

空间目标光谱偏振特性

李雅男^{1,2}, 孙晓兵^{1,2}, 毛永娜³, 乔延利^{1,2}, 洪津^{1,2}

- (1. 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031 ;
2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031 ;
3. 中国科学院国家天文台, 北京 100012)

摘要: 偏振特性及其变化反映了目标的状态信息。文中讨论了采用偏振探测的方法对空间目标探测的思路与可行性, 介绍了空间目标偏振测量装置, 给出了空间目标的光谱偏振观测结果, 并测量了与实测目标相似的空间目标缩比模型的偏振特性, 对实测结果与仿真实验结果进行比较分析, 结果显示两者的偏振特性变化趋势符合的很好, 验证了空间目标光谱偏振观测技术的有效性。研究表明, 空间目标有其自身的偏振特性变化规律, 偏振度由午夜时的 5% 增加到黎明前的 23.8%, 其中太阳能电池板姿态对卫星的偏振特性影响尤为明显。说明了偏振观测是空间目标探测与识别的新方法。

关键词: 偏振观测; 空间目标; 光谱

中图分类号: TN202; O436.2 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2012)01-0205-06

Spectral polarization characteristic of space target

Li Yanan^{1,2}, Sun Xiaobing^{1,2}, Mao Yongna³, Qiao Yanli^{1,2}, Hong Jin^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterizations, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China ;
2. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China ;
3. National Astronomical Observations, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The polarization characteristics and their changes reflect the status of the targets. In this work, the concept and the feasibility of using the polarization detection to characterize space targets were discussed. Then the performance of a polarimetric device applied for space targets detection was introduced. Meanwhile, the results of polarimetric observation on space targets were given and the characteristic of scaled models which were similar to the actual targets were measured, respectively. By comparing the two results, it is demonstrated that the trends of the both polarization characteristics fit well with each other. Therefore, the validity of the polarimetric observation on space targets is confirmed. The polarization characteristics of space targets is revealed, for example, the degree of polarization will increase from 5% at midnight to 23.8% before dawn. Especially, the attitude of the solar panels plays a vital role in affecting the polarization characteristics of the satellites. It is indicated that the polarimetric observation is an innovative method applied for space targets detection and identification.

Key words: photopolarimetric observation; space target; spectrum

收稿日期: 2011-05-14; 修订日期: 2011-06-11

基金项目: 国家 863 计划(2002AA731041); 安徽省红外与低温等离子体重点实验室基金(2007C003018F)

作者简介: 李雅男(1984-), 女, 博士生, 主要从事遥感信息定量化的研究。Email: yananli@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 乔延利(1958-), 男, 博士生导师, 硕士, 主要从事光学遥感信息检测方面的研究。Email: yljiao@aiofm.ac.cn

0 引言

当空间目标很大或在低轨道时,可利用成像系统来确定目标的形状和方向;当目标很小或在高轨时,则目标成为点目标,其细节图像已经不可分,如何判断目标的形状与方向则变得困难,为了达到探测和识别目标的目的,目前已经发展了若干种探测手段^[1]。例如, Sanchez 等根据高轨碎片的光度特性来判断目标的生存状态以及特征^[2],通过同时性的多色测光来判断不同卫星平台^[3]。Jorgensen 等人的研究表明,不同材料的空间目标具有不同的光谱反射率,因此,采用低色散光谱观测对于目标的识别有重要的作用^[4]。虽然有以上探测手段,但识别深空目标仍有很大的困难,采用低色散光谱观测虽然能判断目标的材料,但是由于深空目标的能量太弱、信噪比很低而造成识别困难,采用反射光强度测光识别目标的方法的最大误差是受到大气和云层消光的影响而难以测准,所以寻求更多而有效的探测方法、获取深空目标更多的特征对于空间目标的探测是有深远意义的。

