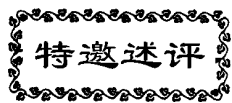


文章编号: 1000-8349(2008)03-0203-11



# 孔径阵列技术及其在射电天文中的应用

吴盛殷, 甘恒谦, 张海燕

(中国科学院 国家天文台, 北京 100012)

**摘要:** 该文概述了近十余年来得到较多研究和发展的孔径阵列技术及其在射电天文中的应用, 如高效馈源照明、扩大单反射面射电望远镜的视场、高效多波束、射频干扰抑制、对射电望远镜反射面缺陷的补偿等。随着孔径阵列 (Aperture Array Tiles, 简称 AAT) 技术的日益成熟和成本的降低, AAT 技术有可能成为全新一代射电望远镜 (例如无反射面射电望远镜和软件射电望远镜) 的基石。

**关键词:** 射电天文学; 射电望远镜; 孔径阵列片; 视场; 多波束

**中图分类号:** P111.44      **文献标识码:** A

## 1 AAT(孔径阵列片) 的概念和结构

所谓的 AAT 是由许多单个的、全天向 (无方向性) 的集成天线单元块组成的不同尺度天线阵或者站, 通过集成在天线单元的相控电路或控制室中的相关电路实现其方向束的电子形成和调动。AAT 概念是从焦面阵应用中发展起来的<sup>[1,2]</sup>, 其主要优点在于: 整体价格有望循集成芯片发展的摩尔定律快速下落; 信息的组合、处理在信息接收到之后, 因而可以最充分地利用接收到的信息; 易于剔除信息中的噪声干扰和实现多路信号的接收和处理。

AAT 的组成层次包括单元 (1)、子片 ( $10^1$ , sub-tile)、片 ( $10^2$ , tile)、子域 ( $10^3$ , sub-domain)、域 ( $10^4$ , domain)、子站 ( $10^5$ , sub-station)、站 ( $10^6$ , station) 和系统 ( $10^8$ , system 如 SKA)<sup>[3]</sup>。

AAT 集成的功能结构层次包括: 片基的无定向宽带天线 (如 Vivaldi 天线)、前置低噪声放大器和集成在硅芯片上的电子处理电路; 群基的处理电路如模拟方向束形成、滤波器和压缩固定射频干扰源的空间谱滤波器; 利用站基的处理电路对接收到的模拟信号作进一步的处理, 如形成数字方向束、以补偿系统缺陷和压缩运动及变化射频干扰源为目的的实时自适应方向束形态控制; 此后数字信号进一步通过光缆干线传回中央处理站, 在那里形成所需要

收稿日期: 2007-10-22; 修回日期: 2008-03-28

基金项目: 国家自然科学基金委员会重点项目 (10433029); 中国科学院知识创新重要方向性项目 (KJ CX2-SW-T3)

的高分辨率方向束并成像。AAT 的功能结构层次可以用图 1 的方框图来更形象地说明。

AAT 的工艺结构从上到下包括<sup>[4]</sup>：对射频透明的保护罩，微带或印刷电路结构的宽带天线单元，集成在多层硅芯片上的低噪声前置放大器，如单片微波集成电路 (MMIC)、高电子迁移率晶体管 (HEMT)、射频集成电路 (RFIC)；滤波器、相位和延迟调节、初步模拟和数字方向束控制 (RF 方向束形成、A/D 转换器) 等电路；安装和支承 AAT 主要部件用的基片、托架结构。这些集成电路涉及磷化铟 (InP)、砷化镓 (GaAs)、硅 / 硅锗 (Si/SiGe)、双极半导体 (bipolar) 和互补金属氧化物半导体 (CMOS) 等半导体工艺。

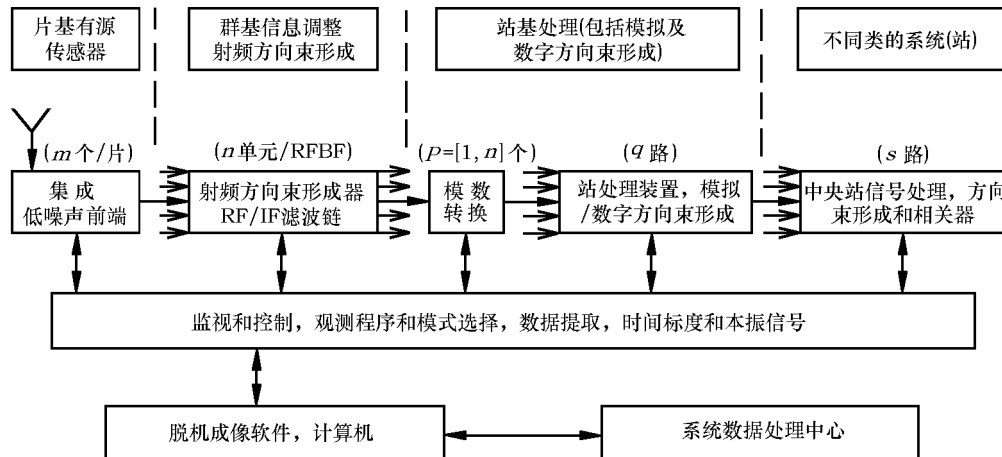


图 1 AAT 的功能结构层次示意图

目前正在荷兰射电天文台 (ASTRON) 研究和发展的 THEA(千单元阵) 和 THEP(千单元阵实验平台) 和 FARADAY(射电天文焦面阵) 计划是利用 AAT 于射电望远镜的一些先导模型研究实例<sup>[5,6]</sup>，而 LOFAR(低频天线阵)<sup>[7]</sup> 计划是较广泛地利用 AAT 技术建造中的低频射电望远镜系统。目前已经确定将在澳大利亚建造的 SKA 和我国将在贵州建造的 FAST 无疑会考虑在其系统中应用 AAT 技术。

