

## 光学成像载荷空间分辨率的球面靶标直接检测法

纪松<sup>1</sup>, 张永生<sup>1\*</sup>, 李凯<sup>2</sup>, 范大昭<sup>1</sup>, 杨伟铭<sup>2</sup><sup>1</sup>信息工程大学地理空间信息学院, 河南 郑州 450001;<sup>2</sup>军事科学院系统科学研究院, 北京 100044

**摘要** 空间分辨率是衡量遥感载荷光学成像性能的重要指标。传统二维扇形靶标影像难以直接用于载荷空间分辨率检测,精度受限于载荷构像模型以及影像校正处理方法。本文结合圆球球面数学模型,设计了扇形与网格混合的球面靶标,提出了一种直接在球面靶标影像上进行光学成像载荷空间分辨率检测方法。该方法针对球面同心圆移动椭圆成像以及偏心率局部一致特点,沿球面同心圆圆心直线方向进行多尺度椭圆拟合,并通过多尺度拟合椭圆长半轴的相对比例关系来精确计算遥感载荷空间分辨率,达到直接基于球面靶标中心投影影像进行载荷空间分辨率检测的效果。采用仿真球面靶标进行检测方法准确性验证,实验结果表明,本文方法具有优于传统检测方法的检测精度。进一步采用中国(嵩山)卫星遥感定标场中布设的实体球面靶标,开展了光学成像载荷空间分辨率检测实验,验证了本文方法的空间分辨率直接检测能力和检测结果有效性。

**关键词** 扇形靶标; 球面靶标; 光学成像载荷; 空间分辨率

**中图分类号** TP751 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS221698

## 1 引言

我国高分辨率天空地多源遥感对地观测体系的构建与发展,为遥感测绘及应用服务提供了大量时效性强、覆盖范围广、信息量丰富的遥感数据<sup>[1-2]</sup>。海量遥感数据的获取与使用,对遥感数据处理及应用技术提出了更高要求,不断促进遥感技术的智能化进步<sup>[3-4]</sup>。在智能化测绘背景下<sup>[5]</sup>,遥感智能处理的实现及应用服务不只依赖于遥感处理算法与模型的智能化提升,也对遥感数据成像质量和对地定位能力提出了更高要求<sup>[6]</sup>。其中,遥感数据成像质量的好坏直接决定了遥感智能解译水平、遥感测绘产品精度以及遥感应应用服务能力,需要在遥感数据处理及应用之前作出准确评价。

遥感数据成像质量是评价地面目标辨别能力的重要参数,主要包括地面分辨率和调制传递函数(MTF)<sup>[7]</sup>。地面分辨率是指分辨地面目标最小细节的能力,在数字影像上通常指单个像元的地面采样距离(GSD),也称为成像载荷的空间分辨率。MTF则是衡量遥感载荷整体成像性能的重要指标<sup>[8]</sup>。对于航空航天遥感载荷而言,由于空间成像环境的负面影响作用,遥感数据的真实成像质量往往偏离其理想状态,造成数据的地面分辨率和MTF下降<sup>[9]</sup>。此时,如果直

接采用理论分辨率进行遥感影像处理及应用,则会导致遥感成图以及遥感产品质量的下降<sup>[10]</sup>。为此,对航空航天传感器载荷的影像获取性能进行评估,特别是对影像数据的地面分辨率进行检测,能够更好地辅助遥感数据处理及应用。

国内外通常通过建立大型野外高精度定标场,对遥感载荷性能进行检校与测试,如德国 Vaihingen/Enz、芬兰 Sjökuulla、挪威 Fredrikstada 和美国 Madison 航空定标场<sup>[11-13]</sup>,美国 Sioux Falls Range、Pueblo Range、Rolla Range 等航天定标场<sup>[14]</sup>,以及中国(嵩山)卫星遥感定标场、包头高分辨遥感综合定标场、敦煌和青海湖定标场等<sup>[10,14-15]</sup>。这些遥感定标场通常布设有多种类型的永久性辐射及几何靶标<sup>[16]</sup>,可以对高分辨率航空航天遥感载荷进行辐射与几何定标,并对载荷的成像性能和几何性能进行检测与分析。

在遥感载荷成像性能分析中,通常采用三线靶标和扇形靶标进行空间分辨率检测<sup>[17]</sup>。三线靶标通常由多根高低反射率线条(三根低反射率线条、两根高反射率线条,或者相反)构成单个靶标元素,两个同等尺度且相互垂直的靶标元素构成靶标单元,并由按照一定的公比逐渐变化的靶标单元构成整体靶标。扇形靶标通常由圆心向外等比扩展的高反射率靶条和低反射率

收稿日期: 2022-09-13; 修回日期: 2022-11-14; 录用日期: 2022-12-12; 网络首发日期: 2023-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(41971427)、高分遥感测绘应用示范系统(二期)(42-Y30B04-9001-19/21)、嵩山实验室项目(纳入河南省重大科技专项管理体系)(221100211000-4)、遥感与空间智能系统中原学者首席科学家工作室专项(2018007)

通信作者: \*yszhang2001@vip.163.com

靶条构成,整体上呈扇形结构,也称为扇形靶标。其中:三线靶标的分辨率检测优点在于简单直接,但是由于靶标离散布设,检测结果容易受到相位差因素影响,检测精度不高且无法检测多方向分辨率<sup>[10]</sup>;扇形靶标的靶条数量较多,且线宽呈周期性连续变化,能够有效避免三线靶标检测结果的偶然性并减小相位差因素的影响<sup>[18-19]</sup>,提高检测准确率,同时扇形靶标的圆心角通常大于直角,可实现多个方向的分辨率检测,因而在遥感定标场中得到了广泛应用。我国资源三号、天绘一号、高分系列等高分辨率光学遥感卫星以及常用的航空传感器、无人机载荷等通常都采用扇形靶标进行空间分辨率检测<sup>[10, 14-15, 20-21]</sup>。

遥感定标场中扇形靶标通常在二维平面上布设,由于遥感透视成像以及几何畸变影响,空间分辨率检测需要在近视垂直摄影或者几何纠正条件下进行<sup>[22]</sup>。当光学遥感载荷大角度成像时,由于较大的几何变形,靶标影像通常无法直接用于分辨率检测,即使在几何纠正处理条件下,由于边缘消减、像素混合效应的增强<sup>[14]</sup>,分辨率检测精度也将大幅降低。随着光学遥感载荷成像分辨率越来越高且大角度成像越来越成为新常态,扇形靶标的分辨率检测范围大幅缩小,此时构建占地面积更小、布设简易灵活且能够适应大视角遥感成像载荷空间分辨率检测的新型分辨率检测靶标,具有重要的研究意义。

本文在二维扇形靶标的基础上,针对遥感载荷成像时三维球面各向同性的特点,提出在球面上构建辐射状扇形分辨率检测靶标的思路,并在球面靶标设计基础上,对基于球面靶标的光学成像载荷空间分辨率检测方法及流程进行研究,以实现高分辨率光学成像载荷的空间分辨率检测应用。

## 2 球面靶标数学模型与设计模式

球面靶标主要是在圆球球面上布设遥感载荷空间分辨率检测时使用的辐射状靶条,兼顾影像 MTF 检测时使用的刃边靶标<sup>[9]</sup>,以进行光学载荷成像性能分析。本文分析并构建球面靶标数学模型,根据成像载荷空间分辨率检测需求,设计球面靶标的布设类型并

给出其布设方法。

### 2.1 球面靶标数学模型

设球面靶标原点  $O$  的位置为  $(X_0, Y_0, Z_0)$ , 圆球半径为  $r$ , 则在直角坐标系  $O-XYZ$  中, 球面上任意一点  $(X, Y, Z)$  可以表示为

$$(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2 + (Z - Z_0)^2 = r^2。 \quad (1)$$

球面点  $(X, Y, Z)$  还可以在球坐标系中表示为

$$\begin{cases} X = X_0 + r \sin(\theta) \cos(\tau) \\ Y = Y_0 + r \sin(\theta) \sin(\tau) \\ Z = Z_0 + r \cos(\theta) \end{cases}, \quad (2)$$

式中:  $\theta$  是靶标上球面点  $(X, Y, Z)$  与靶标原点的连线与  $Z$  轴正方向的夹角,  $0 \leq \theta \leq \pi$ ;  $\tau$  是靶标上  $Z$  轴与球面点  $(X, Y, Z)$  构成的平面与  $ZOX$  平面的夹角,  $0 \leq \tau \leq 2\pi$ 。

### 2.2 球面靶标设计模式

在球面靶标上布设辐射状靶条(三维扇形靶标)以及刃边靶标(三维网格靶标),是光学载荷成像性能分析的基础。综合辐射状靶条和刃边靶标,可设计多类型球面靶标,如图 1 所示。其中,图 1(a)为三维扇形靶标示意图,主要进行空间分辨率检测,图 1(b)为三维网格靶标布设示意图,主要用于影像 MTF 函数检测(也可以通过偏移扇形方式,进行空间分辨率检测),图 1(c)为三维扇形与网格混合靶标布设示意图,可同时进行空间分辨率和 MTF 函数检测。从图 1 中可以看出,不同类型的球面靶标具有不同的应用功能,具体靶标布设方式可以根据实际应用需求来选择。

基于球面靶标布设类型,采用靶标数学模型,对靶标布设模式进行设计,可以设计成如图 1(a)和图 1(b)所示的等分模式靶标,也可以设计成如图 1(c)所示的非等分模式靶标。等分模式球面靶标主要可以分为以下三种类型:1)将球坐标系中  $\theta$  角均匀划分,并将圆球上与  $Z$  轴成  $\theta$  角的圆弧( $\theta$  角对应的纬度方向圆弧)根据  $\tau$  角均匀划分,通过对球面的均匀剖分形成球面靶标;2)将球坐标系中的  $X$  正半轴均匀划分,计算过  $X$  正半轴平分点的截面圆弧与  $Z$  轴的夹角  $\theta$ , 根据  $\theta$  和  $\tau$  角对球面进行剖分,形成球面靶标;3)将球坐标系中的  $Z$  轴和  $\tau$  角均匀划分,计算过  $Z$  轴平分点的截面圆弧与  $Z$

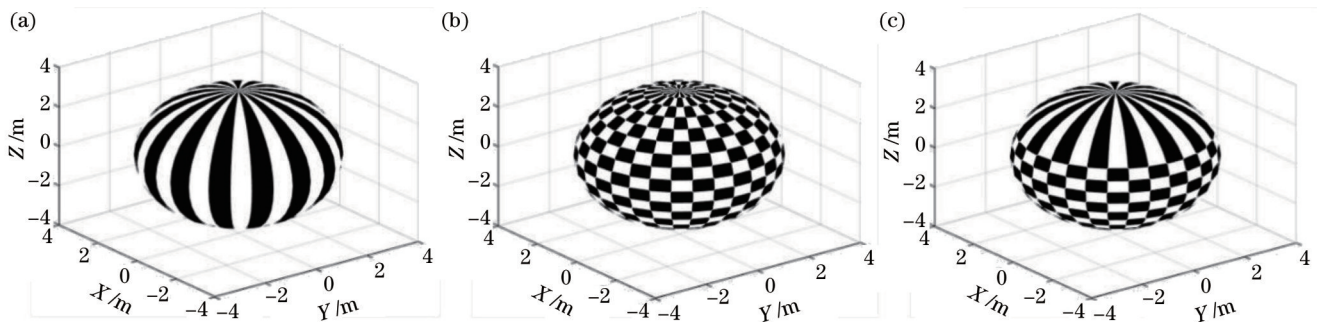


图 1 球面靶标布设类型。(a)三维扇形靶标布设;(b)三维网格靶标布设;(c)三维扇形与网格混合靶标布设

Fig. 1 Deployment type of spherical target. (a) Three-dimensional fan-shape deployment; (b) three-dimensional grid deployment; (c) three-dimensional fan-shape and grid mixture deployment



