

多通道扫描辐射计行间错位的配准方法

李凯^{1,2,3}, 韩昌佩^{1,2*}, 朱钰^{1,2}, 吴亚鹏^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对风云四号 A 星的多通道扫描辐射计 (AGRI) 出现的行间错位问题, 提出解决方案。首先, 根据 AGRI 的扫描方式结合傅里叶相移特性, 计算错位行相邻像元相位差谱曲线; 其次, 通过最小二乘法拟合相位差谱的低频部分获取错位值; 最后, 利用“权重分配”的方式根据行间错位值对错位行进行重建, 解决行间错位问题。本文对该方案进行了仿真实验验证, 并对 AGRI 的在轨数据进行了处理。结果表明应用该方案的重建可以将错位值配准到一个像元以内, 实现较好的行间配准结果。

关键词: 行间配准; 相位差谱; 图像重建; AGRI 图像; 风云四号

中图分类号: TP751.1 文献标识码: A

Registration method of dislocation rows for the advanced geosynchronous radiation imager

LI Kai^{1,2,3}, HAN Chang-Pei^{1,2*}, ZHU Yu^{1,2}, WU Ya-Peng^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Key Laboratory of Infrared Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this paper, the solution to dislocation between adjacent rows is proposed for the advanced geosynchronous radiation imager (AGRI) of Fengyun-4A (FY-4A). Firstly, according to the scanning mode of AGRI combined with the shift theorem of the Fourier Transform, the phase difference curve of adjacent pixels in the misaligned row is calculated. Secondly, the displacement value is obtained by fitting the low frequency portion of the phase difference spectrum by the least squares method. Finally, the dislocation rows are reconstructed by means of “weight assignment” according to the displacement value, and the problem of dislocation between the rows is solved. The scheme proposed is verified by simulation experiment, and the in-orbit images of AGRI are processed. The results show that the proposed algorithm can achieve registration between adjacent rows with high precision on sub-pixel level.

Key words: registration between adjacent rows, phase difference spectrum, image reconstruction, AGRI image, Fengyun-4A

PACS: 42. 79. Pw, 87. 57. Gg, 42. 68. Wt

引言

中国风云 (FY) 气象卫星观测是世界上主要的

气象地球观测系统之一。在过去的 30 年中, 风云卫星提供了大量的观测数据, 用于准确了解和预测中

收稿日期: 2019-08-24, 修回日期: 2020-03-01

基金项目: 中国科学院上海技术物理研究所创新专项 (CX-208)

Foundation items: Supported by Innovative Special Foundation of Shanghai Institute of Technical Physics (CX-208)

作者简介 (Biography): (Biography): 李凯 (1992-), 男, 河南周口人, 博士研究生, 主要从事遥感图像处理, 模式识别方面的研究工作。E-mail: likai_sitp@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: changpei_han@mail.sitp.ac.cn

Received date: 2019-08-24, **Revised date:** 2020-03-01

国和其他地区的天气、气候、环境和自然灾害。中国风云气象卫星由极地轨道和地球静止轨道观测系统组成,包括一系列卫星^[1]。其中,与极轨卫星相比,地球静止轨道卫星可以对同一区域进行高频次观测,从而提高观测的时间分辨率。风云四号 A 星(FY-4A)于 2016 年 12 月 11 日发射,是新一代中国地球静止气象卫星系列风云四号的第一颗卫星^[2]。

由于探测器像素规模、光学系统视场限制,卫星载荷需要依靠扫描镜或指向镜扩大视场范围。FY-4A 上的多通道扫描辐射计(AGRI)、Himawari 上的扫描辐射计(AHI)及 GOES 系列(N-P)上的成像仪采用的是多元线列探测器并扫结合二维扫描来实现此目的^[3-6]。为提高时间效率,这些载荷在东西扫描方向采用的是双向扫描,双向扫描会使目标区域在扫描行边缘处出现错位现象^[6]。这种现象具体表现为从东向西与从西向东相邻扫描行不对齐。将这种现象定义为“行间错位”。要解决行间错位,就要对行间图像进行配准。目前对 AGRI 错位图像的校正是采取固定的错位值,然而错位值在 AGRI 整个在轨运行长周期并不是固定不变的,会有上下 2 个像元的波动。因此为了提高实时配准精度,结合 AGRI 的工作波段特点,利用云图图像之间信息特征对错位行图像进行配准。

图像配准方法一般可划分为基于空间域的配准算法和基于频域的配准算法^[7]。由于 AGRI 扫描行间图像的特点,行与行之间图像并没有完全相同的公共部分,这就导致传统对图像灰度值和对比度

