

低旁瓣反射面天线设计

刘胜文^{1,2}, 王超¹

(1. 中国电子科技集团公司第54研究所, 石家庄 050081;

2. 河北省射电天文技术重点实验室, 石家庄 050081)

摘要: 反射面天线设计在追求高增益的同时, 往往也要求天线具有较低的旁瓣水平, 以防止对其他系统产生干扰; 通过分析不同天线形式反射面天线旁瓣的影响因素, 研究了低旁瓣反射面天线设计时参数选取原则和方法, 总结了低旁瓣反射面天线的设计方法; 给出了一个实际工程应用的超低旁瓣双偏置反射面天线的设计实例和性能仿真计算, 天线仿真的口径效率优于 59%, 旁瓣优于 -40 dB, 验证了分析与设计方法的正确性, 该方法可用于指导低旁瓣反射面天线的工程设计。

关键词: 低旁瓣; 反射面天线; 焦距比; 口面场分布; 双偏置反射面天线

Low Side Lobe Reflector Antenna Design

LIU Shengwen^{1,2}, WANG Chao¹(1. The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China;

2. Hebei Key Laboratory of Radio Astronomy Technology, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: In the design of reflector antenna, while pursuing high gain of antennas, it is often required to have a low side lobe to prevent the interference to other systems. By analyzing the influence factors of the antenna side lobe of different antenna forms, the parameter selection principle and method in a low side lobe reflector antenna design are studied, and the design method of the low side lobe reflector antenna is summarized, which accomplishes the design example and performance simulation calculation of an ultra-low side lobe dual-offset reflector antenna for practical engineering applications. This simulation results show that the aperture efficiency of the antenna is better than 59%, and the side lobe is better than -40 dB, which verifies the correctness of the analysis and design method. The method can be used to guide the engineering design of the low side lobe reflector antenna.

Keywords: low side lobe; reflector antenna; focal diameter ratio; aperture field distribution; dual-offset reflector antenna

0 引言

随着雷达、卫星通信、射电天文等领域的飞速发展, 对高增益、低旁瓣天线的需求日益增加, 高增益可以有效提高系统性能, 然而较低的旁瓣水平才能保证系统有效运行, 越低的旁瓣就代表着对其他系统的影响越小, 尤其是现在多系统的综合运用背景下, 天线的低旁瓣技术越来越受到重视。其中卫星通信一般要求第一旁瓣低于 -14 dB, 射电天文一般要求第一旁瓣低于 -20 dB, 而雷达及其他特殊领域往往要求天线具有更低的旁瓣往往低于 -28 dB^[1-4]。因此如何设计兼具高增益和低旁瓣的天线近些年来受到了广泛关注。常见的高增益、低旁瓣天线有相控阵天线^[5]、反射面天线^[6]和介质透镜天线^[7]三种, 相控阵天线具有较好的旁瓣水平而其价格较为昂贵, 限制了其广泛应用; 介质透镜天线与同增益下的反射面天线相比, 体积重量较大, 在很多应用中也存在一定限制; 反射面天线价格低廉, 并且可以通过合理设计以及反射面天线赋形技术实现低旁瓣设计, 在很多系统中有广泛地应用。

本文通过分析前馈抛物面天线、后馈双反射面天线以及双偏置反射面天线三种形式天线旁瓣的主要影响因素,

研究了低旁瓣反射面天线设计时参数选取原则和方法, 总结了低旁瓣反射面天线的设计方法, 并给出了一个实际工程应用的设计实例和性能分析, 验证了本文的分析与设计方法的正确性, 为低旁瓣反射面天线的设计提供了理论依据。

1 天线旁瓣影响因素分析

1.1 单反射面天线

反射面天线是高增益口径天线的主要代表形式之一, 其原理是将馈源辐射的球面波, 通过反射面的反射形成平面波, 向自由空间辐射, 以此来实现电磁信号的收发。旋转抛物面天线是最常用的天线型式, 按照反射面的数量主要分为单反射面天线和双反面天线; 按照结构的对称性又可分为对称反射面天线和非对称反射面天线(偏置天线)。

单反射面天线(前馈抛物面天线)由馈源和抛物面两部分组成, 如图 1 所示。馈源常采用喇叭馈源, 其辐射场的等效相位中心位于 F 点, 即抛物面的焦点。由抛物面的几何特性和反射定律可知, 由馈源喇叭发出的球面波经过抛物面反射后, 形成沿 Z 轴方向辐射的平面波。前馈抛物面天线结构简单, 设计方便, 馈源尺寸较小, 遮挡较小,

收稿日期: 2023-02-16; 修回日期: 2023-02-23。

作者简介: 刘胜文(1988-), 男, 黑龙江伊春人, 硕士, 工程师, 主要从事反射面天线和馈源设计方向的研究。

引用格式: 刘胜文, 王超. 低旁瓣反射面天线设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(6): 246-251.

