

基于海岸线区域两类不同轴遥感设备之间匹配应用

汪俊锋^{1,2}, 邓宏平^{2*}, 易维宁^{1*}, 陈震霆^{1,2}, 杜丽丽¹, 黄红莲¹

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘要:以高光谱分辨率的空间外差光谱仪为例, 针对其获取地表目标干涉数据的特点, 提出一种利用高空间分辨率遥感图像中海岸线区域的大面积均匀地貌且地表反射率有突变的特征来对空间外差光谱仪进行指向配准的方法, 实现了不同轴成像遥感设备与非成像遥感设备之间的匹配应用. 利用空间外差光谱仪在多个对地观测点的结果干涉数据和相同经纬度区域的高空间分辨率图像数据进行地基测试实验, 将配准校正结果与其标称值进行对比, 误差范围在-3%~5%. 结果表明, 该方法可为星载不同轴成像遥感设备与非成像遥感设备之间匹配应用提供参考依据.

关键词:成像遥感设备; 非成像遥感设备; 匹配应用; 海岸线区域; 不同轴; 反射率突变; 栅格坐标; 误差校正
中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A

Application of matching between two kinds of non-coaxial remote sensing equipment in coastline area

WANG Jun-Feng^{1,2}, DENG Hong-Ping^{2*}, YI Wei-Ning^{1*}, CHEN Zhen-Ting^{1,2},
DU Li-Li¹, HUANG Hong-Lian¹

(1. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. University of science and technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Taking the hyperspectral resolution of Spatial Heterodyne Spectrometer (SHS) as an example, and extracting from the characteristics of the ground surface interferometric data with SHS, this paper proposed a method to match and correct the pointing error of SHS. It used the feature of large area uniform landform and abrupt change of the surface reflectance in coastline area of the high spatial resolution remote sensing image. This method realized the matching application between non-coaxial imaging remote sensing equipment and non-imaging remote sensing equipment. The SHS was used to perform ground-based testing experiment on the results of interferometric data at several earth observation points and high spatial resolution image data in the same latitude and longitude region. The results of the calibration correction were compared with their nominal values. The error ranges from -3 % to 5%. The results show that the proposed method can be used as a reference for matching application between non-coaxial imaging remote sensing equipment and non-imaging remote sensing equipment on board the satellite.

Key words: imaging remote sensing equipment, non-imaging remote sensing equipment, matching application, coastline area, non-coaxial, reflectivity saltation, grid coordinate, error correction

PACS: 42. 68. Wt

收稿日期: 2016-12-01, 修回日期: 2017-04-12

Received date: 2016-12-01, revised date: 2017-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601379), 国家 973 计划项目(61322504)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(41601379), and the Major State Basic Research Development Program (61322504)

作者简介(Biography): 汪俊锋(1985-), 男, 安徽肥东人, 博士研究生, 主要研究领域为遥感数字图像处理. E-mail: wangjunf@mail.ustc.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: denghp83@ustc.edu.cn, yiwn@aiofm.ac.cn

引言

遥感设备主要分为成像遥感设备与非成像遥感设备. 成像遥感设备是一种利用光学成像原理形成影像并记录各种地物影像数据的设备, 如遥感相机^[1]. 成像遥感设备输出是图片数据, 可以做到很高的空间分辨率, 直接反映地物目标的可视化图像信息. 非成像遥感设备是指利用地物目标吸收、辐射和发射电磁波信息的物理特征来对目标进行探测、识别和定位的遥感设备, 如光谱扫描仪、合成孔径雷达、微波辐射器等. 非成像遥感设备输出反映地物目标性质和状态的波谱信息数据, 具备较高的光谱分辨率, 属于对遥感目标定量和定性的解释.

当前, 综合利用多种遥感设备进行数据提取和分析已成为遥感领域的一个重要手段. 高光谱成像仪在 CCD 探测之前有一个分光过程, 需要将混合的白光分解到各个波段上, 再被探测器接收, 这样平均到每个波段的能量就少, 从而形成高光谱图像的空间分辨率比全色图像要低. 高光谱成像仪虽然融合了成像遥感设备与非成像遥感设备的各自优势, 在对地物目标空间特征成像的同时, 获取影像每个像元因色散而形成的连续波段光谱数据, 但是由于光学的物理特性限制, 当前的高光谱成像设备无法做到同时获取到目标的高空间分辨率图像和高光谱分辨率谱段.

