

文章编号: 1007-4619 (2002) 03-0179-04

一种提高 CCD 成像卫星空间分辨率的方法研究

周春平, 田 越, 季统凯, 吴胜利, 张凤坡, 许 东, 时春雨, 姚勇航

(北京市遥感信息研究所, 北京 100011)

摘 要: 从卫星硬件设计与地面软件处理相结合的角度出发, 建立了一套提高卫星图像空间分辨率的方法。对模拟靶标图像、一航景物图像、遥感图像分别进行了不同分辨率成像效果的计算机模拟。结果表明, 所建立的卫星图像空间分辨率提高理论是正确的, 使卫星图像空间分辨率提高 2 倍甚至更多在理论上是可行的。这一研究成果的实际应用, 将会提高卫星的空间分辨率, 也可以在保持卫星分辨率的条件下, 缩小光学仪器的焦距, 使卫星相机小型化, 减小其体积和重量。

关键词: CCD; 卫星成像; 空间分辨率; 图像重建

中图分类号: TP702 **文献标识码:** A

1 引 言

卫星遥感具有覆盖面大、持续时间长、实用性强、不受国界地(水)域限制等独特优势, 广泛地应用于资源开发、环境监测、灾害研究、全球变化分析等领域, 深受各国的高度重视。卫星图像的空间分辨率是衡量卫星遥感能力的一项主要指标, 也是衡量一个国家航天遥感水平的重要标志。特别是近年来, 卫星图像的分辨率不断提高, 1m 分辨率的卫星图像已经商品化。

1984 年 Tsai 和 Huang 首先提出用多幅欠采样图像来提高图像的空间分辨率的设想^[1]。他们希望通过数学模型对同一地区, 不同时相的一组遥感图像进行数据融合处理, 从而得到一幅能提供更加详细信息的高分辨率遥感图像。他们采用的模型为图像无噪声、无退化和空间分辨率大小完全相同的图像采用模型, 并用频谱混叠方式给出了一个解混叠的方法。在此基础上, Kim 等人又研究了混入噪声和图像有模糊退化情形下的模型^[2,3], 并给出了加权迭代法和正则化迭代法两种解混叠的方法。国外一些提高遥感图像空间分辨率的工作取得了一定的成效^[4-6]。在应用方面, 据 1997 年 2 月的《SPACE NEWS》报道, 法国将把一种新的图像融合技术应用于 2002 年发射的“SPOT5”卫星, 这种技术是在地面

上将两幅 5m 分辨率、同时相的“SPOT5”卫星图像进行融合处理, 获得 2.5—3m 高分辨率图像。法国官员称, 法国航天主管部门国家航天研究中心已将此项技术在世界范围内申请了专利保护。

中国科学院遥感应用研究所郝鹏威做了卓有成效的工作^[7], 他从分辨率低的欠采样图像会导致相应频率域频谱混叠的理论出发, 给出了多次欠采样图像在频率域混叠的更一般公式, 并给出一种针对不同分辨率图像解频谱混叠的逐行迭代方法。同时进行了计算机仿真实验, 证明了他的方法在有噪声的情形下也有很好的收敛性。图像的配准、数据源的缺乏是影响其推广的瓶颈。中国科学院西安光学精密机械研究所的刘新平等人也进行了这方面的研究^[8,9], 对 4 幅相同空间分辨率的图像进行图像重建后, 新的空间分辨率是原 4 幅图的 1.8 倍左右。研究对象是面阵而非线阵 CCD。

我们进行的研究是应用两排或多排线阵 CCD, 星-地结合, 从根本上提高卫星图像的空间分辨率。

2 技术原理

星载光学成像系统有两种类型, 一种是线阵推扫式(PUSH-BROOM)扫描成像系统, 另一种是面阵成像系统, 在像平面上一般采用线阵或面阵的 CCD 电子耦合器件。对距离为 R 的空间平面上物体所形

