

## 焦面场分析与相控阵馈源设计

伍洋<sup>\*①②</sup> 杜彪<sup>②</sup> 刘肖萌<sup>②</sup> 金乘进<sup>③</sup> 甘恒谦<sup>③</sup> 龚书喜<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室 西安 710071)

<sup>②</sup>(射电天文技术联合实验室 石家庄 050081)

<sup>③</sup>(中国科学院国家天文台 北京 100012)

**摘要:** 该文介绍了焦面场的计算方法及其与反射面焦径比的关系,分析了焦面场与馈源口径场的联系,并建立了基于焦面场分析进行相控阵馈源设计的方法,包括确定单元间距、阵列规模以及实现目标方向图所需要的激励。按照这一方法,分别以未赋形卡塞格伦天线和前馈抛物面天线为对象,设计了各自的相控阵馈源以实现赋形波束的效果,并在后者上验证了波束扫描性能。通过仿真,天线性能实现了预定目标,证明了设计方法的有效性。

**关键词:** 反射面天线; 多波束; 焦面场; 相控阵馈源

**中图分类号:** TN823

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2013)05-1236-05

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2012.01059

## Focal Field Analysis and Phased Array Feed Design

Wu Yang<sup>\*①②</sup> Du Biao<sup>②</sup> Liu Xiao-meng<sup>②</sup> Jin Cheng-jin<sup>③</sup> Gan Heng-qian<sup>③</sup> Gong Shu-xi<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

<sup>②</sup>(The Joint Laboratory of Radio Astronomy Technology, Shijiazhuang 050081, China)

<sup>③</sup>(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** A method of calculating focal field is introduced, and the connection between focal field, which depends on the reflector geometry, and the aperture field of feed is analyzed. Based on focal field distribution, a design method of phased array feed, including element spacing determination, phased array scale, and excitations for expected radiation pattern is presented. Two phased array feeds are designed to realize shaped beams for an un-shaped Cassegrain antenna and shaped scanning beams for a prime-focus parabolic antenna respectively. The numerical analyses demonstrate the effectiveness of the approach.

**Key words:** Reflector antenna; Multi-beam; Focal field; Phased Array Feed (PAF)

### 1 引言

焦平面阵列馈源是放置在反射面天线焦平面附近、作为馈源使用的小型阵列天线,可分为馈源组(feeds cluster)和相控阵馈源(Phased Array Feeds, PAF)两种。前者通过在天线焦点附件放置多个馈源实现多个波束,其每个单元都是一个性能良好的馈源,各单元独立工作,通过波束切换实现扫描或多波束工作。相控阵馈源则通过波束合成网络,以适当的激励,使局部或整个阵面等效为一个馈源。因为相控阵天线具有较强的灵活性,而反射面系统是一种低成本、高增益的宽带辐射器,因此将相控阵

天线与反射面系统结合的混合天线是一种兼具二者特点的高性价比的天线形式,可用于实现反射面天线的波束赋形<sup>[1]</sup>、有限波束扫描<sup>[2]</sup>以及多波束<sup>[3-5]</sup>工作。

焦面场分析是进行馈源设计的重要方法<sup>[6]</sup>,可有效解决应用于赋形波束天线<sup>[1]</sup>、波束波导天线<sup>[7]</sup>等复杂微波光学系统中的馈源设计问题。该方法一般假设平面波沿某方向入射,通过物理光学法和绕射理论,得到其在天线焦平面激励的场分布,指导馈源的设计。

对于给定的反射面系统,可依据焦面场分布情况进行列馈源的设计。本文介绍了焦面场的计算方法,分析了焦面场与天线焦径比的关系,并建立了根据焦面场分布设计相控阵馈源的方法。

### 2 焦面场分析

馈源的设计离不开其所在的微波光学系统。一

2012-08-17 收到, 2013-02-01 改回

国家 973 计划项目(2012CB821800), 国家自然科学基金国际合作与交流项目(11261140641)和中国科学院重点部署项目(KJZD-EW-T01)资助课题

\*通信作者: 伍洋 yangwu10@163.com

般的馈源设计基于射线寻迹，根据天线形式和焦径比等主要几何参数，求得馈源的照射角，再选定照射电平，由此确定馈源的几何参数。而从焦面场分析入手的设计方法，则通过计算从空间接收的电磁波在天线焦平面形成的场分布，分析馈源的位置及其口径需要实现的场分布，进而确定馈源的参数，该方法也适用于相控阵馈源的设计。

