射电天文望远镜的焦面阵设计

吕善伟 吴东梅 王 伟

(北京航空航天大学 电子信息工程学院，北京 100083) (航天科工集团 203 所，北京 100854)

南仁东

(中科院国家天文台，北京 100012)

摘 要：为使射电天文望远镜的视场得到扩大，分析望远镜的视场时对天线的反射面提出共形网格剖分法，对物理光学法的常规计算方法进行了改进，使计算精度得到提高，且剖分网格少. 采用改进的算法计算了 WSRT 望远镜的焦面场，并根据计算结果设计了 WSRT 望远镜的致密焦面阵结构；用共轭匹配法对阵列单元加权、计算相应的远场方向图，并与采用单个馈源时的远场方向图作比较. 结果表明采用致密焦面阵能扩大视场并保证视场连续，增益也得到提高.

关 键 词：天文望远镜；反射面天线；物理光学法；焦面阵

中图分类号：P 16

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2007)03-0341-04

Design of focal plane array of radio telescope

Lü Shanwei Wu Dongmei

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Wang Wei

(The Second Academy, China Areo-space Science & Industry Corp., Beijing 100854, China)

Nan Rendong

(The National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Science, Beijing 100012, China)

Abstract: In order to increase the field of view (FOV) of the radio telescope, a new grid method named the conforming grid was proposed when the FOV of the telescope was analyzed. With this grid, the physics optical (PO) method is more accurate and fewer grids are needed compared to the conventional PO method. With the modified method, the focal field of WSRT telescope was computed. Based on the result, the dense focal plane array was designed for the telescope. The weights of focal plane array were given by the conjugate field method and the far fields of WSRT were computed. It is proven that a wider FOV, higher gain and aberration correction are obtained by dense focal plane array compared to the single feed.

Key words: telescope; reflector antenna; physical optics method; focal plane array

射电天文学在天文学发展中起着关键性作用，为了对宇宙空间做进一步研究，要求研制出具有高灵敏度、高分辨率和完备频率覆盖的天文观测设备. 一般的天文望远镜的口径都在米数量级，达到几十米甚至几百米，这时望远镜的视场变得很小. 为了扩大望远镜的视场，采用致密焦面阵(dense focal plane array)可以较好地解决这个问题[1-3]. 致密焦面阵的单元采用 Vivaldi 天线为

收稿日期：2006-04-04

基金项目：国家自然科学基金资助项目(60271012)；国家天文台 FAST 课题资助项目

作者简介：吕善伟(1937－)，男，辽宁大连人，教授，lueshw@buaa.edu.cn.

佳，Vivaldi天线可以做得很小，因而能够达到扩大视场的同时保证视场的连续.

1 物理光学计算方法的改进

以文献[4]和美国的WSRT望远镜为例进行分析计算，从中介绍本文的算法.

物理光学法是用散射体表面的感应电流取代散射体本身作为散射源，然后对表面电流积分求出散射场. 首先，根据物理光学近似，由入射场得到金属反射面天线表面的等效电流：$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{r}_f)=2\hat{n}\times\boldsymbol{H}_i(\boldsymbol{r}_f)$；然后由物体的面电流分布，根据朱兰成辐射公式(1)计算出辐射场.

$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r})=-\mathrm{j}k\eta(\bar{\bar{I}}-\hat{r}\hat{r})\cdot\iint_S\boldsymbol{J}(\boldsymbol{r}_f)\frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{j}kr}}{4\pi r}\mathrm{e}^{\mathrm{j}k\boldsymbol{r}_f\cdot\hat{r}}\,\mathrm{d}s \quad (1)$$

采用物理光学法计算反射面天线的散射场可以分为如下步骤：

1) 把反射面划分成足够细小的网格；

2) 求出每个网格中心的入射场；

3) 计算每个网格中心的感应电流；

4) 对表面电流做积分得到辐射场.

常用的网格是等距均匀网格，如图1c所示，这种网格的缺点是离散求和积分时边缘的网格会产生锯齿，引起计算误差. 本文提出一种共形网格剖分的方法，如图1d所示，把反射面在xy平面上的投影圆划分成径向均匀、单元格面积相等、且与圆形共形的网格. 第i个圆环的面积为

$$\pi(i\Delta\rho)^2-\pi[(i-1)\Delta\rho]^2=\pi\Delta\rho^2(2i-1) \quad (2)$$

式中，i取值在$1\sim N$之间；$\Delta\rho$为投影圆半径的划分间隔，一般取1/4波长，$\Delta\rho=R/N$；N为剖分的圆环数目，R为口面半径. 为了使网格单元接近于正方形，第i个圆环划分的网格数为

