

文章编号: 1000-8349(2004)02-0179-09



应用 ATA 的对数周期馈源方案 于 FAST 的可能性探讨

吴盛殷¹, 熊继袞², 吕善伟³, 张江林³,
徐 祥¹, 南仁东¹, 金乘进¹

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 2. 航天总公司 第 23 所, 北京 100854; 3. 北京航空航天
天大学 电子工程系, 北京 100083)

摘要: 介绍应用于美国凤凰计划的 Allen 望远镜阵 (ATA) 的对数周期馈源 (LPA) 概况, 初步给出
此种馈源的基本参数及性能, 仿真估算了其驻波比和方向图, 并结合正在进行的我国 500 m 孔
径球面射电望远镜 (FAST) 计划, 探讨了应用这种宽带馈源的可能性及其限制。

关 键 词: 天文观测设备与技术; 馈源; 对数周期天线 (LPA); 500 m 球面射电望远镜 (FAST);
Allen 望远镜阵 (ATA); 仿真

中图分类号: P111.44 **文献标识码:** A

1 引 言

美国凤凰计划中的 ATA 即是 Allen 望远镜阵, 其每个天线采用单一的宽带馈源及单片微波集成电路 (MMIC) 宽带低噪声前端, 频率覆盖 0.5~11 GHz^[1,2], 此种配置已经被推荐为美国所建议的称之为“Large-N”的 SKA (一平方公里阵大射电望远镜) 概念的天线单元前端。这对正在计划中的我国 500 m 球面射电望远镜 (FAST) 计划, 无疑有很大吸引力。能否采用此种馈源和前端来大大简化 FAST 馈源仓的结构和驱动? 为了回答这个问题, 我们组织和进行了相关的研究, 本文就是此研究的初步结果。ATA 馈源实际上是一种对数周期天线 (LPA), 所以本文首先简介 LPA 的基本参数、性能和 ATA 上所使用的 LPA, 进而对相似结构的天线作仿真计算, 最后简单讨论 ATA 馈源应用于 FAST 计划的可行性和局限性。

收稿日期: 2003-06-24; **修回日期:** 2003-12-23

2 LPA 的基本参数和性能简介

LPA 具有非频变结构, 即天线的各部分在离散频率间隔点上准确地对天线的某一部分缩比而成。如果结构 (如振子) 尺寸变化按特定比例 τ , $\tau = L_{n+1}/L_n = R_{n+1}/R_n$, 式中 L_n 为第 n 个振子的长度, R_n 为第 n 个振子到顶点的距离, 那么在频率 f 和 τf 点上将有相同的性能, $\lg \tau$ 就是它的周期, τ 称为周期律。LPA 工作频带较宽^[3~5], 增益通常为 6~12 dB, E 面波束宽度在 40~60 之间, H 面波束宽度在 60~150 之间。由于上述这些特点, LPA 在宽频带反射面天线馈源及阵列中得到应用。

LPA 的每一段工作频率仅有一小部分被激励, 激励区的相位中心随频率的变化沿天线的轴向移动。集合线是连接各个振子中心的线, 通过它用同轴线对对数周期偶极子交叉馈电可以使天线在短振子方向产生单向辐射, 而集合线分开一个角度 (即扩展角) 可以使天线的相位中心向虚顶角方向移动, 并压缩 H 面波束宽度使之接近于 E 面的波束, 减少一般不同的 E 面和 H 面的相位中心间的距离, 同时相位中心向顶点的移动量随频率的变化也减小了。

3 ATA 系统简介及其馈源

对于像 ATA 那样的小单元组阵, 宽带的前置低噪声 MMIC 接收机要求宽带馈源 (20:1)。计算机模拟试验证明, 小张角锯齿形 (zig-zag) LPA 能保证良好的效率和馈源中的低欧姆损耗。而在馈源内加装一角锥形金属结构, 则能使天线终端到接收机只需要很短的传输线连接, 系统的数字电路都可放在实验室中, 以便适时更新性价比愈来愈好的部件。