目标的偏振特性反映了材料的本征特性,在空间目标的探测中也得到了应用。Stead 在光电望远镜(美国俄亥俄州 Sulphur Grove 观测站)上加上偏振分析器完成空间目标的偏振观测,测量到一个卫星的偏振度最大为 39%^[5]。Kissel 通过研究表明:空间目标反射太阳光的偏振程度很高,并将偏振结果看成由漫反射和镜反射混合产生,按照该假设理论计算与观测结果符合较好,认为这足以证明偏振特性可以作为研究空间目标材料在太空中所受影响的一种有效手段^[6]。根据不同形状卫星的光学偏振观测结果,Beavers 等人表明偏振观测可以作为测试在轨目标状态、判断目标材料、空间环境对目标光学特性的影响,并将铝质材料和太阳能板表面的卫星偏振特性与理论计算结果相比,证明卫星在太空中材料确实发生了变化^[7]。

1 偏振探测原理

偏振探测对于人工目标材料的识别作用明显,空间目标的偏振特性不受大气消光的影响,夜晚观测时照明光源是太阳,空间目标主要是反射太阳光,

太阳光是非偏的,而空间目标散射光的偏振分析则表明空间目标的散射光是偏振的^[8-9],大气传输对空间目标散射光的偏振特性改变很小,公式(1)~(2)讨论了目标偏振光经大气传输后的结果。

$$I_x = \tau_x I_{x0} \quad I_y = \tau_y I_{y0} \quad I = I_x + I_y = \tau_x I_{x0} + \tau_y I_{y0}$$

$$P = \frac{I_x - I_y}{I_x + I_y} = \frac{\tau_x I_{x0} - \tau_y I_{y0}}{\tau_x I_{x0} + \tau_y I_{y0}} \quad (1)$$

式中: I_{x0}, I_{y0} 表示目标在大气顶的水平、垂直方向的强度; I_x, I_y 表示偏振光经大气传输在地面接收到的水平、垂直方向的强度; I 是总的光强度; P 是偏振度; τ_x, τ_y 则是大气对水平、垂直方向偏振光的衰减系数,由于大气透射对偏振光改变很小,可认为 $\tau_x = \tau_y = \tau$, 因此,

$$I = \tau(I_{x0} + I_{y0})$$

$$P = \frac{I_{x0} - I_{y0}}{I_{x0} + I_{y0}} \quad (2)$$

根据公式(1)~(2)可看出:光强度经大气传输后会被削弱,但是偏振度经大气传输后却可不改变。

空间目标表面材料的散射光偏振特性与目标组成材料和不同材料表面的入射角有关,由于目标与观测者以及光源相对位置(由目标的轨道和组成部分姿态所引起)的改变,观测几何示意图见图 1,探测到的散射光偏振状态会相应的改变。这些信号可能会由于特定目标的构成而不同,因此可以作为目标识别的特征。文中介绍了空间目标偏振测量装置,给出了空间目标的观测结果,并在实验室测量了与实测目标近似的空间目标缩比模型的偏振特性,并对实测结果与仿真实验结果进行比较分析。

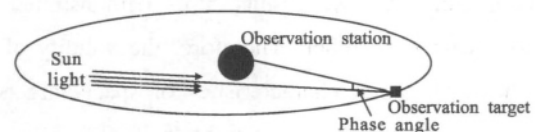


图 1 观测几何示意图

Fig.1 Geometry diagram for observation

2 观测实验

空间目标的偏振观测实验在中国科学院国家天文台完成。实验系统包括天文望远镜、光谱偏振分析器、面阵 CCD 探测器和相关的计算机控制采集系统。实验系统的总体组成框图如图 2 所示。

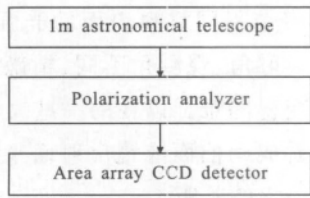


图 2 实验系统总体组成框图

Fig.2 Block diagram of experimental system

采用中国科学院国家天文台 1 m 天文望远镜,其主要技术参数如下:望远镜口径 1 m;焦距 $f/8$;焦点数量 2 个。该天文望远镜是反射式望远镜,它的前两个反射镜(主镜和副镜)视为典型正交,偏振特性可以忽略^[10]。出射光以 45° 入射到铝膜反射镜上,为了消除望远镜系统中铝膜反射镜的偏振影响,在偏振分析器中增加了一个与望远镜 45° 镜正交的铝镜。

