

辐射计反射面天线面形精度对其主波束效率影响研究

苏 晟¹, 钱巧元¹, 吕利清², 王 盛¹

(1. 上海航天电子技术研究所, 上海 201109; 2. 上海卫星工程研究所, 上海 201109)

摘 要:以 FY-3 卫星微波成像仪天线为模型, 对反射面天线面形精度对天线主波束效率的影响进行了分析。提出基于数值拟合法的公式, 用 GRASP 软件半物理仿真结果, 修正 Ruze 公式关于面形精度影响因子的表达式, 实现了工程中天线主波束效率快速估算。该方法减小了 Ruze 公式中由于假设口径场等幅同相分布引起的计算误差, 采用该方法后计算精度可控制在 1% 以内。最后针对多馈源共用反射面的辐射计天线提出了分区域分析面形精度的方法。

关键词:物理光学; 反射面天线; 面形精度; 主波束效率; 微波辐射计; Ruze 公式; 半物理仿真; 数值拟合

中图分类号: TN82

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.02.015

Study on Effects of Surface Error on Beam Efficiency for Radiometer Reflector Antenna

SU Sheng¹, QIAN Qiaoyuan¹, LYU Liqing², WANG Sheng¹

(1. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China

2. Shanghai Satellite Engineering Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: The beam efficiency deterioration, which comes from parabolic antenna surface error, is studied in this paper for FY-3 space-borne radiometer antenna model. A novel numerical fitting method is proposed to revise the impact factor of Ruze-equation (RE) based on the simulation results from GRASP, where calculation error due to the uniform-excitation assumption in RE is alleviated. The antenna test results confirm that the RE beam-efficiency estimation accuracy of better than 1% is realized by employing the revised impact factor. In the last part, a new method called zone partitioning surface error analysis is also proposed for multi-feed reflector antenna.

Keywords: physical optics; reflector antenna; surface error; beam efficiency; microwave radiometer; Ruze-equation; hardware-in-the-loop simulation; numerical fitting

0 引言

主波束效率是辐射计反射面天线的一项重要性能指标, 提高主波束效率有利于提高辐射计的定标精度和观测精度^[1]。反射面天线的面形精度是影响其主波束效率的一项重要因子, 而目前工程上对于反射面面形精度要求尚无明确的规定。Ruze 公式从几何光学的角度建立了面形误差和增益损失之间的关系式^[2], 在分析时假设反射面口径场分布等幅同相, 面形误差在整个面上均匀分布且每个误差点作为一个独立源来考虑。而通常反射面的口径场分布不是理想的等幅同相, 与其形式及馈源的照射锥削有关, 每个误差点对电磁场的影响与相邻误差点

也具有相关性^[3]。因此 Ruze 公式应用于工程时, 计算出的面形精度要求会高于实际需要。到毫米波甚至太赫兹波领域, 反射面要维持高面形精度的难度和成本变大^[4], 研究面形精度对主波束效率的影响程度显得尤为重要。本文通过建立典型的辐射计天线模型, 利用物理光学加物理绕射法, 仿真分析面形精度对主波束效率的影响规律并进行归纳, 提出了辐射计反射面天线对面形精度的一般要求, 在 Ruze 公式的基础上, 得出面形精度对主波束效率影响因子的修正公式, 可以快速准确地估算面形精度对主波束效率的影响程度。针对多馈源共用反射面的天线形式, 还提出分区域分析面形精度的方法。

1 理论分析

反射面天线面形精度和主波束效率是本文讨论的两个关键物理量,关联两者的桥梁是面形精度影响因子,Ruze 公式从几何光学的角度分析了影响因子的由来,是后文影响规律分析的基础。但对于微波天线,反射面还具有物理光学的特性,需要对影响因子公式加以修正。

1.1 基本定义

面形精度是反映反射面实际面形与理想面形接近度的值,常用理论面形与实际面形之间误差的均方根值(RMS)来计算^[5]。

天线主波束效率是指天线辐射的主波束能量和天线辐射全空间能量之比,目前常将天线半功率波束宽度的 2.5 倍定义为主波束范围^[6],相应的主波束效率计算公式为

$$\eta_{\text{BE}} = \frac{\iint_{\Omega_{\text{主波束}}} P_{\text{d}} \mathrm{d}\Omega}{\iint_{4\pi} P_{\text{t}} \mathrm{d}\Omega} \quad (1)$$