ATA 采用的锯齿形 LPA 的扩展角和单元顶角都为 20° , 对数周期 0.975。电磁模拟显示, 频率为 10 GHz 时其馈源中的欧姆损耗仅为 2%。为了覆盖 0.5~11 GHz 的频率范围, 馈源尺度约 1.5 m 长, 0.5 m 宽。预期天线损耗几乎与频率无关, 馈源增益约为 12 dB。一般说馈源的相位中心在离开顶点固定的波长位置 (1.4λ) 上, 采用沿望远镜轴 (Z) 向促动器调节能使不同频率观测时相位中心与焦点重合, 以保证馈源的恒定束宽和天线有不随频率变化的接收面积。此外, 选择焦距比大于 0.65 的主反射面, 能使系统增益随波长的变化不太厉害。

为了降低溢损和随之而来的系统温度增高的有害效应及馈源对反射面的遮挡, 选择偏置格焦加护罩的配置方案, 能使馈源溢损朝向天空, 这时天线的输入阻抗就是馈源的阻抗, 系统性能也只随频率升高而缓慢降低。

ATA 馈源的结构示于图 1^[6], 而四角锥形垂直和水平偏振馈源中间的锥形腔及其中的前置低噪声放大器示于图 2^[6]。在 5 GHz, 天线损耗和溢损的计算值分别为 0.02 和 0.0165, 对应环境温度 300 K 来说, 计及上述损耗和溢损的馈源给出 11 K 的系统温度, 加上馈源和杜瓦间的传输线多了 1.5 K, 宇宙背景辐射是 2.7 K, 大气辐射约为 3.0 K, 因此总的由天线和周围环境产生的系统温度是 18 K 左右。

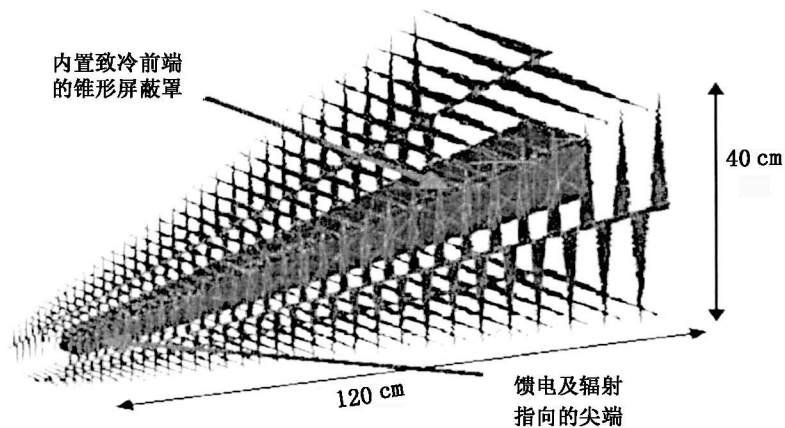


图 1 ATA 天线的四角锥形双线偏振 LPA (工作于 0.5~11 GHz) [6]

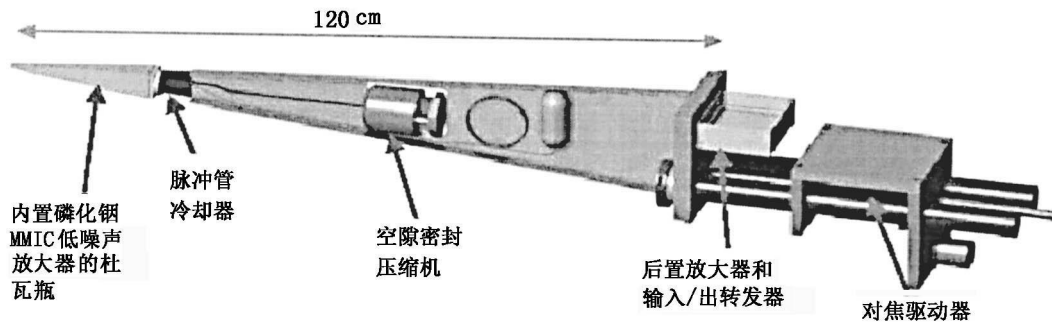


图 2 四角锥形天线中的角锥形腔及其内部的一些配置 [6]