虽然天线效率普遍不高, 但是更小的口面遮挡有利于低旁瓣设计。

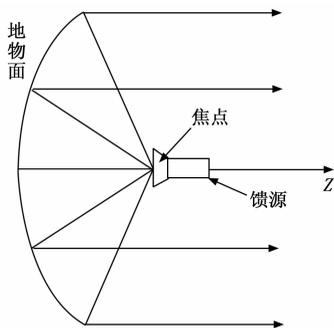


图 1 单反射面天线

单反射面天线的旁瓣主要是由口面场分布决定的, 而前馈抛物面天线是最简单的反射面天线形式, 仅由高效率馈源和抛物面两部分组成, 馈源放置在抛物面焦点处, 利用抛物面几何特性实现电磁辐射, 其口面场分布因此仅决定于馈源的口面场分布。为了实现高效率的辐射, 前馈抛物面天线的馈源一般采用类高斯波束辐射, 因此前馈抛物面天线的旁瓣主要取决于类高斯波束馈源照射时主面边缘的照射电平, 因此需要重点研究不同焦径比、不同边缘的照射电平下的前馈抛物面天线的旁瓣特性。

利用 GRASP 软件^[8], 建立前馈抛物面天线的仿真模型, 天线电尺寸为 40λ , 焦径比 (F/D) 分别为 0.5、0.6、0.7, 边缘照射电平取 $-5\sim-25$ dB, 计算得到天线辐射方向图, 研究其与口径效率、第一旁瓣的关系, 如图 2 所示。

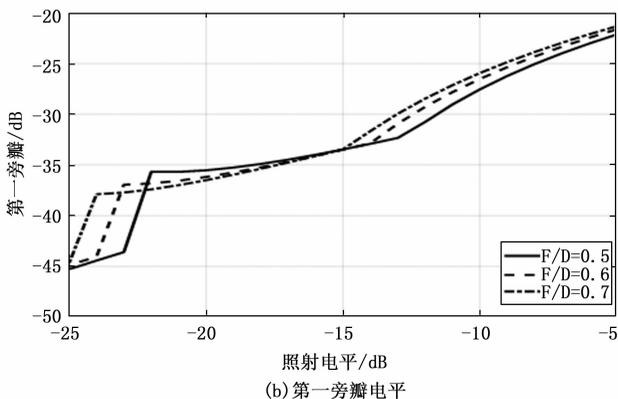
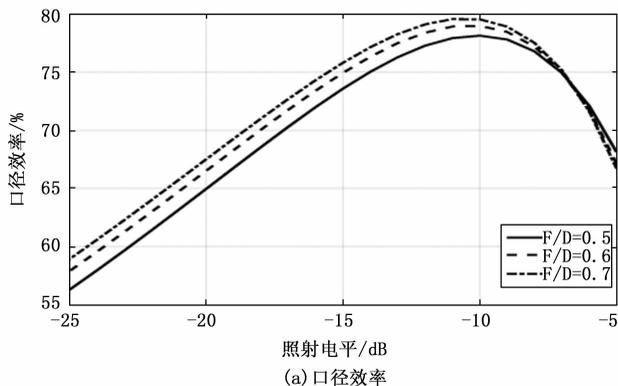


图 2 不同焦径比天线辐射性能随边缘照射电平的变化

由图 2 可以看出, 不同焦径比的前馈抛物面天线规律基本一致, 旁瓣随边缘照射电平降低而降低, 效率也随之降低, 此外, 当照射电平小于 -20 dB 以下, 第一旁瓣发生骤降, 那是因为天线方向图前几个旁瓣发生了融合, 并非真正意义上的旁瓣下降, 因此, 前馈抛物面天线低旁瓣设计时, 照射电平取 $-10\sim-15$ dB 之间, 天线仿真旁瓣在 -25 dB 左右, 考虑到实际工程误差, 天线最终旁瓣也可保证在 -20 dB 以下, 此时天线仍能保证较高的增益; 若想进一步降低旁瓣就需要照射电平取 -20 dB 附近, 此时天线效率有较明显的下降, 仿真旁瓣在 -30 dB 以下, 考虑到实际工程误差, 天线最终旁瓣也可保证在 -28 dB 以下。