正因为 AAT 既可以用作射电望远镜的孔径本身，收集所观测的射电信息，又可以用来作为通常抛物面射电望远镜的焦面阵，以实现多波束、扩大视场、抑制干扰、补偿反射面缺陷等功能，所以它可以因不同的应用，冠以“有源自适应天线”、“有源自适应焦面阵”、“致密焦面阵”、“相控阵”、“馈源综合阵”、“匹配的焦面阵”等名称。

AAT 技术是在射电望远镜发展的特定阶段，为了极大地提高射电望远镜的灵敏度、增加瞬时观测带宽、扩大射电望远镜视场、增大通过射电望远镜探测宇宙的信息获取量和信息利用率，在信息处理、微电子和集成电路技术高度发展的基础上得到研究和发展的。它利用观测数据研究宇宙的全演化过程。实际上 AAT 技术奠基于宽带天线、集成的低噪声前端、光电子、信息处理，以及在电子工业中实现将校准、干扰抑制和图像处理打包等的成就之上。

## 2 AAT 应用中所涉及的基本原理和方法

AAT 应用中所涉及的基本原理和方法包括孔径综合的基本原理、孔径场分布和场强方向图的傅里叶变换关系、电子调向的原理、网格形孔径分布的计算等<sup>[8-11]</sup>。

例如以  $f(u, v)$  代表  $UV$  平面 (即空间频域) 上的孔径场分布， $F(l, m)$  代表该孔径在空间

角域的场强方向图, 两者间就存在傅里叶变换关系:  $f(u, v) \Leftrightarrow F(l, m)$ , 如果以  $g(u, v)$  代表如 AAT 单元阵那样的网格函数,  $e(u, v)$  代表 AAT 单元的孔径场分布, 那么 AAT 的孔径场分布就变成  $e(u, v)$  与  $g(u, v)$  的折合:  $f(u, v) = e(u, v) * g(u, v)$ , AAT 在空间角域的场强方向图就是它们的傅里叶变换  $F(l, m) = E(l, m) \bullet \Sigma G(l, m)$ 。电子方向束调节的基本原理实际上立足于孔径场分布和场强方向图的傅里叶变换关系和位移定理, 当孔径场沿  $U$  方向引入每单位波长  $2\pi\delta$  弧度的相位, 也即产生该量的线性相移后, 场强方向图的主方向束将沿  $x$  方向转动角度  $\theta$ , 使其方向余弦从  $l$  变成  $l + \delta$ 。二维孔径场上的线性相移当然就产生相应方向的方向束调节。

在对 AAT 那样的孔径阵片或群作分析时, 简化每个单元的孔径场分布是有利的, 例如可以假设孔径场分布遵从高斯分布  $\exp(-\pi u^2, -\pi v^2)$ , 而它的傅里叶变换, 即场强方向图也是一个高斯曲面  $\exp(-\pi l^2, -\pi m^2)$ 。同样在对 AAT 阵的分析中, 熟习网格函数及其傅里叶变换将大有裨益, 网格函数  $g(bu, bv) = III(bu, bv) = III(bu) \cdot III(bv) = \Sigma \delta(bu - n) \cdot (bv - n)$  的傅里叶变换也是一个网格函数  $G(l, m) = III(l/b, m/b)/b^2 = III(l/b)/b \cdot III(m/b)/b = \Sigma \delta(l/b - n) \cdot \delta(m/b - n)/b^2$ 。上述的网格函数是从  $-\infty$  到  $+\infty$  分布的, 实际上的孔径或焦点阵都是有限大小的圆形或方形, 也就是说 AAT 单元所构成的孔径必须和一个所谓的圆盒函数或方盒函数相乘, 它们的傅里叶变换分别是一阶 Bessel 函数 ( $2J_1(2\pi a q)/q$ ,  $a$  为圆盒半径) 或滤波函数 ( $\text{sinc}(al)\text{sinc}(bm)$ ,  $a$  和  $b$  为方盒边长), 最终的场强方向图必须与这两个函数折合, 即受到此两函数的平滑。

20 世纪 70 年代以来, 孔径综合系统在射电天文中日益广泛运用, 它的基本原理是射电望远镜系统只要测量的孔径场上每个采样点相对于某个基准点的相位和幅度, 将测量结果经过傅里叶变换和必要的平滑处理, 就得到了单元天线视场内可测量的、具有高角分辨率的天空亮度分布或图像。

近十余年孔径综合技术有了新的发展, 一方面它已经从功率域的互相关向时域的互相关和综合扩展, 另一方面它已经从初期的 1 比特数据信号采样向多比特数字三维傅里叶变换发展。由于微电子和数字信号处理技术的成熟, 而且其性价比基本按“摩尔定律”的快速提高, 即是说数字处理设备的性能在同样的价格下, 每一年半就提高一倍, 已经有条件将新的孔径综合系统设计成同时获取足够“多余量”的射电望远镜, 从过去空间谱单波束综合朝着单元视场内全部方向束形成、邻近电磁场传感器的波束形成与遥远团站间多波束的相关结合过渡; 并把自校、对射频干扰的自适应抑制等硬软件全部集成进去。

对于自调节的指数分布稀疏阵来说, 在频率增高时降低波束形成过程中远离中心区的站的赋权, 就可以使平均孔径效率和角分辨率在 3 个倍频程的范围大体保持一致。按对数螺线配置的综合阵在降低旁瓣、加大主瓣和避免栅瓣效应中效果更佳<sup>[7]</sup>。

