

天线形变对风云卫星遥感图像的影响

王璐¹, 胡伟东¹, 安大伟², 季金佳¹, 陈实¹, LIGTHART Leo P.³

(1. 北京理工大学, 北京 100081; 2. 国家卫星气象中心, 北京 100081; 3. 代尔夫特理工大学, 荷兰 代尔夫特 2628 CN)

摘要:为探究反射面天线形变对风云卫星毫米波和亚毫米波成像仪(MMSI)的亮温图像质量的影响,运用基于表面电流积分的物理光学方法计算天线辐射方向图,探究不同形式反射面天线形变下天线辐射特性的变化规律。结合MMSI的亮温图像的处理结果,评价图像质量的变化。实验结果表明:反射面天线的形变面积、形变位置和副反射面晃动发生变化时,天线的主瓣增益、副瓣电平和波束宽度等关键指标发生规律性变化,对MMSI的亮温图像质量产生不同形式的影响。当反射面天线的形变面积增大时,天线的主瓣增益减小,副瓣电平升高,进一步导致分辨率降低,噪声水平升高,亮温图像质量变差。

关键词:反射面天线形变; 风云卫星; 物理光学法; 辐射方向图; 亮温图像

中图分类号: TN828.5 **文献标志码:** A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.02.017

Effect of Antenna Deformation on Remote Sensing Images of FY Satellites

WANG Lu¹, HU Weidong¹, AN Dawei², JI Jinjia¹, CHEN Shi¹, LIGTHART Leo P.³

(1. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China; 3. Delft University of Technology, Delft 2628 CN, Netherlands)

Abstract: In order to explore the effects of the deformation of the reflector antenna on the brightness temperature image quality of millimeter and sub-millimeter sounding/imager (MMSI) carried by FY satellites, physical optics (PO) method based on surface current integral is used to calculate the antenna radiation pattern and then the variations of the antenna radiation characteristics are analyzed under different forms of deformation of the reflector antenna. Combining with MMSI's bright temperature image processing, we evaluate the changes in image quality. The experimental results show that when the deformation area, deformation position and sub-reflection surface sloshing of the reflector antenna change, the key indicators such as main lobe gain, side-lobe level and beam width of the antenna change regularly, and then the brightness temperature images of the MMSI are affected by different forms. The antenna gain decreases and the side-lobe level increases when the deformation area increases, then the resolution decreases, the noise level increases and the brightness temperature deteriorates.

Keywords: reflector antenna deformation; FY satellites; physical optics (PO) method; radiation pattern; brightness temperature image

0 引言

随着对宇宙探索和地球探测的深入,卫星系统对天线性能的要求越来越高。在气象观测方面,风云系列卫星是我国自主研制的气象卫星,毫米波和

亚毫米波成像仪(MMSI)是中国风云四号地球同步轨道气象卫星上的重要载荷,在天气预报、灾难预警和环境监测等方面,MMSI极具潜力。天线的性能直接影响MMSI的成像质量,为提高接收机的灵敏

收稿日期: 2018-01-25; **修回日期:** 2018-03-09

基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器项目(61527805); 国家自然科学基金面上项目(41775030); 教育部高等学校创新引智计划项目(B14010)

作者简介: 王璐(1996—),女,硕士研究生,主要研究方向为太赫兹遥感技术和微波辐射计图像复原。

通信作者: 胡伟东(1975—),男,博士生导师,主要研究方向为空间太赫兹遥感技术。

度和分辨率,需增大天线的有效接收面积并降低天线系统的噪声温度,而大口径反射面天线是增大天线有效接收面积的有效途径之一^[1-2]。然而此类天线由于体积较庞大,易受重力、温度、风荷和表面加工误差等因素的影响,反射面表面发生形变,进而对卫星成像质量产生影响^[3-4]。因此探究不同类型的天线形变对卫星成像的影响十分必要。

在天线形变方面,前人研究主要集中于反射面随机表面误差对天线电性能的影响^[5],以及反射面由于重力和热效应产生的微小形变对天线辐射特性的影响,以上两者都可归为全局形变。近年来,天线的局部形变问题日益凸显,在卫星上,裸露在外的反射面天线易被太空垃圾等飞行物撞击,造成表面凸起或凹陷,形成局部形变。文献[6-7]中对实际应用中的局部形变已做深入研究。基于此,本文将反射面天线形变与 MMSI 的亮温图像处理结合,仿真不同形变程度的反射面天线,运用基于表面电流积分的物理光学(physical optics, PO)方法计算得出天线辐射方向图,对比分析天线的关键指标^[6-9]。通过较为全面地仿真与整合分析,建立主要指标与 MMSI 所成亮温图像间的联系,目的在于分析和预判卫星系统。因风云四号卫星的数据无法获得,且风云三号微波成像仪的几个频段的通道在风云四号卫星中均有保留,故本文使用风云三号卫星的模拟仿真数据。

