

文章编号: 1007-4619(2007)02-0159-07

# 遥感影像邻近效应的实测数据校正 ( II )

温 奇<sup>1, 3</sup>, 马建文<sup>1</sup>, 陈 雪<sup>1, 2</sup>, 李利伟<sup>1, 3</sup>

(1. 遥感科学国家重点实验室, 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101;

2. 遥感科学国家重点实验室, 北京师范大学 地理学与遥感科学学院遥感与 GIS 研究中心, 北京 100875;

3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

**摘 要:** 本文在总结 2004 年工作的基础上, 以辐射传输理论为基础, 改进和增加了地面同步测量邻近效应模型设计和测量参数, 实现了航空和卫星数据获取过程的地面同步参数测量。在此基础上, 分别对航空 ADS40 和 Landsat-5 TM 数字影像进行了邻近效应校正实验, 特别对城区 ADS40 数字影像大气校正和邻近效应校正后的图像做了对比, 邻近效应校正的图像较只做大气校正的图像像元值反差更大, 细节得到更多增强, 图像质量得到一定程度提高。

**关键词:** ADS40 和 Landsat-5 TM 遥感影像; 邻近效应; 地表实测数据

中图分类号: TP751.1 文献标识码: A

## Correction with Ground Measurement Data for Adjacency Effect in Remote Sensing Images

WEN Qi<sup>1, 3</sup>, MA Jianwen<sup>1</sup>, CHEN Xue<sup>1, 2</sup>, LI Liwei<sup>1, 3</sup>

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China;

2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science Jointly Sponsored by Beijing Normal University and Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Sciences Beijing 100875, China;

3. Graduate School Chinese Academy of Sciences Beijing 100049, China)

**Abstract** This paper summarized the works in 2004, and on the base of radiation transfer theory improved and added the adjacent effect models with ground synchronization measurement and parameters obtained the ground measurement synchronized with the acquisition of airborne and spaceborne remote sensing data. Moreover we practised the experiments of adjacent effect correction respectively for ADS40 and Landsat-5 TM data especially compared the digital images with atmosphere correction and adjacent effect correction. The result is that the contrast of pixels DN of images considering adjacent effect was much larger than those without adjacent effect correction and the details were enhanced so that the qualities of remote sensing images were improved in a certain extent.

**Key words** digital image of ADS40 and Landsat-5 TM; adjacent effect; land-ground measurement data

## 1 前 言

电磁辐射在非均匀媒质中传输时会改变传输方向。在遥感系统中, 大气引起的散射使传感器接收到的信号偏离地表反射真实信号, 地面传感器瞬时

视场外的反射能量进入视场内部, 可以引起像元值的改变。这种由于传感器瞬时视场外的反射能量进入视场内部而引起像元值改变的现象被称为邻近效应 (Adjacent effect)<sup>[1, 2]</sup>。当前邻近效应校正方法的研究主要划分为两大类: (1) 基于辐射传输模型的经验公式; (2) 点扩展函数纠正公式 (Point Spread

收稿日期: 2005-12-18; 修订日期: 2006-04-15  
©1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 40371086)。

作者简介: 温 奇 (1983—), 男, 硕士。主要从事遥感图像处理相关算法的研究。

Function-PSF)。由于自然环境的复杂性和不确定性,辐射传输方程的积分-微分部分参数至今还没有严格的解析解;而采用不同的条件近似得到的不同经验公式中的某些项的物理意义往往又得不到合理的解释,或由于需要引入大量的大气状况参数和地面条件过于复杂,从而往往使应用产生相当多的困难<sup>[3,4]</sup>。PSF方法包括图像目标法、蒙特卡罗法或优化算法模拟以及几何光学计算、辐射传输模型模拟等,这些方法存在结果依赖于具体图像信息、随机误差大、或计算次数过多、对大气状况参数要求高等缺陷<sup>[5-8]</sup>。此外,上述这些方法存在一个共同的问题:算法模型均缺乏同步地面实测数据的支持。

