

射电天文中焦面阵或多波束馈源的应用

吴 盛 殷 南 仁 东

(中国科学院国家天文台 北京 100012)

摘 要

焦面阵技术或者多波束馈源系统已经日益广泛地应用于现代射电望远镜,因为它可以充分地利用同一射电望远镜反射面所能提供的信息,在观测比射电望远镜方向瓣大得多的展源时数倍乃至数十倍地提高观测的速度;当存在大气层或电离层的起伏或不均匀影响观测成像质量时,可消除这种影响,提高观测质量;利用焦面阵各单个馈源接收到的信息的互相关,则可以实时监控射电望远镜的反射面、二次反射面、指向精度,从而降低地面上大射电望远镜或空间射电望远镜的精度要求和造价。目前焦面阵已经愈来愈广泛地配置在毫米波射电望远镜和大型射电望远镜的主要波段。对此作了一个较新和全面的评述,对焦面阵应用中的限制,包括相位误差的限制和性能价格比的考虑和可能的前景作了简要的介绍。还分析了在计划中的大型主动球反射面射电望远镜(即 FAST)上,配置焦面阵的相应限制、问题和难点,提出了初步的建议,并给出经中英双方讨论后初步拟定的 FAST 频段、波束及低噪声放大器的配置。

关 键 词 射电天文学 — 射电望远镜 — 馈源系统 — 焦面阵 — 多波束

分 类 号 P111.44

1 引 论

多波束馈源或焦面阵在抛物面天线上的运用,始于 20 世纪 60 年代末,此技术在 70 年代较大量地被引入射电望远镜,开始主要用于方向束开关方法以扣除高空大气层、电离层的影响,提高射电望远镜观测和成像的精度。70 年代后期随着毫米波射电望远镜的发展和对分子云观测的扩展和深入,焦面阵技术越来越多地应用于毫米波射电望远镜,以大大加快单镜面毫米波射电望远镜对分子云这样的展源进行的成像观测。正是由于此项技术特点和发展的历史原因,加之与多波束馈源相联系的高昂造价,至今多波束馈源仍主要配置在毫米波射电望远镜和主要射电望远镜最重要的厘米波段,并没有也不可能广泛地配置在后者的全部波段。

FAST 既然有望成为 21 世纪头十年内世界一流的射电望远镜之一, 在其某些波段配置多波束馈源当然是必要的。FAST 是一个具有主动反射面的巨型球面射电望远镜, 其部分反射面单元将随着观测和跟踪射电源而实时地调整为对向该天体的抛物面^[1], 为了扩大其天空覆盖, 在观测目标处于大天顶距时, 不得不利用非对称的或残缺的抛物反射面、采用偏置照明等非常规手段^[2], 而且射电望远镜的指向靠馈源整体的驱动和跟踪, 和球面板到抛物反射面的实时拟合, 原则上只能采取主焦馈电, 使用二次反射面及卡焦或格焦馈电的可能性极小, 这些因素决定了在 FAST 上配置多波束馈源的特殊性和难度, 本文在对焦面阵作一般性评述之外, 将顺便探讨该特殊问题。

2 某些基本理论的探讨

2.1 关于抛物面天线相位误差的某些注解

抛物面天线孔径上相位分布不均匀时, 增益就会降低, 这种现象称为相位误差效应, 其相位误差主要来自三个方面, 反射表面的加工及调整误差、馈源相位中心相对抛物面焦点的偏离以及馈源辐射波不是球面波^[3]。

一般要求抛物面制造及校准的公差 Δp 引起的相位误差不超过 $\pi/2$, 考虑到这种公差可以有正有负, 因此通常以 $\Delta p/2$ 作为技术公差, 它应满足条件^[3]:

$$\frac{\Delta p}{2} \leq \frac{\lambda}{32(1 + \cos \psi)} \quad (\text{FAST: } 1.2\text{mm, 在 } 5\text{GHz, } \psi = 56^\circ) \quad (1)$$

这里 ψ 是抛物面上某点到馈源相位中心的连线相对馈源主轴的夹角。

馈源相位中心不在焦点, 而是在沿主轴方向有一位置差 Δp , 也引起相位误差, 要求由此产生的最大相位误差不超过 $\pi/2$, 这时应有^[3]:

$$\Delta p_{\max} \leq \frac{\lambda}{16(1 - \cos \psi)} \quad (\text{FAST: } 8.5\text{mm, 在 } 5\text{GHz, } \psi = 56^\circ) \quad (2)$$

馈源相位中心在焦平面上的移位只引起方向束的移动及相对抛物面顶点的非球面波辐射。

馈源辐射波相对抛物面主轴非球面波引起的相位误差, 主要来自不能归之于发自相位中心的辐射, 例如采用圆盘形馈源或者焦平面阵的情况, 与馈源的类型、形状和大小有密切的关系, 这里不可能作详细的分析并给出简单的关系式作定量的描述, 但一般地说如果能保证反射自镜面边沿的程差控制在 $\lambda/16$ 以内, 天线增益的降低将在 2% 以下。

2.2 关于多波束馈源系统的某些约束条件

2.2.1 Nyquist 采样定理对焦平面阵的限制^[4]

根据采样定理, 焦面阵所产生的方向束角间距应该满足条件: $\Delta\theta = \lambda/2D$, 即约 43% 半功率方向束宽, 在望远镜的焦平面上, 这对应着 $\Delta x = 0.5\lambda F_n = 0.5\lambda F/D$, 这里 F 为有效焦距, F_n 是以孔径为单位的焦数。

实际情况是按采样定理确定的阵元间隔往往难以实施, 例如对 FAST 的情况, 在 6 及 21cm 波段, 这一完全采样的间距分别相当于 1.41 及 4.93 cm, 但为了有效地照明, 最

小馈源的尺寸应该是该间距的 3 ~ 5 倍, 所以物理上根本不可能设置所要求结构的焦面阵来实现以 Nyquist 采样率采样的高孔径效率。好在射电源结构不会在天的时间尺度上有明显的变化, 可以采取另外的途径, 如移动望远镜、作交错扫描、设置交错排列的两偏振馈源组等, 以较多的时间实现完备的采样。这时和采用较紧密排列的小馈源阵相比, 用焦面阵设备成像总的速度并不降低, 因为前者的灵敏度低, 需要较长的积分时间。

2.2.2 多馈源照明和成像的关系^[5]

