

高分辨率空间相机俯仰成像的像移补偿方法

李伟雄, 闫得杰, 王 栋

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 为了使高分率空间 TDI(Time Delay and Integration) CCD 相机适应卫星大俯仰姿态角, 以增强空间遥感的时间分辨率, 分析了卫星大俯仰姿态对高分辨空间相机成像的影响, 使用光学投影方法, 定性分析了俯仰成像时不同视场处的像移速度差异; 根据 TDI CCD 工作方式, 提出了横向像移图像生成原理, 建立了横向像移图像的恢复模型, 并完成了仿真验证和算法精度分析。分析结果表明: 卫星俯仰姿态越大时, 像面不同视场处横向像移速度差异增大; 从仿真实验和精度分析可以看到俯仰成像时采用横向像移图像恢复方法可以得到无横向像移的图像, 横向像移图像采集位数越高, 恢复后的图像灰度值误差越小。横向像移图像恢复方法增强了空间相机对卫星大俯仰姿态的适应能力, 极大地提高 TDI CCD 空间相机敏捷成像能力。

关键词: 空间相机; 俯仰成像; 横向像移; 模糊恢复

中图分类号: V445.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)09-2442-07

Image motion compensation method of high resolution space camera's imaging with pitch angle

Li Weixiong, Yan Dejie, Wang Dong

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to make the high resolution space Time Delay and Integration (TDI) CCD camera adapt to the satellite pitch attitude angle and enhance real-time ability of space remote sensing, the influence of satellite's pitch angle on the imaging of high resolution space cameras was analyzed. The optical projection method was used to qualitatively analyze the differences of image motion velocities among different fields of view when imaging with pitch angles. Generating principle of image with traverse image motion was promoted according to the operation mode of TDI CCD. The model of recovering image with the traverse motion image was built, and the simulation experiment and its algorithm accuracy analysis were accomplished. The analysis result shows that the larger the pitch angle of satellite is, the more different the image motion velocity of various fields of view is. From the emulational experiment and accuracy analysis, it is seen that image without traverse image motion could be gotten by the method of image recovery with traverse image motion, and the higher the collection

收稿日期: 2013-01-02; 修订日期: 2013-02-15

作者简介: 李伟雄(1985-), 男, 助理研究员, 博士生, 主要从事空间对地图像信息获取技术及总体误差理论分析方面的研究。

Email: wishing2190@yahoo.com.cn

通讯作者: 闫得杰(1979-), 女, 助理研究员, 硕士, 主要从事航天遥感器像移补偿软件设计方面的研究。

Email: 149454410@qq.com

digit of image with traverse image motion is, the smaller the error of grew value is. The ability to adapt the pitch angle of satellites is enhanced by the method of recovery of image with traverse image motion, and the capability of agile imaging of TDI CCD space camera is greatly improved.

Key words: space camera; imaging with pitch angle; traverse image motion; recovery of mistiness

0 引言

随着遥感技术的发展,空间光学成像的分辨率越来越高,TDI CCD 相机在高分辨率成像中的应用也越来越广。随着空间相机分辨率的不断提高,各空间技术强国除了追求相机的高地面分辨率外,对图像采集效率也有了更加严格要求^[1-2]。新一代成像卫星的姿态机动性和准确性的提高使其可以完成灵活多变、功能丰富的多种模式对地成像任务,以取得事半功倍、增加功能的作用。目前国外主要是利用成像卫星的大侧摆和大俯仰姿态角来完成侧视和俯视功能,以增强相机单轨地面探测范围和实时性。而卫星大侧摆和大俯仰姿态角对高分辨空间相机成像影响很大,相机需要采用更优的像移补偿方法来适应卫星的大侧摆和大俯仰成像。