1.2 双反射面天线

单反射面天线存在截获效率和照射效率之间的矛盾, 截获效率高意味着更低照射电平的照射, 而照射效率高则要求更平坦的照射, 在单反射面天线设计中就是选取合适的馈源照射电平以平衡两者矛盾, 由于单反射面天线设计自由度不足, 天线效率也普遍较低, 一般在 $50\%\sim55\%$ 之间, 其中最主要原因就是单反射面天线不能通过反射面赋形等技术实现天线的口面场分布的灵活控制, 于是在单反射面天线的基础上, 又发展出了双反射面天线。

双反射面天线由馈源、副反射面和主反射面组成。由于副反射面的引入, 双反射面天线的设计有较大的灵活性。

与单反射面天线相比, 双反射面天线有以下优点:

1) 由于引入了副反射面, 控制主反射面的照射能量又增加了一个可变因素, 天线设计自由度变大, 可通过对主副反射面形状的控制, 改变天线口面场的幅度与相位分布, 从而实现所需要的辐射场, 即解决了截获效率和照射效率之间的矛盾。一般情况下, 口面场的相位为同相分布, 可实现更高的天线效率。

2) 馈源由前馈式馈电变为后馈式馈电, 缩短了馈线长度, 减少了馈线损耗所引入的噪声, 同时馈源安装空间变大, 因此可使用更复杂的馈源网络系统, 如双频或三频等多频共用馈源系统。

3) 可以采用短焦距抛物面作为主反射面, 减小了天线的纵向尺寸。

4) 馈源的漏失能量指向空间, 从而降低了天线的噪声温度。

双反射面天线相较于单反射面天线形式更为复杂, 影响旁瓣的因素不仅有口面场的因素, 也和副反射面遮挡大小相关, 副反射面会形成与主反射面相反辐射方向的负场, 由于副反射面的尺寸远小于主反射面, 因此该负场对天线辐射方向图的主瓣影响较小, 而对旁瓣影响较大, 此外, 由于副反射面的引入, 双反射面天线的设计有较大的灵活性, 并且可通过反射面赋形技术实现较高增益和更低旁瓣的设计。双反射面天线主要包括卡塞格伦、格里高利和环焦三种天线型式, 但是其研究和分析方法都是一致的, 本文采用卡塞格伦天线为例进行分析研究。

卡塞格伦天线的副反射面是双曲面的一部分, 其几何

示意图如图 3 所示。双曲面（副反射面）的轴线与抛物面（主反射面）的轴线和馈源的轴线 Z 轴重合，其一个焦点与馈源相位中心 F_1 重合，另一个焦点 F_2 与抛物面的焦点重合。 F_1 和 F_2 分别称为天线的实焦点（第二焦点）和虚焦点（第一焦点）。根据双曲面的几何特性，由 F_1 发出的入射波经双曲面和抛物面依次反射后到达抛物面口径面上的光程都相等。因此，相心在 F_1 点的馈源发出的球面波经副反射面和主反射面反射后形成沿 Z 轴方向辐射的平面波，即产生高增益的定向辐射波束。

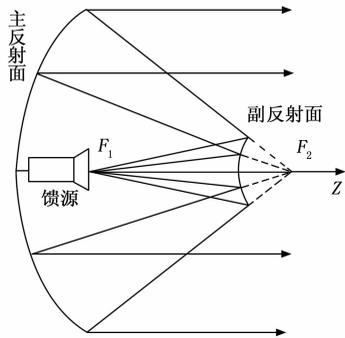


图 3 卡塞格伦天线

首先，分析不同副面大小对天线旁瓣的影响，令副面口径为 D_s ，主面口径为 D ，利用 GRASP 软件，建立卡塞格伦天线的仿真模型，天线电尺寸为 80λ ，计算副面口径与主面口径之比 (D_s/D) 为 0.1、0.15、0.2 时的天线辐射方向图，研究其与第一旁瓣的关系，如图 4 所示。

