

“神舟四号”飞船微波辐射计 天线的主波束效率

叶云裳

(中国空间技术研究院 北京 100086)

摘 要

参照反射面天线主波束效率估计的简易计算公式,对“神舟四号”(SZ-4)飞船辐射计天线的主波束效率进行了具体估算,给出了计算流程和计算结果.计算表明,该辐射计天线在 6.6 GHz, 19.35 GHz, 23.8 GHz 和 37 GHz 4 个频段上的波束效率分别为 89%, 91.24%, 92.91% 和 94.87%,并经过了在轨飞行验证.

关键词 主波束效率; 抛物反射面天线; 辐射方向图; 微波辐射计

1 引言

主波束效率是辐射计反射面天线的重要特性.按其标准定义它有

$$\eta_{be} = \int_{\text{主瓣}} P_t d\Omega / \int_{4\pi} P_t d\Omega, \quad (1)$$

式中,分子为天线在主波束角域内的辐射功率,分母为天线 4π 全空间总的辐射功率.主波束效率为二者之比. P_t 为天线总的功率方向图.

利用(1)式计算主波束效率归结为口面辐射场的数值积分,它涉及全空间角的辐射积分,此数值仿真的分析和过程比较复杂,而且由于已知条件、数学模型和数值处理的误差会带来预估的不确定性.如果通过实测结果计算其主波束效率的话,势必需要在全空间测定许多方向图,如果受条件限制提供的测试数据不充分,也会造成较大的计算误差.对微波遥感辐射计天线主波束效率的工程估计,一直吸引着学者们的关注.最近在美国 IEEE 天线专业杂志上见到了有关“主波束效率”计算的最新的工程计算公式^[1].这组公式是在对大量的微波辐射计天线主波束效率估算基础上的工程经验总结.我国微波遥感研究起步较晚,如何给出 SZ-4 多模态微波遥感辐射计天线的主波束效率,国内尚无建立相应的规范和标准.对文献[1]列出的反射面天线主波束效率的一组计算公式进行了剖析,经过解读、理解和验证,应用到 SZ-4 飞船的辐射计天线主波束效率的计算上.在国内这是首次仅利用一次馈源实测数据和反射面设计参数计算出微波辐射计天线的主波束效率,并已经过了 SZ-4 飞船的在轨飞行验证.本文介绍了该方法在 SZ-4 微波辐射计天线上的应用,包括计算流程和计算结果.这种方法的推广对今后相关规范的形成以及相应的测试检测标准具有参考意义.同时,从一个侧面促进我国微波遥感研究与国际研究的接轨.

2003-06-23 收到原稿, 2003-09-10 收到修定稿

2 主波束效率的近似模型

根据文献 [1], 可以得到主波束效率的近似公式为

$$\begin{aligned}\eta_{be} &= \eta_{\text{截获}} \times \eta_{\text{偏差}} \times \eta_{\text{口径}} \times \eta_{\text{遮挡}} \\ &= [1 - (\cos \theta_0)^{2q+1}] \left[\left(1 - \frac{D_{\text{遮挡}}^2}{D_{\text{有效}}^2}\right)^2 \left(\frac{\theta_{\text{遮挡}}}{\theta_{\text{瓣宽}}}\right)^2 \left(0.828 + 0.495 \left|\frac{ET}{20}\right| \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - 0.546 \left|\frac{ET}{20}\right|^2 + 0.261 \left|\frac{ET}{20}\right|^3 - 0.045 \left|\frac{ET}{20}\right|^4 \right) \right] e^{-(4\pi k\sigma/\lambda)^2},\end{aligned}\quad (2)$$

式中, η_{be} 为反射面的主波束效率. 反射面的截获效率

$$\eta_{\text{截获}} = 1 - \cos \theta_0^{2q+1}.$$

因反射面形面误差增益下降对应的效率

$$\eta_{\text{偏差}} = e^{-(4\pi k\sigma/\lambda)^2}.$$

反射面的照射效率

$$\eta_{\text{口径}} = 0.828 + 0.495 \left|\frac{ET}{20}\right| - 0.546 \left|\frac{ET}{20}\right|^2 + 0.261 \left|\frac{ET}{20}\right|^3 - 0.045 \left|\frac{ET}{20}\right|^4.$$

遮挡效率

$$\eta_{\text{遮挡}} = \left(1 - \frac{D_{\text{遮挡}}^2}{D_{\text{有效}}^2}\right)^2 \left(\frac{\theta_{\text{遮挡}}}{\theta_{\text{瓣宽}}}\right)^2.$$

(2) 式的推导和各部分的意义如下.