已经可以把数字接收技术作为应用软件射电望远镜概念的平台, 例如用不同的软件来重新构建射电望远镜, 将一个相关器转换成一个脉冲星处理器等。新的综合射电望远镜将所有电磁传感器(天线)的信号数字化, 借助快速傅里叶变换算法在天空形成所有可能的波束, 实现高效校准和有效抑制干扰。利用只有有限波束的信号和其他站相应波束互相关, 对几何上固定配置的站和阵, 实现对其电子构形、视场和阵灵敏度随观测需要进行电子调控, 在很宽频段范围内使系统具有大体相同性能的、按比例电子调节, 通过多波束自校和空间谱置零有效地抑制干扰, 通过在不同频率同时观测多个射电源和极大地延长积分时间以最大限度地提高灵敏度。

### 3 AAT 的应用范围

AAT 或相控阵单元的幅度和相位可以根据需要随意电子赋权(控制),每路的延迟可以电子控制和改变,因此整个合成阵的特性也就能随意控制和改变,原则上就能将 AAT 应用到很多场合,如所有波束方向和形状需要改变和调节、阵的相位中心需要移动,以及场强方向图需要在特定方向置零等。在采用集成的、并联的波束形成网络时,可以获得多波束;在入射波前改正相位误差,就使相位阵能实现自适应光学功能<sup>[12,13]</sup>。原则上新一代射电望远镜系统,包括 FAST 都可以而且应该利用 AAT 技术来改善照明波束、减小溢损和降低射频干扰。

AAT 技术采用了集成的模拟和数字方向束形成技术,以及集成的无方向性宽带天线单元,无论用其本身作孔径单元或者用作焦面阵,对一般的抛物面天线照明,都可以较方便地实现瞬时互相独立的多方向束,以观测不同的射电源<sup>[14]</sup>。

多个方向束按一定方式的组合以及集成相应的 DSP(数字信号处理)硬件和算法,就可以扩大通常射电望远镜的视场,这在发展大连续孔径射电望远镜时,有着重要的意义<sup>[15]</sup>。多波束的相关不仅提供了必要信息,以实现射电望远镜站和阵所要求灵敏度的校准,而且把对每个源的积分时间延长到可以和系统的寿命相比的程度,从而极大地提高观测灵敏度。

AAT 技术易于通过对固定位置的射频干扰源实现空间零位调节,以相对主方向束优于 -43 dB 的射频干扰压缩,或者借助自适应数字方向束形成器和最小方差零位调节(MVN)技术对非固定位置的射频干扰源,完成相对主方向束优于 -30 dB 的压缩<sup>[4,16]</sup>。为对付日益严重的射频干扰,原则上已经可以利用频谱滤波和空间波束形成相结合的办法。

通过采用多单元相位反复电路、DSP 和相应的算法,实现在单元群的模拟信号段中相位和幅度的改正和校准,从而简化了整个系统的校准过程,并可以对射电望远镜孔径本身的测量或加工缺陷进行补偿,以降低对孔径各部分测量和调整精度的要求。

在设计和发展全新一代射电望远镜的过程中,最大限度地减小了机械和结构方面的投资,充分地利用标志着微电子集成电路技术高速发展的“摩尔定律”,及时更新射电望远镜的电子部件,以提高其性能和降低总体造价。

### 4 AAT 应用中的频率效应和相位误差问题

早期的相控阵天线一般是窄频带工作或者应用于像雷达那样的固定频率,当代的 AAT 或由它组成的射电望远镜系统的设计、性能、造价等无一不和工作频率特别是最高频率密切相关。尽管目前在荷兰发展的 AAT 采用了集成的宽带 Vivaldi 那样的天线,但是和任何的射电望远镜一样,其频率相依性并没有根本的改变。

#### 1) 价格

在 AAT 系统中,每个单元基本上和一个接收机前端相联系,因此价格大体上和最高工作频率的平方成比例( $C \propto \nu^2$ )。为了满足相当宽频率范围的性能要求,往往有必要实施所谓“混合设计(hybrid design)”,在这样的设计中,除了射频部分,将尽可能地共享系统的信息传输和计算的基础结构。

#### 2) 系统灵敏度

如果有有效接收面积和系统温度的商来表征系统灵敏度,那么因为天空背景噪声和频率有

着强相依关系, 集成天线、LNA 和 MMIC 的选择直接影响着系统噪声, 集成天线单元本身不可避免的方向性使大天顶距观测灵敏度降低, 因此系统灵敏度实际上是频率的函数 ( $A_{\text{eff}}/T_{\text{sys}} = f_s(\nu)$ )。

### 3) 成像视场

除了天线单元和电磁场的相位误差外, 相关器的功能也在很大程度上影响成像视场 (IFOV), 因此它不可避免地是频率的函数 ( $\text{IFOV} = f_I(\nu)$ )。此外在 AAT 应用于多波束的情况下, 焦面阵的大小也因为相位误差的限制而大体和频率成反比。

### 4) 角分辨率

和最长基线和工作频率有关, 再考虑到集成单元工艺、效率和使用频率的限制, 一般说  $AR \propto \nu^{-1+}$  (这里  $-1$  后面的加号表示该指数在  $-1$  到  $-1.9$  之间)。

### 5) 射电源的表面亮度灵敏度

对特定分辨率最小可测连续谱表面亮度可能也是一个频率的函数 ( $SBS = f_b(\nu)$ )。

### 6) 焦面阵

当利用 AAT 技术组成焦面阵时, 因为焦面场分布和工作频率密切相关, 一般地说焦斑的大小和频率成反比, 而焦面阵的单元大小和网格都是固定的, 对不同频率相邻单元对应的波束间隔也与频率成反比, 有必要对不同的偏轴射线和不同的频率进行阵单元设计和配置的优化。