飞行器轨道运动、地球自转和飞行器姿态变化等因素会造成像点在焦平面上的相对运动,形成像的移动,简称像移。像移是影响空间相机成像分辨率的最重要的因素之一,为了保证空间相机获得高分辨率的图像,必须根据精密的像移计算矢模型,对像移速度进行准确的补偿^[3]。通常将像移速度分为两个分量,沿 TDI CCD 积分方向的分量称为前向像移速度,在像面上垂直于 TDI CCD 积分方向的分量称为横向像移速度^[4]。在侧摆成像时,像面上不同视场处前向像移速度差异变大,可以通过分别设置 TDI CCD 不同列像元的行转移频率来实现异速匹配;而俯仰成像时,不同视场处横向像移速度差值较大,如果采用偏流调整(通过焦平面旋转机构或飞行器的姿态调整,使 TDI CCD 的积分方向与像移速度方向一致)的方法对横向像移进行异速匹配,就需要进行分片偏流调整,这对像面设计拼接要求太高^[5-6]。文中主要分析飞行器俯仰姿态对高分辨 TDI CCD 空间相机的影响,提出一种 TDI CCD 适应俯仰成像的方法,为空间相机适应飞行器俯仰姿态成像提供理论基础。

1 俯仰成像分析

飞行器大俯仰姿态下成像对空间相机焦平面的横向像移匹配有较高的要求。TDI CCD 器件在积分方向的像元数较少,因此在飞行器有俯仰姿态时,中心视场与边缘视场的前向像移之差,不会因为俯仰角的增大而增大,但由于受到相机视场角的限制,俯仰成像时的图像会发生变形,造成中心视场与边缘视场的横向像移的差值增大。如图 1 所示,使用面阵 CCD 相机对天花板的方形目标进行拍摄的两张照片。

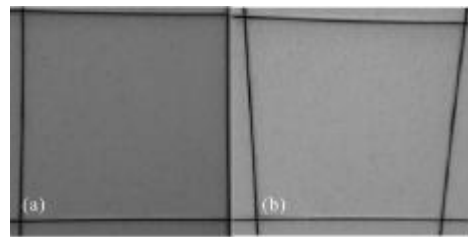


图 1 面阵 CCD 相机拍摄的两张天花板照片

Fig.1 Two pictures of ceiling taken by matrix CCD camera

图 1(a)是像面与天花板平时拍摄的照片,图 1(b)像面与天花板成一定的仰角时拍摄的照片。可以看出右图中的方形区域变成了上宽下窄的梯形区域。为了解释这个现象,给出一次成像的简单原理图,如图 2 所示。

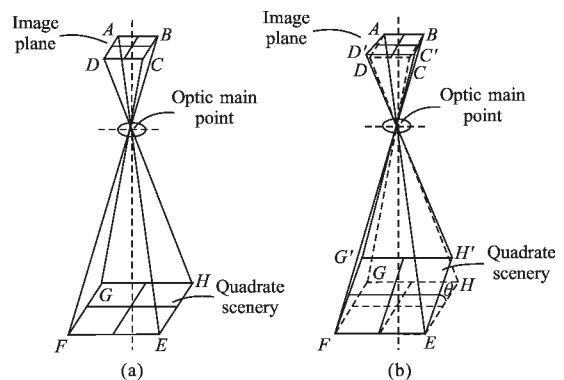


图 2 物面与像面平行以及物面有仰角时的成像原理示意图

Fig.2 Sketch map of imaging when scene face parallels with image face and scene face pitches

图(a)是像面与物面平行时的一次成像示意图,在不考虑光学畸变的前提下,方形区域 EFGH 通过光学系统后,在像面所成的像 ABCD 还是方形区域,只是区域的大小发生了改变。图(b)是物面有一定仰角时的成像示意图,等同于相机在一定俯仰角度的情况下对目标成像,原本与像面平行的方形区域 EFGH,绕 EF 轴旋转了 θ 角度,变成图中方形区域 EFG'H',方形区域 EFGH 和 EFG'H' 形状和大小相同。经过光学系统后,EF 轴在像面上的像仍然是轴 AB,而 G'H' 轴在像面的像变为了轴 C'D',C'D' 轴相对于 CD 轴有一定拉伸,使得方形区域 EFG'H' 在像面上的图像变为了梯形区域 ABC'D'。

