

# 卫星成像仿真中零视距标准图的获取方法

汪兰霞<sup>1,2</sup>, 崔文煜<sup>1</sup>, 易维宁<sup>1</sup>, 黄红莲<sup>1</sup>, 陈川<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所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;

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

**摘要** 高分辨率卫星成像全链路仿真是卫星发射前效果评估的主要手段, 零视距标准图是验证成像仿真链路基础环节准确性的必要标准。地面设备获取零视距图像时, 由于存在成像视场受到限制、观测角度与卫星不一致、工作量大、难以量化等问题, 难以直接获取垂直对地观测的零视距标准图。通过建立地面零视距标准图测量系统, 利用轨道逐行拍摄、几何校正、图像拼接, 得到较大幅宽垂直向下图像。并且通过同步辐射校正法进行量化, 得到零视距反射率图像。最终, 在距离地面 2.6 m 的观测平台上, 获取了面积为 10 m×10 m, 分辨率为亚米级的零视距标准图(反射率图)。与地面实测反射率对比, 结果表明零视距标准图(反射率图)误差小于 5%, 可为亚米级高分辨率卫星成像仿真链路基础环节的精度验证提供标准。

**关键词** 遥感; 卫星成像仿真; 零视距图像; 量化; 同步辐射校正法

中图分类号 P404

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0128002

## Acquisition Method of Zero Stadia Standard Image for Satellite Imaging Simulation

Wang Lanxia<sup>1,2</sup>, Cui Wenyu<sup>1</sup>, Yi Weining<sup>1</sup>, Huang Honglian<sup>1</sup>, Chen Chuan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization of Chinese Academy of Sciences,

Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** Full link simulation of high resolution satellite imaging is the main means to evaluate the effect of satellite pre-launch. The zero stadia standard image is the necessary standard to verify the accuracy of the basics on imaging simulation link. When the ground equipment acquires zero stadia image, it is difficult to obtain zero stadia standard image directly by vertical observation to earth because of the problems such as the inconformity of the observation angle and the satellite, the heavy workload and difficulty of qualification. Through the establishment of ground zero stadia standard measurement system, vertical image with wide width is obtained by rail line shooting, geometric correction and image mosaic. Then, the zero stadia reflectance image is obtained by quantifying the synchrotron radiation correction method. Finally, on the observation platform 2.6 m away from the ground, the zero stadia standard image (reflectivity image) with the area of 10 m×10 m and the resolution of sub-meter level is obtained. Compared with the reflectance of the ground testing, the results show that the error of the zero stadia standard image (reflectivity image) is less than 5%, which can provide a standard for the accuracy verification of basic link of sub-meter high resolution satellite imaging simulation link.

**Key words** remote sensing; satellite imagery simulation; zero stadia image; quantification; synchrotron radiation correction

**OCIS codes** 280.4788; 010.0280; 010.7295

收稿日期: 2017-07-17; 收到修改稿日期: 2017-08-26

基金项目: 国防 973 计划项目(613225)

作者简介: 汪兰霞(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事遥感信息处理方面的研究。E-mail: lxwang@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 易维宁(1956—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事遥感图像辐射校正、遥感信息分析处理技术等方面的研究。E-mail: yiwn@aiofm.ac.cn(通信联系人)

# 1 引 言

高分辨率对地观测卫星的出现,给广大遥感数据用户提供了更加丰富的数据。对地卫星获取的图像质量受诸多因素的影响<sup>[1]</sup>,只有整个遥感成像系统设计科学合理,才能获得满足需求的图像,使得系统各组成部分优化匹配,达到获取的图像质量与投入的资源相匹配的目标<sup>[2]</sup>。为了保证最终的图像质量,需开展遥感卫星成像全链路仿真系统分析综合研究,并且国际上多个遥感系统的研制经验均证实<sup>[3-6]</sup>,遥感卫星成像系统全链路仿真在光学遥感系统的研制和在轨应用均发挥着重要作用。