变化十分敏感的空间域配准方法如序贯相似度检测算法,矩匹配方法,互信息理论方法可能会失效。但是 AGRI 行扫描频率高因此在相邻扫描行之间的云图目标是连续的。这使得相邻扫描行数据具有很强的相关性,即错位处相邻像元采样的目标可以认为是近似相等的。基于这样的假设,提出一种在频域利用连续行相位谱的差估计相邻行的位移并结合空域插值重建实现行间配准的方法。根据傅里叶相移特性,用最小二乘法计算相位谱差曲线的斜率得到相邻行的位移量。以奇数行为基准行,采用在空域中插值的方法对偶数行进行位移量补偿,最终实现亚像素级的行间配准。

主要分为四个部分:第一部分,介绍 AGRI 扫描成像特点以及错位特征;第二部分详细介绍了图像行间配准方案;第三部分展示了图像仿真实验和在轨的图像重建结果;第四部分总结全文。

1 AGRI 图像错位特征

AGRI 是风云四号主要载荷之一,其作用是通过高精度和多光谱定量遥感测量地球环境参数,如陆地、海洋、云和大气。AGRI 可直接用于天气分析和预报、气候预测、环境和灾害监测^[8]。AGRI 有 14 个波段通过线阵推扫结合二维扫描的方式在同一个扫描周期形成 14 幅多波段云图。波段参数见表 1。本文主要讨论了四个波段:可见光波段 2;近红外波段 3;短波红外波段 5;长波红外波段 12(波段不同,探测器像元数不同,错位值也不一样)。

表 1 AGRI 光谱参数

Table 1 Spectral Configuration of AGRI

No.	Central Band / μm	Spectral Band / μm	Spatial Resolution / km	Number of pixels	Main Application
1	0.47	0.45~0.49	1	16*1	aerosol, color image synthesis
2	0.65	0.55~0.75	0.5	32*4	vegetation, star sensing
3	0.825	0.75~0.90	1	16*1	vegetation, aerosol
4	1.375	1.36~1.39	2	8*1	Cirrus
5	1.61	1.58~1.64	2	8*1	cloud, snow
6	2.25	2.10~2.35	2	8*1	cirrus, aerosol
7	3.75	3.50~4.00	2	8*1	cloud, fire
8	3.75	3.50~4.00	4	4*1	land surface
9	6.25	5.80~6.70	4	4*1	upper-level water vapor
10	7.10	6.90~7.30	4	4*1	mid-level water vapor
11	8.50	8.00~9.00	4	4*1	integrated water vapor, cloud
12	10.70	10.30~11.30	4	4*1	cloud, temperature
13	12.00	11.50~12.50	4	4*1	cloud, integrated water vapor, temperature
14	13.50	13.20~13.80	4	4*1	cloud, water vapor

AGRI二维扫描过程中扫描机构在第 N 行从西向东(从东向西)进行扫描,当第 N 行扫描结束时,扫描机构开始回转进行下一行($N+1$)从东向西(从西向东)的扫描,如图1所示。AGRI由于双向扫描延时时因素的影响,奇数行与偶数行之间会有偏移,造成两个相邻扫描行不能完全对齐出现东西错位,东西错位云图如图2所示^[6,9]。

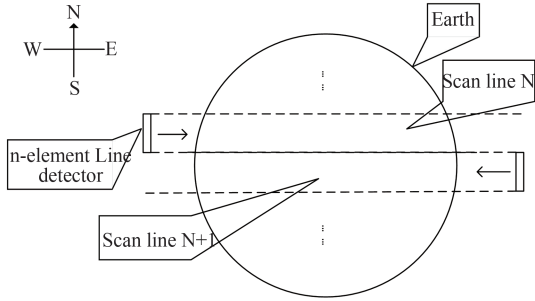


图1 扫描示意图

Fig. 1 Scanning diagram

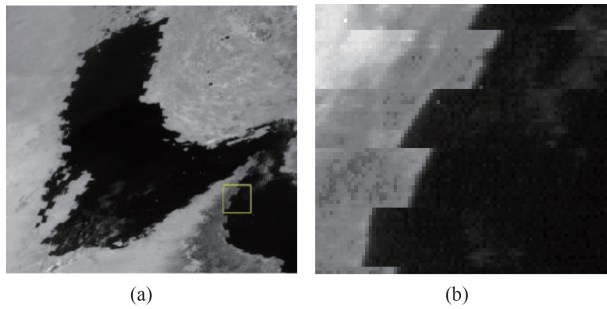


图2 (a)波段0.75~0.90 μm 探测的阿曼湾区域, (b)矩形区域放大

Fig. 2 (a) Oman Bay area detected by the band 0.75~0.90 μm , (b) Rectangular area enlarged