探测器的主要技术参数如下:采用制冷型背照式面阵 CCD 探测器;型号 PI Versarray-1300 B;探测器像元数目 1340×1300 ;数据量化精度 16 bits。

光谱偏振分析器由中国科学院安徽光学精密机械研究所自主研制。其中,光谱偏振分析组件由滤光片、偏振片、 45° 消偏正交铝镜、旋转驱动部件及光机结构组成,组件的光谱波段范围为 $600 \sim 800 \text{ nm}$;中心波长为 700 nm 。经过实际测量,组件中使用的偏振片消光比优于 $10\,000:1$;偏振片旋转驱动角度范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。

测量工作包括测量目标的 Stokes 矢量和望远镜偏振测量系统的偏振定标。目标的 Stokes 矢量为 $S=[I \ Q \ U \ V]$,其中 I 表示总的光强; Q 表示水平和垂直线偏振分量之差; U 表示 45° 和 135° 线偏振分量之差; V 表示圆偏振。

来自星体的光经望远镜系统、偏振分析器到达 CCD 相机,探测器接收到的光强度随偏振片旋转角度变化公式如下^[11]:

$$I(\alpha) = \frac{1}{2}(I + Q \cos 2\alpha + U \sin 2\alpha) \quad (3)$$

式中: $I(\alpha)$ 为仪器测量值,表示在 xoy 平面内偏振片透过轴与 X 轴夹角为 α 的方向上进行观测所得到的光强。

在空间目标偏振成像测量时,采用分时的方式获取空间目标的 3 个偏振方向(0° , 60° 和 120°)上的强度值,即可求解出 Stokes 参量 I 、 Q 、 U ,如公式(4)

所示,再根据公式(4)和公式(5)计算偏振强度与线偏振度。

$$\begin{cases} I = \frac{2}{3}(I(0^\circ) + I(60^\circ) + I(120^\circ)) \\ Q = \frac{2}{3}(2I(0^\circ) - I(60^\circ) - I(120^\circ)) \\ U = \frac{2}{\sqrt{3}}(I(60^\circ) - I(120^\circ)) \end{cases} \quad (4)$$

对应的线偏振度 P 为:

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (0 \leq P \leq 1) \quad (5)$$

定标测量工作包括相机的本底图像测量、平场图像测量、一颗已知偏振为 6.1% 的偏振标准星 HD183143 和一颗已知非偏标准星 HD144579 的测量工作。

3 数据预处理

在进行偏振计算之前,将 3 个偏振方向的偏振图像分别按照天体普通光谱测光流程进行处理,先扣本底,再扣平场,然后用孔径测光,最后得出目标像元区域的数字 DN 值总和,根据公式(4)和公式(5)计算强度与线偏振度。

由于望远镜偏振测量系统本身有一定的偏振敏感性,并且大气对偏振光的传输 τ_x 、 τ_y 不一定完全相同,以一颗已知非偏标准星 HD144579 为参考来确定测量系统本身以及大气传输引起的偏振变化,非偏标准星理论上 $I(0^\circ) = I(60^\circ) = I(120^\circ)$, $P=0$,但是经过测量 $I(60^\circ) = 0.922\,957 \times I(0^\circ)$, $I(120^\circ) = 0.945\,167 \times I(0^\circ)$,所以测量的图像以该校正系数校正。然后以一颗偏振度为 6.1% 的偏振标准星 HD183143 的测量结果来计算误差。经过校正后,HD183143 的 $P=6.02\%$,误差为 1.3%。在下面的目标偏振数据处理过程中也是先经过校正,再根据公式(4)~(5)计算强度与线偏振度。

4 观测结果及讨论

获取的空间目标光谱偏振图像数据如图 3 所示。

图 3(a)和图 3(b)分别是两颗目标 A、B 在同一时刻的偏振图像数据,计算出目标 A 的偏振度为 4.6%,目标 B 的偏振度为 33.5%。对于同一颗目标,在不同时刻偏振度也是变化的,图 4 是一个带太阳能帆板的盒状空间目标的偏振观测结果随时间变化的特性