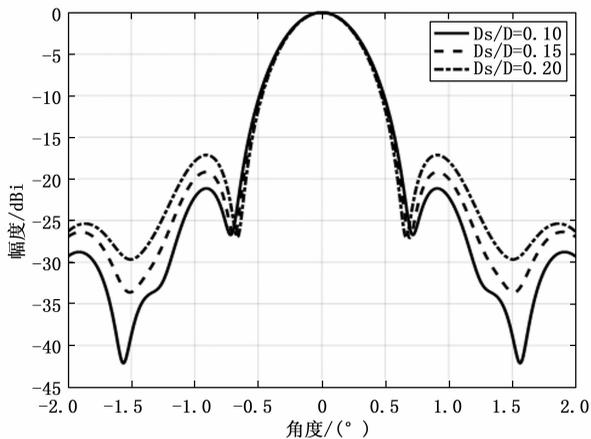


图 4 不同 D_s/D 天线辐射方向图的变化

由图 4 可以看出，副面尺寸增加会带来天线旁瓣的抬升， D_s/D 由 0.1 上升到 0.2，天线旁瓣由 -21.14 dB 抬升至 -17.13 dB，上升了 4 dB，因此在双反射面天线低旁瓣设计时， D_s/D 不应大于 0.1，同时，副面尺寸也不宜过小，过小的副面会增加副面绕射，使第一旁瓣的抬升，副面口径通常应大于 7λ ^[9]。

其次，分析不同口面场分布对天线旁瓣的影响，分别利用均匀分布、泰勒位移分布以及双指数分布对双反射面天线进行赋形设计，此时 D_s/D 取 0.1，再利用 GRASP 软

件计算其远场方向图，如图 5 所示。

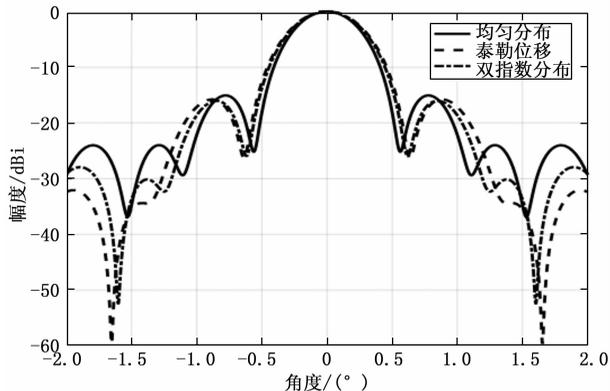


图 5 不同口面场分布的天线辐射性能

由图 5 可以看出，不同口面场分布对旁瓣影响较大。均匀分布，天线波束宽度最窄，效率最高，旁瓣最差为 -16.8 dB；泰勒位移分布和双指数分布，天线效率略有下降，但是第一旁瓣有所降低，均在 -18 dB 附近，因此，可以通过优化口面场分布函数去实现低旁瓣设计，旁瓣水平应与前馈抛物面天线类似。双反射面天线由于副面遮挡的存在，该天线形式很难实现超低的旁瓣，由仿真结果可知，仿真得到的第一旁瓣应该在 $-22 \sim -25$ dB 左右。

1.3 双偏置天线

双偏置反射面天线的两种型式是卡塞格伦型和格里高利型。前者的副反射面是双曲面的一部分，后者的副反射面是椭球面的一部分，两者的主反射面都是抛物面的一部分。格里高利型双偏置天线容易实现紧凑的结构，且由于其馈源和副反射面之间有较大空间，易于实现馈源的远场照射，同时可在后馈焦点放置多个馈源，还可在前馈焦点处放置馈源，实现多频段的工作^[10]。因此，双偏置格里高利天线的使用更为广泛。双偏置反射面天线相比于前两种反射面天线型式^[11]，避免副面的遮挡引起的旁瓣抬升，也可以通过反射面赋形去实现高增益和低旁瓣的最佳化设计，是超低旁瓣的最优选择之一，但是其同时也因为过多地引入了不对称性因素，造成天线结构设计难度和成本方面的上升。

由单反射面天线和双反射面的研究分析可知，双偏置反射面天线不存在副面和馈源的遮挡，其旁瓣特性主要取决于口面场分布函数^[13]，因此，可假定赋形双偏置天线口面场分布函数为 $f(x) = ax^5 + bx^4 + cx^3 + dx^2 + fx + e$ ，通过改进遗传算法 (GA)^[12] 优化口面场分布函数的系数，可实现天线低旁瓣的设计，改进遗传算法的流程如图 6 所示。

口面场分布函数的系数优化的数学模型如式 (1) 所示，以天线效率最优为优化目标，以天线旁瓣低于 -40 dB 为约束条件，优化双偏置反射面天线口面场分布函数的系数。

$$\begin{aligned} \max G &= \frac{2}{\int_0^\pi F(\theta) \sin\theta d\theta} \\ \text{s. t. } SLL &\leq -40 \text{ dB} \end{aligned} \quad (1)$$

