

有限扫描反射面天线相控波束重构技术

刘肖萌^{*①②} 高文军^① 邓云凯^①

^①(中国科学院电子学研究所航天微波遥感系统部 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 该文研究一种采用聚焦馈源阵列馈电的反射面天线, 相控阵馈源离开焦平面向反射面移动一定距离, 位于焦散区, 能够增强反射面天线的波束重构赋形能力和有限视角扫描能力。采用改进的投影矩阵法, 利用仅相位控制技术, 求解相控阵馈源的激励系数, 有效综合了聚焦馈源偏置抛物面天线的方向图。对算例的设计达到了采用仅相位控制技术控制波束指向、波束赋形、旁瓣电平性能要求, 实现了相控阵馈电偏置抛物面天线的波束重构或扫描, 并利用商用 GRASP 仿真软件验证了该文的设计结果, 说明了该文方法的有效性。

关键词: 有限视角天线; 方向图综合; 相控阵馈源; 投影矩阵法

中图分类号: TN820

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)02-0481-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00593

Beam Reconfiguring Technique for Limited Angle Scanning Reflector Antenna with Phase-only Control

Liu Xiao-meng^{①②} Gao Wen-jun^① Deng Yun-kai^①

^①(Department of Space Microwave Remote Sensing System,

Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Reflector antenna with defocused array feed is investigated. The phased array feed moves towards the reflector and locates at the defocused area, which can enhance the beam reconfiguring ability and limited angle scanning capability. Improved projection matrix algorithm is adopted to get the excitation coefficients of the feeding phased array under phase-only control constraint. A numerical analysis is carried out in order to demonstrate the effectiveness of the approach. The patterns of the offset parabolic antenna fed by defocused feed array are effectively synthesized, including scanning and reconfigurable beams. The beam direction, beam-shape and side-lobe level requirements are met under phase-only control. The design results are verified by the simulation software GRASP.

Key words: Limited-angle scanning antenna; Pattern synthesis; Phased array feed; Projection matrix algorithm

1 引言

军用或民用星载通信系统的天线大部分是高增益的有限视角扫描天线。在静止轨道通信卫星中, 阵列馈电的大型反射面天线获得了应用, 采用位于焦散区的相控阵馈源激励, 具有电控波束重构或有限视角扫描能力^[1]。处于焦平面上的馈源基本上是一个多波束系统, 因为接收能量聚集在焦平面中比较小的焦斑上, 采用开关矩阵进行电子控制以分别激励出多波束或者加权的波束簇。馈源从焦平面向反射面方向移动一定距离后, 馈源所需匹配的波前是汇聚式的, 振幅变化较小, 通过调整馈源阵列幅相

分布来进行波束扫描或重构^[2]。这种处于焦散区的馈源阵列具有二次聚焦功能, 因此把这种混合天线称为聚焦馈源反射面天线。星载阵列馈电反射面天线的主要优点是馈电网络比较简单(相对相控阵天线), 重量轻, 收拢体积小, 能够用很低的成本获得较高的增益。

针对阵列馈电反射面天线的方向图综合问题, 常用的方法有: 共轭场匹配法、最优方向性系数法、共轭梯度法、仅相位梯度法、奇异值分解法、量子粒子群算法^[3-5]。利用这些方法设计的阵列馈源能够提高反射面天线波束的电扫能力, 然而, 馈源激励的幅度分布和相位分布均需调整。这样, 发射波束时必须采用数字衰减器对阵列单元激励幅度进行控制, 分配到阵列单元的能量没有全部辐射出去,

2011-06-15 收到, 2011-09-01 改回

国家重点实验室基金(9140C1902020903)资助课题

*通信作者: 刘肖萌 sdhzhxm@yahoo.com.cn

部分能量变成了热耗,特别是在星载合成孔径雷达(SAR)系统大功率发射时,天线必须采取散热措施,既增加了天线的控制、结构等的复杂程度,又降低了天线的发射效率。

采用只改变馈电相位分布的仅相位加权方法可使其不改变原有功率分配馈电网络和不增加新设备的情况下,利用计算机控制移相器值的改变实现波束赋形,是非常经济而且可行的方法。对于有源阵列,希望大功率发射放大器保持在饱和状态,因此发射波束赋形时,希望使用仅相位加权来保持孔径利用效率。