式中: $\Omega_{\text{主波束}} = 2.5 \times \Omega_{3\text{ dB波束宽度}}$; P 为天线辐射功率; P_{t} 为天线总功率密度,当反射面欧姆损耗忽略不计时, P_{t} 为馈源出射的总功率密度。

1.2 面形精度对主波束效率的影响因子

反射面存在面形误差后,与理想反射面的电磁波光程相比存在一个光程差,该光程差对口径场的幅相分布都会产生影响,从而影响反射面天线的主波束效率^[7]。分析面形精度的影响时,将理想反射面的口径相位分布认为是均匀分布,引入面形误差后,在此分布的基础上叠加一个相位误差。图 1 描绘了具有随机面形误差的偏置抛物面天线。图中, F 为焦点, D 为口径, ψ 为馈源入射角,则 M 点的面形误差 Δd 在天线口面产生的相位误差为

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta d \cos(\psi/2) \quad (2)$$

引入均值为零且高斯正态随机分布的面形误差 σ 后,由 Ruze 公式可知,天线辐射功率 P 的衰减因子为

$$\eta_{\text{RMS}} = \exp[-(4\pi k\sigma/\lambda)^2] \quad (3)$$

式中: σ/λ 为波长归一化后的面形精度值; $k = \frac{4F}{D} \cdot \sqrt{\log[1+1/(4F/D)^2]}$ 。考虑反射面面形误差后,式(1)中分子主波束内的功率需再乘以功率衰减因子 η_{RMS} ,而分母 4π 全空间内的总功率保持不变,因此天线存在面形误差时的主波束效率为

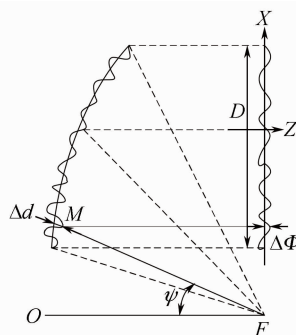


图 1 具有随机面形误差的偏置抛物面

Fig.1 Offset-parabolic reflector antenna with random surface errors

$$\eta'_{\text{BE}} = \eta_{\text{BE}} \eta_{\text{RMS}} \quad (4)$$

而 η_{RMS} 即为面形精度对天线主波束效率的影响因子。

式(3)中面形精度影响因子的得出是基于反射面口径场等幅同相分布的假设的,没有考虑实际馈源的照射特性。实际情况下,反射面口径场分布由反射面形式及馈源照射的初级场决定,馈源照射场强一般是类高斯锥削分布,因此式(3)影响因子的计算结果与实际面形精度对主波束效率的影响程度有误差。

2 影响规律分析

为减小式(3)的计算误差,建立 FY-3 卫星微波成像仪天线模型(含馈源),其为典型的辐射计反射面天线^[8],采用算法为物理光学加几何绕射法的仿真软件 GRASP 进行半物理仿真,对仿真数据进行分析,归纳这一类反射面天线面形精度对主波束效率的影响规律,并且通过数学方法对式(3)进行修正。

天线形式多馈源共用偏置抛物面,馈源采用波纹喇叭实测数据,选取最低(10.65 GHz)和最高(89 GHz)两个频点,在 GRASP 仿真软件中对反射面设置不同的面形精度值进行半物理仿真。

2.1 半物理仿真结果

$\sigma=0$ 时,为理想反射面, $\eta_{\text{RMS}}=1$,仿真得到天线不考虑面形精度影响时的主波束效率 $\eta_{\text{BE}} = \eta'_{\text{BE}}$ (10.65 GHz 频点 η_{BE} 为 93.84%,89 GHz 频点 η_{BE} 为 95.05%); $\sigma>0$ 时,仿真得到不同 σ 对应的 η'_{BE} ,由式(4)反推得到各个 $\eta_{\text{RMS}} = \eta'_{\text{BE}}/\eta_{\text{BE}}$ 。两个频点的仿真结果见表 1、2。