以系统灵敏度和频率的关系为例, 因选用不同的天线或电磁场采集器而不同<sup>[4]</sup>, 一般的抛物面天线有  $A_{\text{eff}} \propto \nu^0$ , 但天线增益  $G \propto \nu^2$ ,  $T_{\text{sys}} \approx 25 \sim 30 \text{ K}$ ; 由许多单元组成的电子扫描阵的有效面积  $A_{\text{eff}} \propto \nu^0 \sim \nu^{-2}$ , 为了在大约十倍频程的范围维持大的有效面积, 孔径必须要由至少两三个单元综合; 有源偶极子阵则有  $A_{\text{eff}} \propto \nu^{-2}$ ,  $T_{\text{eff}} \propto \nu^{-2.5}$ ; 电子自适应阵大体上符合关系  $A_{\text{eff}} \propto \nu^{-1} \sim \nu^{-2}$ ,  $A_{\text{eff}} \propto \nu^{-0.4}$ 。

和射电天文其他观测设备一样, 成像质量所要求的相位误差限度, 在任何 AAT 的应用中都是必须遵从的。由于相位误差可能产生在 AAT 系统的各个环节, 其仔细分析比较繁杂, 可以合理地采用基础射电天文方法中允许有  $\pi$  弧度的最大误差来估算和分配<sup>[15]</sup>。

## 5 关于焦面场分布 (FFD) 的研究以及阵馈源的综合照明<sup>[16]</sup>

反射面天线应用中的一个重要问题是如何实现高效照明、高效的多波束性能或获得所希望的视场 (FOV)。根据天线技术中的互逆定理, 可以通过对入射平面波产生的焦面场分布 (FFD) 的分析, 设计和配置相应 (共轭) 的焦面阵馈源, 借助阵馈源的综合有效截取所希望的天空辐射场信息。

FFD 研究的主要目的是采用某种综合工具获得所要求的、高效的孔径照明和方向图, 换言之通过馈源系统综合来得到最佳的孔径照明和射电源的精确像场。射电望远镜和卫星通信天线常常需要多波束工作模式, 而且波束可以取不同形态的轮廓, 不必非是“铅笔束”, 反射面天线多波束的实现借助于焦面阵, 焦面阵可以由喇叭、波导或微带阵系统构成。原则上固然可以用任何的焦面阵产生的多波束组合来扩大射电望远镜的视场, 但是一般用开口波导或喇叭组成的焦面阵不可能在较大的单元视场中产生足够靠近的多方向束, 这是因为焦面阵单元孔径的大小限制了各单元间的间隔。

FFD 分析的方法概括起来是, 对每一个离轴的平面入射波估计和重建焦区的 FFD, 采用

PO/PDT 或者 GO/GDT<sup>[19]</sup> 算法, 用专门的天线设计程序 GRASP8-SE<sup>[20]</sup> 来计算 FFD, 再用共轭场匹配方法 (DFM) 使焦场和接收馈源的场相匹配。

为了分析焦面阵的最佳配置构形和位置, 以实现和偏轴图像的高效匹配, 有必要得到 3D 的 FFD。除了焦平面上像场的分布外, 对沿轴向偏离  $\pm 0.5\lambda$  的平面上像场幅度和相位分布的分析表明, 和焦平面上的分布相比, 图像环的大小增加了, 衍射的极小消失了, 幅度场分布变得更扩散了。从更有效地捕捉天线表面反射的功率这个角度出发, 对偏轴辐射的最佳匹配平面是焦平面, 当然最佳匹配的表面也许应该有适当曲度, 例如在所谓的 Petzval 表面。

实际上, 单抛物面天线的效率主要取决于馈源在反射面上产生所希望场分布的能力, 最佳的场分布应该有最大的  $G/T$  比和最小的溢损, 因此理想的馈源方向图应有平方正割形式和在反射面边缘的尖锐截止 (例如  $-12$  dB)。单波束照明常常采用波纹喇叭、同轴波导和多模喇叭等来得到所需要的照明和覆盖所要求的波段, 但是为了扩大由众所周知的波长孔径比确定的 FOV 和设计高效的多波束馈源, 上述传统的单波束馈源将难以胜任。主要是相邻单元的间距缩小受到限制, 其结果是期望合成的大 FOV 中各波束只能在较低的电平重叠, 无法形成仅仅小有起伏的单波束; 在用作多波束工作时, 又不能实现 Nyquist 采样律所要求的高孔径效率<sup>[14]</sup>。实际上该采样律要求波束间隔不大于  $\lambda/2D$ , 对应焦平面上的采样间隔不大于  $\Delta x = 0.5\lambda F/D$ , 例如对大  $F/D$  的反射面, 单元间隔应该小于  $1\lambda$ , 对  $F/D < 0.4$  的反射面应该大体小于  $0.5\lambda$ <sup>[14,19]</sup>。

以荷兰 FARADAY 的开发研究为例作进一步说明, FARADAY 的主要目的是研究集成稠密阵天线用作 25 米反射面天线 ( $F/D = 0.35$ ) 的单波束及多波束馈源, 并设计相应的 MMIC 以适应波束成形和扩大的需要, 有效地提高多波束的性能, 改善射电望远镜的 FOV。实际上为了实现高效的多波束性能, 例如要求功率损失小于 50% 的最大的视场覆盖, 就是使众波束彼此在小于 3 dB 水平分离; 其次要求最佳的孔径照明, 即溢损小于  $-12$  dB 的反射面孔径具有最大增益。根据 FFD 的分析, 中央像斑固然可以用  $1.2\lambda$  大小的单一馈源来接收以保证功率损失小于 50%, 如果希望有更大的视场, 即除了轴向平面波外, 还接收一定范围的偏轴平面波, 那就需要设计一个阵馈网格, 其中除了估计阵的大小, 阵单元的最小数目和阵网格的可能间隔也是很重要的。而为了实现高效的多波束性能, 使功率损失小于 50%, 更有必要设计一个专用的馈源网格阵。