因此在需要同时获取目标的高空间分辨率图像和高光谱分辨率的应用上, 就必须同时使用两种不同类型的遥感设备. 由于多种类型遥感设备对同一地物目标的同时探测, 不同遥感设备是否同时准确对准待测地物目标, 成为在高精度定量遥感数据应用和融合时首先要解决的问题. 由于不同类型设备之间数据差异性和匹配难度, 目前国内外对配准的研究多是相同数据类型设备之间, 很多配准算法都是基于图像与图像之间匹配操作而提出的, 而对于不同数据类型设备之间的配准研究较少, 提出的解决方法也鲜有报道^[2,4].

空间外差光谱仪输出为高光谱分辨率的干涉数据, 属于非成像遥感设备, 可以真实有效地获取地表目标或大气分子的高光谱分辨率信息, 提高了量化高光谱数据反演参量的精度, 在大气监测和污染源精细成分探测等领域发挥着重要作用^[6]. 由于载荷姿轨参数和安装误差测量不确定性以及因引力、设备老化等多个方面因素导致空间外差光谱仪存在指向误差, 需要对其指向进行配准匹配并定期监

督^[7]. 本文利用海岸线区域高空间分辨率遥感影像中的大面积均匀地貌且地表反射率有突变的特征, 来对空间外差光谱仪的指向误差进行配准校正处理.

1 原理

1.1 空间外差光谱仪

空间外差光谱仪以空间调制的方式产生两个相干光束, 通过改变两出射光束的波面夹角来获得光程差实现干涉^[8]. 干涉条纹的空间频率取决于入射光频率与一个特定频率之间的频率差, 形成频率外差干涉^[7]. 干涉条纹产生的空间频率可以通过光栅方程进行推导:

$$\sigma(\sin\theta + \sin(\theta - \gamma)) = m/d \quad (1)$$

其中 σ 为入射光的波数, m 为光栅衍射级(通常情况下取 $m=1$), θ 为光栅 Littrow 角, $1/d$ 为光栅的刻线密度. 任意波数为 σ 的光束入射空间外差光谱仪后, 在出射面上与 Littrow 波数 σ_0 的光束出射角相差角度 γ , 两光栅出射光波面相差角度为 2γ , 故波数为 σ 的两束光产生的干涉条纹空间频率为:

$$f_x = 2\sigma\sin\gamma \approx 4(\sigma - \sigma_0)\tan\theta \quad (2)$$

其中的右边项, 是在假设 γ 很小时, 由上式一阶展开获得. 两 Littrow 波数的光经光栅衍射后波前与光轴垂直且前同位相, 干涉条纹为零空间频率, 将光波数 σ_0 视为空间外差光谱仪的系统基频. 偏离基频波数越远, 干涉条纹空间频率越高. 对光谱 $B(\sigma)$ 输入, 探测器在 x 方向(光栅衍射方向)上获取的干涉图信号为:

$$I(x) = \int_0^{\infty} B(\sigma)(1 + \cos[2\pi(4(\sigma - \sigma_0)xtan\theta)])d\sigma \quad (3)$$

再通过傅里叶变换获得干涉图光谱.

卫星在运行中, 空间外差光谱仪载荷沿着卫星的穿轨方向进行隔点扫描测量, 我们称为打点^[9-10]. 周期性地将扫描观测点的测量信息同步发送至地面卫星控制中心, 这些信息包括扫描点原始干涉图数据、扫描点实测经纬度坐标等. 每个观测点得到一个干涉图数据, 相邻观测点之间的距离根据扫描模式的不同而不同, 以每行 5 个扫描点的模式为例, 相邻观测点的地面距离约为 160 km.