表 1 面形精度影响因子仿真结果(10.65 GHz)

Tab.1 Simulation results of η_{RMS} (10.65 GHz)			
σ/mm	σ/λ	$\eta_{\text{BE}}^{\prime}/\%$	η_{RMS}
0	0	93.84	1
0.053	0.001 9	93.80	0.999 6
0.07	0.002 5	93.77	0.999 3
0.4	0.014 2	91.81	0.978 4
0.6	0.021 3	89.30	0.951 6
1.6	0.056 8	65.45	0.697 5
4.6	0.163 3	2.33	0.024 8

表 2 面形精度影响因子仿真结果(89 GHz)

Tab.2 Simulation results of η_{RMS} (89 GHz)			
σ/mm	σ/λ	$\eta_{\text{BE}}^{\prime}/\%$	η_{RMS}
0	0	95.05	1
0.053	0.015 7	93.49	0.983 6
0.065	0.019 3	92.16	0.969 6
0.07	0.020 8	91.23	0.959 8
0.08	0.023 7	89.85	0.945 3
0.20	0.059 3	63.50	0.668 1
0.60	0.178 0	1.47	0.014 9

2.2 规律归纳

由仿真结果可知:1)面形精度与主波束效率呈正相关关系;2)面形精度要求与应用频率成呈相关关系;3)两个频点近似的 σ/λ 对应的 η_{RMS} 值近似,表明归一化面形精度对主波束效率的影响程度近似,这印证了在影响因子理论公式中将面形精度对波长进行归一化处理的合理性。

对仿真结果进一步分析,为使天线主波束效率达到 90%,在两个频点上, η_{RMS} 需要分别达到 0.952(对应的 σ/λ 约为 0.021)和 0.947(对应的 σ/λ 约为 0.023),可见面形精度临界值都在 $\lambda/50$ 附近。不失一般性,考虑面形精度对天线主波束效率影响时,为使天线主波束效率达到 90%,应将影响因子 η_{RMS} 控制在 0.95 以上,对应的面形精度要求为 $\sigma\leq\lambda/50$ 。以同样的分析方法,列出几组常见的反射面面形精度要求值,见表 3。

表 3 常见的反射面面形精度要求

Tab.3 General requirements of RMS for reflector antenna	
影响因子	面形精度要求
$\eta_{\text{RMS}}\leq 0.98$	$\sigma\leq\lambda/60$
$\eta_{\text{RMS}}\leq 0.95$	$\sigma\leq\lambda/50$
$\eta_{\text{RMS}}\leq 0.92$	$\sigma\leq\lambda/36$
$\eta_{\text{RMS}}\leq 0.90$	$\sigma\leq\lambda/30$

2.3 理论公式的修正

按理论公式(3)计算出面形精度对天线主波束效率的影响因子 η_{RMS} ,并与表 1、2 中 10.65 GHz 和 89 GHz 频点的仿真结果进行对比,如图 2 所示。从对比情况来看,当天线面形精度较小时($\sigma/\lambda\leq 0.01$),理论计算值和仿真值比较接近(偏差 $\leq 2\%$);随着面形精度的增大,理论计算值和仿真值的差异逐渐变大,从 $\sigma/\lambda\geq 0.03$ 开始,效率计算偏差将超过 8%,理论公式已不再有效,因此该公式的适用范围较小。

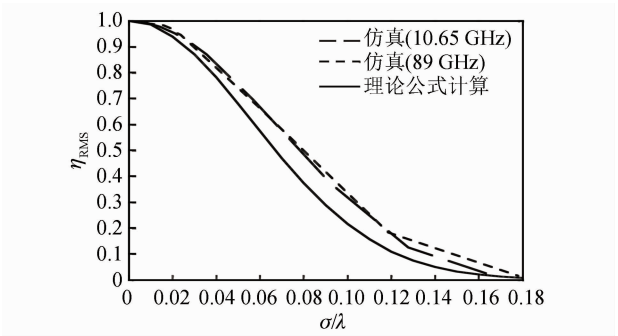


图 2 η_{RMS} 的理论计算值与仿真值
Fig.2 Value of η_{RMS} through the theoretical formula and simulation