经推算, (1) 式可得出

$$\eta_{be} = \frac{1}{4\pi} \int_{\text{主瓣}} G d\Omega, \quad (3)$$

$$G = G_{\max} F^2(\theta, \varphi). \quad (4)$$

式中, G 为天线功率方向图, $G_{\max}$ 为天线最大增益值, $F(\theta, \varphi)$ 为天线归一化的场强方向图. (1) 式和 (3) 式给出了主波束效率的经典计算公式. 式中定义的方向图主瓣 $\Omega_{\text{主瓣}}$ 为电平从零到零的空间角. 对笔形波束的抛物反射面, 主波束有以下近似关系:

$$\Omega_{\text{主瓣}} = 2.5 \times \Omega_{3\text{dB}}. \quad (5)$$

式中, $\Omega_{3\text{dB}}$ 代表半功率瓣宽. 采用 (5) 式定义可克服波束方向图没有尖锐零点造成的零位模糊问题. (1) 式中总的主瓣功率实际上就是反射面散射功率方向图的主瓣功率, 有

$$\int_{\text{主瓣}} P_t d\Omega = \int_{\text{主瓣}} P d\Omega. \quad (6)$$

对于复杂馈源模型或已知测试馈源方向图, 可用数值积分方法获得反射面截获功率与馈源总功率之比. SZ-4 飞船上的多模态遥感器中的辐射计天线馈源可用 $\cos^q$ 模型来逼近, 此时馈源功率方向图可表示为

$$P_f(\theta) = (\cos \theta)^{2q}. \quad (13)$$

在 Ω_R ($0^\circ \leq \theta \leq \theta_0$, $0 \leq \varphi \leq 360^\circ$) 范围内辐射功率相对于总功率可写成

$$P_f(\Omega_R) = \int_0^{\theta_0} \int_0^{2\pi} P_f(\theta) d\Omega = \frac{\pi}{Z_0(2q+1)} [1 - (\cos \theta_0)^{2q+1}]. \quad (14)$$

式中, θ_0 为抛物面的半张角, 计入馈源泄漏效率后可写成

$$\eta_{\text{截获}} = \frac{P(\Omega_R)}{P(4\pi)} = 1 - (\cos \theta_0)^{2q+1}. \quad (15)$$

式中, $\cos^q$ 模型仅对馈源的前半空间辐射 ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$), 忽略后向辐射.

下面将导出馈源模型中的 q 与馈源波束的关系. 反射面边缘幅值电平跌落 ET (dB) 是馈源波束和光程差的共同结果. 可写成

$$ET = FT + PL. \quad (16)$$

式中, FT 为馈源波束因子, 可以表示为

$$FT = 10 \lg \left(\frac{P_f(\theta)}{P_f(0)} \right). \quad (17)$$

式中, $P_f(\theta)$ 为馈源功率方向图, FT 为馈源锥在偏离馈源光轴 θ 角时的电平跌落, 并用馈源光轴电平归一的.

对于

$$P_f(\theta) = \cos^{2q} \theta, \quad q = \frac{FT}{20 \lg(\cos \theta_0)}. \quad (18)$$

PL 代表抛物面的路径损失, 有

$$PL = 20 \lg \left(\frac{R_c}{R_u/R_l} \right). \quad (19)$$

式中, R_c, R_u, R_l 如图 1 所示. PL 是以馈源轴光程归一的路径损失. 如果路径损失可忽略的话, q 可用边缘电平替代馈源锥的计算.

$$ET = FT = 2q \times 10 \lg(\cos \theta_0). \quad (20)$$

(2) 口径效率的计算

口径效率 $\eta_{\text{口径}}$ 是指口径积分与均匀分布相比的效率. 假如抛物面天线口径幅值归一化分布函数可写成

$$Q(\rho) = C + (1 - C) \left[1 - \left(\frac{\rho}{a} \right)^2 \right]^P. \quad (21)$$