轴的夹角  $\theta$ , 根据  $\theta$  和  $\tau$  角对球面进行剖分, 形成球面靶标, 等分模式球面靶标参数取值变化情况如表 1 所示。

在球面靶标设计过程中, 可以根据分辨率检测、MTF 函数检测需要, 进行靶标设计。

表 1 球面靶标等分模式参数取值及特性表

Table 1 Parameter value and features of spherical target equal dividing mode

Equal dividing mode	Vertical arc	X axis	Z axis
Variation parameter	$\theta, \tau$	Positive half of X axis, $\tau$	Positive half of Z axis, $\tau$
Value range	$0 \leq \theta \leq \pi, 0 \leq \tau \leq 2\pi$	$0 \leq X \leq r, 0 \leq \tau \leq 2\pi$	$-r \leq Z \leq r, 0 \leq \tau \leq 2\pi$
Feature	Grid arc length is equal in the vertical direction	Projection length of grid arc to XOY plane is equal	Projection length of grid arc to ZOY or ZOY plane is equal

与二维扇形靶标的布设情况类似, 球面靶标布设通常也需要地形图测绘、布设区定位、点位计算与放样、靶标布设与检测等步骤<sup>[20]</sup>。二维扇形靶标通常占地面积较大, 例如, 中国(嵩山)卫星遥感定标场中的扇形靶标半径长度为 96 m, 扇形张角为 112°, 可满足分辨率优于 4 m 的高分辨率遥感载荷分辨率检测需求<sup>[15]</sup>。球面靶标一般用于亚米级高分辨率遥感载荷分辨率检测, 球体体积通常较小, 且由于靶标在球体上对称, 可在工程测量基础上进行安装布设。

### 3 基于球面靶标的光学成像载荷空间分辨率直接检测方法

#### 3.1 理想条件下空间分辨率检测方法

在理想条件下(正射投影成像, 或者通过正射纠正处理得到的成像条件), 球面靶标影像比例尺关系相对稳定, 光学成像载荷的空间分辨率为靶标正射影像上刚好可分辨的黑白靶条弧长。根据扇形靶标的空间分辨率检测方法<sup>[7]</sup>, 在球面靶标的正射影像上, 成像载荷空间分辨率的理想检测公式表示为

$$R = \frac{2\pi r}{k} \cdot \frac{N}{M} \cdot \frac{\sum_{j=1}^M \sqrt{(x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2}}{\sum_{i=1}^N \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}}, \quad (3)$$

式中:  $R$  为检测的载荷空间分辨率;  $r$  为球半径;  $k$  为球面靶标水平圆弧的平均分段数目(即黑白靶条数目);  $(x_0, y_0)$  为靶标中心在正射影像上的投影坐标;  $(x_i, y_i)$  为球面靶标影像在水平最大圆弧上检测的像点(检测出的数目为  $N$ );  $(x_j, y_j)$  为球面靶标影像在靶条上检测出的刚好可分辨点的像点(检测出的数目为  $M$ )。

根据式(2)和式(3), 设靶标的  $r$  和  $k$  取值固定,  $\theta$  变化取值, 得到球面靶标的靶条最大  $\widehat{L}$  弧长关于  $\theta$  的取

值函数  $\widehat{L}(\theta)$ , 以及光学成像载荷空间分辨率理想检测范围  $R_1$  和最大检测范围  $R_{\max}$ , 具体表示为

$$\begin{cases} \widehat{L}(\theta) = \frac{2\pi r}{k} \sin \theta, \theta \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right] \\ R_1 = (0, \widehat{L}(\theta_0)] \\ R_{\max} = \left(0, \widehat{L}\left(\frac{\pi}{2}\right)\right) \end{cases}, \quad (4)$$

式中:  $\theta_0$  为球面靶标具体布设时的  $\theta$  角取值; 理想检测范围  $R_1$  对应扇形靶条最大弧长; 最大检测范围  $R_{\max}$  对应球面靶标理想投影条件下  $\theta$  角为 90° 时的扇形靶条最大弧长。

设置球面靶标参数, 对式(4)进一步分析, 设靶标球体半径  $r=3.26$  m,  $k=20$ ,  $\theta$  分别取值为 90°, 65° 和 6°, 得到遥感载荷空间分辨率检测范围为  $R_1$  和  $R_{\max}$ , 结果如图 2 和表 2 所示。图 2 为球面靶标在不同  $\theta$  取值条件下的分辨率检测范围, 表 2 为对应的靶标检测范围结果。从图 2(a) 中可以看出, 当球面靶标布设为扇形靶标时,  $R_1$  等于  $R_{\max}$ , 为球体投影到水平平面上的靶条最外层弧长。从图 2(b) 和图 2(c) 中可以看出, 当球面靶标布设为扇形/网格混合靶标时,  $R_1$  小于  $R_{\max}$ , 且  $R_{\max}$  需要通过内层扇形靶条与交错网格块构成的“交错式”投影靶标(如图中红色靶标块构成的“交错靶条”)检测获取。

由于交错靶条在成像过程中容易受到边缘消减、像素混合等效效应影响, 难以准确检测出网格块接边处的载荷空间分辨率。而且, 随着网格块数目的不断增加, 交错靶条受到的成像影响将会越大, 其分辨率检测准确性和可靠性将会大幅降低。同时, 为了兼顾靶标的空间分辨率与 MTF 检测能力, 在球面靶标分辨率设计时, 通常采用图 2(b) 所示的靶标模式, 并且采用  $R_1$  指标进行载荷的空间分辨率检测。

表 2 球面靶标布设参数及其分辨率检测范围(设球形靶标半径  $r=3.26$  m)

Table 2 Deployment parameters and resolution detection range of spherical target (target radius  $r=3.26$  m)

Spherical target deployment mode	Horizontal arc division [number/angle / (°)]	Value range of $\theta$ / (°)	Value range of $R_1$ / m	Value range of $R_{\max}$ / m
Target 1, Fig. 2(a)	20/18	[0, 90]	(0, 1.0242)	—
Target 2, Fig. 2(b)	20/18	[0, 65]	(0, 0.9282)	(0, 1.0242)
Target 3, Fig. 2(c)	20/18	[0, 6]	(0, 0.1071)	(0, 1.0242)

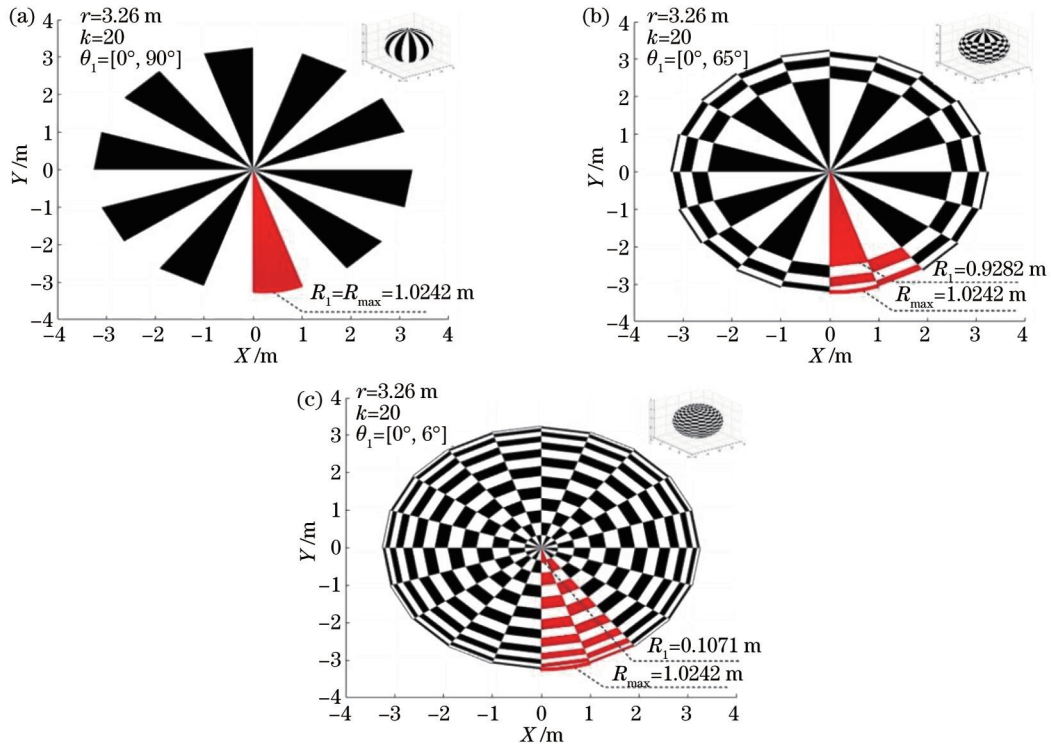


图 2 球面靶标空间分辨率检测范围。(a)三维扇形靶标分辨率检测;(b)三维扇形/网格混合靶标分辨率检测;(c)三维网格靶标分辨率检测

Fig. 2 Spatial resolution detection range of spherical target. (a) Three-dimensional fan-shaped target resolution detection; (b) three-dimensional fan-grid-shaped target resolution detection; (c) three-dimensional grid-shaped target resolution detection

### 3.2 中心投影条件下空间分辨率直接检测方法

实际条件下,球面靶标通常以中心投影(面中心投影以及线中心投影)方式进行成像。根据中心投影影像的比例尺特性<sup>[13]</sup>,球面靶标同心圆(扇形靶条上以球面最顶为同心圆)具有高程差异造成的投影变形以及比例尺差异。如果直接使用球面靶标中心投影影像进行传感器空间分辨率检测,理想检测方法及其分辨率检测范围就难以直接适用,需要研究改进并形成中心投影条件下的分辨率检测方法。

#### 3.2.1 球面靶标同心圆中心投影移动椭圆成像分析

设传感器成像时刻所在的像空间坐标系为  $O_{\text{cam}}-X_{\text{cam}}Y_{\text{cam}}Z_{\text{cam}}$ (像面为  $I_0$ ),球面靶标自身所在的直角坐标系为  $O-XYZ$ ,靶标所在的地面坐标系为  $O_g-X_gY_gZ_g$ ,且  $O-XYZ$  与  $O_g-X_gY_gZ_g$  坐标轴互相平行。在坐标系设置条件下,本文重点分析以下三种类型的球面靶标投影成像特性:整体靶标的成像特性,过球面最顶点(扇形靶条中心点)竖直线段的成像特性,以及扇形靶条上球面最顶点同心圆的成像特征,成像特征示意图分别见图 3(a)~(c)。

图 3(a)中,在中心投影状态下,从传感器成像中心  $O_{\text{cam}}$  出发的射线与球面靶标的表面相切(A、B为两个切点,其像点为  $a$  和  $b$ ),各切点在靶标表面上构成一个圆(切点圆),即从传感器成像中心与切点圆构成圆锥,像面  $I_0$  在圆锥上的截面即为球面靶标的成像,该截

面最外层曲线为圆锥曲线<sup>[23]</sup>(如包含像点  $a$  和像点  $b$  的曲线)。圆锥曲线包括椭圆(圆为椭圆的特例)、抛物线、双曲线<sup>[24]</sup>,在非大倾斜成像条件下,球面靶标通常成像为椭圆,非椭圆形状成像的球面靶标,由于其在影像上的投影变形比较明显,一般不用于分辨率检测。

图 3(b)中,过球面靶标坐标原点  $O$ 、沿  $Z$  轴方向的球面最高点  $A$  和最低点  $B$  的线段  $AOB$ ,在中心投影条件下成像为线段  $ab$ ,由于球面靶标设计时,靶标直角坐标系的  $Z$  轴平行于地面坐标系的  $Z_g$  轴,因此线段  $AB$  为地面铅垂线,根据地面铅垂线的中心投影性质<sup>[25]</sup>,线段  $ab$  的延长线过像底点(设为  $p_0$ ),即球面靶标上的  $Z$  轴线在影像上的成像为过像底点的线段。