项目组综合分析前人研究成果,以辐射传输模型为基础理论,开展了邻近效应的研究。在 2004 年工作的基础上<sup>[9,10]</sup>,本文改进和增加了地面同步测量邻近效应模型设计和测量参数,实现了航空和卫星数据获取过程的地面同步参数测量,分别对航空 ADS40 和 Landsat-5 TM 数字影像开展了邻近效应校正实验,特别对城区 ADS40 数字影像大气校正和邻近效应校正后的图像作了对比,取得了较好的效果。

## 2 同步实验参数的产生过程

为了更好地体现邻近效应校正对提高航空和卫星图像质量的作用,项目组分别获取了 2005 年 5 月 11 日北京北部奥运预留场地航空(ADS40 传感器) 0.3m 分辨率图像数据和 2005 年 7 月 25 日北京地区 Landsat-5(TM) 30m 分辨率图像数据,并布置了同步实地测量试验,对实测数据进行了邻近效应分析。

### 2.1 航空同步数据获取与地面测量

航空遥感平台是中国科学院遥感应用研究所航空遥感中心“奖状”遥感飞机,有效载荷为莱卡公司生产的 ADS40 线阵 CCD 相机。该相机同时获取 3 个全色波段(前、中、后视立体成像),光谱范围 465-680nm 和 4 个多光谱波段,蓝波段(430-490nm)、绿波段(535-585nm)、红波段(610-660nm)、近红外波段(835-885nm)的数据。地面分辨率根据航高可以达到 0.15m, 0.20m, 0.30m, 0.50m。研究中飞机航高为 2980m,使用的航空遥感数据地面分辨率为 0.3m 的蓝、绿、红波段的数据。

图像获取日期为 2005 年 5 月 11 日,覆盖区域

为北京北部奥运场馆周围地域。在航飞当天,进行了同步地面实验,实验选择在奥运场馆区的均匀沙地进行,测量了一个 3×3 共 9 个点的均匀分布阵列,样点间行列间距为 5m,测量点大致经纬度为(N40°0'10.9", E116°22'52.8"), 9 个点对应图像数据上的行列号分别是(12615, 11800), (12625, 11800), (12635, 11800), (12615, 11810), (12625, 11810), (12635, 11810), (12615, 11820), (12625, 11820), (12635, 11820)。

### 2.2 卫星同步数据获取与地面测量

项目组选用了一景 2005 年 7 月 25 日北京地区的 Landsat-5 TM 卫星影像进行校正实验,并于当天在卫星影像所包含区域的中心区域(河北省怀来县官厅水库南侧天漠遥感实验场)进行了地物光谱实地测量。TM 影像中心经纬度为(N40°21'08", E115°53'17");地物光谱实测选取了表面均一的沙地,测量了一个 3×3 的对应遥感图像相邻像元的阵列,测量点经纬度和对应图像数据行列号见表 1。

表 1 9 个测量点和对应 TM 图像行列号

Table 1 Longitude and latitude of 9 measurement points and corresponding line and sample number

编号	纬度	经度	行列号
1	N40°17'25.8"	E115°41'17.0"	(672, 1524)
2	N40°17'25.8"	E115°41'18.3"	(673, 1524)
3	N40°17'25.6"	E115°41'19.5"	(674, 1524)
4	N40°17'26.8"	E115°41'17.0"	(672, 1525)
5	N40°17'26.7"	E115°41'18.2"	(673, 1525)
6	N40°17'26.8"	E115°41'19.6"	(674, 1525)
7	N40°17'27.9"	E115°41'16.9"	(672, 1526)
8	N40°17'27.8"	E115°41'18.2"	(673, 1526)
9	N40°17'27.8"	E115°41'19.7"	(674, 1526)

## 3 校正模型与实验参数选择

ADS40 和 Landsat-5 TM 影像数据都是受邻近效应影响的数据,通过邻近效应测量地面反射率数据可以近似看作真实的地表数据,如果能够在有限的地表实测数据和对应点的图像数据之间建立联系,找到某种使图像质量得到最大提高的最优化规律,那么就可以将这种规律应用到整幅图像上,从而统

