



射电望远镜天线物理参数和校准

郑兴武

南京大学天文学系



目录

- 引论
- 射电天线基本理论和重要参数
- 抛物面天线的性质
- 天线的校准
- 天线性质对天文观测的影响



射电与光学的不同-1

光学: $0.3\mu\text{m}-0.7\mu\text{m}$

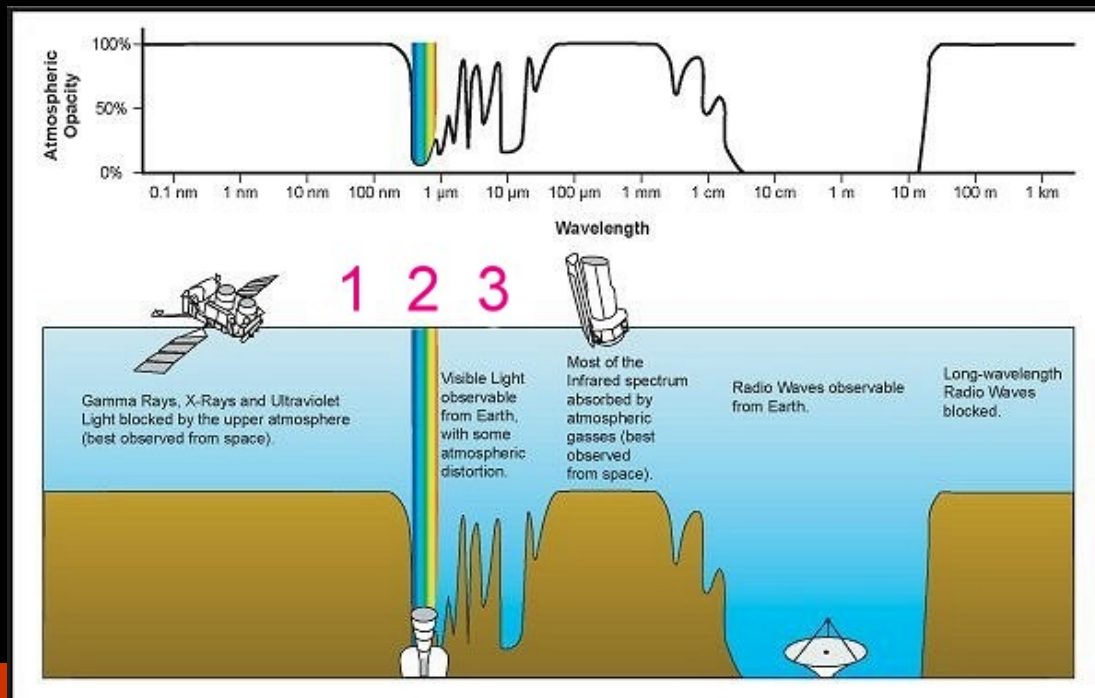
$$\frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} = 2$$

λ_{\min}

射电: $0.1\text{mm}-30\text{m}$

$$\frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} = 3 \times 10^5$$

λ_{\min}



观测整个波段:

光学: 一架望远镜

射电: 多架望远镜

各个波长代码

频率范围 (GHz)	近似波长 (cm)	波段代码
0.30-0.34	90	P
1.24-1.70	20	L
2.65-3.35	13	S
4.6-7.0	6	C
8.1-8.8	3.6	X
14.6-15.3	2	U
22.0-24.0	1.3	K
40.0-50.0	0.7	Q





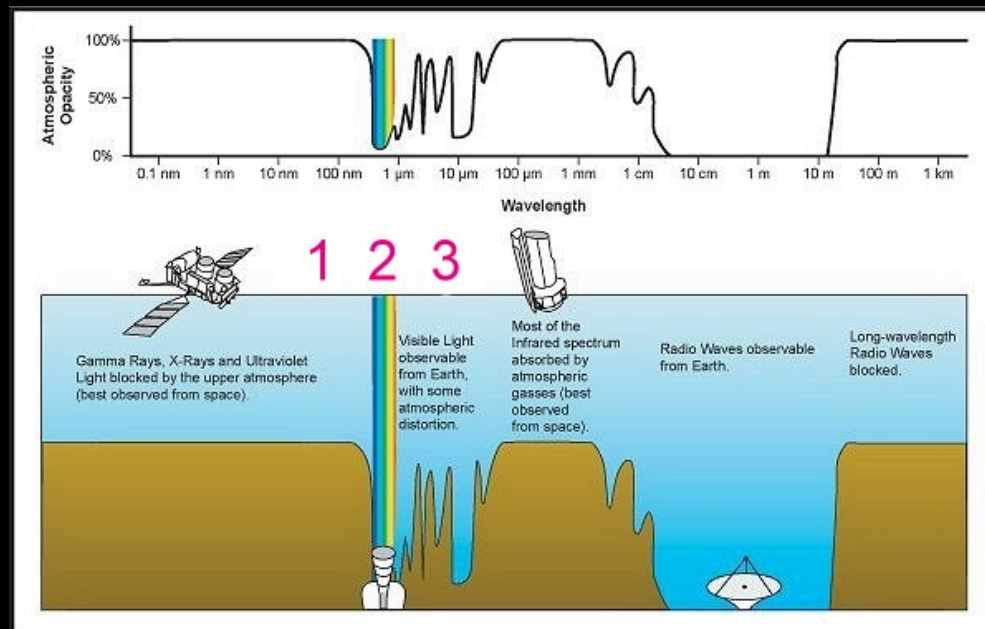
射电与光学的不同-2

光学/射电:

$$\frac{\lambda_{radio}}{\lambda_{optical}} = 10^4$$

相同口径，光学/射电的 PSF:

$$FWHP = \frac{\lambda}{D} \quad \frac{FWHP_{radio}}{FWHP_{optical}} = 10^4$$



射电望远镜：做得很大；但只是单像素观测



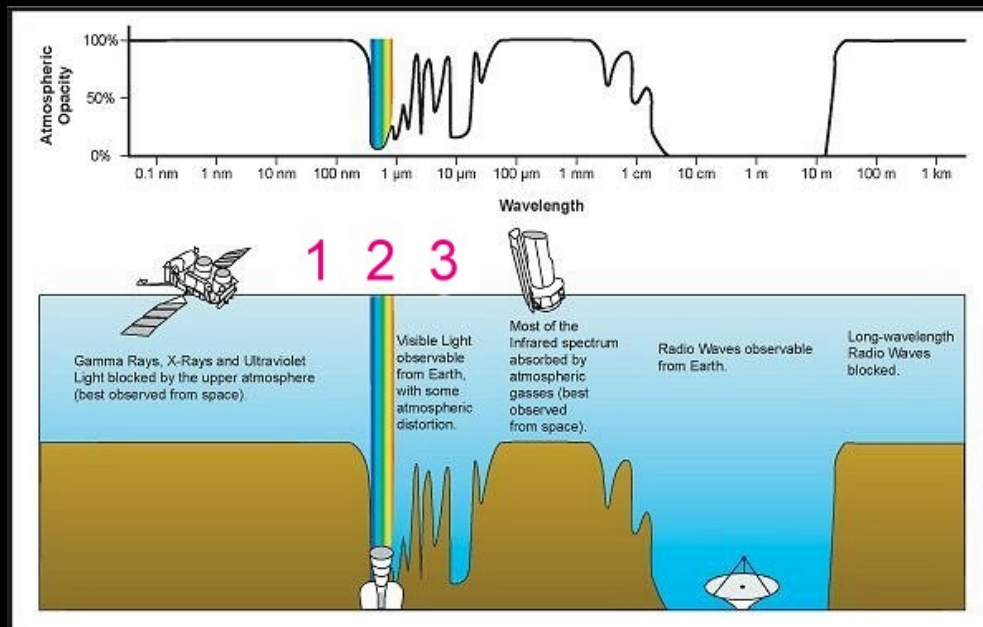
射电与光学的不同-3

光学/射电

望远镜发展和应用:

光学: 单一接收

射电: 发射, 接收



射电望远镜: 雷达发展早, 许多概念来自发射雷达

射电信号的流程

射电信号



地球大气



天线



接收机



采集系统



计算机



天体物理信息

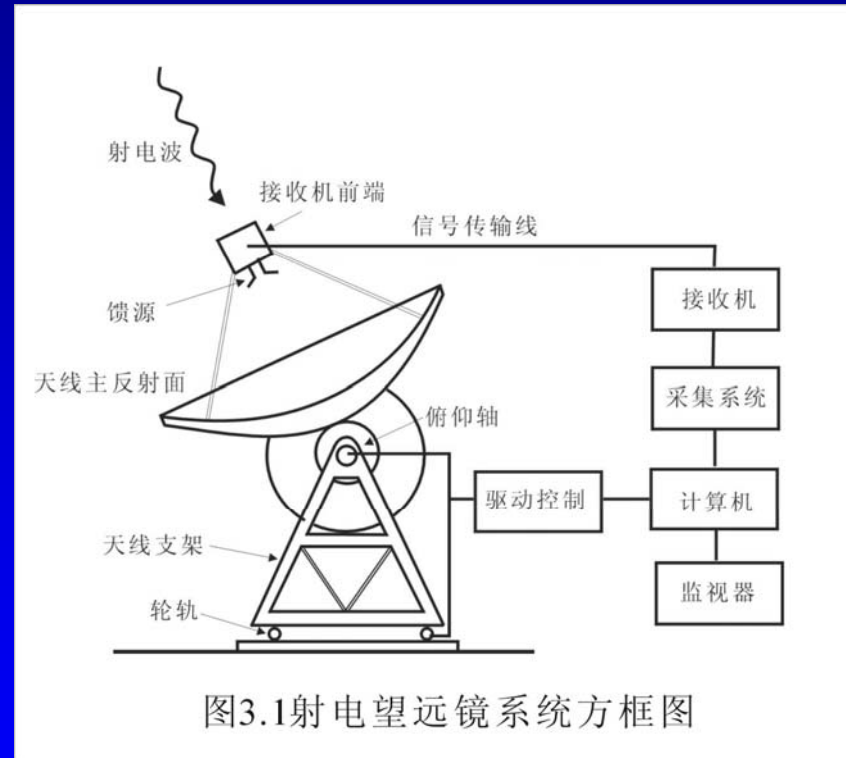


图3.1射电望远镜系统方框图



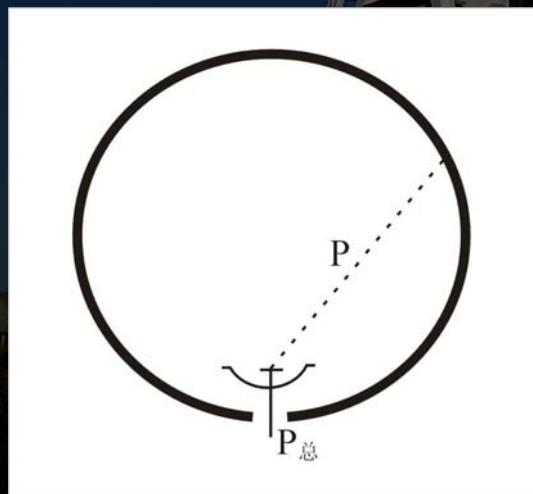
射电天线基本理论和重要参数

- 天线的互易定律
- 天线有效面积和天线效率
- 天线功率方向图和方向性
- 天线温度和亮温度的关系
- 天线增益和有效面积的关系
- 场方向图和孔径场分布
- 天线灵敏度
- 系统等效流量密度
- 指向精度和跟踪精度



天线的互易定律

一架天线不管它是用来发射还是用来接收电磁波辐射，天线发射和接收的工作特性是一样的。



发射天线： $P/P_{\text{总}}$

接收天线： $P'/P'_{\text{总}}$

$$\frac{P}{P_{\text{总}}} = \frac{P'}{P'_{\text{总}}}$$



坐标系



天线有效面积-1

天线实际收集的辐射 \neq 天线几何面积收集的辐射

天线观测流量密度为 F_ν 为 ($\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$) 的射电源

天线观测理论功率为 P_ν 为 (W)

$$\cancel{P_\nu = A_\nu^g F_\nu^m \Delta\nu}$$

A_ν^g 几何面积 F_ν^m 天线接收m偏振的辐射

$$P_\nu = A_\nu^{\text{eff}} F_\nu^m \Delta\nu$$

A_ν^{eff} — 有效面积

$\Delta\nu$ 很小 $A_\nu^{\text{eff}} = A^{\text{eff}}$

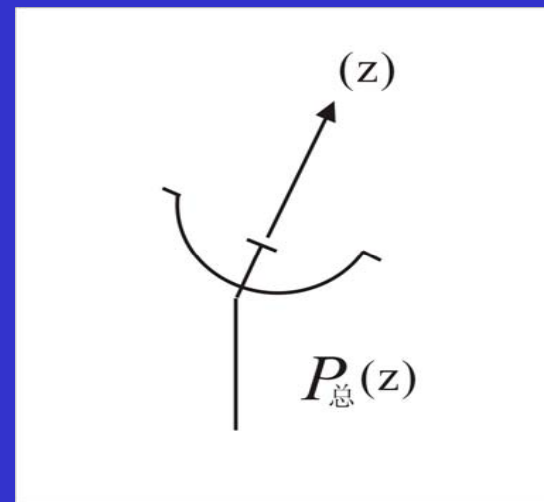
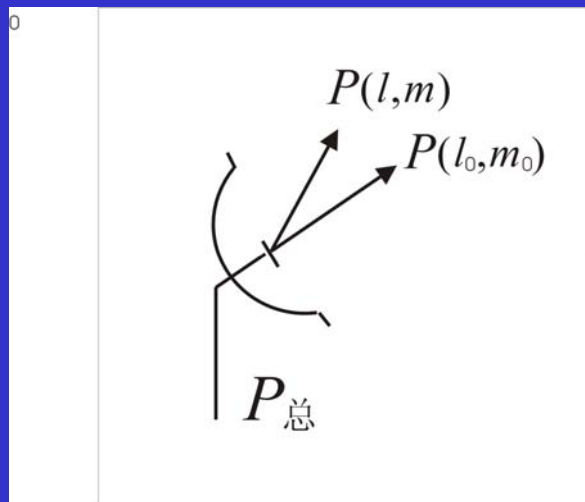
天线有效面积与方向有关 $A^{\text{eff}}(l, m)$
不同的方向有不同的接收本领