天线辐射场的积分可写成

$$E(\theta, \varphi) = \iint_{\text{口径}} Q(\rho) e^{jk\rho} ds. \quad (22)$$

对各种边缘电平 C 的口径效率 ($ET = 20 \lg C$) 可展开成 $|ET/20|$ 4 次幂的多项式, 参照文献 [1] 有

$$\eta_{\text{口径}} = 0.828 + 0.495 \left| \frac{ET}{20} \right| - 0.546 \left| \frac{ET}{20} \right|^2 + 0.261 \left| \frac{ET}{20} \right|^3 - 0.045 \left| \frac{ET}{20} \right|^4. \quad (23)$$

式中, $|ET/20| = ET/20$ 为反射面边缘电场幅值 (绝对值) 跌落. 这是原作者对大量的辐射计天线主波束效率研究的经验总结.

(3) 形面偏差的效率的计算

在此假设形面偏差的均值为零, 并设偏差是按高斯正态随机分布. 对形面偏差的分析可假设在无面公差时反射面的口径相位为均匀分布, 引入形面偏差时应在此分布上叠加了一个随机相位分布. 我们知道, 表面法向偏差 Δn 引起的口径面上相位偏差为

$$\varepsilon_A = 2 \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n \cos \frac{\psi}{2}. \quad (24)$$

式中 ψ 为馈源投射角. 表面随机偏差的效率因子可按 Ruze 公式估计 [2], 可写成

$$\eta_{\text{偏差}} = e^{-(4\pi k \sigma / \lambda)^2} \approx -684 \left(\frac{\sigma}{\lambda} \right)^2 (\text{dB}). \quad (25)$$

式中 (σ/λ) 为以波长归一的表面均方根偏差,

$$k = 4 \frac{F}{D} \sqrt{\lg \left[1 + \frac{1}{(4F/D)^2} \right]}. \quad (26)$$

(4) 中心遮挡效率的计算

对称反射面由于馈源、副面和支架的遮挡, 使天线的有效辐射面积减少, 从而使辐射增益降低. 对这个因素的影响用中心遮挡效率 $\eta_{\text{遮挡}}$ 来表示有

$$\eta_{\text{遮挡}} = \left(1 - \frac{D_{\text{遮挡}}^2}{D_{\text{有效}}^2} \right)^2 \left(\frac{\theta_{\text{遮挡}}}{\theta_{\text{瓣宽}}} \right)^2. \quad (27)$$

式中, $D_{\text{遮挡}}$ 和 $D_{\text{有效}}$ 分别为遮挡口径的直径和有效口径直径. $\theta_{\text{瓣宽}}$ 和 $\theta_{\text{遮挡}}$ 分别代表没有遮挡时的瓣宽和有遮挡时的瓣宽. $D_{\text{有效}}$ 与口径直径 D 的关系为

$$\frac{D_{\text{有效}}}{D} = 1 - 0.645 \left| \frac{ET}{20} \right| + 0.477 \left| \frac{ET}{20} \right|^2 - 0.319 \left| \frac{ET}{20} \right|^3. \quad (28)$$

有遮挡和无遮挡瓣宽之比为

$$\frac{\theta_{\text{遮挡}}}{\theta_{\text{瓣宽}}} = 1 + 0.002 \left(\frac{D_{\text{遮挡}}}{D_{\text{有效}}} \right) - 0.733 \left(\frac{D_{\text{遮挡}}}{D_{\text{有效}}} \right)^2 + 0.546 \left(\frac{D_{\text{遮挡}}}{D_{\text{有效}}} \right)^3. \quad (29)$$

通过上面的分析可以得到主波束效率的近似公式有

$$\begin{aligned} \eta_{\text{be}} &= \eta_{\text{截获}} \times \eta_{\text{偏差}} \times \eta_{\text{口径}} \times \eta_{\text{遮挡}} \\ &= [1 - (\cos \theta_0)^{2q+1}] \left[\left(1 - \frac{D_{\text{遮挡}}^2}{D_{\text{有效}}^2} \right)^2 \left(\frac{\theta_{\text{遮挡}}}{\theta_{\text{瓣宽}}} \right)^2 \left(0.828 + 0.495 \left| \frac{ET}{20} \right| - \right. \right. \end{aligned}$$

$$0.546 \left| \frac{ET}{20} \right|^2 + 0.261 \left| \frac{ET}{20} \right|^3 - 0.045 \left| \frac{ET}{20} \right|^4 \right) e^{-(4\pi k\sigma/\lambda)^2}, \quad (30)$$

其中, $\psi = 2\arctan(d/2F)$, $R = 2f/(1 + \cos\psi)$, $ET = FT + PL(\text{dB})$, $q = |FT/20\lg(\cos\theta_0)|$, 各符号如图 1 所示.