计邻近效应的影响,进而排除其干扰。

### 3.1 卫星观测数据反演的地面反射率

首先,从获取的遥感影像数据反演出地面反射率。卫星遥感影像像元的 DN 值经辐射校正转化为到达传感器的辐射亮度值  $L$ (单位  $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$ ):

$$L(k) = c_0(k) + c_1(k)DN(k) \quad (1)$$

式中,  $k$ 代表波段号;  $c_0, c_1$ 是校正系数(分别是偏移量和增益值),可在所获取影像数据的头文件中查到。

在平坦的朗伯体地表和水平均匀大气条件下,大气顶部反射率  $\rho^*$  [3]:

$$\rho^* = \frac{\pi Ld^2}{E_s \cos\theta_s} \quad (2)$$

式中,  $E_s$ 是大气顶部的平均太阳辐射照度,  $\theta_s$ 为太阳天顶角,  $d$ 是日地距离(天文单位):

$$d = \frac{1}{1 - 0.01674 \cos[0.9856(JD - 4)]} \quad (3)$$

JD为卫星过境日期的儒略日。  $d$ 在一年内会产生 3.5% 的差异。

大气顶部反射率  $\rho^*$  与地面反射率  $\rho_1$ 关系 [11] 如下:

$$\rho^* = \rho_a + \frac{\rho_1}{1 - \rho_1 S} T(\theta_s) T(\theta_v) \quad (4)$$

式中,  $\rho_a$ 为大气固有反射率,  $S$ 为大气球面反照率,  $T(\theta_s)$ 和  $T(\theta_v)$ 分别为入射方向和观测方向的大气透过率。

公式(4)可以转化为:

$$\rho_1 = \frac{\rho^* - \rho_a}{T(\theta_s) T(\theta_v) + (\rho^* - \rho_a) S} \quad (5)$$

将由 6S 计算得出的参数  $\rho_a, S, T(\theta_s) T(\theta_v)$ 代入公式(5)就可以得到由图像反演的地面反射率值  $\rho_1$ 。

同时,大气顶部反射率  $\rho^*$  还可表示为由大气固有反射率  $\rho_a$ 、目标像元反射率  $\rho_1$ 和背景反射率  $\rho_b$ 三部分组成 [12]:

$$\rho^* = \rho_a + T(\theta_s) T(\theta_v) \left[ \rho_1 \iint_{\text{target}} \text{PSF}(x, y) dx dy + \rho_b \iint_{\text{background}} \text{PSF}(x, y) dx dy \right] \quad (6)$$

式中,  $T(\theta_s)$ 和  $T(\theta_v)$ 分别为入射方向和观测方向的大气透过率,  $\text{PSF}$ 为大气点扩散函数。

背景反射率  $\rho_b$ 计算如下:

$$\rho_b(x, y) = \frac{\sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n \rho_1(i, j) \exp(-r)}{\sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n \exp(-r)} \quad (7)$$

式中,  $r$ 为参考像元和中心像元之间的实际距离:

$$r = \sqrt{i^2 + j^2} \times a \quad (8)$$

$a$ 为数字影像空间分辨率,单位:  $m$ 。

在整个区域上,  $\iint_{\Omega} \text{PSF}(x, y) dx dy = 1$ , 记

$$\iint_{\text{target}} \text{PSF}(x, y) dx dy = \alpha \quad (0 < \alpha < 1), \quad \text{则}$$

$$\iint_{\text{background}} \text{PSF}(x, y) dx dy = 1 - \alpha, \quad \text{于是}$$

$$\rho^* = \rho_a + T(\theta_v) (\rho_1 \alpha + \rho_b (1 - \alpha)) \quad (9)$$