飞行器俯仰角对 TDI CCD 空间相机相对于面阵 CCD 影响更为严重,由于 TDI CCD 在积分方向像元数很少,所以图像变形相对于面阵 CCD 较小,但是 TDI CCD 是对运动的景物进行成像,物面的俯仰角将会使景物点的移动方向发生改变,给相机成像带来较为严重的问题。

如图 3 所示, A_0D_0' 为视场的中心线,与 TDI CCD 积分方向一致,地面方形区域 EFG'H' 投影到像面变为梯形区域 ABC'D'。假设飞行器无俯仰姿态时,地面方形区域 $EE_1H_1'H_1'$ 投影到像面上正好是一个像元,且像移方向正好沿像元中心线,与 TDI CCD 积分方向一致。当飞行器有俯仰姿态时,地面方形区域 $EE_1H_1'H_1'$ 投影到像面上变为梯形区域 $AA_1D_1'D_1'$,其像移方向沿中心线 A_0D_0' ,与 TDI CCD 积分方向不再平行,且离视场中心越远的像元,其像移方向与积分方向夹角越大。将不同像元处的像移分为前向和横向两个方向,可以看出,飞行器有俯仰

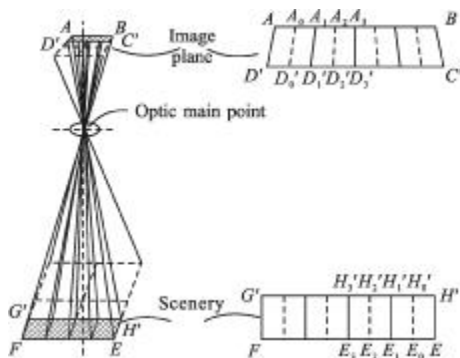


图 3 TDI CCD 俯仰成像的瞬态几何成像模型

Fig.3 Instantaneous geometrical model of TDI CCD imaging with pitching angle

姿态时,离视场中心越远,横向像移越大,前向像移基本不变。如果整个像面都按照视场中心像元的像移速度进行匹配,则非视场中心像元存在较大横向像移匹配误差,拍摄图像从中心到边缘越来越模糊。

2 俯仰成像像移补偿方法

俯仰成像时,非视场中心像元与视场中心像元横向像移速度差值变大,使横向像移匹配残差大幅度增大。如果采用偏流调整策略^[7],则需要对不同视场的像元调整不同的偏流角。如果仅依靠飞行器姿态进行调姿,这是难以满足要求的,因为飞行器姿态调整,只能使相机的整个像面都按一个偏流角进行调整。如果使用偏流机构进行调整,则需要像同大侧摆成时像移速度异速匹配一样,对像面进行分组,对不同组的像元进行不同的偏流角调整。由于像移速度匹配使用 TDI CCD 器件,通过改变其行转移频率,就能以较小的代价,实现异速补偿。而偏流机构分组调整,其实就意味着需要对 TDI CCD 进行分片偏流调整,这将会使像面机构变得十分复杂,且不同片 TDI CCD 在拼接时通常对共面性要求极高,通常误差要求小于微米量级。如果在像面 TDI CCD 进行分片调整后,还需要保证其共面精度,无疑对结构设计方面的要求更加严格,甚至是难以完成的。

根据 TDI CCD 电荷转移原理^[8-9],提出一种横向像移图像恢复方法,采用图像处理方法,对拍摄后有横向像移的图像进行恢复。由于实验条件的限制,目前该方法停留在算法的建立和完善以及仿真验证阶段,下文将进行详细介绍。

2.1 横向像移图像生成原理

在不进行偏流调整且不考虑安装误差等因素的影响的前提下,TDI CCD 行转移方向与前向像移方向相同,如果仅将 TDI CCD 电荷转移速度设置为与前向像移速度相同,使拍摄的图像只存在横向像移,可定义这种图像为横向像移图像。横向像移图像相对于无横向像移的图像有两个差异,一个是宏观的,一个是微观的。