因为接收天线一般位于发射源的远场，所以可将入射信号近似看作平面波。入射波  $\vec{H}_i$  在天线反射面的感应电流分布为

$$\vec{J}_s = \hat{n} \times 2\vec{H}_i \quad (1)$$

式中  $\hat{n}$  是反射面的法线矢量。 $\vec{J}_s$  在场点的引起的磁场为

$$\vec{H}(\vec{r}) = -\frac{1}{4\pi} \int_S \left( jk + \frac{1}{R} \right) \hat{R} \times \vec{J}_s(\vec{r}') \frac{\exp(-jkR)}{R} dS \quad (2)$$

式中  $k$  是波数， $R$  是场点到源点的距离。对前馈抛物面天线而言，当场点位于焦平面上时，式(2)对应着焦平面的场分布；对于多反射面天线，则需由式(2)求得天线在次级反射面的电流，进而得到焦平面的场分布。因为物理光学法并未考虑反射面边沿的影响，所以精确求解焦面场还需要绕射理论。

设馈源口径场为  $\vec{E}_F$ ，对应位置的焦面场分布为  $\vec{E}_R$ ，则功率传输系数可以表示为

$$\eta = \frac{\left| \iint_S (\vec{E}_F \times \vec{E}_R^*) dS \right|^2}{\iint_S |\vec{E}_F|^2 dS \iint_S |\vec{E}_R|^2 dS} \quad (3)$$

式中  $S$  是馈源与焦面场耦合的区域，\*代表共轭。当  $\vec{E}_F$  与  $\vec{E}_R$  相同时，在馈源口径内  $\eta = 1$ 。因此对于接收天线而言，为实现高的天线效率，馈源口径的场分布应与天线的焦面场相同。而天线在发射时，使馈源口径的场分布与接收时的焦面场共轭匹配可实现较高的增益。

当均匀平面波沿抛物面轴向入射时，焦平面上主极化的场分量可解析的表示为<sup>[8]</sup>

$$\vec{E}_{co} = A_0 \frac{J_1(u_0)}{u_0} \quad (4)$$

$$u_0 = kr_f \sin \theta_0 \quad (5)$$

式中  $A_0$  是与入射场强、天线的电尺寸和焦径比相关的常数， $r_f$  为焦平面上一点到焦点的距离， $\theta_0$  是反射面对馈源的半张角。广泛应用于反射面天线的波纹喇叭在平衡混合条件下的口径场为<sup>[8]</sup>

$$\vec{E}_{ap}(k_0 r) = 2 \frac{J_1(k_0 r)}{k_0 r} - J_2(k_0 r) \quad (6)$$

式(6)中第 1 项是主值场分布。由于其与焦面场同为第 1 类一阶贝塞尔函数，因而  $\eta$  较高。

### 3 焦面场与反射面焦径比

图 1 给出了 1.25 GHz 时，焦径比为 0.3 和 0.4 的抛物面天线在入射角分别为 0, 2 倍, 4 倍和 6 倍半功率波束宽度的平面波照射下焦平面的场分布。如图 1 所示，随着入射角的增大，焦面场中心逐渐远离焦点，并发生散焦。因此当馈源偏焦照射反射面时，馈源口径场与焦面场失配，导致  $\eta$  变小，天线效率下降。

直接辐射的相控阵天线一般采用移相的方式实现波束扫描，这一方法对位于焦平面的相控阵馈源并不能取得预想的效果。尽管移相可以改变相控阵馈源的辐射方向，但因其相心仍处于天线的焦点，所以并未改变天线的光路，仅是通过改变天线口径的幅度分布，略微改变了辐射方向。根据焦面场的分析，只有使等效馈源的相位中心横向偏离天线焦点，才能有效地实现反射面天线波束扫描。

由图 1 还可以看出，大焦径比抛物面天线的焦斑面积较大，因此馈源也应具有更大的口径。同时，相同角度的入射平面波激励起的焦面场距离焦点更远，但散焦程度较轻，说明增大抛物面的焦径比有利于减小偏焦造成的波束性能下降。但对于馈源组阵列而言，为保证接收功率不变，增大天线焦径比的同时也要相应增大馈源口径，这就增大了馈源的偏焦距离。因此，对于馈源组馈电的反射面天线，增大天线的焦径比对于提高偏轴波束性能的作用很小。