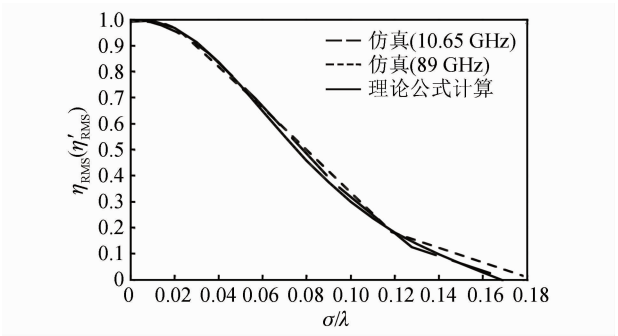


图 3 η_{RMS} 的修正公式计算值与仿真值
Fig.3 Value of η_{RMS} through the modified formula and simulation

增大仿真样本数量,得到多组仿真数据(取 30 组),使用数据拟合方法对式(3)进行修正。数据拟合时采用在式(3)的基础上增加多项式的方法^[9],使计算值不断逼近微波仿真结果,拟合原则是控制计算误差在 1% 以内(工程上从面形精度测试到天线主波束效率测试累积的测试误差约为 1%)的基础上,尽量使公式简单化。修正后面形精度对天线主波束效率的影响因子计算公式为

$$\eta'_{\text{RMS}} = \exp[-(4\pi k\sigma/\lambda)^2] - 23.283(\sigma/\lambda)^3 - 7.702(\sigma/\lambda)^2 + 1.932\sigma/\lambda - 0.008 \quad (5)$$

按修正后公式计算出面形精度对天线主波束效率的影响因子 η'_{RMS} , 并与 10.65 GHz 和 89 GHz 频点的仿真结果进行对比, 如图 3 所示。可见, σ/λ 在 0.05 以内(工程上关于反射面天线面形精度的讨论范围一般在 $\lambda/20$ 内), 计算偏差小于 1%, 计算值与仿真值基本一致。使用修正公式可快速估算面形精度对天线主波束效率的影响程度, 在项目研制初期可为方案的可行性分析及仿真建模分析提供参考数据。

3 实测验证情况

反射面天线口径 0.9 m, 焦距 1 m, 通过三坐标测量仪测得反射面的面形精度为 0.066 mm。验证面形精度对波束效率影响程度最大的 89 GHz 频点的情况, 按修正式(5)计算出 η_{RMS} 为 0.977 4, 乘以理想面形天线主波束效率 95.05%(见表 2)得到天线主波束效率预估值为 92.9%。在暗室测试了天线工作在 89 GHz 频点的辐射特性, 测得主波束效率为 92.6%, 与修正公式预估值较接近。

直接用式(3)计算出 η_{RMS} 为 0.930 3, 得到相应的主波束效率为 88.43%, 结果与实测值相比偏低。

4 分区域面形精度对主波束效率影响分析

对于多馈源共用反射面的辐射计天线, 不同馈源的有效照射区域不同, 低频段馈源的有效照射区

域较大, 高频段则较小^[10]。通过多次仿真计算发现, 将馈源约 -15 dB 波束内的区域作为有效照射区域, 照射区域外的反射面部分对主波束效率产生的影响微乎其微。

在微波成像仪天线仿真模型中, 对反射面的面形精度进行分区域设置, 如图 4 所示。按照 $\sigma \leq \lambda/50$ 的要求, 在高频 89 GHz 馈源 -15 dB 照射区域 D_s 范围内, 设置 σ_h 为 0.07 mm, 其余部分面形精度降低, 设置 σ_l 为 0.2 mm, 经仿真并与未分区域设置情况的仿真结果进行对比, 结果如表 4 所示。可见, 与整个面 σ 设置为 0.07 mm 的情况相比, 分区域设置虽然降低了反射面外圈的面形精度, 但两个频点的主波束效率几乎不受影响; 与整个面 σ 设置为 0.2 mm 的情况相比, 分区域设置有针对性地提高了反射面中心高频馈源有效照射区域的面形精度, 使高频的主波束效率得到保证。