2 行间配准方法介绍

采用多元探测器并扫或串行扫描不仅可以扩大视场范围也是提高扫描仪性能的重要手段(实现时间延迟积分技术)^[10]。然而在东西方向上采用双向扫描方式的载荷,所形成的云图可能会出现行间错位的现象。克服错位问题才能使云图更好的进一步应用。本节部分将详细介绍行间错位的纠正方法,行间错位纠正也称为行间配准。

2.1 相位相关定位偏移量

n 元线列探测器相邻两行扫描的过程中,如图1所示,第 N 扫描行的第 n 个像元所采集的目标 $f_N^n[m]$ 与第 $N+1$ 扫描行的第1个像元所采集的目标 f_{N+1}^1 在

发生错位 m_0 前可认为是近似相等的。基于这样的假设,可以得到如下关系:

$$f_N^n[m] \approx f_{N+1}^1[m - m_0] \quad (1)$$

2.1.1 相位相关算法基础

假设 $f_1[m]$ 和 $f_2[m]$ 是两个存在平移变换 m_0 关系的序列,满足

$$f_2[m] = f_1[m - m_0] \quad (2)$$

它们对应的傅里叶变换分别为 $F_2(\omega)$ 和 $F_1(\omega)$,则有如下关系

$$F_2(\omega) = F_1(\omega) e^{-2j\pi m_0 \omega} \quad (3)$$

两个序列的归一化交叉能量谱为

$$\frac{F_1(\omega) F_2^*(\omega)}{|F_1(\omega) F_2^*(\omega)|} = e^{2j\pi m_0 \omega} \quad (4)$$

其中,*表示复共轭。根据交叉能量谱可以得到相位差函数,如式(5)所示

$$\Phi_{\Delta}(\omega) = \Phi_1(\omega) - \Phi_2(\omega) = 2\pi m_0 \omega \quad (5)$$

这里,相位差应该是斜率为 m_0 的直线。实际上在提取相位的过程中,得到的相位差是在 $[-\pi, \pi]$ 范围之内。当 $\Phi_{\Delta}(\omega) > \pi$ 时,其值相当于被减去 2π 的整数倍^[11]。因此,要得到连续的相位差曲面,需要对 $\Phi_{\Delta}(\omega)$ 进行解缠处理。因此,对解缠之后的相位差用最小二乘拟合方法拟合出相位差斜率便可以得出偏移量 m_0 。

2.1.2 低频可拟合特性

由上文分析可知,式(1)的成立是建立在错位行相邻像元所采集目标近似相等的假设基础上的,即两个序列是有一定的差异的。事实上在双向扫描时,由于气象云图的瞬息万变,也会引入一定的差异性。差异性会导致求得相位差谱出现抖动,高频部分发生混叠,如图3(a)所示。为了方便描述,这里本文将两个序列之间的差异性用 $e(m)$ 表示并引入式(1)可得实际错位行相邻像元序列关系:

$$f_N^n[m] = f_{N+1}^1[m - m_0] + e[m - m_0] \quad (6)$$

在频域,对应关系为

$$F_N^n(\omega) = [F_{N+1}^1(\omega) + E(\omega)] e^{-2j\pi m_0 \omega} \quad (7)$$

根据傅里叶变换理论可知,图像之间的差异性主要体现在其相位谱的高频信息上。即当 ω 取值较小时有如下关系:

$$\text{abs}(E(\omega)) \ll \text{abs}(F_{N+1}^1(\omega)) \quad (8)$$

在低频区域可以用 $F_{N+1}^1(\omega)$ 估计 $F_{N+1}^1(\omega) + E(\omega)$,此时实际错位行相邻像元序列的相位差关系仍可用式(5)表示。所以,用相位差谱的低频信息

进行最小二乘拟合,可以得到较高精度的位移量 m_0 。

低频区域是相位差可拟合的基础,实际上在拟合之前还需要对相位差曲线进行滤波处理降低差异性对相位差谱的抖动影响。

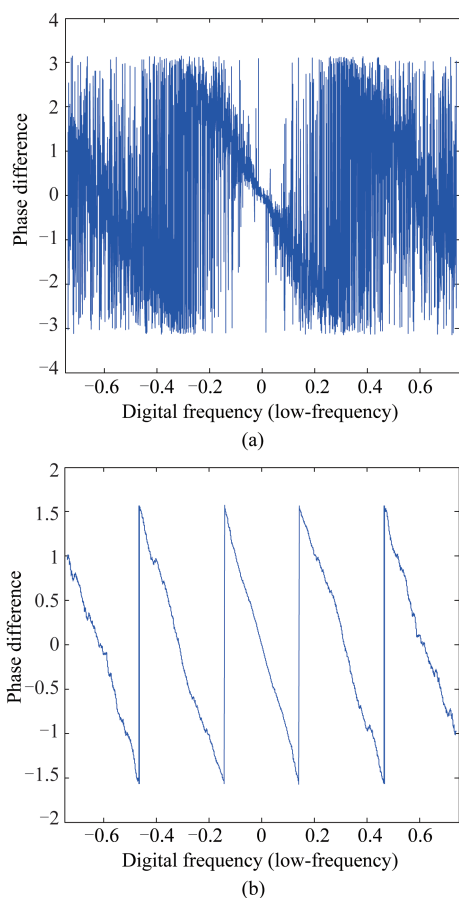


图3 (a)原始相位差曲线 (b)向量滤波后的相位差曲线
Fig. 3 (a) Phase difference (low-frequency), (b) phase difference after vectorial filtering