图 3(c)中,球面靶标上与  $Z$  轴垂直的截面为相互平行的圆,且所有圆的圆心过  $Z$  轴。根据中心投影性质,平面圆的中心投影的最外层曲线同样为圆锥曲线<sup>[26]</sup>,且所有圆锥曲线的中心与影像底点在同一条直线上。

根据上述分析,得到球面靶标中心投影成像分析结论:沿靶标球面最顶点均匀布置的扇形靶标,在中心投影条件下(摄站中心偏离球面顶点的地面铅垂线),空间分辨率检测时截取的球面扇形靶标同心圆在二维影像上表现为椭圆,且靶标同心圆圆心垂直连线在二维影像上沿着影像底点辐射线移动。



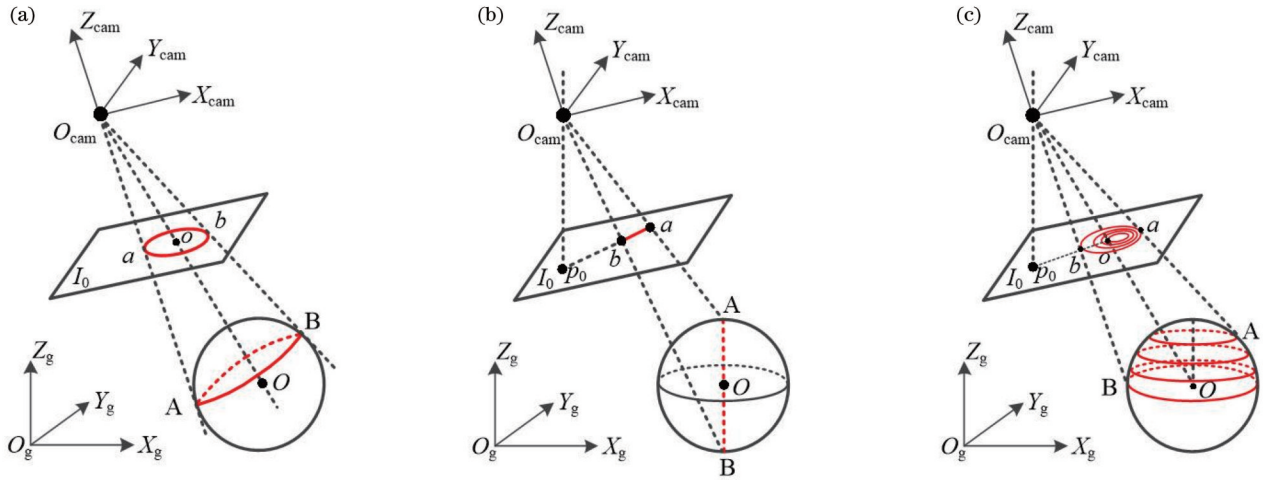


图 3 球面靶标中心投影示意图。(a)三维靶标中心投影;(b)靶标 Z 轴中心投影;(c)靶标 Z 扇形大弧中心投影

Fig. 3 Schematic diagram of spherical target center projection. (a) 3D target center projection; (b) center projection of target Z axis; (c) center projection of fan-shaped arc along target Z axis

### 3.2.2 球面靶标同心圆成像椭圆偏心率误差分析

根据球面靶标非垂直中心投影变形分析结论,球面扇形靶条中心圆以移动椭圆方式成像。本节主要通过成像模型以及参数模拟方式,对成像椭圆偏心率差异进行分析。

设靶标球面上的点坐标为  $(X, Y, Z)$ , 靶标成像时的成像传感器摄站原点为  $(X_0, Y_0, Z_0)$ , 靶标通过传感器成像的像点为  $(x, y)$ 。同时,设面阵中心投影传感器成像时刻的焦距为  $f$ , 成像时刻的姿态角为  $(\varphi, \omega, \kappa)$ , 在不考虑坐标系变换关系条件下,靶标球面点的成像方程为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda} R^T(\varphi, \omega, \kappa) \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda} \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中:  $\lambda$  为比例系数;  $R(\varphi, \omega, \kappa)$  为旋转矩阵(其中,  $\varphi$  为绕 Y 轴旋转角,  $\omega$  为绕 X 轴旋转角,  $\kappa$  为绕 Z 轴旋转角)<sup>[27]</sup>, 矩阵元素为  $(a_1, a_2, a_3; b_1, b_2, b_3; c_1, c_2, c_3)$ 。

根据式(1), 给定  $\theta = \theta_0$  对应的单个靶标同心圆, 代入(5)式, 简化得

$$\begin{cases} \frac{x}{-f} = \frac{a_1 \sin(\theta_0) \cos(\tau) + b_1 \sin(\theta_0) \sin(\tau) + c_1 \cos(\theta_0)}{a_3 \sin(\theta_0) \cos(\tau) + b_3 \sin(\theta_0) \sin(\tau) + c_3 \cos(\theta_0)} = \frac{a_1 \cos(\tau) + b_1 \sin(\tau) + c_1 \cot(\theta_0)}{a_3 \cos(\tau) + b_3 \sin(\tau) + c_3 \cot(\theta_0)} \\ \frac{y}{-f} = \frac{a_2 \sin(\theta_0) \cos(\tau) + b_2 \sin(\theta_0) \sin(\tau) + c_2 \cos(\theta_0)}{a_3 \sin(\theta_0) \cos(\tau) + b_3 \sin(\theta_0) \sin(\tau) + c_3 \cos(\theta_0)} = \frac{a_2 \cos(\tau) + b_2 \sin(\tau) + c_2 \cot(\theta_0)}{a_3 \cos(\tau) + b_3 \sin(\tau) + c_3 \cot(\theta_0)} \end{cases} \quad (6)$$

在成像视角较小情况下,  $R(\varphi, \omega, \kappa)$  接近单位矩阵, 即矩阵中  $b_1, c_1, a_2, c_2, a_3, b_3$  值接近于 0, 在  $\cos(\tau)$  和

$\sin(\tau)$  取值区间较小、 $\cot(\theta_0)$  取值空间较大情况下, 进一步简化式(6), 得

$$\begin{cases} x = -f \frac{a_1 \cos(\tau) + c_1 \cot(\theta_0)}{c_3 \cot(\theta_0)} = -f \frac{c_1}{c_3} - f \frac{a_1}{c_3 \cot(\theta_0)} \cos(\tau) \\ y = -f \frac{b_2 \sin(\tau) + c_2 \cot(\theta_0)}{c_3 \cot(\theta_0)} = -f \frac{c_2}{c_3} - f \frac{b_2}{c_3 \cot(\theta_0)} \sin(\tau) \end{cases} \quad (7)$$

根据式(7)以及椭圆参数方程<sup>[24]</sup>, 在成像视角较小情况下, 球面靶标非垂直中心投影影像表现为椭圆, 长、短半轴分别为  $-a_1 f / [c_3 \cot(\theta_0)]$  与  $-b_2 f / [c_3 \cot(\theta_0)]$ , 即椭圆形状与  $\theta_0$  相关, 偏心率与  $\theta_0$  无关。因此, 沿靶标球面最顶点均匀布设的扇形靶标,

在不同高度情况下, 成像椭圆形状各异但偏心率基本保持一致。

在成像视角较大情况下, 将式(5)中的像点进一步表示为关于的  $\tau$  函数  $F(\tau)$  和  $G(\tau)$ :

$$\begin{cases} x = F(\tau) = -f \frac{a_1 \cos(\tau) + b_1 \sin(\tau) + c_1 \cot(\theta_0)}{a_3 \cos(\tau) + b_3 \sin(\tau) + c_3 \cot(\theta_0)} \\ y = G(\tau) = -f \frac{a_2 \cos(\tau) + b_2 \sin(\tau) + c_2 \cot(\theta_0)}{a_3 \cos(\tau) + b_3 \sin(\tau) + c_3 \cot(\theta_0)} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} A_1 = a_1 \cos(\tau) + b_1 \sin(\tau) + c_1 \cot(\theta_0) \\ A_2 = a_2 \cos(\tau) + b_2 \sin(\tau) + c_2 \cot(\theta_0) \\ A_3 = a_3 \cos(\tau) + b_3 \sin(\tau) + c_3 \cot(\theta_0) \end{cases} \quad (9)$$

将  $F(\tau)$  和  $G(\tau)$  函数关于  $\tau$  进行求导, 并计算导数的比值:

设:

$$\frac{\partial x / \partial y}{\partial \tau / \partial \tau} = \frac{[b_1 \cos(\tau) - a_1 \sin(\tau)] A_3 - [b_3 \cos(\tau) - a_3 \sin(\tau)] A_1}{[b_2 \cos(\tau) - a_2 \sin(\tau)] A_3 - [b_3 \cos(\tau) - a_3 \sin(\tau)] A_2} = \frac{(a_3 b_1 - a_1 b_3) \tan(\theta_0) + (a_3 c_1 - a_1 c_3) \sin(\tau) + (b_1 c_3 - b_3 c_1) \cos(\tau)}{(a_3 b_2 - a_2 b_3) \tan(\theta_0) + (a_3 c_2 - a_2 c_3) \sin(\tau) + (b_2 c_3 - b_3 c_2) \cos(\tau)} \quad (10)$$

进一步, 根据矩阵行列式性质, 得到

$$\frac{\partial x}{\partial \tau} / \frac{\partial y}{\partial \tau} = \frac{\begin{vmatrix} \cos(\tau) & a_1 & a_3 \\ \sin(\tau) & b_1 & b_3 \\ -\tan(\theta_0) & c_1 & c_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \cos(\tau) & a_2 & a_3 \\ \sin(\tau) & b_2 & b_3 \\ -\tan(\theta_0) & c_2 & c_3 \end{vmatrix}}, \quad (11)$$

式中:  $\|$  为行列式标量取值。

设向量

$$\begin{cases} e_1 = (a_1 & b_1 & c_1) \\ e_2 = (a_2 & b_2 & c_2) \\ e_3 = (a_3 & b_3 & c_3) \\ e_4 = (\cos(\tau) & \sin(\tau) & -\tan(\theta_0)) \end{cases} \quad (12)$$

根据向量混合积的概念, 三阶矩阵的行列式等于向量混合积, 则式(11)可以表示为

$$\frac{\partial x}{\partial \tau} / \frac{\partial y}{\partial \tau} = \frac{\begin{vmatrix} \cos(\tau) & a_1 & a_3 \\ \sin(\tau) & b_1 & b_3 \\ -\tan(\theta_0) & c_1 & c_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \cos(\tau) & a_2 & a_3 \\ \sin(\tau) & b_2 & b_3 \\ -\tan(\theta_0) & c_2 & c_3 \end{vmatrix}} = \frac{e_4 \cdot (e_1 \times e_3)}{e_4 \cdot (e_2 \times e_3)} = \frac{\|e_1 \times e_3\|_2 \|e_4\|_2 \cos\langle (e_1 \times e_3), e_4 \rangle}{\|e_2 \times e_3\|_2 \|e_4\|_2 \cos\langle (e_2 \times e_3), e_4 \rangle} \quad (13)$$

结合向量叉积的概念, 有  $e_1, e_2, e_3$  正交且模为 1, 则  $\|e_1\|_2 = \|e_2\|_2 = \|e_3\|_2 = 1$ , 且  $\|e_1 \times e_3\|_2$  和  $\|e_2 \times e_3\|_2$  为各自向量构成的四边形面积, 值均为 1。由于旋转矩阵  $e_1, e_2, e_3$  正交, 即  $(e_1 \times e_3)$  法向量为  $e_2, (e_2 \times e_3)$  法向量为  $e_1$ , 则式(13)表示为

$$\frac{\partial x}{\partial \tau} / \frac{\partial y}{\partial \tau} = \frac{\cos\langle e_2, e_4 \rangle}{\cos\langle e_1, e_4 \rangle} \quad (14)$$