实验证明利用 Vivaldi 单元阵列, 并以不同的复系数 (幅度和相位) 对阵列不同的环赋权时, 可以改善照明方向图, 一方面使照明图形更宽, 另一方面使反射面边缘照明更低。稠密 AAT 阵列用作抛物面射电望远镜馈源时, 既改善了照明方向图, 提高了观测和扫描的效率, 又利于多波束馈源的设计应用; 此外它还提供了使射电望远镜能在宽频带工作的一个解决办法。

对偏置抛物面射电望远镜的 FFD 进一步分析表明, 由于焦点和反射面在此种射电望远镜中的不对称性, 离轴平面波在焦平面上场分布也不是对称的, 波束的畸变也许需要不只一个单元才能捕捉到离轴波束的焦面场 (例如近似三角形或者梯形的分布), 在设计和配置焦面阵时需倍加小心才能保证高效和最佳的天线波束。

在功率损失小于 50% 或者重叠电平低于 3 dB 的要求下, 除了对 Westerbork 25 m 天线 ( $F/D = 0.35$ ) 的研究和设计外, 还对  $F/D = 0.525$  的 LDA (大型可展偏置天线) 作了相应的设计研究。后者采用孔径大小仅为  $0.75\lambda \sim 1\lambda$  的喇叭阵, 采用更窄间隔的集成阵 (Vivaldy  $8 \times 9$  单元阵, 间隔 2.7 cm, 有源单元数依构形需要选择 12~25 个, 阵馈尺度对 3.5 GHz 约  $1.2\lambda$ ), 阵馈实验基本采用六角形阵列中的三角形网格配置成 3、5、7 喇叭组群, 最终得到边缘  $-12$  dB

的高斯照明。而在 Westerbork 的 25 米天线上的实验表明一个  $7 \times 7$  单元的阵馈能够组成一个高效的单波束阵馈, 获得所要求的正割平方照明且轴向电平为  $-3$  dB、反射面边缘为  $-18$  dB。设计的原则是使阵馈源形成一些同心激励环, 在一定程度上和同轴喇叭的情况相似。但是这样的激励设定往往只对有限的频带 (约 30%) 有效, 因为 FFD 的横向大小和频率相关。

上述实验表明, 为实现高效多波束性能, 主焦反射面望远镜其阵馈群组的大小不应小于焦面波束斑的大小, 且其形态与焦场结构中的椭圆或哑铃形辐射环相配, 它可以用足够的密度和延伸的环形或矩形网格阵实现, 由于焦场分布 (FFD) 的大小与频率密切相关, 而焦馈阵的几何是固定的, 所以对不同的偏轴波束和频率需要作最佳化的研究和实验。而对偏置反射面天线, 阵馈群组的网格构形不仅取决于入射波方向的偏轴值, 而且决定于其方位角, 因此阵馈中单元应视不同的方位以三角形 (对称面) 或方形、梯形 (其他方位) 组群。

此外作为改善孔径照明和扩大视场的焦面阵, 其单元间隔和阵的大小受到严格的限制, 主要是因为作为多波束模式工作的阵边缘的单元, 相对阵中心处单元的相位中心将产生额外的相位差, 从而产生方向束在大扫描角的畸变、孔径照明效率损失和彗形旁瓣等, 比如为了限定此相位差小于  $\pi/2$ , 就要求焦面阵单元间隔和排列“环数”满足一个和频率成反比的不等式<sup>[14]</sup>。

## 6 关于 AAT 系统波束形成的校准简介<sup>[14,15]</sup>

这里仅以千单元相位阵 (THEA) 方向束形成为例说明其中的校准问题:

- 1) 采用二级校准的概念, 片上的成束以及阵中诸片间的数字波束成形;
- 2) 片内成束由集成的低噪声放大器 (LNA)、功率分配器 (splitter) 和通过数模转换器 (DAC) 控制的向量调制器 (VM) 实现, VM 实际上是可变化的复相移器, 就是说通过它可以调节每一路的幅度和相位;
- 3) THEA 共有 2 048 个 VM, 欲对每一 VM 进行单独的校准是困难的, 采用若干个一组, 其中之一为基准, 其余也以同样的办法作校准, 仍然可以把误差控制在容许的范围;
- 4) 在对天线单元的相位和增益的校准中, 采用相位钳制 (Phase Toggling) 技术, 可以同时确定两者的误差, 相位钳制就是改变每一个 VM 的相位并使得相位和增益的每一个偏离都可以测量的过程。基本办法是在频率步进改变  $f_k$  时钳制 (测量) 每一单元的相位, 再对所有测量结果作傅里叶变换, 此变换峰值对应的频点增益和相位是每个天线单元在此过程链中增益和相位偏置的平均值, 此技术已得到实际计算和测量的验证。
- 5) 利用此种技术对四单元在  $f_k = 1, 5, 9, 13$ ,  $N = 32$  个测点的校准实验表明其峰值点的数据可用来校准系统, 相位和增益误差分别为  $\pm 1^\circ$  和  $\pm 0.1$  dB。
- 6) 实际的 THEA 每 4 个 Vivaldi 天线单元共享一块方向束形成的网络板, 实验表明方向束可以形成和调动, 并可以以  $-30 \sim -40$  dB 的深度置零, 后者对于干扰的第一级抑制是重要的。8 天线单元的方向束调动和置零也是成功的, 调动范围是  $-30^\circ \sim -40^\circ$ 。