天线有效面积-2

$$P_{\nu} = A_{\nu}^{eff} F_{\nu}^m \Delta\nu$$

天线有效面积与方向有关 $A^{eff}(l, m)$
不同的方向有不同的接收本领



天线（孔径）效率

$$\eta_A = \frac{A_{eff,0}}{A_g}$$

$A_{eff,0}$: 天线最大有效面积
 A_g : 几何面积

频率 (MHz)	0.073- 0.0745	0.3- 0.34	1.24 1.70	4.5 5.0	8.1- 8.8	14.6 15.3	22.0 24.0	40.0- 50.0
近似波 长(cm)	400	90	20	6	3.6	2	1.3	0.7
代号	4	P	L	C	X	U	K	Q
天线效 率 (%)	15	40	55	69	63	58	40	35



天线（孔径）效率和有效面积

波段 (cm)	上海 65米（拟建）	澳大利亚 Parkes 64米	意大利 撒丁岛 64米（在建）
L: 18	60/1991	57.2/1840	59.4/1911
S: 13	58/1925	45.2/1454	——
C: 6	60/1991	39.0/1255	57.7/1856
X: 3.6	60/1991	40.9/1316	60.8/1956
Ku: 2.5/2.0	60/1991	24.5/788	60.0/1930
K: 1.35	55/1825	29.9/476（45m口径）	56.1/1805



Ag=3318

Ag=3217

射电望远镜-参数

天线功率方向图

天线的功率方向图:

在 (l, m) 方向, 单位立体角里接收的功率 $P_v(l, m)$

光轴方向 (l_0, m_0) , $P_v(l_0, m_0)$, 一般最大

归一化功率方向图:

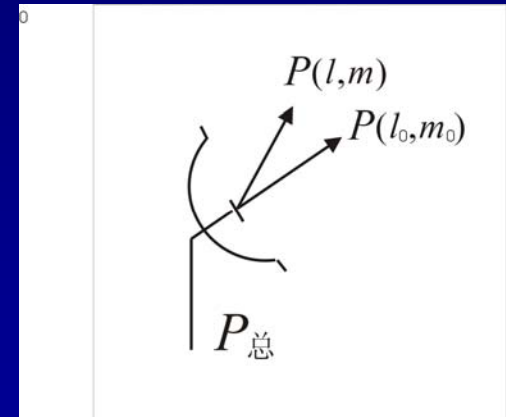
$$P_N(l, m) = \frac{P_v(l, m)}{P_v(l_0, m_0)}$$

$$P_v(l, m) = A_{eff}(l, m) S_v \Delta v$$

$$P_v(l_0, m_0) = A_{eff}(l_0, m_0) S_v \Delta v$$

$$P_N(l, m) = \frac{A_{eff}(l, m)}{A_{eff}(l_0, m_0)}$$

$$A_{eff}(l, m) = P_N(l, m) A_{eff}(l_0, m_0)$$



抛物面天线功率方向图-1

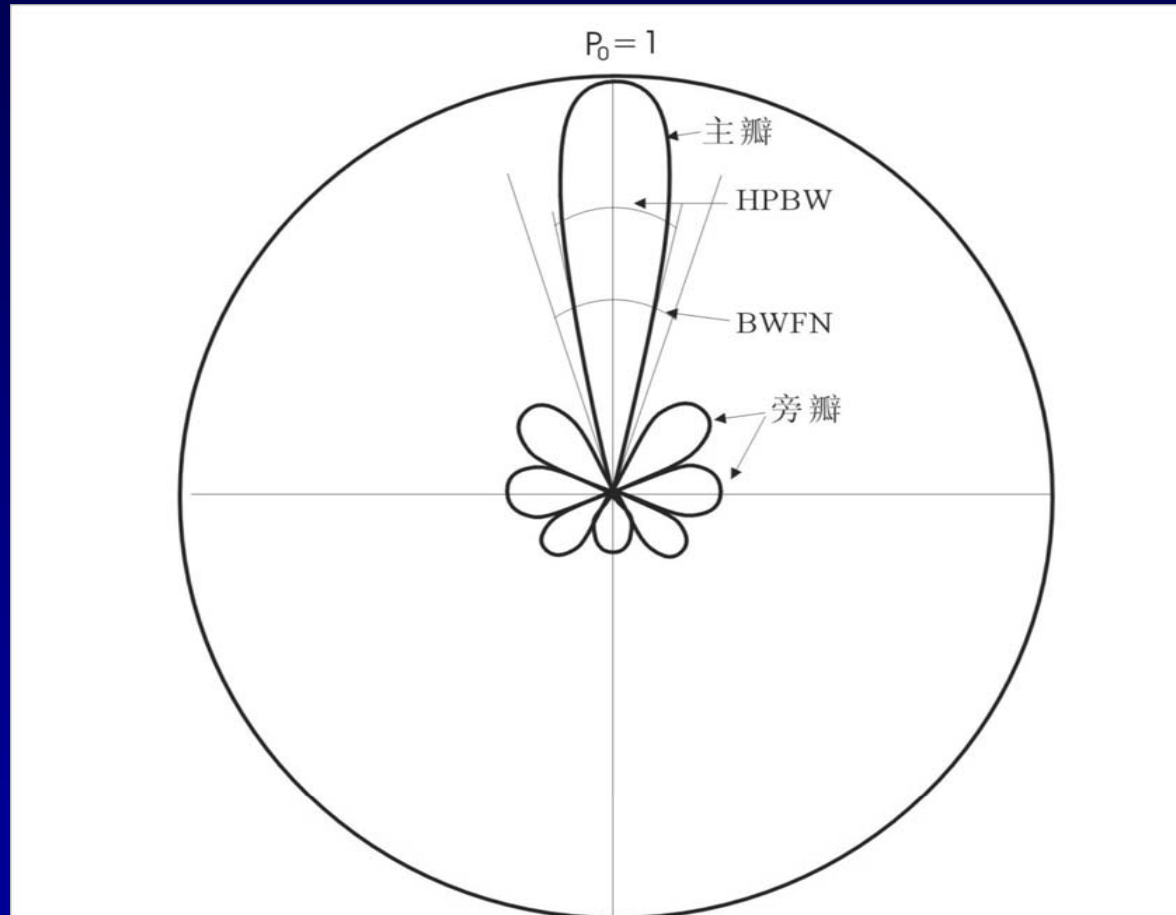
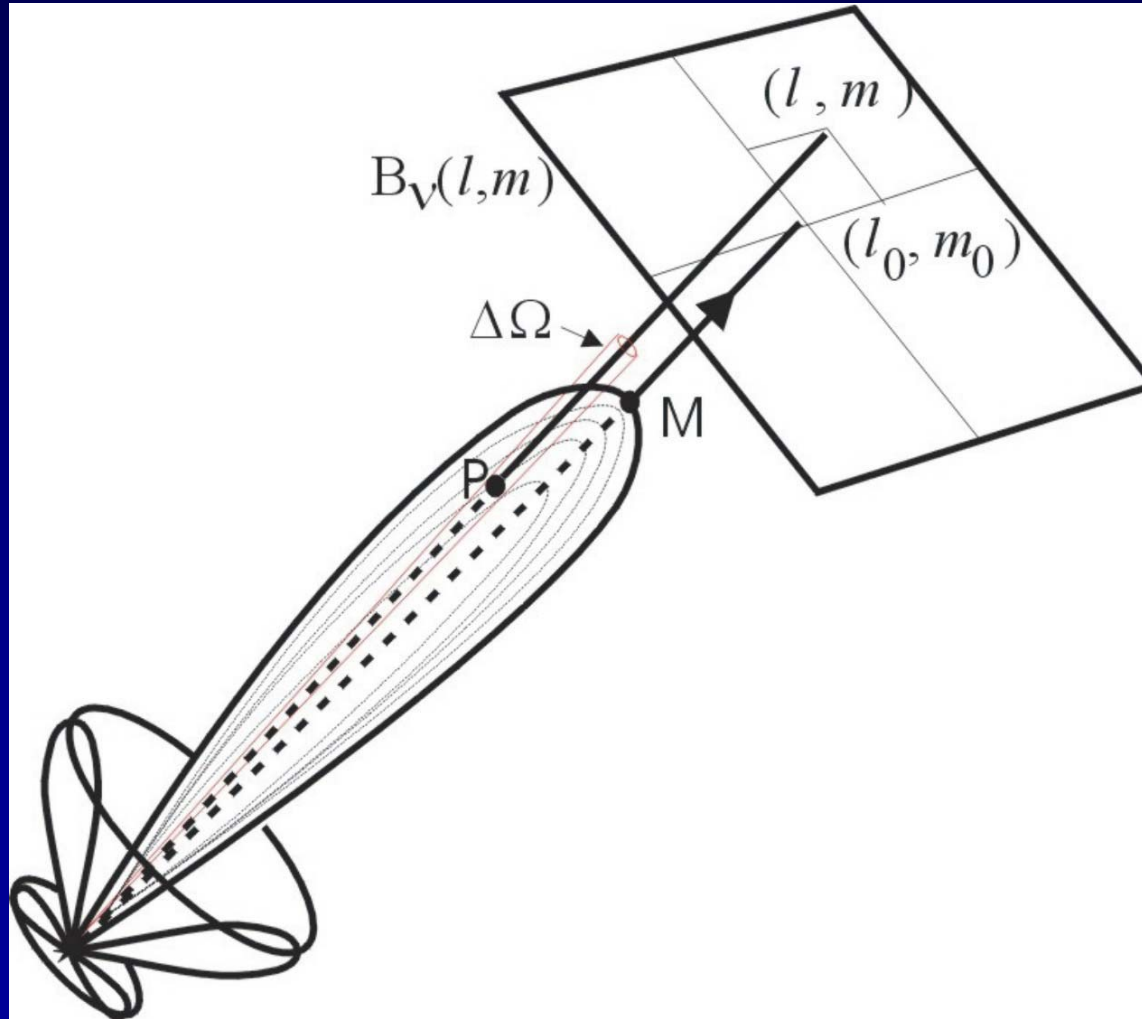


图3.3 功率方图的切面图



抛物面天线功率方向图-2



天线方向图立体角 $\Omega_A = \iint_{4\pi} P_N(l, m) d\Omega$

主波束立体角 $\Omega_M = \iint_{\text{主瓣}} P_N(l, m) d\Omega$

主波束效率 $\eta_M = \frac{\Omega_M}{\Omega_A}$

德令哈 ~ 60%，乌站 65%

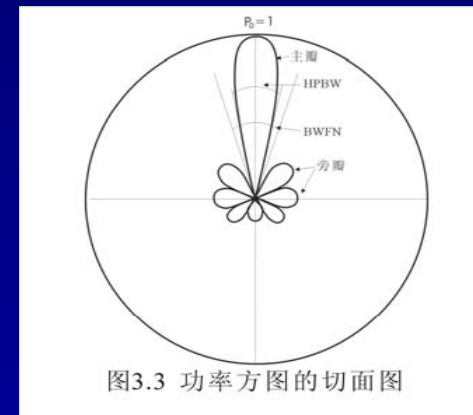


图3.3 功率方图的切面图

天线发射的总功率里有多少是集中在主束之内

波束效率与天线效率关系???

射电望远镜-参数



天线的方向性

定义 $P(l, m)$ 和它的平均值之比为方向性

$$D(l, m) = \frac{P(l, m)}{\frac{1}{4\pi} \iint_{4\pi} P(l, m) d\Omega} = \frac{4\pi A_{eff}(l, m)}{\iint_{4\pi} A_{eff}(l, m) d\Omega}$$

物理意义：天线在某一方向单位立体角发射的功率与整个天线发出功率平均值的比

在光轴方向： $P(0,0)=1$ 方向性最大

$$D_0 = \frac{4\pi}{\iint_{4\pi} P(l, m) d\Omega} = \frac{4\pi}{\Omega_A}$$

$$P(l, m) = D(l, m) / D_0 \quad \iint_{4\pi} D(l, m) d\Omega = 4\pi$$

射电望远镜-参数



射电源天线温度

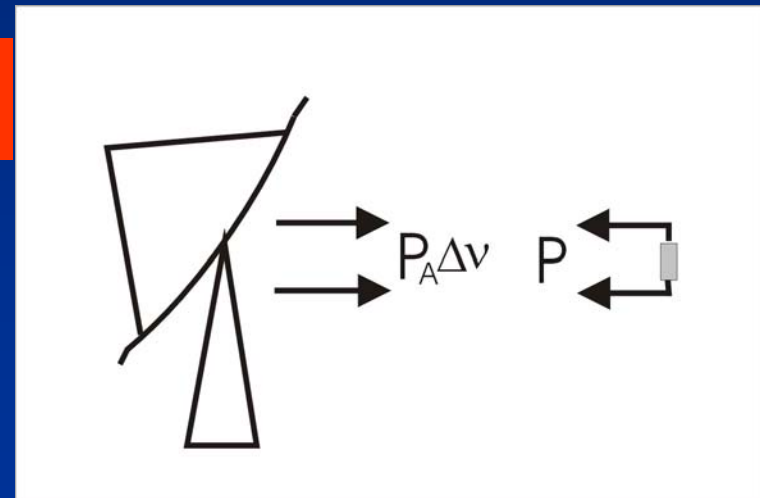
设一个天线对向射电源，在单位频率间隔范围内，接收到的功率为 P_A

Nyquist定理 一个负载电阻，在温度为 T

时，在单位频率间隔，它的输出功率为 $P = kT$

$$P_A = kT_A \leftarrow \text{天线温度}$$

电阻的热噪声功率来表示天线的输出功率



$$P_A = kT_A \Delta \nu$$

天线温度和系统噪声温度

天线温度仅仅是天线输出功率的另一种表示

$$P_A = kT_A \Delta \nu$$

天线温度 $T_A = 1\text{K}$, $PA = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ WHz}^{-1}$
典型射电源辐射天线输出功率

天线指向天空背景时，有功率输出

包括：天空背景 T_{bg} ； 大气辐射 T_{sky} ； 地面辐射 T_{spill}

馈源和波导损失 T_{loss} ； 接收机噪声 T_N

$$T_{sys} = T_N + T_{bg} + T_{sky} + T_{spill} + T_{loss}$$

系统温度

射电望远镜-参数



射电天线温度和亮温度的关系

一个射电源的辐射可以表示为 T_A ，也可以表示为 T_B

T_A 和 T_B 关系???