1 设计思路与方法

分析天线形变对辐射计工作性能的影响,首先需明确辐射计天线的工作原理,天线的作用主要包含 3 方面:

1) 主瓣的作用。主瓣贡献的温度 T_{ML} 为通过天线主波束立体角观测的视在温度,包括目标直接辐射的亮温 T_B 和天线主波束方向上经目标区域其它辐射源引起的间接辐射。

2) 旁瓣的作用。旁瓣贡献的温度 T_{SL} 为在天线主波束立体角以外方向上所观测的视在温度,主导因素是目标背景产生的辐射能量。

3) 天线传递函数。天线作为入射 T_{ML} 和 T_{SL} 与辐射计接收机输入间的接口,当入射的辐射亮温被天线收集后,被天线方向图函数加权。

旁瓣贡献的加权温度 \bar{T}_{SL} 主要是背景辐射的噪声温度,一般情况下背景很复杂,很难精确得到。主波束效率 η_M 越大, \bar{T}_{SL} 的估计误差 $\Delta \bar{T}_{SL}$ 对 \bar{T}_{ML} 的影响越小。因此对辐射计天线来说,应该尽可能降低

天线副瓣电平,提高天线主波束效率,减小 \bar{T}_{SL} 对目标辐射特性测量的影响。

无耗天线温度为

$$T_A(\theta, \varphi) = \frac{\iint_{\Omega_M} T_{AP}(\theta, \varphi) F_n(\theta, \varphi) d\Omega}{\iint_{4\pi} F_n(\theta, \varphi) d\Omega} + \frac{\iint_{\Omega_S} T_{AP}(\theta, \varphi) F_n(\theta, \varphi) d\Omega}{\iint_{4\pi} F_n(\theta, \varphi) d\Omega} T_{ML} T_B T_{SL} \quad (1)$$

式中: $F_n(\theta, \varphi)$ 为天线总的功率方向图; $T_{AP}(\theta, \varphi)$ 为黑体等效辐射温度; θ, φ 为电磁场球面坐标系的坐标; Ω_M 为天线主瓣立体角; Ω_S 为天线旁瓣立体角。则天线主瓣和旁瓣的加权视在温度分别为

$$\bar{T}_{ML}(\theta, \varphi) = \frac{\int_{\Omega_M} T_{AP}(\theta, \varphi) F_n(\theta, \varphi) d\Omega}{\int_{\Omega_M} F_n(\theta, \varphi) d\Omega} \quad (2)$$

$$\bar{T}_{SL}(\theta, \varphi) = \frac{\int_{\Omega_S} T_{AP}(\theta, \varphi) F_n(\theta, \varphi) d\Omega}{\int_{\Omega_S} F_n(\theta, \varphi) d\Omega} \quad (3)$$

而天线的主波束效率 η_M 可表示为

$$\eta_M = \frac{\int_{\Omega_M} F_n(\theta, \varphi) d\Omega}{\int_{4\pi} F_n(\theta, \varphi) d\Omega} \quad (4)$$

通过以上分析,并且假设辐射计输入端分别接到 2 个温度为 T_h 和 T_l 的高温源和低温源,得到其输出端电压分别为 V_h 和 V_l , 最终得到辐射计输出端的电压与天线主瓣所贡献的温度之间的关系式

$$\bar{T}_{ML} = \frac{1}{\eta\eta_M} \left(\frac{T_h - T_l}{V_h - V_l} V - \frac{V_l T_h - V_h T_l}{V_h - V_l} \right) - \frac{(1 - \eta_M)}{\eta_M} \bar{T}_{SL} + \frac{1 - \eta}{\eta\eta_M} T_0 \quad (5)$$

式中: η 为天线的辐射效率; T_0 为有损天线的物理温度。

由式(5)可知,假设 $\eta, \eta_M, \bar{T}_{SL}$ 和 T_0 已知,则可通过辐射计输出端的电压 V 精确得到主波束贡献的视在温度 \bar{T}_{ML} , 即被测目标的辐射特性。

2 仿真实验及结果分析

2.1 反射面天线形变对于天线性能的影响

运用 HFSS(High Frequency Structure Simu-

lator)作为仿真工具,利用物理光学法计算局部凸起形变反射面天线的方向图^[9-11],仿真形变面积、形变位置和副反射面晃动。仿真过程中选用正馈双反射面天线,工作频段为 94 GHz,馈源为喇叭天线,主反射面直径为 260 mm,副反射面直径为 51 mm,焦距比为 0.4。天线模型如图 1 所示。