当 $F/D > 1$ 时, 馈源在焦面上的小移位, 相当于孔径照明的线性相移, 等效于孔径转过一个角度——即调动方向束。当 $F/D < 1$ 时, 焦面上所成图像受彗形 (Coma) 像差的歪曲, 通过焦点的平面波阵面反射到焦平面上的焦点和与之相间 L 的另一点的相对波程差中, 除了线性程差外, 还含有非线性部分^[5]:

$$\Delta p \cong L \sin \psi \cong \delta\gamma \left(H + \frac{H^3}{4F^2} \right) \quad (3)$$

式中 H 为抛物面上某点相对主轴的距离 (该式原书中第二项的符号有误, 应该是正号。), F 为焦距, $\delta\gamma = L/H$ 为对应焦平面上线性位移 L 的方向束转动角 (以 rad 为单位)。

在 $H/F \ll 1$ 的一级近似下, 对抛物面上某点反射的波程差为: $\Delta p \approx \delta\gamma H$ 。而在不满足 $H/F \ll 1$ 的一级近似条件的情况下, $H = D/2$ 时达到的最大相位误差将为:

$$\delta\phi_{\max} = \frac{\pi\delta\gamma D^3}{16\lambda F^2} \approx \frac{0.075n\pi}{(F/D)^2} \quad (4)$$

这里令 $\delta\gamma = n\theta_{1/2} = n \times FWHP = 1.2n\lambda/D$ ($FWHP$ 为方向束的半功率宽度), $\delta\phi_{\max} = \pi$ 的最大相位误差, 对应百分之几的有效面积减小或相应的增益降低, 这时方向瓣的形状不致引起太大的变化, 而且由此产生的彗差旁瓣响应将低于 -15dB。从 (4) 式可见, 用于射电天文的短焦距抛物面天线 ($F/D \cong 0.4$) 不适宜在焦平面产生比较大的像, 或者采用较大的焦面阵。

2.2.3 消旋转和焦面阵各单元间的差异问题

由于视差效应和地球的周日运动, 对一般地平装置的射电望远镜, 焦面阵和相对应的方向束阵相对于射电源有旋转, 这种旋转可以用旋转补偿法, 即使焦面阵作相应的补偿旋转, 或者在数据处理中用“软件消旋转” (software derotation) 来消除旋转效应。

焦面阵各单元间的孔径效率和与接收机的耦合或连接一般都可能因照明差异和其他像差而不同, 这些都必须用观测行星或其他源的办法来测量和改正。而孔径效率的不同也可能由一些潜在因素产生, 例如随阵元、观测高度角、频率、视差角方向束对光学主轴的偏离和溢损而异。有必要花费一定的时间对这些因素作尽可能的定量分析, 并且在设置焦面阵时, 尽可能使各单元一致并保持稳定, 特别是使之与频率无关。

2.2.4 关于 FAST 计划中采用多波束馈源的可能性

首先, 对 FAST 说 $F/D = 141/300 = 0.47$ 并不满足 $F/D > 1$ 的条件, 其馈源对孔径的最大照明角 $\psi_{\max} = 56^\circ$, $\delta\phi_{\max} = \pi$ 的最大相位误差, 对应 $n_{\max} \cong 2.94$, 方向束半功率宽 $\theta_{1/2}$ 在 5GHz 及 1.4GHz 波段分别为 $49.5''$ 及 $2.89'$, 而焦平面上馈源间距 L 应分别为 4.34 及 15.2cm, 最大焦面阵半径应该分别是 12.59 及 44.08cm。如考虑到 Nyquist 采样定

理的限制, 焦平面上馈源间距 L 在上述两个波段应该分别取值 1.41 和 4.94cm, 但实际上这样的间隔是难以实现的。最终可以得出的结论是在 FAST 计划中设置多波束馈源阵是可能的, 但多波束馈源阵的分布范围或多波束在天空中覆盖的范围是有限的。

2.3 关于 FAST 计划中的偏置照明

为了扩大 FAST 的天空覆盖, 改善大天顶角观测时的方向瓣, 降低望远镜边沿溢出或地面噪声的影响, 当观测天顶角大于 30° 时, 需要将馈源或馈源阵相对主光轴作一个最大达 30° 的旋转, 使馈源或馈源阵保持指向可利用孔径的中心^[6]。在这种情况下, 馈源阵的边沿相对处于抛物面焦点的中心引进额外的相位差: $\pm 4\pi nL \cdot \sin(\theta/2)/\lambda$, 这里 L 为最小间隔, n 为前面所确定的容许径向阵元数。此时多波束馈源阵已经不再是严格意义上的焦平面阵, 它将至少使天线增益进一步降低, 而且容许相位误差会进一步限制焦面阵的径向尺度, 需要作更仔细的分析研究。

3 世界上一些主要射电望远镜上馈源及多波束馈源的配置

为了解国际上主要射电望远镜对多波束馈源的配置情况, 从万维网上获取了美国最新建成的 GBT 射电望远镜、美国 Arecibo 球面射电望远镜、德国 Effelsberg 100m、英国 Jodrell Bank 的 Lovell 76m 及澳大利亚 Parkes 64m 射电望远镜的有关情况, 分别整理列表于后。某些最新的进展, 将在相应的表后作简短说明。

3.1 GBT 的前端配置:

表 1 美国 Green Bank 新 100m 射电望远镜的前端配置

频率 /GHz	状态	安装位置	系统温度 /K	波束	偏振测量
0.29~0.395	在建	主焦		单波束	双(线/圆)偏
0.385~0.52	在建	主焦		单波束	双(线/圆)偏
0.51~0.69	在建	主焦	30	单波束	双(线/圆)偏
0.68~0.92	在建	主焦	30	单波束	双(线/圆)偏
0.91~1.23	在建	主焦		单波束	双(线/圆)偏
L 波段 FPA	研发中	主焦	< 50	19 元成束网络	双线偏振
1.15~1.73	完成	格焦	20	单波束	双(线/圆)偏
1.73~2.60	在建	格焦	20	单波束	双(线/圆)偏
3.95~5.85	完成	格焦	20	单波束	双(线/圆)偏
8.0~10.0	完成	格焦	21~27	单波束	双圆偏
12.0~15.4	完成	格焦	24~30	双波束	双圆偏
18.0~22.0	完成	格焦	38	双波束	双圆偏
22.0~26.5	完成	格焦	42	双波束	双圆偏
26.0~40.0	部分集资	格焦		双波束	双线偏
40.0~52.0	设计中	格焦		四波束	双圆偏带第 3 面
86.0	建议	格焦			

