

使用压缩感知的遥感图像振荡畸变几何校正方法

汪 璞 安 玮 邓新蒲 郭 靖

国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 卫星平台振动和反射镜震颤会引起遥感图像中的振荡畸变。这类畸变难以通过常用的几何校正方法消除。对此,提出了一种使用压缩感知的几何校正方法。该方法基于有理函数模型(RFM)进行几何校正。在校正过程中,利用初始的RFM计算出地面控制点(GCPs)在图像中的投影坐标与实际成像坐标之间的偏差(称为投影偏差),以地面控制点处的投影偏差作为采样值,使用压缩感知技术重构出所有像元处的投影偏差,并据此对RFM进行像方补偿;利用经过补偿的RFM进行遥感图像纠正。通过补偿,消除了振荡畸变引起的RFM模型误差,进而提高校正性能。利用实测数据验证了该方法的有效性,并通过仿真数据分析了地标点的数量与分布对该几何校正方法性能的影响。

关键词 图像处理;遥感图像;几何校正;振荡畸变;压缩感知;有理多项式模型

中图分类号 TP751.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0110004

Geometric Correction Method for Oscillation Distortion of Remote Sensing Images Using Compressive Sampling

Wang Pu An Wei Deng Xinpu Guo Jing

*College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China*

Abstract Satellite vibration and scan mirror oscillation can cause oscillation distortions of remote sensing imagery. These distortions are difficult to be corrected by common geometric correction methods. A geometric correction method using compressive sampling is proposed. In this method, geometric correction is performed with rational function model (RFM). The biases between the image coordinates and project coordinates of ground control points (GCPs) are calculated with the original RFM. The bias is called projection bias. The projection biases at the GCPs are regarded as measurements. By using the technique of compressive sampling, the projection biases of every pixel can be reconstructed, and the RFM is compensated according to projection biases. The remote sensing imagery is rectified with the compensated RFM. Through compensation, the errors of RFM which caused by oscillation distortions are eliminated and the performance of geometric correction is improved. The method is proved effective by using real remote sensing images. Based on simulated images, the effect of GCPs distribution and number on geometric correction is also analyzed.

Key words image processing; remote sensing image; geometric correction; oscillation distortion; compressive sampling; rational function model

OCIS codes 100.2960; 120.7280; 120.5800

1 引 言

遥感图像在国民经济建设和国防建设中发挥着日益重要的作用。而遥感图像在其成像过程中,受到各种误差的影响,导致其中存在畸变,难以直接使用^[1]。为保证数据的定位精度,必须经过相应的几何校正处

收稿日期: 2014-07-05; 收到修改稿日期: 2014-08-22

基金项目: 国防科技大学优秀研究生创新资助项目(B130403)、湖南省研究生科研创新项目(CX2103B019)

作者简介: 汪 璞(1986—),男,博士研究生,主要从事空间红外图像获取与处理方面的研究。E-mail: wp421189@163.com

导师简介: 安 玮(1969—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事空间信息获取与处理方面的研究。

E-mail: nudtanwei@tom.com

理,消除掉图像中的几何畸变^[2]。

遥感图像几何校正方法的关键在于成像几何模型。成像几何模型反映了地面点三维空间坐标与相应像点在像平面坐标系的二维坐标之间的数学关系^[2]。成像模型一般分为两类:严格成像模型和广义成像模型。针对于不同类型的传感器,国内外研究人员建立了大量严格成像模型,例如为处理 SPOT 全色波段影像提出的 Westing 模型^[3],袁修孝等^[4]针对单线阵推扫卫星遥感影像建立了相应严格成像模型。在广义成像模型中,有理函数模型(RFM)因其精度高、适用范围广的优势,成为应用和研究的重点。Hu 等^[5]对有理函数模型的原理和应用进行了介绍,Fraser 等^[6]探讨了有理函数模型的误差补偿方法。

关于严格成像模型和有理函数模型的研究众多,但很少有关于应用这两种模型对于振荡畸变进行校正的研究。在实际中,很多因素会导致遥感图像中存在振荡畸变,例如相机反射镜震颤或卫星平台振动等^[2,7-10]。通过实验发现,上述两类模型对于振荡畸变的校正效果并不理想。当存在振荡畸变时,这两类模型难以精确描述这类畸变的影响,从而使模型误差增加,像平面投影偏差增大,影响校正效果。像平面投影偏差是指空间目标点在遥感图像中的成像坐标与其利用成像几何模型计算得到的像平面投影坐标之间的偏差。

针对上述问题,本文在传统的 RFM 像方补偿方法的基础上,提出了一种新的几何校正方法。该方法的核心是使用压缩感知技术来重构所有像元处的投影偏差,并据此对 RFM 模型进行像方补偿,以提高模型精度。压缩感知是近年提出的概念,其基本思想是对于稀疏信号或者能够在一定域上被稀疏表示的信号而言,仅需要少量采样值就可以精确恢复出原始信号^[11-12,15]。利用压缩感知技术,可以根据地面控制点处的投影偏差,重构出全图所有点处的投影偏差。这一优点可以有效弥补传统的 RFM 像方补偿方法的不足。传统方法通常采用对模型系数进行修正,或者在模型中增加简单补偿项的方式修正模型。这类方法对于系统误差有较好的校正效果,但当误差为振荡误差或其他复杂误差时,这类方法修正效果不佳。而本文中所提出方法,是直接对图像中所有像元处的投影偏差进行估计,能更准确地描述复杂误差对于成像投影的影响,从而实现模型的精确补偿。文中所提出方法的难点在于如何估计出图像中所有像元处的投影偏差。为解决这一问题,本文将偏差估计问题转换为从少量测量值中重构信号的问题,这是压缩感知中的常见问题。在转换过程中,各像元处的像面投影偏差被等效为待重构的信号(后文中称为偏差信号),地面控制点(GCPs)处的投影偏差被视为偏差信号测量值。然后利用压缩感知技术中的信号重构技术,恢复出遥感图像中各像元处的投影偏差。需要说明的是,当振荡频率过高时,会造成图像模糊,这会对地面控制点提取匹配精度造成影响,进而间接干扰算法性能^[16-18]。

通过在实验中与其他几何校正方法的比较,验证了该方法对于振荡畸变校正的有效性。同时基于仿真数据,分析了地标点分布和数量对于本文所提校正算法性能的影响。

2 基本概念介绍

2.1 几何校正方法

几何校正方法的关键在于成像几何模型。下文主要针对有理函数模型和严格成像模型这两种常用模型进行介绍。

1) 有理函数模型

有理函数模型(RFM)是对一般多项式模型和直接线性变换模型的扩展,其实质是利用纯数学来对严格几何处理模型进行拟合,具有适用范围广,精度高,保密性好等优点。RFM 的系数可以通过地形相关和地形无关的方式获得。当 RFM 模型存在误差时,可以通过直接补偿和间接补偿的方式加以修正。直接补偿法利用控制点,直接对 RFM 中的系数进行修正。而间接补偿法则是利用附加补偿项的方法来消除 RFM 中的误差^[5-6,19]。