对于口径为  $D$  的天线，波束偏移因子 BDF<sup>[9]</sup>可表示为

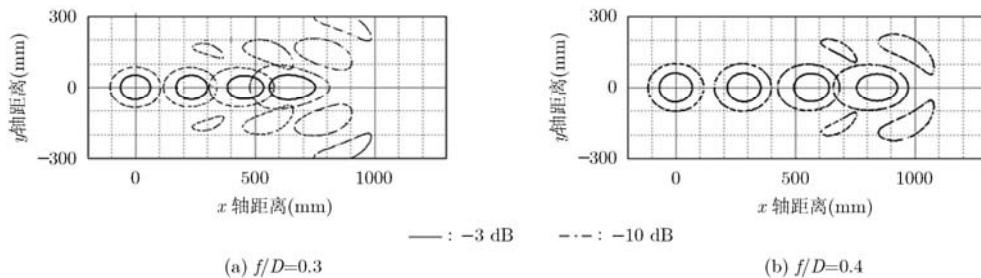


图 1 不同焦径比的反射面天线焦面场的比较

$$\text{BDF} = \frac{\theta_b}{\theta_f} = \sin^{-1} \left[ \frac{d}{f} \cdot \frac{1 + \kappa \left( \frac{D}{4f} \right)^2}{1 + \left( \frac{D}{4f} \right)^2} \right] \cdot \frac{1}{\tan^{-1} \left( \frac{d}{f} \right)} \quad (7)$$

式中  $\theta_b$  和  $\theta_f$  分别为波束偏转角和馈源偏置角,  $d$  为馈源横向偏离焦点的距离,  $f$  是天线的焦距,  $\kappa$  是与  $f$  和  $d$  相关的系数, 取值范围 0.3~0.7。由于  $d \ll f$ , 因此

$$\text{BDF} \approx \frac{1 + k [D/(4f)]^2}{1 + [D/(4f)]^2} \quad (8)$$

给定天线波束的覆盖区域或扫描角度, 根据最大角度  $\theta_{b\max}$  入射的平面波形成的焦面场分布, 就可以确定所需要的阵列大小。根据式(7), 馈源相位中心到天线焦点的最大距离

$$d_{\max} = \tan \left( \frac{\theta_{b\max}}{\text{BDF}} \right) \cdot f \quad (9)$$

## 4 相控阵馈源的设计

相控阵馈源是代替单个馈源馈电的小型相控阵天线。根据不同的应用, 阵列单元可选用一种或多种形式。一般来说, 相控阵馈源的阵元采用方向性较低的小尺寸天线, 以实现反射面的良好照射和满足小间距组阵的要求。由于指标要求不同, 阵元的选择十分多样, 此处不再详述。本节主要通过分析焦面场, 确定相控阵馈源的单元间距、阵列规模及激励系数的方法, 给出了两个算例, 并利用 GRASP9.7 进行天线方向图仿真验证。

### 4.1 阵列规模

通过计算焦面场的分布范围, 可以确定相控阵馈源的阵列尺寸。表 1 给出了图 1(a)中轴向入射波激励起的焦面场各环能量的百分比。

表1 焦面场各环能量的百分比

环数	能量比(%)	环数	能量比(%)
0	84.9	5	0.6
1	7.1	6	0.4
2	2.7	7	0.3
3	1.4	8	0.3
4	0.9	9	0.2

由表 1 可知, 焦面场能量主要集中在第 1 个零深以内的区域, 约占总能量的 85%, 而当阵列的半径大于焦面场第 3 个零点的位置时, 可截获约 95% 的能量。根据式(4), 平面波沿轴向入射时, 其焦面场的第 3 零点到焦点的距离

$$d_{3\text{null}} = 1.62\lambda / \sin\theta_0 \quad (10)$$

考虑散焦的影响, 相控阵馈源的半径应大于

$$R_{\text{paf}} \geq d_{\max} + \frac{1.62\lambda}{\sin\theta_0} \quad (11)$$

### 4.2 单元间距

馈源的辐射场决定于馈源的口径场, 为实现良好照射的方向图, 馈源的口径场应与焦面场匹配。对相控阵馈源而言, 可以利用阵列单元对焦面场进行采样, 提取出焦平面上的场分布信息, 从而还原焦面场, 实现所需的照射, 保证天线的辐射特性。焦面场是与位置相关的 2 维分布函数, 利用傅里叶变换, 可以求得其空间谱, 再根据采样定律确定最大阵元间距。图 2 给出了函数  $J_1(x)/x$  的傅里叶变换结果。

