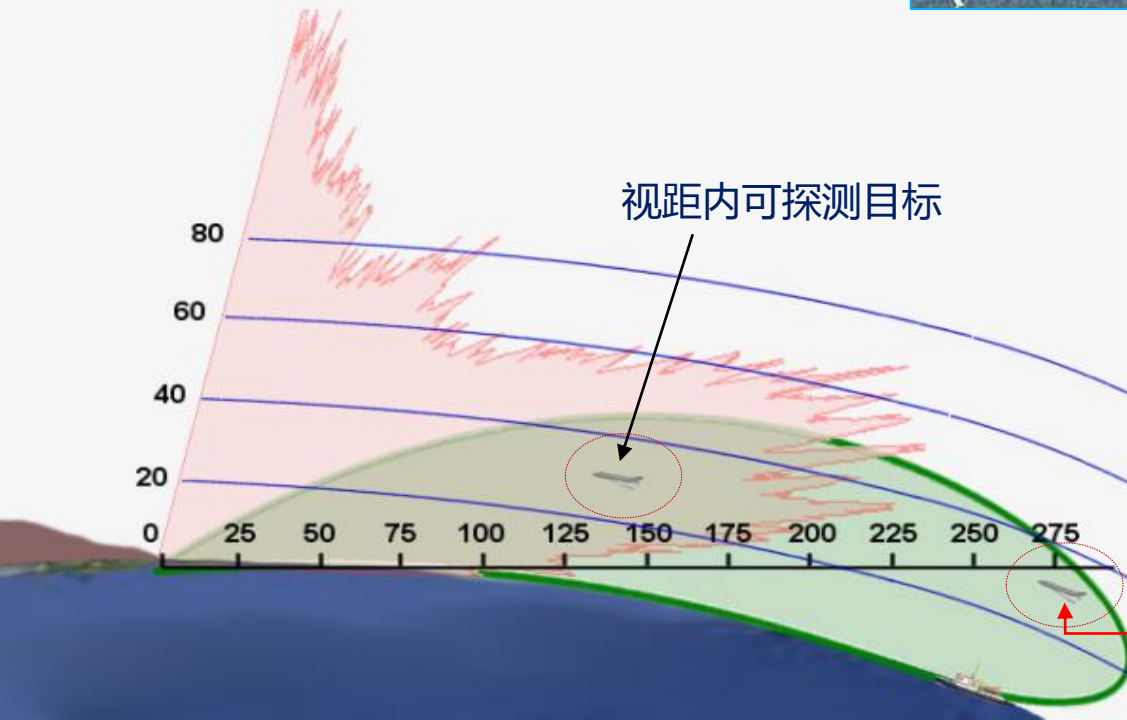
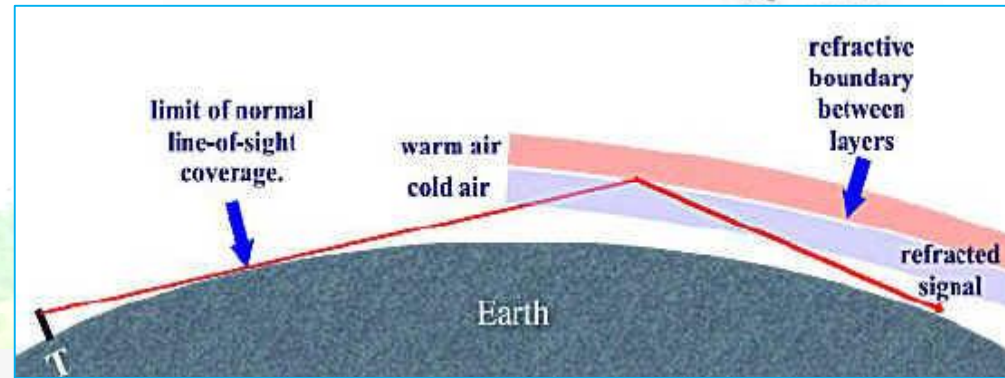
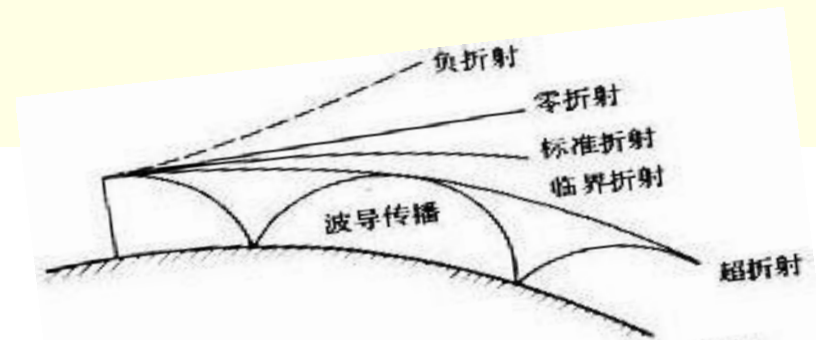




# 第3讲 电磁波的发射与传播

## ◆ 超视距传播

电波除利用电离层反射实现超视距传播，还可以利用低层大气的分层特征通过反射和折射实现超视距传播。



利用海面大气波导效应  
探测超视距目标





# 第3讲 电磁波的发射与传播

## 常用电波传播模型

### 6. 电波传播模型

✓ 电波传播受 **频率、距离、天线高度、极化、地形、天气、日照、建筑** 等影响，精确计算非常困难。基于大量测量结果和统计分析，得出了许多传播模型，只要输入所需的参数，即可进行估算。

◆ **ITU-P. 1546** 是ITU（国际电信联盟）推荐的地面**点对点**预测模型（30MHz~30GHz），广泛应用于广播、陆地和海洋移动、固定台站等业务。