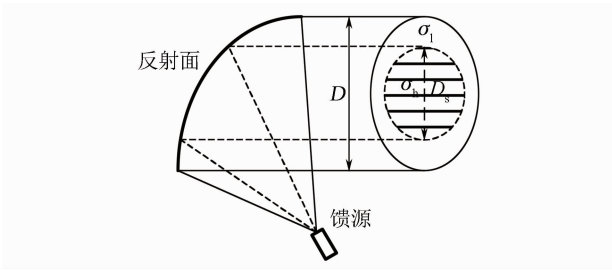


图 4 分区域面形精度分析示意
Fig.4 Zone partitioning method for RMS analysis

通过分区域来提面形精度要求, 可以避免对反射面面形精度提过高的要求, 使指标要求提得更合理。

表 4 面形精度分析结果(分区域与未分区域)
Tab.4 Results of RMS analysis (with and without zone partitioning)

	未分区域				分区域	
频点/GHz	10.65	10.65	89	89	10.65	89
σ/mm	0.07	0.2	0.07	0.2	0.07(D_s 内), 0.2(整个面)	
σ/λ	0.002 5	0.007 1	0.020 8	0.059 3	0.002 5(D_s 内); 0.007 1(整个面)	0.020 8(D_s 内); 0.059 3(整个面)
$\eta'_{\text{BE}}/\%$	93.77	93.31	91.23	63.50	93.69	91.02
η_{RMS}	0.999 3	0.994 4	0.959 8	0.668 1	0.998 4	0.957 6

5 结束语

反射面天线面形精度与主波束效率呈正相关。本文结合理论分析和半物理仿真结果, 对面形精度对主波束效率的影响规律进行了归纳。通过对微波模型仿真数据的拟合, 提出了基于 Ruze 公式的面

形精度影响因子修正公式, 减少了 Ruze 公式中由于假设口径场等幅同相分布而引起的计算误差, 计算精度优于 1%。对于多频段多馈源共用反射面的天线形式, 提出了分区域提面形精度要求的方法, 有效避免对反射面面形精度提过高的要求, 该方法在

航天科技集团科技创新研发项目“新一代多通道扫描微波成像探测仪”反射面的研制中得到了应用。本文得到的定性规律对于反射面天线具有普遍适用性,由于修正公式拟合使用的数据源是偏置抛物面天线的仿真结果,因此对这一类天线形式有较好的应用。对于其他天线形式,后续将通过更多的数据积累对此项研究进行补充和完善。

参考文献

- [1] 叶云裳. “神舟四号”飞船微波辐射计天线的主波束效率[J]. 空间科学学报, 2003, 23(6): 459-466.
- [2] RUZE J. Antenna tolerance theory[J]. IEEE Proc, 1996, 54(4): 633-640.
- [3] 谢苏隆, 钟鹰. 一种新的用于反射面天线辐射远场分析的快速积分方法[J]. 上海航天, 2012, 29(1): 29-32.
- [4] 李勇, 翟晓霞, 张文静. 太赫兹高增益天线研究[J]. 无线电通信技术, 2015, 41(4): 68-70.
- [5] MARTINEZ-LORENZO J Á, RAPPAPORT C M. Reflector antenna distortion determination: an iterative-field-matrix solution[C] // IEEE Antennas and Propagation International Symposium, Toki Messe, Niigata, Japan, 2007: 5171-5174.
- [6] SHIUE J C, DOD L R. Remote Sensing and Microwave Radiometry[M]. New York: Springer, 1988.
- [7] RAHMAT-SAMII Y, HOFERER R A, MOSAL-LAEI H, et al. Beam efficiency of reflector antennas: the simple formula[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1998, 40(5): 82-87.
- [8] 徐博明. 气象卫星有效载荷技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005: 147-152.
- [9] 宋晓霞. 基于 MATLAB 的通用数据拟合方法[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2014, 30(4): 1-3, 6.
- [10] 杜彪, 伍洋, 张一凡, 等. 大口径反射面天线技术综述[J]. 无线电通信技术, 2016, 42(1): 1-8.