从式(14)中可以得到: 球面圆在中心投影影像上的椭圆成像, 其导数比值等于“球面圆弧与圆心连接向量”与旋转矩阵  $R$  的第 2 和第 1 行向量的夹角余弦比值

函数, 长短半轴比值等于比值函数的系数。当球面圆位于旋转矩阵正交空间中时, 特别是当球面圆位于靶标顶部时, 该比值函数的系数具有较好的稳定性, 即成像椭圆离心率同样基本保持一致。

本文设置常用航空航天传感器成像参数(包含大倾角成像条件, 即对应较大的  $\varphi$  和  $\omega$  姿态角), 模拟各分辨率处靶条中心圆的成像, 计算并分析椭圆的离心率差异。同时, 设椭圆离心率误差引起的分辨率最大检测误差为  $\Delta R_{\max}$ , 即  $\Delta R_{\max}$  等于椭圆短半轴最大测量差值与长半轴测量值的比值乘以靶标最大检测分辨率, 计算方法见下式。实际分辨率检测过程中, 分辨率误差等于该分辨率处椭圆离心率误差乘以该处的分辨率检测真值, 远小于  $\Delta R_{\max}$  值, 本文以分辨率最大检测误差进行分析, 模拟结果见表 3。

$$\Delta R_{\max} = \left( \sqrt{1 - e_{\max}^2} - \sqrt{1 - e_{\min}^2} \right) R_{\max} \quad (15)$$

从表 3 中可以看出, 对于半径  $r=3.26 \text{ m}$  的常用球形靶标, 在模式 1、模式 2 和模式 3(航空传感器模拟成像参数)条件下,  $\theta$  角为  $2^\circ \sim 45^\circ$  之间的成像椭圆离心率偏差最大为 0.0008, 分辨率最大检测误差为 4.3 mm, 模式 4(航天传感器模拟成像参数)条件下,  $\theta$  角为  $2^\circ \sim 45^\circ$  之间的成像椭圆离心率偏差最大为 0.0009, 分辨率最大检测误差为 3.5 mm。在实际航空航天遥感成像时, 影像成像角度通常低于模拟成像角度, 且球面靶标成像位置更接近于影像中心, 为此椭圆离心率造成的分辨率检测误差远低于  $\Delta R_{\max}$ , 即可以认为球面扇形靶条中心圆的椭圆成像具有相同的椭圆离心率。

### 3.2.3 基于定方向移动椭圆拟合的球面靶标分辨率直接检测方法

根据前述分析, 在中心投影条件下, 球面靶标同心圆以椭圆方式进行成像, 且椭圆圆心在像底点辐射线上移动, 这导致理想条件下根据式(3)来确定遥感载荷空间分辨率的方法不再准确。但是, 球面靶标同心圆成像椭圆离心率误差较小, 本文通过球面靶标成像椭圆长半轴的相对比例关系来精确计算遥感载荷空间分辨率, 即遥感载荷空间分辨率  $R$  表示为



表 3 球面扇形靶条中心圆椭圆成像偏心率(球形靶标半径  $r=3.26\text{ m}$ )Table 3 Eccentricity of circular ellipse of spherical fan-shaped target strip (spherical target radius  $r=3.26\text{ m}$ )

$\theta$ angle of spherical target ( $r=3.26\text{ m}$ ) ( $f=0.004\text{ m}$ )	Ellipse eccentricity $e$			
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
	$X_0=200\text{ m } \varphi=15^\circ$ $Y_0=100\text{ m } \omega=20^\circ$ $Z_0=300\text{ m } \kappa=10^\circ$	$X_0=400\text{ m } \varphi=25^\circ$ $Y_0=300\text{ m } \omega=25^\circ$ $Z_0=400\text{ m } \kappa=20^\circ$	$X_0=600\text{ m } \varphi=35^\circ$ $Y_0=500\text{ m } \omega=30^\circ$ $Z_0=500\text{ m } \kappa=30^\circ$	$X_0=10\text{ km } \varphi=35^\circ$ $Y_0=5\text{ km } \omega=30^\circ$ $Z_0=400\text{ km } \kappa=10^\circ$
$45^\circ$	0.7961	0.9943	0.9206	0.8572
$40^\circ$	0.7963	0.9943	0.9205	0.8575
$30^\circ$	0.7965	0.9944	0.9202	0.8578
$20^\circ$	0.7967	0.9944	0.9199	0.8581
$10^\circ$	0.7968	0.9944	0.9198	0.8581
$5^\circ$	0.7969	0.9944	0.9198	0.8581
$2^\circ$	0.7969	0.9945	0.9198	0.8581
Max eccentricity error	0.0008	0.0002	0.0008	0.0009
Max resolution detection error /m	0.0024	0.0043	0.0043	0.0035

$$R = \frac{2\pi r}{k} \cdot \frac{a_1}{a_0}, \quad (16)$$

式中:  $a_1$  为分辨率检测结果对应椭圆的长半轴;  $a_0$  为扇形靶条最外层椭圆的长半轴。

根据球面靶标同心圆中心投影移动椭圆成像、偏心率误差分析及式(16), 本文提出一种基于直线方向变尺度移动椭圆拟合的球面靶标分辨率直接检测方法, 主要技术思路为: 首先计算球面靶标中扇形靶条同心圆的椭圆圆心直线方向, 随后计算成像椭圆的长半轴和偏心率, 最后在直线方向采用定偏心率固定长半轴变化的椭圆截取靶条影像, 通过刚好可分辨点像点处与最外层靶条处成像椭圆长半轴的比例关系, 获取空间分辨率检测结果, 主要步骤如下。

1) 直接选取待分辨率检测的影像数据, 从含有球面靶标的影像区域中提取扇形靶条最外层靶条像点、交错靶条像点, 采用椭圆数学模型进行像点拟合, 得到拟合模型结果。

2) 根据拟合得到的椭圆数学模型, 计算各个椭圆的圆心, 拟合生成椭圆圆心直线, 作为分辨率检测的椭圆圆心基准直线方向。同时, 根据扇形靶条最外层椭圆数学模型, 计算该椭圆的长半轴和偏心率, 作为分辨率检测的基准长半轴和基准偏心率。

3) 从扇形靶标的中心像点开始, 沿着椭圆圆心基准直线, 向扇形靶条最外层靶条椭圆圆心方向, 逐步选取影像点。将选取的像点作为新的椭圆圆心, 根据基准偏心率, 构建长半轴连续变化的椭圆(可以根据椭圆圆心位置关系, 设置长半轴初值), 并截取扇形靶条影像。

4) 构建扇形靶条影像椭圆截面的灰度曲线, 分析灰度曲线的变化特性, 获取刚好可分辨的靶条影像。如果灰度曲线的变化特性无法对应刚好可分辨的靶条影像, 则重复步骤 3, 选取下一个椭圆圆心, 构建新的

椭圆并截取扇形靶条影像, 直至得到刚好可分辨的靶条影像。

5) 根据刚好可分辨靶条影像椭圆的长半轴, 球面靶标设计参数以及扇形靶条的理想最大检测分辨率, 分析并计算待分析影像对应的载荷空间分辨率, 获取分辨率检测结果。

## 4 实验与分析

实验采用了中国(嵩山)卫星遥感定标场中固定布设的球面靶标(球体通过实地测量后安装, 球面靶标内容可根据检测需要进行更换), 其布设影像图如图 4 所示。图 4 虚线框中球面靶标的半径为  $3.26\text{ m}$ , 上下半球各分为 5 层, 其中最上层为球面扇形靶标, 其余层次均为刃边靶标。每层靶标的高度为半径长度的  $1/5$ , 且每层靶标的水平弧长被均匀划分为 18 份。根据靶标设计参数, 最上层球面扇形靶标的理想最大检测分辨率为  $0.6828\text{ m}$ , 靶标在工程测量仪器辅助下安装, 分辨率检测相对误差不超过  $0.1\text{ cm}$ 。

同时, 实验采用了大疆无人机(精灵 Phantom 4 Pro), 从不同高度位置和不同成像角度处, 对球面靶标进行了摄影。摄影相机型号为 FC330, 单个像素对应地面距离的理论计算公式为  $H/36.5$  (单位为:  $\text{cm}/\text{pixel}$ ,  $H$  为航高)<sup>[28]</sup>, 影像的幅面大小为  $4000\text{ pixel} \times 3000\text{ pixel}$ 。本文在实验中选取非垂直摄影角度获取的影像数据, 直接进行分辨率检测。

### 4.1 球面靶标分辨率检测方法准确性分析模拟实验

根据实验数据给出的球面靶标设计参数, 通过参数模拟方式, 对式(16)中给出的球面靶标空间分辨率检测公式进行分析, 以验证基于定方向移动椭圆拟合的球面靶标分辨率检测方法的准确性。采用表 3 中给出的球面靶标在模式 1~4 条件下的成像参数, 根据式(5)得到球面靶标同心圆模拟成像, 结果如图 5 所示。

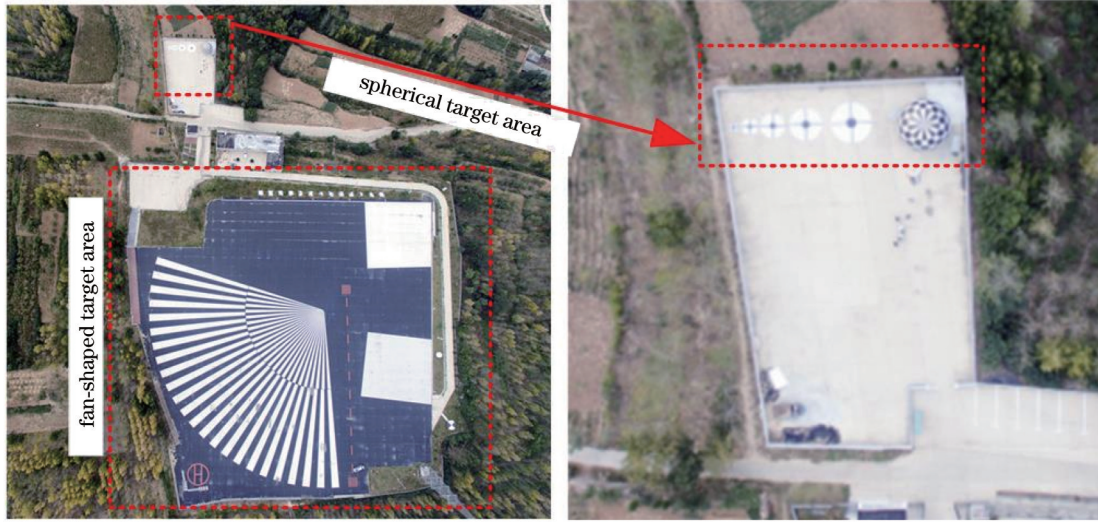


图 4 中国(嵩山)卫星遥感定标场球面靶标布设影像

Fig. 4 Spherical target image of China (Songshan) satellite remote sensing calibration field

根据模拟成像结果,拟合计算各个成像椭圆( $\theta=45^\circ, 40^\circ, 30^\circ, 20^\circ, 10^\circ, 5^\circ, 2^\circ$ )的长半轴、圆心距离、实际地