收稿日期: 2000-12-28; 修订日期: 2001-05-08

作者简介: 周春平(1966—), 男, 副研究员。1992年毕业于北京大学遥感与地理信息系统研究所, 获硕士学位, 1993年入中国科学院地理研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 1996年获得博士学位。之后, 在北京大学遥感与地理信息系统研究所做博士后工作, 1998年出站到北京市遥感信息研究所工作。主要从事遥感、GIS及GPS车辆导航系统的理论和技术研究。发表论文50余篇。

成的一帧图像,在忽略光学系统非线性畸变和噪声干扰影响的条件下,其空间分辨率 ΔL 可以表示为:

$$\Delta L = \frac{W}{f}R$$

式中, W 为 CCD 器件阵元宽度, f 为光学系统的焦距。显然,空间分辨率 ΔL 与 CCD 器件阵元宽度及距离成正比,与相机焦距成反比。也就是说,在距离一定的条件下,要想提高 CCD 成像卫星图像的空间分辨率,最直接的方法就是增大光学系统的焦距或缩小 CCD 器件阵元宽度。焦距增大会使得光学零件的加工难度增大,费用增高,导致遥感器的体积大、重量重等一系列难题。CCD 器件方面,由于国外的技术封锁,目前我们可以得到用于卫星相机的 CCD 孔径仅为 $13\mu\text{m}$ (法国 SPOT5 为 $6.5\mu\text{m}$)。同时, CCD 孔径 W 太小,不但制造工艺困难,信噪比降低,而且图像信号的频带过宽,在空域一定的情况下数据量也过大,给图像传输造成一定困难。

那么,怎样在 CCD 器件阵元宽度 W 、相机焦距 f 和距离 R 一定的条件下提高空间分辨率? 这是我们研究的主题。这项技术就是超分辨率(super-reso-

lution)技术,利用棱镜分光的方法,把多个探测器特定布置在各焦平面位置,这样对静态和动态目标都可以同时得到多幅图像,经过图像重建,可以从多幅低分辨率图像得到一幅高分辨率图像。

两排 CCD 错位的方法相当于两台相同的相机对同一区域同时成像,即沿卫星飞行方向两台相机取景一致,垂直于卫星飞行方向上两台相机取景相差半个像元,如图 1。随着卫星向前飞行,CCD 成像系统推扫,获取两幅垂直飞行方向相差半个像元的图像数据。对于每一扫描行,如图 2。

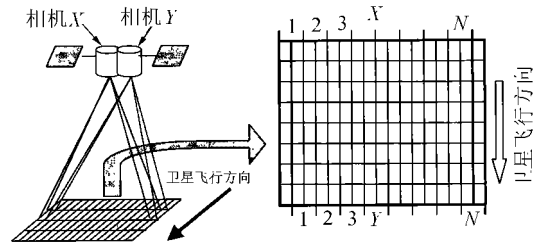


图 1 两排 CCD 模拟的相当于双相机成像示意图
Fig.1 Sketch map of double CCD arrays simulated double cameras

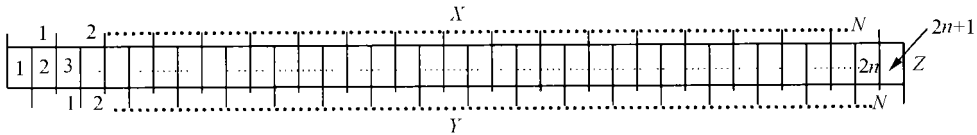


图 2 两排 CCD 成像每一扫描行示意图
Fig.2 Sketch map of every line

通过在成像面上按特定的错位方式排列两列或多列 CCD 阵列,得到两幅或多幅低分辨率图像,然后应用我们所创立的一种独特的数据图像重建方法——“参照系数学模型法”,得到一幅高分辨率的图像。该方法正在申请专利,具体内容在本文中不做详述。