$\alpha$ 称为目标像元实际地表反射率  $\rho_1$ 对反演得到的地表反射率  $\rho_1$ 的贡献率,它反映了邻近效应的强度。

将公式(9)右端去除大气固有反射率和衰减作用后,得到地面反射率  $\rho_1$ :

$$\rho_1 = \rho_1 \alpha + \rho_b (1 - \alpha) \quad (10)$$

经反演得出的去除邻近效应的地面反射率  $\rho_{mg}$ 为:

$$\rho_{mg} = \rho_1 = \frac{\rho_1 - \rho_b (1 - \alpha)}{\alpha} \quad (11)$$

根据(1)-(11)式,如果通过某种方法能够确定合适的像元贡献率值  $\alpha$ ,就可以通过应用(11)式对整幅图像进行校正,从而得到最大程度去除邻近效应影响的遥感数字影像。

### 3.2 利用逆向最小二乘法确定目标像元贡献率

为了分析邻近效应校正的效果,以实测地表反射率  $\rho_{\text{measure}}$ 为横坐标,图像数据经反演得到的反射率  $\rho_{\text{mg}}$ 为纵坐标,将 9 个实测点在直角坐标系中表示出来。在理想状况下,如果没有邻近效应的存在,图像反演反射率  $\rho_{\text{mg}}$ 和实测反射率  $\rho_{\text{measure}}$ 在直角坐标系中应该严格分布在直线  $y=x$  上面;但由于一些不确定因素的存在,点的实际分布形态是散布在  $y=x$  周围。如果能够取到合适的  $\alpha$ 使  $\rho_{\text{mg}}$ 能够最大可能地靠近  $\rho_{\text{measure}}$ ,也就是说使直角坐标系上的 9 个点能够最大可能地靠近直线  $y=x$  那么就可以将该  $\alpha$ 值应用到整幅图像上,用(11)式进行图像校正,从而得到最大程度上接近地表真实反射率值的图像数据。

在此通过逆向使用“最小二乘法”的思想来确定使校正结果最优的  $\alpha$ 值。“最小二乘法”假定实

验测得了  $n$  对变量数据  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ , 则在 XOY 平面上, 可以得到  $n$  个点  $P_i(x_i, y_i)$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ), 这些点大致分布在直线  $y=ax+b$  附近,  $a$  和  $b$  待定。通过解偏微分方程, 得到使总偏差  $F(a, b) = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2$  最小的  $a$  和  $b$  的值即为所求。

逆向使用最小二乘法的理论, 直线  $y=x$  是确定的, 而点的位置却随  $\alpha$  值的变化而变化。代入不同的  $\alpha$  值 (范围从 0.01-0.99, 步长为 0.01) 进行试验, 能够使总偏差 (12) 式最小的

$$F(\alpha) = \sum_{i=1}^9 \epsilon^2 = \sum_{i=1}^9 (\rho_{\text{measure}_i} - \rho_{\text{img}_i})^2 = \sum_{i=1}^9 \left( \rho_{\text{measure}_i} - \frac{\rho_{1_i} - \rho_{b_i}(1-\alpha)}{\alpha} \right)^2 \quad (12)$$

值即为最优贡献率值理论值。研究中对不同代入数据进行了实验, 将最小总偏差的贡献率值  $\alpha$  和中值总偏差的贡献率值  $\alpha$ , 分别代入 (11) 式中, 计算结果表明, 代入中值误差贡献率值能够适应不同波段, 更具有适应性, 整个计算流程如图 1 所示。