遥感卫星成像全链路仿真系统是指地面景物目标经过反射或辐射的信息,经大气传输到卫星平台上的遥感器进行成像,光电转换之后传输到地面,经处理再现景物信息的全系统。遥感卫星成像全链路仿真系统针对整个遥感系统的各个环节,包括场景目标、大气、遥感器(光学系统、探测器和电路)、卫星平台、数据传输以及地面处理。高分辨率卫星成像全链路仿真系统的精度是基于各个环节误差逐级传递的结果。针对地面反射辐射,其关键是零视距标准图的获取,零视距标准图的准确程度是验证全链路仿真系统可靠性的基础,直接影响整个仿真系统的精度。

零视距标准图是验证地面反射辐射场仿真结果的基准,目前的验证方法,一是将单点实测值,即零视距仿真辐射图典型地物的辐射值与实测值进行对比验证。二是将低空飞行获取实拍图像与仿真结果进行对比。如罗切斯特理工大学数字图像与遥感实验室研发的 DIRSIG4.0.5 仿真软件和德国宇航中心开发出的光学遥感仿真软件 SENSOR<sup>[4]</sup>等,对于地面辐射场仿真结果的验证都是基于上述两种方法。单点对比难以对二维仿真辐射场进行全面验证;低空飞行由于姿态、飞控的问题,其获取的图像具有不可控因素造成的误差。由于图像不可避免地会叠加大气的影响,定量化精度有限。而且,在某些感兴趣却又敏感区域,低空航拍的手段无法使用,可利用地面设备进行获取。根据对地观测卫星成像方式<sup>[7]</sup>,零视距图像通过垂直向下的拍摄方式获得。获取过程中存在两个主要问题:1)零视距原始图像获取的问题,垂直向下的拍摄高度与图像幅宽之间的矛盾;2)零视距原始图到标准图转化的问题,由于零视距标准图的获取是基于实测的标准,并且获取图像存在时刻性,太阳光辐射在拍摄的时间段内处于变化

的过程,在图像拼接成全景图的过程中必然存在时相和观测几何的问题。目前国内外的研究主要针对无人机或低空飞行所获得的图像,针对地面设备获取大幅宽的零视距图的研究较少。

本文以拍摄高度为 2.6 m 获取 10 m×10 m 区域,分辨率为亚米级的零视距标准图的过程为例,介绍了采用地面设备获取零视距图像的方式及特点,阐述了图像获取过程中面临的问题及解决对策,对零视距标准图的获取过程进行讨论,并对其精度进行验证。

## 2 零视距标准图获取原理

### 2.1 测量原理及系统

获取零视距标准图的测量系统设计如图 1 所示,主要分为原始图像的获取和光谱测量。在逐轨拍摄图像的过程中,为了保证每张图像几何精度的一致性,采用导轨保证移动过程的稳定性;采用稳定器保证拍摄角度的稳定性;同时在目标区域摆放控制点进一步保证观测几何一致性。为了保证辐射一致性,在目标区域摆放灰色参考板,进行光谱值的获取,并将其作为定量化标定的输入。测量仪器的相关参数如表 1 所示。

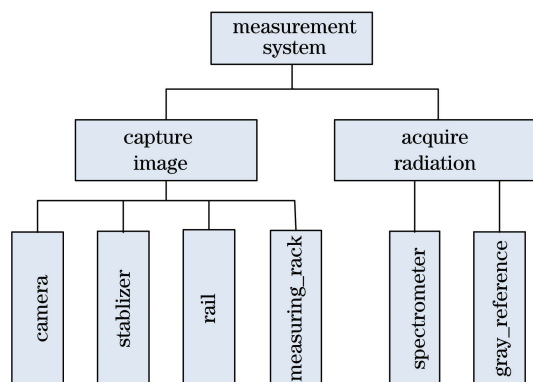


图 1 测量系统

Fig. 1 System of measurement

其中稳定器使用的是具有专门定制算法的云台,可在平台移动过程中,保持相机在固定的方向上,稳定精度达 0.1°。图 2 是某地区水泥地的方向反射率曲线图,其中横轴为观测天顶角,0°为观测方向垂直向下,纵轴是其反射率。由图 2 可知,观测天顶角在 0°和 0.1°的反射率相差 0.01%,差异不明显;观测天顶角在 0°和 10°的反射率相差 1.39%,差异明显。在拍摄过程中相机的不稳定性或者地面的起伏均可能导致拍摄角度 10°左右的波动。由于稳定器能保证观测角度在 0.1°的范围,此时方向反射特性不明显。因此采用稳定器能解决测量过程中方向