## 7 干扰抑制和波束置零或干扰置零的算法概要<sup>[17]</sup>

- 1) 通常的自适应置零技术是采用最小方差 (MV) 算法的功率最小化法, 但是 MV 方法并不适用于射电天文, 因为 MV 的功率反转性质使得置零深度和干扰噪声比 (INR) 成比例; 其

次 MV 易受“加权抖动”或者“方向图晃动”现象的制约,因为射电天文的 RFI 源包括非地球同步卫星和地面的移动通信,为了有效地对付这些动态的信号,置零算法中的加权常需要以 10 ms 量级更新,而自校算法的更新一般是每秒一次,在自校更新之间要求自适应方向图近似保持稳定,只有所要求的零位可以移动,这就使得天文成像极其困难;此外即便采用将天线阵协变矩阵分解为“干扰子空间”和“噪声子空间”的两个成分后,对较大的天线阵使用 MV 还将导致计算量过大的问题。

2) 另一种可以供选择的办法是子空间扫描并随之采用空间投影的技术,例如称之为“投影近似收缩的子空间扫描”(PASTd)技术,这种技术是将干扰的估计和对干扰的抑制问题分成两步来进行。可以相对低的复杂性,直接得到变换的本征矢量。

3) 子空间扫描空间投影技术(STSP)是专为 AAT 的应用而发展的另一种可能技术。它先通过 PASTd 得到本征矢量;再通过 Graham-Schmidt 正交化(GSO)程序使估计的本征矢量正交,以改善其精度;此后用最小描述长度法(MDL)估计干扰子空间的级别,用不同的方法估计信号子空间的级别。

4) STSP 技术随后进入调节矢量匹配、置零选择和波束形成的阶段。原则上可以从估计的本征矢量直接计算适当的置零空间投影,然而知道和不同的干扰源相联系的到达方向(DOA)对系统的校准是有用的,MUSIC 技术可以用来估计 DOAs,也可以采用最大似然方法估计  $k$  个 DOAs,和 DOAs 相关的调节矢量和干扰本征矢量的某种组合也许是最佳的,尽可能有最深的置零,而且在 DOAs 确切知道的情况下,还有助于进一步校准系统;置零过程也许需要进一步作些调整,例如当天线阵单元数  $N \gg k$  时,或者当存在干扰噪声比  $INR < 1$  不能可靠地探测或估计干扰时,可以适当增加置零数,反之如果特定干扰所造成的损害还不及相应的置零搅乱方向图造成的损害,可以适当删去干扰子空间的矢量;也可能需要修改确定干扰子空间的矢量,以形成适应特定干扰的方向图,而不一定总是深置零。在完成所有上述程序形成的置零矩阵基础上,波束形成就是顺理成章的了。

5) 采用 64 个弓形领结式天线组成的 OSMA 双层结构实验系统进行实测和仿真实验,该系统工作在 1.5~3.5 GHz,在实验频率 2 GHz,天线单元有效列和行的间隔分别为半波长和两波长。仿真实验中,假设  $k_{\max} = 5$ ,  $INR = +32$  dB,相对于垂射方向的  $DOA = 70^\circ$ ,实测结果表明 PASTd 和 GSO 算法以及所计算的本征值和本征矢量都是收敛的。当然由于 OSMA 试验装置本身的限制,在低  $INR$  的试验和波束的精确测量是不可能的,但是对 8 单元 ( $N = 8$ ) 的均匀线阵,在  $INR = 0$  的假设下,仍然进行了仿真计算,计算中主本征值和主本征矢量仍然是收敛的,自适应波束也在距垂射方向的主瓣 ( $90^\circ$ ) 为  $70^\circ$  处成功置零。SDSP 方法所得到的自适应波束和 MV 方法所得的主要差别就在于前者的置零深度(小于  $-50$  dB) 远优于后者 ( $-32$  dB),而且置零方位也更准确 ( $20^\circ$ )。

6) 用浮点计算次数对 SDSP 和 MV 在自适应置零算法的加权更新中的估算分析表明,对  $N = 8$  而且  $k_{\max} = 1$  的情况,两种方法的计算量大体相同。而当  $Nk_{\max}^{-1} > 7.3$  时,即是说对较多单元的阵和仅有较少的干扰源的情况,STSP(用 PASTd) 和 MV 相比,计算的效率更高,不易于造成计算机的障碍,这是它的一个重要优势。

## 8 应用 AAT 补偿孔径面几何缺陷的可能性和局限 [21,22]

AAT 技术重要的特点是可以对不同位置的单元分别赋权,这样的焦面装置在匹配焦面场



分布时有很大的灵活性。其中一个最重要的用途是补偿孔径面的几何缺陷。当孔径面存在几何缺陷, 使得焦面上的电场分布变差, 焦斑扩展, 相位起伏增加。用喇叭馈源接收时, 天线的效率会下降, 这是因为在喇叭口内电场的相位发生变化, 喇叭馈源最后得到是所接收的电场的矢量相加。AAT 技术的焦面阵馈源, 可以在一定程度上改正焦面电场分布, 从而补偿孔径面的几何缺陷。当然孔径面几何缺陷必须是可知的, 通过精确测量得到孔径面的几何数据, 利用得到的数据模拟计算反射面焦面上电场分布, 根据电场的幅度和相位分布设置焦面阵的赋权网络。使每个天线单元的相位能补偿所在位置的电场的相位, 取得最强的接收信号。

从上面的分析也不难看出, 用 AAT 技术补偿孔径面几何缺陷是有条件的, 孔径面的缺陷若能引起焦平面上较大范围内的场分布变化, 并且变化是缓慢的, 就可以用 AAT 技术补偿; 若孔径分布引起的焦场在整个焦平面内变化一致, 这时所有的 AAT 单元需要同样的加权改正或者反射面本身的安装需要重新校准; 另一方面如果变化在小范围内, 比一个 AAT 单元天线还小, AAT 也不能改正这种变化。