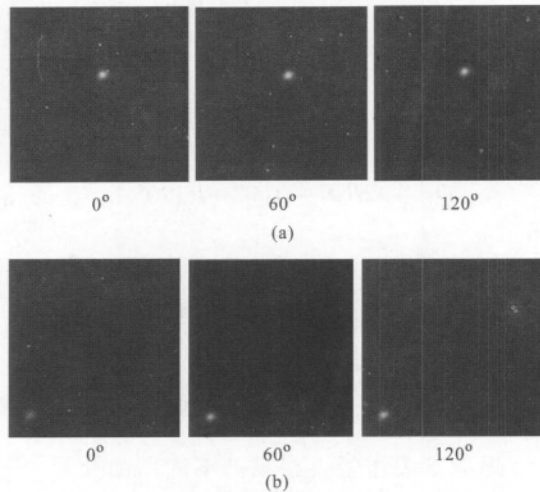


图 3 偏振图像数据

Fig.3 Photopolarimetric image data

曲线。图 4(a)是空间目标经定标后的星等随时间变化的曲线,它对应于偏振 Stokes 强度分量 I ; 图 4(b)是目标偏振度随时间变化曲线。随着观测时间的变化,太阳光照射在目标本体表面的入射角发生变化,由于目标在正常运行过程中,为了保证获取最大的能量,太阳能电池板会随着太阳入射角的变化而转动。所以,地面观测过程中,太阳能电池板的观测方向、观测到的强度和偏振度都会发生改变。图 4(a)中,随着时间的增加,相位角(光源-目标-探测器夹角)减少,光强度呈下降趋势,在 16:00 附近,由于入射角和观测角相接近,目标接近镜反射,所以有个峰值;图 4(b)中,随着时间的增加,偏振度由刚开始的 5% 逐渐增加到 23.8%。

由于空间目标是点目标,其具体形态细节已经不可分,难以解释其光度及偏振变化规律。因此,在进行实测数据的同时,笔者在实验室也进行了空间目标偏振特性的仿真实验。

实测的目标是一颗 GEO 目标,根据图 4(a)的光变特性可知,该目标是一颗正常运行的卫星,假定目标的太阳能电池板面向太阳的面积最大,由于是夏季观测,假定太阳板入射角为 20° ,观测角随时间变化,而目标的本体则一直面向地球,根据计算,观测站-卫星-地心夹角约为 5° ,太阳照射在本体的角度随时间变化,因此,在实验室模拟观测条件,在入射角、观测角近似相等的条件下,获取了空间目标缩比模型和各组成空间目标材料的偏振数据。空间目标主要是由本体、太阳能电池板和天线等组成,观测到

的光强度是许多个不同材料表面的光强度总和,由于各个部件的入射角、观测角不同,精确分析空间目标的光度变化变得困难,以往的一些文献中都是将目标表面近似看成朗伯面或镜反射面来分析,与实际测量结果有一定的差距。

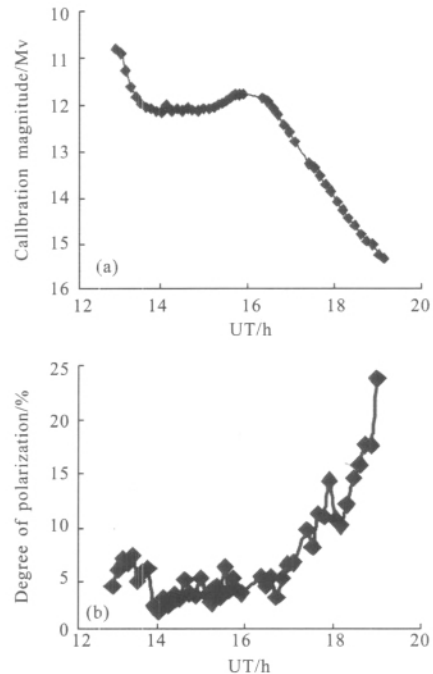


图 4 空间目标的偏振观测结果

Fig.4 Photopolarimetric observed results of space target

经过多次测试空间目标缩比模型偏振特性,结果表明,组成目标的各个部分中,太阳能电池板的偏振特性对整体的偏振特性贡献最大。图 5 是仿真实验用的卫星模型、太阳能电池板、本体三者的偏振特性曲线,横坐标是相位角(光源-目标-探测器夹角)。由于卫星本体的偏振度很小,约为 5%,其在整个目标面积中所占的比例也很小,所以卫星模型的偏振特性主要反映了太阳能电池板的偏振特性。