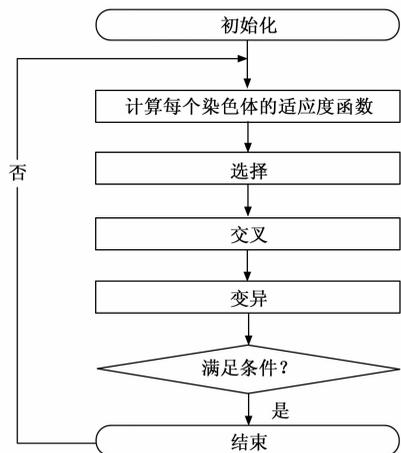
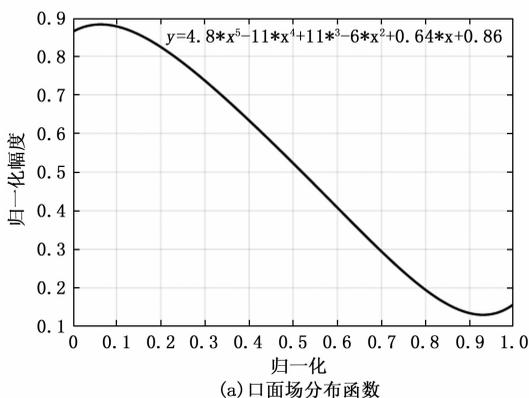


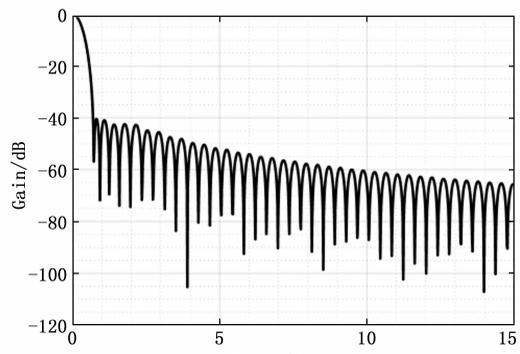
图 6 改进遗传算法的流程图

图 7 为优化所得到的口面场分布函数和利用积分公式^[13]计算的远场辐射方向图, 圆对称口径的积分公式如式(2)所示:

$$F(\theta) = \int_0^a F(\rho) J_0(k\rho \sin\theta) \rho d\rho \quad (2)$$



(a) 口面场分布函数



(b) 远场积分方向图

图 7 优化所得的口面场分布函数和利用积分公式计算的远场辐射方向图

由图 7 可以看出, 双偏置天线仅需要控制天线口面场分布^[14], 即可实现超低旁瓣的设计, 按照图 7 所示的口面场分布函数进行双偏置格里高利反射面赋形即可实现 -40 dB 的旁瓣电平。

1.4 设计原则和方法

根据以上研究内容对低旁瓣设计原则和方法进行归纳总结:

通过合理选取反射面参数(边缘照射电平、副面口径)和控制口面场分布可以实现反射面天线的低旁瓣设计。其中双偏置反射面更易于实现低旁瓣设计, 尤其是超低旁瓣的设计(-30 dB 以下); 前馈抛物面天线相对于双反射面天线, 也易于实现低旁瓣设计, 最低可达到 -30 dB 量级; 对称型双反射面天线, 由于副面遮挡很难完成超低旁瓣的设计, 其低旁瓣水平一般在 -25 dB 量级。

2 超低旁瓣反射面天线设计实例和容差分析

2.1 设计实例

依托实际工程应用设计超低旁瓣反射面天线, 下面给出一个 S 频段 8.5 m 超低旁瓣反射面天线设计实例, 天线主要技术指标要求如表 1 所示。

表 1 8.5 m 天线主要技术指标要求

项目	指标要求
工作频率	2.7~3 GHz
第一旁瓣	≤ -32 dB
天线效率	≥ 45%

该实际工程中要求第一旁瓣 ≤ -32 dB, 该要求远低于卫星通信的 -14 dB, 属于超低旁瓣的设计范畴, 需要精心设计才能满足要求。根据本文对反射面天线旁瓣影响因素分析结果, 需要通过优选反射面形式、口面场分布函数优化、反射面天线赋形、以及误差控制等方面多手段并行设计, 进而实现超低旁瓣的设计。

首先, 按照 1.4 节的设计原则和方法, 天线应选用赋形双偏置格里高利天线, 该天线形式可以避免副面、馈源以及支杆的遮挡, 有利于反射面天线的低旁瓣设计; 并且可以通过反射面赋形技术实现特定的口面场分布, 进而实现超低旁瓣设计。