按照定义 $B^m(l, m) = \Delta F^m / \Delta \Omega$

天线在 (l, m) 接收到的功率

定义 $P(l, m)$ 和它的平均值之比

$$\Delta P = A_{eff}(l, m) \Delta F^m \Delta \nu$$

$$\Delta P = A_{eff}(l, m) B^m(l, m) \Delta \Omega \Delta \nu$$

天线接收到的总功率

$$P = \int_{4\pi} A_{eff}(l, m) B^m(l, m) \Delta \nu d\Omega$$

$$P = \Delta \nu \int_{4\pi} A_{eff}(l, m) B^m(l, m) d\Omega$$

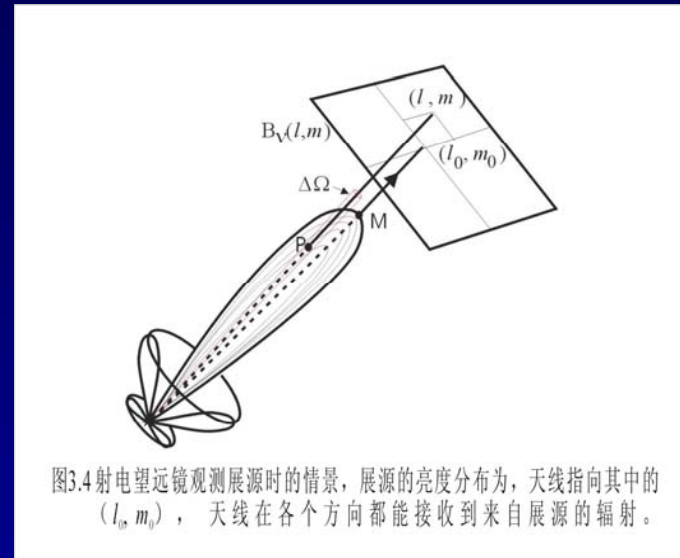


图3.4射电望远镜观测展源时的情景，展源的亮度分布为，天线指向其中的 (l_0, m_0) ，天线在各个方向都能接收到来自展源的辐射。

$$P_A = k T_A \Delta \nu$$

$$B = 2k T_B / \lambda^2$$

$$T_A = \frac{1}{k} \int_{4\pi} A_{eff}(l, m) B^m(l, m) d\Omega$$

$$T_A = \frac{1}{\lambda^2} \int_{4\pi} A_{eff}(l, m) T_B(l, m) d\Omega$$



重要关系式

射电天线、负载电阻和黑体腔处于热平衡状态

$$T_A = \frac{1}{\lambda^2} \int_{4\pi} A_{eff}(l, m) T_B(l, m) d\Omega$$

定义 $P(l, m)$ 和 Ω 的平均值之比

$$\int_{4\pi} A_{eff}(l, m) d\Omega = \lambda^2$$

$$A_{eff}(l, m) = P_N(l, m) A_{eff}(l_0, m_0)$$

$$A_{eff,0} = \lambda^2 / \int_{4\pi} P_N(l, m) d\Omega = \lambda^2 / \Omega_A$$

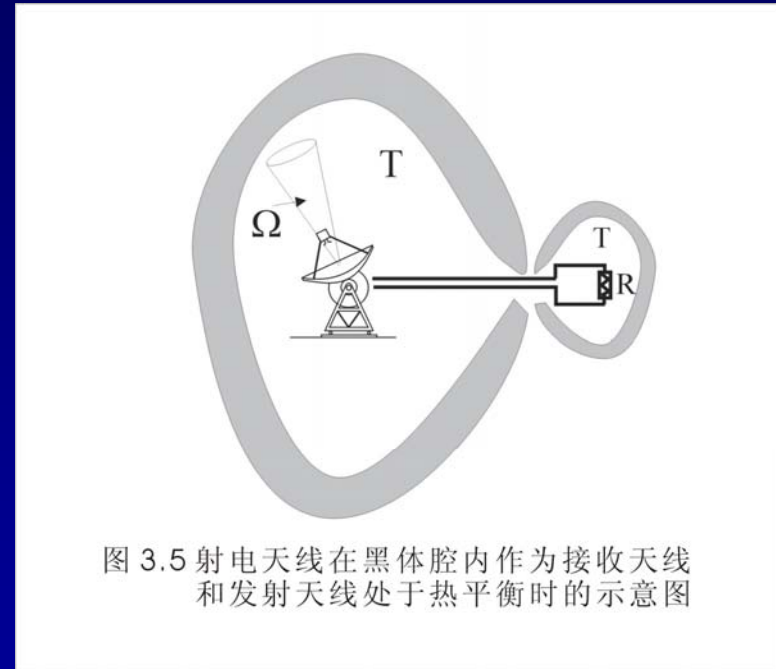


图 3.5 射电天线在黑体腔内作为接收天线和发射天线处于热平衡时的示意图

有效面积大：波长要长，方向图立体角要小



天线增益

发射天线：无损耗雷达天线

输给天线的总的功率为 P_T

在 (l, m) 方向发射功率为 $P(l, m)$

$$P(l, m) = G(l, m) \frac{P_T}{4\pi}$$

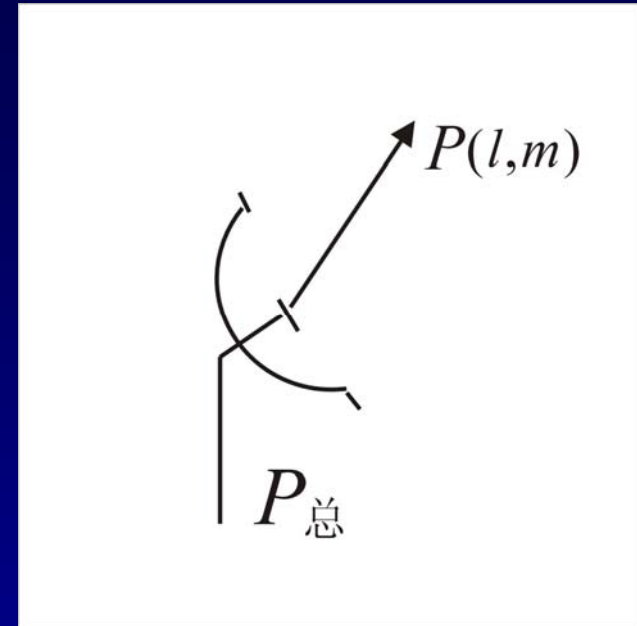
天线的增益

物理意义：比平均值大（或小）几倍

$$\int_{4\pi} G(l, m) d\Omega = \frac{\int_{4\pi} P(l, m) d\Omega}{\frac{P_T}{4\pi}} = 4\pi$$

归一化增益：

$$G_N(l, m) = \frac{G(l, m)}{G_0}$$



天线的增益、方向性和功率方向图-1

天线有效面积:

$$A_v^{eff} = \frac{P_v}{F_v^m \Delta\nu}$$

天线效率:

$$\eta_A = \frac{A_{eff,0}}{A_g}$$

定义 $P(l, m)$ 和它的平均值之比

天线功率方向图:

$$P_N(l, m) = \frac{P_v(l, m)}{P_v(l_0, m_0)}$$

PSF

天线方向性:

$$D(l, m) = \frac{P(l, m)}{\frac{1}{4\pi} \iint_{4\pi} P(l, m) d\Omega} = \frac{4\pi A_{eff}(l, m)}{\iint_{4\pi} A_{eff}(l, m) d\Omega}$$

天线增益:

$$G(l, m) = \frac{P(l, m)}{\frac{P_T}{4\pi}}$$

射电望远镜-参数



天线的增益、方向性和功率方向图-2

$$\frac{G(l, m)}{G_0} = \frac{D(l, m)}{D_0} = P_N(l, m)$$

定义 $P(l, m)$ 和它的平均值之比

天线方向性没有考虑天线本身输入功率转换为辐射功率的效率，强调的是天线发射的方向性；天线增益与天线方向性不同，着眼点是输入给天线的总功率它在各个方向发射的能力。

无损天线 $G(l, m) = D(l, m)$



天线增益和有效面积的关系

负载电阻温度: T

输给天线的总功率: $P_T = kT\Delta\nu$

天线没有损耗

天线在黑体腔内发射总功率: $kT\Delta\nu$

定义 F

天线在 Ω 范围内发射的功率

$$\frac{P_T G(l, m)}{4\pi} \Omega = \frac{kT\Delta\nu G(l, m)}{4\pi} \Omega$$

天线在 Ω 范围内接收的功率

$$\frac{1}{2} F_\nu A_{eff} \Delta\nu = \frac{I_\nu}{2} \Omega \Delta\nu A_{eff} = \frac{kT\Delta\nu}{\lambda^2} \Omega A_{eff} \rightarrow G(l, m) = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{eff}(l, m)$$

天线增益和天线效率只差一个常数

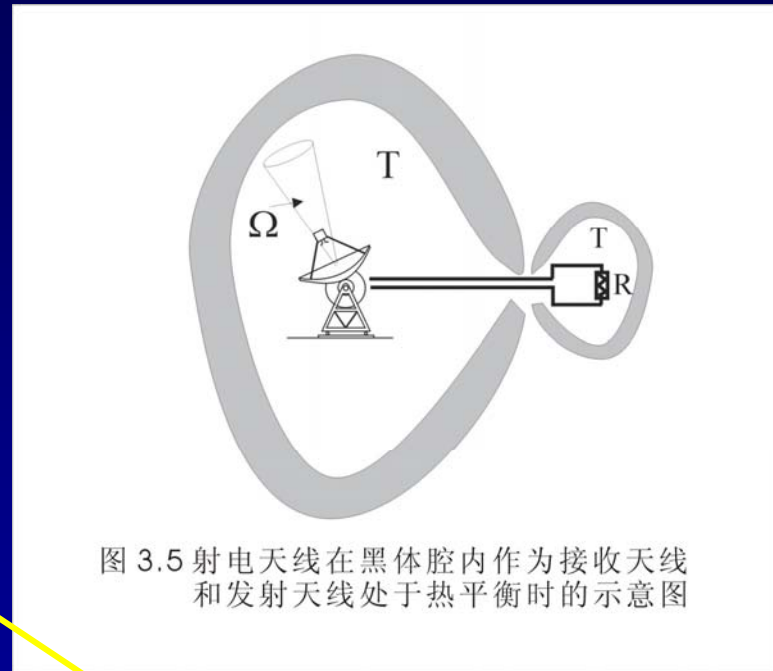


图 3.5 射电天线在黑体腔内作为接收天线和发射天线处于热平衡时的示意图

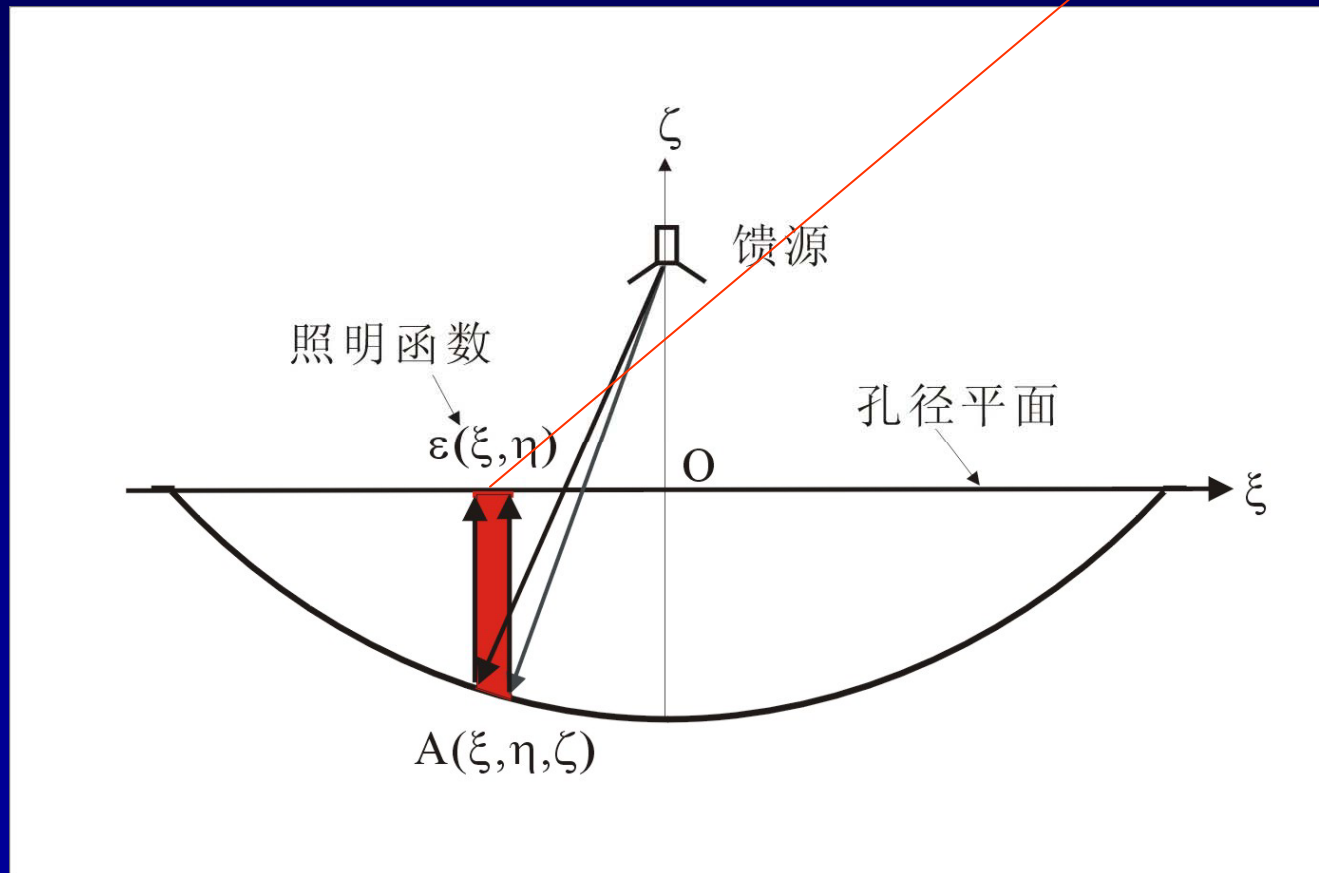
射电望远镜-参数



照明函数

$$E(x, y, z)$$

关键：功率方向图
决定的什么因素???



天线的场方向图和孔径场分布

关键：功率方向图
决定的什么因素???