本文基于投影矩阵法^[6],实现仅相位控制的聚焦馈源偏置抛物面天线的方向图综合。在对馈源相位分布迭代求解中,采用改进的投影矩阵法^[7]。文献^[6]中使用增益方向图作为目标,由于增益为估计值,导致目标方向图不准确,并且不易实现方向图形状的控制。本文将迭代得到的远场方向图归一化,避免了增益估计值的影响,加强了对方向图形状的约束,特别适合主波束赋形和局部副瓣区域的电平抑制。对L波段聚焦馈源反射面天线设计表明,利用移相器控制馈源阵列相位分布,能够实现多种波束赋形和有限视角波束灵活扫描。

2 问题描述和数学模型

已知抛物反射面、馈电阵列的几何结构,以及对波束的指标要求,求解馈源阵列各单元的幅度和相位激励系数。在仅相位控制的要求下,馈源阵列各单元的幅度激励系数固定,通过调整其相位激励来综合出多组不同的波束。在天线的远场选取观察点,并根据对波束的指标要求来定义波束的上下界掩模(mask),优化馈电阵列相位激励系数,使天线方向图在掩模限定的范围内赋形。

阵列馈源激励的反射面天线的辐射场可以写成由单个单元激励的辐射场的叠加,而每个单元激励的远场辐射方向图由计算物理光学辐射积分得到。本节首先介绍由任意位置馈电单元激励的偏置抛物面天线的物理光学辐射积分式,然后建立求解相控阵激励系数的数学模型。

2.1 馈电单元激励的偏置抛物面天线辐射场的计算

偏置抛物面天线的结构如图1所示。抛物面天线的直径为 D ,焦距为 f ,偏置距离为 H ,馈源阵列中心指向与旋转抛物面轴线的夹角为 θ_{h0} 。馈源阵列沿 z_h 朝抛物面平移一定距离。天线辐射场的计算涉及到5个坐标系^[8],如图1中显示,有旋转对称抛物面坐标系 $\{m\}$,偏置抛物面坐标系 $\{p\}$,馈源阵列坐标系 $\{h\}$,单馈源坐标系 $\{r\}$,观察点坐标系 $\{X,Y,Z\}$ 。

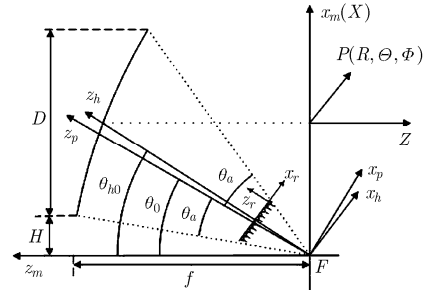


图1 偏置抛物面天线的结构示意图

基于物理光学法,图1所示抛物面天线的辐射场^[8]为

$$\mathbf{E}(R, \Theta, \Phi) = \mathbf{F} - (\mathbf{F} \cdot \mathbf{R})\mathbf{R} \quad (1)$$

$$\mathbf{F} = \frac{-jk\eta}{4\pi R} e^{-jkR} \iint \mathbf{J}_s(r) e^{jk\rho \cdot \mathbf{R}} dS$$

其中 k 和 η 分别为自由空间中的波数及波阻抗, \mathbf{R} 为观察点处的单位矢量, ρ 为馈源的位置矢量。表面感应电流密度 $\mathbf{J}_s(r)$ 为

$$\mathbf{J}_s = \begin{cases} 2(\mathbf{n} \times \mathbf{H}_i), & \text{照射面} \\ 0, & \text{阴影面} \end{cases} \quad (2)$$

其中 \mathbf{n} 为抛物面天线的表面法向单位矢量, \mathbf{H}_i 为入射磁场。

本文中,馈电单元采用 x 向线极化的理想点源,其增益方向图函数为

$$D_{\theta_r}(\theta_r) = D_{\varphi_r}(\theta_r) = C \cos^b(\theta_r/2) \quad (3)$$

