

变形反射面天线馈源最佳相位中心的研究

宋立伟，段宝岩，郑飞

(西安电子科技大学 机电科技研究所, 陕西, 西安 710071)

摘要：针对变形反射面天线馈源相位中心选取的问题, 提出了寻找天线馈源最佳相位中心的优化模型。该模型基于变形反射面天线馈源相位中心与远场方向图的函数关系式, 可得到天线反射面存在任意表面误差时的馈源最佳相位中心, 使得天线的增益损失最小。将该模型应用于某 8 m 反射面天线的工程计算中。在仅考虑天线自身重力荷载的情况下, 确定了天线不同仰角时的馈源最佳相位中心。数值模拟结果表明, 该优化模型所确定的增益损失小于最佳吻合抛物面时的增益损失。

关键词：反射面天线; 馈源相位中心; 反射面表面误差; 增益损失

中图分类号: TN 823.27; TN820.88 文献标识码: A 文章编号: 1001-0645(2009)10-0894-04

A Study on the Optimal Feeds Phase Center for Distorted Reflector Antennas

SONG Li-wei, DUAN Bao-yan, ZHENG Fei

(Research Institute on Mechatronics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: To determine the feeds phase center for distorted reflector antennas, the optimization model is given. The proposed model bases itself on the expression between feeds phase center of distorted reflector antennas and its far-field pattern. The optimal feeds phase center of reflector antennas existing reflector surface errors can be worked out to obtain the minimal gain loss by this model. Finally, as an example, a practical calculation is carried out for a 8 m reflector antenna. Only considering the gravity loading cases, the optimal feeds phase centers can be obtained in different elevation cases. The numerical results show that the gain loss of the given model is less than the one of best fit paraboloid.

Key words: reflector antenna; feeds phase center; reflector surface errors; gain loss

反射面天线在地面通信、星载、射电天文望远镜等诸多方面的应用, 对反射面天线电性能指标提出了更高的要求, 如高增益、窄波束、高效率等指标。因此, 对反射面天线的加工、制造、安装提出了更加严格的指标。然而, 反射面天线在实际工作环境中, 将受到外部载荷(自重、风、惯性、冰雪等载荷)的影响, 会产生表面变形和馈源误差, 从而导致电性能变化, 引起增益下降, 旁瓣电平提高^[1-2]。

反射面变形可通过面板实时调整, 但不可能调整到理想反射面的情况, 因此需通过馈源调整方法

或阵列馈源补偿方法来弥补^[3-6]。根据任意形状变形反射面天线馈源相位中心的概念^[6-7], 通常馈源的调整可依据最佳吻合抛物面^[8]所确定的新焦点, 调整馈源的相位中心到新的焦点上, 此时, 反射面的表面误差就只有对最佳吻合抛物面的偏差, 误差量明显减小, 从而提高反射面天线的电性能; 此外还可基于变形反射面天线馈源相位中心的效率表达式^[6-7], 采用优化方法寻找最优的馈源相位中心位置来满足效率最大化。但最佳吻合抛物面只是在结构上考虑了天线的几何关系, 仅满足反射面天线设

收稿日期: 2008-09-25

基金项目: 国家“九七三”计划项目(61358)

作者简介: 宋立伟(1982—), 男, 博士生, E-mail: slw1206@163.com; 段宝岩(1955—), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: bduan@xidian.edu.cn

计最初的理想结构形式,没有考虑最终电性能指标情况,存在着电性能变化情况不明确的问题,因此最佳吻合抛物面不一定是最佳的逼近面。而变形反射面天线馈源相位中心的效率表达式仅考虑了效率问题,其效率为反射面天线的辐射功率与天线从馈线得到的净功率之比,即天线的口径效率。同样没有与天线关心的电指标(增益、副瓣电平、波束宽度等)进行联系,而且馈源的相位中心只有一个自由度的变化,对变形反射面的补偿能力是有限的。而且上述的两种方法,对馈源调整只考虑了馈源相位中心位置,没有确定馈源指向问题。

作者利用变形反射面天线馈源相位中心与远场方向图的函数关系式,建立了馈源最佳相位中心的优化模型,用于确定增益损失最小时的馈源相位中心信息。此函数关系式可预估反射面表面误差和馈源相位中心的位置误差、角度误差存在情况下的电性能情况。