◆ **Okumura-Hata** 模型适合大中城市、城市郊区和乡村，是迄今在移动通信的场强预测中使用最广泛的模型（450MHz~2GHz）；我国从1994年将其列入国标和军标，2010年做进一步修订。

序号	传播模型名称	适用频率范围	适用业务	备 注
1	自由空间传播模型	0~300GHz	通用	最基本的传播模型
2	航空模型	30MHz~30GHz	航空	用于航空器间、航空器与地面间分析计算
3	Flat-Earth	30MHz~10GHz	通用	平滑地形，考虑多径影响
4	奥村(Okumura)-Hata 1	150MHz~1.5GHz	陆地移动	包括多种天线有效高度计算方法
5	奥村(Okumura)-Hata 2	1.5~2GHz	陆地移动	包括多种天线有效高度计算方法，在原型基础上对 1.8GHz 进行扩展
6	Longley Rice	20MHz~40GHz	通用	分视通区、衍射区以及远区
7	Egli 城区模型	30MHz~10GHz	通用	城市环境
8	ITU-R P. 370	30MHz~1GHz	广播	370-5、370-6、370-7 可选
9	ITU-R P. 567	30MHz~1GHz	广播	ITU 370 的简化版本，考虑时间概率以及空间概率
10	ITU-R P. 1546	30MHz~3GHz	广播	ITU-R P. 370 的替代模型
11	ITU-R P. 533	2~30MHz	短波通信等	可指定工作月份、时间、太阳黑子活动因子等；包括一定的天线数据
12	ITU-R P. 530	800MHz~70GHz	微波通信等	时间概率、湿度、温度、降雨概率等
13	ITU-R P. 452	>0.7GHz	微波卫星	衍射、对流层散射、时间概率、湿度、温度等
14	ITU-R P. 368	10kHz~30MHz	短波通信广播	远区场、近区场分别考虑，可指定介电常数与电导率
15	ITU-R P. 1147	150kHz~1.7MHz	中、长波通信	可指定工作月份、时间、太阳黑子活动因子等





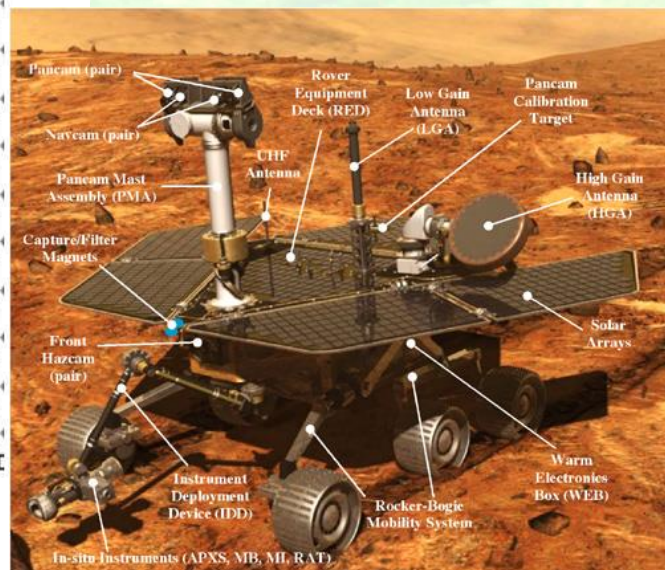
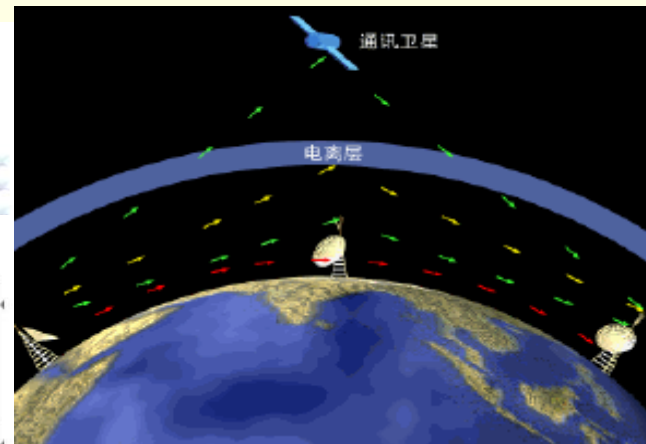
# 第3讲 电磁波的发射与传播

## ◆ 无线电频段划分及主要传播模式

无线电频谱及主要传播模式

段号	频段名称	频段符号	频段范围 (含上限, 不含下限)	波段名称	波长范围 (含上限, 不含下限)	传播模式
1	极低频		3~30Hz	极长波	100~10 兆米	空间波为主
2	超低频		30~300Hz	超长波	10~1 兆米	空间波
3	特低频		300~3000Hz	特长波	100~10 万米	空间波为主
4	甚低频	VLF	3~30kHz	甚长波	10~1 万米	空间波为主
5	低频	LF	30~300kHz	长波	10~1 千米	地波为主
6	中频	MF	300~3000kHz	中波	10~1 百米	地波与天波
7	高频	HF	3~30MHz	短波	100~10 米	天波与地波
8	甚高频	VHF	30~300MHz	超短波	10~1 米	空间波
9	特高频	UHF	300~3000MHz	分米波	10~1 分米	空间波
10	超高频	SHF	3~30GHz	厘米波	10~1 厘米	空间波
11	极高频	EHF	30~300GHz	毫米波	10~1 毫米	空间波
12	至高频		300~3000GHz	丝米波	10~1 丝米	空间波

电磁波让我们彼此、让我们与整个世界、让我们与外太空 紧密相连！



“勇气号”火星探测器