宏观的差异是横向像移图像相对无横向像移的图像存在一定的形变,如图 4 所示。

图 4 中,正方形目标成像到像面正好为 16 个像元,通过 TDI CCD 推扫成像,假设前向和横向像移速度相同,且 TDI CCD 与前向像移完全匹配,则图

像在像面上每向下走一行,其也向左走一列。第一行图像在 CCD 上成像为第 1 到 4 列,第二行图像在第 2 到 5 列,第三行图像在 3 到 6 列,第四列图像在 4 到 7 列,因此正方形目标经过 CCD 成像后其形状就变为了右边图像的形状。

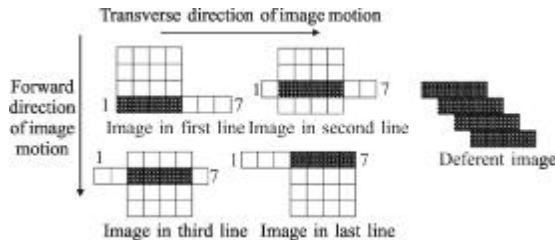


图 4 横向像移图像形变产生示意图

Fig.4 Sketch map of generating distortion of image with traverse motion

微观的差异是横向像移的图像相对于原始图像存在一定的模糊。如图 5 所示。

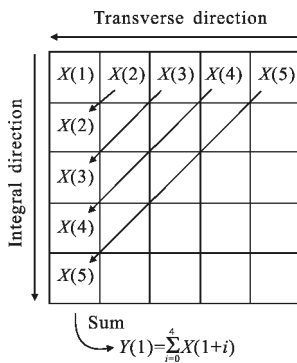


图 5 偏流角为 45°时的横向像移图像模糊生成示意图

Fig.5 Sketch map of generating mistiness of image with traverse motion when drift angle is 45°

某一行目标通过 TDI CCD 器件 5 级积分成像,当没有横向像移时,经过 5 次电荷的转移并累积,第一列像元输出应为 $5 \times x(1)$,由于横向像移的影响,假设电荷每转移一行,图像往左横移一列,则第一列像元输出为 $\sum_{i=0}^4 x(i)$,其它列也是同样的情况,因此该行数据的各列像元都受到了相邻像元的影响,输出的图像数据与无横向像移时不同,出现图像模糊现象。两种差异是同时产生的,为了方便理解,进行分别说明。横向像移图像形变恢复方法较为简单,确定一个基准行,从该行往后,逐行对图像数据进行平移,具体的算法不进行介绍。横向像移图像的模糊恢复较为麻烦,也是研究的重点,在下一节中进行详细介绍。

2.2 横向像移图像模糊恢复数学模型

在 2.1 节中,为了交待横向像移图像模糊产生的原因,给出了一个横向像移速度等于前向像移速度的特殊示意图,此情况下偏流角正好为 45° ,电荷每转移一行,图像横向的移动也正好是一个像元。而在俯仰成像分析中,可以看到不同视场像元的横向像移其实是不相同的,通常情况下横向像移远小于前向像移,且也不会总是一个像元或者是整数像元,因此积分级数为 5 级时偏流角小于 45° 时横向像移图像模糊的准确示意图应该如图 6 所示。

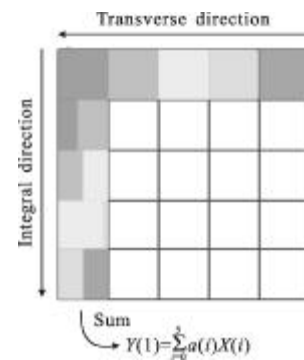


图 6 横向像移图像模糊生成示意图

Fig.6 Sketch map of generating mistiness of image with traverse motion

图中, $X(i)$ 所拍摄那行图像的第 i 列进行一次曝光产生的电荷量对应的码值; $a_k(i)$ 为经过 5 级积分输出的码值 $Y(k)$ 中, $X(i)$ 的系数,是一个累加和,例如,在第一级成像时, $X(1)$ 正好占了整个像元,那就是 1,而在第二级成像时其只占了 $1/3$,而在其它级成像时都没有,则 $a_1(1)$ 就为 $1+1/3=4/3$ 。以此类推,可确定出 $a_1(2)$ 、 $a_1(3)$ 、 $a_1(4)$ 以及 $a_1(5)$ 。