要知道什么位置最适合安放 AAT 接收机, 需要知道焦点附近电场的三维分布 (3D Focal Field Distributions)。要找到最佳的 AAT 接收机安放面, 此面由那里的波束变形最小来决定。这里需要对反射面做焦场分析, 并用 AAT 来匹配得到的焦场。对一个大抛物面反射面做焦场分析是一个很费时费力的工作, 幸运的是, 可以借助计算机进行庞杂的计算。GRASP8 是一个专业的望远镜反射面设计软件, 可用来计算各种反射面的焦场和远场场分布<sup>[16]</sup>。

以类似 TICRA 公司的 GRASP 系列专业设计软件做即将建造的 FAST 的焦场分析为例。FAST 在观测模式下形成 300 米实时抛物面以实现天体的跟踪观测。下面图 2 和图 3 是两种不同入射角情况下 FAST300 米抛物面焦点附近的电场分布, 包括电场功率和电场的相位。

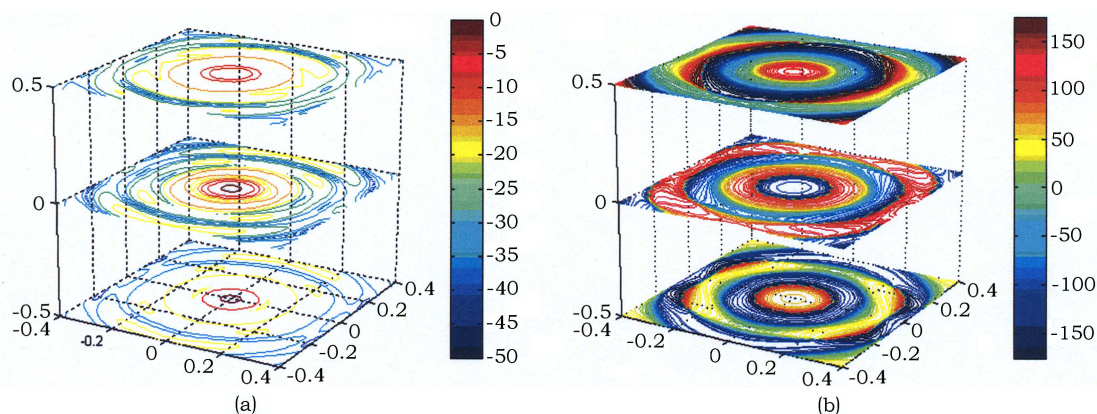


图 2 沿主轴入射的平面波 ( $\theta = 0 \text{ deg}$ ,  $\varphi = 0 \text{ deg}$ ) 在焦点附近的电场分布情况

(a) 电场功率分布, 单位: dB; (b) 电场相位分布, 单位: 角度

图中,  $XOY$  平面是几何焦平面,  $Z$  轴是抛物面的主轴。3 个平面分别是焦平面后  $\lambda/2$  平面 ( $Z = 0.5\lambda$ ), 几何焦平面 ( $Z = 0\lambda$ ), 焦平面前  $\lambda/2$  平面 ( $Z = -0.5\lambda$ )。比较所得到的结果可以看到, 对于主轴入射的情况 (图 2), 当远离焦点时 (不论是向前还是向后), 功率分布变得平坦, 同时电场相位分布却变得复杂。为了相位阵赋权网络的简单, 我们尽力要在功率分布集中、相位分布比较平坦的地方安置接收机。要求功率分布集中, 是因为这样我们可以用最少的 Vivaldi 单元接收到我们想要的功率。相位分布平坦使得单元相位赋权趋于一致, 赋权网

络大大简化。所以对于主射入射的平面波，几何焦平面是理想的接收机安放平面。

从图 3 可以看出，在平面波偏轴入射情况下，焦平面和焦平面前  $\lambda/2$  平面上，有大致相同的电场功率分布，并且在焦平面前  $\lambda/2$  平面上电场的相位分布还要略微平坦一点。综合考虑，几何焦平面不比焦平面前  $\lambda/2$  平面有任何优势。焦平面不再是安放馈源的最佳位置。

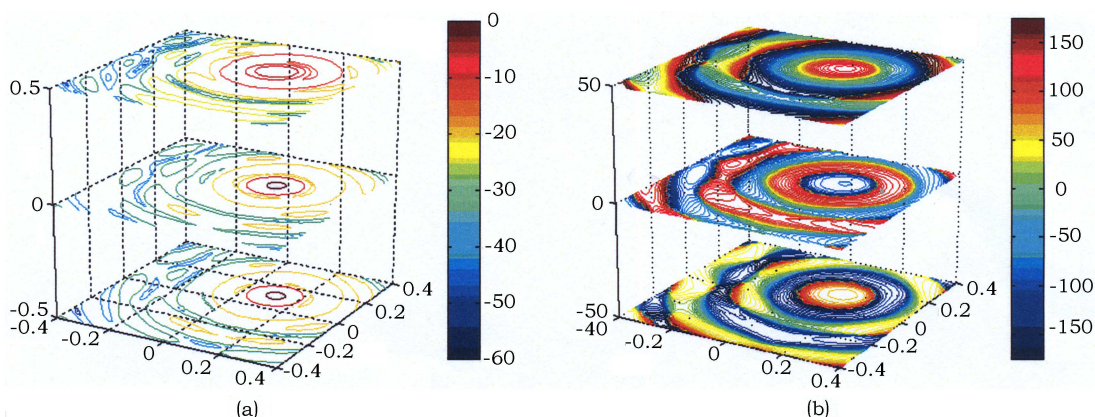


图 3 偏离主射入射平面波 ( $\theta = 0.0566 \text{ deg}$ ,  $\varphi = 45 \text{ deg}$ ) 在焦点附近的电场分布情况