其中 C 为常量^[9],根据馈源照射在反射面边缘的锥削量来选定系数 b ^[10]。

在实际馈源阵列中,采用馈电单元的有源方向图计算,即可计及单元互耦等效应。

2.2 数学模型及求解

将馈电单元激励下抛物面天线的方向图加权叠加,可得到馈源阵列激励的抛物面天线方向图,即

$$E(u, v) = \sum_{n=1}^N A_n E_n(u, v) \quad (4)$$

其中 $u = \sin(\Theta) \cos(\Phi)$, $v = \sin(\Theta) \sin(\Phi)$, Θ 和 Φ 为观察点坐标系下的球坐标分量。 A_n 为第 n 个单元的复数激励系数。 $E_n(u, v)$ 为第 n 个馈源激励下抛物面天线的方向图。选取 M 个远区辐射场观察点,得到 M 个方程,其矩阵形式如下:

$$\mathbf{F}_d = \mathbf{T}\mathbf{A} \quad (5a)$$

$$\begin{bmatrix} F_{d1} \\ F_{d2} \\ \vdots \\ F_{dM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \cdots & T_{1N} \\ T_{21} & T_{22} & \cdots & T_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{M1} & T_{M2} & \cdots & T_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_N \end{bmatrix} \quad (5b)$$

其中 F_d 为期望方向图, $T_{mm}=E_n(u_m, v_m)$, $m=1, 2, \dots$, $M(M \geq N)$ 。

实际上, 由 M 个远场点约束方程一般不能给出馈电阵列激励系数的准确解, 但是在最小二乘意义下, 可求解出式(5)表示的超定方程的最优解。在最小二乘意义下, 误差矢量 $(F_d - TA)$ 与 T 矩阵的列空间正交, 即满足方程

$$T^H(F_d - TA) = [0] \quad (6)$$

通过求解式(6)可得到馈源阵列的激励系数 A 如下:

$$A = (T^H T)^{-1} T^H F_d \quad (7)$$

投影矩阵 P 定义为 $P = T(T^H T)^{-1} T^H$, 由式(7)得到的 A 是方程 $TA = PF_d$ 的准确解, 是式(5)的最优解^[6]。

一般只给定期望方向图的幅度值, 经过式(7)一步运算并不能得到较准确的结果, 因此通过迭代过程来近似估计远场方向图的相位分布, 然后逐步逼近较精确的解。

首先给出试探激励系数 $A^{(1)}$, 并根据输入功率将其归一化。然后将它代入式(5), 求出相应的远场 $F^{(1)}$ 。显然 $F^{(1)}$ 与 F_d 不相同, 算出误差方向图, 并按照改进的投影矩阵法^[7]赋值如下:

$$\Delta F = \max F(|{}_n F| - P_M\{|{}_n F|\}) (F / |F|) \quad (8a)$$

$$P_M\{|{}_n F|\} = \begin{cases} M_U, & |{}_n F| > M_U \\ |{}_n F|, & M_L \leq |{}_n F| \leq M_U \\ M_L, & |{}_n F| < M_L \end{cases} \quad (8b)$$

其中 $\max F$ 为当前辐射场的最大值, ${}_n F$ 是归一化的辐射场方向图。 $P_M\{|{}_n F|\}$ 是由掩模定义的投影算子, M_U 是期望方向图的上界掩模, M_L 是期望方向图的下界掩模。