表中格焦表示为设置在格雷戈里反射面焦点的接收机, 作为近年完成的“最现代化”的大抛物面射电望远镜, GBT 也只在 L 波段计划配置真正意义上的多波束成像焦面阵, 在 10 GHz 以上高频率段配置的双波束或四波束装置, 显然是为了减小大气影响和提高观测精度。焦面阵技术的不断发展也正促使 NRAO 计划在更多波段配置焦面阵, 例如他们准备在 18~26GHz(K) 波段配置焦面阵, 以便对该波段的强 H₂O 脉泽辐射及大量 NH₃ 谱线的热发射作有成效的观测。另外拟发展 3mm 波段的双束、双偏振相关型接收机, 并进一步发展大于 1000 像素的大尺度测热辐射计阵作连续谱观测, 32 波束阵作谱线成像观测^[7]。

3.2 Effelsberg 100m 射电望远镜的前端配置:

表 2 德国马普射电天文所 100m 射电望远镜的前端配置

频率 /GHz	安装位置	前放类型	系统温度 /K	通道数	波束数	偏振测量
408	主焦	FET	100	2	1	双圆偏
610	主焦	FET	130	2	1	双圆偏
0.8/1.3	主焦	HEMT	50~95	2	1	双圆偏
1.3/1.7	主焦	HEMT	26	2	1	双圆偏
2.3	格焦	FET	80	1	1	软件偏
2.7	格焦	FET	40	2	1	双圆偏
3.2	主焦	FET	30	1	1	软件偏
4.6	主焦	参放	40	1	1	软件偏
4.85	格焦	HEMT	30	8 ^[9]	2	双圆偏
6.25	主焦	HEMT	50	2	1	双圆偏
8.6	格焦	HEMT	50	2	1	双圆偏
10.7	格焦	HEMT	50	16 ^[9]	4	双圆偏
12.1	主焦	HEMT	170	1	1	软件偏
13.25	主焦	HEMT	50	2	1	双圆偏
15	格焦	HEMT	100	4	4 ^[9]	软件偏
15/23/43	格焦	HEMT	55/50/100	6	1	双圆偏
18~26	主焦	量子放大器	30~60	1	1	软件偏
27~36	主焦	HEMT	70/40	1	1	软件偏
32	格焦	HEMT	100	12 ^[9] , (36 ^[9])	3, (9)	双圆偏
32	主焦	HEMT	100	2	1	双圆偏
43	主焦	HEMT	120	1	1	软件偏
40~50	主焦	HEMT	70	2	1	双圆偏
86	主焦	混频器	200	1	1	软件偏

表中 HEMT 表示高电子迁移率晶体管放大器, FET 为场效应晶体管放大器, 格焦表示为设置在格雷戈里反射面焦点的接收机, 值得注意的是马普所在望远镜上发展的多方向束装置主要用于扣除天气及大气效应, 配合特殊的解积算法及所谓“软件波束开关”技术, 提高观测精度。新发展的多波束设施也主要在 10.7 及 32 GHz 等较高的频率, 并没有看到发展 1.42/1.66 GHz 的观测中性氢及羟基分子云的多波束装置的计划^[8]。实际上, 因为该射电望远镜的主焦模式只有 0.3 的焦比, 安装主焦模式的 L 波段多波束馈源除馈源本

身的体积过大难以实现外, 成像方面的障碍也是主要因素。目前安装在二次焦点的 L 波段多波束馈源正在计划中。除了 15 (14.7) GHz 外的所有多波束系统每个馈源配有附加的 IF 偏振计作高灵敏度线偏振辐射观测, 而前者可旋转以补偿观测中的视差角变化^[9]。

3.3 Jodrell Bank MkIA(即 Lovell) 射电望远镜的前端配置:

Lovell 射电望远镜是最早 (20 世纪 50 年代) 建成的、直径为 76m 的大型抛物面望远镜, 虽经数次反射面重铺及结构改造, 现在其工作波段还是相对较少, 主要频段是 1.3 ~ 1.8 GHz ($T_{\text{sys}} = 37\text{K}$)、5 GHz ($T_{\text{sys}} = 33\text{K}$) 及 327 MHz, 因为该望远镜焦比较小 ($F/D = 0.25$), 长期以来只能用作主焦接收, 未曾配置多波束接收机^[10]。已经制定计划进一步改造该射电望远镜, 包括重铺铝合金反射面板, 将柱支撑主焦接收改成卡焦接收, 采用 PID 反馈改善跟踪及指向精度, 用全息测量法来调整表面以达到 8 mm 以内的峰-峰形变 (相当于 1 mm 的表面公差), 并采用可变形的二次反射面以补偿主反射面的偏差, 使该射电望远镜能工作到 22 GHz 并有 85% 的最高孔径效率和 100K 的系统温度^[11]。计划配置 HEMT 低噪接收机, 使望远镜系统温度达到 14K, 灵敏度达到 1.41 K/Jy, 在 5 GHz 的灵敏度将改善约 30 倍。由于改造成为卡焦系统, 所以计划配置 7 馈源的焦面阵系统, 其外侧的馈源增益降低到 -1 dB 以内。届时有望将此最“年长”的大射电望远镜改造为有与现代化大射电望远镜相匹配的波段设置、灵敏度和多波束配置的望远镜^[12], 并列和 GBT、Effelsberg 100m 望远镜那样全波段的前端配置表。

3.4 Arecibo 射电望远镜的前端配置:

表 3 Arecibo 射电望远镜 (305m) 的前端配置表

频率 /GHz	状态	类型	系统温度 /K	灵敏度 /K·Jy ⁻¹	方向束配置	安装位置
0.3~0.4	2000	HEMT	—	—	单方向束	格焦
0.41~0.45	完成	HEMT	44+Sky	9	单方向束	格焦
0.6~0.7	完成	HEMT	120	10	单方向束	格焦
1.15~1.73	完成	HEMT	38	10	单方向束	格焦
1.37~1.45	完成研究	HEMT	32	10	7 束 (2-3-2)	格焦
1.7~3.0	2000	HEMT	35	7	单方向束	格焦
2.33~2.43	完成	HEMT*	32	7	单方向束	格焦
3.0~4.0	2000	HEMT	—	—	单方向束	格焦
4.0~6.0	完成研究	HEMT	36	(3)	10 束 (3-4-3)	格焦
6.0~8.0	2001	Dual Beam	—	—	2	格焦
8.0~10.0	2000 完成研究	HEMT	—	—	13 束 (4-5-4)	格焦
10.0~12.0	2000 后	HEMT	—	—	?	格焦
0.024~0.026	已有	双极晶体管	800	5 (对天顶)	八木天线	平台小车
0.044~0.05	已有	双极晶体管	600	5 (对天顶)	八木天线	平台小车
0.298~0.338	尚无	GaAs FET	135	7 (对天顶)	40' 线馈	平台小车
0.42~0.44	已有	HEMT*	70	18 (对天顶)	96' 线馈	平台小车