平板天线的孔径场分布（照明函数）
 $\varepsilon(\xi, \eta)$

远场分布 $E(l, m)$

用惠更斯原理计算：

$$E(l, m) = C_0 \iint \varepsilon(\xi, \eta) e^{-ik(l\xi + m\eta)} d\xi d\eta$$

$$E(l, m) \Leftrightarrow \varepsilon(\xi, \eta)$$

$$P(l, m) = E(l, m) E^*(l, m)$$

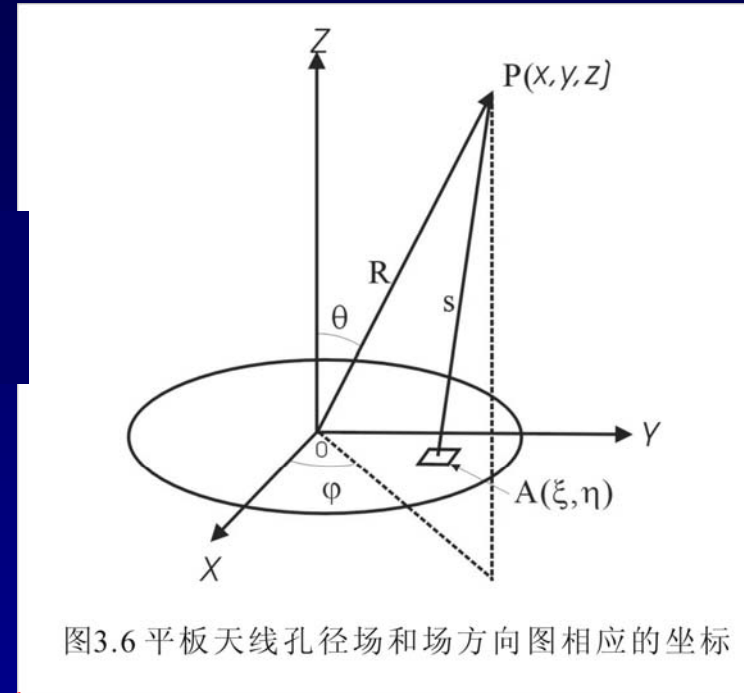


图3.6 平板天线孔径场和场方向图相应的坐标



均匀孔径场分布的场方向图

$$\varepsilon(\xi, \eta) = 1$$

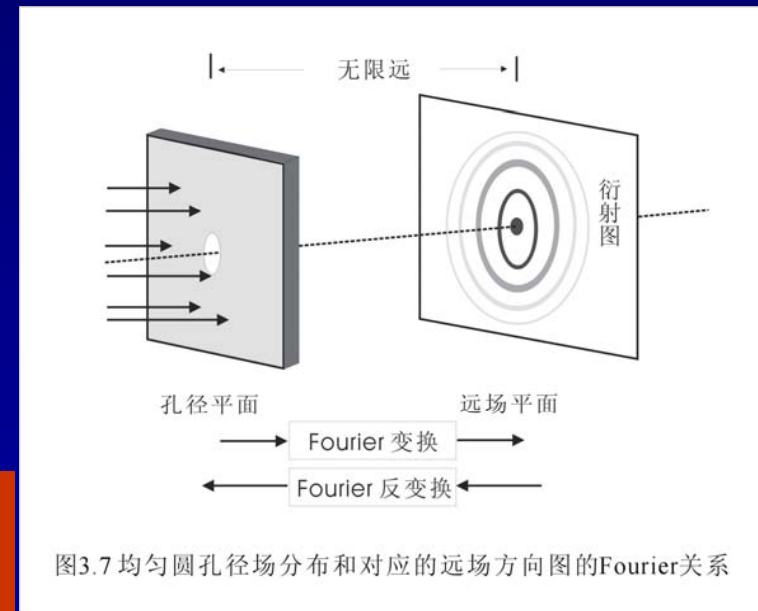
$$E(l, m) = C_0 \iint e^{-ik(l\xi + m\eta)} d\xi d\eta$$

场方向图（功率方向图） 由孔径场分布决定

为了获得所要求的天线增益、
分辨率、旁瓣电平
改变孔径场分布

孔径场分布 = 照明函数

均匀实圆孔径均匀的孔径场分布在远场平面形成的是一幅衍射图



一般的把孔径场分布

注意相位相同

$$\varepsilon(\xi, \eta) = g(\rho) = \begin{cases} k \times \left[1 - \left(\frac{\rho}{a} \right)^2 \right]^n & \rho \leq a \\ 0 & \rho > a \end{cases}$$

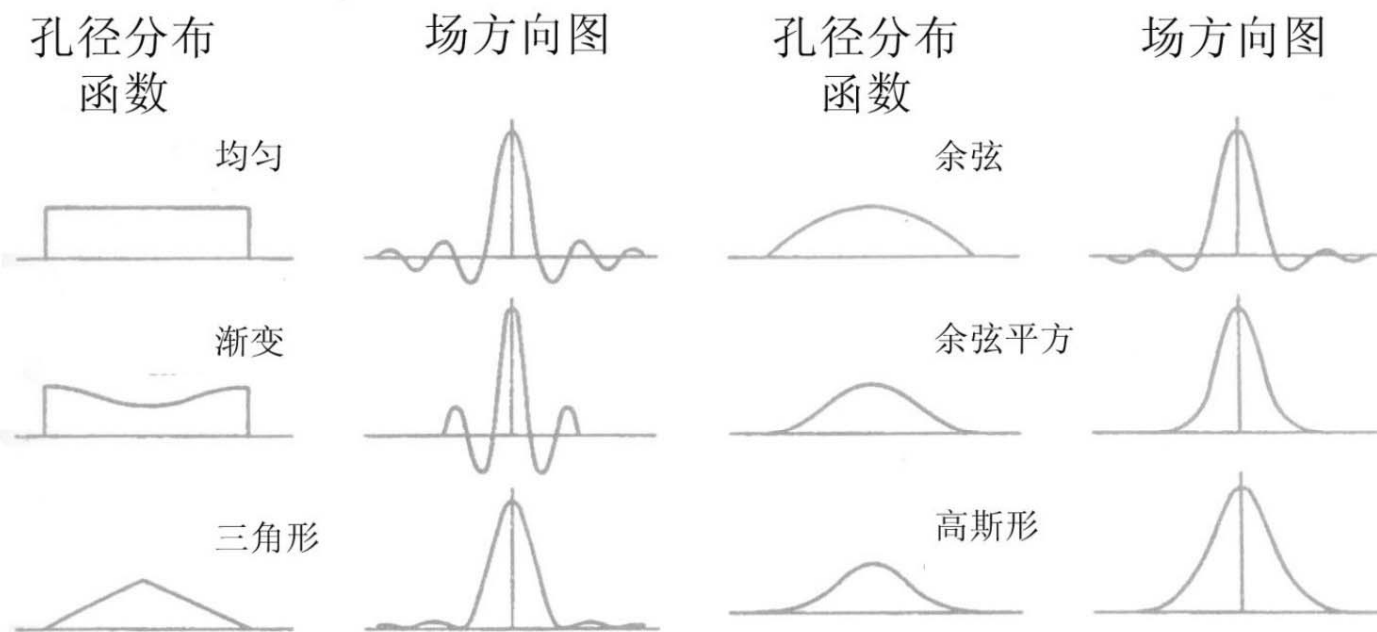
场方向图分布

$$E(\nu) = \pi a^2 k \Lambda_1(\nu) + \frac{\pi a^2}{n+1} \Lambda_{n+1}(\nu)$$

$$\nu = 2\pi a \sin \theta$$

$$\Lambda_n(\nu) = \frac{n! J_n(\nu)}{(\nu/2)^n}$$





图E3.3-2各种孔径场分布和对应的场方向图



天线灵敏度

天线孔径面积 A_g , 效率: η_A

射电源流量密度: F_s

天线接收到的总功率:
$$P = \frac{\eta_A A_g F_s \Delta \nu}{2}$$

等效的天线温度 T_A :

$$P = kT_A \Delta \nu$$

$$G(l, m) = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{\text{eff}}(l, m)$$

$$kT_A \Delta \nu = \frac{1}{2} \eta_A A_g F_s \Delta \nu \quad \text{或者} \quad \frac{T_A}{F_s} = \frac{\eta_A A_g}{2k}$$
$$\frac{T_A}{F_s} = \frac{\lambda^2}{8\pi k} G_0$$

天线对单位流量的射电源观测到源的天线温度

(Degree Per Flux Unit, 简称DPFU)

射电望远镜-参数



系统等效流量密度

测到天线1K对应的射电流量密度?

$$\frac{F_s}{T_A} = \frac{2k}{\eta_A A_g}$$

系统噪声温 T_{sys}

度: FD (System Equivalent Flux Density):

$$f_{tys} = \frac{F_s}{T_A} T_{tys} = \frac{2k}{\eta_A A_g} T_{sys}$$

系统噪声对应的流量密度

T_{sys} 小 η_A 大 A_g 大

$T_{sys} = 20\text{K}$ $\eta = 3\%$ SEFD?



射电望远镜最小可测流量

SEFD (System Equivalent Flux Density):

$$f_{tys} = \frac{F_s}{T_A} T_{tys} = \frac{2k}{\eta_A A_g} T_{sys}$$

射电望远镜最小可测流量:

积分时间: $\Delta\tau$ 带 $\Delta\nu$

$$T_{A,\min} = \frac{T_{sys}}{\sqrt{\Delta\nu\tau}}$$

宽:

$$F_{\min} = \frac{2kT_{sys}}{\eta_A A_g \sqrt{\Delta\tau\Delta\nu}}$$



射电望远镜空间分辨率

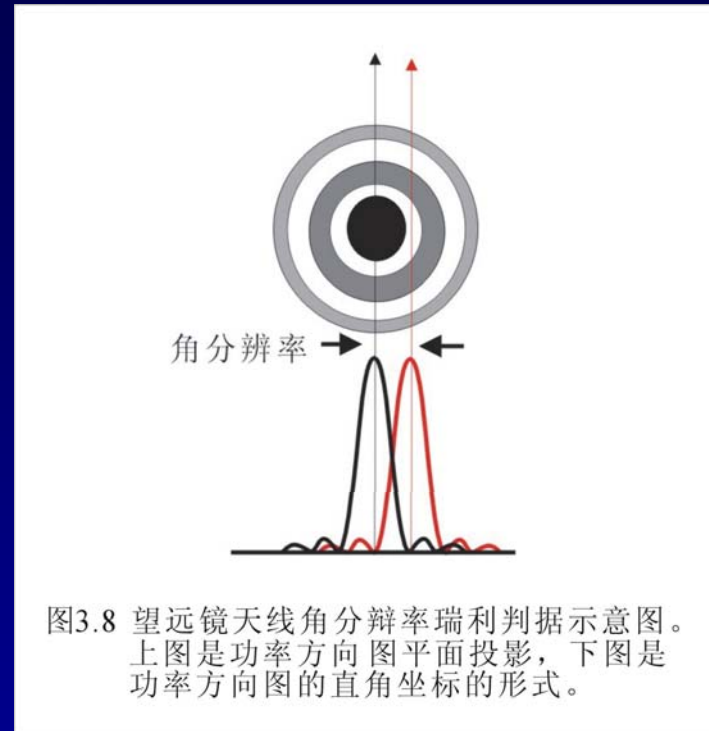
射电望远镜能区分两个射电点源所对应天空最小的张角称为角分辨率

瑞利判据：

射电天线对一颗射电源响应的主瓣极大值处刚好与另一颗射电源紧邻主瓣的第一极小值重合，即角分辨率值为主瓣宽度（BWFN）的一半

抛物面：
$$\frac{1}{2}WBFN = 1.219 \frac{\lambda}{D}$$

$$HPBW = 1.02 \frac{\lambda}{D}$$



天线的指向精度和跟踪精度

25米： 300吨

65米： 2300吨

100米： 7300吨

指向精度和跟踪精度是一项具有挑战性的技术。

重复指向精度：

系统误差：如蒙气差、轴系误差、蜗轮误差等

随机误差：随机

增益损失 $\leq 3\%$

天线的指向精度应小于 $HPBW/10$

抛物面天线， $0.1\lambda / D$

100m, 1cm , 则要求指向精度 $< 2''$



抛物面天线的结构形式

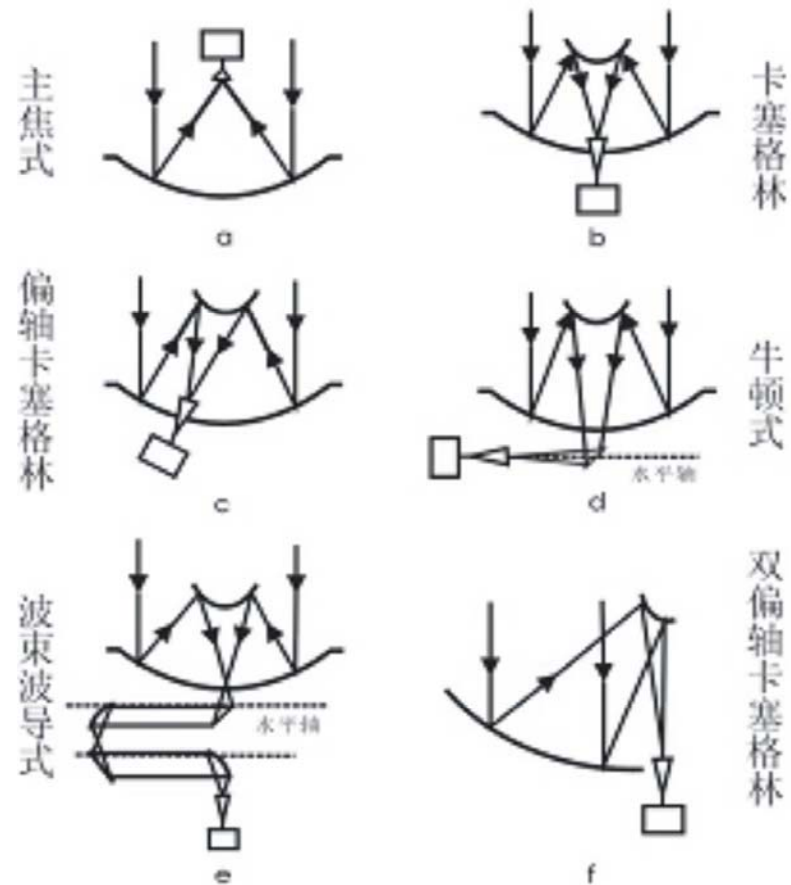


图3.20 主反射面为抛物面的六类反射面天线系统

射电望远镜-参数



抛物面天线的性质-1

均匀孔径场分布

$$E(l, m) = C_0 \iint e^{-ik(l\xi + m\eta)} d\xi d\eta$$

均匀孔径场功率方向图

$$P(\theta) = \frac{4J_1^2(\pi\theta D / \lambda)}{(\pi\theta D / \lambda)^2}$$

半功率束宽

$$HPBW = 1.02 \frac{\lambda}{D}$$

第一旁瓣的高度：0.017

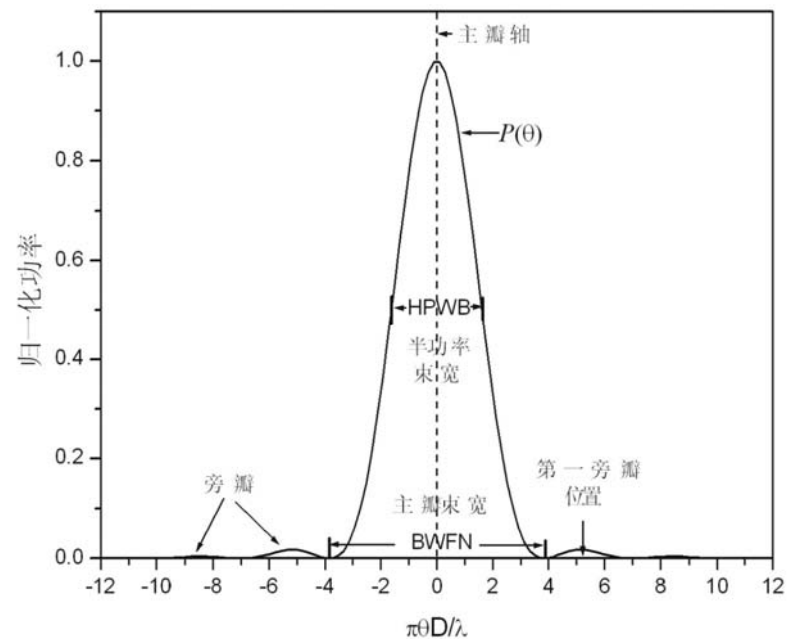


图3.18 均匀圆孔径远场功率方向图的直角坐标表示
射电望远镜-参数



抛物面天线的性质-2

方向图立体角

$$\Omega_A = \frac{4}{\pi} \left[\frac{\lambda}{D} \right]^2$$

最大有效面积

$$A_{eff,0} = \pi \left[\frac{D}{2} \right]^2 = A_g$$

最大的天线增益

$$G_0 = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_g = \left[\pi \frac{D}{\lambda} \right]^2$$

天线口径越大工作波长越短增益越高，
在射电天文里一般都用抛物面天线的原因

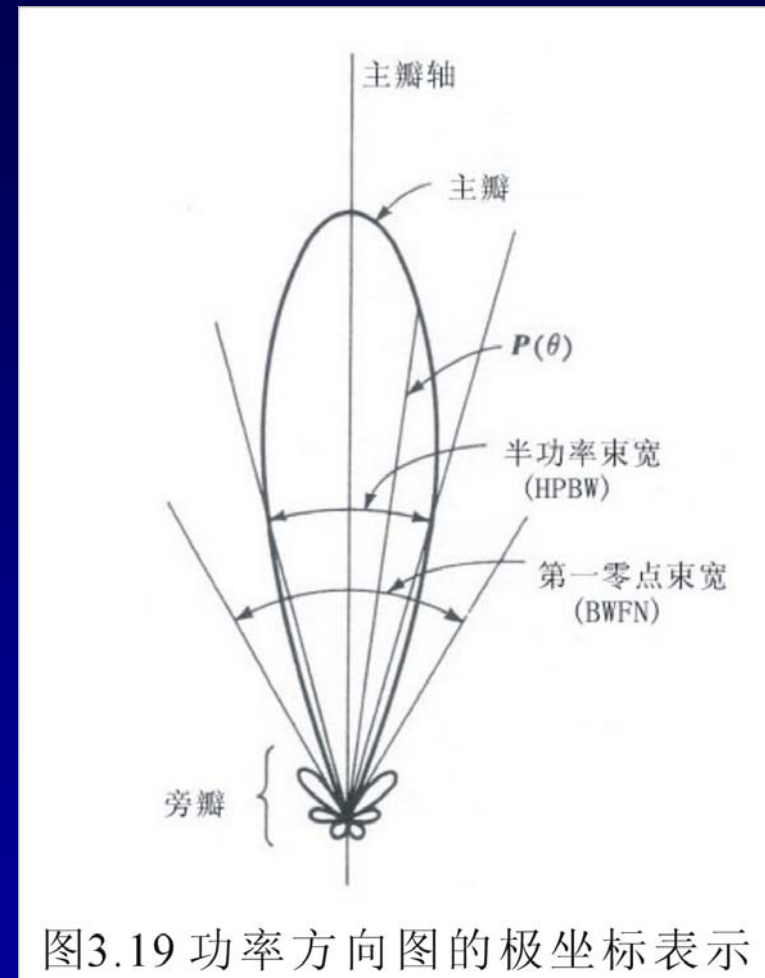


图3.19 功率方向图的极坐标表示



抛物面天线的性质-3

实际的抛物面天线

$$G_0 = \frac{4\pi}{\lambda^2} \eta_A A_g$$

一般天线效率

$$\eta_A = e_r \eta_t \eta_s \eta_a$$

e_r 辐射效率：天线发射的总功率与输给天线的总功率之比

η_t 削尖效率：天线孔径场分布一般总是中央比较高边缘比较小

η_s 溢出效率：馈源的功率方向图总有一部分在反射天的外面

η_a 技术效率：天线面板随机误差、孔径遮挡、实际天线反射面偏离设计形状引起的反射面相位误差、馈源相位误差等等



抛物面天线功率方向图测定

扫描法：指向强射电点源

跟踪状态，偏离 ± 2 HPBW，步长 0.2 HPBW

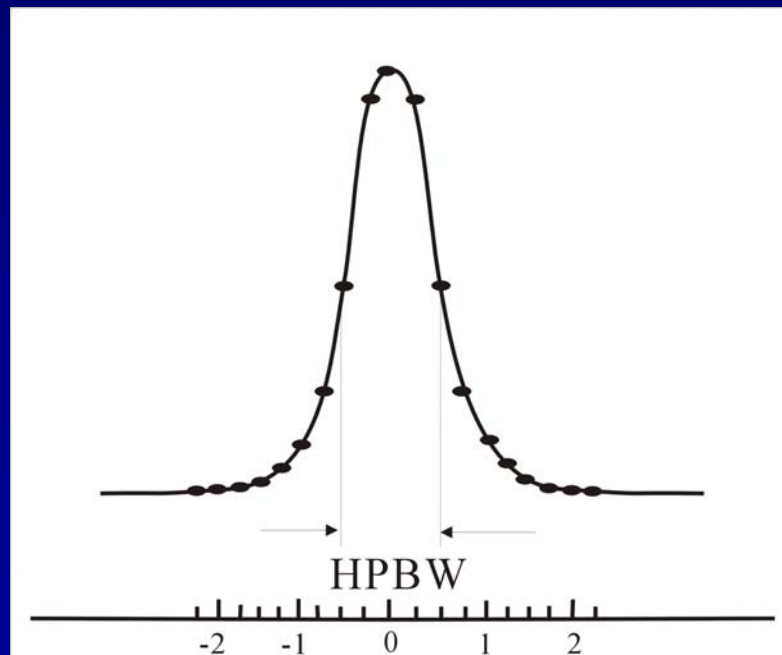


图3.21 用扫描方法得到的各个扫描点偏离中心的位置和测得的天线温

B高斯曲线拟合

$$P(x) = \exp \left\{ -2 \ln 2 \left(\frac{x}{HPBW} \right)^2 \right\}$$

射电望远镜-参数



抛物面天线指向精度测定-1

五点法：包括指向强射电点源和附近五点

天线的温度

$$T_i = T_p \exp \left\{ -2 \ln 2 \left[\left(\frac{\Delta AZ_i}{HPBW_{AZ}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta EL_i}{HPBW_{EL}} \right)^2 \right] \right\}$$

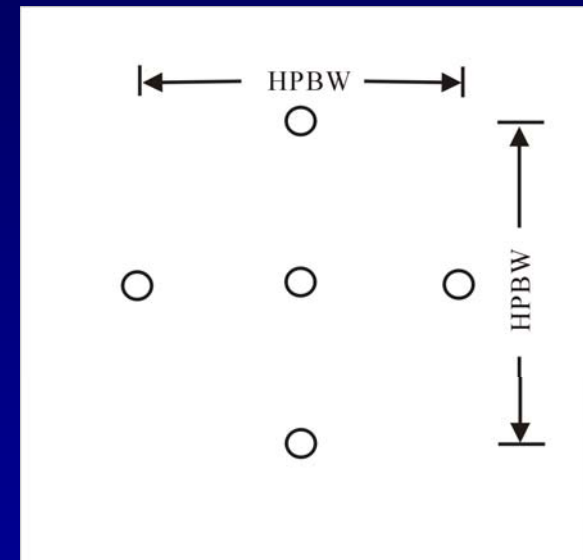
T_p 天线温度的极值

ΔAZ_i ΔEL_i

方位和仰角方向偏离

$HPBW_{AZ}$ $HPBW_{EL}$

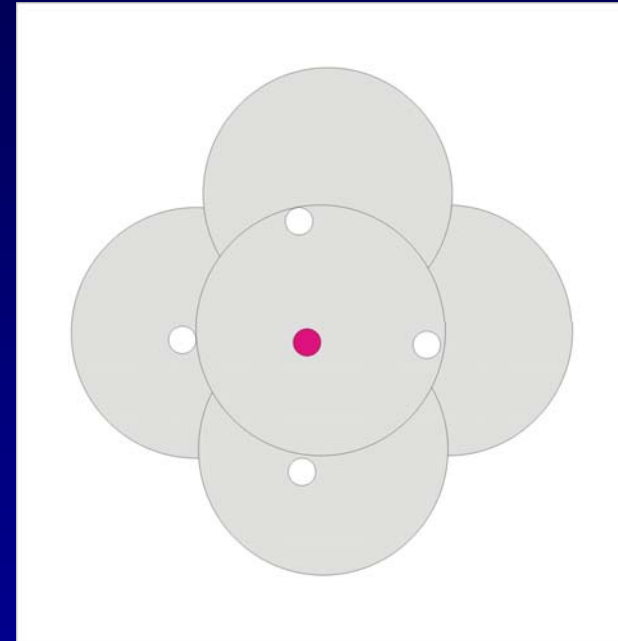
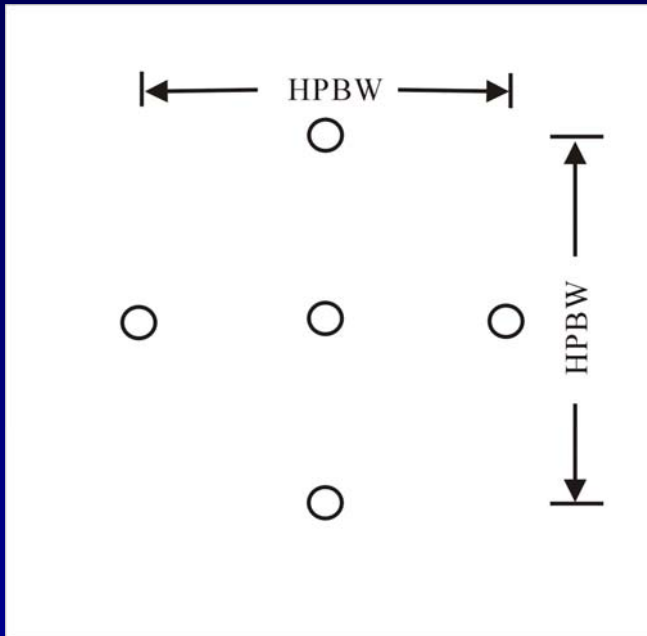
方位和仰角方向的半功率束宽



射电望远镜-参数



抛物面天线指向精度测定-1



$$\Delta AZ = (\ln T_4 - \ln T_5) * \frac{HPBW}{4(\ln T_3 - \ln T_4 - \ln T_5)}$$

$$\Delta EL = (\ln T_2 - \ln T_1) * \frac{HPBW}{4(\ln T_3 - \ln T_4 - \ln T_2)}$$



抛物面天线指向系统误差模型

系统误差模型

$$\Delta AZ = P_1 + P_2 \tan EL - P_3 / \cos EL \\ + P_4 \sin AZ * \tan EL - P_5 \cos AZ * \tan EL$$

$$\Delta EL = P_4 \cos AZ + P_5 \sin AZ T_p \\ + P_6 + P_7 \cos EL + P_8 \sin EL$$

方位和仰角码盘零点误差

俯仰轴与方位轴不正交引起的误差

天线电轴与俯仰轴不正交引起的误差

方位轴南北和东西向偏斜引起的误差最后的和分别表示

对称和非对称重力变形引起的误差

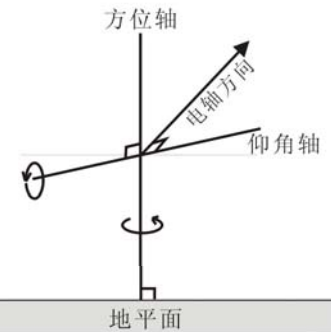


图3.25 大型地平式抛物面天线简化为方位轴、俯仰轴和抛物面天线的电轴的示意图



天线最佳状态

天线主反射面、副面和馈源要放置在正确的位置

天线反射面的精度要达到天线设计的要求，
即实际天线反射面与理论反射面偏离不能太大

怎样精度的反射面对天文观测是可以接受的??

由于面板精度误差引起的天线增益降低多少??