表 1 测量仪器参数

Table 1 Parameter of measuring instrument

Item	Description
Camera	Industrial camera can modulate the aperture and focal length at will
Stabilizer	Stabilizer has customized algorithm, three kinds of built-in mode, three buttons can be used to control the direction of the stabilizer, and achieve any angle shot
Spectrometer	SVC HR-1024 full spectrum portable ground spectrometer produced by Spectra Vista, Inc., with a spectral range of 350-2500 nm

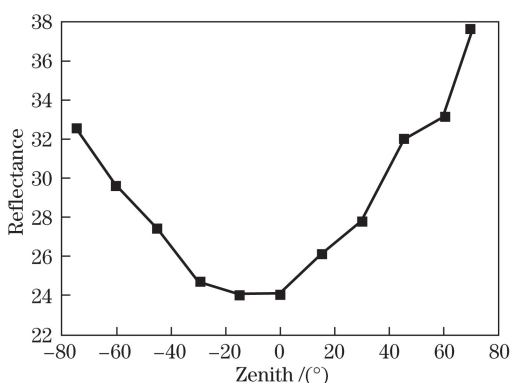


图 2 水泥地方向反射率

Fig. 2 Directional reflectance of cement ground

反射特性导致的误差,确保所得序列图像拍摄角度的稳定性。此外,测量过程中稳定测量角度始终向下,保证观测几何一致性,从而可以准确有效地对图像进行几何校正和拼接。

本文针对三个目标均为 10 m×10 m 的正方形区域的零视距标准图的获取过程进行讨论,其中包括两块水泥地与跑道的混合区域和一块草地,简称水泥地 1、水泥地 2 和草地。三块目标区域的拍摄过程均相同,拍摄时间均处于上午 9-10 点和下午 3-4 点,此段时间太阳高度角变化相对缓慢,并且不会因为自身的阴影挡住目标。所有序列图像均通过以下 4 步所得:

1) 测量系统的搭建。相机拍摄高度为 2.6 m,微调相机焦距,由测量可知相机每次所能拍摄面积为 1.2 m×1.35 m。拼接导轨车,导轨上用记号笔按照间隔 1 m 的距离做标识。

2) 为保证每张图片具有重叠部分,在目标区域两边按照间隔 1 m 的距离摆放相应的标志物,如图 3(a)所示。并且保证相对位置统一,以便数据处理时进行几何校正。

3) 将导轨车放到第一行开始拍摄,按照导轨上标识的步长依次移动推车逐个拍摄目标区域,直到一行全部拍摄结束,如图 3(b)所示。按照目标区域两边的标志物移动导轨车到下一行,逐行测量,直到目标区域全部拍摄完毕。

4) 与拍摄同步,采用光谱仪测量标志物附近区域和灰色参考板的反射率光谱,同时随机选取其他区域进行反射率光谱的测量。



图 3 实验现场。(a)标志物;(b)沿轨拍摄

Fig. 3 Experiment field. (a) Marker; (b) shoot along track

## 2.2 同步量化方法

原始图像记录的目标的灰度值,没有物理单位,本文统称为 DN 值。必须将 DN 值转换为遥感器端的辐射量纲数据,才可进行比较。当大气模式为中纬度夏季,对处于北纬 31°东经 117°的某地区,同一天内某地区太阳天顶角分别处于 30°和 45°时,即两个不同时间点,地表辐亮度变化过程如图 4 所示。从图 4 中可以看出,太阳天顶角处于 30°和 45°时辐亮度随波长的变化趋势相同,但是对于同一波长下辐亮度差值明显,即一天内不同时刻地表的辐亮度值变化较大。因此,只能选择光谱反射率作为量化处理的辐射量纲。

记录图像的相机接收到的信号记作  $L$ ,  $L_{ssp}$  为大气对太阳辐射的单次散射,  $L_{map}$  为与背景相互作用后大气多次散射部分,  $L_0$  为直接太阳辐射和太阳辐射通过大气分子与气溶胶的单次散射及多次散射