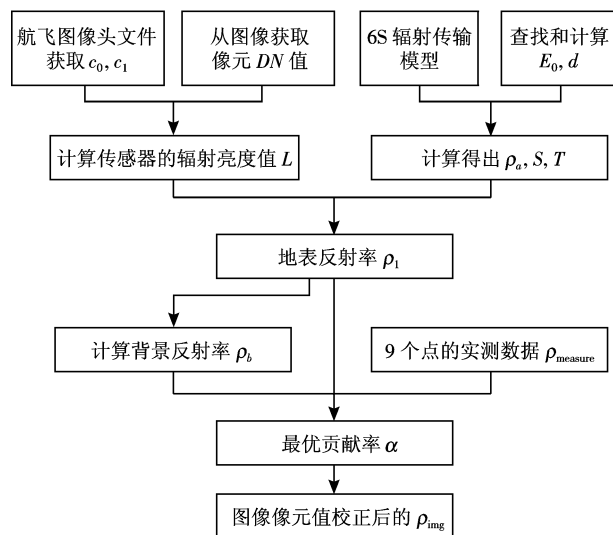


图 1 邻近效应校正算法流程图

Fig 1 The flow chat of Adjacency Effect correction Arithmetic

在实际实验中, 高分辨率航空遥感 ADS40 的邻近效应校正代入均值总偏差的贡献率值  $\alpha$  效果比较好, 分别为 (band1-0.19, band2-0.2 and band3-0.2)。卫星遥感 Landsat-5 TM 邻近效应校正代入最小值总偏差的贡献率值  $\alpha$  效果比较好, 分别为 (band1-0.35, band2-0.91, band3-0.98)。因此, 在操作过程中选择效果好的波段贡献率值  $\alpha$  需要进行必要的验证。

## 4 ADS40和 Landsat-5 TM 影像邻近效应校正

按照建立的邻近效应校正算法流程, 项目组分别对获取的 ADS40 和 Landsat-5 TM 影像进行邻近效应的校正。

### 4.1 ADS40 与 Landsat-5 TM 邻近效应校正参数选择

航空遥感 ADS40 的蓝波段 (430-490nm)、绿波段 (535-585nm)、红波段 (610-660nm) 三个波段,  $C_0$  和  $C_1$  取 1 和 0。太阳天顶角  $\theta_s = 35.8134^\circ$ , 航飞日期的儒略日为  $JD = 131$ , ADS40 蓝、绿、红三波段大气顶部的平均太阳辐射照度  $E_s$  分别为 1636.7, 1857.8 和 1911.7。利用 6S 软件计算出参数  $S, T(\theta_s), T(\theta_v), \rho_a$  并反演出  $\rho_1$ 。ADS40 分辨率 0.3m, 为了消除更大范围内的邻近像元的影响, 在 (7) 式计算  $\rho_b$  的过程中, 选择了不同半径  $n$  卷积算子实验, 实验结果表明,  $n=50$  的  $(2n+1) \times (2n+1)$  的卷积算子, 在 15m 范围内计算量适中且效果也比较好。

从 Landsat-5 TM 图像的头文件中, 获取  $C_0$  和  $C_1$  参数用于 (1) 式计算, 同时得到成像时的太阳高度角为  $61^\circ$ , 则太阳天顶角  $\theta_s = 90^\circ - 61^\circ = 29^\circ$ 。Landsat-5 TM (1, 2, 3, 4, 5, 7) 六个波段大气顶部的平均太阳辐射照度  $E_s$  分别为 1957.0, 1829.0, 1557.0, 1047.0, 219.3 和 74.5, 卫星过境日期的儒略日为  $JD = 206$ , 分别用于 (2) 和 (3) 式的计算。通过代入 TM 不同波段 (wave: 25-30) 和不同反射率值 ( $r$ : 0, 0.2, 0.4) 共 18 组数据联立解方程组, 可以解出 6 个波段不同的  $S, T(\theta_s), T(\theta_v), \rho_a$  值。将计算得出的参数应用于 (5) 式可以反演出  $\rho_1$ 。邻近像元的反射率对中心像元的贡献, 随二者之间的距离增大呈指数型迅速减小; 到达一定程度后, 半径  $n$  的继续增大并不会引起  $\rho_b$  的显著改变, 反而增加了处理时间。因此, 在 (7) 式计算  $\rho_b$  的过程中, 选择了不同半径  $n$  卷积算子实验, 实验结果:  $n=30$  的  $(2n+1) \times (2n+1)$  的卷积算子, 在 1km 范围内计算量适中且效果也比较好。