表中格焦表示为设置在格雷戈里反射面焦点的接收机, 平台小车表示设置在原悬挂平台俯仰滑动车上的接收机, 包括线馈源和工作在 10m 波段的八木振子馈源, 符号 * 表示在该波段配有雷达。Arecibo 射电望远镜在它的格雷戈里反射面焦点, 安装了 1.4 GHz 的

焦面阵, 由 7 个口径大约为 1λ 的双模喇叭排列为正六边形, 方向束截面是椭圆形, 其 FWHM $\approx 2.9' \times 3.5'$, 而方向束间隔为 $4.5'$, 即大约为 1.4 FWHM(平均值), 最大旁瓣为 -9dB , 中央单元的孔径效率相对最佳的馈源喇叭降低了 0.5dB (即约 12%), 边沿单元的方向束则有约 0.7dB (17%) 的损失。计划在 5GHz , 设置构形为 3—4—3 的馈电喇叭, 相对于主轴上的理想喇叭, 最大增益降低约 1.6dB (45%), 最大旁瓣约为 -9dB 。此外还计划设置工作在 10GHz 、构形可能是 4—5—4 的焦面阵^[13]。

3.5 Parkes 64m 射电望远镜的前端配置:

Parkes 射电望远镜经过多次重铺反射面及结构改造, 现在中间 44m 孔径的反射面已经能工作到 7mm 波段, 它的工作波段配置及相应的系统温度简单地列入表 4^[14]。

表 4 Parkes 64m 射电望远镜的频段配置和系统温度

频段 /GHz	0.61	0.84	1.4	1.6	2.3	5.0	6.7	8.4	12	15	22	43
系统温度 /K	60	80	85	85		80	45		80	80	80	80
/Jy					90			90				

注: 系统温度与真实温度毫无关系, 它可以用 K 或者 Jy 为单位, 其间由下面的诸关系式相联系: $P_s = kT_s = S_s A$, $S_s = kT_s / \eta_a A_0$ 。式中 k 为玻尔兹曼常数, T_s 、 P_s 和 S_s 分别为系统温度、等效的系统输入端功率和等效的以 Jy 为单位的系统温度, 而 η_a 为天线效率。

Parkes 射电望远镜配置了一组多方向束馈源及两组接收机, 其一是工作在 21cm 波段的 HI Parkes 全天巡天 (HIPASS) 系统, 其馈源呈 1—4—3—4—1 配置, 每一个方向束包括了两个正交线偏振的测量通道, 多方向束接收机的主要性能参数列如下表:

表 5 Parkes 64m 射电望远镜多波束接收机的主要性能

参数	方向束 1	方向束 2~7	方向束 8~13
频率范围 /GHz	1.23~1.53	1.23~1.52	1.23~1.52
偏振	正交线偏振	正交线偏振	正交线偏振
平均系统温度 (仰角 $EI=55^\circ$)/K	21	21	21
FWHP 方向束宽 /(')	14.0	14.1	14.5
FWHP 方向束椭率 (径向)	0.00	0.03	0.06
效率 /Jy·K ⁻¹ [注]	1.36	1.45	1.72
平均系统温度 (仰角 $EI=55^\circ$)/Jy	29	30	36
平均校准温度 /Jy	1.6	1.8	2.0
Coma lobe (彗形瓣)/dB	无	-17	-14

注: 这里的效率和通常大线孔径效率 η_a 的关系为 $\eta_s = k / \eta_a A_0$, 而 A_0 为望远镜反射面的几何面积, 下面两行的系统和校准温度均以 Jy 为单位, 即已经计及孔径效率, 参看表 4 的注解。

起初 Parkes 64m 射电望远镜的 21cm 波段多波束焦面阵计划由 3×3 圆喇叭方阵组成, 喇叭间隔为 1.2λ (262.5mm), 方向束角间距约为 2 FWHP, 焦面阵的直径为 1050mm , 阵单元由圆喇叭组成, 其直径从 15.3cm 变到最外侧的 24cm 。虽然焦面阵的配置不满足 Nyquist 采样定理, 但可以通过交错扫描实现对大尺度结构的成像^[15]。

多波束接收机通常和多波束相关器一起使用, 以获得不同的带宽、通道数、通道间隔、频率分辨率和速度分辨率。

和此多波束馈源相配的另一组接收机是专门用来观测脉冲星的, 称之为多波束脉冲星系统, 它由前端的多波束接收机加上安装在控制室的脉冲星多波束滤波器组和多通道数字化转换器系统组成。

3.6 ALMA(Atacama 大毫米波阵) 的接收机配置

ALMA 拟建在智利 5000m 海拔的 Atacama 沙漠中, 是美、欧、日合作的一个大毫米波射电望远镜计划, 预期它将由分布在 10km 范围内的 64 面直径 12m 的天线组成, 接收面积达 7000m², 频段设置覆盖从 30GHz 到 950GHz 的所有大气窗口。该天线阵的部分将于 2005 年开始工作, 全阵到 2009 年可以工作, 它将成为世界上海拔最高的、最大的毫米波射电望远镜。鉴于该望远镜的重要性, 尽管目前仅处于计划的设计和发展阶段, 许多技术细节还在讨论和变化中, 某些参数还未见正式报道, 仍将其频段和接收机的配置简要地在此列举^[16,17]。

表 6 ALMA 的频段及接收机配置

频段	频率范围 /GHz	安装位	接收机类型	波束	IF 带宽 /GHz	系统温度 /K	偏振
1	31.3~45	卡焦	HFET	1+W	8		双线偏
2	67~90	卡焦	SIS 混频	1+W	8		双线偏
3	89~116	卡焦	SIS 混频	1+W	8	60~80	双线偏
4	125~163	卡焦	SIS 混频	1+W	8		双线偏
5	163~211	卡焦	SIS 混频	1+W	8		双线偏
6	211~275	卡焦	SIS 混频	1+W	8	77~126	双线偏
7	275~370	卡焦	SIS 混频	1+W	8		双线偏
8	385~500	卡焦	SIS 混频	1+W	8		双线偏
9	602~720	卡焦	SIS 混频	1+W	8	168~250	双线偏
10	787~950	卡焦	SIS 混频	1+W	8		双线偏