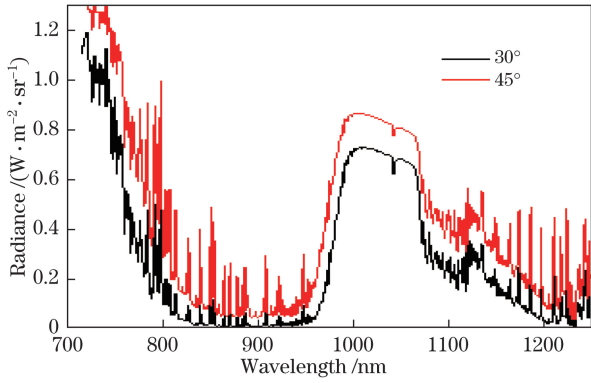


图 4 辐亮度变化过程

Fig. 4 Process of radiance change

经地面目标反射到相机的辐射,  $f$  为大气透射率,  $L_p$  为程辐射,  $g$  为相机中的不同增益,  $L_{oig}$  为成像光谱仪的零输入响应。对遥感器的某一波段  $i$  而言存在下列关系:

$$L_i = g_i (L_{oif_i} + L_{ssp} + L_{mspi}) + L_{oig} = g_i (L_{oif_i} + L_{pi}) + L_{oig} = (g_i \times f_i) \times L_{oi} + (g_i \times L_{pi} + L_{oig})。 (1)$$

目标上的辐照度为  $E$ , 目标上的反射率为  $d$ , 则

$L_o = \frac{d}{\pi} E$ , 那么对某  $i$  波段而言:

$$L_i = (g_i \times f_i) \times L_{oi} + (g_i \times L_{pi} + L_{oig}) = \left( \frac{g_i E_i}{\pi} \times f_i \right) \times d_i + (g_i \times L_{pi} + L_{oig})。 (2)$$

由(1)~(2)式可看出, 相机的通道  $i$  接收的信号  $L_i$  与地面目标的有效亮度  $L_{oi}$  及目标反射率  $d_i$  为线性回归关系。消除大气影响因素和相机自身因素, 即可对原始图像进行大气纠正, 进而可将成像光谱数据转换成反射率图像, 因此(1)~(2)式改写成:

$$L_{oi} = \frac{1}{(g_i E_i f_i) \pi} \times L_i + \frac{g_i \times L_{pi} + L_{oig}}{g_i \times f_i} = k'_i L_i + b'_i, (3)$$

$$d_i = \frac{1}{(g_i E_i f_i) \pi} \times L_i + \frac{g_i \times L_{pi} + L_{oig}}{(g_i E_i f_i) \pi} = k_i L_i + b_i, (4)$$

式中,  $k'_i, b'_i, k_i, b_i$  为线性回归系数,  $k'_i, k_i$  包含了大气透射率成分,  $b'_i, b_i$  包含了程辐射和空中遥感器零响应成分。

由于相机的通道  $i$  接收的信号与地面目标的反射率  $d_i$  为线性关系, 可利用辐射校正法进行量化, 将零视距原始图转化为零视距反射率图像。同步辐射校正法是一种被广泛应用的统计模型。根据相机记录值与光谱反射率之间的线性关系, 将图像

标记区域记录的平均  $V_{DN}$  值和实测的对应区域的平均反射率进行线性拟合, 线性拟合方程为

$$V_{REF} = K \times V_{DN} + B, (5)$$

式中,  $V_{REF}$  表示对应区域的实测反射率,  $V_{DN}$  表示对应区域的灰度值。  $K, B$  是需要拟合的相关参数, 即为(4)式中所提到的线性回归系数。根据同步辐射校正法线性拟合出参数  $K, B$  的值, 通过  $V_{DN}$  值的输入转换得到反射率值, 由此, 将零视距原始图转换成反射率图像。

### 3 实验结果

通过实验所得结果为零视距原始图和零视距反射率图, 实验数据处理过程如图 5 所示。零视距原始图是将序列局部图像拼接成局部全景图, 并且进行几何校正, 最后合成零视距原始图。零视距标准图是采用同步辐射校正法将图像进行定量化处理, 转换成零视距反射率图像。