### 4.2 ADS40 影像校正前后的对比

对比 ADS40 没有经过邻近效应校正的影像 (图 2(a)) 和进行过邻近效应校正的影像 (图 2(b)), 经过校正的图像得到明显的增强, 其中道路中的斑马线比未校正图像更加清晰。通过目视解译可以更好

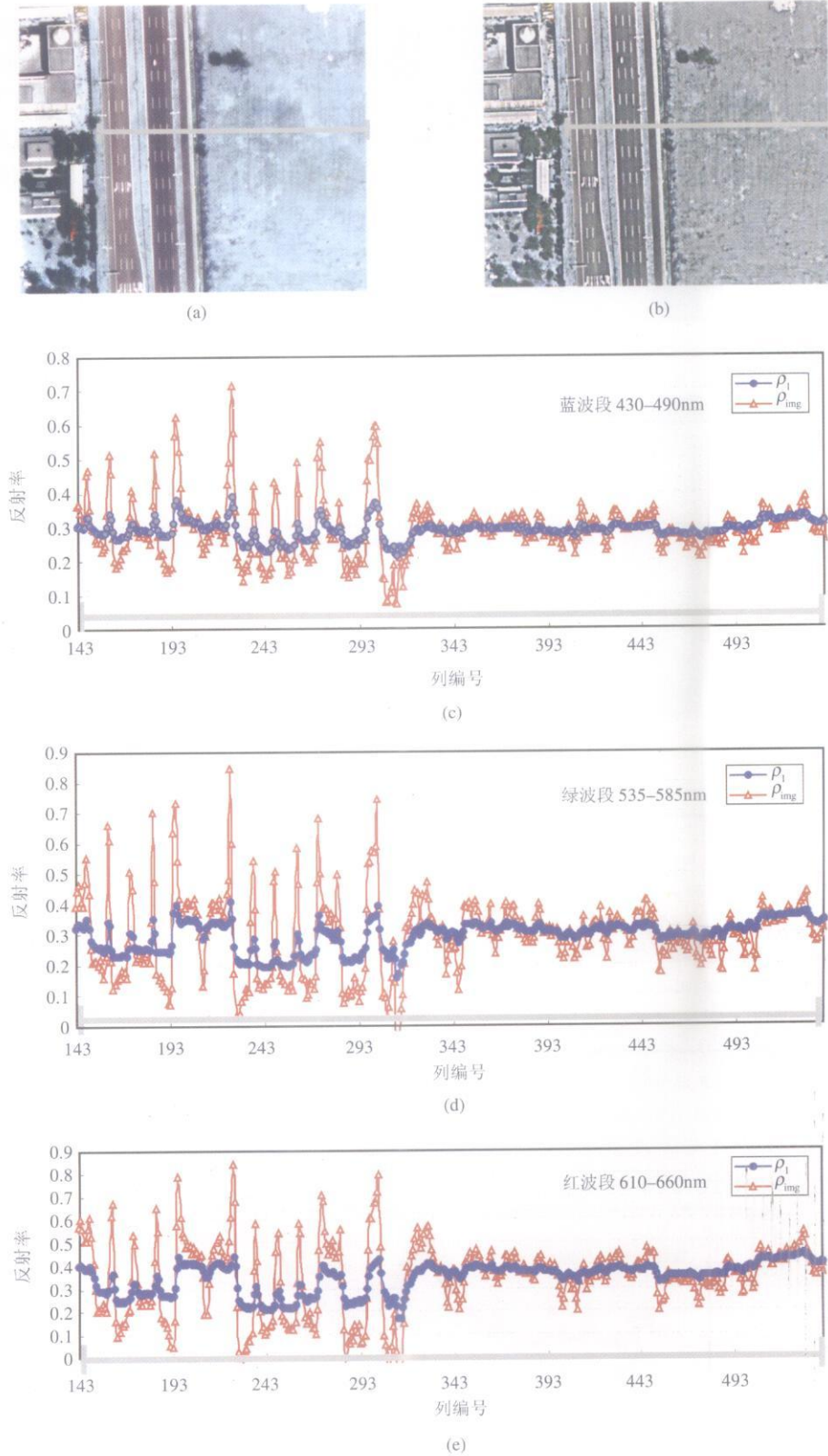


图 2 ADS40 红、绿、蓝波段

(a) 大气校正结果合成影像  $\rho_1$ ; (b) 大气校正 + 邻近效应校正结果合成影像  $\rho_{img}$ ;