作为前端的 MMIC 放大器采用磷化钢高电子迁移率晶体管 (InP HEMT) 放大器, 它在 0.5~11 GHz 的范围有大约 10 K 的噪声温度, 总的系统温度将为 28 K 左右; 随着芯片的发展有可能在 80 K 的物理温度下, 实现噪声温度为 20 K 的宽带放大器, 它将产生约 40 K 的总系统温度。如果致冷器温度工作在较低的 60 K 时, 系统温度还会有 4~5 K 的改进。

由于单元天线的视场相当大, 有可能会同时形成多个波束, 指向并跟踪不同的观测目标。考虑到主要的 RFI (射频干扰) 源是通信卫星, 而通信卫星的位置作为时间的函数是精确已知的, 因此可以设计一个消除 RFI 的方案 (RFI Cancellation Scheme), 即自适应的波束相减方法。

4 LPA 的基本计算公式和应用于 ATA 的一些结果

在 ATA 计划中, 采用一个沿天线主轴的促动器随观测频率移动馈源的相位中心到抛物面的焦点, 来减少轴向偏焦效率损失。其二相对单元的扩展角和每个单元的顶角都是 20° , 最大长度 $R_1 = 120 \text{ cm}$, 最大单元长度 $L_1 = 40 \text{ cm}$, 周期律 $\tau = 0.975$ 。由此推算得知: 该 LPA

的间隔常数 $\sigma = 0.375$ ，低端截止常数 $K_1 = 0.667$ ，高端截止常数 $K_2 = 0.4595$ ^[1]，最小单元长度 $L_N = 1.25$ cm， $N = 138$ 为偶极子单元数。激励区中的偶极子数 N_a 可以用如下公式计算： $N_a = 1 + \lg(K_2/K_1)/\lg \tau$ ，其值为 16。从 LPA 基本公式推算得知，E 面和 H 面相位中心到顶点的距离分别为 $l_E = 1.4\lambda$ 和 $l_H = 1.3\lambda$ ，两者相差很小，可以用平均相位中心的位置 $l = 1.35\lambda$ ，来计算频率 ν (以 GHz 为单位) 处的 LPA 相位中心相对于基准频率 ν_0 相应位置的沿轴线位移：

$$\Delta z = 40.5(1/\nu_0 - 1/\nu) \text{ cm} , \quad (1)$$

或者仍然如 ATA 天线那样用 $l = 1.4\lambda$ 来计算：

$$\Delta z = 42(1/\nu_0 - 1/\nu) \text{ cm} . \quad (2)$$

但实际上促动器调节量将取决于相位中心和频率的精确关系，一般应该通过实验来确定。

如 ATA 那样的偏置格里高利双反射面天线的特征可以用等效的单反射面方法确定，其等效焦距为

$$F_e = F_0(1 - e^2)/(1 + e^2 - 2e \cdot \cos B) , \quad (3)$$

其中 F_0 为主反射面的焦距， e 为副反射面的偏心率， B 为主反射面和副反射面的主轴的夹角。例如对 ATA，估计 $e = 0.3$ ， $B = 31^\circ$ ，由此计算出 $F_e = 1.58F_0$ ，在 $F_0 = 0.40D$ (D 为主反射面直径) 的情况下， $F_e = 0.63D$ 。

5 对 LPA 的驻波比、方向图等的进一步分析和计算

我们对锯齿形 LPA (4~12 GHz) 的无源部分进行了计算机仿真研究，仿真软件为 Ansoft 公司的 HFSS (高频仿真系统)。当馈线特性阻抗为 500Ω 时，驻波比仿真计算结果如图 3 所示。图中电压驻波比 (VSWR) 的突变 (在 $f = 8.8$ GHz 处) 主要是由于仿真时天线末端未接