2) 严格成像模型

严格成像模型描述的是地面点的影像坐标和地面坐标之间的数学关系,其本质是通过坐标变换确定空间坐标和像平面坐标之间的关系。针对于不同的应用情况,许多学者都提出了相应的严格成像模型,各自能够适应于不同的应用环境。但就目前而言,还缺乏一个普适性的严格成像模型。本文采用的是单线阵推

扫相机的严格成像模型,具体模型介绍参见文献[4]。

2.2 压缩感知

压缩感知是近年来兴起的一种理论。基于该理论,可以利用远低于奈奎斯特采样率的采样值,精确重构出原始信号。为便于阐述,以如下问题为例来介绍压缩感知中的基本概念。假设需要从一个不完整测量值中,恢复一个 $N \times 1$ 信号 x , 该向量的测量值为

$$y = \Phi x, \tag{1}$$

式中 Φ 是一个 $M \times N$ 的测量矩阵,且 $M \ll N$, y 表示 $M \times 1$ 的测量值向量。由于 y 的维数远远低于 x 的维数,方程(1)是一个欠定问题,难以实现对于信号 x 的重构。然而,如果原始信号 x 是 K 稀疏的(即 x 中仅有 K 个元素不为0),则 x 有可能被精确求解出,其如下图1所示。

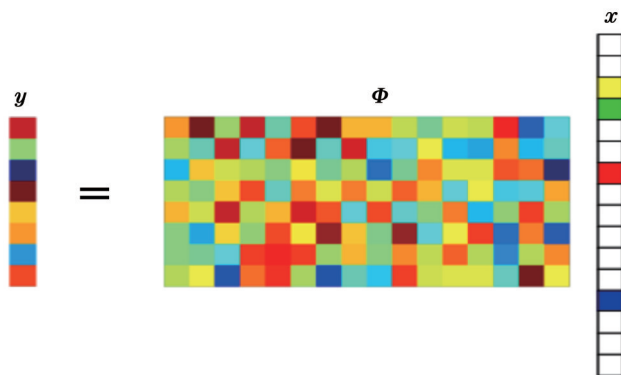


图1 对于稀疏信号的线性测量

Fig.1 Linear measurement for sparse signal

在上图中,白色方块表示0值,彩色方块表示非0值。在该种情况下,只需确定 K 个非零元素在 x 中的位置并针对这 K 个元素进行求解,而不需要求解 x 中所有元素的值。这极大地降低了对于采样点数量的要求,即便 y 中元素数量远少于 x ,也可能准确恢复出 x 。根据压缩感知理论,当 Φ 满足约束等距性准则时,则信号 x 可以由测量值 y 通过求解最优 l_0 范数问题精确重构

$$\hat{x} = \arg \min \|x\|_0, \Phi x = y, \tag{2}$$

式中 $\|\cdot\|_0$ 为向量的 l_0 范数,表示向量 x 中的非零元素的个数^[11]。

但在实际应用中,大部分自然信号都不是稀疏的,在对这类信号进行重构之前,首先需要通过某种变化 Ψ 进行稀疏表示,通过对其稀疏系数的重构,间接重构出原始信号。考虑一个非稀疏的自然信号 f 的重构问题,其不完整测量值 $y = \Phi f$, f 可以被稀疏表示,其稀疏表示系数为 x ,即

$$f = \Psi x, \tag{3}$$

具体如下图2所示。

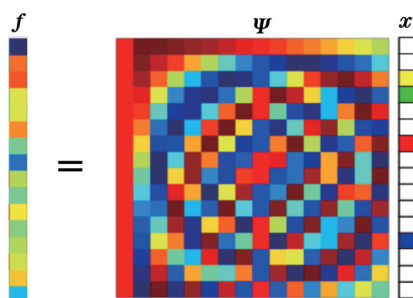


图2 信号的稀疏表示

Fig.2 Sparse representation of signal

关于信号 f 的测量方程可以被重写为

$$y = \Phi f = \Phi \Psi x = \tilde{\Phi} x, \tag{4}$$

式中 $\tilde{\Phi} = \Phi\Psi$ 为 $M \times N$ 的矩阵, 被称为传感矩阵。这样, 对于自然信号的重构就被等效为对于稀疏信号的重构。其结构如图 3 所示。

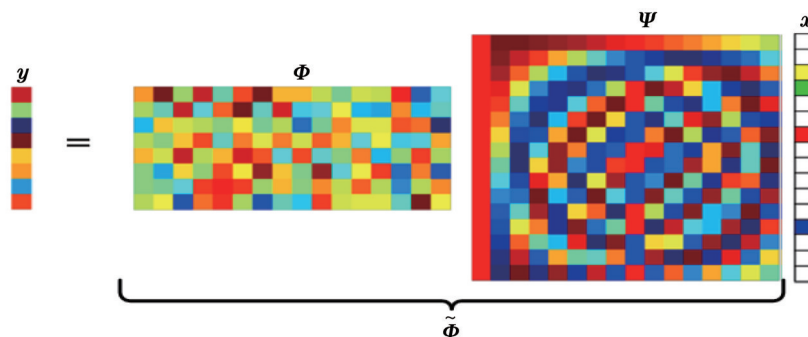


图 3 压缩感知的线性测量

Fig.3 Linear measurement of compressive sampling

此时, x 满足稀疏特性, 如果 $\tilde{\Phi}$ 满足约束等距性, 则可以利用相应的信号重构算法得到其估计值 \hat{x} ^[7]。在此基础上结合稀疏基 Ψ 实现对于信号 f 的重构:

$$\hat{f} = \Psi\hat{x}. \quad (5)$$

根据压缩感知理论, 信号 x 成功恢复的概率取决于 $\tilde{\Phi}$ 是否满足约束等距性, 由于 Ψ 通常是固定的, 要使得 $\tilde{\Phi} = \Phi\Psi$ 满足约束等距性, 必须合理设计测量矩阵 Φ ^[7]。

在确定压缩感知的测量方程后, 剩下的核心问题就是如何从(4)式中求解出 x , 该求解过程被称为信号重构。在信号重构领域, 相关研究人员已提出了一系列的信号重构算法, 主要有最小 l_1 范数法、匹配追踪系列算法、迭代阈值法和最小全变分法等。各类方法均有各自特点, 需要根据应用环境的不同, 选取相应的算法。其中, 匹配追踪类算法由于其计算复杂度相对较低, 更适宜于二维信号的恢复重构, 文中即采用该类算法。