1.2 指向误差

指向误差定义为: 目标物的理论指向与实际指向之间的误差^[11], 对于空间外差光谱仪来说, 指向误差指遥感地面目标地点的理论地理坐标与实际地

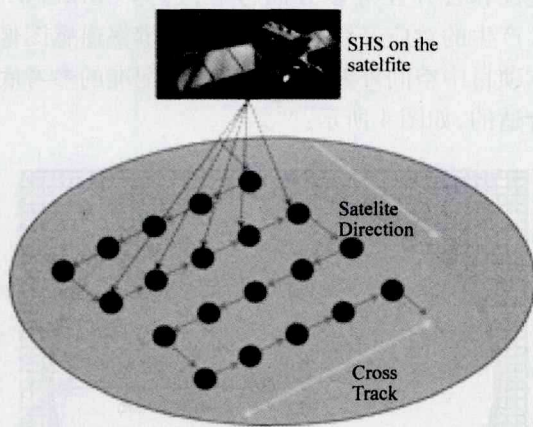


图1 卫星空间外差光谱仪扫描探测原理图
Fig. 1 The schematic diagram of spatial heterodyne spectrometer scanning detection

理坐标误差^[12-13],即经度误差 δlon_i 和纬度误差 δlat_i ($i=1,2,\dots,n,n$ 为观测点个数).

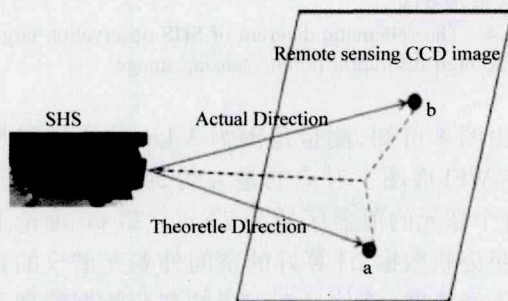


图2 空间外差光谱仪指向误差示意图
Fig. 2 The schematic diagram of spatial heterodyne spectrometer pointing error

指向误差模型为:

$$\delta\text{lon}_i = \widehat{\text{lon}}_i - \text{lon}_i = f(\delta\text{lon}_i, a) + \gamma_i, \quad (4)$$

$$\delta\text{lat}_i = \widehat{\text{lat}}_i - \text{lat}_i = f(\delta\text{lat}_i, b) + \varphi_i, \quad (5)$$

$$\delta\text{lon} = \frac{(\sum_{i=1}^n f(\delta\text{lon}_i, a) + \gamma_i)}{n}, \quad (6)$$

$$\delta\text{lat} = \frac{(\sum_{i=1}^n f(\delta\text{lat}_i, b) + \varphi_i)}{n}, \quad (7)$$

其中 $\widehat{\text{lon}}_i$ 和 $\widehat{\text{lat}}_i$ 为观测点的实测经度和纬度; lon_i 和 lat_i 为观测点的真实经度和纬度; $f(\delta\text{lon}_i, a)$ 和 $f(\delta\text{lat}_i, b)$ 为各观测点经度误差和纬度误差为未知量的拟合函数; γ_i 和 φ_i 为残余误差; δlon 和 δlat 为空间外差光谱仪经纬度指向误差偏移量数值. 经度误差和纬度误差为未知量的拟合函数 $f(\delta\text{lon}_i, a)$ 和 $f(\delta\text{lat}_i, b)$ 可以选择二次曲线拟合模型. 以 $f(\delta\text{lon}_i, a)$

为例,其是一个以 δlon_i 为变量的二次函数. 一般来讲, $f(\delta\text{lon}_i, a)$ 的值(记为 y)将不会全部落在某条曲线上,若第 k 个数据(记为 x_k)对应的值恰好落在曲线上,则这个点的值(记为 y_k)满足二次曲线的方程,即

$$a_0 + a_1 x_k + a_2 x_k^2 = y_k, \quad (8)$$

如果这个点不在曲线上,则它的坐标不满足曲线方程,有一个残差,即 γ_i 和 φ_i . 于是全部点处的总误差用残差平方和表示

$$F(a_0, a_1, a_2) = \sum_{k=1}^n [(a_0 + a_1 x_k + a_2 x_k^2) - y_k]^2, \quad (9)$$

这是关于 a_0, a_1 和 a_2 的一个三元函数,合理的做法是选取 a_0, a_1 和 a_2 ,使得这个函数取极小值. 为了求该函数的极小值点,令

$$\frac{\partial F}{\partial a_0} = 0, \frac{\partial F}{\partial a_1} = 0, \frac{\partial F}{\partial a_2} = 0, \quad (10)$$

得

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^n 2[(a_0 + a_1 x_k + a_2 x_k^2) - y_k] = 0 \\ \sum_{k=1}^n 2[(a_0 + a_1 x_k + a_2 x_k^2) - y_k] x_k = 0 \\ \sum_{k=1}^n 2[(a_0 + a_1 x_k + a_2 x_k^2) - y_k] x_k^2 = 0 \end{cases}, \quad (11)$$

这是关于待定系数 a_0, a_1 和 a_2 的线性方程组,拟合模型的结果就是求出这3个待定系数.