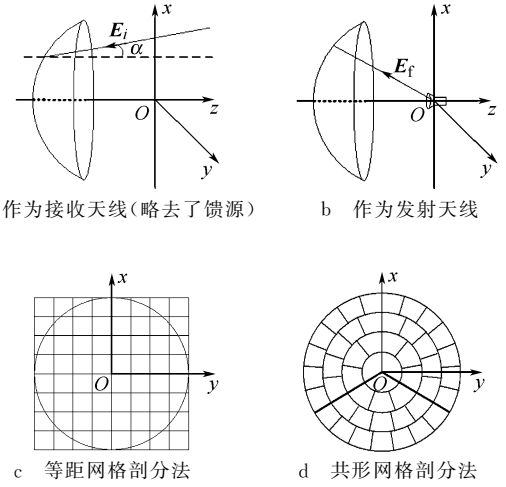
$$\pi\Delta\rho^2(2i-1)/\Delta\rho^2=\pi(2i-1)\approx 3(2i-1) \quad (3)$$

这时每个网格单元面积为$\frac{\pi}{3}\Delta\rho^2$.

以参考文献[4]中的前馈单反射面天线为例，其焦距400 mm，口径430 mm，工作频率20 GHz. 馈源辐射场为：

$$\boldsymbol{E}_f=\frac{\mathrm{e}^{-jkr}}{4\pi r}\left[\hat{\theta}\left(\frac{1+\cos\theta}{2}\right)^q\cos\varphi-\hat{\varphi}\left(\frac{1+\cos\theta}{2}\right)^q\sin\varphi\right] \quad (4)$$

其中，q根据最大增益准则确定，忽略馈源对反射面的遮挡效应. 分别采用等距剖分离散求和积分法、等距剖分Bessel_Fourier积分法、共形剖分离散求和积分法计算该天线的远场，得到的归一化方向图的结果如图2所示.



a 作为接收天线(略去了馈源) b 作为发射天线

c 等距网格剖分法 d 共形网格剖分法

图1 望远镜天线坐标与反射在剖分的示意图

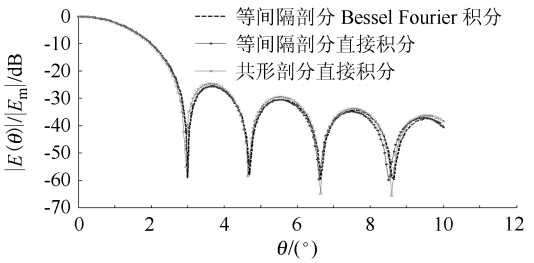


图2 三种方法计算的归一化方向图

以不同方法的网格数、计算得到的半功率点波瓣宽度(HPBW，Half-Power Beamwidth)和旁瓣相对电平(SLL，Side Lobe Level)列在表1中. 与理论结果相对比，这三种方法都比较准确地计算出了主瓣宽度和旁瓣电平，但共形剖分法的精度略高，且剖分网格数少，体现了共形网格的优越性. 下一节中计算反射面天线的远场和焦面场时就采用共形剖分法.

表1 三种计算方法计算的主要参数

方法	网格数	HPBW/(°)	SLL/dB
1	1024	2.3	−25.6
2	1024	2.3	−25.5
3	768	2.3	−24.6
理论		2.3	−24

2 WSRT望远镜的焦面场和远场

美国的WSRT望远镜的口径$D=25$ m，焦径比$F/D=0.35$，工作频率为2～5 GHz. 分别用作接收天线和发射天线时的坐标系如图1a和图1b所示.

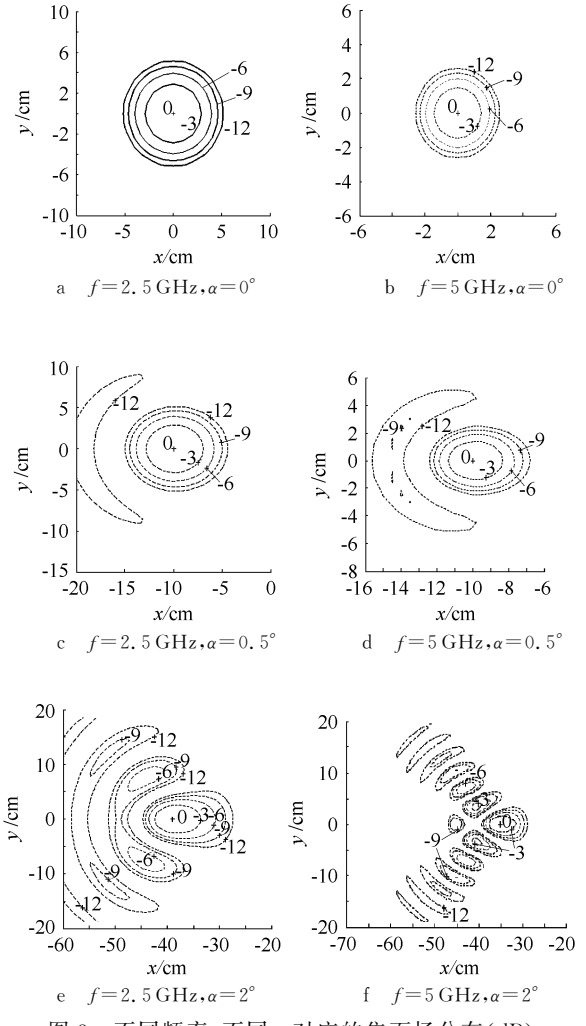
当WSRT望远镜用作发射天线时，如图1b所示，入射波是来自馈源的球面波，如式(4)所示. 工作频率为5 GHz时，计算得到增益为61.2 dB，