(c) 1994-2020 (CN) 是两种处理结果影像的剖面反射率值对比, 经过邻近效应校正的影像变化明显增大。 http://www.cnki.net

Fig 2 ADS40 red green blue bands

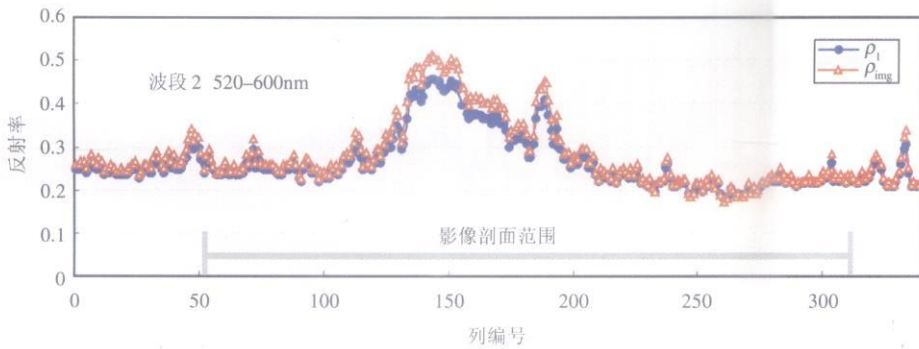
(a) atmosphere corrected image  $\rho_1$ ; (b) atmosphere + adjacent corrected image  $\rho_{img}$ ; (c), (d), (e) comparison of two images reflectance profile



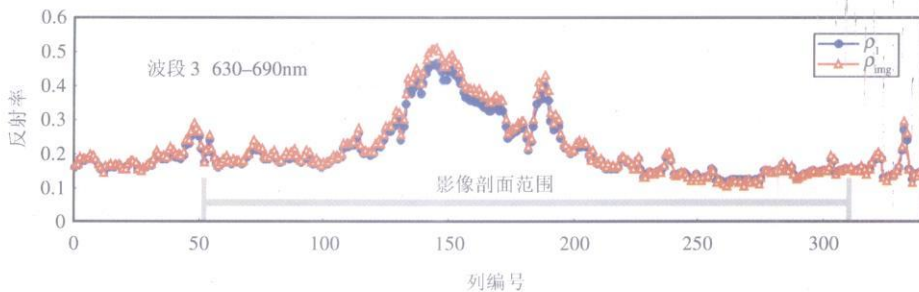
(a)



(b)



(c)



(d)

图 3 反射率剖面图为 TM 波段 2, 3 的反射率影像和邻近效应校正影像剖面图。  
 TM 影像 a b 是波段 3, 2, 1 的地表反射率合成影像 a 和邻近效应校正影像 b

Fig 3 a b Profiles reflectance image and adjacent effect corrected image of band 3, 2, 1 composite

地分辨道路和斑马线。图像左边的建筑区,房屋建筑轮廓更加清晰。为了更好地从数值上体现校正效果,截取图像中部区域剖面数据进行对比。

ADS40 蓝波段的光谱覆盖范围是 430—490 nm,根据测量校正后影像与大气校正后的反射率影像比较,在经过大气校正的反射率影像高值区和低值区都有增强的效果,见图 2(c)。