精确的理论研究

理想的反射面

$$E(l, m) = C_0 \iint \varepsilon(\xi, \eta) e^{-ik(l\xi + m\eta)} d\xi d\eta$$

反射面有误差

$$E(l, m) = C_0 \iint \varepsilon(\xi, \eta) \sigma(\xi, \eta) e^{-i\{kG + k(l\xi + m\eta)\}} d\xi d\eta$$

$$E(l, m) \leftrightarrow \varepsilon(\xi, \eta)$$

$$P(l, m) = E(l, m) E^*(l, m)$$



简单的估计-1

馈源发射球面波

有瑕疵的抛物反射面

孔径平面：
不是一个均匀的
平面电磁波

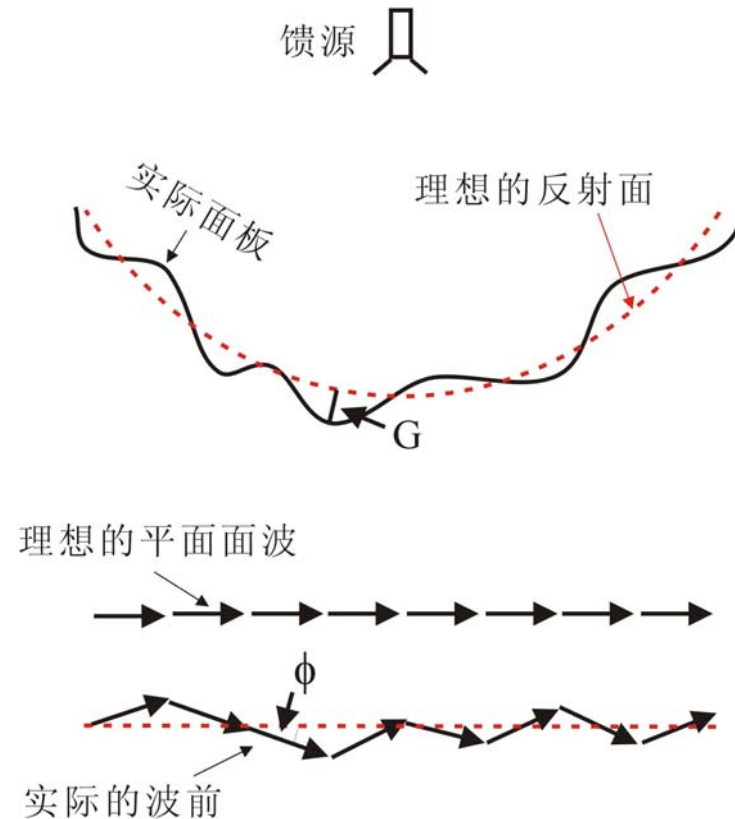


图3.31如果把天线看作发射天线，馈源发射的一个球面波经有瑕疵的抛物反射面天线反射后，在孔径平面上不是一个均匀的平面电磁波，而是一个强度和相位都不均匀的孔径场分布。



简单的估计-2

面板误差的均方根值
(rms) 为 ε

实际波前与理想波前的
相位差为

$$\phi = k \cdot 2\varepsilon$$

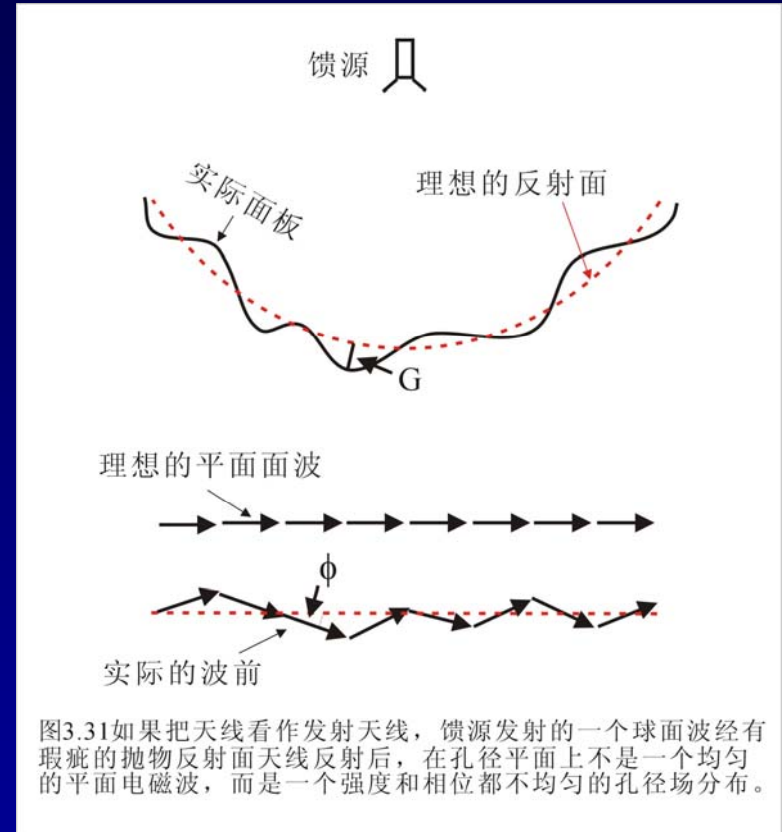
孔径平面实际波前的电场振幅

$$E = E_0 \cos \phi$$

E_0 理想波前平面电磁波的振幅

$$P/P_0 = \cos^2 \phi = \cos^2 (4\pi\varepsilon / \lambda)$$

$$\varepsilon = \lambda / 20 \quad P/P_0 = 0.65$$



天线面板精度

天线面板误差均方根值为 $\lambda/20$ 时，天线增益降低 39%

现代毫米波和亚毫米波天线

要求天线面板误差均方根值 $\lambda/40$

天线增益只降低 10%



天线全息法测量原理-0

要使一架射电望远镜天线要处在最佳的工作状态，

(1) 要求构成天线的所有光学组员，即天线主反射面、副面和馈源，应在设计的正确位置上，并有很好的准直；

(2) 可能比前者更重要的是天线反射面的精度要达到天线设计的要求，即实际天线反射面与理想反射面偏离的均方差 (r. m. s.) 好于 $\lambda / 40$ 其中 λ 为射电望远镜工作波长。

是一项具有挑战性的工作



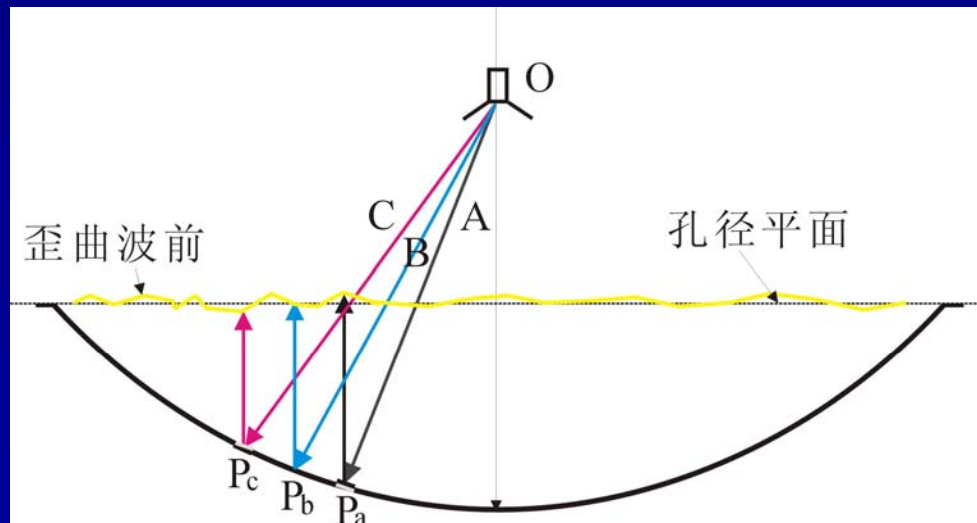
天线全息法测量原理-1

微波全息技术 (Microwave Holography Technique)

$$E(l, m) = C_0 \iint \varepsilon(\xi, \eta) e^{-ik(l\xi + m\eta)} d\xi d\eta$$

$$E(l, m) \Leftrightarrow \varepsilon(\xi, \eta)$$

得到天线孔径上任一点电场的振幅和相位



远场—同步卫星

相位参考—小天线

射电望远镜—参数



天线全息法测量原理-2

输入相关器的信号

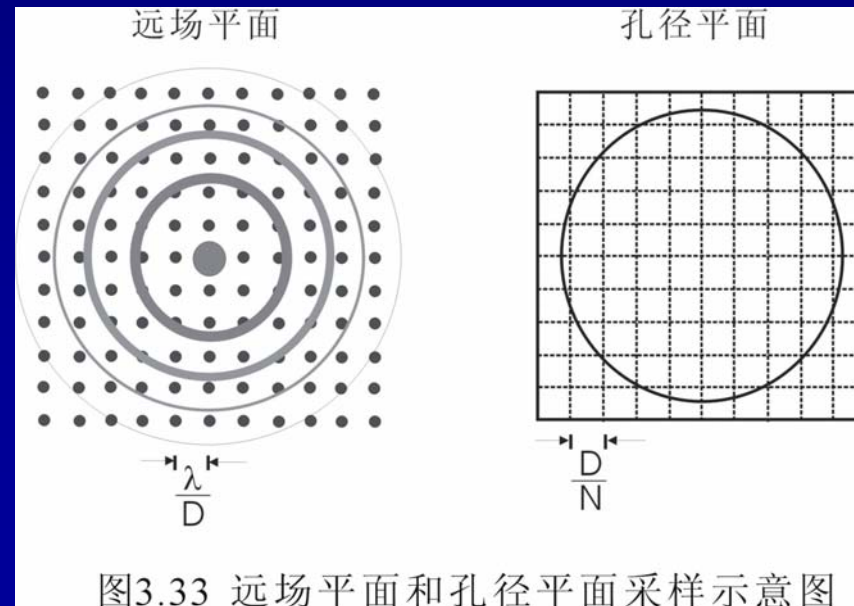
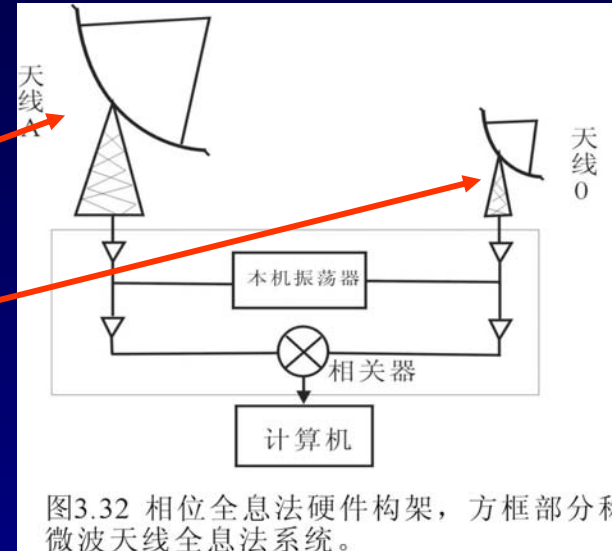
$$E_A = \varepsilon_A \exp[i(\omega t + \psi_A)],$$

$$E_0 = \varepsilon_0 \exp[i(\omega t + \psi_0)]$$

$$R_i(\Delta\psi) = E_A E_0^* \\ = \varepsilon_A \varepsilon_0 \exp[i(\psi_A - \psi_0)]$$

$$\varepsilon_A \varepsilon_0 \quad (\psi_A - \psi_0)$$

同步卫星的信号强



天线全息法测量原理-3



天线全息法测量原理-4

接收下来信号先进行Fourier变换，然后再相关得到待测天线在某个特定方向的观测相位和振幅

$$E_0(t) = \frac{1}{2\pi} \int E_0(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad P_0(\omega) = E_0(\omega) E_0^*(\omega)$$

$$E_A(t) = \frac{1}{2\pi} \int E_A(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad P_A(\omega) = E_A(\omega) E_A^*(\omega)$$

$$R(\omega) = E_A E_0^* = \varepsilon_A(\omega) \varepsilon_0(\omega) e^{i(\psi_A - \psi_0)}$$