当横向像移速度不为 0,小于前向像移速度时,通过以上原理,可以列出一个 5 个方程,大于 5 个小于等于 9 未知数的方程组,如公式(1)所示。

$$\begin{cases} Y(1) = \sum_{i=1}^5 a_1(i)X(i) \\ Y(2) = \sum_{i=2}^6 a_2(i)X(i) \\ Y(3) = \sum_{i=3}^7 a_3(i)X(i) \\ Y(4) = \sum_{i=4}^8 a_4(i)X(i) \\ Y(5) = \sum_{i=5}^9 a_5(i)X(i) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $Y(k)$, ($k=1, 2, \dots, 5$) 为已知的图像数据; $a_k(i)$, ($k=1, 2, \dots, 5, j=1, 2, \dots, 9$) 可以通过横向像移量计算出来。

这是一个未知数少于方程个数的方程, 没有唯一解。但是如果还能找到包含 $X(i)$, ($i=1, 2, 3, \dots, 9$) 的另外一个与此方程组不相关的方程组, 就可以联立求解出 $X(i)$, ($i=1, 2, 3, \dots, 9$), 从而得到复原的图像, 定义这种方法为组建完整方程组法。

通常情况下, 相邻像元横向像移速度差别不大, 因此可以通过分组, 在横向像移满足横向像移误差的要求时, 每一组中的横向像移都取相同的值, 这样得到两组不相关的方程组, 就可以通过对同一景物进行两次成像, 要求两次成像是横向像移不相同。可以通过单片 CCD 分时对同一目标或者多片 CCD 同时对同一目标完成两次图像, 两次成像时 CCD 积分方向与像移方向夹角不同, 即可得到两副不同横向像移的图像。

综上所述, 可以得出以下结论:

(1) 当横向像移速度不大于前向像移速度时, 可以通过同一景物的两幅不同横向像移的图像, 恢复出无横向像移的图像;

(2) 通过分组, 可以对不同组的图像数据采用不同的横向像移进行恢复, 相当于是对不同的视场所拍摄的图像的横向像移进行了变速匹配。每一组的像元数小于 2 倍的积分级数, 为每个方程组中系数 $a_k(i)$ 都不等于 0 的 $X(i)$ 的数量。通常级数是远小于整个视场的像元数的, 因此通过此方法, 可以解决俯仰成像问题, 在级数为 96 级下成像时, 其每一个分组中的像元数是可以设为小于等于 192 的, 实际分组应该根据横向像移误差要求确定, 通常远小于这个值。

3 横向像移图像恢复法仿真实验

在 MATLAB 环境下, 通过仿真实验对横向像移图像恢复法进行了验证, 进行算法精度的分析。首先根据横向像移图像生成原理, 模拟生成了某无横向像移的原始图像所对应的景物在不同横向像移时所拍摄的两幅图像, 然后通过对图像数据进行逐行移位的方法校正图像的形变, 最后根据组建完整方程组的方法, 得到了无横向像移的图像。仿真结果如图 7 所示。