根据投影矩阵理论, 可求得增量激励系数矩阵为

$$\Delta A = (T^H T)^{-1} T^H \Delta F \quad (9)$$

在得到增量激励系数后, 更新激励系数矩阵 A , 即

$$A_{\text{temp}} = A^{(i)} + C_1 \Delta A \quad (10a)$$

$$\Delta \varphi = \text{Re}\{-j(A_{\text{temp}} / A^{(n)} - 1)\} \quad (10b)$$

$$A^{(n+1)} = A^{(n)} e^{j\Delta \varphi} \quad (10c)$$

其中 C_1 为步长。

按照上述过程反复迭代, 直至达到满足精度的方向图或者最大迭代步数(例如 3000 步)。投影矩阵法的流程如图 2 所示。

文献[6]采用投影矩阵法对相控阵天线波束进行综合, 通过合理选择观察点角度取值范围和角度间

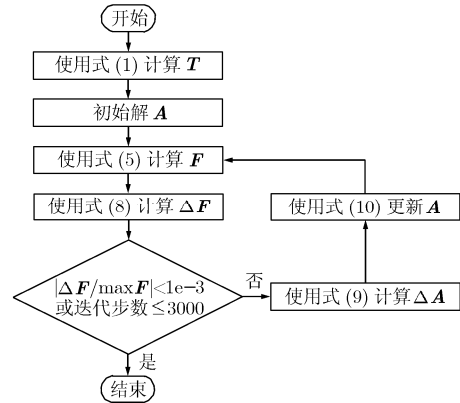


图 2 投影矩阵算法流程图

隔能够保证算法的收敛性。其中, 观察角度范围必须大于各单元的波束宽度, 角度间隔必须小于相控阵全口径均匀分布的波束宽度。

沿用上述法则, 本文对于阵列馈电的反射面天线的波束综合问题, 目标方向图的观察点角度取值范围必须覆盖全部单个馈源单元激励下天线的主波束范围, 而观察点的角度间隔应小于反射面全口径均匀分布的波束宽度。这种观察点角度取值范围和角度间隔的选取能够保证本文算法的收敛性, 而对初始值的选取不加限制。在本文对聚焦馈源抛物面天线的方向图综合中, 馈源阵列的初始相位激励系数都取为 0。

为了更好地达到期望方向图的指标, 需要对上下界掩模、方向图加权因子等仔细设定。根据作者经验, 经几次对主波束附近的掩模形状试探后, 能够选取适当的波束中心点、主波束宽度、临界区角度范围等。副瓣区内的掩模形状可以直接根据期望方向图的副瓣要求设定。如果强调在特定区域内掩模对波束的约束作用, 可在该区域采用适当的加权。

3 数值算例

根据本文方法编制了阵列馈电偏置抛物面天线方向图综合的程序, 对偏置抛物面天线的方向图进行优化设计。得到馈源相位分布后, 利用 GRASP 软件进行天线方向图仿真验证。

聚焦馈源偏置抛物面天线的参数: 偏置抛物面天线直径 $D=20$ m, 偏置距离 $H=4$ m, 焦距 $f=12$ m, 工作的中心频率为 1.25 GHz。馈电阵列为 16×10 单元的平面阵, 沿 z_h 从焦平面向反射面方向移动 3 m, 馈源坐标系 z_h 轴偏角 θ_{h0} 为 60.51° , 单个馈源在反射面边缘的照射锥削为 -10 dB。

基于该天线结构, 馈源阵列的幅度分布采用固定的泰勒加权, 仅通过优化相位分布来实现波束赋形或波束扫描。首先根据合成孔径雷达(SAR)系统

的需求, 形成余割平方波束(算例 1)和扫描波束(算例 2), 然后根据星载通信系统的需求, 形成特殊等高线图形波束, 如三角形或中国版图的赋形波束。

算例 1 期望在 E 面(XOZ 面)为余割平方波束形状, 在 H 面(YOZ 面)波束宽度为 1.6° 的方向图。综合出的余割平方 E 面方向图如图 3(a)所示。作为比较, 当所有馈电单元都为同相分布时, 偏置抛

物面天线的 E 面方向图如图 3(b)所示。图 3 中 M_U , M_L 分别为期望方向图的上界掩模和下界掩模。图中给出了 Grasp 软件的仿真曲线, 与本文计算曲线一致, 验证了本文方法。