面空间距离与 $\theta=45^\circ$ 条件下的相应距离比值,结果见图 5 和表 4。

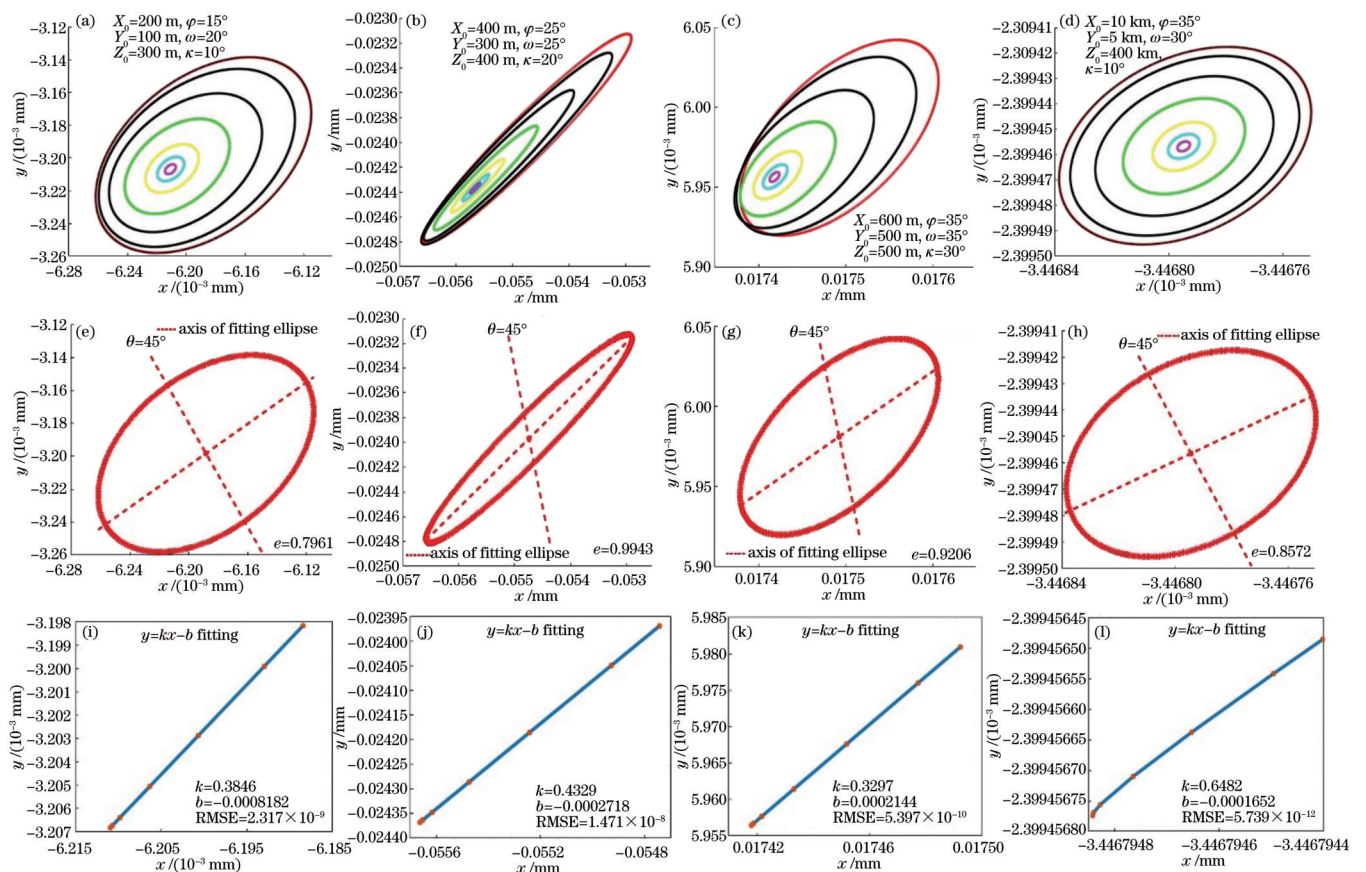


图 5 球面扇形靶条中心圆椭圆成像及其拟合。(a)~(d)模式 1~4 靶条中心圆模拟成像;(e)~(h)模式 1~4 最外层靶条中心圆成像椭圆拟合;(i)~(l)靶条中心圆成像椭圆圆心直线拟合

Fig. 5 Imaging and fitting of central circle ellipse of spherical fan-shaped target strip. (a)~(d) Simulation imaging of target circle from mode 1 to mode 4; (e)~(h) ellipse fitting of the outmost target imaging circle from mode 1 to mode 4; (i)~(l) ellipse center line fitting of target imaging circle

分析图 5 和表 4 可以得到:在中心投影条件下,球面靶标同心圆以椭圆方式进行成像,且椭圆圆心沿直

线移动;同时,球面靶标成像椭圆长半轴距离比值与实际靶标空间距离(真值)之间的最大偏差不超过 1%,



表 4 球面扇形靶条成像椭圆距离比关系表  
Table 4 Imaging ellipse distance ratio of spherical fan-shaped target strip

Parameter		$\theta=45^\circ$	$\theta=40^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=20^\circ$	$\theta=10^\circ$	$\theta=5^\circ$	$\theta=2^\circ$	Maximum deviation / %	
									Semi-major axis	Center distance
Actual space distance ratio		1	0.9090	0.7071	0.4837	0.2456	0.1233	0.0494	—	—
Mode 1 ellipse	Semi-major axis ratio	1	0.9099	0.7089	0.4855	0.2467	0.1238	0.0496	0.18	27.92
	Center distance ratio	1	0.7986	0.4567	0.2045	0.0500	0.0110	—		
Mode 2 ellipse	Semi-major axis ratio	1	0.9123	0.7141	0.4907	0.2498	0.1255	0.0503	0.70	27.86
	Center distance ratio	1	0.7993	0.4576	0.2051	0.0501	0.0110	—		
Mode 3 ellipse	Semi-major axis ratio	1	0.9084	0.7058	0.4823	0.2448	0.1228	0.0492	0.13	27.97
	Center distance ratio	1	0.7981	0.4559	0.2040	0.0498	0.0109	—		
Mode 4 ellipse	Semi-major axis ratio	1	0.9089	0.7069	0.4835	0.2455	0.1232	0.0493	0.02	29.25
	Center distance ratio	1	0.7924	0.4434	0.1912	0.0430	0.0090	—		

而成像椭圆圆心距离比值与实际靶标空间距离(真值)之间的最大偏差普遍在 27% 以上。因此,遥感载荷空间分辨率可以通过三维球面靶标成像椭圆长半轴的相对比例关系来计算,即采用球面靶标中的扇形靶条,在二维影像上采用椭圆形状并且沿椭圆圆心直线方向进行靶条截取,通过椭圆长半轴比例关系计算真实的分辨率,实现空间分辨率检测,这也表明本文所提出的基于定方向移动椭圆拟合的球面靶标分辨率检测方法准确性高且切实可行。

#### 4.2 球面靶标椭圆拟合与参数提取实验

从实验数据中截取球面靶标影像区域(成像靶标,下同),采用边缘特征提取算子提取成像靶标中的边缘像点,提取结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出,在非垂直视角条件下,实验中选取的成像靶标具有明显的椭圆成像特性,如图 6(b)所示。同时,由于球面靶标设计时采用均匀布设的黑白靶条和黑白靶块,成像靶标的色调反差比较明显,能够从中较好地提取边缘特征(提取的边缘像点采用\*符号表示),如图 6(c)所示。

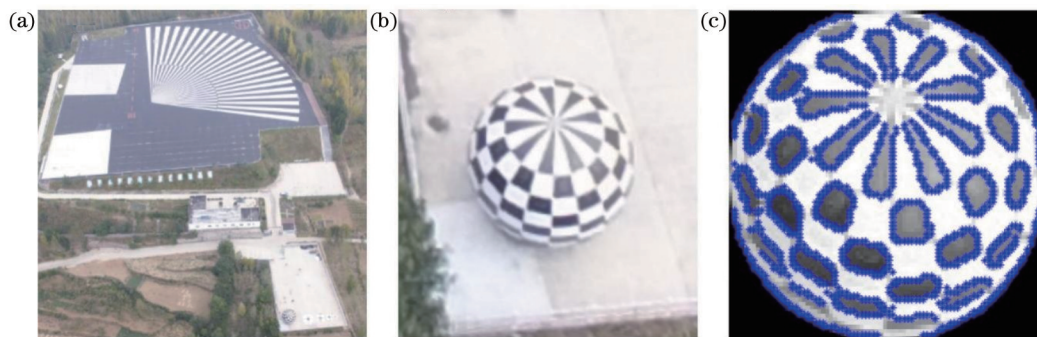


图 6 靶标倾斜摄影影像及其边缘提取结果。(a)倾斜摄影影像;(b)局部影像;(c)边缘提取结果

Fig. 6 Target oblique photographic image and its edge extraction results. (a) Oblique photographic image; (b) local image; (c) edge extraction results

结合成像靶标的边缘提取结果,在边缘特征交互编辑下,选取实验影像中球面扇形靶标和第一层刃边靶标块的最外层边缘像点,随后采用椭圆参数模型对边缘像点进行拟合,得到拟合椭圆的圆心坐标、偏心率、长半轴及其倾角等参数,结果如图 7 和表 5 所示。

由于球面扇形靶标和第一层刃边靶标的圆心在同一竖直方向上,根据本文分析,靶标以近似相同偏心率椭圆方式成像。图 7(a)给出了椭圆长短半轴拟合结果图,从图中可以看出,成像靶标拟合椭圆长短半轴几乎互相平行。表 5 中成像靶标最大偏心率为 0.4586,

偏心率误差为 0.0148,为最小偏心率的 3.33%。该结果验证了球面扇形靶条中心圆的椭圆成像具有相同的椭圆偏心率这一结论的正确性。

图 7(b)给出了椭圆圆心连线方向,该连线方向与椭圆轴线具有一定的夹角,结果如图 7(c)所示。表 5 中也给出了成像靶标拟合后椭圆长半轴大小和圆心坐标。从椭圆圆心连线在靶标影像上的叠加显示结果可以看出,该连线方向经过扇形靶条中心点,于是,该直线方向可以用作后续分辨率检测时的基准方向,其直线方程可以根据椭圆圆心坐标来计算获取。

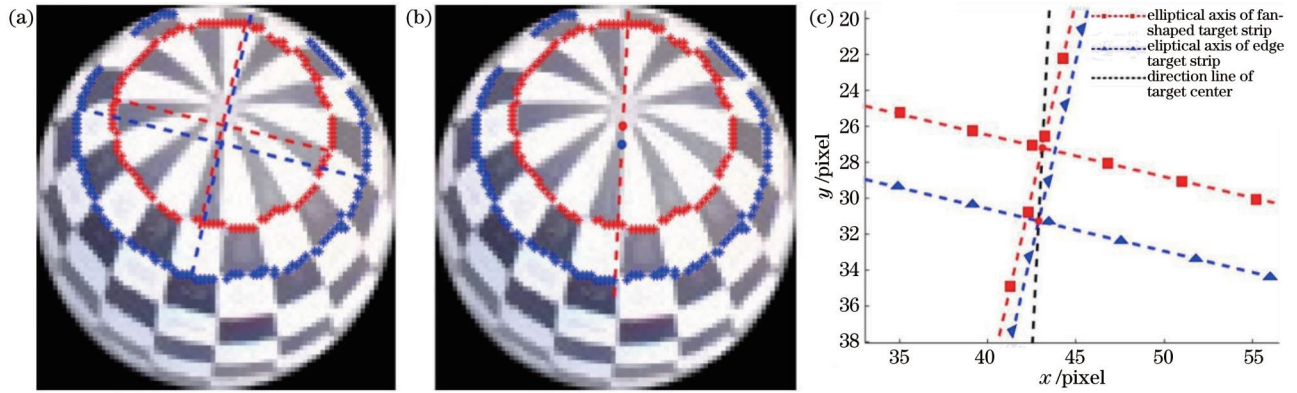


图 7 成像靶标椭圆拟合结果图。(a)椭圆拟合轴线;(b)圆心方向线;(c)椭圆轴线与圆心方向线位置关系

Fig. 7 Ellipse fitting result of imaging target. (a) Axis fitting of ellipse; (b) direction line of target center; (c) positional relationship between ellipse axis and target center direction line