在上文中, 主要是以一维信号为例对于压缩感知进行阐述, 但在实际应用中, 压缩感知同样可以被用于二维信号的恢复重构。在应用时, 需要先将二维信号中的元素重新排布为一维信号, 然后利用压缩感知技术重构出一维信号, 最后将重构得到的一维信号中的元素重新排组为二维信号即可。通过压缩感知理论, 可以仅仅依据图像中若干点处的像平面投影误差, 准确重构出整幅图像中所有点处的像平面投影误差, 进而实现精确校正。

3 使用压缩感知的几何校正方法

该部分首先介绍了使用压缩感知的几何校正方法的基础, 即如何将投影偏差表示成二维信号(投影偏差信号), 然后针对如何重构偏差信号进行了讨论, 最后对使用压缩感知的几何校正方法的流程进行了介绍。

3.1 投影偏差的表示方法

基于压缩感知几何校正算法的核心思想在于将像平面投影偏差表示成二维信号, 进而利用信号重构算法恢复出偏差信号, 在此基础上对于RFM模型进行补偿。因此, 如何用二维信号来描述投影偏差, 是文章中的一个基础问题。为使说明更形象具体, 以一具体实例为基础进行介绍:

对于一幅 $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$ 的遥感图像, 如果其成像几何模型中存在误差, 则图像中各像元与其对应投影点之间存在投影偏差,

$$\Delta r_{ij} = i - r_{ij}, \quad \Delta c_{ij} = j - c_{ij}, \quad (6)$$

式中 Δr_{ij} , Δc_{ij} 分别表示行方向和列方向上的投影偏差, (i, j) 表示一个图像像元的行列索引号, 如图 4(a) 所示。在地表表面必然存在一个目标点, 对应于图像中的成像坐标 (i, j) , 而 r_{ij} 和 c_{ij} 则是该目标点在通过成像几何模型投影到像平面上的位置点, 如图 4(b) 所示。

遥感图像中所有像元处的投影偏差可通过两个二维的信号 R 和 C 来表示, 这两个信号被称为偏差信号, 其定义如下所示:

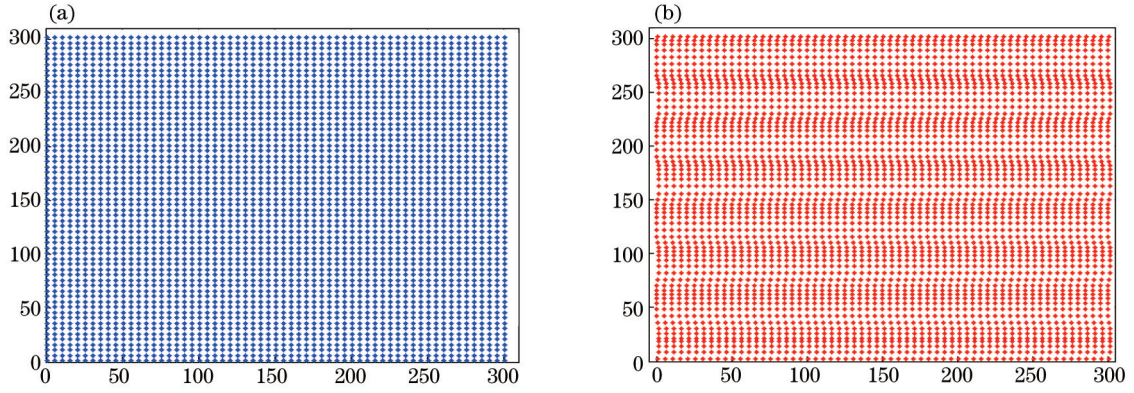


图4 像面投影偏差示意图。(a)图像像元;(b)像元对应投影点

Fig.4 Example of image projection bias. (a) Image points; (b) project points

$$R = \begin{bmatrix} \Delta r_{11} & \dots & \Delta r_{1N} \\ \dots & \ddots & \dots \\ \Delta r_{M1} & \dots & \Delta r_{MN} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} \Delta c_{11} & \dots & \Delta c_{1N} \\ \dots & \ddots & \dots \\ \Delta c_{M1} & \dots & \Delta c_{MN} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

R 和 C 分别表示在行方向和列方向的投影偏差。图4所对应的偏差信号如图5所示。

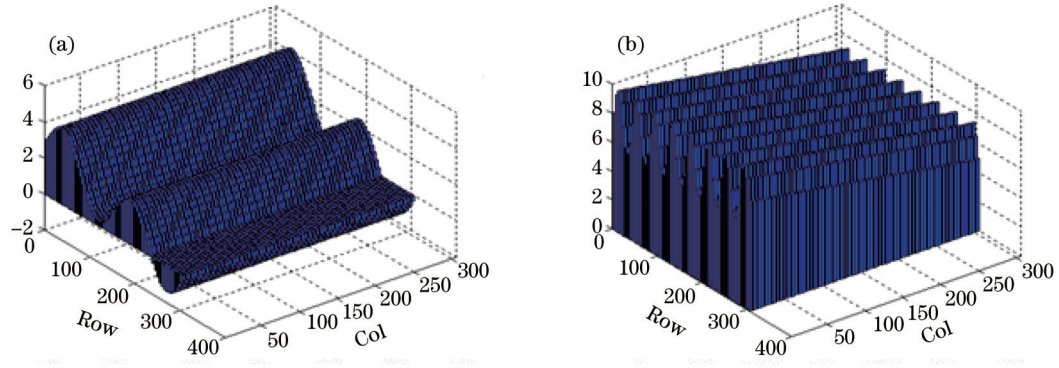


图5 (a)投影偏差信号 R ; (b)投影偏差信号 C

Fig.5 (a) Projection bias signals R ; (b) projection bias signals C

3.2 投影偏差信号的重构

从信号处理的角度来看,对于投影偏差信号 R 和 C 的重构问题,可以被视为压缩感知中基本的信号重构问题。它可以被描述为如下形式:

$$L = \Phi f_r, S = \Phi f_c, \quad (8)$$

式中 Φ 是一个 $K \times MN$ 的测量矩阵, L 和 S 为 $K \times 1$ 的列向量,表示投影偏差信号的采样值,其可以利用控制点和成像模型计算得到。 f_r 和 f_c 是 $MN \times 1$ 列向量,它们是由 R 和 C 中的数据重新排列后得到,它们的定义如下式所示:

$$f_r = \begin{bmatrix} R(1,1) \\ \vdots \\ R(M,1) \\ \vdots \\ R(1,N) \\ \vdots \\ R(M,N) \end{bmatrix}, \quad f_c = \begin{bmatrix} C(1,1) \\ \vdots \\ C(M,1) \\ \vdots \\ C(1,N) \\ \vdots \\ C(M,N) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