注: ALMA 还处于研发阶段, 许多指标或参数尚待最后确定, 如系统温度的初步目标是 $6\sim 10h\nu/k$, 最终目标将是 $3\sim 8h\nu/k$, 式中 h 和 k 分别为普朗克和玻尔兹曼常数, ν 为频率, 这些指标现在都没达到; 此外作为一个大型毫米波综合阵, 所有波段的馈源都是单波束, 但是将要配置 183GHz 水线的水汽辐射计(表中波束栏中以 W 表示), 作水汽辐射监测和相位改正之用。该表第四列的 HFET 为异质结场效应管放大器, SIS 为低温超导结混频器。

3.7 其他射电望远镜的多波束系统

Onsala 天文台的 20m 毫米波射电望远镜安装了 4×4 的对角喇叭阵, 配以 SIS 混频器, 其后端是宽带混合相关器频谱测量装置, 工作在 115GHz, 称之为 SISYFOS(即 Onsala 天文台 SIS 成像系统)^[18]。

QURRY 是一个 15 单元的焦平面阵, 工作在 3mm 波段, 安装在五院校天文台的 14m 毫米波射电望远镜上, 作分子云大尺度结构的成像观测研究^[19]。

安装在 Kitt Peak 的 NRAO 12m 毫米波射电望远镜上的 8 方向束肖特基混频器接收机已经更新为 8 方向束 SIS 接收机, 该系统工作在 230 GHz, 馈源配置为 4×2 , 相邻方向

束间隔为 $87''$, 单方向束的半功率宽约为 $30''$, 主要用以观测延展大于方向束间隔的大尺度结构^[20]。

MARS 是 MRAO 配置在 JCMT 毫米波射电望远镜的多波束接收机, 该焦面阵第一期完成 8 单元工作在 230 GHz 的阵, 第二期则将配置 32 或 64 单元工作在 345 GHz 的混频器^[21]。

高电子迁移率晶体三极管 (HEMT) 单片集成电路 (MMICs) 的发展已经使得制造工作在 150 GHz 以下、具有 30~1000 单元的焦面阵成为可能, 而且其尺寸小 (小于半波长间距)、简单 (每一像素只需要 0.01~3 个芯片) 和低噪声温度 ($0.25\sim 3\text{K}/\text{GHz}$) 都适于焦面阵成像的应用^[22], 例如在五院校天文台毫米波望远镜上将配置的不小于 32 单元的 HEMT 阵^[23]。在 JCMT (麦克斯韦望远镜) 上则计划配置工作在亚毫米波段的 91 及 37 个像素的测辐射热计阵—亚毫米波照相机, 该成像阵称之为 SCUBA (亚毫米波通用测辐射热阵), 它是目前唯一使用软件消旋转技术的焦面阵^[24]。

实际上世界上许多主要的毫米波及亚毫米波射电望远镜, 几乎无一例外地已经或者正在计划配置焦面阵接收机, 例如由亚利桑那大学和马普射电天文所联合建造、位于美国亚利桑那州 Graham 山上的 10m 直径的亚毫米波望远镜 HHT 正在配置 16 单元工作在 480 GHz 的外差 SIS 接收机阵^[25], 称之为 DesertSTAR 的、工作在 345 GHz 的 7 像素外差接收机阵也正在该望远镜上配置^[26]; 日本 NRO 的 45m 望远镜正在配置称之为 BEARS、工作在 82~116 GHz 的 SIS 5×5 阵列接收机^[27] 以及工作在 40~50 GHz 的 2×3 波束的焦面阵 SIS 接收机^[28]; 工作在 230 GHz 的 3×3 多波束双偏振焦面阵正在 IRAM 建在西班牙的 30m 毫米波射电望远镜上配置^[29]; 波兰 Torun 射电天文台的 32m 射电望远镜上也在计划配置 100 单元的 1cm 接收机阵 (OCRA)^[30]; 有 10×10 单元、工作在 650 GHz 的亚毫米波照相机正在研制中, 准备装在拟建于智利北部的大亚毫米波阵 (LMSA/ALMA) 的原型射电望远镜 (ASTE-10m) 上试用^[31]。

4 多波束馈源的潜在应用价值和价格效率

焦平面馈源阵可以将反射望远镜表面的全部电场在焦区附近采样, 因此有可能测量和分析所采样的电场, 降低一系列对反射面的要求, 而这些要求或约束往往极大地影响望远镜的造价。例如借助于焦面阵的测量, 无要求反射面是连续的且和抛物面的离差不大于 $\lambda/16$, 无要求望远镜的指向精度在例如 $\lambda/10D$ 以内, 无要求反射面在 $\lambda/16$ 或 $\lambda/32$ 精度范围内符合一特定的形状, 从而将研制精密大射电望远镜的精力、财力和时间主要不是投向以钢和铝为主的结构设计、加工和安装上, 而是用于表面测量和信号数据处理范畴^[32]。实际上, 一个实时焦面阵补偿系统已经在 JPL 研制并安装到位于美国 Goldstone 的深空网站的 34m 波束波导天线上, 该系统工作在 33.7 GHz 的 Ka 波段, 由 7 个 22dBi (dBi 为相对射频信号电平) 的喇叭组成。它对歪曲的电磁场采样, 并从下变频的基带信号的实时相关测量中推出最佳组合权、提供组合信息以确定大气在总系统噪声中的贡献、推算望远镜的指向改正使天线对准观测的射电源^[33]。已经建立了焦平面相关

理论, 并利用这一理论对射电望远镜的反射面误差作自校准和自改正, 还提出应用此技术于大射电望远镜在空间的建造问题^[34]。

尽管焦面阵可以成倍地加速获得观测目标的信息量, 更准确地进行天线的指向和校准, 更好地消除大气背景起伏的影响, 改善望远镜本身制造和校准的缺陷。因此它对建造巨型射电望远镜、对监测和实时改正望远镜本身的误差和来自大气的扰动的影响, 都有积极的作用。但是如前一节所述, 至今在主要的大射电望远镜和其主要的工作频段上, 并没有普遍设置焦面阵接收机。甚至在最新建造的 GBT 上, 原来也只计划在 L 波段研制 19 波束的焦面阵, 其主要原因是焦面阵的价格-效率关系。