3 实验

3.1 实验数据及实验过程

实验数据为靶标图像、日常生活图像、遥感图像。

实验过程如图 3,数字模拟实验的目的是检验“参照系数学模型法”的正确性。应用靶标图像、日常生活图像、遥感图像作为原始图像,模拟 CCD 阵列对原始图像进行降低空间分辨率扫描,得到两幅或多幅低分辨率图像。这些低分辨率图像序列的空间分辨率是一致的,但扫描的起始位置不同,在一个

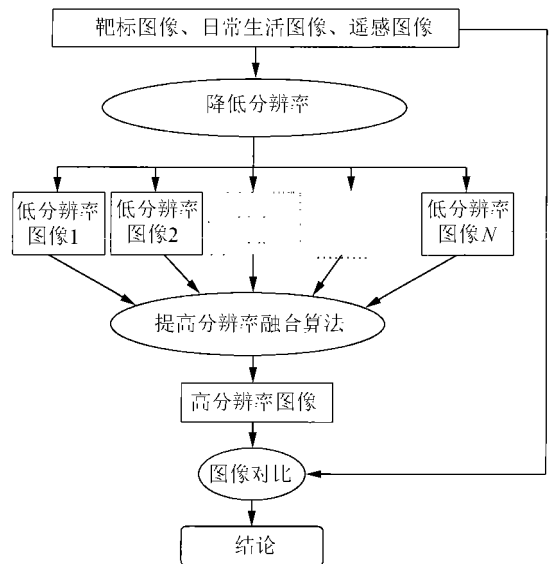


图 3 提高空间分辨率图像重建实验流程图

或两个方向相差半个或几分之一个像元。对这些低分辨率图像序列进行图像重建，得到一幅高分辨率的图像。将该图像与原始图像进行对比，若二者相差不大，就说明我们应用的图像重建方法是正确的，否则，说明我们应用的图像重建方法不适当。

3.2 图像重建结果

应用靶标图像、日常生活图像、遥感图像，我们以横向和双向两种方式分别对提高一倍、两倍图像空间分辨率的图像融合理论进行了数字模拟验证(图 4—图 7)。

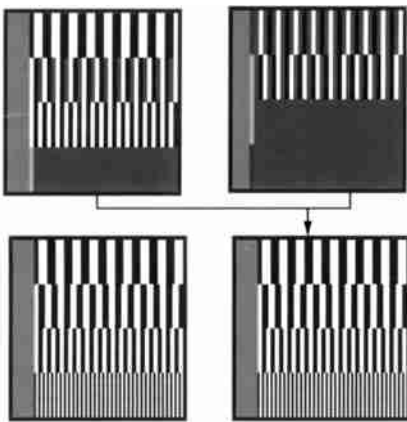


图 4 分辨率提高到原来的 2 倍

Fig.4 Spatial resolution improved double

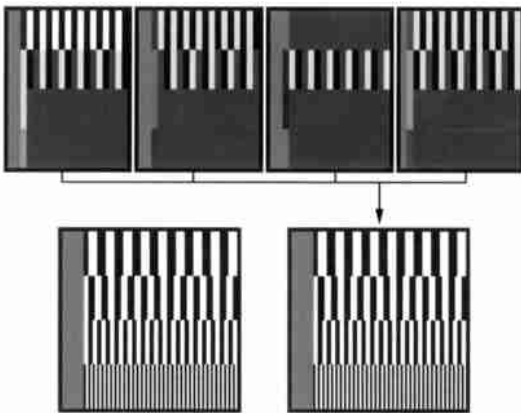


图 5 分辨率提高到原来的 4 倍

Fig.5 Spatial resolution improved quadruple

对原始图像和经图像重建的结果图进行比较，一种方法是直观的目视比较；另一种方法是对比图像对应像元的灰度值，计算参数 ϵ 。实验表明：我们所建立的提高图像空间分辨率的图像融合理论非常理想的。

$$\epsilon = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (P_r(m, n) - P_o(m, n))^2}{M \times N}$$