#### 3.1 零视距原始图

给定某个场景的一组互相有重叠的局部图像, 生成包含这组局部图像的一幅完整的宽视场图像, 称为图像拼接。将获得的几百张原始图像通过逐行拼接, 最后合成零视距原始图。图像拼接过程需要在相邻两幅图像的重叠区域搜索并匹配相同的图像内容, 从而确定两幅图像之间的相对位置关系, 实现相邻两幅图像对接处理。利用每个图片具有  $1/5 \sim 1/4$  的重叠部分进行几何扭曲校正合成, 得到每行的图像, 并将图像模式设置为灰度, 图 6 所示为草地第一行经过合成后的局部图像。

在 Envi 软件中, 针对不同的数据源和辅助数据, 利用卫星自带的地理定位文件可以进行几何校正、Image to Image 几何校正、Image to Map 几何校正和 Image to Image 自动图像配准。本实验选用的是 Image to Map 几何校正, 即通过地面控制点对遥感影像进行几何校正, 控制点则是通过计算后键盘输入坐标数据并在图像上找到对应点, 对应的控制点即为地面上按相同步长摆放的标志物。由于地面的控制点具有几何一致性, 所以利用地面的这些控制点数据对图像的几何畸变本身进行数学模拟, 图 7 为草地第一行经过几何校正后的图像。

将数张几何校正后的行局部图像拼成一幅无缝高分辨率原始图。根据模板或者图像特征之间的对应关系, 将待拼接图像的重合区域进行融合得到拼接重构的平滑无缝零视距原始图像, 如图 8 所示, (a) 为水泥地 1, (b) 为水泥地 2, (c) 为草地。