带宽内平均



天线全息法测量结果

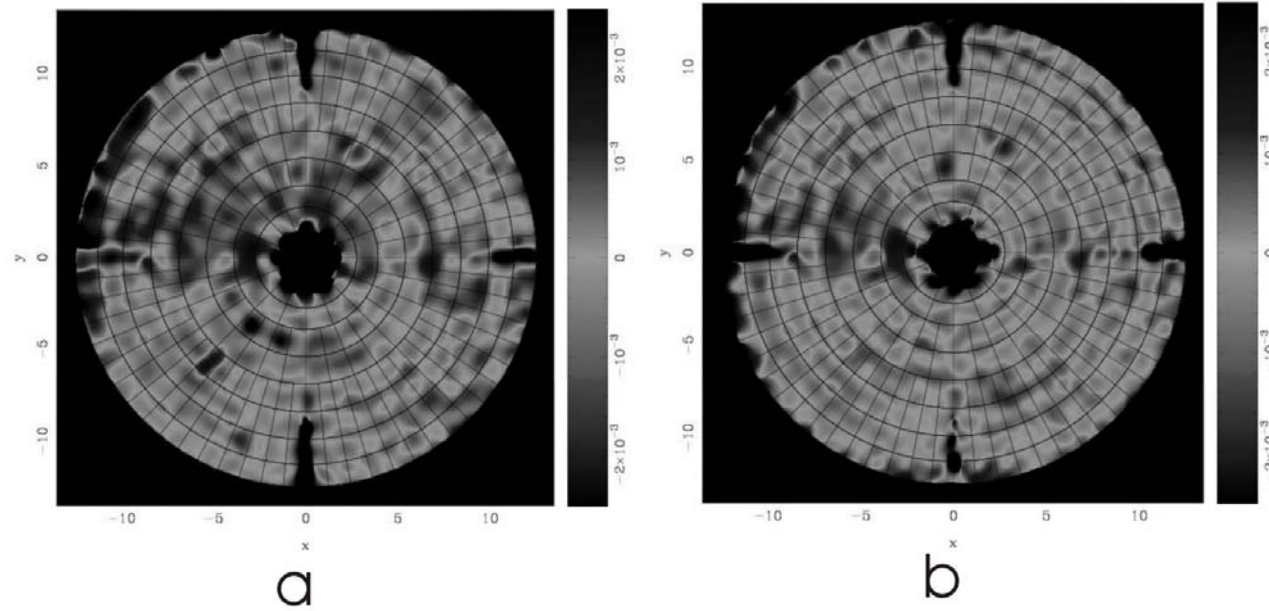


图3.34 (a) 面板调准前；(b)调准后用全息法测得面板误差，灰度的单位为米。

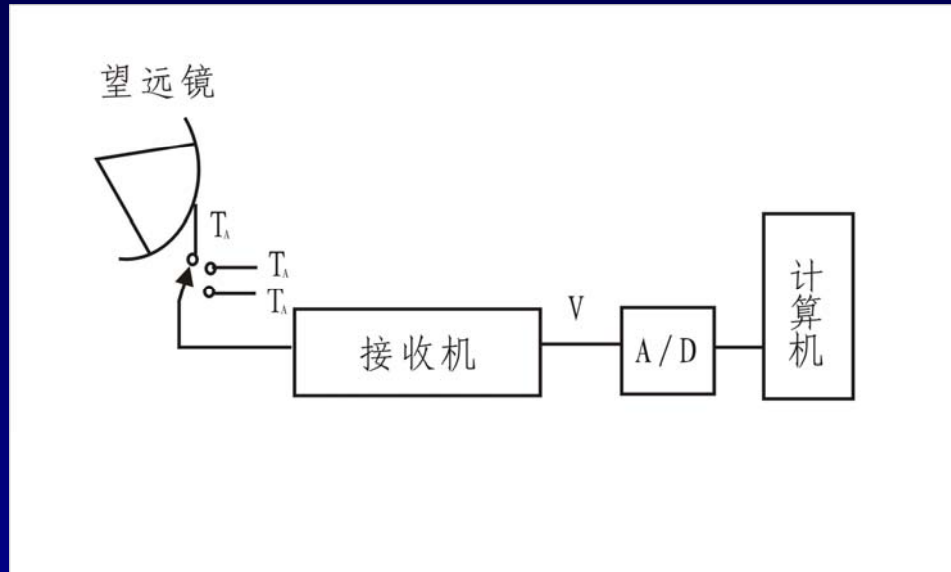


射电望远镜天线的校准

- 地球大气的校准
- 接收机的校准
- 射电流量的绝对校准
- 射电望远镜天线效率测量
- 射电流量的相对校准



射电望远镜接收机的校准-1



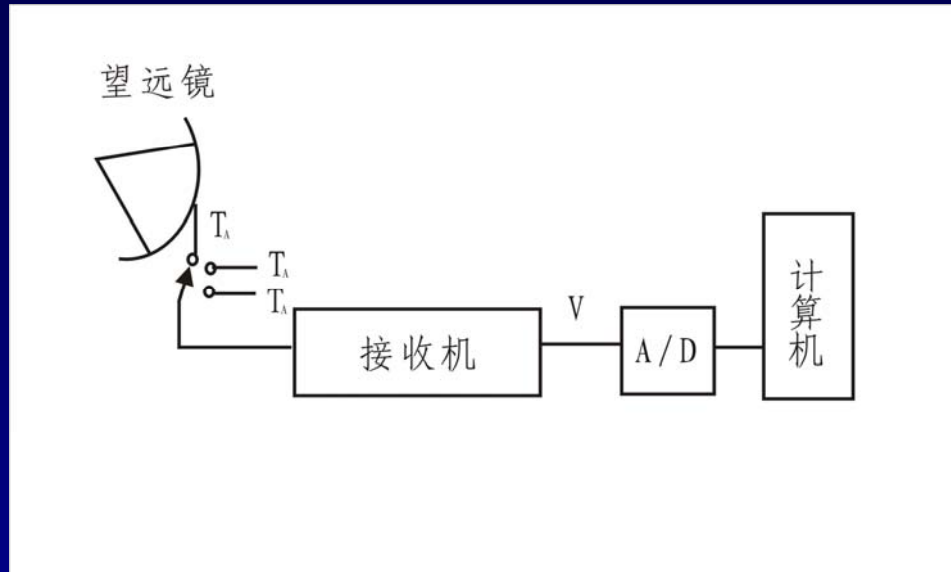
射电信号 $r = qT_A + P$

校准源1信号 $r_{N1} = qT_{N1} + P$ 液氮黑体

校准源2信号 $r_{N2} = qT_{N2} + P$ 常温黑体



射电望远镜接收机的校准-2



固体噪声信号 $r_S = qT_S + P$

校准源1信号 $r_{N1} = qT_{N1} + P$

液氮黑体

校准源2信号 $r_{N2} = qT_{N2} + P$

常温黑体



地球大气对电磁波传播地影响

- (1) 介质对电磁波的吸收；
- (2) 介质大尺度分布引起的射电波的折射和延迟；
- (3) 介质中湍动结构引起的辐射散射, seeing, 或叫闪烁



中性大气的吸收-1

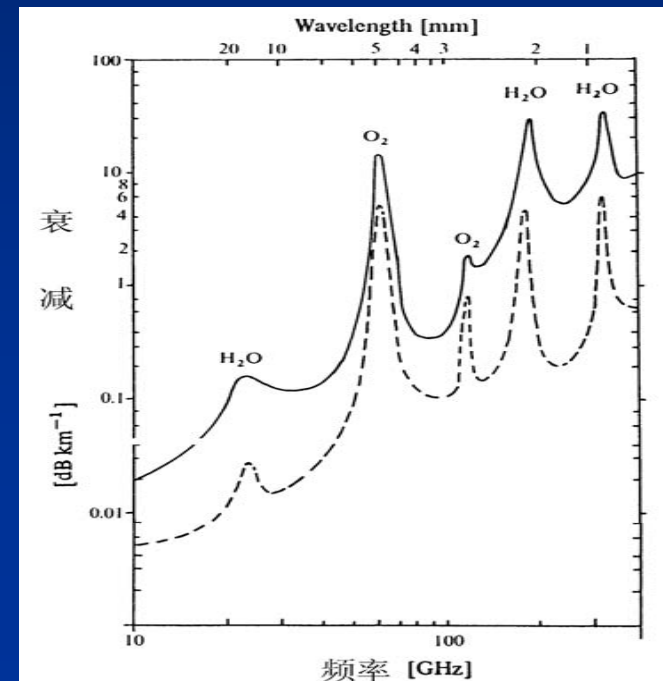
主要原因：中性大气中水汽、氧和臭氧的共振吸收

$$T_B(\nu) = T_{B0}(\nu)e^{-\tau_\nu} + \int_0^\infty k_\nu(s)T(s)e^{-\tau'_\nu} ds$$

介质有吸收一定有发射

要研究

- (1) 吸收的影响
- (2) 发射的影响



中性大气的吸收-2

主要原因：中性大气中水汽、

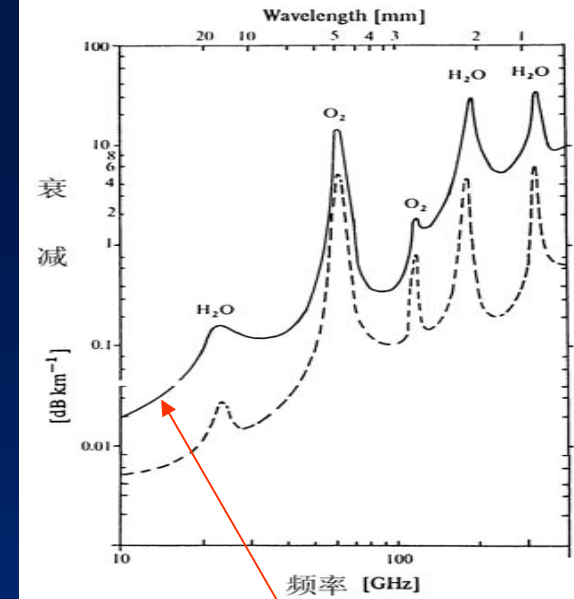
氧和臭氧的共振吸收

$$T_B(\nu) = T_{B0}(\nu) e^{-\tau_\nu} + \int_0^\infty k_\nu(s) T(s) e^{-\tau'_\nu} ds$$

$$k = (3.24 \times 10^{-4} e^{-644/T}) \frac{\nu^2 T \rho_\nu}{T^{3.125}} \left(1 + 0.0147 \frac{\rho_\nu T}{P}\right) \times \left[\frac{1}{(\nu - 22.235)^2 + \Delta \nu^2} + \frac{1}{(\nu + 22.235)^2 + \Delta \nu^2} \right] + 2.55 \times 10^{-8} \rho_\nu \nu^2 \frac{\Delta \nu}{T^{3/2}}$$

线心吸收系数： $k_m \approx 0.36 \frac{\rho_\nu}{P T^{1.875}} e^{-644/T}$

其他吸收
来自线翼



射电望远镜-辐射



不透明度和透射系数

不考虑发射 $T = 0$

$$T_B(\nu) = T_{B0}(\nu) e^{-\tau_\nu} \quad \eta = \frac{T_B(\nu)}{T_{B0}} = e^{-\tau_{\nu 0} M(z)}$$

大气质 $M(z)$ $z < 75^\circ$ $M(z) \approx \sec z$

天顶方向的不透明度 $\tau_{\nu 0}$ 透射系数 η

如果 $\tau_{\nu 0} \approx 10$, 大气完全不透明;

当 $\tau_{\nu 0} \leq 0.3$, 即透射系数超过

75 % 时, 认为可进行天文观测



不透明度测量-1

$$T_{cb} \approx 2.7\text{K}$$

用一架小的主焦反射面天线
望远镜接收到的系统噪声温度

地球大气

宇宙背景

$$T_S = T_R + T_{at}(1 - e^{-\tau_0 \sec z}) + T_{cb} e^{-\tau_0 \sec z}$$

接收机噪声

$$\ln \frac{T_S - T_R - T_{at}}{T_{cb} - T_{at}} = -\tau_0 \sec z$$

在对流层，其温度从地面温度开始逐渐下降，下降率约为
 6.5 K (km)^{-1} ，于是在高度的地方，大气的温度为

在 h 高度 $T_{at} = T_{sur} - Qh$

水汽标高 $\approx 2 \text{ km}$

平均值

$$\bar{T}_{at} = T_{sur} - Q \frac{\int_0^{\infty} h e^{h/h_0} dh}{\int_0^{\infty} e^{h/h_0} dh} = T_{sur} - Qh_0$$

射电望远镜-辐射



不透明度估计-2

$$\tau_0 = \alpha_0 + \alpha_1 \rho_{V0}$$

α_0 和 α_1 这两个常数, ρ_{V0} 海平面水汽密度

表:从海平面水汽密度估计大气不透明度的经验常数

频率(GHz)	α_0	α_1
1.5	0.013	0.0009
22.2	0.026	0.011
35	0.039	0.0030
90	0.039	0.0090



水汽辐射计和可凝水测量

$$\tau_0 = \int_0^{\infty} k_v(h) dh$$

水汽辐射计

小天线，中心工作频率：22.232 GHz，3 个通道

$$k_m \approx 0.36 \frac{\rho_v}{P T^{1.875}} e^{-644/T}$$

$$\tau_0 = 0.39 \int_0^{\infty} \frac{\rho_v}{P T^{1.875}} e^{-\frac{644}{T}} dh \quad \text{假定 } P \text{ 和 } T \text{ 分布为常数}$$

$$= 0.36 \frac{1}{P T^{1.875}} e^{-\frac{644}{T}} \int_0^{\infty} \rho_v dh$$



地球大气辐射的影响

$$T_S = T_R + T_{at} [1 - e^{-\tau_\nu}]$$

α_0

大气的辐射等效于提高接收机的噪声温度，使望远镜接收系统的灵敏度降低。

接收机的噪声温度为： $T_R = 30 \text{ K}$

大气温度为： $T_{at} = 290 \text{ K}$

大气的光深： $\tau_\nu = 0.2$

则系统噪声温度约为： $T_R = 83 \text{ K}$



射电源流量密度测量

天线单位流量密度所对应射电流量密度

$$f_{T_A=1\text{K}} = \frac{2k}{\eta_A A_g}$$

射电源的天线温度 T_A

$$F_\nu = \frac{2k}{\eta_A A_g} T_A$$

射电源大气外的流量密度为

$$F_\nu^0 = \frac{2k}{\eta_A A_g} T_A e^{\tau_\nu(0)M(z)}$$



射电源流量密度绝对测量

射电源大气外的流量密度为

$$F_{\nu}^0 = \frac{2k}{\eta_A A_g} T_A e^{\tau_{\nu}(0)M(z)}$$

射电望远镜天线的 η_A 已知：喇叭天线

能精确的扣除其他噪声源的影响

Wilson 测得天空温度为 6.7K，天线损耗0.8K 后瓣0.1K

大气2.3K

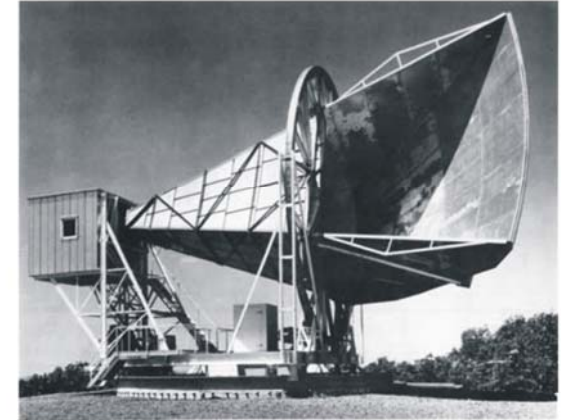


图3.14 位于美国新泽西州Holmdel镇贝尔电话实验的喇叭天线，它在美国国家宇航局（NASA）被动通讯卫星项目支持下在1959年建成。喇叭天线孔径约6.1米，长度约为15米，天线水平装置，喇叭天线支架底部安装在轮轨上，它整个能在水平位置上自由转动，天线的俯仰是通过直径近9米的高度轮转动来实现的。图中左边的小屋里的接收机直接地接在喇叭天线上，减少了传输线引起的噪声。



射电望远镜天线效率测量

$$F_{\nu}^0 = \frac{2k}{\eta_A A_g} T_A e^{\tau_{\nu}(0)M(z)}$$

$$\eta_A = \frac{2k}{A_g} \frac{T_A}{F_{\nu}^0} e^{\tau_{\nu}(0)M(z)}$$

观测不同天顶距位置射电校准源 天线效率曲线

$$G(l, m) = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{\text{eff}}(l, m) \quad G(l, m) = \frac{4\pi}{\lambda^2} \eta_A(l, m) A_g$$

$$G(l, m) = \frac{8k\pi}{\lambda^2} \frac{T_A}{F_{\nu}^0} e^{\tau_{\nu}(0)M(z)}$$