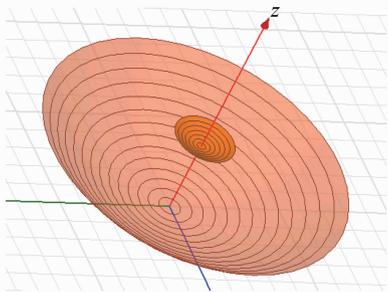


图 1 反射面天线模型

Fig.1 Model of reflector antenna

1)形变面积对反射面天线电性能的影响。固定发生形变的位置和形变幅度,改变形变面积,形变面积分别取整个反射面面积的 0.062 5%,0.25%,1%,2.37%,4%。形变幅度不变,形变中心位置不变,形变位置取为 y 轴距离中心 1/2 半径处,分别计算 H 面和 E 面的方向图,并与无形变的方向图曲线比较,观察反射面天线的电特性随形变面积的变化规律。凸起形变反射面天线的方向图及电参数变化数据如图 2 和表 1 所示。

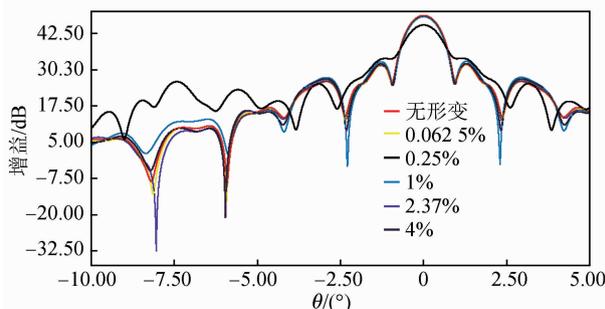
表 1 形变面积不同时的电参数变化量

Tab.1 Changes in electrical parameters with different deformation areas

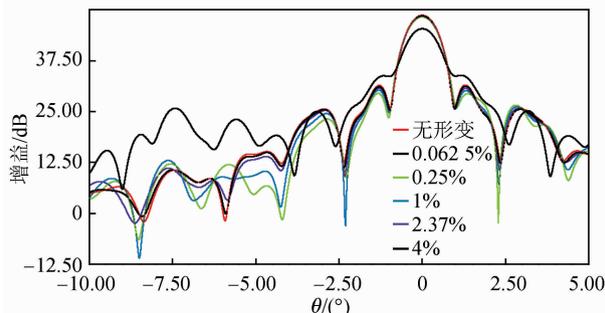
形变面积比例/%	0.062 5	0.25	1	2.37	4
E 面主瓣增益变化/dB	-0.14	-0.24	-0.3	-0.41	-3.3
E 面 $\Delta L_{SS}(\text{left})/\text{dB}$	-0.26	-0.16	0.19	0.89	1.87
E 面 $\Delta L_{SS}(\text{right})/\text{dB}$	-0.21	-0.13	0.16	0.95	1.97
E 面 $\Delta W_{\text{HPB}}/\text{dB}$	0.002 1	0.000 2	0.003 6	0.009 7	0.054 5
H 面主瓣增益变化/dB	-0.14	-0.24	-0.3	-0.41	-3.35
H 面 $\Delta L_{SS}(\text{left})/\text{dB}$	0.42	0.71	1.16	1.93	2.05
H 面 $\Delta L_{SS}(\text{right})/\text{dB}$	0.44	0.79	1.18	2.09	2.14
H 面 $\Delta W_{\text{HPB}}/\text{dB}$	-0.002	-0.004 2	-0.009 2	-0.018 7	-0.122 3

注: ΔL_{SS} 为反射面天线形变与无形变第 1 副瓣电平的差值; ΔW_{HPB} 为半功率波瓣宽度的差值(下同)。

从图 2 和表 1 可见,在形变面积为反射面面积的 1%时,主瓣增益降低 0.3 dB, E 面主极化 L_{SS} 升高约 0.2 dB, H 面主极化 L_{SS} 升高约 1.2 dB。无论



(a) E 面主极化方向图



(b) H 面主极化方向图

图 2 天线辐射方向图

Fig.2 Antenna radiation patterns

H 面还是 E 面,形变反射面天线的辐射方向图与无形变的天线辐射方向图比较,变化显著。随着凸起形变面积的增大,主瓣增益不断降低,第 1 副瓣电平逐渐升高,天线性能下降。

2)形变位置对反射面天线电性能的影响。固定天线发生形变的面积和形变幅度,改变形变位置,形变面积为整个反射面面积的 2%,形变位置由反射面中心向反射面边缘移动,形变中心距离反射面中心的距离分别为 0,50,100,150,200 mm。凸起形变反射面天线的方向图及电参数变化数据如图 3 和表 2 所示。