3 SZ-4 微波辐射计天线主波束效率的计算

3.1 主波束效率的计算公式

SZ-4 飞船的主载荷为多模态微波遥感器. 在其留轨段上载有满足各种安装要求, 不同取向的反射面天线组. 其中微波辐射计天线是一个偏置抛物反射面, 如果要通过测试确定其波束效率, 实现起来有较大的困难, 因此采用了测试与计算相结合的方式来估计其波束效率. 由于本辐射计天线馈源无遮挡, 利用 (2) 式进行计算时, 可简化为

$$\begin{aligned} \eta_{be} &= \eta_{\text{截获}} \times \eta_{\text{口径}} \times \eta_{\text{偏差}} \\ &= [1 - (\cos\theta_0)^{2q+1}] \left[\left(0.828 + 0.495 \left| \frac{ET}{20} \right| - 0.546 \left| \frac{ET}{20} \right|^2 + 0.261 \left| \frac{ET}{20} \right|^3 - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. 0.045 \left| \frac{ET}{20} \right|^4 \right) \right] e^{-(4\pi k\sigma/\lambda)^2}. \end{aligned} \quad (31)$$

该式为本辐射计天线主波束效率计算的基本公式.

3.2 主波束效率计算流程

在反射面天线的设计参数和馈源的一次方向图数据已知的条件下, 按照图 2 所列计算机流程就可进行反射面天线主波束效率的估算.

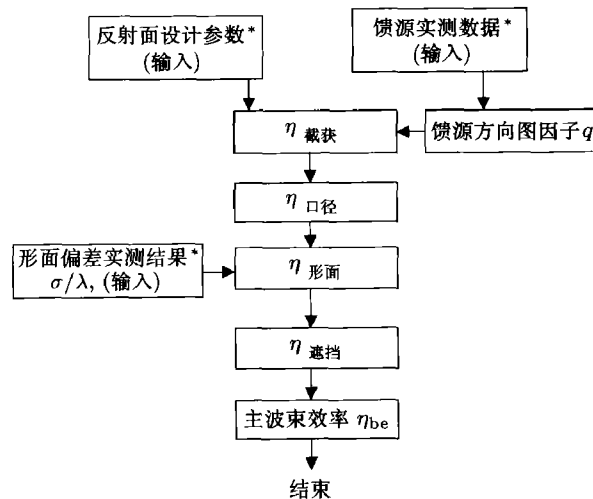


图 2 主波束效率的计算机流程

Fig.2 Calculation flow chart of the main beam coefficient

图 2 流程中带 * 者为计算的输入数据. 首先将反射面设计参数 (口径 D , 焦距 F , 偏置高度 H 和反射面对馈源的半张角 θ_0) 和馈源实测方向图输入, 按 (15) 和 (23) 式可以求出反射面的截获效率和口径照射效率; 再将反射面的形面偏差的均方根实测值输入, 按 (25) 式可计算形面偏差的增益下降对应的效率. 本天线为偏置抛物面无馈源遮挡, 流程中的遮挡效率不计. 因此总的主波束效率即是上面三项效率的乘积.

3.3 SZ-4 微波辐射计天线主波束效率的计算

SZ-4 微波辐射计天线主波束效率计算按图 2 所示的流程进行. 计算过程及中间数据列于表 1 中.