因为 f_r 和 f_c 通常并不稀疏,难以将这两个向量直接恢复出来。需要先将这两个向量进行稀疏表示,然后对其稀疏系数进行重构,如下式所示:

$$L = \Phi \Psi x_r, \quad S = \Phi \Psi x_c, \quad (10)$$

式中 Ψ 是一个稀疏基,在文中用一个 $MN \times MN$ 的矩阵来表示。 \mathbf{x}_r 和 \mathbf{x}_c 分别是 f_r 和 f_c 稀疏系数向量,满足 $f_r = \Psi \mathbf{x}_r$ 和 $f_c = \Psi \mathbf{x}_c$,在完成对于 \mathbf{x}_r 和 \mathbf{x}_c 的重构以后,利用(5)式,即可获得 f_r 和 f_c 的重构结果。然后,根据(9)式重新排列 f_r 和 f_c 中的数据,即可恢复出 R 和 C 。至此,完成了对于偏差信号的重构。

为了保证重构成功和有效性,必须使用合适的稀疏基以及测量矩阵,同时还需要采用适当的重构算法。下面对选取何种稀疏基,如何构建采样矩阵以及所采用的信号重构算法进行介绍。

3.2.1 稀疏基

基于以前的研究^[3,7,13-15],可以认为投影偏差中的主要成分包含线性系统偏差、仿射类偏差和振荡类偏差。其中,振荡偏差主要表现为随行变化正弦函数形式^[10-12]。通过分析发现,这几类偏差经过二维傅里叶变换,在频域上显得非常稀疏。如图6所示。

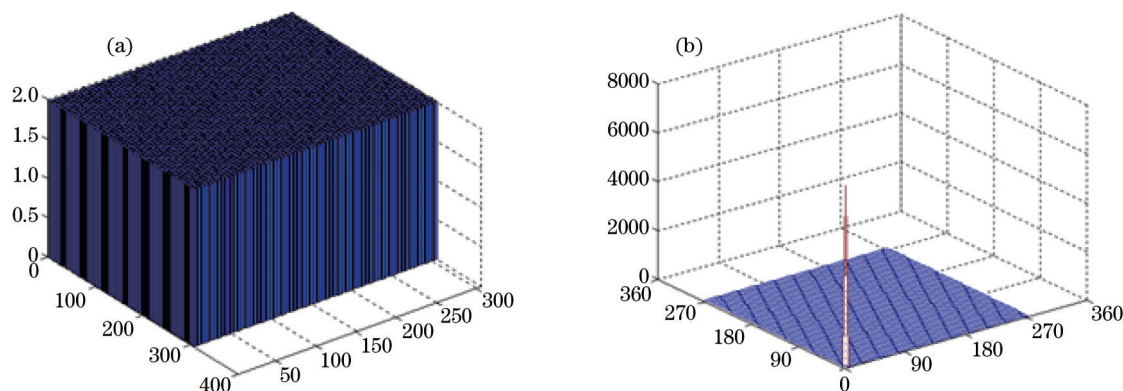


图6 (a)线性系统类偏差;(b)二维傅里叶变换结果
Fig.6 (a) Linear systematic bias; (b) 2D-FFT result

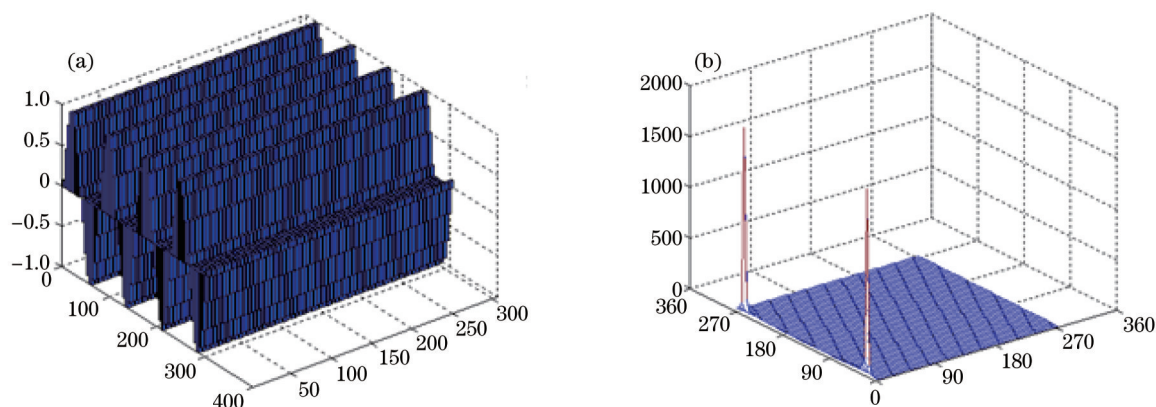


图7 (a)振荡类偏差;(b)二维傅里叶变换结果
Fig.7 (a) Oscillation bias; (b) 2D-FFT result

在图6~8中,线性系统偏差、仿射类偏差以及正弦振荡偏差被展示在左侧,它们的二维傅里叶变换结果被展示在右侧。因为投影偏差的所有主要成分的二维傅里叶变换结果非常稀疏,所以,可认为投影偏差能够在二维傅里叶基上稀疏表示。据此,二维傅里叶基被选作为偏差信号的稀疏基。二维傅里叶基的定义如下,令:

$$a(r,c,u,v) = \exp[j2\pi(ur/M + vc/N)], \quad (11)$$

$$\mathbf{a}(r,c) = [a(r,c,0,0) \ \cdots \ a(r,c,0,N-1) \ \cdots \ a(r,c,M-1,0) \ \cdots \ a(r,c,M-1,N-1)], \quad (12)$$

则二维傅里叶基可以表示为

$$\Psi_{M^2} = \frac{1}{MN} [\mathbf{a}(0,0)^T \ \cdots \ \mathbf{a}(0,N-1)^T \ \cdots \ \mathbf{a}(M-1,0)^T \ \cdots \ \mathbf{a}(M-1,N-1)^T]^T. \quad (13)$$

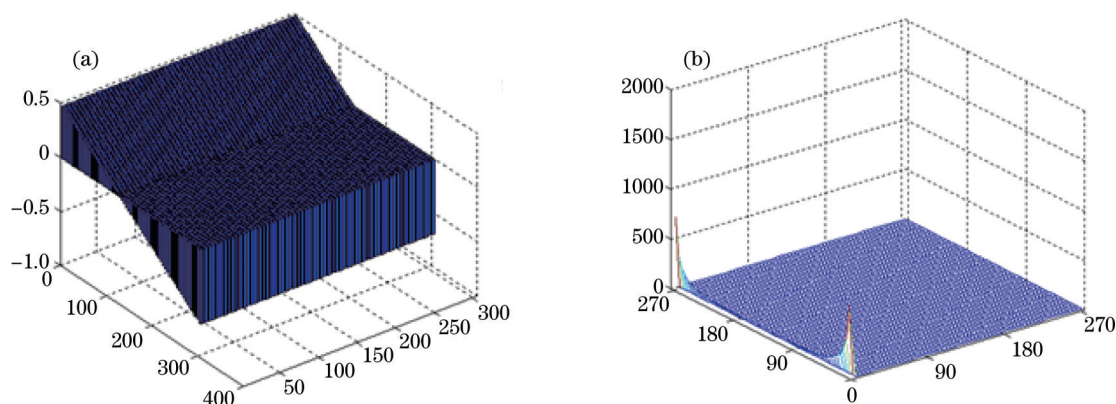


图8 (a)仿射类偏差; (b)二维傅里叶变换结果

Fig.8 (a) Affine bias; (b)2D-FFT result

3.2.2 测量矩阵

测量矩阵由地面控制点的像平面坐标所决定。如果存在 K 个地面控制点,其像平面坐标为 $(r'_1, c'_1), (r'_2, c'_2), \dots, (r'_k, c'_k)$, 则其所对应的测量矩阵定义如下,令:

$$b_i = [0 \quad 0 \quad \dots \quad \frac{1}{p_i} \quad \dots \quad 0], \quad (14)$$