从图 3 和表 2 可见,形变量始终控制为主反射面面积的 0.25% 不变,形变发生于主反射面中心时,天线方向图变化剧烈,主瓣增益剧烈下降,副瓣电平升高。随着形变位置由中心向边缘移动,主瓣增益减少量越来越小,波束宽度增大量也越来越小。这说明中心位置的形变对反射面辐射特性的影响相对较大。

3)副反射面晃动对反射面天线电性能的影响。副反射面向 X 、 Y 和 Z 方向偏移 1 mm 时,形变发生后天线方向图和数据如图 4 和表 3 所示。

通过以上仿真结果可见,副反射面沿 X 轴移动 1 mm 时,天线方向图 E 面主极化方向偏移 0.36° ;

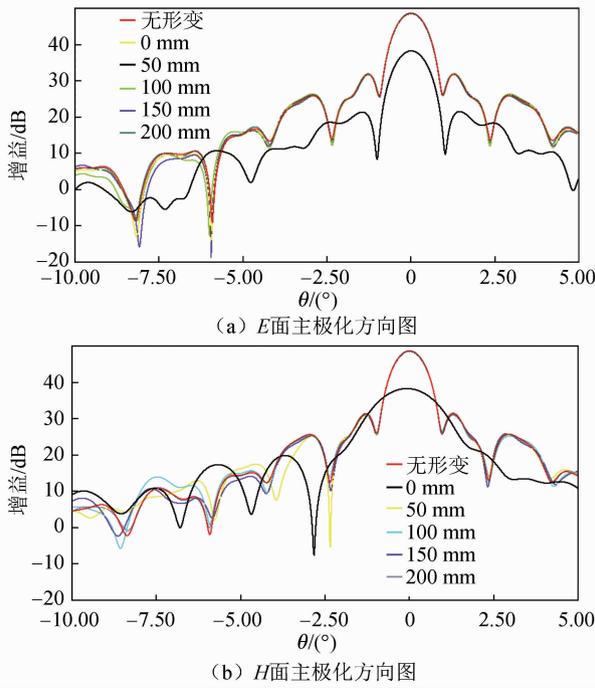


图 3 天线辐射方向图

Fig.3 Antenna radiation patterns

表 2 形变位置不同时电参数变化量

Tab.2 Changes in electrical parameters with different deformation positions

位置	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5
E 面主瓣增益变化/dB	-2.34	-0.01	-0.04	-0.09	0.07
E 面 $\Delta L_{SS}(\text{left})/\text{dB}$	1.47	-0.04	0.18	0.07	0.06
E 面 $\Delta L_{SS}(\text{right})/\text{dB}$	1.31	0	0	0.06	-0.28
E 面 $\Delta W_{HPB}/\text{dB}$	0.040 4	0.010 3	0.006 4	0.002 4	0.001 8
H 面主瓣增益变化/dB	-2.31	-0.01	-0.04	-0.09	0.07
H 面 $\Delta L_{SS}(\text{left})/\text{dB}$	1.51	-0.41	-0.07	-0.336	0.05
H 面 $\Delta L_{SS}(\text{right})/\text{dB}$	1.55	0.14	0.01	-0.44	0.11
H 面 $\Delta W_{HPB}/\text{dB}$	0.726 5	0.002 5	0.001 2	0.001 7	0.001 6

副反射面沿 Y 轴移动 1 mm 时,天线方向图 H 面主极化方向偏移 0.36°;副反射面沿 Z 轴移动 1 mm 时,天线方向图主瓣增益降低 2.54 dB,第 1 副瓣电平 L_{SS} 升高约 4 dB,波束变宽,指向性不变。

2.2 成像质量影响模拟实验

由反射面天线形变仿真结果可见,天线形变主要会造成以下 3 方面的影响:1)波束宽度变化,主瓣增益降低;2)副瓣增益升高,主瓣增益降低;3)主瓣方向偏移。针对以上 3 种情况,分别仿真天线方向图对成像质量的影响。

表 3 形变发生前后天线性能参数

Tab.3 Antenna performance parameters before and after deformation

形变形式	无形变	X 方向 偏移 1 mm	Y 方向 偏移 1 mm	Z 方向 偏移 1 mm
E 面主瓣增益/dB	48.54	48.45	46.02	46.00
E 面 $L_{SS}(\text{left})/\text{dB}$	31.69	27.17	32.36	35.69
E 面 $L_{SS}(\text{right})/\text{dB}$	31.76	34.59	32.84	35.69
E 面 W_{HPB}/dB	0.793 3	0.791 3	0.740 8	0.784 2
E 面主瓣偏移角度/(°)	0	0.36	0	0
H 面主瓣增益/dB	48.54	46.08	48.42	46.00
H 面 $L_{SS}(\text{left})/\text{dB}$	31.35	32.22	27.58	35.72
H 面 $L_{SS}(\text{right})/\text{dB}$	31.41	32.23	33.91	35.72
H 面 W_{HPB}/dB	0.803 9	0.755 6	0.805 0	0.817 9
H 面偏移角度/(°)	0	0	0.36	0