射电望远镜的效率可以定义为产出和投入之比, 其产出应是一个射电望远镜能在一给定的时间里, 以一特定的灵敏度得到频谱信息的数量^[35]。显然望远镜的产出与焦面阵系统的单元数、总的观测效率(计及旁瓣电平的增加、移动天线的的时间、调谐和校准带来的损失等)成线性关系。实际上在带宽、频率覆盖、谱分辨率保持不变的情况下, 产出率也和系统温度的平方成反比。问题的关键是通过增加波束单元的数量还是降低系统温度的途径来提高望远镜的产出。

系统温度大体上和大气辐射总量、望远镜本身的噪声、对地面的溢损和接收机的噪声成比例关系。只有后者可以因为经费和技术努力的投入而得到改善。而通过对焦面阵接收机各部分的造价分析, 可以得出的结论是: 焦面阵接收机的价格 $C \propto N^A$, 这里 N 为焦面阵单元数, A 为介于 0.5 和 1 之间的因子, 具体取值因射电望远镜及其所处环境而定。需要在采用焦面阵还是着力降低系统温度间作出某种折中, 在此折中中应特别注意观测目标是以大尺度展源为主, 还是以单方向束不可分辨的致密源为主, 它们可能在选择中决定性地改变权重。几个有参考价值的建议是: 尽可能使接收机的噪声温度最小, 使焦面阵的噪声性能尽可能接近单方向束的接收机, 发展中频通道及后端的高新技术以降低焦面阵的投入, 焦面阵系统应设计得易于更新和发展。

5 FAST 上的多波束馈源

5.1 偏照在多波束系统中应用的可能性及限制

当 FAST 观测目标的天顶距大于 30° 时, 使馈源相对主光轴旋转一个角度 θ , 从而保证照明中心正好处于可利用反射面的中心, 这将有效地利用拟合得到的抛物面、改善方向图和降低溢损噪声。可是当采用焦面阵而非单馈源以获得多波束时, 阵边沿的喇叭相对阵中心的喇叭的相位中心, 将产生额外的相位差 $\pm 4\pi nL \cdot \sin(\theta/2)/\lambda$, 这里 L 为最小间隔, n 为前面所确定的容许径向阵元数。可以用类似馈源在主轴上位移的公式(2)来估算这一附加相位差在容许范围内时会给 nL 及 θ 带来的限制。和(2)式不同的是, 焦点到抛物面边沿之一相对主光轴的张角 ψ 不再恒定地为 56° , 而是按关系式 $\psi = 56^\circ - \theta$ 随 θ 变化, 当天顶角从 30° 变到 60° 时, θ 将大体上从 0° 线性地变到 30° ^[2]。这时的约束条件将是:

$$2nL \times \sin(\theta/2) \leq \frac{\lambda}{16} [1 - \cos(56^\circ - \theta)]^{-1} \quad (5)$$

如果用焦面阵的直径或大小 D 来代替 $2nL$, 就可以求出在不同波长 λ 值时 $D(\theta)$ 和 θ 的相依关系。在波长为 6 和 21cm 时, 该关系可以分别用图 1 中带圆圈的实曲线和带十字的虚曲线表出。

从该图可见, 除非如节 2 所述来配置焦面阵, 即: 取 $n = 1$, $L = 4.34 \text{ cm}$ ($\lambda = 6 \text{ cm}$) 或 15.2 cm ($\lambda = 21 \text{ cm}$), 对应的直径均分别不超过 11 和 40cm, 偏照所引进的额外相位差才不致影响焦面阵的正常工作。正如所述, 如果焦面阵的直径分别取为 25 和 88cm, 那么严格地说, 焦面阵的完全正常工作只能限于倾斜角在 5° 以内的偏照。当然在公式 (5) 的计算中, 只考虑了大天顶角照明时, 球冠边沿对拟合抛物反射面的限制, 所以有公式余弦项中的 $56^\circ - \theta$ 的变量, 实际上对拟合反射面靠近球冠顶点的一侧, 仍应该采用 56° 的恒量, 这时附加相位误差对多波束阵大小的限制更为严格些。

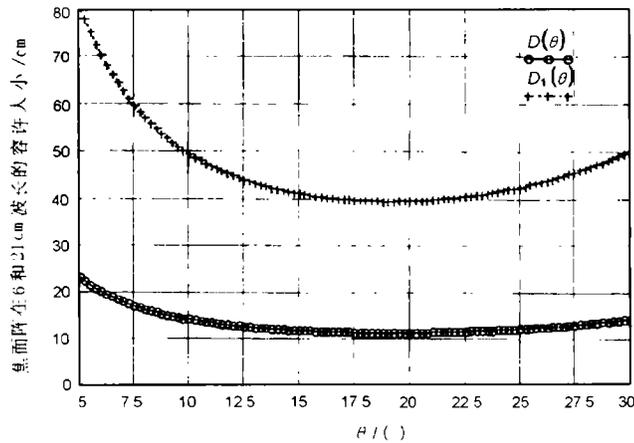


图 1 在满足容许的附加相位差时, 焦面阵的直径随其相对主光轴的倾斜角的变化, 实曲线和虚曲线分别代表在 6 和 21cm 波长处容许的最大焦面阵直径 (单位是 cm)

5.2 用多波束系统进行偏振测量的可能性

一般地说, 射电天文偏振测量的可能性立足于对天线偏振特性的完全了解。在射电天文中, 为了测量天体辐射电磁波的偏振特性, 需要完全了解天线的偏振特性, 并且在观测过程中按一定的程序控制和改变天线的偏振特性, 以测量入射电磁波的 Stokes 参量, 最终确定其偏振度、偏振方向等特性^[36]。一般情况下, 即对于圆对称的抛物面天线或圆对称的球面天线, 在不采用二次反射面和卡塞格林、格里高尼焦点馈源因而有较大焦比的情况下, 虽然存在交叉偏振等问题^[5], 但还是认为反射面的偏振特性相对于抛物面主轴是各向同性的, 全靠调节和控制馈源的偏振来进行偏振测量。但是对天顶角大于 30° 的观测来说, 有效可用的反射面已经不再是圆对称的了, 对这样反射面的偏振特性有无可能作准确的描述, 或者干脆应该放弃天顶角大于 30° 度的偏振测量, 是必须进一步研究和回答的问题。很有可能需要研究特殊的观测方案, 采用 ON-OFF 波束开关, 或者在深入研究观测不同射电源时, 主反射面及其偏振特性随天顶角的变化规律, 发展特殊的软件在偏振测量中消除非对称主反射面的偏振效应。这方面, 马普射电天文所多年来成