其次, 按照 1.3 节所述方法, 假定口面场分布函数为 $f(x) = ax^5 + bx^4 + cx^3 + dx^2 + fx + e$, 以天线增益最大为优化目标, 以第一旁瓣小于 -40 dB 为约束条件, 通过遗传算法(GA)优化口面场分布函数的系数, 进而实现天线低旁瓣的设计, 优化所得的系数如下所示, $a=4.8, b=-11, c=11, d=-6, e=0.64, f=0.86$ 。

然后, 利用双偏置格里高利赋形方法^[15]对 8.5 米天线进行赋形设计, GRASP 仿真模型如图 8 所示, 馈源采用 -18 dB 照射电平的高斯馈源, 仿真结果如图 9 所示, 主要电气指标如表 1 所示, 由仿真结果可以看出天线口径效率优于 59%, 天线第一旁瓣优于 -40 dB。

最后, 由于大型反射面天线加工周期长, 成本高, 难以直接加工实物进行实验和分析。这样就需要对反射面天线误差影响因素进行容差分析, 进而实现对误差项的精确控制, 保证反射面超低旁瓣的实现。

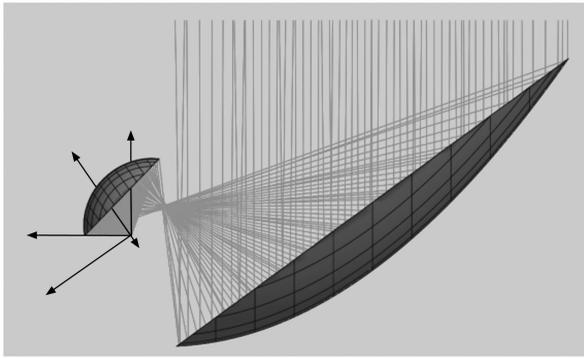


图 8 GRASP 仿真模型

也称极值法，基本思想是当部分参数在容差范围内取值时，寻找设计指标的最坏可能，可以最大限度保证天线的电性能满足要求^[16]。

实际的大型反射面天线在加工和安装过程中不可避免地存在一定的公差，这就会带来电气性能的下陷，虽然本文采用了双偏置格里高利这种天线形式避免了支杆等的遮挡，总体性能变化不会太大。但是仍然需要进一步对馈源和副反射面的平移和旋转对天线旁瓣和效率的影响进行容差分析。

双偏置格里高利反射面天线的坐标系示意图如图 10 所示，包括主反射面坐标系 $[X、Y、Z]$ 、副反射面坐标系 $[X_s、Y_s、Z_s]$ 和馈源坐标系 $[X_f、Y_f、Z_f]$ ，其中，副反射面和馈源位姿的变化会直接影响方向图，包含副反射面的平移量 $(X_s、Y_s$ 和 $Z_s)$ 和旋转量 $(rotX_s、rotY_s$ 和 $rotZ_s)$ ，馈源的平移量 $(X_f、Y_f$ 和 $Z_f)$ 和旋转量 $(rotX_f、rotY_f$ 和 $rotZ_f)$ ，由于大口径反射面天线加工成本和周期限制，本文设计的 8.5 米天线并未完成加工，因此，以 10 米级双偏置格里高利的一个实际工程为例，通过摄影测量拍照法^[17]，对其实际架设安装后副反射面和馈源的位姿进行精确测量，并根据多次测量数据取最大值，进而完成对本文设计的 8.5 米低旁瓣反射面天线的容差分析计算，摄影测量的副反射面和馈源位姿如表 3 和表 4 所示。