在向量 b_i 中,只有第 p_i 个元素为 1,其余元素均为 0,其中, $p_i = (r'_i - 1) * M + c'_i$ 。则测量矩阵可以表示为

$$\Phi = [b_1^T \quad b_2^T \quad \dots \quad b_k^T]^T. \quad (15)$$

需要注意的是,为了能够保证测量矩阵与稀疏基以极大概率不相关,地面控制点应该随机选择,否则会影晌偏差信号重构的精度^[7]。

3.2.3 信号重构算法

在常见信号重构算法中,匹配追踪类方法的计算复杂度低于其他方法,计算速度更快。由于二维信号的重构计算量巨大,采用匹配追踪方法更为适宜。在对偏差信号的恢复中,文章采用了正交匹配追踪算法来重构投影偏差信号。正交匹配算法与基本匹配追踪算法相近,只是通过递归地对已选择的原子集合进行正交化以保证迭代的最优性,从而减少了迭代次数。该方法具体细节参见文献[9]。

3.3 使用压缩感知的几何校正方法流程

使用压缩感知的几何校正方法的基本流程如图9所示。

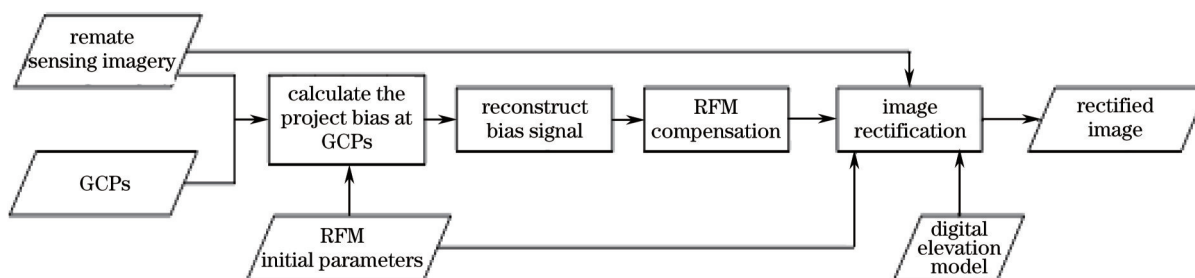


图9 使用压缩感知几何校正流程图

Fig.9 Flowchart of geometric correction using compressive sampling

整个流程主要包含4个步骤,具体如下所示:

1) 计算控制点处的投影偏差

在该步中,首先利用RFM模型计算出地面控制点在像平面上的投影坐标,并从遥感图像中测量出对应地面控制点处坐标。然后使用如下的公式计算出地面控制点处的投影偏差:

$$\Delta r = r' - r, \quad \Delta c = c' - c, \quad (16)$$

式中 $(\Delta r, \Delta c)$ 表示测量得到的行列值 (r', c') 和RFM关于地面控制点投影坐标 (r, c) 之间的偏差;

所有地面控制点处的偏差能够被整合表示为两个向量的形式, L 和 S , 其定义如下:

$$\begin{aligned} L &= [\Delta r_1 \quad \Delta r_2 \quad \cdots \quad \Delta r_k]^T, \\ S &= [\Delta c_1 \quad \Delta c_2 \quad \cdots \quad \Delta c_k]^T, \end{aligned} \quad (17)$$

L 和 S 都是 $K \times 1$ 的向量。 K 是地面控制点的数量。 L 和 S 可以被视为对于像面投影偏差的不完全测量;

2) 偏差信号重构

在地面控制点已经确定, 控制点处偏差已经计算得到的情况下。 利用3.2节中所介绍的信号重构算法, 即可完成偏差信号的重构;

3) RFM 模型补偿

当偏差信号 R 和 C 已知, RFM 模型的误差可通过将 RFM 投影坐标系修正到像平面坐标系的方法来进行补偿, 其补偿公式如下所示:

$$\begin{aligned} r' &= r + f(r, c, R), \\ c' &= c + f(r, c, C), \end{aligned} \quad (18)$$

式中 (r, c) 代表 RFM 投影坐标, (r', c') 是各点的像平面坐标, f 表示插值函数, 用以获取在 (r, c) 点处的投影偏移误差。 所有通过初始有理函数模型计算得到的坐标值, 都需要再经过(18)式修正, 以实现对于模型误差的补偿。 由于插值函数 f 易于实现, 且不是研究重点, 因此不在文中对其进行介绍;

4) 图像纠正

在完成对于 RFM 的补偿以后, 即可对原始遥感图像进行纠正。 文章采用间接纠正法进行图像纠正, 在纠正过程中, 首先要确定纠正后图像的边界范围, 然后利用补偿后的 RFM 模型, 结合地面高程数据, 计算出纠正后图像各点对应于原始遥感图像中位置, 根据计算得到位置在原始图像中进行采样, 将采样得到的灰度值设为纠正后图像中对应点处的灰度值, 从而完成图像纠正。 由于该方法技术成熟, 且非本文重点, 故不对其进行详细叙述, 图像纠正的详细实现过程参见相关文献^[13]。

4 实验分析

为验证方法的有效性, 通过实测数据对文中提出的几何校正算法进行了测试, 并与基于间接补偿 RFM 的校正方法和基于严格成像模型的校正方法进行了比较。 同时利用仿真数据分析了地标点数量和分布对于算法性能的影响。

4.1 实测数据实验

4.1.1 实验数据

在实验中, 测试数据为一张国内某型实验卫星所获得遥感图像的局部。 该图像未经过几何校正, 图像尺寸为 800 pixel×800 pixel, 分辨率约为 30 m, 成像区域为哈萨克斯坦的舍普琴柯堡, 获取时间为 2012 年 7 月 11 日。 另选取了一张经过精校正的资源三号遥感图像作为参考图像, 其尺寸为 6000 pixel×6000 pixel, 分辨