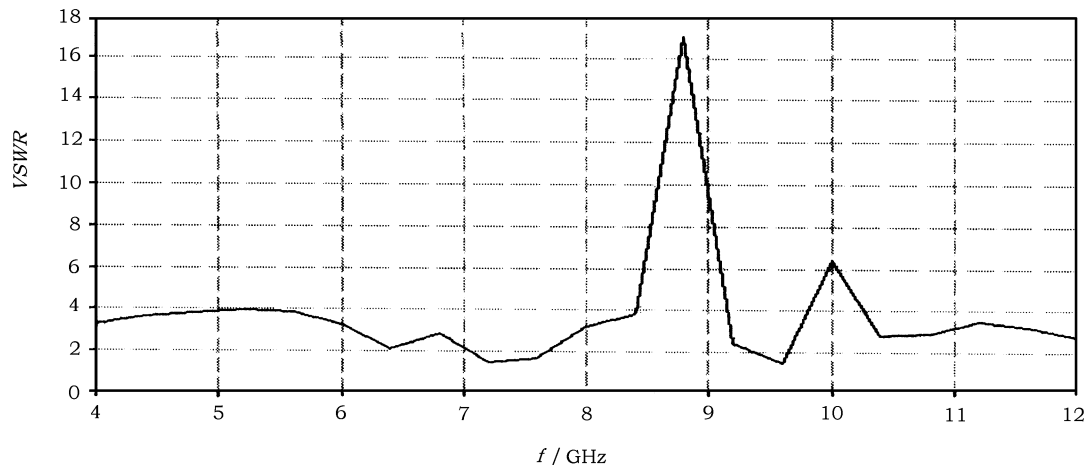


图 3 LPA 在频率 4~12 GHz 范围的驻波比

匹配负载造成的。ATA 宽带馈源在 4、6、8、10、12 GHz 的 H 面方向图如图 4~6 所示。E 面的方向图因篇幅关系未列出。

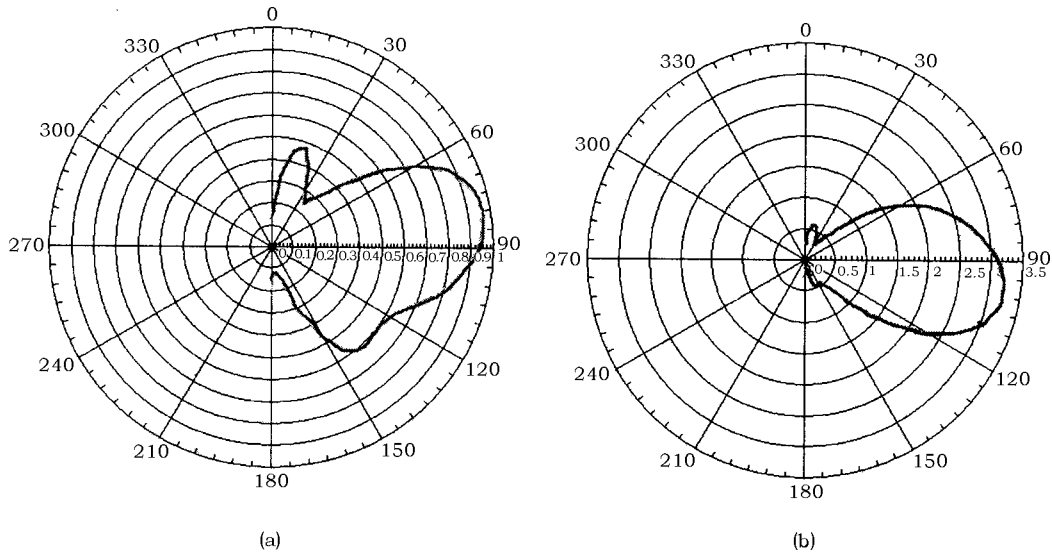


图 4 H 面方向图 (90° 为天线指向)
(a) 频率为 4 GHz ; (b) 频率为 6 GHz .