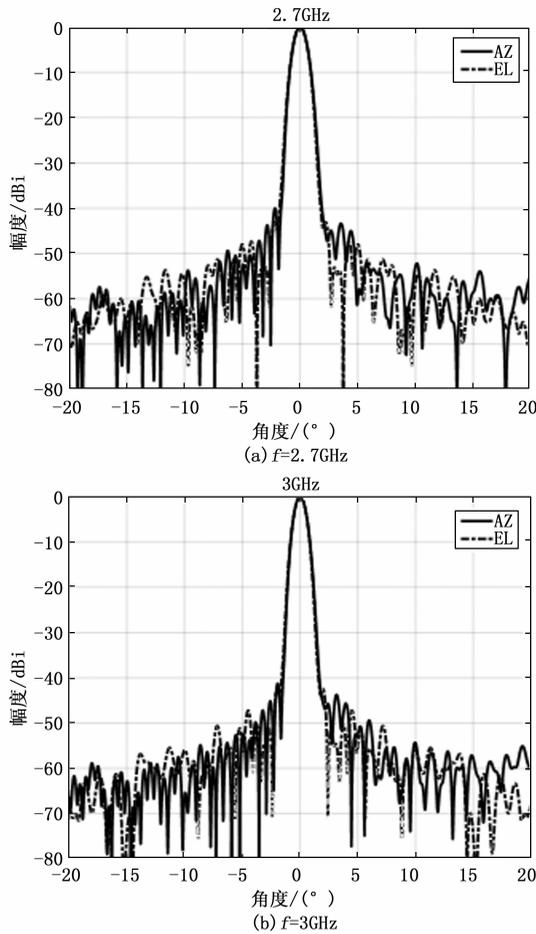


图 9 天线远场方向图

表 2 主要性能指标

频率/GHz	天线增益/dB	天线效率/%	第一旁瓣/dB	波束宽度/(°)
2.7	45.33	59.12	-40.02	1.024
3.0	46.25	59.17	-41.25	0.936

2.2 容差分析

反射面天线领域常用的容差分析方法有最坏情况分析法、统计公差法和区间分析方法，其中最坏情况分析法，

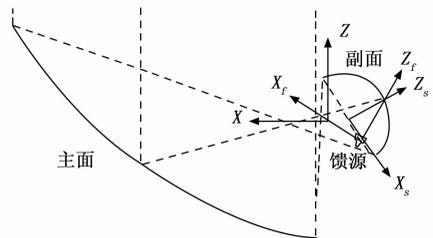


图 10 天线模型坐标系示意图

表 3 副反射面位姿

	第一组	第二组	第三组	最大值
X_s/mm	---	---	---	---
Y_s/mm	---	---	---	---
Z_s/mm	-0.126	-0.046	-0.489	-0.489
$rotX_s/(°)$	0.002 4	-0.002 3	0.010 2	0.010 2
$rotY_s/(°)$	-0.000 8	0.000 6	0.000 9	0.000 9
$rotZ_s/(°)$	---	---	---	---

表 4 馈源位姿

	第一组	第二组	第三组	最大值
X_f/mm	-0.563	-0.636	-0.238	-0.636
Y_f/mm	-0.579	-0.101	-0.388	-0.579
Z_f/mm	-0.777	-0.530	0.416	-0.777
$rotX_f/(°)$	0.462 9	0.472 1	0.5475	0.547 5
$rotY_f/(°)$	-0.102 1	-0.002 1	-0.029	-0.102 1
$rotZ_f/(°)$	---	---	---	---

在表 3 和表 4 中, 副反面位姿仅包含 Z_s 、 $rotY_s$ 和 $rotZ_s$, 这是因为在大型天线实际使用时, 天线副反射面、主反射面会构成一个近似的最佳拟合的反射面, 并非设计时的反射面, 因此在天线调整和拟合过程中, 会根据天线主反射面实际的位姿, 对天线副反射面位姿做半固定的拟合, 即固定 X_s 、 Y_s 、 $rotZ_s$, 拟合其他参量, 因此, 本文在做天线容差分析时沿用该思路, 此外, 考虑馈源位姿时, 由于馈源往往是轴对称结构, 也可以忽略 $rotZ_f$ 的影响。

因此, 针对多次摄影测量值取最大值, 并在天线工作的最高频率 3 GHz 下, 分析的天线性能指标的变化情况, 如表 5 所示, 天线方向图变化情况如图 11 所示。

表 5 主要性能指标 (3 GHz)

	天线增益 /dB	天线效率 /%	第一旁瓣 /dB	波束宽度 /($^{\circ}$)
副反射面	46.25	59.14	-40.94	0.939
馈源	46.26	59.27	-40.89	0.933
副面+馈源	46.26	59.27	-40.92	0.937

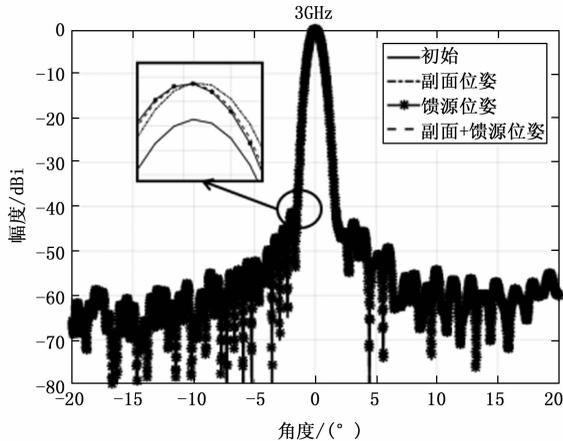


图 11 天线远场方向图

由表 5 和图 11 可以看出, 本文设计的 8.5 米低旁瓣反射天线在考虑装配公差后天线口面效率仍高于 59%, 天线第一旁瓣低于 -40 dB, 仍然具有较好的电性能, 优于实际工程要求, 也验证了本文设计方法的有效性。