通过对 8 级积分横向像移总共为 5 个像元和 4 个

像元的 10 位图像进行处理, 获得了横向像移恢复后的图像, 如图 7 所示, 可以看到图像的模糊得到修复。

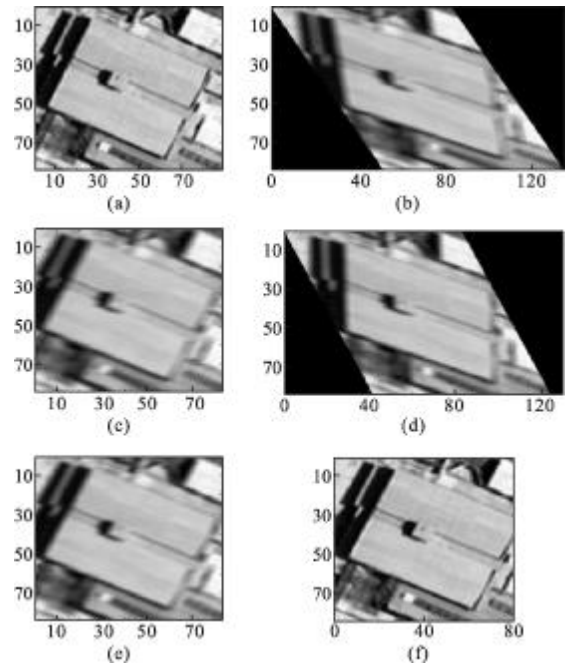


图 7 8 级成像采集位数 10 位的横向像移图像恢复结果

Fig.7 Result image recovery with traverse image motion when integral grade is 8 and collection digit is 10 bits

图 7 中图(a)是原始图像, 图(b)是 8 级积分横向像移总共为 5 个像元的图像, 图(c)是形变校正后横向像移总共为 5 个像元的图像, 图(d)是 8 级积分横向像移总共为 4 个像元的图像, 图(e)是形变校正后横向像移总共为 4 个像元的图像, 图(f)是横向像移恢复后的图像。

为了验证横向像移恢复法的精度, 对还原后的图像进行了误差统计, 即用还原图像的 RGB 值与原始图像进行对比, 并绘制直方图, 通过直方图研究横向像移恢复后的图像的误差分布情况。通过研究发现, 图像采集位数的不同, 横向像移恢复后的图像误差将发生较大变化。TDI CCD 器件输出信号为模拟信号, 通过 AD 的采集得到数字信号, 数字信号的有效采集位数主要取决于两方面, 一方面是 TDI CCD 器件的动态范围; 另一方面是图像采集电路的噪声, 图像数据采集位数通常要求小于等于数字信号的有效采集位数。目前航天上使用的 TDI CCD 通过 AD 采集后的数字信号的有效位数通常为 8-10 位, 因此对采集位数为 8-10 的图像进行了仿真, 并且进行了误差统计, 如图 8 和图 9 所示。

图 8 中图(a)是原始图像,图(b)是横向像移恢复后的 8 位采集图像,图(c)是横向像移恢复后的 9 位采集图像,图(d)是横向像移恢复后 10 位采集的图像。

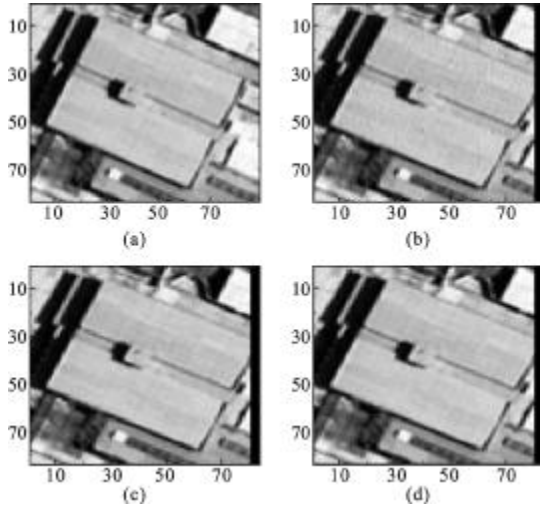


图 8 8 级成像采集位数 8-10 位的恢复后图像

Fig.8 Recovered image when integral grade is 8 and collection digit is from 8 to 10 bits