由图 2 可知, 0.35 Hz 的采样频率可实现对  $J_1(x)/x$  绝大部分频率分量的采样。由式(5), 满足焦面场采样的阵元间距应小于

$$d_s = \frac{1}{0.7\pi \sin\theta_0} \lambda \quad (12)$$

根据式(12), 当天线焦径比较大时, 相控阵馈源的阵元间距可适当增大, 这也利于减轻阵元间的互耦效应。然而, 过大的阵元间距会造成接收面积的不连续, 导致能量漏失, 天线效率降低, 因此需要综合考虑。

对于焦径比 0.35 的前馈抛物面天线,  $\theta_0 = 71^\circ$ , 由式(12)得到满足采样要求的最大阵元间距为  $0.48\lambda$ 。图 3 给出了阵列尺寸相同时, 改变阵元间距对方向图的影响。如图 3 所示, 共轭匹配激励条件下, 阵元间距为  $0.3\lambda$  时, 馈源的方向图接近理想时的情况; 当阵元间距变为  $0.5\lambda$  时, 阵列近似满足采样要求, 方向图发生少许变化; 当间距增大到  $0.6\lambda$  时, 采样条件被破坏, 方向图明显改变。因此可以按式(12)确定满足采样要求的最大阵元间距。

根据式(11), 式(12), 可以估计矩形阵列总的阵元数为

$$N \approx 19 \left[ \frac{d_{\max} \sin\theta_0}{\lambda_0} + 1.62 \right]^2 \quad (13)$$

根据以上分析, 相控阵馈源的阵列规模主要取决于扫描的角度和反射面的焦径比, 短焦距天线的焦面场分布较为集中, 但散焦严重。由于相控阵馈源能够较好地补偿偏焦引起的相差, 因此可适当选用小焦径比的反射面以减小阵列的规模。

### 4.3 馈源阵列的激励

阵列的激励是相控阵天线设计的关键之一。如果将求解相控阵馈源的激励系数视为一个寻优过程, 对于给定的方向图要求, 可将混合天线的方向图看作单个阵元照射下天线方向图的叠加, 再通过

局部或全局优化算法求解激励系数<sup>[10,11]</sup>。这些方法更多地是从数学的角度来解决问题。

共轭场匹配法则通过计算阵元所在位置的场分布确定阵列的激励，阵元的激励与其所在位置的场幅度相等，相位相反。反射面天线的方向图与天线的口径场、焦平面场紧密联系，已知三者中的任意一个，便可推得其它。且根据互易定理，天线的收发方向图相同，所对应的焦平面场分布互为共轭。因此对于给定的方向图，通过求解其对应的天线口径场，再按照天线的口径场分布对入射波的幅度进行加权，求得此时焦平面的场分布，确定阵元的激励。该方法避免了各种优化方法的反复迭代，减少了求解时间。

### 5 设计实例

波导馈电的双反射面天线常通过赋形主副反射面提高天线的性能。在笔波束应用中，相控阵馈源可通过调整激励，实现对反射面的特定照射以及在口径场的场分布，达到与赋形天线相同的辐射性能。

图 4 给出了相控阵馈源在未赋形卡式天线上实现波束最高增益的例子。天线主面电尺寸为  $270\lambda$ ，焦径比 0.32，主副面的直径比 10:1，副面的离心率 1.34。根据式(11)和式(12)，阵列半边长为  $7\lambda$ ，阵元允许最大间距  $2\lambda$ ，为避免接收面积不连续，阵元间距取  $0.7\lambda$ ，故采用  $21 \times 21$  矩形阵列。众所周之，天线口径的场均匀分布时，天线增益最高。因此令入射平面波的幅度在天线口径上均匀分布，计算出天线的焦面场后按共轭匹配法确定激励。图 4 中给出了将阵列方向图作为馈源方向图，利用 GRASP9.7 计算得到的天线方向图。作为比较，图中给出了使用 GRASP9.7 计算的喇叭馈电的未赋形及按均匀口径分布赋形的卡式天线方向图。可以看出，相控阵馈电的未赋形卡式天线方向图明显区别于喇叭馈电的未赋形卡式天线，与赋形天线十分接