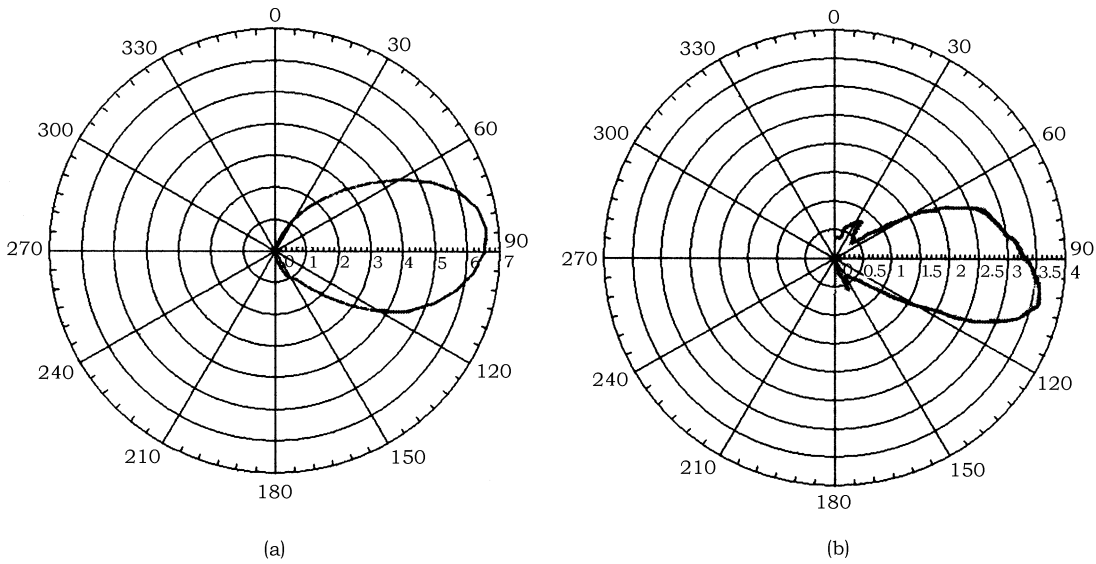


图 5 H 面方向图 (90° 为天线指向)
(a) 频率为 8 GHz ; (b) 频率为 10 GHz .

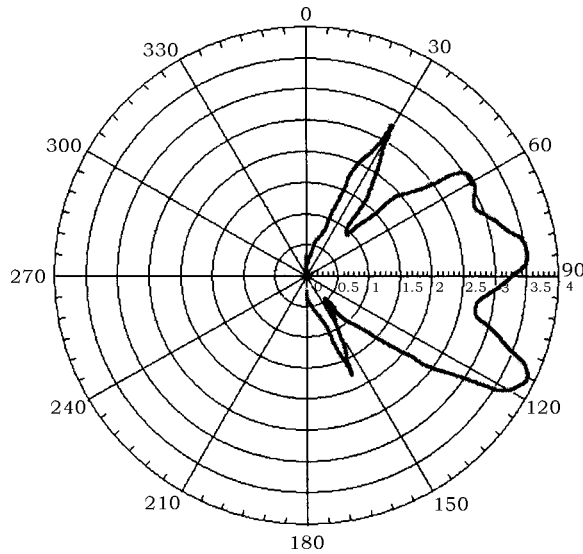


图 6 H 面方向图 (90° 为天线指向)
频率为 12 GHz .

双对数周期振子扩展角的变化,可影响到 E 面、H 面的波束宽度,从而改变天线增益,其具体变化趋势视情况而定。ATA 馈源中放置前端及其他附件的金属四角锥腔对馈源的电性能是有影响的,它的存在改变了天线上的电流分布,以及天线的输入阻抗、驻波比、增益和方向图,同时也影响到垂直极化和水平极化之间的隔离度。此外 ATA 天线上采用的偏置格里高利双反射面馈源加护罩,虽然使馈源溢损朝向天空且无馈源遮挡,但是对方向图的影响也是不可避免的。

对比 H 面方向图和文中略去的 E 面方向图可以看出,在测试频率低端 (4、6 GHz 处),方向图的主峰与天线指向有约 10° (H 面) 到约 30° (E 面) 的偏差;在 8 GHz 处两者符合最佳;在测试频率高端 (10、12 GHz 处),约 10° (E 面) 的偏差重新出现,且有较为严重的旁瓣或后瓣,这种现象的产生与仿真中的网格剖分方式以及缺少轴向促动器是有关系的。仿真中所测得的 E 面半功率波束宽度分别为 80° (4 GHz)、54° (6 GHz)、85° (8 GHz)、70° (10 GHz) 和 60° (12 GHz),H 面半功率波束宽度在上述相应频率处则分别为 87°、68°、70°、57.5° 和 70°。