仿真数据选用风云三号微波成像仪中 183 GHz 频段台风正演模型。中心的红色亮温高值区代表台风眼,蓝色的亮温低值区表示台风的雨带。正演亮温图像有 126×126 个像素点,每个像素点代表 $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ 的范围。天线方向图为根据实际指标理想化的归一化高斯天线方向图。其主要评价指标有:空间分辨率 R_{IFOV} 、噪声标准差 σ_n 和相关系数 C_{RTA} 。

毫米波亚毫米波探测仪采用模拟的天线方向图,高斯型天线方向图是真实天线方向图的理想近似,已有研究者证明采用高斯型天线方向图 σ 具备可行性^[12]。

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \times \exp\left\{-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left[\frac{(x-\bar{x})^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-\bar{y})^2}{\sigma_y^2} - 2\rho\frac{(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sigma_x\sigma_y}\right]\right\} \quad (6)$$

式中: \bar{x} 和 \bar{y} 为中心坐标; ρ 为相关系数。设置 $\rho = 0$ 以获得对称的天线方向图,得

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(x-\bar{x})^2 + (y-\bar{y})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (7)$$

天线的地面分辨率 R_{IFOV} 与天线方向图 σ 的关系式为

$$R_{IFOV} = 2\sqrt{2\ln 2} \times \sigma R_{\text{pixel}} \approx 2.354 820 1 \times \sigma R_{\text{pixel}} \quad (8)$$

式中: R_{pixel} 为正演亮温图像每个像素的分辨率。

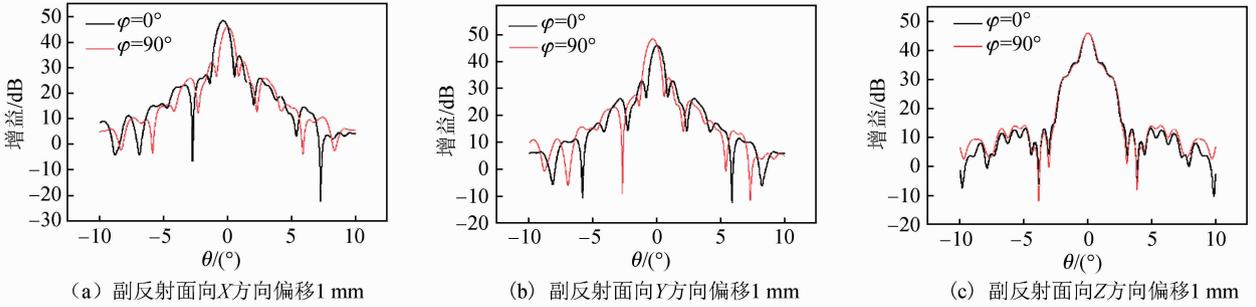


图 4 天线辐射方向图

Fig.4 Antenna radiation patterns

图像的噪声标准差 σ_n 采用 Imerkaer 提出的快速噪声方差估计算法来估算^[13]。Imerkaer 选择了 1 种估计噪声标准差的替代方法。采用了绝对偏差和的形式,即

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{6(M-2)(N-2)} \sum_{m=1}^{M-2} \sum_{n=1}^{N-2} |T_A(m,n) \otimes \mathbf{L}| \quad (9)$$

式中: \mathbf{L} 为 1 个 3×3 的矩阵,起到线性滤波的作用, \mathbf{L} 为 2 个拉普拉斯滤波的矩阵 \mathbf{L}_1 和 \mathbf{L}_2 的权重和,

$$\text{其中 } \mathbf{L}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{L}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & -4 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{L} =$$

$$\mathbf{L}_2 - 2\mathbf{L}_1 = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 4 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}。用 \mathbf{L} 对整幅图像卷$$

积滤波,可以估计图像信号的二次导数,移除图像表面的噪声纹理。

相关系数 C_{RTA} 表示处理后的亮温图像 T_B 与正演参考图像 T_A 的相关程度, C_{RTA} 越接近于 1,表示与参考图像相关程度越高。

$$C_{RTA} = \frac{\sum_m \sum_n (T_{Amm} - \bar{T}_A)(T_{Bmm} - \bar{T}_B)}{\sqrt{[\sum_m \sum_n (T_{Amm} - \bar{T}_A)^2][\sum_m \sum_n (T_{Bmm} - \bar{T}_B)^2]}} \quad (10)$$