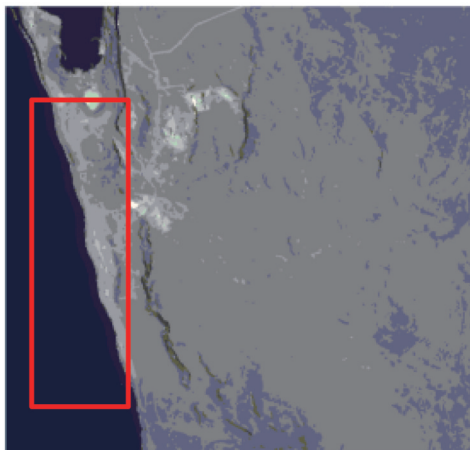


图 10 实验卫星图像

Fig.10 Experimental satellite image

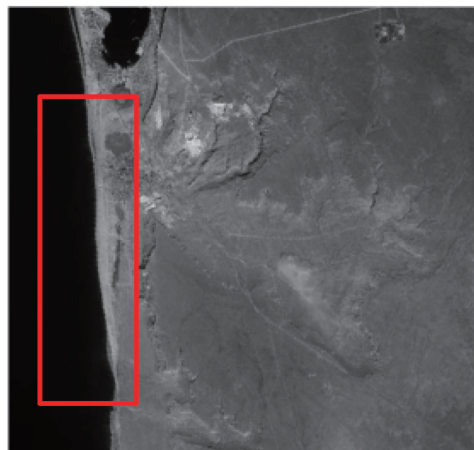


图 11 资源三号卫星图像

Fig.11 ZY-3 image

率为 2.1 m,覆盖区域与实验卫星图像重叠,获取时间为 2013 年 1 月 23 日。该图像分辨率远高于本文实验卫星图像的分辨率,经过精校正后,图像的平面定位精度和高程定位精度均优于 3 m,且图像具有足够的地面控制点,可将其作为参考基准图。由图 10 和图 11 的海岸线起伏可以看出,由于成像过程中受到高频姿态振荡的影响,实验卫星图像中除存在通常的旋转、平移畸变外,还存在明显振荡畸变。

4.1.2 校正方法的效果

本节比较了三种几何校正方法:基于间接补偿 RFM 的几何校正方法、基于严格成像模型的几何校正方法,以及使用压缩感知的几何校正方法。各种校正方法的效果如图 12~14 所示。

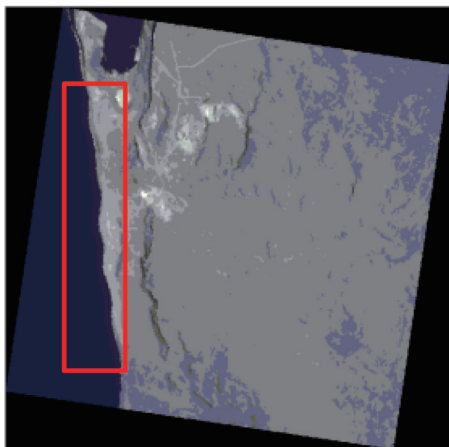


图 12 间接补偿 RFM 校正效果

Fig.12 Image corrected by indirect-RFM

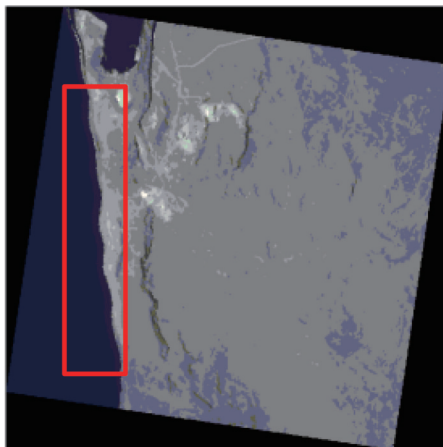


图 13 严格成像模型校正效果

Fig.13 Image corrected by Rigorous sensor model

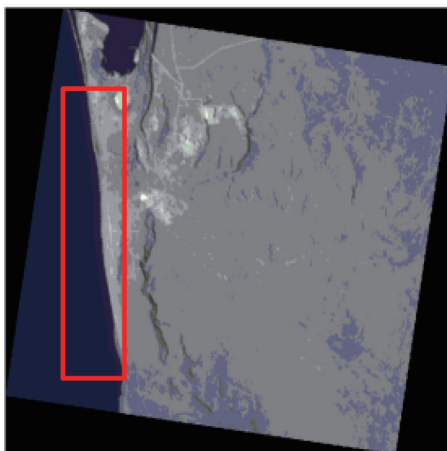


图 14 使用压缩感知校正方法校正效果

Fig.14 Image corrected by RFM compensated by CS

由图 12~14 可以看出,使用间接补偿 RFM 的校正方法与使用严格成像模型的校正方法效果相近,其对于系统误差校正效果较好,但未能去除图像中的抖动误差。而使用压缩感知的校正方法,则较好的修正了图像中的振荡畸变,海岸线平滑,更接近实际情况。为量化评价各种校正方法的性能,从图像中随机选取了 80 个均匀分布的地标点作为检测点。统计分析了在使用不同几何校正方法情况下,各检测点处的均方根 (RMS) 误差和最大校正残差,结果如下表所示。

在上表中,In-direct refining RFM 表示采用间接补偿 RFM 的校正方法;Rigorous sensor model 表示采用严格成像模型的校正方法;RFM compensated by CS 表示采用压缩感知的几何校正方法。从上表的统计结果中可以看出,当图像中存在明显振荡畸变时,采用间接补偿的 RFM 和严格成像模型的两种校正方法的效果均不理想,其 RMS 误差约在 60 m,最大误差在 100 m 以上。而基于压缩感知的几何校正方法,则较好的校正了振荡畸变误差,其 RMS 误差约为 13 m,最大误差约为 31 m,优于其他两种方法。实验结果证明了该方法对于

振荡畸变校正的有效性。

表1 校正方法的性能

Table 1 Performances of geometric correction methods

Correction methods	RMS error /m			Maximum residual error /m		
	X	Y	Image	X	X	Image
In-direct refining RFM	55.63	20.17	59.17	110.64	33.54	115.61
Rigorous sensor model	53.74	20.00	57.34	99.11	30.59	100.01
RFM compensated by CS	13.11	1.81	13.23	30.85	4.80	31.22