6 计划中的 FAST 天线和馈源

计划中的 FAST 射电望远镜是一个有可调节面板的 500 m 口径球面射电望远镜^[7]。其指向观测射电源的反射面部分可以实时地调节成为一个孔径为 200~300 m 的抛物面,在小天顶距对 300 m 孔径的反射面照明时,馈源对该拟合抛物面的照明张角约为 120°;在天顶距超过 30° 时该张角可以略小,或者保持同样照明张角,但需将馈源向球反射面顶点适当偏置^[8,9],

以避免地面热噪声直接进入馈源。

FAST 计划工作在 0.30~6.7 GHz 频率范围内, 共分 9 个波段配置馈源和接收机^[10], 原设计的频段、馈源、极化器和制冷压缩机的情况如表 1 所示。

表 1 各频段馈源、极化器的类型和需要的制冷压缩机 CTI1020R 配置

接收机号	频段 /GHz	馈源类型	极化器类型	制冷压缩机数
1	0.30~0.55	宽带折合振子或 Dikiy 型	混合 (Hybrid) 耦合器	0
2	0.55~0.64	Dikiy 型或振子	混合 (Hybrid) 耦合器	0
3	0.63~1.15	宽带折合振子或 Dikiy 型	混合 (Hybrid) 耦合器	0
4	1.15~1.72	多模喇叭	1/4 波片 +OMT	1/3
5	1.23~1.53	同轴波导	OMT (直接式收发转换器)	1
6	2.15~2.35	同轴波导	OMT+ 混合耦合器	1/2
	8.00~8.80	多模喇叭	1/4 波片 +OMT	
7	2.00~3.00	多模喇叭	1/4 波片 +OMT	1/3
8	4.50~5.20	多模喇叭?	阶梯状隔片 (septum)	1
9	5.70~6.70	多模喇叭	阶梯状隔片 (septum)	1/3

表中列出的所有馈源、极化器和制冷压缩机都配置在一个由计算机控制的钢缆悬挂和驱动的馈源仓中, 为了保证观测和跟踪射电源的精度, 各频段的馈源和极化器还要安装在一个所谓 Stewart 平台的二次稳定平台上。此馈源仓的总重量大约是 2 T。

诚然若能采用 ATA 那样带护罩的锥形 LPA 作馈源, 可以大大简化上述馈源、极化器和制冷系统的设计, 也可以大大减轻与之相关联的馈源仓、稳定平台和计算机控制钢缆驱动系统的重量, 以及保证必要精度的难度。

7 LPA 应用于 FAST 的可能性和局限性

虽然非频变的 LPA 有可能用在大型射电望远镜上, 但是根据一般射电望远镜对馈源的要求, 馈源对反射面的照明应该尽可能均匀且有最小的溢损, 而简单的偶极子天线难以满足这一要求, 其直接结果是减小了孔径的有效面积 A_{\max} 。

在 ATA 上采用的双极化四角锥形 LPA, 因为加装了护罩和 Z 向促动器, 其旁瓣、后瓣和在 0.5~11.2 GHz 频率范围 (频比 22.4:1) 的匹配将得到很大的改善。原则上, 如果 FAST 有和 ATA 天线同样的等效焦径比 0.63, 就有可能在 FAST 上采用尺度放大的 ATA 馈源, 以保证在 0.3~6.7 GHz 频率范围 (频比 22.3:1) 内的正常工作。根据相似定理, 如果仍采用相似的参数 τ 、顶角和扩展角, 则馈源的尺度将从 0.4 m×1.2 m 变为 0.67 m×1.9 m。若欲进一步改善天线的效率, 焦径比就要求大于 0.63。实际上 FAST 是一个反射面实时拟合抛物面、主馈照明的射电望远镜^[7], 根据面板最佳拟合等因素, 其焦径比为 0.467~0.47^[11]。为了减轻馈源支撑和驱动的重量及难度, 初步选定的焦仓驱动和跟踪方案是计算机控制钢缆驱动加二次稳定平台, 且排除了利用卡塞格伦或格里高利二次反射面照明的可能性^[9], 换言之, 将有