(C)1993-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

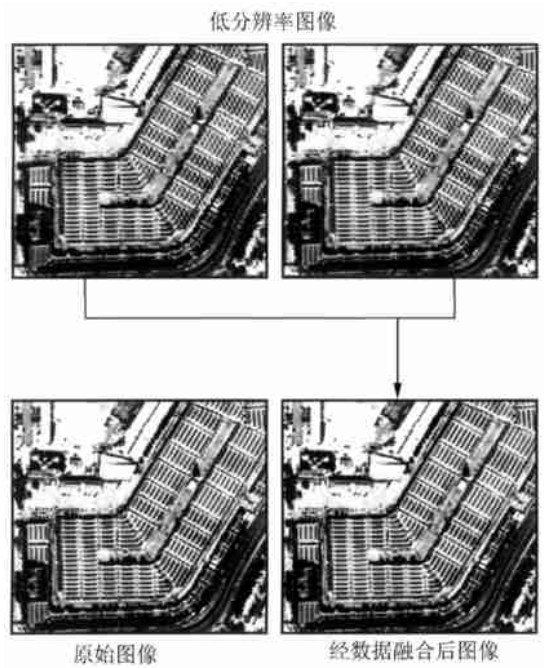


图 6 横向分辨率提高到原来的 2 倍

Fig.6 Horizontal resolution improved double

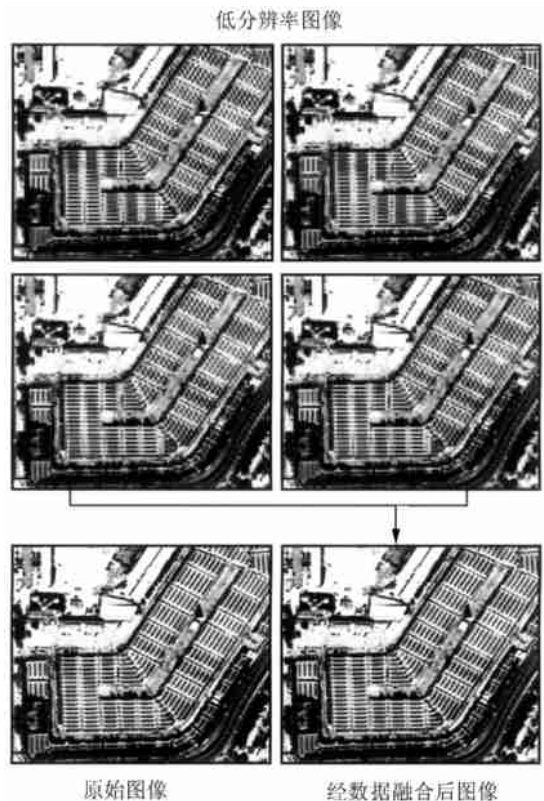


图 7 双向分辨率提高到原来的 2 倍

Fig.7 Resolution in both horizontal and vertical

direction improved double

式中， M, N 为图像的行列数， p 为像元的值， $p_{r(m, n)}$

为行为 m , 列为 n 处结果图的像元值, $p_{o(m,n)}$ 为行为 m , 列为 n 处原始图像的像元值。

4 结论与展望

在传输型 CCD 扫描卫星的星载相机上通过多排 CCD 的错位, 同时进行地面数据融合, 来提高图像空间分辨率的理论是可行的。这样的系统结构具有以下优点:

(1) 光学系统基本不变的前提下, 在 CCD 孔径受限制的条件下, 提高了卫星图像的空间分辨率; (2) 具有同时获得不同分辨率卫星图像的功能, 可以适应不同的应用需求; (3) 具有两套电路系统, 增加了系统获取图像的可靠性; (4) 有助于卫星实现体积小、重量轻、成本低的特点, 对空间光学遥感器和小卫星的相关工作将产生很大的推进作用。

要将这一理论应用于实际工程之中, 有以下的关键技术需要研究解决:

(1) 自动生成卫星遥感靶标算法; (2) 模拟不同空间分辨率图像的算法 (PSF、噪声的影响); (3) 提高卫星空间分辨率的数学模型 (多种及比较); (4) 点扩散函数 (PSF)、噪声对算法的影响及消除方法; (5) CCD 排列相对误差对算法的影响及消除方法; (6) CCD 排列不均匀对算法的影响及纠正方法; (7) 影响分辨率提高的各种因素及分辨率提高的极限。

参 考 文 献 (References)

[1] Tsai R Y, Huang T S. Multiframe Image Restoration and Registration

[M]. Advances in Computer Vision and Image Processing, JAI Press, 1984, Vol. 1.

[2] Kim S P, Bose N K, Valenzuela H M. Recursive Reconstruction of High Resolution Image from Noisy Unsampld Multiframe [J]. *IEEE Transactions on acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1990, **38** (6): 1013—1027.

[3] Kim S P, Su Wenyu. Recursive High-Resolution Reconstruction of Blurred Multiframe Images [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1993, **2** (4): 534—539.

[4] T Komatsu, K Aizawa, T Igarashi *et al*. Signal-processing based method for acquiring very high resolution images with multiple cameras and its theoretical analysis [J]. *IEE PROCESSING-1*, 1993, **140** (1): 19—25.

[5] Andrew J Patti M Ibrahim Sezan, A Murat Tekalp. High-resolution Image Reconstruction from a Low-resolution Image Sequence in the Presence of Time-varying Motion Blur [J]. 0—8186—6950—0/94. *IEEE*, 1994, 343—347.

[6] Russell C Hardie, Kenneth J Barnard, John G Bognar *et al*. High-resolution Image Reconstruction from a Sequence of Rotated and Translated Frames and its Application to an Infrared Imaging System [J]. *Optical Engineering*, 1998, **37** (1): 247—260.

[7] Hao Pengwei. Spatial Resolution Improvement of Digital Images [D]. Thesis of Doctor's Degree, Chinese Academy of Sciences, 1997. [郝鹏威. 数字图像空间分辨率改善的方法研究 [D]. 中国科学院遥感应用研究所博士学位论文, 1997.]

[8] Liu Xiping, Gao Zhan, Deng Nian Mao *et al*. The "Sub-pixel" Method and Experiment Using Plate CCD as Sensors [J]. *Chines Science Bulletin*, 1999, **44** (15): 1603—1605. [刘新平, 高瞻, 邓年茂等. 面阵 CCD 作探测器的“亚像元”成像方法及实验 [J], 科学通报, 1999, **44** (15): 1603—1605.]

[9] Liu Xiping, Gao Yingjun, Lu Zhao *et al*. Research on the Miniaturizing Techniques of Remote Sensor [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1999, **14**(3): 30—33. [刘新平, 高英俊, 鲁昭等. 遥感器小型化技术研究 [J]. 遥感技术与应用, 1999, **14**(3): 30—33.]

The Study of Method for Improving the Spatial Resolution of Satellite Images with CCD Cameras

ZHOU Chun-ping, TIAN Yue, Ji Tong-kai, WU Sheng-li, ZHANG Feng-po, XU Dong, SHI Chun-yu, YAO Yong-hang
(Beijing Remote Sensing Information Institute, Beijing 100011, China)

Abstract: By the integrating satellite hardware's design with ground software's processing, the article presents a new theoretical method for improving the spatial resolution of satellite image. Computer simulations under different resolution levels are carried out on simulated target images, common scenery images and Remote Sensing images separately. The success results of experimental simulations show clearly the method for improving resolution we present is valid in theory, which also proved the theoretic feasibility to enhance the spatial resolution of satellite images up to twice, even N times. Obviously, practical applications of the research will enhance the spatial resolution of satellite images. In addition, it can also help shorten optical instruments' focus, decrease satellite camera's size and mass while remaining the same spatial resolution of satellite images.

Key words: CCD; satellite images; spatial resolution; image reconstruction