此外,为分析该校正方法对于图像辐射值的影响,文章还对原始图像和经过本文所提方法进行校正遥感图像进行了灰度的直方图统计,其结果如图15所示。

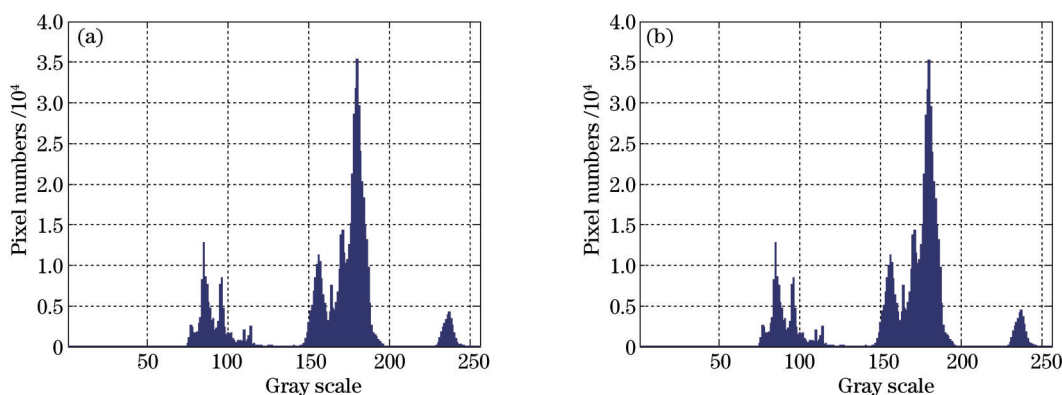


图15 (a)原始图像灰度直方图;(b)校正后图像灰度直方图

Fig.15 (a) Histogram of original image; (b) histogram of corrected image

由上图可以看出,校正后的图像与原始图像的直方图相比,无明显差异,本文所提方法对于图像的灰度值影响较小。

4.2 仿真数据实验

4.2.1 实验数据

为进一步分析文章所提几何校正方法的性能,使用仿真的棋盘图对本文所提算法进行了测试,分析了控制点分布和数量的影响。本文所使用的仿真数据如图16所示。

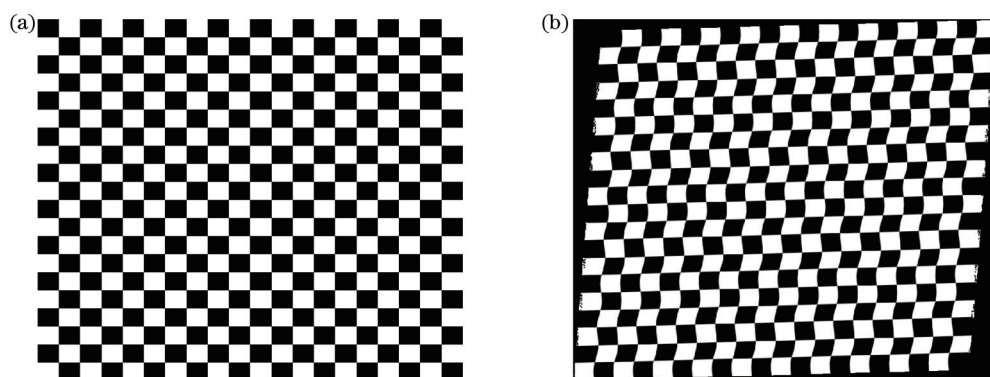


图16 (a)不包含畸变的参考图像;(b)包含畸变的待校正图像

Fig.16 (a) Reference image without distortion; (b) image with distortion

在图16中,图(a)为不带误差的参考图像,尺寸为800 pixel×800 pixel,图(b)为参考图像经过变形后得到,其中包含了仿射畸变和振荡畸变,振荡畸变的振幅为3 pixel。相较于使用实测数据,使用仿真数据具有如下三方面的优势:1)可以准确获取控制点坐标;2)可以调节控制点的数量和位置;3)可以控制几何畸变的类型和幅度。

4.2.2 地标分布的影响

传统几何校正方法通常要求地面控制点在全图均匀分布,而使用压缩感知的几何校正方法则有别于

此,其要求地面控制点的位置选择应该尽量随机,避免均匀的网格化分布。否则导致压缩感知中的传感矩阵 $\tilde{\Phi}$ 病态,严重影响投影偏差信号的重构,进而导致校正效果降低。为说明这一特点,在相同几何畸变条件、相同地面控制点数量的情况下,采用不同的地面控制点分布,独立对图 16(b)进行了两次校正,其校正结果如图 17 所示。

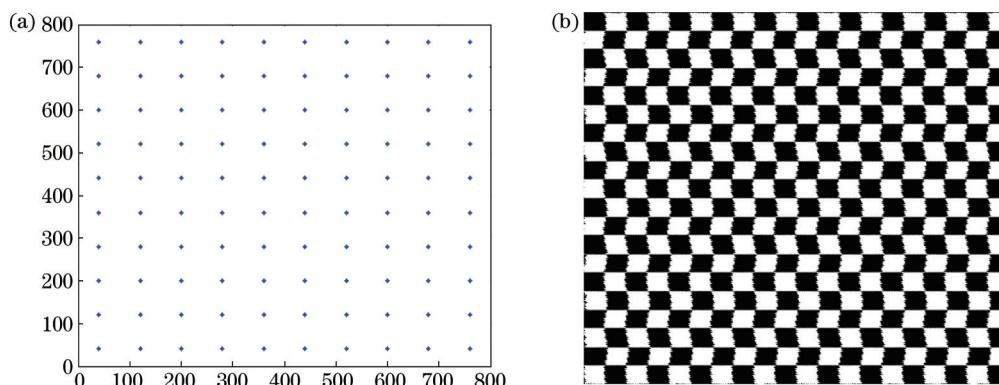


图 17 (a)地面控制点均匀分布;(b)对应校正效果图

Fig.17 (a) GCPs distributed uniformly; (b) corresponding corrected image

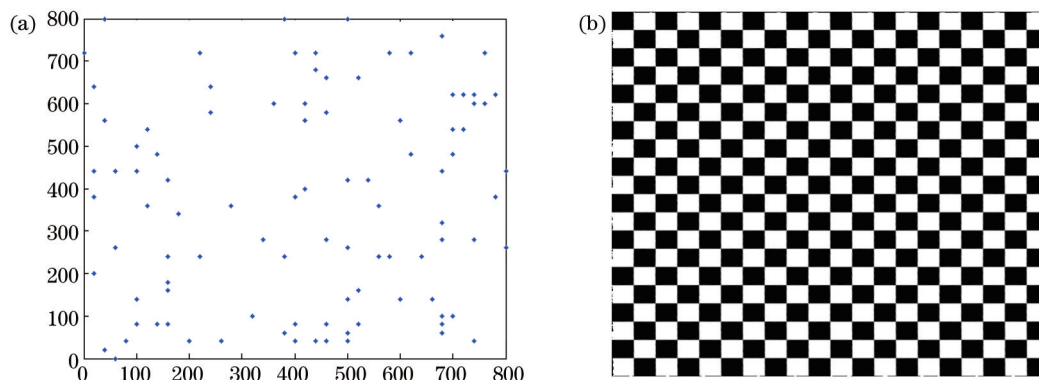


图 18 (a)地面控制点随机分布;(b)对应校正效果图

Fig.18 (a) GCPs distributed randomly; (b) corresponding corrected image

在图 17(a)与图 18(a)中,蓝点表示地面控制点。当地面控制点均匀分布时,得到的校正图像模糊,振荡效果依然存在,校正效果较差。当地标分布随机时,得到的校正图像清晰,图像中不存在明显的振荡误差。地面控制点分布对于使用压缩感知的校正方法影响较大,选取时应尽量随机选取,避免出现均匀网格分布的情况。