(a) 电场功率分布, 单位: dB; (b) 电场相位分布, 单位: 角度

虽然目前 AAT 的技术还需进一步研究和发展, 但由于其价格十分昂贵, 主要限于在新的实验装置、新建的大型射电望远镜及一些毫米波射电望远镜上应用。但是随着微电子集成技术的发展, AAT 将会日益广泛地应用于射电望远镜, 甚至孕育了实现软件射电望远镜和无传统意义反射面射电望远镜的可能前景。

#### 参考文献:

- [1] Padman R. Multi-feed Systems for Radio Telescopes, Emerson D T, Payne J M eds. Provo: BookCrafters Inc., Astron. Soc. Pac. Conf. Ser. 1995, 75: 3
- [2] Fisher J R. Multi-feed Systems for Radio Telescopes, Emerson D T, Payne J M eds. Provo: BookCrafters Inc., Astron. Soc. Pac. Conf. Ser. 1995, 75: 27
- [3] Butcher H R. European SKA Consortium, The European Concept for the SKA-Aperture Array Tiles. Dwingloo: ASTRON, 2002: 3
- [4] Van Ardenne A, Smolders B, Hampson G. Radio Telescopes, Proceedings of SPIE, Butcher H R ed. 2000, 4051: 420
- [5] Strom R G, Smolders B, van Ardenne A. Astrophysics and Space Science, 2001, 278: 209
- [6] Bregman J D. Radio Telescopes, Proceedings of SPIE, Butcher H R ed. 2000, 4051: 19
- [7] Ivashina M. Annual Report of ASTRON, Dwingloo: ASTRON, 2001: 5
- [8] Keen N. Multi-feed Systems for Radio Telescopes, Emerson D T, Payne J M eds. Provo: BookCrafters Inc., Astron. Soc. Pac. Conf. Ser. 1995, 75: 42
- [9] 王绥瑄, 吴盛殷. 射电天文方法, 北京: 科学出版社, 1988: 59
- [10] Bracewell R N. The Fourier Transform and its Applications, 2nd ed., New York: McGraw-Hill, 1978: 45
- [11] Christiansen W N, Hogbom J A. 射电望远镜, 陈建生译, 北京: 科学出版社, 1977: 62
- [12] Ivashina M, Bregman J, van Ardenne A. Annual Report of ASTRON, Dwingloo: ASTRON, 2002: 5
- [13] Ivashina M, Klooster K V. 25th ESA Antenna Workshop on Satellite Antenna technology, ESTEC: Netherlands, Noordwijk, 2002
- [14] 吴盛殷, 南仁东. 天文学进展, 2001, 19: 421

- [15] Brookner E. *Sci. Am.*, 1985, 252: 94
- [16] Hampson G A, Bij de Vaate J G. *IEEE AP-S International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Boston: Proceedings Pg. 2001: 610
- [17] Napier P J, Cornwell T J. *Multi-feed Systems for Radio Telescopes*, Emerson D T, Payne J M eds. Provo: BookCrafters Inc., *Astron. Soc. Pac. Conf. Ser.* 1995, 75: 48
- [18] Ivashina M, Bregman J, van Ardenne A. A way to improve the field of view of the radiotelescope with a dense Focal plane array, presented at International conference on Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo02), Sevastopol, Ukraine, 2002
- [19] Elligson S W, Hampson G A. *IEEE Transaction on Antenna and Propagation*, 2002, 50: 25
- [20] Rahmat-Samii Y. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 1990, 32(4): 20
- [21] Vilmrotter V, Fort D, Iijima B. *Multi-feed Systems for Radio Telescopes*, Emerson D T, Payne J M eds. Provo: BookCrafters Inc., *Astron. Soc. Pac. Conf. Ser.* 1995, 75: 61
- [22] Fisher J R, Bradley R F. Full-sampling array feeds for radio telescopes, in *Radio Telescopes*, Proceedings of SPIE, Butcher H R ed. 2000, 4015: 273

## The AAT Technique and its Applications in Radio Astronomy

WU Sheng-yin, GAN Heng-qian, ZHANG Hai-yan

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

**Abstract:** The AAT(Aperture Array Tiles) technique founded on micro-electronic IC has been extensively studied and well applied in radio astronomy in last ten years. The basic concept and some essential applications of the AAT are overviewed in this paper.

Firstly the concept, the level-by-level structure and the basic performance structure of the AAT are briefly described. Then the basic principle and analysis method associated with the AAT and radio astronomy are introduced in section 2. The applicable scope of the AAT in radio astronomy is outlined in section 3 that includes high-efficiency illumination of the aperture, enlarging the field of view, realization of high-efficiency multibeam, RF interference nulling and compensation of deflection on the reflector of the radio telescope. Any application of the AAT would be influenced and restricted undoubtedly by operation frequency, phase error and system calibration that are discussed briefly in sections 4 and 6. The focus field distribution (FFD) is a key point of applying the AAT as illuminator of a reflector of radio telescopes. The applications of the FFD in enlarging the field of view and improving multi-beam efficiency of a radio telescope are illustrated in section 5. In section 7, the restrain or suppress of radio-frequency interference in radio observations by using the AAT technique is introduced in brief. Finally the possibility and restriction of applying the AAT in compensation and correction of any deflection on the reflector of radio telescopes are described.

The AAT technique would be developed quickly and the cost would undoubtedly decrease in accordance with the Moore Law. It would be expected to become a foundation stone of some completely modern radio telescope, such as a software or reflectorless radio telescope.

**Key words:** radio astronomy; radio telescope; aperture array tile (AAT); field of view; multi-beam