天线增益曲线

射电望远镜-参数



射电源流量密度相对测量

射电源大气外的流量密度为

$$F_{\nu}^0 = \frac{2k}{\eta_A A_g} T_A e^{\tau_{\nu}(0)M(z)}$$



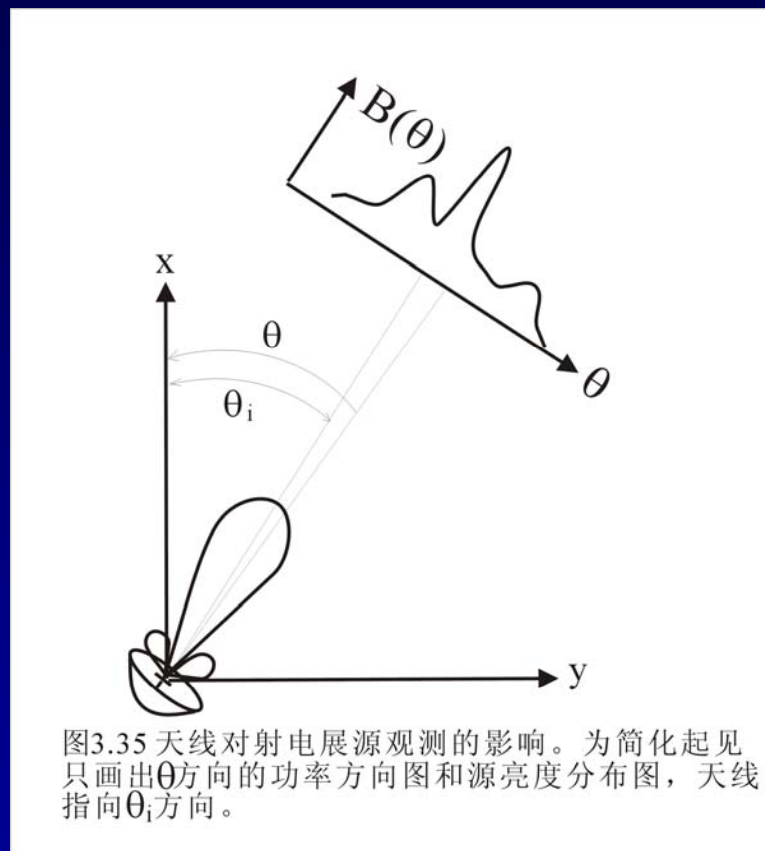
天线对天体成图观测的影响-1

单天线观测一个展源时，不可能得到实际的射电源亮度分布

束平均亮度分布

恢复得到源实际的亮度分布

射电天文一个大课题



天线对天体成图观测的影响-2

天线电轴对准方向 θ_i

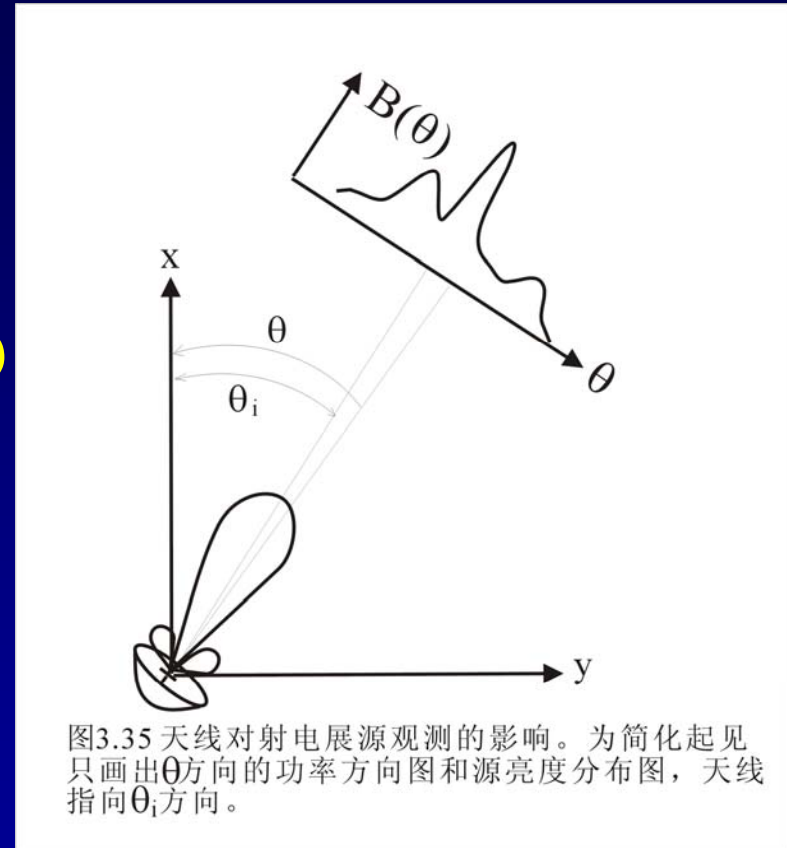
这个方向天线的有效面积为 $A_{eff}(\theta_i)$

天线对应于方向 θ
角径为 $d\theta$ 辐射小面元
功率输出可以写为，

$$W(\theta) = \frac{1}{2} F A_{eff}(\theta - \theta_i) \Delta \nu$$

$$W(\theta) = \frac{1}{2} B(\theta) d\theta A_{eff}(\theta - \theta_i) \Delta \nu$$

$$W(\theta_i) = \frac{1}{2} \Delta \nu \int_{\Omega_M} B(\theta) A_{eff}(\theta - \theta_i) d\theta$$



天线对天体成图观测的影响-3

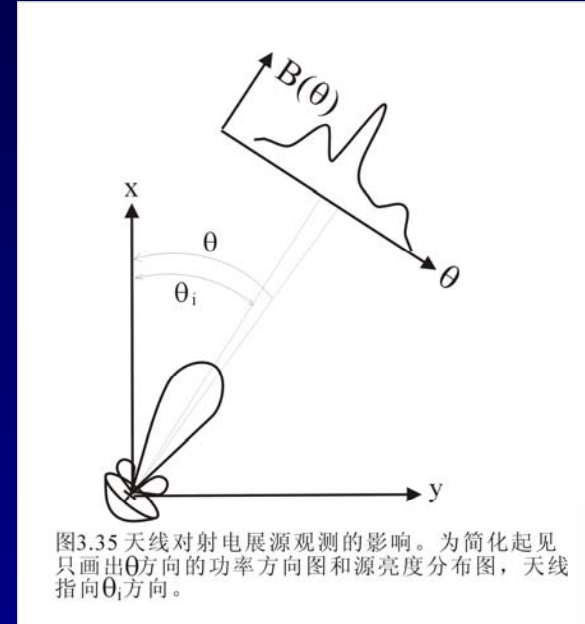
$$W(\theta_i, \phi_j) = \frac{1}{2} \Delta \nu A_{\text{eff},0} \int_{-\infty}^{\infty} B(\theta, \phi) P(\theta - \theta_i, \phi - \phi_j) d\Omega$$

$$F'(\theta_i, \phi_j) = \int_{-\infty}^{\infty} B(\theta, \phi) P(\theta - \theta_i, \phi - \phi_j) d\Omega$$

$$T_A(\theta_i, \phi_j) = \frac{A_{\text{eff},0}}{\lambda^2} \int_{-\infty}^{\infty} T_B(\theta, \phi) P(\theta - \theta_i, \phi - \phi_j) d\Omega$$

$$B_A(\theta, \phi) = B(\theta, \phi) \otimes P(\theta, \phi)$$

$$T_A(\theta, \phi) = \frac{A_{\text{eff},0}}{\lambda^2} T_b(\theta, \phi) \otimes P(\theta, \phi)$$



天线对天体成图观测的影响-4

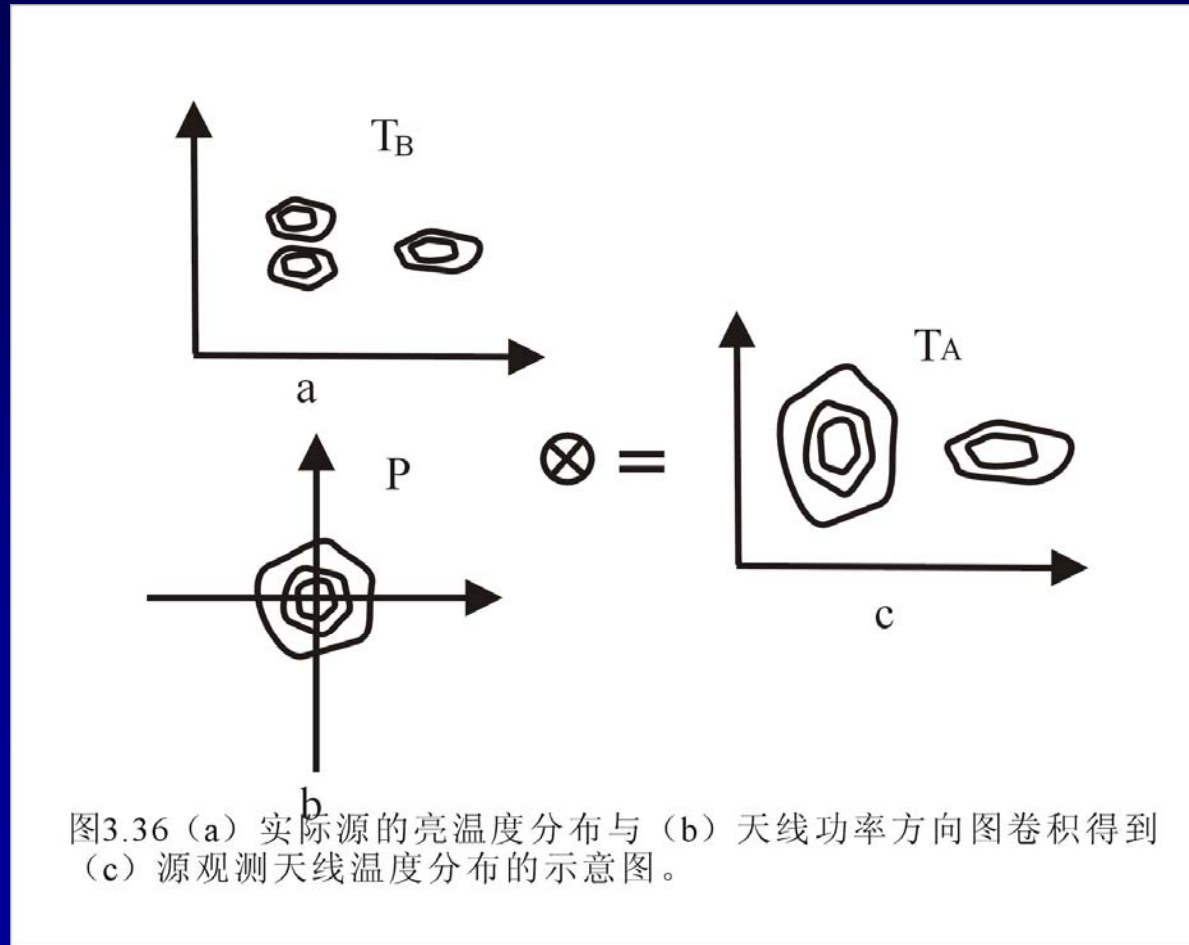


图3.36 (a) 实际源的亮温度分布与 (b) 天线功率方向图卷积得到 (c) 源观测天线温度分布的示意图。



天线对天体成图观测的影响-5

$$B_A(\theta, \phi) = B(\theta, \phi) \otimes P(\theta, \phi)$$

$$T_A(\theta, \phi) = \frac{A_{eff,0}}{\lambda^2} T_b(\theta, \phi) \otimes P(\theta, \phi)$$

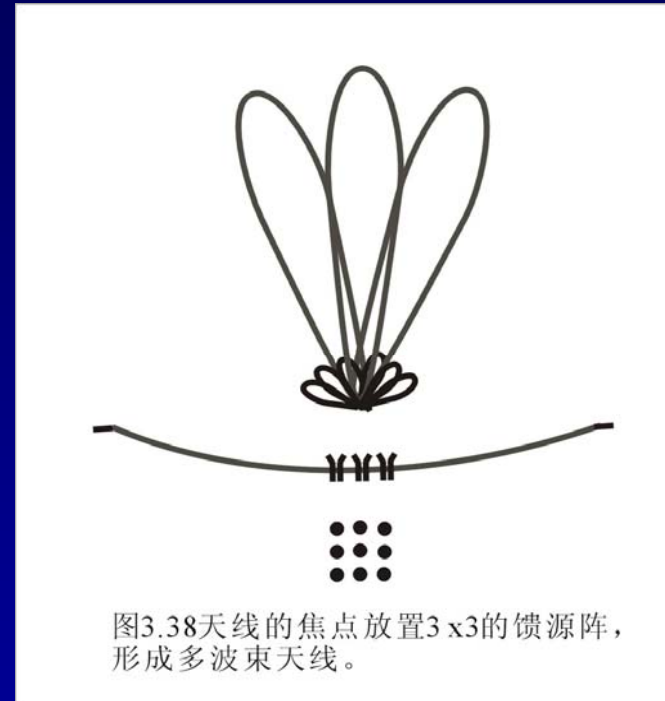
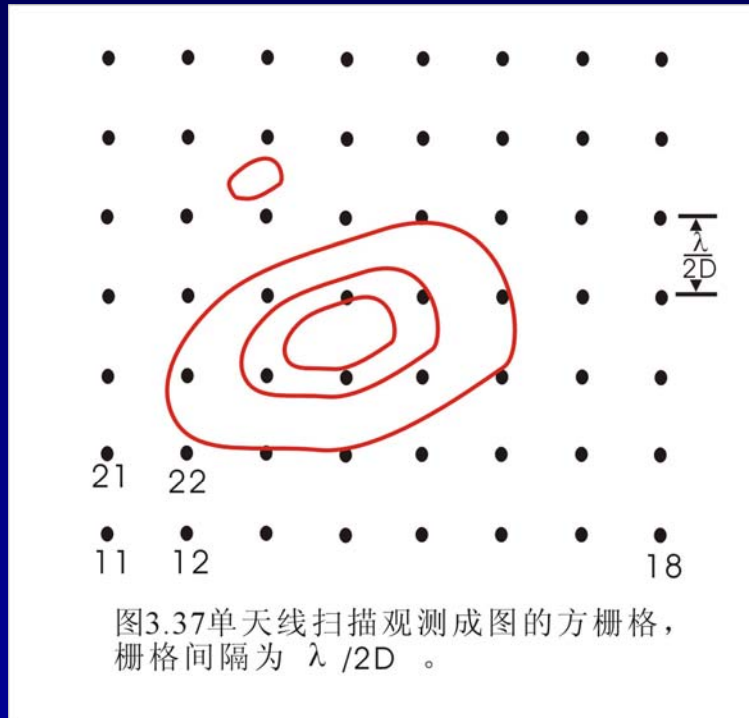
观测一个射电点源 $B(\theta, \phi) = 1$ $T_B(\theta, \phi) = 1$

$$B_A(\theta, \phi) = P(\theta, \phi)$$

$$T_A(\theta, \phi) = \frac{A_{eff,0}}{\lambda^2} P(\theta, \phi)$$



空单天线成图观测



美丽的南京大学天文系