功应用的软件偏振测量的经验值得我们借鉴。

在偏振测量可以正常进行的假设下，配置圆波导喇叭作为多波束馈源系统的单元是有利的，它除了有接收两方向圆偏振辐射完全对称的性质外，单元间的互耦合也最小。

5.3 对 FAST 的波段及馈源设置的建议

建议多波束馈源仅在 1.4 GHz 和高端的一个频段 5 GHz 或者 6.2/8.4 GHz 配置，其他波段一概只配置单波束两（偏振）通道的馈源及接收机。L 波段的多波束馈源或焦面阵的每一波束包括两个偏振通道，主要用来作大范围巡天、大尺度射电源观测及脉冲星搜寻等。高端波段采用 3、4 波束，共 6~8 偏振通道的馈源和接收机，主要用来作大气校准，扣除大气起伏的影响，提高观测精度。此建议已经得到中英双方专家的认可，并在 2001 年春天 JBO 专家和工程师代表团访问北京天文台和中方专家共同讨论后，初步拟定了未来 FAST 频段及馈源的配置，如表 7 所示。

表 7 FAST 的频段和低噪声放大器 (LNA) 配置和预期的系统噪声温度

接收机号	频段 /GHz	波束	LNA 类型 (HEMT)	预期系统噪 声温度 /K	备注
1	0.30~0.55	1	平衡式	100	基于荷兰 NFRA 的设计
2	0.55~0.64	1	调谐式	60	基于现有的英国 JBO 设计
3	0.63~1.15	1	平衡式	60	基于荷兰 NFRA 的设计
4	1.15~1.72	1	调谐式	25(氮致冷)	美国 NRAO 设计的 JBO 版本
5	1.23~1.53	13	调谐式	25(氮致冷)	美国 NRAO 设计的 JBO 版本
6	2.15~2.35	1	调谐式	35(氮致冷)	新的 JBO 设计 (同 7 号机)
	8.00~8.80	1	调谐式	25(氮致冷)	新的 JBO 设计
7	2.00~3.00	1	调谐或平衡式	25(氮致冷)	新的 JBO 设计 (同 6 号机)
8	4.50~5.20	7	调谐式	30(氮致冷)	正在 JBO 研制 (同 9 号机)
9	5.70~6.70	1	调谐式	30(氮致冷)	正在 JBO 研制 (同 8 号机)

实际上对大天顶距的观测，焦面阵可以用来组合成垂射天线照明器，以照明不再是圆对称的类椭圆可利用孔径。如果适当放宽边沿馈源相位误差的限制，例如将 (5) 式中分母上的因子 16 改为 8，那么同样直径的焦面阵可以工作到约 60° 的天顶角，当然这时其相位误差的影响，需要重新估计。此外随着多波束馈源系统的设置，除了偏照所要求的倾斜角控制以外，该系统在观测中的消旋转是必须在设计中考虑的，这给相应的控制测量系统也将增加一定的难度。

6 结 语

本文从概述多波束馈源系统的发展和目前世界上几个主要射电望远镜上的配置和近期的发展出发，简要地论述了涉及馈源及反射面不准带来的相位误差和焦面阵基本参数确定的原则，分析了多波束射电望远镜的价格效率，以及采用偏照工作模式后，焦面阵引进的额外相位误差和它对焦面阵参数的进一步约束，还提出了偏照工作模式下偏振

测量的可能性和进一步研究的问题。最后对 FAST 计划中多波束馈源系统的设置, 提出了新的建议, 并列出了经过中英双方专家在 2001 年春共同讨论后, 对 FAST 馈源和接收机配置的意见。

致谢 在本文写作过程中, 作者之一有幸得到马普射电天文所邀请和资助, 在该所短期工作访问, 获得许多最新信息, 在此对该所 R. Wielebinski 和 E. Feurst 教授、A.J. Zensus、R. Schwartz、A. Witzel、W. Reich、R.W. Porcas 和 H. Mattes 博士表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 邱育海. 天体物理学报, 1998, 18: 221
- 2 吴盛殷. *Astrophys. Rep.*, 1999, 33: 89
- 3 任朗. 天线理论基础, 北京: 人民邮电出版社, 1980
- 4 Whyborn N D. In: Emerson D T, Payne J M eds. *Multi-feed Systems for Radio Telescopes*, Provo: Book Crafters, Inc., Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., 1995(75): 117
- 5 Christiansen W N, Hoegbom J A. 射电望远镜, 陈建生译, 北京, 科学出版社, 1977
- 6 Wu S Y. In: Chen P S ed. *Observational Astrophysics in Asia and its Future*, (Proceedings of the 4th EAMA), Kunming: Yunnan Observatory, 1999: 98
- 7 Jewell P R. In: Butcher H R ed. *Radio Telescopes (Proceedings of SPIE, Volume 4015)*, Washington: SPIE, 2000: 136
- 8 Reich W. In: Emerson D T, Payne J M eds. *Multi-feed Systems for Radio Telescopes*, Provo: BookCrafters, Inc., Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., 1995(75): 171
- 9 Reich W. In: Davis R J, Jackson N eds. *High Sensitivity Radio Astronomy*, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1997: 225
- 10 Booth R S. In: Hirabayashi H, Inoue M, Kobayashi H eds. *Frontiers of VLBI*, (Frontiers Science Series-1), Tokyo: Universal Academy Press Inc., 1991: 131
- 11 Wilkinson P N. In: Davis R J, Booth R S eds. *Sub-arcsecond Radio Astronomy*, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1993: 422
- 12 Davis R J. In: Davis R J, Jackson N eds. *High Sensitivity Radio Astronomy*, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1997: 213
- 13 Goldsmith P F, Baker L A, Davis M M et al. In: Emerson D T, Payne J M eds. *Multi-feed Systems for Radio Telescopes*, Provo: BookCrafters, Inc., Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., 1995, 75: 90
- 14 Tzioumis A. In: Sasao T, Manabe S, Kameya O et al eds. *VLBI Technology, Progress and Future Observational Possibilities*, Tokyo: Terra Scientific Publishing Company, 1994: 211
- 15 Staveley-Smith L, Wilson W E, Bird T S et al. In: Emerson D T, Payne J M eds. *Multi-feed Systems for Radio Telescopes*, Provo: BookCrafters Inc., Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., 1995, 75: 136
- 16 Wild W, Payne J, Belitsky V et al. In: Butcher H R ed. *Radio Telescopes (Proceedings of SPIE, Volume 4015)*, Washington: SPIE, 2000: 320
- 17 Wild W, Payne J. Chapter 5, In: *ALMA Project Book* at <http://www.eso.org/projects/alma/> ..., Version Feb. 2001
- 18 Johansson J F. In: Emerson D T, Payne J M eds. *Multi-feed Systems for Radio Telescopes*, Provo: BookCrafters Inc., Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., 1995, 75: 130
- 19 Erickson N R. In: Emerson D T, Payne J M eds. *Multi-feed Systems for Radio Telescopes*, Provo: BookCrafters Inc., Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., 1995, 75: 149
- 20 Payne J M, Jewell P R. In: Emerson D T, Payne J M eds. *Multi-feed Systems for Radio Telescopes*, Provo: BookCrafters Inc., Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., 1995, 75: 144
- 21 Padman R, Blundell R. In: Emerson D T, Payne J M eds. *Multi-feed Systems for Radio Telescopes*, Provo: BookCrafters Inc., Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., 1995, 75: 155