2.1.3 正余弦向量滤波

根据2.1.1节可知,提取的相位差值域为 $[-\pi, \pi]$,导致相位差曲线中存在从 π 到 $-\pi$ 的跳变,如图3(a)所示。为了提取可拟合区域,需要将相位差中相邻 2π 跳变的相位找到,然后将跳变还原。由于抖动的影响很难提取实际跳变位置,因此在跳变还原之前需要对相位差曲线进行滤波消抖处理。

中值或均值等滤波方法不能直接运用到相位差的滤波处理中,这会严重损害相位差曲面的跳变性质导致相位差失真。文献[12]中提出一种可以利用正余弦变换的向量滤波方法,该方法简单实用,并且能够较好的保真相位差值。

用向量滤波方法将相位差 Φ_{Δ} 映射到一个二维

的向量空间:

$$k_1 = \cos(\Phi_{\Delta}) \quad , \quad (9)$$

$$k_2 = \sin(\Phi_{\Delta}) \quad , \quad (10)$$

通过映射对相位差谱中的每一个值都取相应的余弦与正弦值,将原来跳变相位差值 Φ_{Δ} 映射为连续的正余弦值 k_1 和 k_2 。此时可以选择多种方法对余弦序列和正弦序列做滤波。本文选择简单易行的均值滤波:

$$K_1[i] = \frac{1}{k^2} \sum_{i \in w} k_1[i] \quad , \quad (11)$$

$$K_2[i] = \frac{1}{k^2} \sum_{i \in w} k_2[i] \quad , \quad (12)$$

K_1 和 K_2 分别是滤波后的余弦和正弦值序列, k 为以 i 为中心的滤波窗口 w 的尺寸大小。

最后,利用正余弦函数计算反正切并进行逆映射便可得到滤波后的相位差曲线:

$$\widetilde{\Phi}_{\Delta} = \arctan\left(\frac{K_2}{K_1}\right) \quad , \quad (13)$$

滤波之后的相位差曲线 $\widetilde{\Phi}_{\Delta}$ 如图3(b)所示,由于使用了反正切函数,其值限制在 $[-\pi/2, \pi/2]$ 。通过正余弦函数 K_1 和 K_2 的正负关系判断相位差值所处的象限对跳变相位差值进行还原,对还原后的相位差曲线采用最小二乘直线拟合方法便可以估计出 m_0 ,示意图如图4所示。

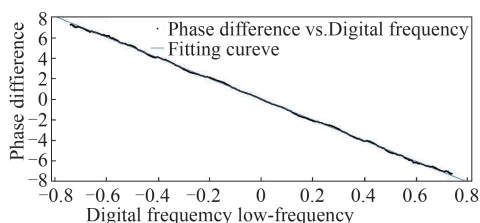


图4 相位差拟合曲线
Fig. 4 Phase difference fitting curve

根据傅里叶相位差位移特性可知,相位差的周期个数(2π 整数倍)与错位量是相近的。一般情况下选择包含频域中心3个周期范围内的点看作低频拟合区域。同时AGRI不同波段图像的错位量和分辨率大小是正相关的。因此,为了后续计算方便,根据不同分辨率的图像选择相应比例的范围即可。

2.1.4 一致性检验

在一个全圆盘图像中(短时),错位量可认为是固定不变的。因此对全圆盘所有错位估计值取平均可以进一步提高精度。对于一幅在轨图像中,在陆地面积较少的区域易受散点云团的影响使 $e(m)$

较大导致式(8)不成立;此时估计的错位值偏离真实值较大。因此在错位估计值取平均之前有必要进行一致性检验将异常值剔除^[13]。

残差与均方根误差通常用来检验估计精度,残差与均方根误差定义如式(14)和式(15)所示

$$residual_i = \sqrt{m_i - \bar{m}_0} \quad , \quad (14)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N residual_i^2}{N}} \quad , \quad (15)$$

这里 m_i 是第 i 个估计值, \bar{m}_0 是所有估计值的平均值。首先,计算估计值点的残差和均方根误差。然后,去除具有最大残差的估计值点。重复上述过程直到均方根误差小于给定阈值,将阈值设定为 1 个像素。对异常值剔除后的估计值取平均即为所得最终错位量。