近，说明相控阵馈源在未赋形卡式天线口径上实现了均匀的场分布和天线增益最高。由于激励系数可以灵活调整，因此相控阵馈电的反射面天线的辐射特性还可以根据需要，在不同的方向图之间进行切换。

相控阵馈源还能提高前馈天线的辐射特性。改型广义泰勒位移分布是卫星通信地球站天线常用的口径场函数，在满足第 1 旁瓣和远旁瓣指标要求的条件下具有较高的天线效率<sup>[8]</sup>。而前馈天线为满足等光程条件，采用抛物面形的反射面，在天线口径通常难以实现该函数分布。图 5 给出了相控阵馈源在前馈抛物面天线上实现改型广义泰勒位移口径分布的效果。反射面电尺寸  $42\lambda$ ，焦径比 0.4，根据式(11)和式(12)，阵元间距阵列半边长为  $2\lambda, 0.52\lambda$ ，故阵列采用  $9 \times 9$  矩形排布，阵元间距  $0.5\lambda$ 。为实现天线口径场为改型广义泰勒分布的方向图，计算焦面场时对平面波沿天线口径的幅度分布按目标函数进行加权，再按照共轭场匹配法对相控阵馈源进行激励。将算得的阵列方向图作为馈源方向图，利用 GRASP9.7 计算得到天线方向图。作为比较，图中给出了天线口径场为期望的改型广义泰勒分布时积分得到的方向图，以及利用 GRASP9.7 计算的喇叭馈电的天线方向图。可以看出，相控阵馈电的抛物面天线方向图与口径场积分的方向图吻合良好，体现出口径场为广义泰勒分布时天线的辐射特性。

图 6 给出了图 5 中的抛物面天线实现，1 维波束扫描时的性能。天线最大扫描角为  $8^\circ$ ，根据式(12)得到满足扫描需要的阵列半边长  $5\lambda$ ，仍取阵元间距  $0.5\lambda$ ，则相控阵馈源采用  $9 \times 21$  矩形阵列。平面沿天线口径的幅度分布按广义泰勒位移分布函数进行加权，入射角依次取为  $0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ$  和  $8^\circ$ ，各波束使用相应位置的  $9 \times 9$  矩形阵列按共轭匹配激励。图中虚线为采用喇叭在相应位置馈电时的波束。随扫描角度增加，喇叭馈电的抛物面天线方向图波束