馈源阵列幅度激励分布如图 4(a)所示, 采用本文方法优化得到的与余割平方波束对应的相位激励分布如图 4(b)所示。

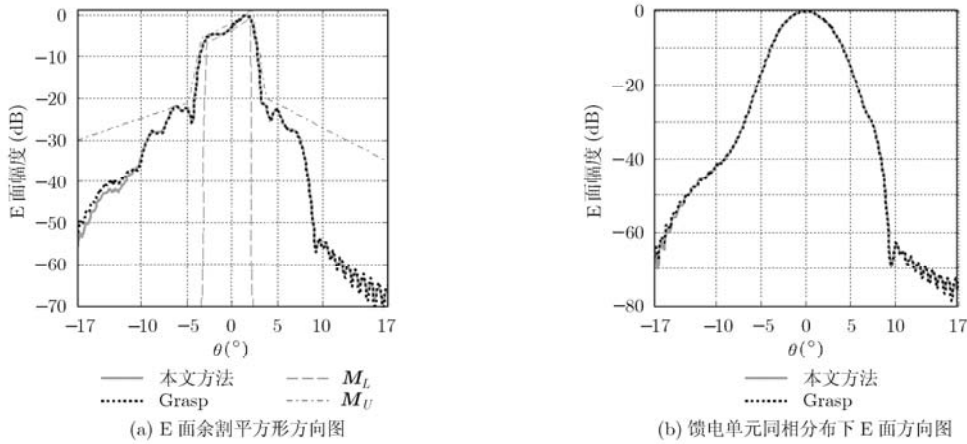


图 3 E 面方向图

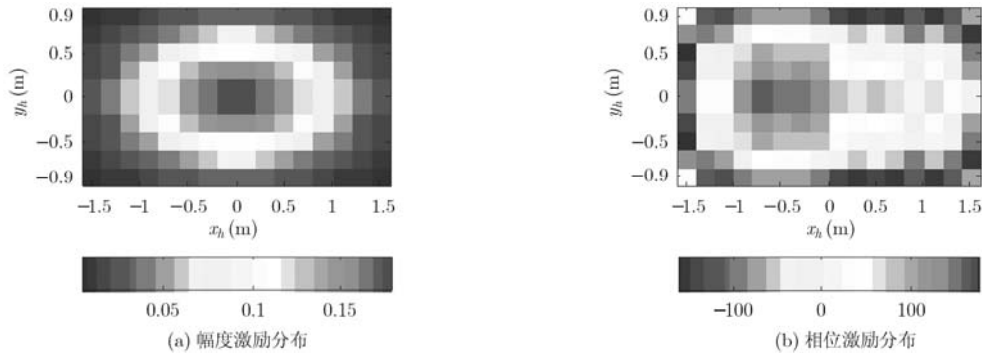


图 4 E 面余割平方波束的激励分布

算例 2 参照焦点处的单馈源激励下偏置抛物面天线的主面波束宽度为 0.8° , 期望在 E 面得到二倍展宽的扫描波束, 在 H 面为中心指向。综合了 8 组在 E 面不同扫描位置处的方向图, 两主面内波束宽度都为 1.6° 。综合出的 E 面归一化方向图如图 5 所示。8 组波束的增益、E 面波束宽度、波束中心指向和副瓣电平如表 1 所示。

算例 3 根据星载通信系统的需求, 期望得到为特殊形状的赋形波束, 首先综合了三角形的波束, 其等高线方向图和相位激励分布如图 6 所示。之后, 综合得到了形状为中国版图的赋形波束, 其等高线方向图和相位激励分布如图 7 所示。在图 6 和图 7 的方向图中, 同时显示了相应期望方向图的下界掩模形状。