表 5 成像靶标拟合参数

Table 5 Fitting parameters of imaging target

Imaging target	Eccentricity	Long half axis /pixel	Center coordinates /pixel	Eccentricity error (percentage /%)
Ellipse of fan-shaped target strip	0.4438	24.8099	(43.0941, 27.2098)	0.0148 (3.33)
Ellipse of square-shaped edge target	0.4586	33.1413	(42.8845, 31.2837)	

由于影像边缘提取结果具有一定的误差,考虑该误差对椭圆拟合的影响,本文将扇形靶条椭圆、刃边靶块椭圆偏心率进行平均,并将均值偏心率作为各自分辨率检测的基准偏心率大小,即成像靶标对应分辨率检测时的基准偏心率为 0.4512,将扇形靶条拟合椭

圆的长半轴大小作为分辨率比较的基准。

通过球面靶标椭圆拟合与参数提取实验,得到成像靶标分辨率检测所需的基准偏心率、基准移动方向和最大分辨率基准长半轴大小,形成分辨率检测基准参数表,结果见表 6。

表 6 成像靶标分辨率检测基准参数

Table 6 Reference parameters for imaging target resolution detection

Spherical target	Reference eccentricity	Reference direction line	Reference long half axis size of maximum resolution /pixel
Imaging target	0.4512	$y = -4.6849x + 306.8001$	24.8099

### 4.3 球面靶标分辨率检测实验

根据表 6 所示的成像靶标分辨率检测基准参数,从扇形靶条中心点开始,沿着基准直线方向,选取椭圆圆心,构建基准偏心率条件下的多尺度椭圆,截取扇形靶条,获取椭圆位置处靶条影像的灰度值,进行分辨率检测处理。

在构建基准偏心率条件下的多尺度椭圆时,为了保证在椭圆在靶条影像截取时的均匀性,本文按照一定的采用间隔,对椭圆 360°圆心角进行均匀划分,内插(本文采样双线性插值方法)获取采样位置处靶条影像的灰度值;其中,不同采样间隔条件下的多尺度椭圆构建与采用间隔设置如图 8 所示。从图 8 中可以看出,随着椭圆长半轴尺度的增加,采样点稀疏度成比例增加。为了在分辨率检测过程中,准确分析靶条像点灰度值的变化,本文采样椭圆圆心角 1°的采样间隔。

针对成像靶标,在扇形靶条中心点处向外构建尺度为 1~8 pixel(设为尺度 1~8)、偏心率为 0.4512 的椭圆,并截取扇形靶条影像,获取 1°的采样间隔的影像灰

度值。以采样间隔为  $x$  轴,以靶条影像采样点处的灰度值为  $y$  轴,绘制靶条影像灰度曲线(从圆心角 0°绘制至 360°),结果如图 9 所示。图 9(a)为扇形靶条中心点处构建的多尺度椭圆,图 9(b)为多尺度椭圆的局部放大图,图 9(c)为多尺度椭圆上分析得到的靶条影像灰度局部最大值点及其连线,图 9(d)为尺度 1 至尺度 8 椭圆截取的靶条影像灰度曲线。

从图 9(a)和(b)中可以看出,在扇形靶条圆心处构建的多尺度椭圆(长半轴连续相差 1 个像素)保持有相同的偏心率,且椭圆轴线方向与图 7(a)轴线方向平行。图 9(d)为按照 1°的采样间隔,获取的采样位置处靶条影像的灰度值曲线,该曲线上的局部最大值点对应的采样角如图中红色圆点所示,局部最大值点在影像上的坐标位置如图 9(c)所示。由于实验中采用了 18 个扇形靶条(各 9 个黑白靶条)构成的球面扇形靶标,理论上来说,靶条影像灰度曲线中的局部最大值点对应于白色靶条。为了消除噪声对检测结果的影像,本文在灰度阈值条件下(对应于 8 位灰度图像,文中采



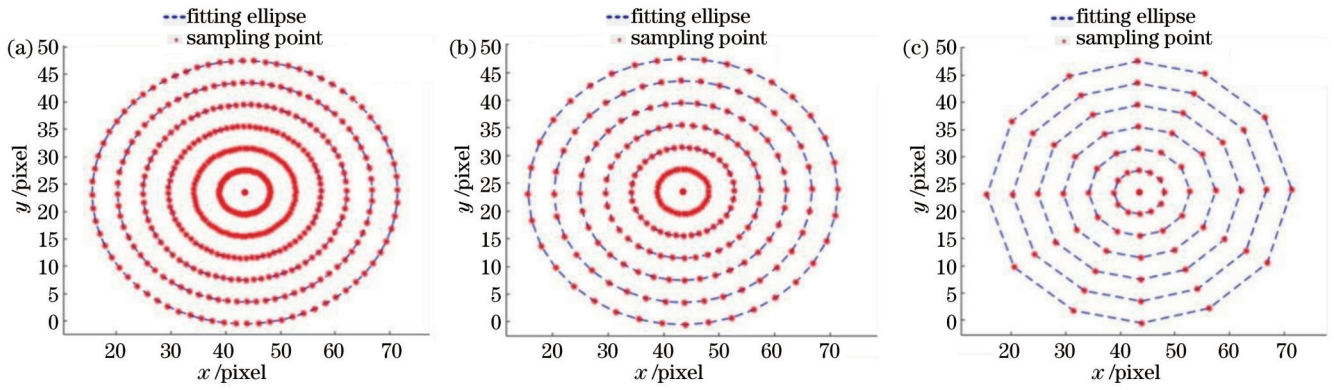


图 8 多尺度椭圆构建与采样点获取。(a)采样间隔为5°;(b)采样间隔为10°;(c)采样间隔为30°

Fig. 8 Multi-scale ellipse construction and sampling point acquisition. (a) Sampling interval is 5°; (b) sampling interval is 10°; (c) sampling interval is 30°

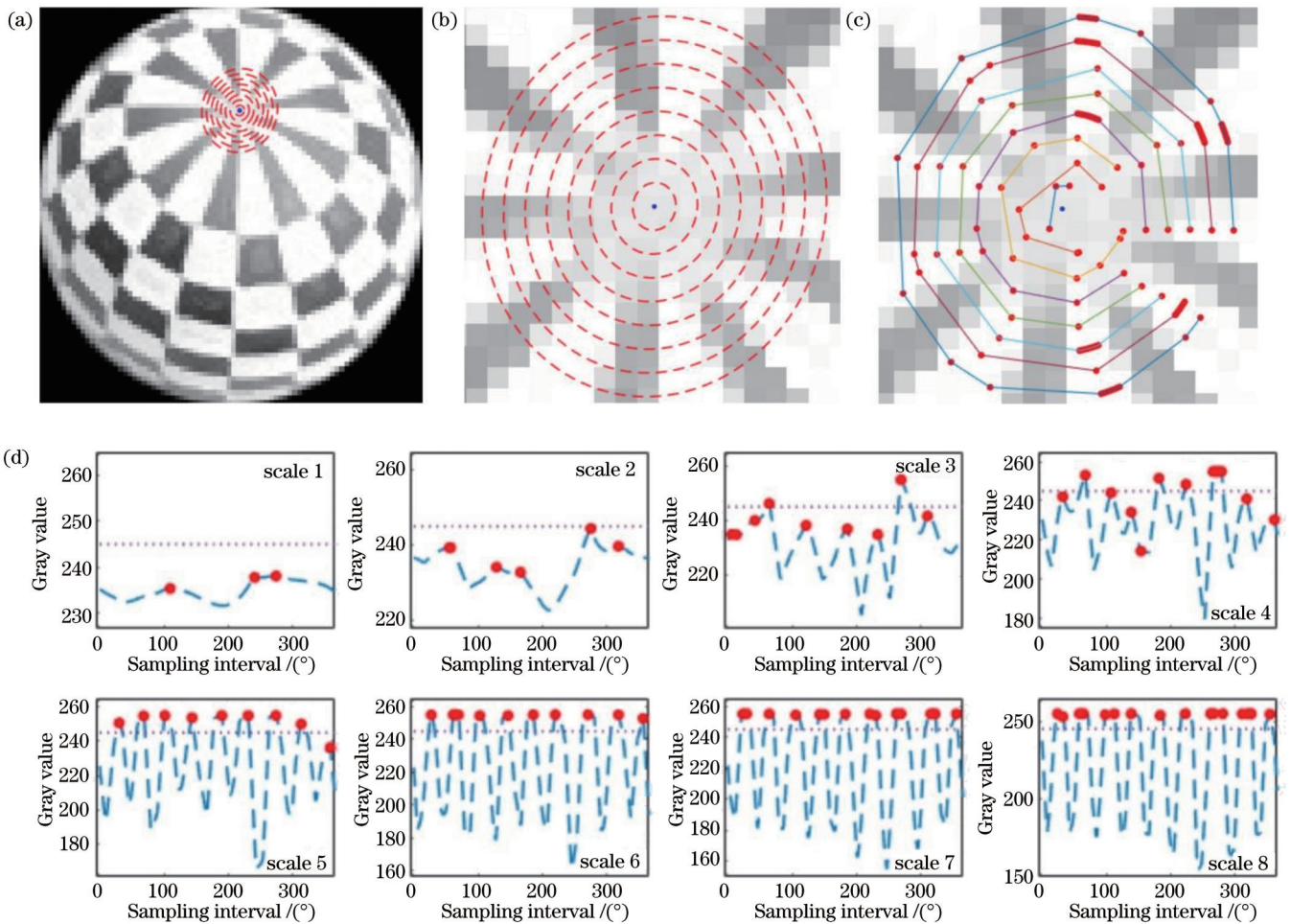


图 9 扇形靶条圆心处空间分辨率检测。(a)多尺度椭圆构建;(b)多尺度椭圆局部放大图;(c)椭圆灰度局部最大值点及连线;(d)多尺度椭圆截取的靶条影像灰度曲线

Fig. 9 Spatial resolution detection at the centroid of fan-shaped target strip. (a) Multi-scale ellipse construction; (b) partial enlarged view of multi-scale ellipse; (c) local maximum points and connecting lines of elliptical gray value; (d) gray curve of target strip image intercepted by multi-scale ellipse

用经验阈值 245), 对局部最大值点进行阈值分析, 如图 9(d) 中的水平虚线所示。

根据图 9(d), 检测得到的白色靶条数量结果如表 7 所示。根据空间分辨率检测方法, 要想得到刚好可

分辨的靶条影像, 理想条件下, 该靶条影像内测检测得到的靶条数量为 0, 外侧检测得到的靶条数量为 9 (即分辨率检测的理想条件为白色靶条检测数量从 0 直接变化至 9), 即在扇形靶条圆心处无法准确检测出空间

分辨率结果,且成像靶标的刚好可分辨的靶条影像位于尺度 2 和尺度 6 椭圆之间。该实验结果表明:在球面靶标分辨率检测过程中,直接在扇形靶条圆心处得到

的检测结果不稳定,需要采用本文给出的定方向移动椭圆圆心拟合方法。

表 7 白色扇形靶条检测数量  
Table 7 Number of detected white fan-shaped target strip

Intercept ellipse scale	Scale 1	Scale 2	Scale 3	Scale 4	Scale 5	Scale 6	Scale 7	Scale 8
Number of detected white target strips	0	0	2	5	8	9	9	9

为了得到准确的空间分辨率检测结果,实验中根据本文方法移动椭圆圆心并在新圆心位置条件下进行椭圆拟合与分辨率检测分析。在实验中,本文从扇形靶条原点,沿着基准直线方向,分别向外移动 0.5、1.0、1.5、2.5 pixel,在 0.5 pixel 圆心位置处构建(2.4,