2 方法

根据指向配准的原理,需要将非光学成像设备的光谱观测点匹配到对应经纬度区域范围内的参考遥感成像底图上. 参考遥感图像的每个像元对应一个栅格坐标,该坐标可以通过遥感图像的地理信息参数,计算出每个像元对应的地理坐标,即经纬度. 卫星的指向载荷系统会根据卫星的姿轨数据,计算好星下观测点的经纬度. 当然这个经纬度信息只是理论计算值,由于卫星姿轨参数和光谱仪安装误差和测量不确定性以及引力、设备老化等多个方面因素会导致观测点经纬度理论计算值存在误差. 所以空间外差光谱仪的指向配准过程就是建立配准误差校正模型和误差校正算法^[14],解算出观测点经纬度匹配到遥感底图上对应像元上的经纬度误差值并进行配准校正.

2.1 配准参考底图和坐标定位

根据遥感光学成像原理,地面点目标的光能量,

穿过大气层到达遥感图像探测器入瞳处,并经过光学系统最终到达探测器焦平面.假设该探测器是理想成像系统,目标在焦平面上理论成像面积正好占满一个像元.然而实际中成像正好在一个像元内的情况比较少见,目标在传感器阵列上所成的像大多会在几个像元之间;如果观测目标较小且像元分辨率低,则会出现多个目标在一个像元内.

已知某星载空间外差光谱仪对地观测点的测量范围是 3 km,即一个直径为 3 km 的圆形范围,光谱仪测量到观测点的干涉图光谱,每个观测点都对应一个理论地面经纬度信息.该卫星还拥有用于温室气体反演的遥感图像探测器,探测器的空间分辨率为 10 km,即图像的每个像元覆盖的地面范围为 10 km × 10 km.如果以该图像探测器生成的遥感地面图像作为配准的参考底图,那么可能会出现的最极端的情况是九个观测点都指向底图上的一个像元,如图 3 所示:

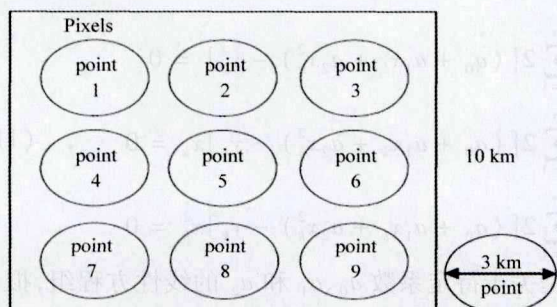


图 3 九个观测点在探测器一个像元上成像示意图
Fig. 3 The schematic diagram of nine observation targets in one pixel

由以上分析可知,多个观测点的经纬度坐标与底图上一个像元的经纬度坐标进行对应,显然会造成指向定位精度低,误差大,究其原因还是作为参考底图的遥感地面图像空间分辨率过低.所以,选择空间分辨率为 10 km 的卫星自带图像探测器生成的遥感地面图像作为配准的参考底图是不合适的.

中巴地球资源卫星 04 星(简称 CBERS-04)是由中国和巴西联合研制,2014 年 12 月 7 日在太原卫星发射中心成功发射,卫星轨道高度 778 km,倾角 98.5°,总质量 2 060 kg,卫星上装有 4 种成像载荷,包括全色/多光谱相机、多光谱相机、红外相机以及宽视场成像仪(简称 WFI),其中,因为 WFI 分辨率高(73 m)、幅宽大(866 km)的特点,广泛应用于国土、水利、林业资源调查等领域^[15].从成像传感器光谱特性、辐射和空间分辨率、图像幅宽、图像数据

完整性和公开性等多方面考虑,选择 CBERS-04 的 WFI 产生的对应经纬度范围的高分辨率遥感图像作为本项目中空间外差光谱仪的指向配准的参考底图是合适的,如图 4 所示:

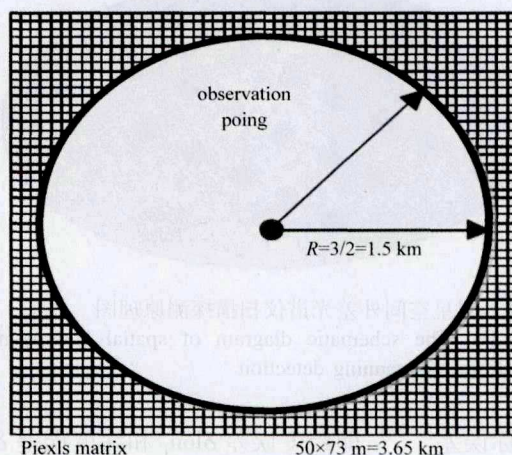


图 4 空间外差光谱仪观测点在高分辨率遥感底图上的成像示意图

Fig. 4 The schematic diagram of SHS observation target in the high resolution remote sensing image

由图 4 可知,测量范围为 3 km 的光谱仪观测点,在 WFI 底图上对应的是大约 50 × 50 个像元区域,每个像元的覆盖区域为 73 m × 73 m.理论上根据卫星姿轨数据,计算好的空间外差光谱仪的观测点星下经纬度(该信息在卫星的载荷数据管理系统中获得),在 50 × 50 个像元区域里,肯定有一个像元的栅格坐标经过坐标空间转换后,等于或接近光谱仪的观测点星下经纬度坐标.

2.2 配准误差校正模型和算法

观测点的星下经纬度是理论计算值,因多方面因素会导致观测点星下经纬度理论计算值存在误差,这个误差值是经常性变化的,需要周期性对其进行监督和配准校正.配准模型建立的前提是观测点星下经纬度理论计算值是不可信的,需要寻找一种方法来确定观测点的真实经纬度,再用这些观测点的真实经纬度与星下理论计算的经纬度进行差值,并对一系列的差值做拟合,从而得到星载空间外差光谱仪指向配准的数学模型.确定某些观测点真实经纬度的方法成为了建立配准误差校正算法模型的重点.

地球表面的海岸线区域具有大面积均匀地貌并且地表反射率有突变的特征,如果每行穿轨观测点中有一个点落在海岸线上,则这个落在海岸线上的观测点是可以通过光谱干涉图数据计算出来的.对

于这种落在海岸线上的观测点,称之为特殊观测点,其可以通过光谱干涉数据的处理计算,判断出该点真实经纬度坐标。

假定在地表反射率高的地点其干涉数据输出 DN 值为 G_h , 在地表反射率低的地点其干涉数据输出 DN 值为 G_l 。这样空间外差光谱仪实际指向处于海岸线突变交界处采样输出干涉数据 G_m :

$$G_m = a \cdot G_h + b \cdot G_l \quad (12)$$

其中 a, b 分别为空间外差光谱仪实际采样圆形视场亮地表和暗地表所占的比例,并且满足: $a + b = 1$ 。

使用最小二乘法线性拟合的准则,计算各观测点干涉数据有效范围内基线均值作为该观测点干涉数据数值。

$$S = \sum_{i=1}^m [y_i - f(x_i)]^2 = \sum_{i=1}^m [y_i - ax_i - b]^2 \quad (13)$$

$$a = \frac{m \sum_{i=1}^m x_i y_i - \sum_{i=1}^m x_i \sum_{i=1}^m y_i}{m \sum_{i=1}^m x_i^2 - (\sum_{i=1}^m x_i)^2} \quad (14)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^m x_i^2 \sum_{i=1}^m y_i - \sum_{i=1}^m x_i y_i \sum_{i=1}^m x_i}{m \sum_{i=1}^m x_i^2 - (\sum_{i=1}^m x_i)^2} \quad (15)$$

$$I = \frac{\sum_{i=1}^m (ax_i + b)}{m} \quad (16)$$

将每幅干涉数据 I_j 与其穿轨方向的临近两幅干涉数据 I_{j-1}, I_{j+1} 进行比较。若当前观测点干涉数据 I_j 比临近的暗干涉数据数值大, 而比临近的亮干涉数据数值小, 且满足亮、暗两干涉数据均值阈值, 则认为当前观测点为理论海岸线上点:

$$I_{j-1} \times \mu > I_j > I_{j+1} \times \xi \quad (17)$$

$$\text{或} \quad I_{j-1} \times \mu < I_j < I_{j+1} \times \xi \quad (18)$$

$$\text{Abs}(I_{j-1} - I_{j+1}) > \vartheta \quad (19)$$

其中 μ, ξ 和 ϑ 为亮、暗两干涉数据均值可调节的实验室阈值。

在参考底图上对理论海岸线上观测点的左右相邻点进行连线, 确定连线与参考底图上实际海岸线的交点, 将该交点的栅格坐标转换为经纬度信息作为该观测点对应的实际海岸线经纬度坐标。计算理论海岸线上观测点干涉数据自带经纬度信息与海岸线交点实际经纬度信息的差值, 作为观测点指向误差。统计一段时间内指向误差, 将剔除异常误差点后均值作为最终空间外差光谱仪的指向误差。

3 实验及结果

海岸线底图我们选择南非靠近印度洋的海岸线区域, 如果在大陆海岸线的边缘附近有较大的岛屿, 会对配准算法造成较大的影响, 所以在选择海岸线时要尽量避开岛屿, 选取如图中红色标注点位置, 如图 5 所示。选择 CBERS-04 WFI 在对应经纬度即南非德班附近海岸线所产生的中高分辨率遥感图像作为参考底图, 如图 6(a) 所示。采用非监督分类(2 个 calss), 可以很好的提取海岸线, 结果如图 6(b) 所示。



图 5 海岸线区域遥感底图上的实际区域位置选择
Fig. 5 The actual location choice of remote sensing image in land-sea boundary region

图 6(c) 表示了两副图像的叠合, 可以看出很好的分离了海洋和陆地。图 6(d) 的红色线为精确提取的海岸线, 至此已经完成了海岸线的精确提取。

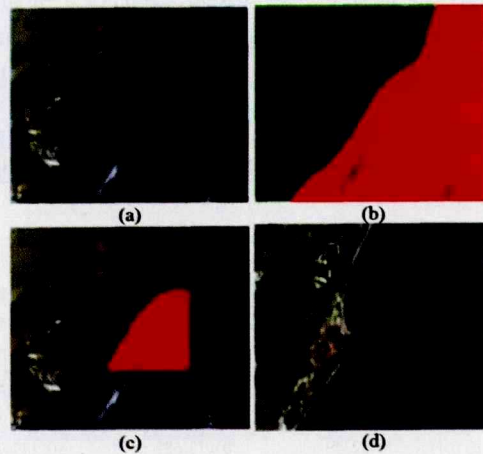


图 6 海岸线区域遥感底图的海岸线信息提取
Fig. 6 The extracting of coastline information using the remote sensing image in land-sea boundary region

从数据库管理系统获取固定时间内的对应参考

底图经纬度区域范围内的空间外差光谱仪观测点原始干涉数据,并根据干涉数据自带经纬度信息将各观测点叠加显示在中分辨率参考底图像上,如图 7(a)所示.每行 5 个观测点,这些观测点沿穿轨方向等间隔均匀地分布在遥感底图表面,使用红点标记,如图 7(b)所示,再利用式(13-16)对每个观测点数据进行拟合计算,求出每个观测点基线均值.按顺序对每行穿轨方向的观测点原始干涉数据与其临近的两个观测点干涉数据进行系列比较处理,利用式(17-19),如果找到海岸线上的点,则用绿点标记出,如图 7(c)所示.对于已经找到位于海岸线观测点的左右相邻点在中分辨底图上进行连线,计算连线与参考底图海岸线的交点,并将该交点栅格坐标对应的经纬度信息作为该观测点实际经纬度信息,如图 7(d)所示.利用式(4-7),计算出海岸线上观测点的实际经纬度坐标和理论经纬度坐标之间的误差偏移量.

将观测点的地理坐标纬度和经度分别设为 X 轴与 Y 轴,将观测点的干涉数据 DN 值为 Z 轴,并将系统标称的观测点参考位置和观测点的实际位置在同一坐标系中显示,由此画出三维图像,如图 8 所示,显示了六组穿轨方向上的观测点目标在地理空间上的分布情况.从图 8 的观测点地理坐标位置走向分布来看,与测试实验中遥感参考底图上叠加的观测点位置一致,从各观测点的干涉数据 DN 值分布来看,可以得出位于海洋中的观测点的干涉数据 DN 值在 1 500 ~ 3 000 之间,位于陆地上的观测点的干涉数据 DN 值在 6 000 ~ 8 000 之间,位于陆海交界处观测点的干涉数据 DN 值在 3 000 ~ 5 000 之间.