2.2 错位行重建

由 2.1 节部分得到的错位估计值是一个含有小数的符号值,符号表示错位的相对方向。为了方便讨论,这里以第 N 行为参考行并假设错位值 m_0 是正值,表示 $N+1$ 行扫描行相对于 N 行扫描行向西(向左)错位了 m_0 。因此将错位行的重建可以分为两个部分取整部分 $[m_0]$ 和小数部分 $m_0 - [m_0]$ 。整数部分利用式(16)直接对错位行进行整数移位即可。

$$y(m) = \left\{ x\left(m - [m_0]\right) \right\} \quad , \quad (16)$$

这里 $x(n)$ 是 $N+1$ 行扫描行采样数据。在式(16)的基础上,小数部分本文采用“权重分配”的方式即按照空间错位距离分配权值进行插值重建如图 5 所示:

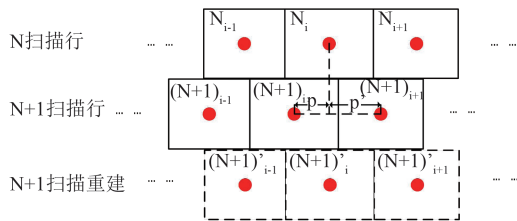


图5 扫描行重建图
Fig. 5 Scan line reconstruction

这里 N_i 是 N 扫描行中第 i 个采样点; $(N+1)_i$ 是 $N+1$ 扫描行中第 i 个采样点; $(N+1)'_i$ 是重建后的第 i 个点; p 与 p' 是权重因子,根据式(19)对 $N+1$ 行进行重建。

$$p = m_0 - [m_0] \quad , \quad (17)$$

$$p' = 1 - p \quad , \quad (18)$$

$$y'(i) = p * y(i) + p' * y(i + 1) \quad , \quad (19)$$

$y'(i)$ 即是重建后的序列。

本节行间配准算流程如图 6 所示。

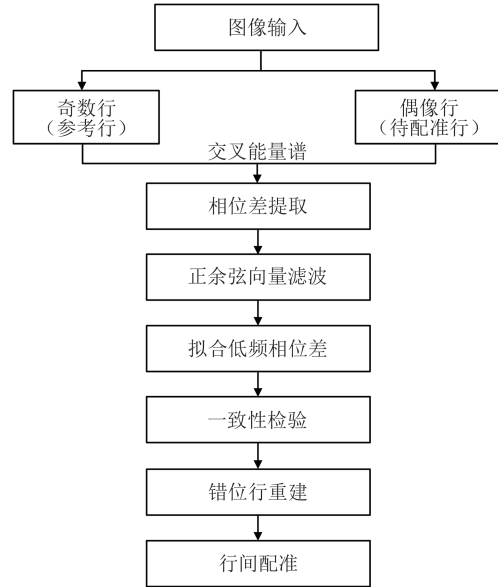


图6 行间配准算法流程图
Fig. 6 Flow chart of the registration algorithm

3 实验验证

为了验证本文所提方案的性能,利用本文方法对手动移位的图像进行仿真实验并与序贯相似度检测算法进行比较。同时对在轨图像数据进行行间配准并展示结果。所使用数据来源为 FY-4A 上 AGRI 于 2018 年 10 月 9 日 05:00:00 (Universal Time Coordinated, UTC) 生成。

3.1 仿真实验

3.1.1 仿真实验图像生成

为了与云图性质保持一致,本文选用了在轨图像生成仿真图像。由于图像源自于扫描系统,因此没有原始无错位的图像可以作为参考。因此本文对在轨图像做了如下处理:首先,用目视方法对图像进行错位校正,形成可参考图像。以图像大小 7888×20000 的波段 2 (16 像元) 为例。图 2(a) 选自于原始错位图像,原始图像以 16 为整数倍的行发生错位。图 7(a) 示出了参考图像的局部。为了尽量避免与原 16 行倍数相交且不失一般性,对参考图像进行以 13 为整数倍的相邻行手动错位,错位 10.5 个像素如图 7(b) 所示。

3.1.2 仿真实验

由仿真图像可以得到约 606 个扫描行。图 8(a)

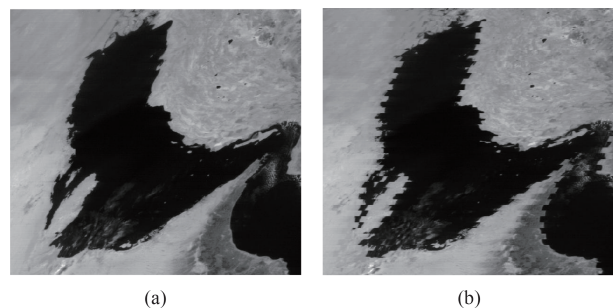


图7 (a) 参考图像(局部)(b) 仿真图像(局部)