1 变形反射面天线的远场函数

变形反射面天线馈源相位中心与远场方向图的函数关系为

$$E(\theta, \varphi) = \iint_A \frac{f(\xi + \delta_\xi, \varphi' + \delta_{\varphi'})}{r'} e^{ik\Delta d \cdot \hat{r}'} \times e^{j2k\Delta z \cos^2(\theta/2)} e^{jk' \sin \theta \cos(\varphi - \varphi')} p' dp' d\varphi'. \quad (1)$$

式中: Δz 为反射面的表面误差; $f(\xi, \varphi')$ 为馈源的远场方向图; Δd 为馈源相位中心位置误差; $\delta_\xi, \delta_{\varphi'}$ 为馈源方向图在 ξ, φ' 方向产生的角度偏移; \hat{r}' 为馈源到反射面的单位矢量。

由式(1)可分析出馈源相位中心误差和反射面表面误差对反射面天线电性能的影响,同时也为变形反射面天线馈源最佳相位中心的优化分析提供了理论模型。

2 优化模型及其分析流程

反射面表面误差的确定可通过天线结构有限元分析获得。根据反射面天线电性能中增益是最重要的电参数,构造了天线增益损失 ΔG 最小时,寻求变形反射面天线馈源的最佳相位中心的优化模型为

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{find } \delta_\xi, \delta_{\varphi'}, \Delta d, \\ \min \Delta G(\delta_\xi, \delta_{\varphi'}, \Delta d) = \\ -20 \lg \left[\frac{\max(|E(\theta, \varphi)|)}{\max(|E_0(\theta, \varphi)|)} \right], \\ \text{s. t. } \xi_1 \leq \delta_\xi \leq \xi_2, \varphi'_1 \leq \delta_{\varphi'} \leq \varphi'_2, \\ |\Delta d - \Delta d_1| \leq d_0. \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: $\xi_1, \xi_2, \varphi'_1, \varphi'_2$ 分别为馈源方向图在 ξ, φ' 方向的角度偏移量的下限和上限; Δd_1 为最佳吻合抛物面所确定的新焦点位置; d_0 为以最佳吻合抛物面所确定的新焦点为中心偏移量的空间约束上限。最佳吻合抛物面给出的新焦点位置 Δd_1 为中心的约束空间,可减少馈源相位中心位置误差优化时的搜索空间,使优化模型更快地达到收敛。

此优化模型可按图1所示的分析流程进行分析。首先,由天线结构力学分析获得结构节点位移信息,通过插值或拟合的方法得到反射面表面误差。然后,根据式(1)分析得到变形前后的远场方向图。最后,利用式(2)的优化模型计算增益损失最小时的馈源相位中心。

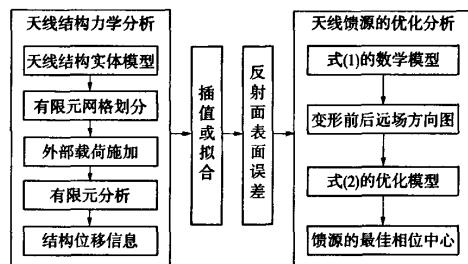


图1 变形反射面天线馈源相位中心优化模型的分析流程
Fig. 1 A block diagram of computational steps for the optimization model

3 数值模拟结果

利用图1给出的分析流程,在8 m口径的卫星地面站天线上进行数值实验。天线为旋转抛物面天线,焦距为3 m。天线背架为钢结构,有336根杆单元,96个节点,材料的弹性模量为 2.1×10^9 Pa,密度为 7.85×10^{-3} kg/cm³,反射面板为铝合金,厚度为4 mm,密度为 2.73×10^3 kg/cm³,杆件的截面分为12类,详见表1。考虑到天线结构的对称性,只取整个背架结构的1/4部分(见图2)。

表1 8 m天线背架结构的杆截面分类情况
Tab. 1 Cross sectional area of the back-up structure of 8 m structure

类别	截面积/cm ²	杆件位置号	类别	截面积/cm ²	杆件位置号
1	1.5	(1)(4)	7	3.0	(13)(21)
2	2.0	(5)(8)	8	1.0	(14)(15)
3	3.0	(9)(12)	9	1.5	(16)(17)
4	1.0	(2)(3)	10	2.0	(18)(19)
5	1.5	(6)(7)	11	3.0	(20)(22)
6	1.5	(10)(11)	12	1.0	(23)(24)(25)(26)(27)(28)