式中: \bar{T}_A 和 \bar{T}_B 分别为 T_A 和 T_B 的像素平均值。

1) 主瓣波束宽度变化。调节天线方向图波束宽度分别为 $3.3^\circ, 4.0^\circ, 4.2^\circ, 4.5^\circ, 4.8^\circ$, 并利用天线方向图对正演台风图像进行抽样,比较抽样结果,如图 5 所示。

从抽样结果可见:随着波束宽度变宽,图像质量降低,与原始正演图像吻合度降低。随机选取并对比图 5(a)~(f) 的第 70 条亮温数据,绘出亮温分布曲线如图 6 所示。由图 6 和表 4 可知:相比波束宽

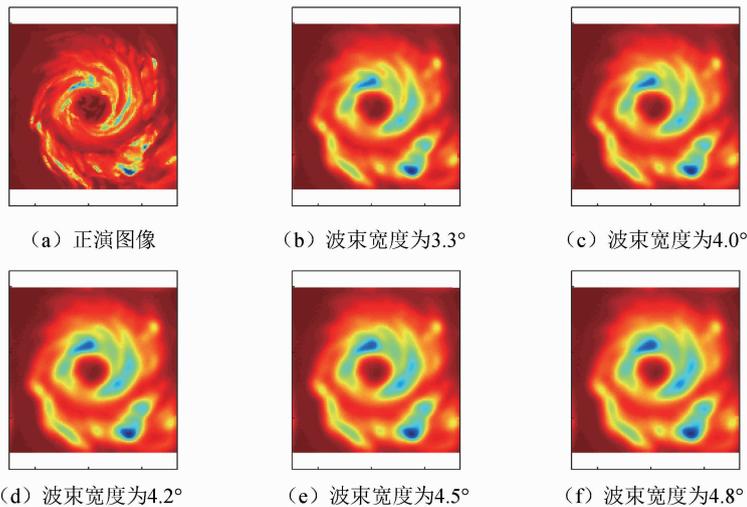


图 5 主瓣波束变化时对正演台风图像的抽样结果

Fig.5 Sampling results of forward-looking typhoon images when main lobe beam changes

度为 3.3° ,波束宽度为 4° 时的分辨率降低 3 km,相关系数降低 0.008,噪声水平升高 0.005 K。总体来看,当波束宽度变宽时,空间分辨率降低,噪声水平升高,与原始正演图像之间的相关系数 C_{RTA} 降低,图像的起伏相对正演图像不明显,具体体现在亮温分布数据曲线的峰值更低、谷值更高,即图像上显示的细节信息减少。

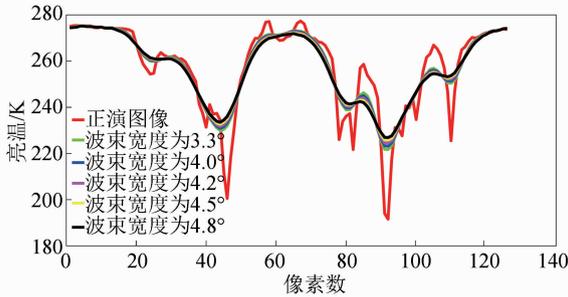


图 6 图 5 中亮温数据分布曲线吻合度分析

Fig.6 Concordance analysis of brightness temperature data distribution curves in Fig. 5

2) 副瓣电平升高。选择归一化高斯天线方向图,副瓣增益升高为主瓣增益的 5%,10%,15%,20%,并利用天线方向图对正演台风图像进行抽样,比较抽样结果,如图 7 所示。

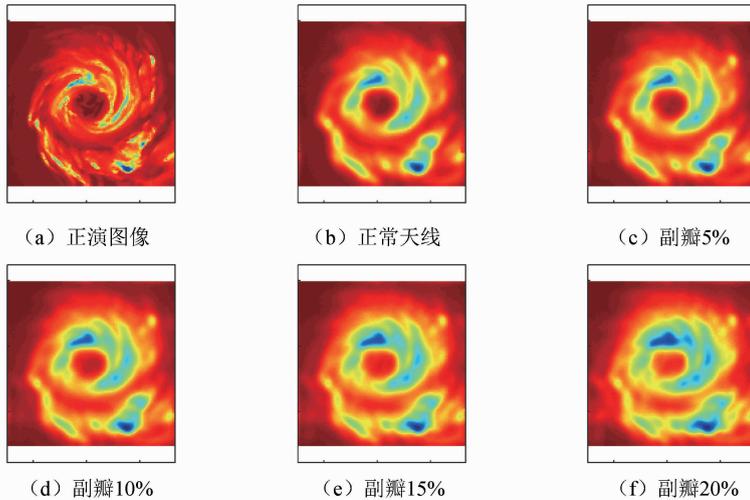


图 7 副瓣电平升高时对正演台风图像抽样结果

Fig.7 Sampling results of forward-looking typhoon images when side-lobe level increases