- 22 Weinreb S. In: Emerson D T, Payne J M eds. Multi-feed Systems for Radio Telescopes, Provo: BookCrafters Inc., Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., 1995, 75: 189
- 23 Erickson N R. In: Emerson D T, Payne J M eds. Multi-feed Systems for Radio Telescopes, Provo: BookCrafters Inc., Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., 1995, 75: 207
- 24 Gear W K, Cunningham C R. In: Emerson D T, Payne J M eds. Multi-feed Systems for Radio Telescopes, Provo: BookCrafters Inc., Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., 1995, 75: 215
- 25 Guesten R, Hauschildt H *et al.* In: Emerson D T, Payne J M eds. Multi-feed Systems for Radio Telescopes, Provo: BookCrafters Inc., Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., 1995, 75: 222
- 26 Groppi C E, Walker C K *et al.* In: Butcher H R ed. Radio Telescopes (Proceedings of SPIE, Volume 4015), Washington: SPIE, 2000: 253
- 27 Sunada K, Yamaguchi C *et al.* In: Butcher H R ed. Radio Telescopes (Proceedings of SPIE, Volume 4015), Washington: SPIE, 2000: 237
- 28 Tsuboi M, Kasuga T *et al.* In: Butcher H R ed. Radio Telescopes (Proceedings of SPIE, Volume 4015), Washington: SPIE, 2000: 278
- 29 Schuster K-F, Blondell J *et al.* In: Butcher H R ed. Radio Telescopes (Proceedings of SPIE, Volume 4015), Washington: SPIE, 2000: 260
- 30 Browne I W A, Mao S *et al.* In: Butcher H R ed. Radio Telescopes (Proceedings of SPIE, Volume 4015), Washington: SPIE, 2000: 299
- 31 Matsuo H, Takeda M *et al.* In: Butcher H R ed. Radio Telescopes (Proceedings of SPIE, Volume 4015), Washington: SPIE, 2000: 228
- 32 Fisher J R. In: Emerson D T, Payne J M eds. Multi-feed Systems for Radio Telescopes, Provo: BookCrafters Inc., Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., 1995, 75: 27
- 33 Vilnrotter V, Fort D, Iijima B. In: Emerson D T, Payne J M eds. Multi-feed Systems for Radio Telescopes, Provo: BookCrafters Inc., Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., 1995, 75: 61
- 34 Napier P J, Cornwell T J. In: Emerson D T, Payne J M eds. Multi-feed Systems for Radio Telescopes, Provo: BookCrafters Inc., Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., 1995, 75: 48
- 35 Hills R. In: Emerson D T, Payne J M eds. Multi-feed Systems for Radio Telescopes, Provo: BookCrafters Inc., Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., 1995, 75: 126
- 36 王绥瑄, 吴盛殷等. 射电天文方法, 北京: 科学出版社, 1988

Applications of the Focus Plane Array or the Multi-beam Feed System in Radio Astronomy

Wu Shengyin Nan Rendong

(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

Abstract

The technique of the focus plane array (FPA) or the multi-beam feed system has been more and more widely applied in radio astronomy. Much more information of electric and magnetic field collected at the focus plane could be used to fasten the observational procedure several or even several tens times by scanning the telescope over the extended sources. The image quality observed can be improved by subtracting or removing effects of fluctuation or irregularity in the atmosphere or the ionosphere, and by monitoring or controlling the accuracy of the main reflector, the subreflector and the pointing of the telescope. Costs and requirements for the accuracy of huge radio telescopes or space radio telescopes might be much reduced by introducing the FPA

in monitoring and adjusting telescopes in the future. The FPAs have been equipped widely on millimeter and sub-millimeter radio telescopes and main bands of large radio telescopes in the world. The paper will review the situation of that by listing operating feeds for the latter and describing briefly the FPAs equipped on the former. The restriction of applying the FPAs on telescopes and corresponding phase errors will be briefly analyzed in this paper. Consideration of the cost and prospect of application of the FPA are also shortly given. Finally tentative valuation and suggestion of applying the FPA on the FAST, a planned huge spherical radio telescope with active main reflector, are followed. Arrangement of frequencies, beams, LNAs and corresponding system temperature suggested by experts from China and Jodrell Bank Radio Observatory is listed at last.

Key words Radio astronomy—Radio telescopes—Feed system—Focus plane array—Multi-beam feeds

* * * * *

2002 年征订启事

《天文学进展》2002 年征订事宜委托天津市全国非邮发报刊联订服务部全权办理。刊物为季刊, 每年的 3、6、9、12 月下旬出版, 每期定价 10 元, 全年 40 元(含邮寄费和包装费)。凡需订阅者请将订刊款通过邮局或银行直接按以下地址汇出即可;

邮政编码: 300381

地 址: 天津市大寺泉集北里别墅 17 号

户头全称: 天津市河西区联合征订服务部

帐 号: 605248-1046196

开户银行: 工商行天津市尖山分理处

电 话: (022) 23973378; (022) 23962479 **传真:** (022) 23973378

网 址: www.LHZD.com E-mail:LHZD@public.tpt.tj.cn

汇款时请注明“订阅 2002 年《天文学进展》(编号 5155)”字样和订阅份数、订户名称、收件人姓名、地址、邮政编码。联合征订部收到订刊款后即会奉上发票。本编辑部在刊物出版时即及时奉寄。凡在 2002 年中订阅者均能及时收到本刊。凡非通过上述渠道订阅本刊者, 如有延误或寄失, 本编辑部概不负责, 敬请谅解。

欢迎订阅, 谢谢支持!

《天文学进展》编辑部

2002 年 12 月 1 日