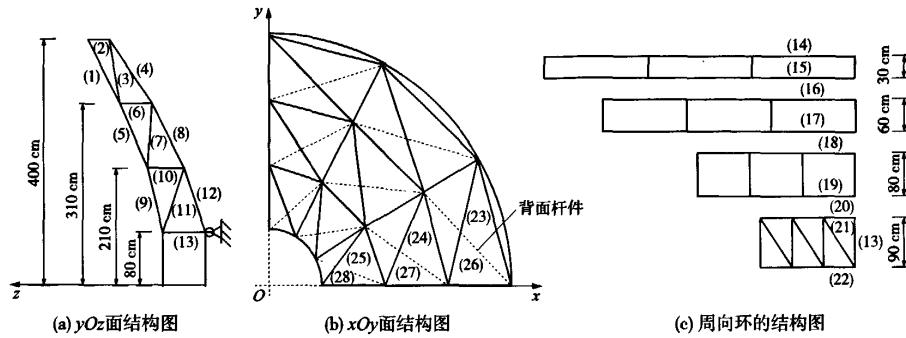


图2 天线背架的结构简图
Fig. 2 Back-up structure of 8 m structure

为减少结构分析的计算量,在天线结构的有限元建模时,将面板的质量作为载荷施加到了背架结构的上弦节点上,没有对反射面板进行建模。对天线在不同仰角下,分析了天线背架结构只考虑自重情况下的变形。由结构的刚度方程 $K\delta = P$ 可知,天线结构的力学分析结果是一组节点位移向量,节点位移需与其对应的节点变形前坐标相加,得到反射面变形后的节点坐标,通过插值或拟合的方法^[9]获变形后的反射面信息,将其与变形前的反射面对比,可确定反射面表面误差信息。

计算时定义天线的工作频率为 15 GHz,设馈源

为 \hat{x} 方向的线极化,且以 $\cos^2 \xi$ 近似其方向图(反射面的边缘照射电平均为 -12 dB)。利用式(1)对天线仰天情况下存在不同反射面表面误差和馈源误差时进行了计算,并将结果列于表 2 中。从表 2 数据可看出,只有表面误差存在时的天线增益损失为 0.028 5 dB,而当馈源误差同时存在时,天线增益损失并不是各误差单独存在时的增益损失之和。从变形后与变形前的增益损失对比可看出,两种误差同时存在时并不一定完全增加增益损失。由于馈源误差的存在,反而有可能减少增益损失。因此,建立式(2)的优化模型是有意义的。

表 2 反射面天线仰天时在各种馈源误差时的增益损失
Tab. 2 Gain loss of reflector antenna existing different feeds errors at 90° in the elevation

情况	反射面变形前的情况			反射面变形后的情况			变形后与前的增益损失对比
	馈源位置误差	馈源角度误差/(°)	增益损失/dB	馈源位置误差	馈源角度误差/(°)	增益损失/dB	
1	{0,0,0}	0	0	{0,0,0}	0	0.028 5	0.028 5
2	{0.2λ,0,0}	0	0.013 3	{0.2λ,0,0}	0	0.036 0	0.022 7
3	{0.2λ,0.2λ,0.2λ}	0	1.569 8	{0.2λ,0.2λ,0.2λ}	0	1.508 9	-0.061 1
4	{0,0,0}	10	0.016 1	{0,0,0}	10	0.033 1	0.017 0
5	{0,0,0}	20	0.053 0	{0,0,0}	20	0.062 3	0.009 3
6	{0.2λ,0,2λ,0.2λ}	10	1.730 5	{0.2λ,0,2λ,0.2λ}	10	1.631 6	-0.098 9
7	{0.2λ,0,1λ,0.3λ}	15	0.976 1	{0.2λ,0,1λ,0.3λ}	15	0.870 5	-0.105 6
8	{0.1λ,0,0.3λ,0.2λ}	10	3.601 3	{0.1λ,0,0.3λ,0.2λ}	10	3.460 6	-0.140 7