4.2.3 地面控制点数量的影响

为评估地面控制点数量对于校正效果的影响,从图形中选取了 100 个均匀分布的检测点,通过统计校正后各检测点处校正残差均方根 R_{MSE} ,评价地面控制点数量对于校正效果的影响。在本实验中,测试了地面控制点数量在 60~140 范围内变化的情况下,使用压缩感知的几何校正方法的效果,如图 19 所示。

在上图中,横坐标表示地面控制点数量,纵坐标表示 R_{MSE} 值,单位为像素。当地面控制点数量过少时,校正效果很差,随着地面控制点数量增加,校正精度在不断提升。当地面控制点数量达到一定值时,校正效果趋于稳定,进一步增加控制点数量对于校正效果的改善不明显。所需地面控制点的数量,要根据具体情况而定,需要考虑待校正图像的大小、所需采用的稀疏基、重构算法和投影偏差的类型以及大小等因素,目前尚未有普适的估计方法。

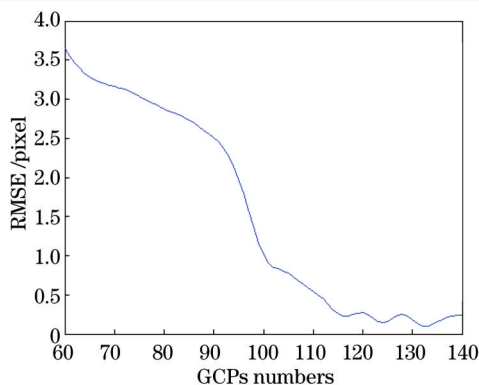


图 19 地面控制点数量与校正精度之间的关系图

Fig.19 Relationship between GCPs number and geometric correction accuracy

5 结 论

针对常用几何校正方法难以处理振荡畸变的问题,提出了一种使用压缩感知的几何校正方法。该方法以RFM模型为基础,其核心是通过压缩感知技术估计出所有像元处的像平面投影偏差,并以此为依据进行RFM的像方补偿,改善模型精度,提高校正质量。常用的成像几何模型补偿方法,多是对于模型参数进行修正,或者在模型中添加简单的补偿项。这类方法能对简单的系统误差起到较好地补偿作用,但难以补偿振荡引起的偏差。而文中所提出的校正方法,能够有效抑制振荡畸变的影响,进而提高几何校正精度。实验验证了该校正方法的有效性。该方法在设计时并未局限于某类特定型号的卫星,因此,其理论上可用于校正包含有振荡畸变的其他遥感图像。在后续研究中,会针对稀疏基和重构算法进行优化,以提高文中所提出的几何校正方法的精度,拓展其能够处理的几何畸变种类。同时对该算法的性能进行更全面的分析。

参 考 文 献

- 1 J Wang, Y Ge, G B Heuvelink, *et al.*. Effect of the sampling design of ground control points on the geometric correction of remotely sensed imagery [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 18(1): 91-100.
- 2 T Toutin. Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(1): 1893-1924.
- 3 T Westin. Precision rectification of SPOT imagery [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1990, 56(2): 247-253.
- 4 Yuan Xiuxiao, Zhang Guo. Object location of satellite imagery under lacking ground control points [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2003, 28(5): 505-509.
袁修孝, 张 过. 缺少控制点的卫星遥感对地目标定位[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2003, 28(5): 505-509.
- 5 Y Hu, V Tao, V Croitoru. Understanding the rational function model: methods and applications [C]. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2004. 119-124.
- 6 C Fraser, H Hanley. Bias-compensated RPCs for sensor orientation of high-resolution satellite imagery [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2005, 71(8): 909-915.
- 7 Hu Chunhui, Yan Changxiang, Shao Jianbing. Pointing mirror low frequency sine oscillation induced remote sensor image distortion and correction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0428002.
胡春晖, 颜昌翔, 邵建兵. 指向镜低频正弦振动下遥感图像的畸变及校正[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0428002.
- 8 C Oh, W Lee, H Bang. Passive jitter isolation for reaction wheel of satellites [C]. *SICE-ICASE International Joint Conference*, 2006. 3891-3895.
- 9 Yu Teshima, A Iwasaki. Correction of attitude fluctuation of terra spacecraft using ASTER/SWIR imagery with parallax observation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 222-227.
- 10 Sun Jiabing, Ni Ling, Zhou Junqi, *et al.*. *Principle and Applications of Remote Sensing* [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009. 123-137.
孙家柄, 倪 玲, 周军其, 等. *遥感原理与应用* [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009. 123-137.
- 11 E Candès, M B Wakin. An introduction to compressive sampling [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 21-30.

- 12 R G Baraniuk. Compressive sensing [J]. IEEE Signal Process Mag, 2007, 24(4): 118-121.
- 13 J Tropp, A Gilbert. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(12): 4655-4666.
- 14 Wang Hongjun, Wang Wei, Wang Xin, *et al.*. Space camera image degradation induced by satellite micro-vibration [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42 (10): 1212-1217.
王红娟, 王 炜, 王 欣, 等. 航天器微振动对空间相机像质的影响[J]. 光子学报, 2013, 42(10): 1212-1217.
- 15 T Iwata, T Kawahara, N Muranaka, *et al.*. High- bandwidth attitude determination using jitter measurements and optimal filtering [C]. AIAA GNC Conference, 2009.
- 16 Yang Fei, Jin Guang, Qu Hongsong, *et al.*. Design and analysis about rapid geometric correction of space whiskbroom time delayed and integration CCD camera [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0111001
杨 飞, 金 光, 曲宏松, 等. 航天时间延迟积分 CCD 相机摆扫成像快速几何校正设计与分析[J]. 光学学报, 2014, 34 (1): 0111001.
- 17 Zhao Yanyan, Yuan Yan, Su Lijuan. Point spread function estimation of blurring due to uniform linear motion in arbitrary direction [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0809003.
赵妍妍, 袁 艳, 苏丽娟. 任意方向匀速直线运动模糊的点扩展函数估计[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0809003.
- 18 Zhang Bowen, Wang Xiaoyong, Hu Yongli. Integrated analysis on effect of micro-vibration on high resolution space camera imaging [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2012, 33(2): 60-66.
张博文, 王小勇, 胡永力. 微振动对高分辨率空间相机成像影响的集成分析[J]. 航天返回与遥感, 2012, 33(2): 60-66.
- 19 Huang Junhui, Wang Zhao, Xue Qi, *et al.*. Calibration of camera with rational function lens distortion model [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0508001.
黄军辉, 王 昭, 薛 琦, 等. 基于有理函数式镜头畸变模型的摄像机标定[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0508001.

栏目编辑: 张浩佳