3 结束语

本文通过对反射面天线旁瓣影响因素的分析, 研究了不同类型反射面天线设计的参数选取原则和设计方法, 给出了一个 8.5 m 赋形双偏置格里高利天线设计实例, 天线

在 S 频段实现口径效率大于 59%, 天线第一旁瓣为 -40 dB, 满足工程指标要求, 验证了本文分析与初步设计的正确性, 可用于指导低旁瓣反射面天线的工程设计。

参考文献:

- [1] 宋长宏. 基于喇叭单元的平面阵列天线研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [2] 张立军, 史振起. 高效率低旁瓣天线口面场分布函数研究 [J]. 无线电通信技术, 2010, 36 (4): 36-38.
- [3] 刘奇, 陈卯蒸, 李颖, 等. 射电天文台址电子设备电磁辐射评估 [J]. 天文研究与技术—国家天文台台刊, 2015 (3): 292-298.
- [4] 马晓峰, 冯丹萍, 吴玉清, 等. 一种星载阵列天线的高效波束赋形算法 [J]. 电波科学学报, 2016, 31 (3): 479-485.
- [5] 孙斌峰. 非周期宽角扫描低旁瓣相控阵天线研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [6] 陈鹏羽. 极低旁瓣反射面天线设计与实现 [D]. 广州: 电子科技大学, 2020.
- [7] 赵春雨. 超宽角扫描多波束透镜天线关键技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [8] 庄建楼. 星载 Ka 频段移动波束天线的仿真计算 [J]. 航天器工程, 2007, 16 (4): 56-59.
- [9] 杜彪. 反射面天线新技术及其工程应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.
- [10] 石雪莹. 偏置反射面天线的研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [11] 吴庚飞. 轴对称和偏置双反射面天线的研究 [D]. 桂林电子科技大学, 2017.
- [12] 张宙, 韩国栋, 杜彪. 基于混合遗传算法的非周期阵列综合技术. 现代雷达, 2012, 34 (12): 60-63.
- [13] 杨可忠. 现代面天线新技术 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1993.
- [14] 刘胜文, 杜彪, 伍洋. 赋形双反射面天线口面场分布的优化 [J]. 无线电通信技术, 2016, 42 (2): 55-58.
- [15] 刘胜文. 双偏置格里高利天线赋形方法的研究 [J]. 电波科学学报, 2016, 31 (4): 798-802.
- [16] ZHANG B T, YAHYA R S. Robust optimization with worst case sensitivity analysis applied to array synthesis and antenna design [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2018, 66: 160-171.
- [17] 冯其强. 数字工业摄影测量技术及应用 [M]. 北京: 北京测绘出版社, 2013.
- [18] 刘胜文, 杜彪, 伍洋. 赋形双反射面天线口面场分布的优化 [J]. 无线电通信技术, 2016, 42 (2): 55-58.
- [19] 刘胜文. 双偏置格里高利天线赋形方法的研究 [J]. 电波科学学报, 2016, 31 (4): 798-802.
- [20] ZHANG B T, YAHYA R S. Robust optimization with worst case sensitivity analysis applied to array synthesis and antenna design [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2018, 66: 160-171.
- [21] 冯其强. 数字工业摄影测量技术及应用 [M]. 北京: 北京测绘出版社, 2013.
- [22] SCHINHAERL M, SMITH G, STAMP R, et al. Mathematical modelling of influence functions in computer-controlled polishing: Part I [J]. Applied Mathematical Modelling, 2010, 32 (12): 2888-2906.
- [23] BACHE M R. Processing titanium alloys for optimum fatigue performance [J]. International Journal of Fatigue, 1999, 21 (S1): 105-111.

(上接第 245 页)

- [26] 王育坚, 廉腾飞, 吴明明, 等. 基于八叉树与 KD 树索引的点云配准方法 [J]. 测绘工程, 2017, 26 (8): 35-40.
- [27] CHEN C. Acceleration of vector bilateral filtering for hyperspectral imaging with GPU [J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2021, 49 (5): 1502-1514.
- [28] 赵自明, 史兵, 田喜平, 等. LAS 格式解析及其数据的读取与显示 [J]. 测绘技术装备, 2010, 12 (3): 17-20.