利用上述指向配准计算方法获取位于海岸线上

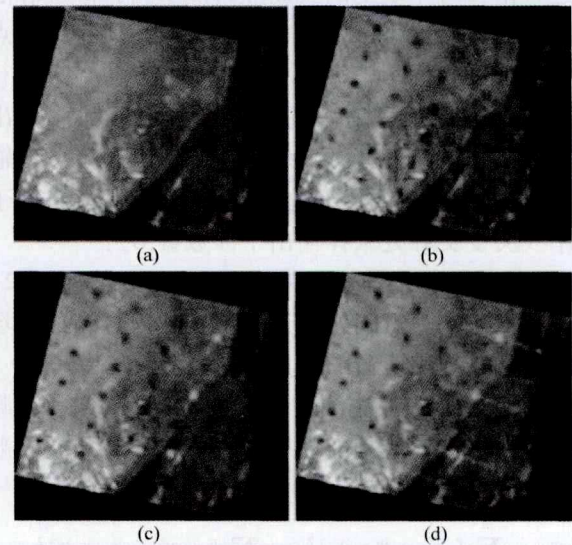


图 7 海岸线上的观测点实际指向位置获取流程

Fig. 7 The flow chart of achieving the actual pointing location of observation target on the coastline

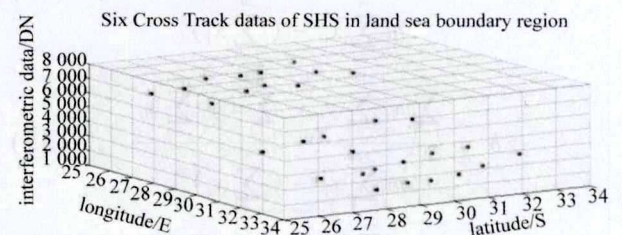


图 8 海岸区域内穿轨方向 SHS 各个观测点实际指向位置(红点)和参考指向位置(绿点)以及干涉数据值分布

Fig. 8 The distributing of pointing location (red) and reference pointing location (green) and the interferometric data of many targets on earth in cross track measured by SHS in the land-sea boundary region

观测点的指向误差,统计一段时间内指向误差,将剔

表 1 空间外差光谱仪指向配准结果(实际指向偏移)与参考指向偏移的对比误差范围

Table 1 The results of SHS pointing calibration(actual direction offset) contrast with the reference direction offset

序号	观测点号 (海岸线)	实际指向偏移		参考指向偏移		对比误差范围/(%)	
		经度	纬度	经度	纬度	经度	纬度
1	6001133	0.902 734°	-0.154 863°	0.913 891°	-0.152 651°	-1.220 823 93	1.449 056 999
2	6157841	0.698 186°	-0.130 083°	0.681 912°	-0.134 102°	2.386 524 948	-2.996 972 45
3	6189223	0.720 005°	-0.130 546°	0.708 989°	-0.132 872°	1.553 761 765	-1.750 556 93
4	6205467	0.863 317°	-0.172 279°	0.831 839°	-0.173 417°	3.784 145 73	-0.656 221 71
5	6362439	0.569 856°	-0.168 862°	0.543 641°	-0.167 535°	4.822 116 066	0.792 073 298
6	6393761	0.652 397°	-0.192 367°	0.671 593°	-0.183 537°	-2.858 278 75	4.811 019 032
7	6452349	0.913 682°	-0.147 983°	0.921 537°	-0.143 624°	-0.852 380 32	3.035 008 077
8	6518372	0.732 168°	-0.165 237°	0.718 512°	-0.169 691°	1.900 594 562	-2.624 770 91
9	6604394	0.654 239°	-0.156 471°	0.630 821°	-0.153 171°	3.712 305 075	2.154 454 825
10	6776518	0.573 681°	-0.143 352°	0.590 139°	-0.146 113°	-2.788 834 49	-1.889 633 37
11	6836570	0.615 473°	-0.189 531°	0.624 726°	-0.187 478°	-1.481 129 33	1.095 061 821
12	6964526	0.539 437°	-0.159 674°	0.538 761°	-0.156 249°	0.125 473 076	2.192 014 029