3 dB波瓣宽度为 0.158°,第 1 旁瓣相对电平为 −25.3 dB.

当 WSRT 望远镜用作接收天线时,如图 1a 所示,入射波是来自空间的平面波.假设入射平面波的波矢量 $\hat{\boldsymbol{k}}$ 在 xz 平面且与 z 轴夹角为 α(参见图 1a),是 y 向线极化,这时入射场可表示为

$$\boldsymbol{E}_i = \hat{y}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\boldsymbol{kr}} = \hat{y}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k(x\cos\alpha+z\sin\alpha)} \tag{5}$$

当工作频率分别为 2.5 GHz(λ=120 mm)、5 GHz(λ=60 mm)时,以不同 α 角值计算得到的 xy 平面上的场分布分别如图 3a,3c,3e 和图 3b,3d,3f 所示.由图可以看出,随着平面波入射角的增大,焦斑最强点距坐标原点越来越远,增益越来越小,且焦场范围越来越大.工作频率越高,则焦斑越小,即反射面的汇聚能力越强.



a　f=2.5 GHz,α=0°　　b　f=5 GHz,α=0°

c　f=2.5 GHz,α=0.5°　　d　f=5 GHz,α=0.5°

e　f=2.5 GHz,α=2°　　f　f=5 GHz,α=2°

图 3　不同频率、不同 α 对应的焦面场分布(dB)

3　设计 WSRT 望远镜的焦面阵结构

阵元间距和面阵尺寸两个参数的选择和确定.①由前面第 2 节知,最高工作频率为 5 GHz 时,波束宽度为 0.158°;以 0.158°入射的平面波在焦平面上引起的焦点偏移量为 31.6mm,据此可选择阵元间距为 30 mm(对应 2.5 GHz 为 $\lambda/4$,对应 5 GHz 为 $\lambda/2$),以保证视场连续覆盖.②一方面为了增加望远镜的视场需要尽量增大焦面阵;另一方面,焦面阵越大,结构越复杂,成本越高,遮挡越大.折衷考虑,取馈源阵列半径为 405 mm的圆,此时扫描角度约为 2°;所设计的焦面阵结构在 xy 平面上取均匀分布的面阵,阵元间距 30 mm,限制在半径 405 mm 的圆内,此时可计算出约有 580 个阵元.

4　焦面阵加权与仿真

采用共轭匹配法对焦面阵单元作加权[5].共轭匹配法是指为了得到指向 α 方向的波束,阵列的幅度和相位决定于:以 α 角斜入射的平面波在反射面的焦面场分布,取其共轭值.

以下给出对应不同 α 角计算得到的阵元加权值和天线二次方向图曲线.

1) f=2.5 GHz,α=0°

根据图 3a 可知,电场主要集中在焦平面中心,因此对中间的 9 个阵元作加权,权值为阵元中心所在位置的电场相对于最大场值的归一化共轭值,其余阵元不工作,权值如表 2 所示.

表 2　馈源阵列的阵元加权值

y/mm	x/mm				
	−60	−30	0	30	60
60	0	0	0	0	0
30	0	$0.4471\mathrm{e}^{-\mathrm{j}0.0081}$	$0.6926\mathrm{e}^{-\mathrm{j}0.0052}$	$0.4471\mathrm{e}^{-\mathrm{j}0.0081}$	0
0	0	$0.6936\mathrm{e}^{-\mathrm{j}0.0018}$	1	$0.6936\mathrm{e}^{-\mathrm{j}0.0018}$	0
−30	0	$0.4471\mathrm{e}^{-\mathrm{j}0.0081}$	$0.6926\mathrm{e}^{-\mathrm{j}0.0052}$	$0.4471\mathrm{e}^{-\mathrm{j}0.0081}$	0
−60	0	0	0	0	0

将本文得到的辐射场结合文献[4]给出的增益 G 公式,计算的增益方向图绘于图 4～图 6 中.