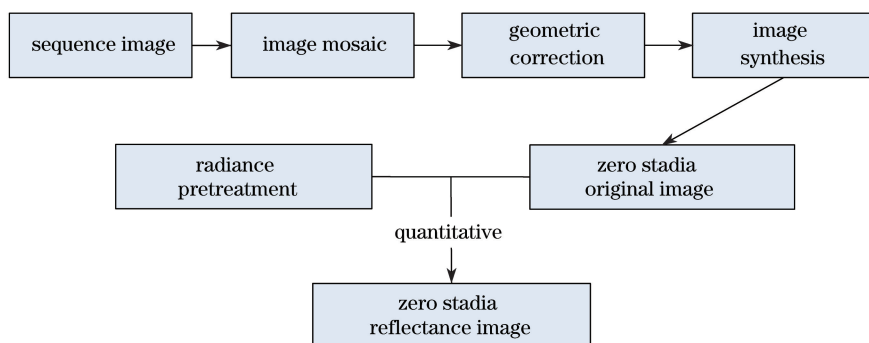


图 5 零视距图像处理过程

Fig. 5 Process of zero stadia image

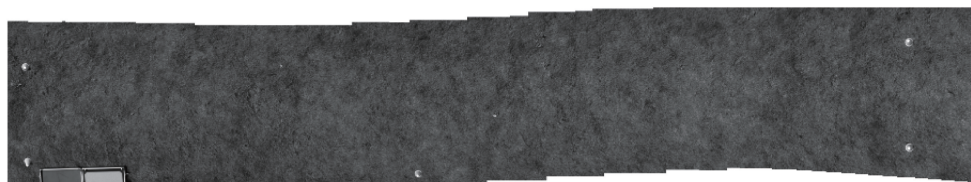


图 6 图像合成后图像

Fig. 6 Image after synthesis

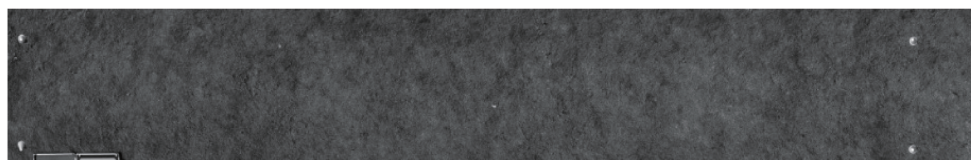


图 7 校正后图像

Fig. 7 Corrected image

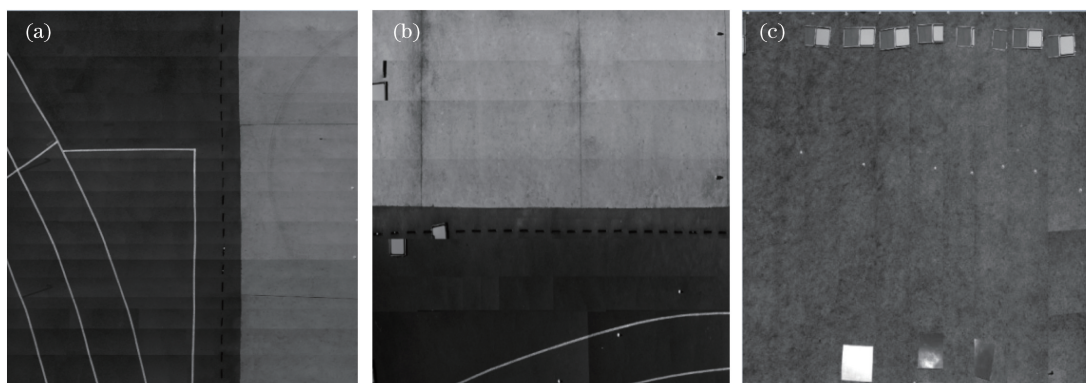


图 8 目标区域原始图。(a)水泥地 1;(b)水泥地 2;(c)草地

Fig. 8 Original figure of target area. (a) Cement floor 1; (b) cement floor 2; (c) lawn

### 3.2 零视距标准图(反射率图)

相机记录的值和对应区域实测反射率值之间满足线性关系,采用辐射校正法进行定量化。相机记录的均是宽波段内的平均值,而光谱仪测量的是各波长下目标地物光谱反射率值。基于相机的特性,需要对辐射光谱进行预处理,得到标记区域和参考板处于 350~900 nm 波段的反射率平均值。采用(5)式进行线性拟合图像记录的  $V_{DN}$  值与反射率之间的关系如图 9 所示。参数  $K$ 、 $B$  的具体值统计如

表 2 所示。

根据所得参数  $K$ 、 $B$  的值,利用(5)式反向模拟反射率值。为了保证获取数据在相机线性动态范围内,一是需要根据地面实际反射强度设置合适的光时间和增益;二是用于同步定量化的参考板,其反射率需要在合适的范围内。综合两方面的考量,图像 DN 值的选择处于相机的线性区 100~60000 或 50~200 内,使得参考板和地物的像素值在相机线性响应区内较均匀地分布。得到的三幅零视距反射

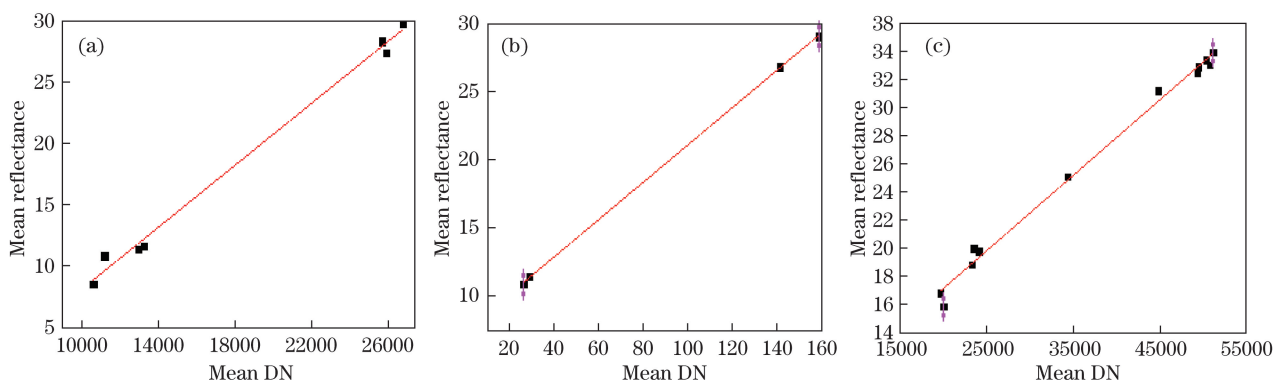


图 9 目标区域拟合图。(a)水泥地 1;(b)水泥地 2;(c)草地

Fig. 9 Fitting figure of target area. (a) Cement floor 1; (b) cement floor 2; (c) lawn