随机选取并对图 9(a)~(f) 的第 70 条亮温数据,绘出亮温分布曲线如图 10 所示。由图 10 和表 6 可知,当主波束偏移 0.5° 时,分辨率降低 8 km,相关系数减小约 0.07,噪声水平升高 0.005 K。即随着主波

表 4 主瓣波束变化时的抽样结果

Tab.4 Sampling results when main lobe beam changes

3 dB 波束宽度/ $^\circ$	R_{IFOV}/km	相关系数 C_{RTA}	噪声水平 σ_n/K
3.3	25	0.926 0	0.360
4.0	28	0.918 2	0.365
4.2	30	0.910 5	0.368
4.5	33	0.902 9	0.369
4.8	35	0.895 5	0.374

束偏移量增加,噪声水平升高,所得的亮温图像与原始正演图像之间的相关系数剧烈降低,偏移超过 5° 时,图像完全错位,说明天线抽样结果完全恶化,图像数据需经过后续校正才能使用。

3) 主瓣指向性偏移。选择归一化高斯天线方向图,根据对应关系,调节天线方向图主波束指向,分别沿 Y 轴方向偏移 $0^\circ, 5^\circ, 8^\circ, 11^\circ, 14^\circ$,并利用天线方向图对正演台风图像进行抽样,比较抽样结果,如图 9 所示。

束偏移量增加,噪声水平升高,所得的亮温图像与原始正演图像之间的相关系数剧烈降低,偏移超过 5° 时,图像完全错位,说明天线抽样结果完全恶化,图像数据需经过后续校正才能使用。

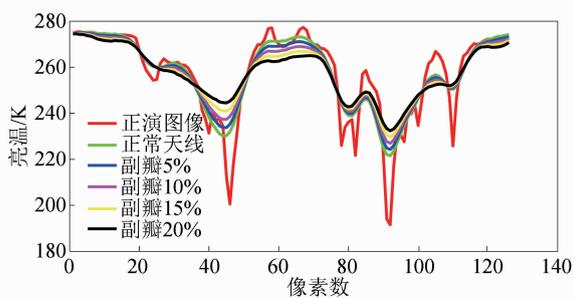


图 8 图 7 中亮温数据分布曲线吻合度分析

Fig.8 Concordance analysis of brightness temperature data distribution curves in Fig. 7

表 5 副瓣电平升高时的抽样结果

Tab.5 Sampling results when side-lobe level increases

副瓣升高/%	R_{IFOV}/km	相关系数 C_{RTA}	噪声水平 σ_n/K
0	25	0.926 0	0.360
5	28	0.921 0	0.396
10	29	0.912 7	0.411
15	32	0.898 8	0.441
20	43	0.876 5	0.450

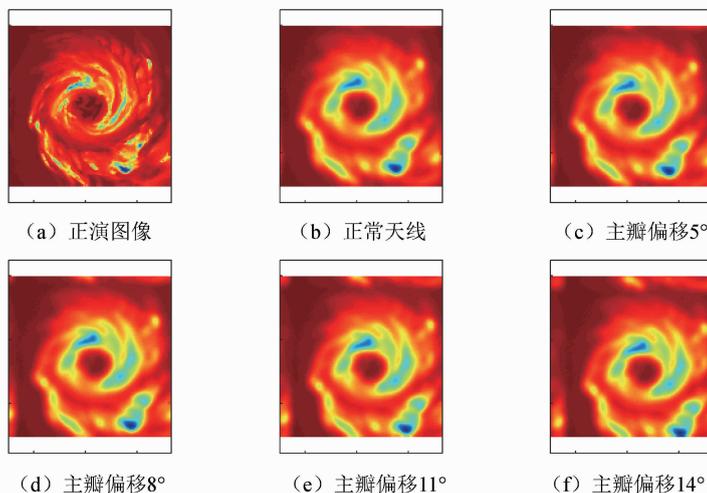


图 9 主瓣指向性偏移时对正演台风图像抽样结果

Fig.9 Sampling results of forward-looking typhoon images when main lobe directivity offsets

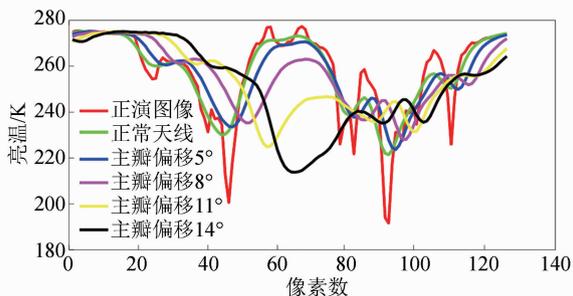


图 10 图 9 中亮温数据分布曲线吻合度分析

Fig.10 Concordance analysis of brightness temperature data distribution curves in Fig. 9