效焦距比增至 0.63 或更大是不可能的。因此如果要采用 ATA 型的 LPA, 就不能简单地如上放大其尺度, 或者利用市场上已经有的用于通信的宽带 LPA^[12], 而需要重新设计。此外, 对于 FAST 计划中的 L 波段多波束馈源, 利用 LPA 阵是根本不可能的。一方面, 焦面阵的成像尺度限制了所采用馈源单元的尺度^[13]。另一方面, ATA 型 LPA 的横向尺度又必然加大了诸方向束的角间隔, 失去了利用多波束馈源阵观测大尺度延展射电结构的意义; 而多波束馈源阵中相邻 LPA 间的耦合, 必将影响各个 LPA 的方向图和驻波比; LPA 多波束阵本身结构不可避免的臃肿和复杂, 以及多波束馈源一般仅应用于相当窄频带的观测的本质更排除了使用 LPA 的必要, 这时多模圆形喇叭仍是最适宜的选择。

此外 FAST 原方案中, 接收机的带宽设置与分频段且相对较窄的馈源相匹配, 如果采用 ATA 型的 LPA 作馈源, 接收机势必面临带宽扩展、噪声匹配等一系列调整问题, 有可能需要考虑 MMIC 宽带低噪声前置放大器和频率综合器分频段提供本振等配置方案, 因此必须慎重选择。

最后考虑在 ATA 型的 LPA 设计中采用内部的金属壁四面锥体, 以容纳前置低噪声放大器、小型致冷器和 Z 向促动器, 此举可以最大限度地减小传输损耗、降低系统噪声并使每个馈源的结构更加紧凑, 但必将在一定程度上影响 LPA 的电性能, 因而在对其设计和任何仿真实验中, 必须给予认真关注。

参考文献:

- [1] Welch Wm J, Dreher J W. In: Butcher H R ed. Radio Telescopes, Proc. of SPIE, 4015, Washington: SPIE, 2000: 8
- [2] DeBoer D R, Dreher J W. ATA Memo 23, <http://astron.berkeley.edu/ral/ATAImager.Docs.html/>, 2001
- [3] Jasik H. Antenna Engineering Handbook, 1961
- [4] Ruch W V. Analysis of Reflector Antenna, 1971
- [5] Kitsuregawa T. Satellite Communication Antennas, 1989
- [6] http://www.seti.org/seti/our_projects/allen_telescope_array/overview/technical.html/
- [7] 邱育海. 天体物理学报, 1998, 18(3): 221
- [8] Wu S Y. Astrophys. Rep., 1999, 33: 89
- [9] Wu S Y, Wang S G, Mao Y K *et al.* In: Strom R, Peng B, Walker M *et al.* eds. Sources and Scintillations: Refraction and Scattering in Radio Astronomy, IAU Colloq. 182, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001: 249
- [10] 吴盛殷, 南仁东, 彭勃等. 见: 高本庆主编. 中国电子学会第七届学术年会论文集, 北京: 人民邮电出版社, 2001: 7
- [11] Wu S Y, Su Y. 天文学报, 2003, 44(增刊): 34
- [12] 张江林. 关于 LPA 的市场调研报告, 2002
- [13] 吴盛殷, 南仁东. 天文学进展, 2001, 19(3): 421

On Possibilities of Applying the LPA Scheme for the ATA to the FAST

WU Sheng-yin¹, XIONG Ji-gun², Lǚ Shan-wei³, ZHANG Jiang-lin³,
XU Xiang¹, NAN Ren-dong¹, JIN Cheng-jin¹

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 2. The 23rd Institute, General Corporation of Aeronautics and Astronautics of China, Beijing 100854, China; 3. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Allen Telescope Array (ATA) is a radio telescope array applied in the project Phoenix, US. The array will be operated from 0.5 to 11 GHz. A wide-band feed and an integrated MMIC front end will be equipped on each of 350 antennas in diameter of 6.1 m. A general introduction of the array and an initial analysis of performance and parameters of associated LPA feeds are presented in the paper. Preliminary simulation of the feed has been performed and indicated. The possibility of applying this kind of feed in the FAST project is discussed briefly at the end of the paper.

Key words: astronomical facilities and technique; feed; Logarithm Period Antenna (LPA); 500m-Aperture Spherical Radio Telescope (FAST); Allen Telescope Array (ATA); simulation