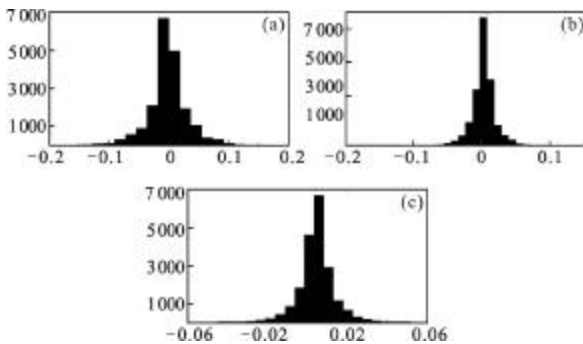


图 9 8 级成像采集位数为 8-10 位恢复后图像灰度值相对误差直方图

Fig.9 Histogram of gray value relative error of recovered image when integral grade is 8 and collection digit is from 8 to 10 bits

图 9 中提到相对误差,是用恢复后的图像减去与恢复图像采集图像位数相同的原始图像数据(原始图像是 8 位图像),再除以 2^n , n 是图像采集位数。图(a)是采集位数为 8 位的横向像移恢复后的灰度值相对误差直方图,图(b)是采集位数为 9 位的横向像移恢复后的灰度值相对误差直方图,图(c)是采集位数为 10 位的横向像移恢复后的灰度值相对误差直方图。

可以看到,采集位数越高,恢复后的图像与原始图像越接近。同时根据相对误差直方图可以看出相

对误差服从正态分布,且采集位数越高,恢复后图像误差值越小,通过统计,恢复后的 3 幅图像的相对误差(3σ)分别为 13.67%,7.03%以及 3.52%,对应 99.73% 图像传函^[10]下降不超过 27.34%,14.06%,7.04%,采集位数每增加一位,相对误差降低一倍。

在上面的仿真中采用 8 级积分,当级数增加时此方法依旧适用,其算法和 8 级时大同小异,16 级成像采集位数为 10 位的横向像移图像恢复仿真实验结果以及相对误差直方图如图 10 和图 11 所示。

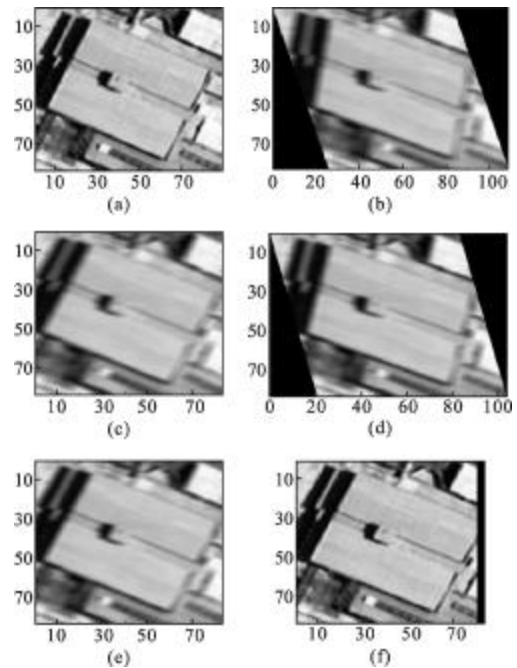


图 10 16 级成像采集位数 10 位的横向像移图像恢复结果

Fig.10 Result of image recovery with traverse image motion when integral grade is 16 and collection digit is 10 bits

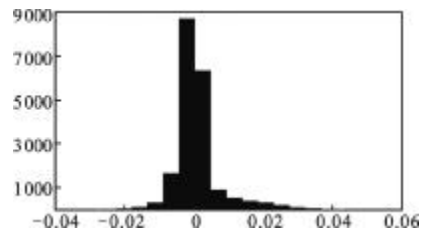


图 11 16 级成像采集位数为 10 位恢复后图像灰度值相对误差直方图

Fig.11 Histogram of gray value relative error of recovered image when integral grade is 16 and collection digit is 10 bits

图 10 中图(a)是原始图像,图(b)是 16 级积分横向像移总共为 5 个像元的图像,图(c)是形变校正后横向像移总共为 5 个像元的图像,图(d)是 16 级积分