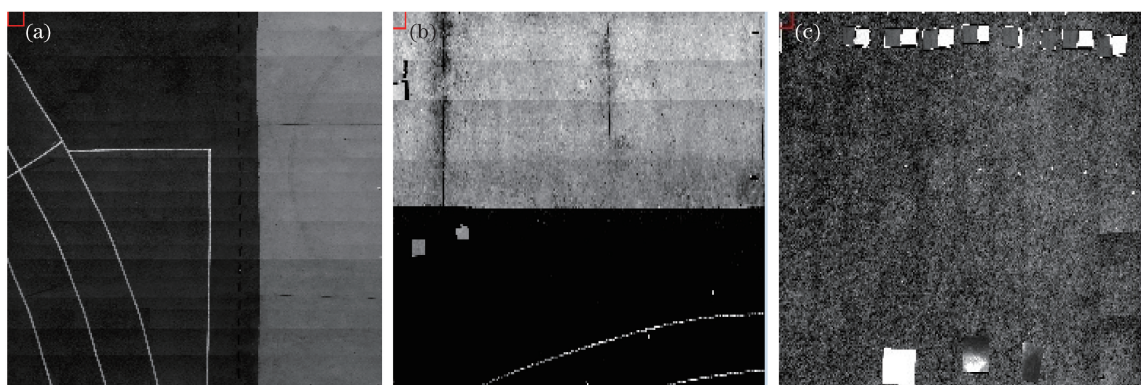


图 10 目标区域零视距图。(a)水泥地 1;(b)水泥地 2;(c)草地

Fig. 10 Zero stadia figure of target area. (a) Cement floor 1; (b) cement floor 2; (c) lawn

表 2 参数  $K$ 、 $B$

Table 2 Parameters of  $K$  and  $B$

Parameter	Cement floor 1	Cement floor 2	Lawn
$K$	0.00126	0.13786	$5.4 \times 10^{-4}$
$B$	-4.32576	7.36908	6.38236

表 3 参数  $K$ 、 $B$  的拟合误差

Table 3 Fitting errors of parameter  $K$  and  $B$

Parameter	Cement floor 1	Cement floor 2	Lawn
$V_{K\_error} / 100\%$	$4 \times 10^{-5}$	0.00114	$1 \times 10^{-5}$
$V_{B\_error} / 100\%$	0.82148	0.12276	0.53468

率图,如图 10 所示。

## 4 精度分析

对处理过的原始图进行量化后,得到零视距反射率图。通过分析其不确定度的理论估算值和误差,验证零视距反射率图的可用性。

### 4.1 不确定度的理论估算

基于同步辐射校正法的不确定度主要来源于拟合误差和测量不确定度。利用同步辐射校正法拟合时,参数  $K$ 、 $B$  都存在一定的拟合误差  $V_{K\_error}$  和  $V_{B\_error}$ 。三幅图像拟合过程中参数  $K$ 、 $B$  的拟合误差如表 3 所示,可以看出拟合误差均在 1% 以内,表明拟合结果较好。

测量不确定度,即对被测量值不能肯定的程度,也表明该结果的可信赖程度。它是测量结果质量的

指标。不确定度越小,所述结果与被测量的真值越接近,水平越高,其使用价值越高;不确定度越大,测量结果的质量越低,水平越低,其使用价值也越低。在报告物理量测量的结果时,必须给出相应的不确定度,一方面便于使用它的人评定其可靠性,另一方面也增强了测量结果之间的可比性。对于此次实验仪器的不确定度,即光谱仪的测量不确定度为 0.17%。零视距反射率图像的不确定度由理论估算公式计算所得,即

$$V_{T\_estimate} = \sqrt{V_{M\_error}^2 + V_{error}^2}, \quad (6)$$

式中,  $V_{T\_estimate}$  为理论估算值,  $V_{M\_error}$  是测量不确定度,  $V_{error}$  为拟合误差。三幅图像的不确定度的理论估算值  $V_{Estimated\_value}$  如表 4 所示。由表 4 可知,所得零视距标准图的不确定度均在 1% 内。