3.2, 4.0, 4.8) pixel 长半轴的 4 个椭圆,在 1.0、1.5、2.5 pixel 位置处构建(3.2, 4.0, 4.8, 5.6) pixel 长半轴的 4 个椭圆,利用构建的椭圆截取扇形靶条,采样得到靶条影像灰度值曲线,分析灰度曲线的局部极大值,结果如图 10 和表 8 所示。

表 8 定方向移动椭圆拟合空间分辨率检测  
Table 8 Moving ellipse fitting on fixed direction and spatial resolution detection

Intercept ellipse of imaging target	Size of long half axis /pixel				
	2.4	3.2	4.0	4.8	5.6
Number of detected white target strips					
Sampling ellipse 0.5 pixel movement	0	2	4	7	—
Sampling ellipse 1.0 pixel movement	—	2	4	7	9
Sampling ellipse 1.5 pixel movement	—	2	4	6	9
Sampling ellipse 2.5 pixel movement	—	2	3	6	7

图 10(a)~(d)分别为沿椭圆圆心基准方向向外移动并构建的多尺度椭圆结果,图 10(e)~(h)分别为各移动圆心条件下的多尺度靶条影像灰度曲线。根据靶条影像灰度曲线的局部最大值点,如图 10(d)~(h)中红色圆点表示的位置,确定白色靶条检测数量,检测结果如表 8 所示。从表 8 中可以看出,在不同圆心位置条件下,采用相同长半轴的椭圆,白色靶条检测数量比较接近(主要原因在于影像像素的混叠效应)。但是:在 1.0 pixel 移动的拟合椭圆、长半轴为 5.6 pixel 处,白色靶条检测结果最为明显,如图 10(f)中的最后一幅影像灰度曲线结果;在 1.5 pixel 移动的拟合椭圆、长半轴为 5.6 pixel 处,第 8 个白色靶条检测结果不显著,如图 10(g)中的最后一幅影像灰度曲线结果;在 2.5 pixel 移动的拟合椭圆、长半轴为 5.6 pixel 处,白色靶条检测结果发生异常,如图 10(h)中的最后一幅影像灰度曲线结果。

以看出,成像靶条在拟合椭圆长半轴 3.5 pixel 处具有 9 处极值点,在长半轴 3.1 pixel 位置处具有 8 处极值点,为此在不考虑阈值条件下,成像靶标在长半轴为 3.3 pixel 位置处上可实现分辨率检测。根据分辨率计算式(16),成像靶标对应的最为理想的分辨率检测结果为  $3.3 \times 0.6828 / 24.8099 = 0.0908 \text{ m}$ 。

因此,根据图 10 和表 8,得到第一张影像数据的成像分辨率长半轴为 4.8~5.6 pixel 的拟合椭圆均值(椭圆中心移动 1.0 pixel)与扇形靶条最外层长半轴的比例,再乘以最外层靶条的理想检测分辨率,得到成像靶标对应的分辨率检测结果为  $5.2 \times 0.6828 / 24.8099 = 0.1431 \text{ m}$ 。

新疆无人机厂商给出的空间分辨率理论计算公式为  $(H/36.5)\text{cm/pixel}^{[28]}$ ,其中,  $H$  为飞行器相对于拍摄场景的飞行高度(单位为 m),36.5 为传感器焦距与 CCD 像元大小的比值。球面靶标的成像高度为 780.077 m,靶标所在区域的高度约为 480 m,根据计算公式,成像载荷的理论空间分辨率为 0.08221 m。

放宽靶条影像灰度曲线的阈值条件,直接根据影像灰度曲线中的局部最大值,分析白色靶条检测数量,即在上述实验得到的成像靶条检测结果最为显著的圆心位置处,再次进行小尺度椭圆拟合与靶条影像截取以及分辨率检测实验,结果如图 11 所示。从图 11 中可

从上述结果中可以看出,成像靶条在最为宽松的检测条件下,成像载荷的空间分辨率检测值与传感器理论值比较接近,在严格阈值设置检测条件下,成像载荷的空间分辨率检测值约为理论值的 2 倍。分析该实验结果,可以得到:1)在宽松阈值条件下,成像载荷的空间分辨率检测值与理论检测值接近,表明了本文方法的有效性和正确性;2)在严格阈值条件下,成像载荷空间分辨率理论检测值偏离实际检测值,表明光学载荷的实际成像性能低于其设计指标,需要依托靶标进行检测处理;3)与传统二维扇形靶标相比,本文方法避免了基于地面控制点或者数字高程模型数据的影像纠正处理环节,无需影像几何定位模型参与纠正解算,可直接使用球面靶标影像进行载荷成像性能检测,且具有更加准确的检测效果。



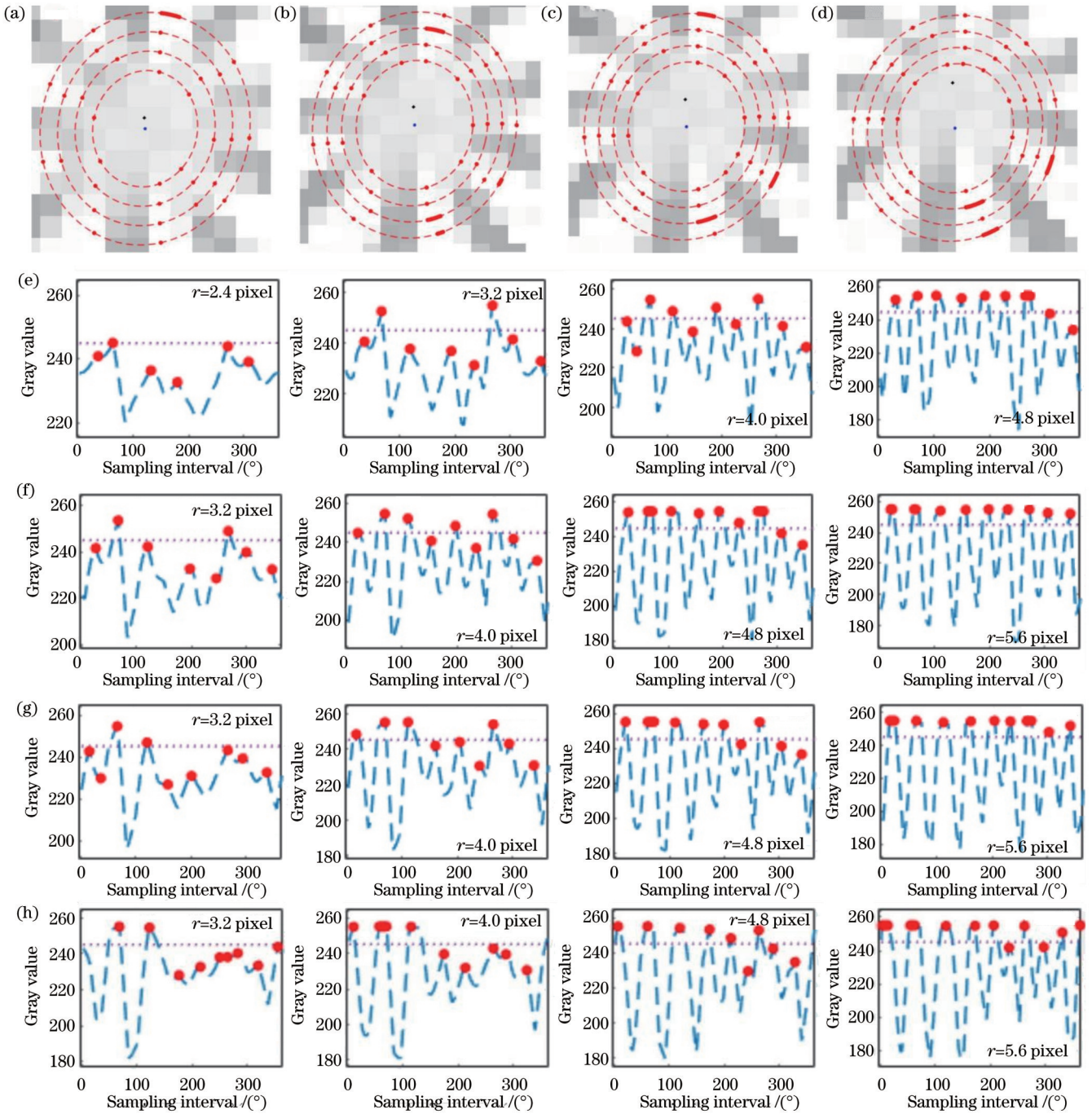


图 10 定方向移动椭圆拟合与靶条影像灰度曲线。(a)~(d)移动 0.5、1.0、1.5、2.5 pixel 的采样椭圆；(e)~(h)移动 0.5、1.0、1.5、2.5 pixel 的靶条影像灰度曲线

Fig. 10 Moving ellipse fitting on fixed direction and gray curve of target strip image. (a)~(d) Sampling ellipse of 0.5, 1.0, 1.5, and 2.5 pixel movement; (e)~(h) gray curve of target strip image of 0.5, 1.0, 1.5, and 2.5 pixel movement

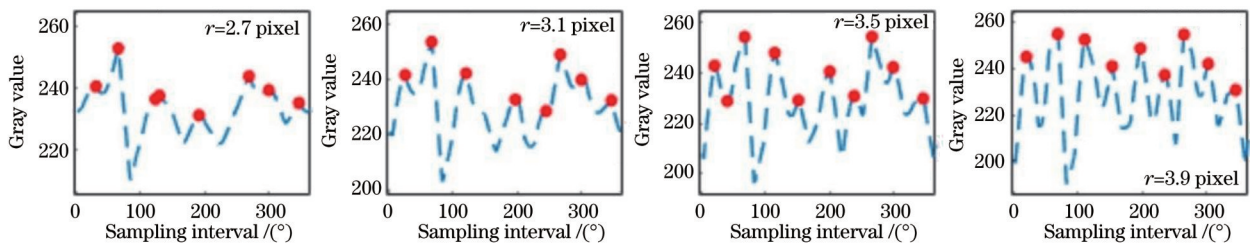


图 11 定方向移动椭圆拟合与靶条影像灰度曲线(宽阈值)

Fig. 11 Moving ellipse fitting on fixed direction and gray curve of target strip image (wide threshold)



## 5 结 论

本文针对航空航天遥感载荷的成像性能检测需求,在分析遥感定标场二维扇形靶标应用的优缺点的基础上,提出了在各向同性的三维球面上构建辐射状靶条的思路,通过球面靶标的数学模型建立,设计模式和布设策略分析,实现了球面靶标的设计与构建。根据球面靶标分辨率检测特点及要求,分析了球面靶标分辨率检测方法,重点探讨了球面靶标中心投影变形及遥感载荷空间分辨率检测策略,并创新提出了一种基于定方向移动椭圆拟合的球面靶标分辨率检测方法,给出了该方法的技术步骤。针对无人机载荷进行了空间分辨率检测仿真实验与实体靶标实验,验证了球面靶标在遥感载荷倾斜成像条件下空间分辨率检测的可行性和正确性。本文方法及实验结论可为遥感定标场球面靶标建设以及亚米级高分辨率光学遥感载荷的空间分辨率检测提供技术支持。

### 参 考 文 献

- [1] 张永军, 张祖勋, 龚健雅. 天空地多源遥感数据的广义摄影测量学[J]. 测绘学报, 2021, 50(1): 1-11.  
Zhang Y J, Zhang Z X, Gong J Y. Generalized photogrammetry of spaceborne, airborne and terrestrial multi-source remote sensing datasets[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(1): 1-11.
- [2] 龚健雅, 许越, 胡翔云, 等. 遥感影像智能解译样本库现状与研究[J]. 测绘学报, 2021, 50(8): 1013-1022.  
Gong J Y, Xu Y, Hu X Y, et al. Status analysis and research of sample database for intelligent interpretation of remote sensing image[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(8): 1013-1022.
- [3] 李德仁, 王密. 高分辨率光学卫星测绘技术综述[J]. 航天返回与遥感, 2020, 41(2): 1-11.  
Li D R, Wang M. A review of high resolution optical satellite surveying and mapping technology[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2020, 41(2): 1-11.
- [4] 王密, 杨芳. 智能遥感卫星与遥感影像实时服务[J]. 测绘学报, 2019, 48(12): 1586-1594.  
Wang M, Yang F. Intelligent remote sensing satellite and remote sensing image real-time service[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(12): 1586-1594.
- [5] 陈军, 刘万增, 武昊, 等. 智能化测绘的基本问题与发展方向[J]. 测绘学报, 2021, 50(8): 995-1005.  
Chen J, Liu W Z, Wu H, et al. Smart surveying and mapping: fundamental issues and research agenda[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(8): 995-1005.
- [6] 徐伟伟, 张黎明, 李鑫, 等. 基于宽动态目标的高分辨率光学卫星相机在轨辐射定标[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1028004.  
Xu W W, Zhang L M, Li X, et al. On-orbit radiometric calibration of high-resolution optical satellite camera based on wide dynamic targets[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1028004.
- [7] 徐伟伟, 张黎明, 司孝龙, 等. 基于辐射状靶标的高分辨率光学卫星传感器像质评价方法研究[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0928003.  
Xu W W, Zhang L M, Si X L, et al. Image-quality evaluation of high-spatial-resolution satellite optical sensor based on radial target[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 0928003.
- [8] 曲梦雅. 高分辨率成像系统 MTF 检测及其在图像复原中的应用[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2017.