表 6 主瓣指向性偏移时的抽样结果

Tab.6 Sampling results when main lobe directivity offsets

主波束偏移量/(°)	R_{IFOV}/km	相关系数 C_{RTA}	噪声水平 σ_n/K
未偏移	25	0.926 0	0.360
0.5	33	0.860 3	0.365
0.8	—	0.575 8	0.368
1.1	—	0.253 7	0.369
1.4	—	0.126 2	0.374

仿真实验可得出以下结论:1)随反射面天线形变面积的增大,主瓣增益不断降低,第 1 副瓣电平逐渐升高,在亮温图像上表现为空间分辨率降低,噪声水平升高,图像质量降低,目标的亮温信息丢失;2)形变面积固定时,反射面天线形变位置越靠近中心,天线性能所受影响越大,图像质量越差;3)天线副反射面沿 X,Y 和 Z 轴偏移都会导致图像的空间分辨率降低,相关系数减小,噪声水平升高;沿 X 轴和 Y

3 结束语

本文详细探究了不同形式和不同程度的反射面天线形变对天线主瓣增益、副瓣电平等关键指标的影响,并根据各项指标的变化情况,模拟仿真风云三号微波成像仪 183 GHz 频段的台风眼正演亮温图像。

轴偏移还会使天线方向图发生偏移,继而导致亮温图像发生错位,产生大量错误信息,严重影响目标亮温信息的提取和观测。

仿真结果表明:天线形变对卫星成像质量存在一定影响,且呈规律性变化。由上可知,形变面积变化、形变位置变化和天线反射面晃动这 3 种情况均导致图像质量下降,图像空间分辨率降低,从而导致观测目标的亮温信息发生错误和丢失。其中天线的副反射面晃动导致的主波束偏移是最为关键的影响因素,应重点关注。上述探究结果为辐射计天线性能的分析提供依据,有利于辐射计的性能提升和改善。

因天线的形变形式复杂多样,针对目前的工作进展,后续还需从以下 2 个方面展开研究:1)进一步探究不同位置时形变面积变化对成像质量的影响,如将形变面积的位置分别设定在 Y 轴、X 轴、距中心 1/4 半径和 1/2 半径等,观察不同位置时面积变化对成像质量的影响规律是否相同;2)进一步探究天线形变幅度对卫星成像质量的影响,在形变面积和形变位置不变的情况下,改变形变幅度,观察天线辐射特性的变化规律。

参考文献

- [1] MENZEL W, PILZ D, AL-TIKRITI M. Millimeter-wave folded reflector antennas with high gain, low loss, and low profile[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2002, 44(3): 24-29.
- [2] RUSCHW V T, POTTER P D, BOOKER H G, et al. Analysis of reflector antennas department of electrical engineering university of southern California [C]//*IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, New York, USA, 1970: 523-526.
- [3] DUAND W, Rahmat-Samii Y. Reflector surface distortion compensation: a diffraction synthesis methodology[C]//*Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Ann Arbor, MI, USA, 1993: 242-245.
- [4] YANG Y, TAN L, MA J, et al. Effects of localized deformation induced by reflector antenna on received power[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(3): 396-400.
- [5] RUZE J. The effect of aperture errors on the antenna radiation pattern[J]. *Nuovi Cimenti*, 1952, 9(3): 364-380.
- [6] CHEN M, ZHANG Y, ZHAO X W, et al. Analysis of antenna around NURBS surface with hybrid MoM-PO technique[J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2007, 55(2): 407-413.
- [7] CHERRETTEA R, ACOSTA R J, LAM P T, et al. Compensation of reflector antenna surface distortion using an array feed[J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2002, 37(8): 966-978.
- [8] LINDLEY A. Analysis of distorted reflector antennas [C]//*Sixth International Conference on Antennas and Propagation*, Coventry, UK, 1989: 32-34.
- [9] GONZALEZ-VALDES B, MARTINEZ-LORENZO J A, RAPPAPORT C, et al. A new physical optics based approach to subreflector shaping for reflector antenna distortion compensation[J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2013, 61(1): 467-472.
- [10] LING J, GONG S, QIN S, et al. Radiation analysis of on-platform antenna using MoM-PO combined with surface-surface configuration[J]. *International Journal of RF & Microwave Computer-aided Engineering*, 2010, 20(6): 667-671.
- [11] 宋微微, 张小苗, 袁方成. 具有局部凸起形变反射面天线的方向图仿真[J]. *现代电子技术*, 2008, 31(7): 1-3.
- [12] HOLLINGER J P, PEIRCE J L, POE G A. SSM/I instrument evaluation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1990, 28(5): 781-790.
- [13] John I. Fast noise variance estimation [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 1996, 64(2): 300-302.