表 4 不确定度的理论估算

Table 4 Theoretical estimation of uncertainty

Area	Cement floor 1	Cement floor 2	Lawn
$V_{Estimated\_value} / 100\%$	0.8389	0.2079	0.5611

## 4.2 误差分析

对零视距标准图进行误差分析,计算出来的零视距反射率图相对实测的误差如表 5~7 所示。相对误差最大约为 3.34%,最小为 0.07%。即在误差允许 5%的范围内,该反射率图像能作为零视距标准图使用。

表 5 水泥地 1

Table 5 Cement floor 1

	$V_{Measured\_Ref}$	$V_{Simulate\_Ref}$	$V_{Relative\_error} / 100\%$
1	29.80174	29.37048	1.447112
2	8.61878	8.90659	3.339375
3	28.37086	27.97529	1.394277
4	27.44236	28.25718	2.969215

表 6 水泥地 2

Table 6 Cement floor 2

	$V_{Measured\_Ref}$	$V_{Simulate\_Ref}$	$V_{Relative\_error} / 100\%$
1	28.20121	27.98649	0.761386
2	27.95568	27.73198	0.800195
3	10.85616	10.86443	0.076193
4	11.46058	11.39127	0.604733

表 7 草地

Table 7 Lawn

	$V_{Measured\_Ref}$	$V_{Simulate\_Ref}$	$V_{Relative\_error} / 100\%$
1	32.87892	33.09092	0.644785
2	33.91467	33.96521	0.149013
3	33.38226	33.54343	0.482788
4	25.09455	24.92857	0.661425

## 5 结 论

由于地面设备无法直接获取大幅宽的图像,于是采用逐行拍摄的方式将获得的序列图像进行拼接合成。为了避免时相不一致性,采用辐射校正法将图像进行定量化得到零视距反射率图。采用地面设备获取的零视距图其分辨率达到毫米级,相较无人机等低空飞行设备获取所得零视距图像的分辨率有

所提高;由于近地拍摄,大气影响可忽略,并且可利用同步实测的方法验证自身精度。采用地面测量手段虽然存在工作量较大、自动化程度不高等问题,但是在某些区域地面测量是唯一可行的手段。对零视距反射率图像进行误差分析和精度验证,结果显示零视距反射率图的误差在 5%内,其不确定度在 1%内。通过所提出的获取方法得到的零视距反射率图像在误差和不确定度允许的范围,能作为零视距标准图使用,在高分辨率卫星成像仿真中具有参考价值。

## 参 考 文 献

- [1] Fan C C, Wang M, Zhao W W, *et al.* A compensation modeling method for time-varying systematic error of high-resolution optical satellite image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1228001.  
范城城, 王密, 赵薇薇, 等. 一种高分辨率光学卫星影像时变系统误差建模补偿方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(12): 1228001.
- [2] Ruan N J, Zhuang X X, Li T T, *et al.* End to end simulation and analysis of space optical remote sensing system[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2013, 34(6): 36-43.  
阮宁娟, 庄绪霞, 李妥妥, 等. 空间光学遥感系统全链路仿真与分析[J]. *航天返回与遥感*, 2013, 34(6): 36-43.
- [3] Schott J R, Gerace A D, Brown S D, *et al.* Modeling the imaging performance of the landsat data continuity mission sensors[C]. *SPIE*, 2011, 8153: 8153OF.
- [4] Borner A, Wiest L, Keller P, *et al.* Sensor: a tool for the simulation of hyperspectral remote sensing systems[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2001, 55(5): 299-312.
- [5] Gregory G G, Friere E R. End-to-end electro-optical modeling software[C]. *SPIE*, 1999, 3780: 883-889.
- [6] Gartley M, Schott J, Raqueno N, *et al.* Data-driven simulations of the landsat data continuity mission (LDCM) platform[C]. *SPIE*, 2011, 8048: 289-293.
- [7] Wang B H, Ruan N J, Guo C L, *et al.* Optical system design of airborne light and compact high resolution imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1022001.  
王保华, 阮宁娟, 郭崇岭, 等. 机载轻小型高分辨率成像光谱仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1022001.