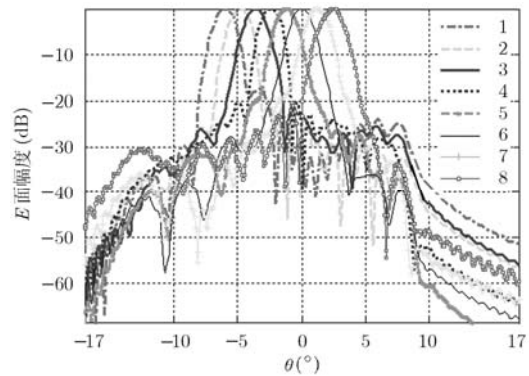


图 5 扫描波束的 E 面方向图

基于特定的阵列馈电偏置抛物面天线结构, 利用改进的投影矩阵法求解相控阵馈源的相位激励系

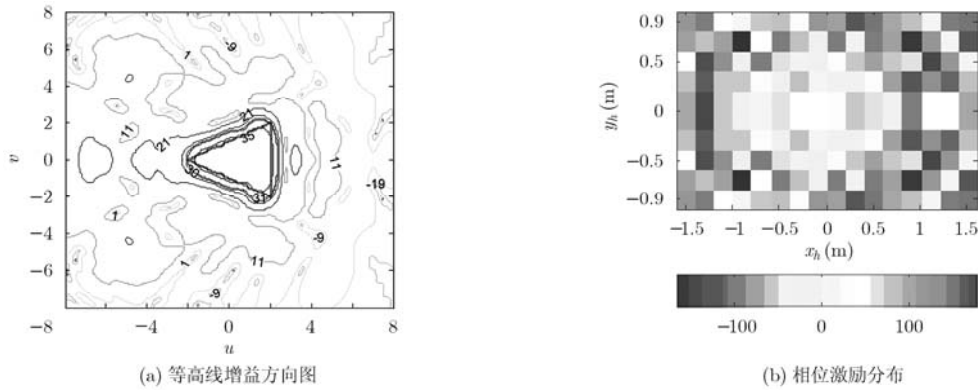


图 6 三角形的等高线增益方向图和相位激励分布

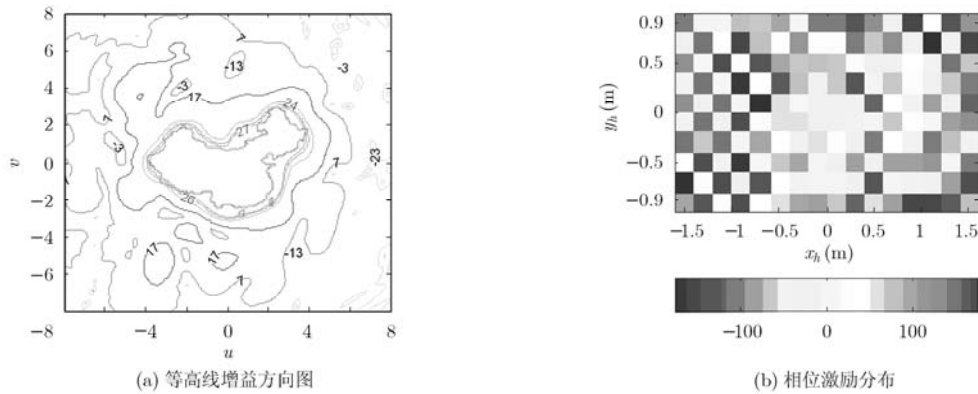


图 7 中国地图形状的等高线增益方向图和相位激励分布

表 1 扫描波束的 E 面方向图性能参数

波束	波束宽度 (°)	增益(dB)	波束中心 (°)	副瓣电平 (dB)
1	1.6	40.48	-6.01	-17.53
2	1.61	42.21	-4.82	-20.67
3	1.61	43	-3.63	-21.91
4	1.6	44.42	-2.4	-20.24
5	1.6	45.05	-1.19	-26.58
6	1.6	45.21	0.031	-27.84
7	1.61	44.84	1.237	-27.06
8	1.61	43.82	2.416	-20.54

数，综合了多组满足不同指标要求的波束，其中包括多组扫描波束、E 面余割平方形的波束和特殊的赋形波束。由于实例计算基于特定的天线结构，所得到的有限视角扫描波束的增益有波动，且在大扫描角处的波束增益降低较多，如表 1 中的波束 1。可进一步通过调整馈源阵列的前移距离、馈源单元数目及间隔、反射面的表面形状来弥补这一不足，后续工作将在这些方面展开。