表 1 辐射计天线的主波束效率计算表
Table 1 Calculation data of main beam coefficient

反射面几何参数 (输入)				
天线投影口径 D/mm	660			
偏置高度 $H(=d_c+D/2)/\text{mm}$	420			
焦距 F/mm	560			
下边缘角 $\psi_l/(\circ)$	9.19			
上边缘角 $\psi_u/(\circ)$	67.61			
馈源倾角 $\psi_b/(\circ)$	38.4			
馈源半张角 $\theta_0(=(\psi_u-\psi_l)/2)/(\circ)$	29.21			
下边缘斜距 R_l/mm	563.62			
上边缘斜距 R_u/mm	811.06			
馈源轴斜距 R_c/mm	627.91			
下斜距空衰 $PL_l(=20\lg(R_c/R_l))/\text{dB}$	0.938 2			
上路径空衰 $PL_u(=20\lg(R_c/R_u))/\text{dB}$	-2.223			
平均路径空衰 $PL_a(=(PL_l+PL_u)/2)/\text{dB}$	-0.642 4b			
馈源相关参数 (输入)				
频率/GHz	6.6	19.35	23.80	37
边缘电平 ET/dB^*	-11	-12	-13	-15
馈源锥/dB	-10.357 6	-11.357 6	-12.357 6	-14.357 6
$FT=ET-PL_a$				
馈源方向图因子 q	8.77	9.61	10.46	12.15
$ ET/20 $	0.55	0.60	0.65	0.75
$\eta_{\text{截获}}$	0.913 6	0.934 1	0.9498	0.970 9
$\eta_{\text{口径}}$	0.974 4	0.979 7	0.982 7	0.988 0
形面偏差 $(\sigma/\lambda^*)/\text{mm}$	0.068	0.068	0.068	0.068
$\eta_{\text{形面}}$	0.999 6	0.997 0	0.995 4	0.989 0
波束效率 η_b	0.889 9	0.912 4	0.929 1	0.948 7
与规范符合度	未达	优于	优于	优于
$\eta_b \geq 90\%$				

* 馈源或天线的实测数据.

由表可见,除 C 频段 (6.6 GHz) 内主波束效率为 89% 稍低于规范值外,其余指标均优于规范值。

C 频段主波束效率较低的原因是因为在该频段内一次馈源的波瓣较宽,在反射面边缘的照射电平偏高形成较高的泄漏,使泄漏效率降低所致。这是一个多频段、双极化共馈源系统,要改善此频段特性势必又牵动到其他频段性能,再加上载体安装条件的约束和电磁兼容要求的限制,这只能是多因素折中的结果。如果应用及限制条件放宽或要求提高,进一步优化设计波束效率还可望提高。

要达到高的主波束效率,反射面和馈源设计要匹配,在满足电性能条件下,一定需控制馈源的泄漏,同时应作到尽量均匀的口径分布。然而这两者往往不可兼得,因此对反射面系统的最优设计是重要的。

另外形面精度与波束效率是一个正相关的关系。SZ-4 飞船微波辐射计天线反射面形面最坏情况下的 RMS 都能控制在 0.01λ 的量级上。由于反射面天线达到了较高的形面精度,它对波束效率起到了重要作用。要实现高的形面精度这是个涉及材料、结构、制造、组装、检测和温控处理等多方面的问题,这也反映了航天器天线在设计、制造、检测和热控等方面的综合水平。随着工作频段的提高要维持高的形面精度难度就更大了,这也是未来航天器天线应着力解决的问题。

参 考 文 献

- [1] Rahmat-Samii Y *et al.* Beam efficiency of reflector antennas: The simple formula. *IEEE Trans. Ant. Prop. Mag.*, 1998, 40(5):82—87
- [2] Ruze J. Antenna tolerance theory. *IEEE Proc.*, 1996, 54:633—640

MAIN BEAM EFFICIENCY OF MICROWAVE RADIOMETER ANTENNAS ON “SZ-4” SPACESHIP

YE Yunshang

(Chinese Academy of Space Technology, Beijing 100086)

Abstract

Based on a simple formula for calculating the main beam efficiency presented in Ref.[1], the main beam efficiency calculation is performed for multi-band microwave radiometer antenna boarded on “SZ-4” spaceship. The calculation shows that the main beam efficiencies at 6.6, 19.35, 23.8 and 37 GHz are 89%, 91.24%, 92.91% and 94.87%, respectively.

Key words Main beam efficiency, Parabolic reflector antenna, Radiation pattern, Microwave radiometer