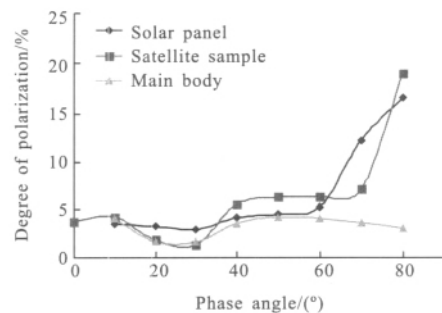


图 5 空间目标偏振特性仿真实验研究结果

Fig.5 Polarimetric simulated experimental result of space target

将实际观测数据与近似条件下的太阳能电池板偏振特性相比较,图 6(b)是将空间目标偏振度随时间变化的曲线转化为随相位角(太阳-目标-探测夹角)变化的特性曲线,并考虑观测日入射角、观测角的变化,太阳能电池板在实验室近似条件下的仿真实验结果。其中模拟结果 2 是缩比模型的太阳能电池板的偏振特性实验结果,如图 5 所示,考虑到不同太阳能电池板的偏振特性差异,模拟结果 1 是另一个外观的太阳能电池板的偏振特性实验结果,实物图如图 6(a)所示。将模拟实验结果用最小二乘法拟合,并与实测结果相比较,从图 6(b)中可看出,实测结果和模拟实验结果变化趋势相同,与模拟结果 1 的相关系数为 0.95,与模拟结果 2 的相关系数为 0.93,结果表明:目标偏振特性实测结果与太阳能电池板的偏振特性非常接近,偏振探测对太阳能电池板的姿态确定有重要的作用。

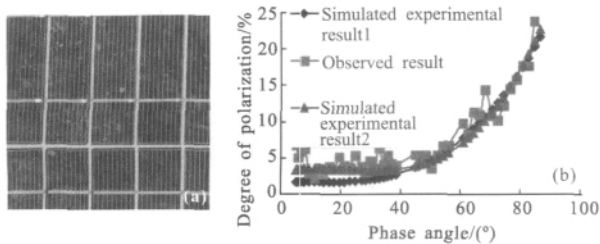


图 6 空间目标实测偏振度与太阳能电池板仿真实验结果相比较

Fig.6 Comparison of observed result and simulated experimental result

空间目标有其独特的偏振变化规律,这与其组成材料的偏振特性密切相关,在实验室测量 4 种空间目标常用的材料,如黄色镀铝聚酯薄膜,银色镀铝聚酯薄膜,铝板和太阳能电池板的多角度偏振特性,为了与高轨静止空间目标的偏振特性相比较,以下仅给出观测角为 0° 时,入射角从 $0^\circ\sim 80^\circ$ 变化的各种材料的偏振特性曲线,如图 7 所示,可以看出,不同材料在

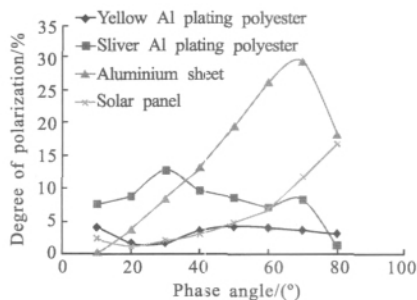


图 7 空间目标不同材料的偏振特性曲线

Fig.7 Polarization properties characteristic for different materials of space target

相同的轨道时的偏振变化规律也是不同的,这也为空间目标的探测识别提供了更多的信息。

5 结论

空间目标是人工目标,有其独特的偏振特性变化规律,计算表明,空间目标偏振度受大气传输影响可忽略不计,文中介绍了自行研制的空间目标光谱偏振探测实验装置,并利用该装置与国家天文台 1 m 望远镜转接获取了空间目标光谱偏振观测结果,同时开展了空间目标缩比模型的偏振特性实验,并将实测结果与实验室仿真结果相比较,结果表明,空间目标的偏振特性与太阳能电池板的偏振特性非常接近。因此,为采用偏振探测对太阳能电池板的姿态确定提供了可能。