与馈源阵列放置在焦平面上的多波束天线相比，本文采用的聚焦馈源反射面天线可实现波束的二次聚焦，波束扫描或重构更具灵活性。前者的多

波束局限于有限个离散角度位置上的具有特定形状的波束^[2]，而聚焦馈源反射面天线能够在扫描视域内所有角度上连续地扫描，同时还可以实现赋形波束等。通过相控阵馈源的相位调整，既能优化反射面天线扫描波束的形状，也能补偿反射面的热变形^[11]。

4 结论

在仅相位控制的约束下，本文采用改进的投影矩阵算法求解了位于焦散区的馈源阵列的相位激励系数，有效地综合了相控阵馈电的偏置抛物面天线的多组方向图，实现了波束重构和扫描。

将馈源阵列从焦平面向反射面方向移动一定距离，通过调整馈源阵列各单元的激励系数，使其等效为焦平面上的一个或多个虚拟馈源，实现二次聚焦作用。使用这种聚焦馈源反射面天线，能够灵活实现有限视角范围内的多组笔状或扇形波束、连续扫描波束，以及赋形波束等。聚焦馈源反射面天线必将成为星载通信系统和合成孔径雷达系统等的优选天线方案。

参考文献

[1] Tokunaga K, Tsunoda H, Matsumoto Y, et al. Electric design and prototype development of phased array feed for

- onboard reflector antennas[J]. *Electronics and Communications in Japan (Part I: Communications)*, 2001, 84(6): 22–31.
- [2] 高文军, 刘肖萌. 采用最小二乘法综合旋转对称抛物面天线方向图[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2011, (1): 35–39. Gao Wen-jun and Liu Xiao-meng. Synthesis of array-fed parabolic antenna patterns using least-squares method[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2011, (1): 35–39.
- [3] Hayman D B, Bird T S, Esselle K P, *et al.* Experimental demonstration of focal plane array beamforming in a prototype radiotelescope[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(6): 1922–1934.
- [4] Tanaka S, Yamada T, Murata T, *et al.* A study on pattern synthesis method for array-fed reflector antenna for advanced direct broadcasting satellites[C]. *Antennas and Propagation Society International Symposium*, Boston, MA, 2001: 566–569.
- [5] Shi Wei, Zhang Quan-sheng, and Du Hui. Quantum particle swarm optimization for integer programming of phased array feeds[C]. *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology*, Chengdu, China, May 8–11, 2010: 1386–1389.
- [6] Bhattacharyya A K. Projection matrix method for shaped beam synthesis in phased arrays and reflectors [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55(3): 675–683.
- [7] Liu Xiao-meng, Gao Wen-jun, Deng Yun-kai, *et al.* Integrated beam synthesis technique of phased array antenna for variable look-angle SAR[C]. *The 9th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory*, Guangzhou, China, Nov. 29–Dec. 2, 2010: 536–539.
- [8] 杨可忠, 杨智友, 章日荣. 现代面天线新技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1993: 79–93. Yang Ke-zhong, Yang Zhi-you, and Zhang Ri-rong. *New Techniques of Modern Reflector Antenna*[M]. Beijing: People's Posts & Communications Publishing House, 1993: 79–93.
- [9] 白雪. 混合天线基于实数编码遗传算法的方向图优化[D]. [硕士学位论文], 西安电子科技大学, 2010. Bai Xue. RGA-based pattern optimization for hybrid antennas[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2010.
- [10] Milligan T A. *Modern Antenna Design*[M]. Second Edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2005: 385–387.
- [11] Bahadori K and Samii Y R. An array-compensated spherical reflector antenna for a very large number of scanned beams[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2005, 53(11): 3547–3555.
- 刘肖萌: 女, 1985年生, 博士生, 研究方向为阵列馈电反射面天线的设计.
- 高文军: 男, 1973年生, 副研究员, 硕士生导师, 从事天线及馈线方面的研究工作.
- 邓云凯: 男, 1962年生, 研究员, 博士生导师, 研究领域为星载合成孔径雷达系统设计与工程实现.