横向像移总共为 4 个像元的图像,图(e)是形变校正后横向像移总共为 4 个像元的图像,图(f)是横向像移恢复后的图像。与 8 级成像相比,恢复后的图质量没有太大变化,经过误差统计,恢复后的图像的相对误差(3σ)分别为 3.48%,与 8 级成像时 10 位采集误差 3.52%接近。因此可以确定横向像移图像恢复方法的算法精度受成像级数影响很小,精度的提高需要依靠图像采集位数的提高。

4 结 论

通过光学几何投影法,建立了俯仰成像的瞬态成像模型,定性分析了飞行器俯仰姿态对高分辨率 TDI CCD 空间相机成像的影响。俯仰成像时,焦面上不同视场处横向像移速度不同,带来横向像移速度误差,当误差过大时,会造成图像模糊,因此需要对不同视场处像元的横向像移进行分别匹配。通过组建完成方程组的方法,对同一景点的有不同横向像移的两副图像进行处理,获得了无横向像移的图像,且横向像移图像采集位数越高,恢复后的图像灰度值误差越小。采用横向像移恢复的像移补偿方法,经过合理的分组,可以实现横向像移图像的异速匹配,将像移补偿误差控制在允许范围内。

该补偿方法目前只通过了仿真验证,还需要进一步搭建物理平台完成物理验证,同时还需考虑电子学和结构方面的在轨实现方法。希望该方法对研制空间相机的同行提供一些有用的信息,并且有更多的人加入到此方面的研究中。

参考文献:

- [1] WorldView -2 Collection Capacity. http://www.digitalglobe.com/constellation/wordview-2/Capacity_Datasheet.pdf.
- [2] Pleiades Program Overview [M]. Presentation of SPOT IMAGE Direct Receiving Station Meeting, 2006.
- [3] Wang Jiaqi, Jin Guang, Yan Changxiang. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracking and measuring device [J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(12): 105-116. (in Chinese)
- 王家骥, 金光, 颜昌翔. 机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J]. 光学 精密工程, 2005, 13(2): 105-116.
- [4] Li Weixiong, Yan Dejie, Xu Shuyan, et al. Modification of geocentric distance error of space camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(5): 225-232. (in Chinese)
- 李伟雄, 闫得杰, 徐抒岩, 等. 空间相机地心距误差修正[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(5): 225-232.
- [5] Yan Dejie, Xu Shuyan, Han Chengshan. Effect of aircraft attitude on image motion compensation of space[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(11): 2219-2203. (in Chinese)
- 闫得杰, 徐抒岩, 韩诚山. 飞行器姿态对空间相机像移补偿的影响[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(11): 2199-2203.
- [6] Wang Yueming, Wang Jianyu. Imaging motion model and compensation methods of spaceborne opto-mechanical scanner [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(4): 952-956. (in Chinese)
- 王跃明, 王建宇. 星载光机扫描仪像移模型及补偿方法 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 952-957.
- [7] Li Weixiong, Xu Shuyan, YAN Dejie. Influencing parameters of estimate errors of space camera's drift angle [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(8): 1530-1536. (in Chinese)
- 李伟雄, 徐抒岩, 闫得杰. 影响空间相机偏流角估值误差的参数[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(8): 1530-1536.
- [8] Wang Dejiang, Kuang Haipeng, Cai Xichang, et al. Digital implementation of forward motion compensation in TDI-CCD panoramic aerial camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(12): 2465-2472. (in Chinese)
- 王德江, 匡海鹏, 蔡希昌, 等. TDI CCD 全景航空相机前向像移补偿的数字实现方法 [J]. 光学 精密工程, 2008, 16(12): 2465-2472.
- [9] Miller B M, Rubinovich E Y. Image motion compensation at charge-coupled device photographing in delay-integration mode[J]. Automation and Remote Control, 2007, 68(3): 564-571.
- [10] Liu Chaoshan, Liu Guangbin, Yang Bo, et al. Star sensor image motion model and its simulation analysis [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(5): 1311-1315. (in Chinese)
- 刘朝山, 刘光斌, 杨波, 等. 弹载星敏感器像移模型及其仿真分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(5): 1311-1315.