由于空间目标偏振观测是分时进行的,所以难免会由于时变引进一定的误差,该误差可以采用同一像面上偏振成像技术予以消除^[12-14],目前该偏振成像装置正在研制中。

参考文献:

- [1] Tang Yijun, Jiang Xiaojun, Wei Jianyan, et al. Review of optical observations of high apogee space debris [J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29(4): 1094-1098. (in Chinese) 唐轶峻,姜晓军,魏建彦,等. 高轨空间碎片光电观测技术综述[J]. 宇航学报, 2008, 29(4): 1094-1098.
- [2] Sanchez D J, Gregory S A, Storm S, et al. Photometric measurements of geosynchronous satellites [C]//SPIE, 2000, 4091: 164-182.
- [3] Payne T E, Gregory S A, Sanchez D J, et al. Color photometry of geosynchronous satellites using the SILC filters[C]//SPIE, 2001, 4490: 194-199.
- [4] Jorgensen K, Africano J, Stansbery G, et al. Determining the material type of man-made orbiting objects using low resolution reflectance spectroscopy[C]//SPIE, 2001, 4490: 237-246.
- [5] Kissel K E. Polarization effects in the observation of artificial satellites [J]. *Planets, Stars and Nebulae Studied with Photopolarimetry*, 1974: 371-380.
- [6] Beavers W I, Tapia S, Cho J Y K. Photopolarimetric studies of resident space objects [C]//Abstracts of Lunar and Planetary Science Conference, 1991, 6(22): 67-68.
- [7] Stead R P. An Investigation of polarization produced by space objects [D]. USA: Air Force Institute of Technology,

- 1967.
- [8] Bush K, Crockett G, Barnardet C, et al. Satellite discrimination from active and passive polarization signatures: simulation predictions using the TASAT satellite model[C]// SPIE, 2002, 4481: 46–57.
- [9] Bush K. Simulating speckle polarization backscatter signatures from actively illuminated satellites [C]//SPIE, 2002, 4481: 211–222.
- [10] Giro E, Bonoli C. Polarization properties at the Nasmyth focus of the alt-azimuth TNG telescope [C]//SPIE, 2003, 4843: 456–458.
- [11] Cao Hanjun, Qiao Yanli, Yang Weifeng, et al. Characterization and analysis of the polarization images in remote sensing[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2002, 19: 373–378. (in Chinese)
- 曹汉军, 乔延利, 杨伟锋, 等. 偏振遥感图像特征表征及分析[J]. *量子电子学报*, 2002, 19: 373–378.
- [12] Pernechele C, Giro E, Fantinel D. Device for optical linear polarization measurements with a single exposure [C]//SPIE, 2003, 4843: 156–163.
- [13] Tan Bitao, Chen Lizi, He Yu, et al. Infrared detecting model of the missile target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 38(S2): 405–408. (in Chinese)
谭碧涛, 陈力子, 贺玉, 等. 导弹目标短波红外探测模型研究[J]. *红外与激光工程*, 2008, 38(S2): 405–408.
- [14] Wang Guoqiang, Wu Yuanhao. Ground-based measurement on the infrared characteristic of space object[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9): 1634–1639. (in Chinese)
王国强, 吴元昊. 空间目标红外辐射特征的地基测量[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(9): 1634–1639.

下期预览

基于非局部均值的连续太赫兹图像去噪处理研究

李琦, 夏志伟, 丁胜晖, 王骐

(哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150081)

摘要: 太赫兹辐射能够穿透大多数对可见光和近红外光不透明的物质。提高成像质量是成像系统的关键, 尤其对探测器性能较低的面阵成像更为重要。通过数字图像处理方法改善成像质量是一条重要的解决途径。应用非局部均值(NLM)分别对真实的透射扫描、反射扫描和透射面阵、反射面阵的太赫兹图像进行了去噪处理, 选取不同的控制参数进行了对比分析, 同时对比了均值滤波处理结果。实验结果表明: 非局部均值能够较好地去除连续太赫兹图像噪声、提高成像质量, 对噪声严重的面阵成像去噪效果最明显。非局部均值去噪并保持边缘能力明显好于均值滤波。