利用式(2)的优化模型,编程计算了变形反射面天线在不同仰角下增益损失最小时馈源相位中心。表 3 给出了最佳吻合抛物面确定的馈源相位中心处

的增益损失与式(2)优化模型所确定的增益损失的比较。

从表 3 可看出,优化模型给出的增益损失比最

表 3 馈源确定时最佳吻合抛物面和优化模型增益损失的比较
Tab. 3 Gain loss in the best fit parabolic reflector and the optimization model

仰角/(°)	最佳吻合抛物面		本文的优化模型	
	馈源相位中心 $\Delta d/cm$	增益损失 $\Delta G/dB$	馈源相位中心 $\Delta d/cm, \delta_\ell/(^\circ)$	增益损失 $\Delta G/dB$
0	(0.037 1, 0.019 1, 0.036 9)	0.051 4	(0.042 3, 0.049 8, 0.069 3, 0.000 296)	0.042 3
30	(0.039 7, 0.024 8, 0.023 6)	0.018 5	(0.015 0, 0.046 1, 0.060 1, 0.000 304)	0.015 0
60	(0.038 7, 0.024 0, 0.005 0)	0.013 0	(0.040 3, 0.030 8, 0.050 3, -0.000 25)	0.010 2
90	(0.015 7, 0.030 2, 0.005 0)	0.027 1	(0.020 4, -0.001 78, 0.026 8, 0.000 153)	0.024 3

佳吻合抛物面时的损失要小,证明了优化模型是有效的。同时优化模型中增加了馈源的角度误差信息,然而优化结果给出的角度很小。这可从表2 的分析结果看出,馈源角度对增益损失的影响很小,可以忽略。

4 结 论

为得到变形反射面天线馈源的最佳相位中心,作者基于变形反射面天线馈源相位中心误差与远场方向图的函数表达式,建立了增益损失最小的优化模型,并将该模型在8 m 天线的实际工程中进行了计算。从数值模拟结果可看出,优化模型所给出的馈源信息,能够补偿天线增益损失,同时相对最佳吻合抛物面时的增益损失也降低了,证明了此优化模型的有效性。该优化模型非常适合于大型反射面天线或更高频段天线馈源相位中心的确定。

参考文献:

- [1] Bahadori K, Rahmat-Samii Y. Characterization of effects of periodic and aperiodic surface distortions on membrane reflector antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(9):2782 - 2791.
- [2] Joo-Wan K, Byung S K, Choong W L. Computation of the average power pattern of a reflector antenna with random surface errors and misalignment errors [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1996, 44(7):996 - 999.
- [3] Rahmat-Samii Y. Novel array-feed distortion compensation techniques for reflector antennas[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1991, 6(6):12 - 17.
- [4] Acosta R. Compensation of reflector surface distortions using conjugate field matching [C] // Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (AP-S' 86). Philadelphia, USA: [s. n.], 1986:259 - 262.
- [5] Rahmat-Samii Y. Array feeds for reflector surface distortion compensation: concepts and implementation[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1990, 32(4):20 - 26.
- [6] 漆一宏,吴鸿适. 反射面天线馈源的混合相位中心[J]. 电子学报,1992,20(9):22 - 26.
Qi Yihong, Wu Hongshi. The hybrid phase center of a reflector antenna fees source[J]. Acta Electronica Sinica, 1992,20(9):22 - 26. (in Chinese)
- [7] 徐国华,漆一宏,段宝岩,等. 反射面天线馈源相位中心的研究[J]. 电子学报,1990,18(4):88 - 92.
Xu Guohua, Qi Yihong, Duan Baoyan, et al. Study on feeds phase center of reflector antennas[J]. Acta Electronica Sinica, 1990,18(4):88 - 92. (in Chinese)
- [8] 朱钟淦,叶尚辉. 天线结构设计[M]. 北京:国防工业出版社,1979:210 - 214.
Zhu Zhonggan, Ye Shanghui. The design for antenna structure [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1979:210 - 214. (in Chinese)
- [9] 王从思,段宝岩,仇原鹰. Coons 曲面结合 B 样条拟合大型面天线变形反射面[J]. 电子与信息学报,2008(1): 233 - 237.
Wang Congsi, Duan Baoyan, Qiu Yuanying. On new fitting method of large distorted antenna reflectors based on coons surface and B-spline[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008 (1): 233 - 237. (in Chinese)

(责任编辑:刘芳)

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>