从图 4 可知,采用焦面阵提高了增益,降低了旁瓣电平(相对电平),特别是第 1 旁瓣下降较多.

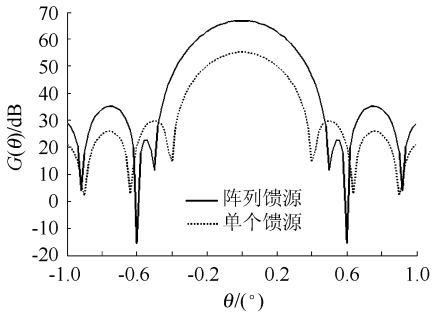


图 4　位于(0,0)的单馈源和阵列馈源的二次方向图

2) f=5 GHz,α=0.91°

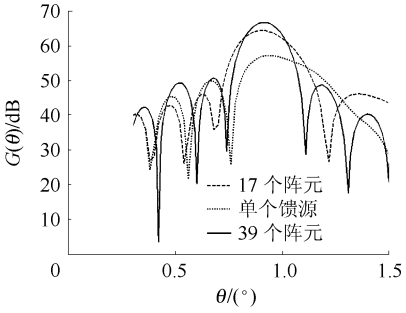


图5 位于(−180, 0)的单个馈源和阵列馈源的二次方向图

与1)类似,首先根据工作频率5GHz、平面波以0.91°入射时在焦平面上的场分布,确定需要加权的阵元及其权值,然后计算加权后的反射面系统的二次方向图.图5给出了加权阵元的数目变化时与单个馈源时的方向图.由图5可知,单个馈源在偏轴照射时,二次方向图发生畸变,表现在方向图不对称,旁瓣电平升高.采用焦面阵能校正这种畸变,且校正能力与所用到的阵元个数有关,阵元数越多,校正能力越强.

3) $f=5\,\mathrm{GHz}, \alpha=1.85°$

与2)类似,计算确定阵元加权值后计算得到的反射面二次方向图,与单个馈源时的方向图绘于图6.由图可知,当扫描角度接近最大视场时,由于焦面阵的面积有限,权值较大、作用较大的阵元已接近焦面阵边缘,因此,焦面阵的校正能力有限,二次方向图的畸变还比较明显.

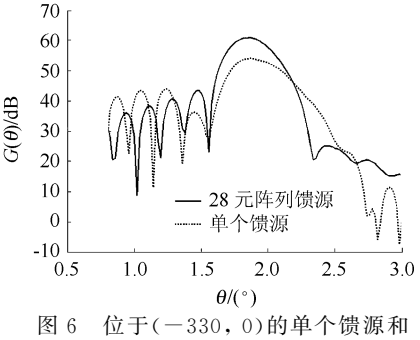


图6 位于(−330, 0)的单个馈源和阵列馈源的二次方向图

5 结束语

本文提出共形网格剖分法,提高了物理光学法计算的精度.并采用改进的算法计算了WSRT望远镜的远场和焦面场,最后设计了WSRT望远镜的焦面场并用共轭匹配法对阵列作加权.通过算例可知,采用焦面阵能有效扩大视场,提高天线增益,校正方向图畸变,但对于扫描角度接近最大视场的情况,焦面阵的校正能力有限.

参考文献(References)

[1] Weem J P, Popovic Z, Notaros B M. Vivaldi antenna arrays for SKA[C]//Antennas and Propagation Society International Symposium. [S.l.]: IEEE&IEE Publications, 2000, V1:174−177

[2] Ivashina M V, van Ardenne A, Bregman J D, et al. Activities for the square kilometer array (SKA) in Europe[C]//IVth International Conference on Antenna Theory and Techniques, 2003, V2: 633−636l

[3] Ivashina M, van Ardenne J D B A. A way to improve the field of view of the radiotelescope with a dense focal plane array[C]//Microwave and Telecommunication Technology 12th International Conference, 2002: 278−281

[4] 王宇. 相控馈电双反射面天线的研究[D]. 北京:中国空间技术研究院, 2003
Wang Yu. Research on the phased-array-fed dual-reflector antenna[D]. Beijing: Chinese Academy of Space Technology, 2003(in Chinese)

[5] Ivashina M V, Bregman J D, bij de Vaate J G, et al. Experimental results for a focal plane array, synthesized with conjugate field method[C]//Antennas and Propagation Society International Symposium. [S.l.]: IEEE&IEE Publications, 2004, V1:21−24

(责任编辑:娄 嘉)