- Qu M Y. Modulation transfer function measurement of high-resolution sensors and its application in image restoration[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2017.
- [9] 黄黎. 中低分辨率卫星成像系统的 MTF 在轨检测方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.  
Huang L. Research on MTF in-orbit detection method of medium and low resolution satellite imaging system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- [10] 金庆雄. 航测无人机检校场的设计与应用[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2018.  
Jin Q X. The design and application of aerial survey UAV calibration field[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2018.
- [11] Honkavaara E, Hakala T, Peltoniemi J, et al. Analysis of properties of reflectance reference targets for permanent radiometric test sites of high resolution airborne imaging systems[J]. Remote Sensing, 2010, 2(8): 1892-1917.
- [12] CRAMER M, Fritsch D. 10 years ifp test site Vaihingen/Enz: an independent performance study[EB/OL]. [2022-11-12]. <https://phowo.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo05/120cramer.pdf>.
- [13] 王涛. 线阵 CCD 传感器实验场几何定标的理论与方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2012.  
Wang T. Study on theories and methods of linear CCD sensor geometric calibration based on field[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2012.
- [14] 李传荣, 马灵玲, 唐伶俐, 等. 面向定量遥感的高分辨遥感综合定标场及其应用[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 198-219.  
Li C R, Ma L L, Tang L L, et al. A comprehensive calibration site for high resolution remote sensors dedicated to quantitative remote sensing and its applications[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1): 198-219.
- [15] 李照洲, 徐文, 傅俏燕, 等. 中国(嵩山)固定式靶标场建设及其应用[J]. 大气与环境光学学报, 2014, 9(2): 81-89.  
Li Z Z, Xu W, Fu Q Y, et al. Building and application for China Songshan artificial target site[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2014, 9(2): 81-89.
- [16] Hu X K, Gao H L, Cheng T H, et al. Site selection and evaluation on China's new radiometric calibration test sites[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2019, XLII-3/W10: 511-520.
- [17] 高正清, 王险峰. 航天遥感成像系统像元分辨率在轨检测方法研究[J]. 航天返回与遥感, 2009, 30(3): 28-33, 62.  
Gao Z Q, Wang X F. Measurement of resolution on-orbit of space remote sensing imaging system[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2009, 30(3): 28-33, 62.
- [18] 彭宇, 黄海乐, 朱雷鸣. 基于辐射状靶标的天绘一号卫星 CCD 相机分辨率在轨检测[J]. 测绘与空间地理信息, 2013, 36(7): 149-151, 154.  
Peng Y, Huang H L, Zhu L M. The In-orbit resolution detection of TH-01 CCD cameras based on the radial target[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2013, 36(7): 149-151, 154.
- [19] 张静, 李传荣, 李晓辉, 等. 基于辐射状靶标的 MTF 评估算法及精度分析研究[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(3): 523-530.  
Zhang J, Li C R, Li X H, et al. A research on MTF estimation and accuracy analysis based on radial-target method[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014, 29(3): 523-530.
- [20] 鲁大尉, 朱雷鸣, 黄海乐, 等. 天绘一号卫星分辨率检测靶标的组成和布设[J]. 测绘与空间地理信息, 2014, 37(11): 166-167.  
Lu D W, Zhu L M, Huang H L, et al. The composition and layout of resolution target for TH-1 satellites[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2014, 37(11): 166-167.
- [21] 许妙忠, 涂辛茹. 基于定标场的 ADS40 系统几何检校[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(7): 771-775.

- Xu M Z, Tu X R. Geometric calibration of ADS40 system based on test field[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(7): 771-775.
- [22] 张永生. 遥感测绘卫星全球广域定标定位框架体系[J]. 测绘科学技术学报, 2013, 30(4): 416-423.
- Zhang Y S. Global wide area framework of calibration and positioning for remote sensing and mapping satellites[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2013, 30(4): 416-423.
- [23] 贾静. 多相机系统中若干视觉几何问题的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- Jia J. Study on some vision geometry problems in multi-camera system[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.
- [24] 古其远, 陈明蔚. 圆的中心投影[J]. 海南师范学院学报(自然科学版), 2000, 13(2): 26-30.
- Gu Q Y, Chen M W. Central projection of circle[J]. Journal of Hainan Normal University (Natural Science), 2000, 13(2): 26-30.
- [25] 张剑清, 张勇, 方芳. 铅垂线辅助城区航空影像的绝对定向[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(3): 197-200.
- Zhang J Q, Zhang Y, Fang F. Absolute orientation of aerial imagery over urban areas combined with vertical lines[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(3): 197-200.
- [26] 张逸勇. 基于圆球的多相机标定方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- Zhang Y Y. Research on multi-camera calibration based on sphere[D]. Xi'an: Xidian University, 2017.
- [27] 张保明, 龚志辉, 郭海涛. 摄影测量学[M]. 北京: 测绘出版社, 2008.
- Zhang B M, Gong Z H, Guo H T. Photogrammetry[M]. Beijing: Sino Maps Press, 2008.
- [28] 精灵 4 RTK 技术参数[EB/OL]. [2021-09-11]. <https://www.dji.com/cn/phantom-4-rtk/info?clickpid=>.
- Phantom 4 RTK technical parameters[EB/OL]. [2021-09-11]. <https://www.dji.com/cn/phantom-4-rtk/info?clickpid=>.

## Direct Detection Method for Spatial Resolution of Optical Imaging Loads Based on Spherical Target

Ji Song<sup>1</sup>, Zhang Yongsheng<sup>1\*</sup>, Li Kai<sup>2</sup>, Fan Dazhao<sup>1</sup>, Yang Weiming<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, Henan, China;*

<sup>2</sup>*Institute of System Engineering, Academy of Military Sciences, Beijing 100044, China*

### Abstract

**Objective** In the context of intelligent surveying and mapping, the quality of remote sensing imagery directly determines the intelligent interpretation level, the accuracy of image products, and ability of application services. Before processing and application, effective evaluation of remote sensing imagery or payload is required. Spatial resolution is an important index to measure the imaging performance of optical remote sensing payload, which is usually detected by three-bar targets or fan-shaped targets deployed in the remote sensing calibration. The three-bar detection method features simplicity and directness. However, due to discrete deployment, the detection results are easily affected by the phase difference factor, with low accuracy of the method. Fan-shaped targets are usually deployed on a two-dimensional plane. Due to the influence of perspective imaging and geometric distortion, the spatial resolution detection method should be carried out under the condition of vertical photography or geometric correction. Thus, during imaging at a large angle, the method cannot be directly employed for resolution detection due to large geometric deformation. Even under the condition of geometric correction, the resolution detection accuracy will be greatly reduced due to edge reduction or pixel mixing effect. Therefore, according to the isotropic characteristics of the three-dimensional spherical surface, this paper proposes to construct a fan-shaped resolution detection target on a spherical surface, which is called a spherical target. It also hopes that the spherical target can be helpful in solving the problems brought by three-bar or fan-shaped radial targets, and can be directly adopted for spatial resolution detection of high-resolution optical imaging loads under non-vertical imaging and non-geometric correction conditions.

**Methods** Firstly, this paper builds a mathematical model of the spherical target and analyzes the design modes of the spherical target under equal and unequal conditions, with deployment strategies of spherical targets being given. Secondly, based on the traditional two-dimensional target image resolution determination method, an ideal spherical target image resolution determination method is given, and the resolution detecting range is analyzed for different types of spherical targets. Thirdly, the imaging characteristics of spherical targets are analyzed. Additionally, based on the building of the strict imaging model, the central projection deformation rule of the spherical target is studied by parameter simulation. The conclusions are obtained as follows. For multiple concentric circles with the center of the fan-shaped target strip as the origin, imaging ellipses on the two-dimensional images have the same eccentricity. The centers of the imaging ellipses are on the same straight line, while the proportional relationship between the long half axes of the ellipses is approximately



equal to that of the image resolution. Finally, an image resolution determination method based on directional moving ellipse fitting is innovatively proposed for the spherical targets, and technical steps of the method are given.

**Results and Discussions** Under the condition of central projection, images are simulated for the concentric circle of the spherical target (Fig. 5). Both the imaging characteristics and ellipse fitting characteristics are analyzed through the simulated data. Simulation results show that the distance ratio error of the long half-axis of the spherical target imaging ellipse is low, and the maximum deviation of the simulated data is not more than 1% (Table 4), which is suitable for spatial resolution detection. By employing the actual spherical target fixed in the China (Songshan) satellite remote sensing calibration field, the edge extraction (Fig. 6) and ellipse fitting (Fig. 7) process on a unmanned aerial vehicle (UAV) sensor target image is conducted, and then the ellipse eccentricity (Table 5) is calculated. Based on multi-scale ellipse construction and sampling point acquisition (Fig. 8), the gray curve of the target strip image obtained by the fixed center ellipse fitting method (Fig. 9) is intercepted and drawn and is compared with the intercepted and drawn results obtained by the proposed method (Fig. 10). Then, the optimal long half axis size of UAV image target ellipse is analyzed (Table 8), and the spatial resolution of UAV imaging load is calculated and evaluated to verify the validity and accuracy of the proposed method.

**Conclusions** This paper aims at improving the imaging performance evaluation effectiveness of aerospace remote sensing payloads. Based on analyzing the advantages and disadvantages of the two-dimensional fan-shaped target in the remote sensing calibration field, it proposed a method for determining the spatial resolution of optical imaging payload directly on the spherical target image. Then, it also conducts experiments on both simulated data and actual UAV spherical target images and verifies the feasibility and correctness of the proposed method for remote sensing payload under tilt imaging conditions. Compared with the traditional two-dimensional fan-shaped target, the proposed method avoids the image correction processing based on ground control points or digital elevation model data and does not need the image geometric positioning model to be involved in the correction solution. In addition, the spherical target image can be directly employed to determine the load imaging performance, with a more accurate spatial resolution determination effect. The methods and experimental results in this paper can provide technical support for the construction of the spherical target in the remote sensing calibration field and the spatial resolution determination of high-resolution optical remote sensing payload.

**Key words** fan-shaped target; spherical target; optical imaging load; spatial resolution