除异常误差点后均值作为最终空间外差光谱仪的指向误差, 得到结果与标称值进行比较, 如表 1 示, 平均相对误差为 -3% ~ 5%。

4 结论

成像遥感设备与非成像遥感设备之间的匹配应用是基于图像信息与光谱信息之间的匹配操作, 这与传统图像与图像直接配准方法有很大不同; 另外, 由于空间外差光谱仪指向配准所使用的高空间分辨率参考遥感图像不是来源于同一卫星并与空间外差光谱仪同轴指向的图像探测器, 而是源于外部不同轴其他卫星图像探测器的遥感图片, 进一步增加了空间外差光谱仪指向配准的难度和复杂性。本文以空间外差光谱仪为例, 从其指向原理和输出干涉数据特点出发, 对高空间分辨率的图像数据和高光谱分辨率的干涉数据之间的匹配应用进行了研究, 提出了基于不同轴海岸线区域两类不同轴遥感设备之间的匹配应用研究, 重点解决了成像遥感设备与非成像遥感设备对同一观测目标的不同数据之间的指向配准问题。论文利用该方法对多个对地观测点的高光谱分辨率干涉数据和相同经纬度范围内高空间分辨率遥感图像数据进行地基测试实验, 并将配准校正值与其标称值进行对比和分析。实验结果表明该方法很好地解决星载不同轴图像遥感设备的与非图像遥感设备之间匹配应用问题。

References

- [1] Arthur K R. Stabilization of precision electro optical pointing and tracking systems [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1969, AES-5 (1): 805 - 819.
- [2] ZHANG Qian, JIA Yong-Hong, HU Zhong-Wen. An improved SIFT algorithm for multi-source remote sensing image registration [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (张谦, 贾永红, 胡忠文. 多源遥感影像配准中的特征匹配改进. 武汉大学学报. 信息科学版), 2013, 38(4): 455 - 459.
- [3] Sedaghat A, Mokhtarzade M, Ebadi H. Uniform robust scale-invariant feature matching for optical remote sensing image [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(11): 4 516 - 4 527.
- [4] Huo C L, Pan C H, Huo L G. Multilevel SIFT matching for large-size VHR image registration [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(2): 171 - 175.
- [5] Eugenio F, Marques F. Automatic satellite image georeferencing using a contour-matching approach [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(12): 2869-2880.
- [6] YE Song, XIONG Wei, QIAO Yan-Li, et al. Data processing for interferogram of spatial heterodyne spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (叶松, 熊伟, 乔延利, 等. 空间外差光谱仪干涉图数据处理. 光谱学与光谱分析), 2009, 29(3): 848 - 852.
- [7] Rahman M, Heikkala J, Lappalainen K. Modeling, measurement and error compensation of multi-axis machine tools (Part I): Theory [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004, 40(10): 1535 - 1546.
- [8] Englert C R, Harlander J M. Flat-fielding in spatial heterodyne spectroscopy [J]. *Appl. Opt.*, 2006, 45: 4583 - 4590.
- [9] Sakuma F, Bruegge C J, Rider D, et al. OCO/ GOSAT preflight cross-calibration experiment [J]. *IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing*, 2010, 48(1): 585 - 599.
- [10] Yoshida J, Kawashimaa T. Prelaunch performance test results of TANSO-FTS and CAI on GOSAT [J]. *Proc. of SPIE*, 2008, 7082: 1 - 9.
- [11] Ulich B L. Overview of acquisition and tracking and pointing system technologies [J]. *Proc. SPIE*, 1990, 887: 40 - 63.
- [12] Keitzer S, Kimbrell J, Greenwald D. Deterministic errors in pointing and tracking system: Identification and correction of static errors [J]. *SPIE*, 1991, 1482: 406 - 414.
- [13] Dobber M R, Dirksen R L, Levelt P E, et al. Ozone monitoring instrument calibration [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44 (5): 1209 - 1238.
- [14] Grange. R E M. A calibration method for radiometric and wavelength calibration of a spectrometer [J]. *SPIE*, 1998, 3648: 237 - 241.
- [15] WANG Mi, HU Kun, JIN Shu-Ying, et al. Study of match between scan lines of IRS images of CBERS-04 [J]. *Journal of Geomatics* (王密, 胡坤, 金淑英, 等. CBERS-04 星红外相机数据扫描行配准算法研究. 测绘地理信息), 2016, 41(3): 68 - 72.