Fig. 7 (a) Selected part from the reference image, (b) selected part from the simulation image

和图8(b)分别为用序贯相似度检测算法(SSDA)和本文方法,以奇数行为基准对偶数行所估计的位移量。可以看出,SSDA方法方法所估计的位移量均为整数,因此无法实现亚像素精度的位移估计与配准。而本文方法所估计的位移量均分布在10.5周围,与仿真值相符合,有了高精度位移估计的基础,其配准精度也可以达到亚像素级。图9(c)和9(d)分别为两种配准结果与参考图像的差图像,可以看出本文方法的配准效果要优于SSDA方法。

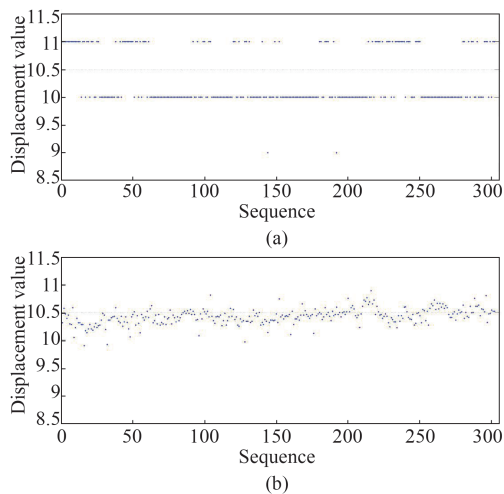


图8 (a)SSDA方法错位量估计(b)本文方法错位量估计

Fig. 8 (a) Estimated displacement by SSDA, (b) Estimated displacement by proposed algorithm

为了量化算法对错位图像的质量改善,本文引入互相关系数作为图像的客观评价准则。根据互相关理论可知^[14],遥感图像错位相邻行之间的错位值越小,其互相关系数就越大,反之亦然。当相邻行之间不存在错位时,互相关值应是最大。其计算结果如表2所示:

从表2可知,仿真错位图像与参考图像相比,其互相关系数明显下降。而算法能够较为准确的估

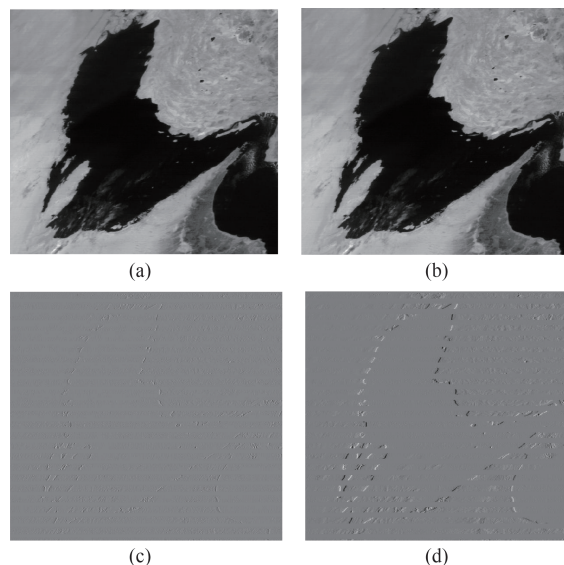


图9 (a)方法配准图像(局部),(b) SSDA方法配准图像(局部),(c) 图像(a)与参考图像的差,(d) 图像(b)与参考图像的差
Fig. 9 (a) Selected part from image registered by proposed algorithm, (b) selected part from image registered by SSDA, (c) difference image between (a) and reference image, (d) difference image between (b) and reference image

表2 仿真实验客观评价

Table 2 Objective evaluation of simulation experiment

图像	互相关系数			位移估计均值
	均值	相对误差	标准差	
参考图像	0.9806	0	0.0071	---
仿真图像	0.8105	17.01%	0.0381	---
SSDA方法配准	0.9595	2.1%	0.0076	10.13
本文方法配准	0.9789	0.17%	0.0067	10.42

计位移量并实现行间配准。配准后的图像的互相关系数与参考图像间的相对误差由17%下降到0.17%。而SSDA方法无法达到这样优异的效果。从表中所列的位移估计均值也能够反映出本文所提方案性能优于SSDA方法,可以实现较高精度的亚像元行间配准。

3.2 在轨数据处理

为了验证该方法对AGRI在轨数据的行间配准效果,示例了波段2可见光;波段3近红外;波段5短波红外及波段12长波红外四个波段在阿曼湾区域的配准结果,如图10~13。对在轨实际错位图像本文选择了经过一致性检验的平均错位估计值进行帧内配准并对其计算相关系数,如表3所示。