ADS40 绿波段的光谱覆盖范围是 535—585 nm,经过排除邻近效应影响,结果影像的反射率得到普遍增加,见图 2(d)。

ADS40 红波段的光谱覆盖范围是 610—660 nm,经过排除邻近效应影响,结果影像的反射率得到普遍增加,见图 2(e)。

### 4.3 TM 影像校正前后的对比

Landsat-5 TM 波段 1 的光谱覆盖范围是 450—520 nm,根据测量校正后影像与反射率影像比较,将最小总偏差的贡献率值  $\alpha$  代入式(11),计算邻近效应,结果图像除了在高值区体现出一些校正效果外,其余部分没有体现出更好的校正效果(这个现象可能是由于蓝波段受更多大气散射光影响的缘故)。

Landsat-5 TM 波段 2 的光谱覆盖范围是 520—600 nm,将最小总偏差的贡献率值  $\alpha$  代入式(11),经过排除邻近效应影响,结果影像的反射率得到普遍增加,见图 3(c)。

Landsat-5 TM 波段 3 的光谱覆盖范围是 630—690 nm,将最小总偏差的贡献率值  $\alpha$  代入式(11),计算邻近效应,经过排除邻近效应影响,结果影像的反射率得到普遍增加,见图 3(d)。

## 5 结论与讨论

由于存在交叉辐射,邻近效应在一定程度上会影响数字影像质量,而现有的许多邻近效应校正方法存在各种各样的问题,或由于基于物理模型使公式过于复杂而难以得到解析解,失去了严谨的优势;或由于随机误差大、计算次数过多、对大气状况参数要求高等缺陷而缺乏实用价值。本文以辐射传输模型为基础结合地表实测数据,通过逆向应用“最小

二乘法”思想,用统计的方法建立了一种邻近效应校正模型。应用本方法对航空和航天数字影像进行实验,校正后图像像元值反差变大,细节增强,图像质量得到有效的提高。

为了完善邻近效应模型的适用性,在今后的研究中应当开展对地表不同高度平台的邻近效应测量。

### 参考文献(References)

- [1] Kaufman Y J. The Atmospheric Effect on Remote Sensing and its Correction[M]. Theory and Applications of Optical Remote Sensing 1989.
- [2] Takashina T, Masuda K. Operational Procedure of Atmospheric Correction on Satellite Visible Data Allowing for the Adjacency Effect[A]. Proc SPIE[C], 1996, 2817: 70—81.
- [3] Vermote E F, Tanre D, Deuze J L, et al. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum: An Overview[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(3): 675—686.
- [4] Liang S L, Fang H L, Chen M Z. Atmospheric Correction of Landsat ETM+ Land Surface Imagery-Part I: Methods[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(11): 2490—2498.
- [5] Ruiz C P, Lopez F J A. Restoring SPOT Images Using PSF-derived Deconvolution Filters[J]. Int J Remote Sensing, 2002, 23(12): 2379—2391.
- [6] Reinersman P N, Candler K L. Monte Carlo Simulation of the Atmospheric Point-spread Function with an Application to Correction for the Adjacency Effect[J]. Applied Optics, 1995, 34(21): 4453—4471.
- [7] Borel C C, Gerstl S A W. Adjacency-Blurring Effect of Scenes Modeled by the Radiosity Method[A]. Proc SPIE '92[C]. Orlando, FL, pp. 620—624 and LAUR-92-985, 1992.
- [8] Lu D R, Duan M Z. Atmospheric Correction and Aerosol Remote Sensing Based on Radiative Transfer Model Computation[A]. Proc ACRS[C], 1999.
- [9] Ma J W, Li X W, Chen X, et al. Target Adjacency Effect Estimation Using Ground Spectrum Measurement and Landsat-5 Satellite Data[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(3): 729—735.
- [10] 冯春,马建文,陈建平. 卫星影像“邻近效应”PSF校正方法[J]. 量子电子学报, 2005, 22(4): 657—662.
- [11] 徐希孺编著. 遥感物理[M]. 北京大学出版社, 2005.
- [12] Richter R. On the In-flight Absolute Calibration of High Spatial Resolution Spaceborne Sensors Using Small Ground Targets[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(13): 2827—2833.