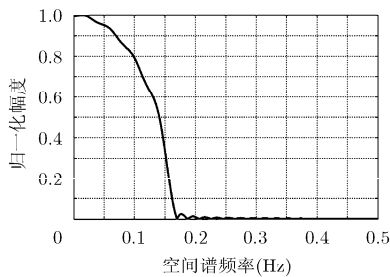


图2 函数  $J_1(x)/x$  的空间谱

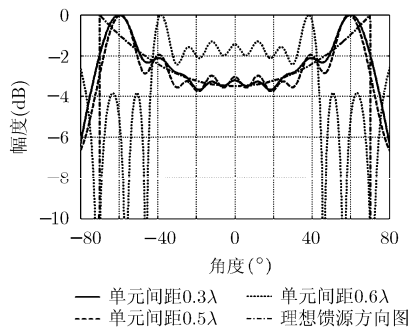


图3 阵元间距对方向图的影响

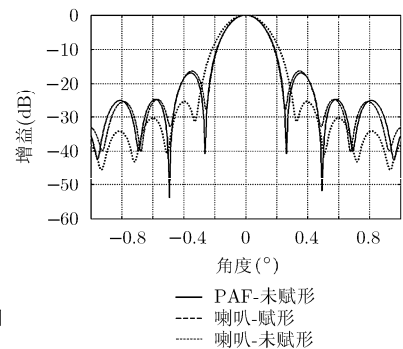


图4 卡塞格伦天线方向图的比较

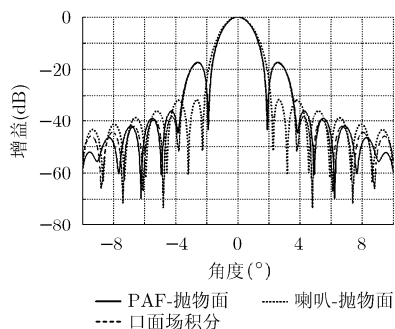


图5 相控阵馈电抛物面天线方向图

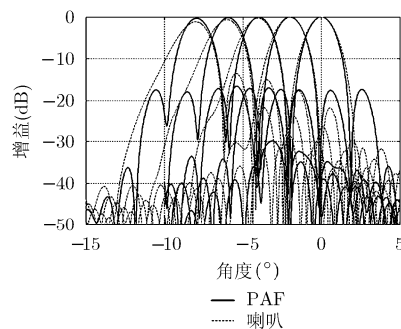


图6 天线的波束扫描性能

展宽,旁瓣升高,增益下降明显,而相控阵馈电的天线各波束的一致性很好,不同角度的波束均保持了广义泰勒分布口径场的辐射特性。说明相控阵馈源阵列截获了入射波的主要能量,同时,按照轴向波束的焦面场分布确定的阵元间距满足采样要求,使得相控阵馈源能够补偿偏焦引起的相差,较好地还原了天线的焦面场。

## 6 结论

焦面场分析是进行相控阵馈源设计的有力工具。本文采用焦面场分析的方法,从反射面天线作为接收天线的角度进行分析,通过计算入射波在天线焦平面形成的场分布,确定相控阵馈源的单元间距、阵列规模及激励系数,有效地实现了旋转对称抛物面天线和卡塞格伦天线的波束重构和扫描。

## 参考文献

- [1] Courtonne V, Dusseux T, and Brunet P. Feed cluster synthesis from focal field distribution[C]. Antennas and Propagation Society International Symposium, Toulouse, 1992, 1: 21-23.
- [2] Wang Hao, Fang Da-guang, and Chow Y L. Grating lobe reduction in a phased array of limited scanning[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, 56(6): 1581-1586.
- [3] Kildal P S, Johansson M, Hagfors T, *et al.* Analysis of a cluster feed for the Arecibo trireflector system using forward ray tracing and aperture integration[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1993, 41(8): 1019-1025.
- [4] Warnick K F, Carter D, Webb T, *et al.* Towards a high sensitivity cryogenic phased array feed antenna for the Green Bank Telescope[C]. General Assembly and Scientific Symposium, Turkey, 2011: 1-4.
- [5] Veidt B, Hovey G J, Burgess T, *et al.* Demonstration of a dual-polarized phased-array feed [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, 59(6): 2047-2057.
- [6] Clarricoats P J B and Oliver A D. Corrugated Horns for Microwave Antennas[M]. UK, Peter Peregrinus Ltd., 1984, Chapter 1.
- [7] Esquivel M S and Imbriale W A. DSS-13 S-band design optimization using the focal-plane method[C]. International Symposium on Antennas and Propagation Society, Ann Arbor, 1993, 3: 1638-1641.
- [8] 杨可忠, 章日荣, 杨智友. 现代面天线新技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1993: 2-12, 264-270.
- [9] Lo Y. On the beam deviation factor of a parabolic reflector[J]. *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, 1960, 8(3): 347-349.
- [10] Landon J, Jeffs B D, and Warnick K F. Model-based subspace projection beamforming for deep interference nulling[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(2): 1215-1228.
- [11] 刘肖萌, 高文军, 邓云凯. 有限扫描反射面天线相控波束重构技术[J]. 电子与信息学报, 2011, 34(2): 481-486.  
Liu Xiao-meng, Gao Wen-jun, and Deng Yun-kai. Beam reconfiguring technique for limited angle scanning reflector antenna with phase-only control[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 34(2): 481-486.

伍 洋: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为射电望远镜天线、卫星通信天线与馈源技术。

杜 彪: 男, 1962年生, 博士, 研究员, 硕士生导师, 研究方向为射电望远镜天线、卫星通信地球站天线、馈源系统等。

刘肖萌: 女, 1985年生, 博士, 研究方向为阵列馈电反射面天线的设计。