通过表3可以看出波段不同,错位值也不一样。实际错位值越小,在轨图像相邻行的相关性受到的影响也会越小,符合实际情况。另一方面,根据本

表3 在轨实验客观评价

Table 3 Objective evaluation of in-orbit experiments

波段	图像	互相关系数		位移估计均值
		均值	标准差	
波段2	在轨图像	0.8567	0.0795	---
	本文方法配准	0.9724	0.0174	22.31
波段3	在轨图像	0.91	0.0517	---
	本文方法配准	0.9761	0.0143	9.87
波段5	在轨图像	0.9400	0.0302	---
	本文方法配准	0.9919	0.0036	3.85
波段12	在轨图像	0.9945	0.0029	---
	本文方法配准	0.9966	0.0018	1.49

文方法配准结果的相关系数来看,方法在各个波段都变现出了优异的性能具备较高配准精度效果,通过图10~图13在轨配准图像的目视比较,所提方案可以实现较高精度的行间配准。

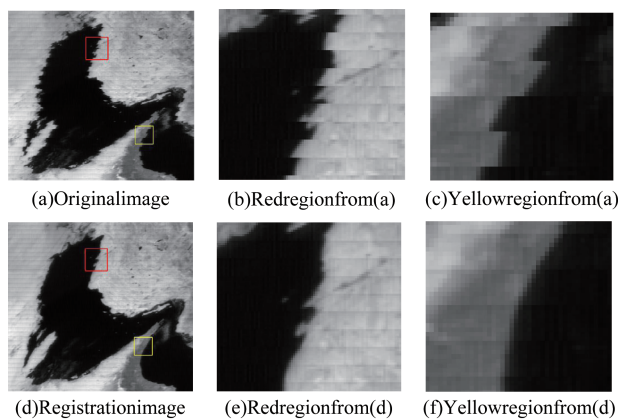


图10 波段5所探测区域

Fig. 10 Image detected by the band 5

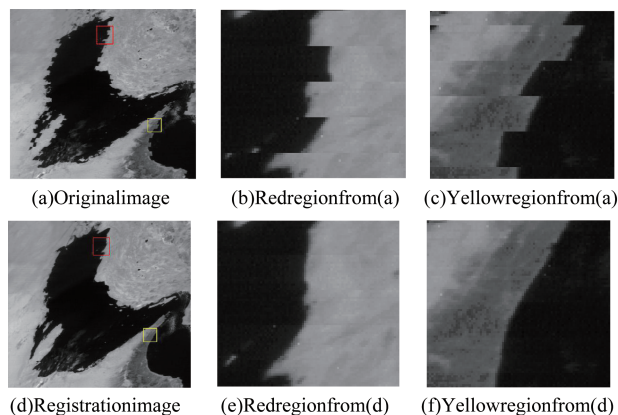


图11 波段3所探测区域

Fig. 11 Image detected by the band 3

同时为了验证在轨后FY-4辐射计行间错位值在长周期下的波动范围,本文选取了30组全圆盘L0

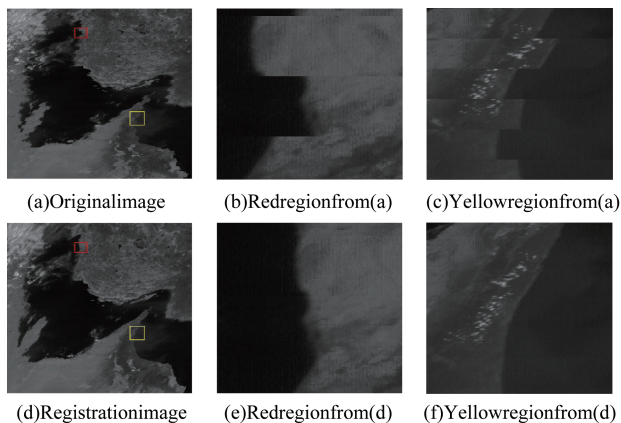


图12 波段2所探测区域

Fig. 12 Image detected by the band 2

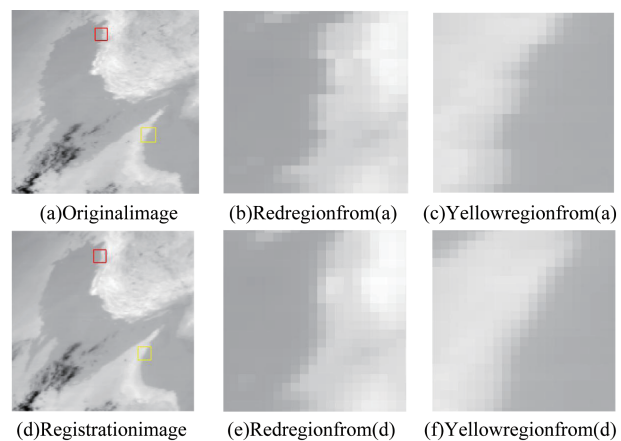


图13 波段12所探测区域

Fig. 13 Image detected by the band 12

数据时长跨度2017年1月至2017年10月UTC时间05:00:00(北京时间13点)。通过统计得到的错位值在长周期会有1~2个像元的波动,波段不同,错位值的波动情况也不一样,如下表4示例了4个波段。因此提出一套方案对图像进行实时行间配准有重要意义。

表4 错位值统计

Table 4 Displacement statistics

成像时刻(北京时间)	波段 / μm	错位值变化范围
(2017年1月~2017年10月)	0.55~0.75	22~24
	0.75~0.90	8~10
	1.58~1.64	3~4
	10.30~11.30	1~2

4 结论

风云四号A星多通道扫描辐射计采用线列探测器推扫结合二维双向扫描,遇到了大部分的类似载

荷的行间错位问题,行间错位直接影响了图像的进一步使用。为了解决这种错位现象,提出了一套从图像端进行行间配准的方案。首先,根据 AGRI 的扫描方式结合傅里叶相移特性,计算错位行相邻像元相位差谱曲线。其次,通过最小二乘法拟合相位差谱的低频部分获取错位值;为了提高错位值估计的精度在相位差拟合部分进行了正余弦向量滤波,在拟合结果上执行了一致性检测。最后,根据行间错位值利用权重分配的方式对错位行进行重建,解决 AGRI 图像行间错位问题。本文利用仿真实验对该方案进行了验证,同时对 AGRI 的在轨数据进行了处理。结果表明该方案适用于所有波段,其重建结果将错位值配准到一个像元以内,实现较好的行间配准精度,具有重要的工程应用价值。

References

- [1] Zhang H, Su Y, Shang J, *et al.* Accurate star centroid detection for the advanced geosynchronous radiation imager of Fengyun-4a[J]. *IEEE Access*, 2018, **6**: 7987-7999.
- [2] Yang Jun, Zhang Zhi-Qing, Wei Cai-Ying, *et al.* Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites, Fengyun-4 [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2016:BAMS-D-16-0065.1.
- [3] Zhou Shi-Chun. Introduction to Advanced Infrared Optoelectronic Engineering [M]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, 2010: 319 - 328 (周世椿. 高级红外光电工程导论. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所研究生部, 2010: 319-328).
- [4] Wang Gan-Quan, Chen Gui-Lin. Two-dimensional scanning infrared imaging technology on geosynchronous orbit [J]. *Infrared and Laser Engineering* (王淦泉, 陈桂林. 地球同步轨道二维扫描红外成像技术. 红外与激光工程), 2014, 43(02): 429-433.
- [5] Paul C. Griffith. Advanced Himawari Imager (AHI) Design and Operational Flexibility: 12th Annual Symposium on New Generation Operational Environmental Satellite Systems AMS Annual Meeting, 2016 [C]. America: the American Meteorological Society, 2016: 11-14.
- [6] Satya K, Christian A, James C, *et al.* From Photons to Pixels: Processing Data from the Advanced Baseline Imager [J]. *Remote Sensing*, 2018, **10**(2):177-.
- [7] Barbara Zitová, Flusser J. Image registration methods: a survey [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, **21**(11): 977-1000.
- [8] Lu Feng, Shou Yi-Xuan. Channel simulation for FY-4 AGRI: 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2011 [C]. Vancouver: IEEE Geoscience and Remote Sensing Society, 2011: 3265-3268.
- [9] Zhang Qiang, Wang Gan-Quan, Chen Gui-Lin. Research of improving accuracy of imaging register in multi-channel scanning imagery radiometer of FY-4 [J]. *Infrared Technology* (张强, 王淦泉, 陈桂林. 提高FY-4多通道扫描成像辐射计图像配准精度的研究. 红外技术), 2005(03): 223-226.
- [10] Space Systems-Loral. GOES I-M DateBook [M]. America: National Aeronautics and Space Administration, 1996: 3-36.
- [11] Foroosh H, Zerubia J B, Berthod M. Extension of phase correlation to subpixel registration [J]. *IEEE Trans Image Process*, 2002, **11**(3):188-200.
- [12] Aebischer H A, Waldner S. A simple and effective method for filtering speckle-interferometric phase fringe patterns [J]. *Optics Communications*, 1999, **162** (4-6): 205-210.
- [13] Ye Y, Shan J. A local descriptor based registration method for multispectral remote sensing images with non-linear intensity differences [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, **90**(3):83 - 95.
- [14] Bing P, Hui-Min X, Tao H, *et al.* Measurement of coefficient of thermal expansion of films using digital image correlation method [J]. *Polymer Testing*, 2009, **28** (1): 75-83.