

文章编号: 1007 4619(2007)01 0001-08

# 遥感邻近效应测量与数据分析

陈 雪<sup>1</sup>, 马建文<sup>1</sup>, 温 奇<sup>1,2</sup>, 李利伟<sup>1,2</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 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

**摘 要:** 2004 年和 2005 年开展了遥感邻近效应的理论研究, 2 次卫星、1 次航空遥感同步试验测量和测量数据分析, 在获取了邻近参数的基础上实现了对图像的邻近效应校正。本文介绍了 2005 年 7 月 25 日在官厅遥感实验场沙漠的卫星同步测量实验结果和 2005 年 5 月 11 日奥运场馆建设预留裸土地的 ADS40 航空遥感同步实验测量数据分析。改进测量方案和测量装置, 并且对测量结果进行了对比分析。在两个相邻像元邻近效应分析的基础上, 增加了 9 个点邻近像元效应分析和建立计算公式; 在满足高斯条件和影像平坦性要求的前提下, 直线高斯相邻点 ( $d=2R$ ) 条件下亮度分布交叉点在 ( $d=R$ ), 像元分辨率相互影响约为 12.5%, 实际测量中亮度分布交叉点和相互影响偏向于亮度值相对低的像元。

**关键词:** 邻近效应; 同步测量实验; 点扩散函数模型

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A

## Adjacency Effect Measurement and Data Analysis

CHEN Xue<sup>1</sup>, MA Jianwen<sup>1</sup>, WEN Qi<sup>1,2</sup>, LI Liwei<sup>1,2</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. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Supported by NSFC, we have carried out the research on adjacency effect since 2004 and conducted 2 satellite and 1 aerial synchronous experiments. The experiments on May 11st and July 25th, 2005 and the results analysis were introduced in this paper. With improved measurement design and measurement device, data are analyzed by comparing the spectral curves from ground measurement, flat platform measurement and framed platform measurement. The results show that the improved measurement can prevent more scatter lights to come in the adjacent measurement system. Two adjacent effect analysis results show that if the two pixels have the same brightness there are mutual adjacent influence source and the influence strength is around 12.5%, if the two pixels do not have the same brightness, the influence strength toward weaker pixel in other word the less brighter pixels get more adjacent effect.

**Key words** adjacency effect; synchronous experiments; PSF model

## 1 引 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, 大气引起的散射改变了传感器接收到的信号强度, 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以

收稿日期: 2005-12-13 修订日期: 2006-02-23

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 40371086)

作者简介: 陈 雪 (1977—), 女, 2006 年毕业于北京师范大学地理学与遥感科学学院, 获理学博士学位。现在中国科学院遥感应用研究所从事遥感数据模型研究, 已发表论文 8 篇。

及视场内向视场外传递的反射能量,引起像元值改变的现象被称为邻近效应(Adjacency Effect)<sup>[1,2]</sup>。对于 1km 及以上较低空间分辨率的传感器,邻近效应是微弱的,可以被忽略;如果传感器的空间分辨率高于 500m 时,邻近效应的影响比较显著,应当考虑邻近效应的存在和作用<sup>[3]</sup>。随着卫星高分辨率遥感数据的普及应用和对遥感分析结果定量化程度要求的不断提高,遥感邻近效应的研究以及探索克服邻近效应的方法已经成为当前国际遥感界研究的热点内容<sup>[4]</sup>。

当前,邻近效应的研究内容可以划分为两大类:(1)基于辐射传输模型的经验公式<sup>[5-10]</sup>;(2)点扩散函数(Point Spread Function, PSF)方法<sup>[11-14]</sup>。对于辐射传输的积分-微分方程参数,采用不同的条件近似解法,对邻近效应得到了不同的经验公式,但公式中某些项的物理意义往往不易得到合理的解释,或需要引入大量的大气状况参数,使得应用时相当困难。本研究以二维高斯型点扩散函数模型为基础,设计了地面测量和同步实验获取邻近效应参数<sup>[15]</sup>;借鉴了影像平坦性原理<sup>[16]</sup>,对所测量的参数进行多种分析,展示邻近效应对影像的影响统计规律。本文介绍了我们 2005 年 7 月 25 日在官厅沙漠遥感实验场进行 Landsat 5 卫星遥感同步测量数据与分析结果和 2005 年 5 月 11 日在奥运场馆建设预留地进行的航空 ADS40 遥感同步实验测量数据与分析结果。

## 2 遥感邻近效应测量设计与野外测量

测量设计是根据辐射传输原理设计的测量邻近

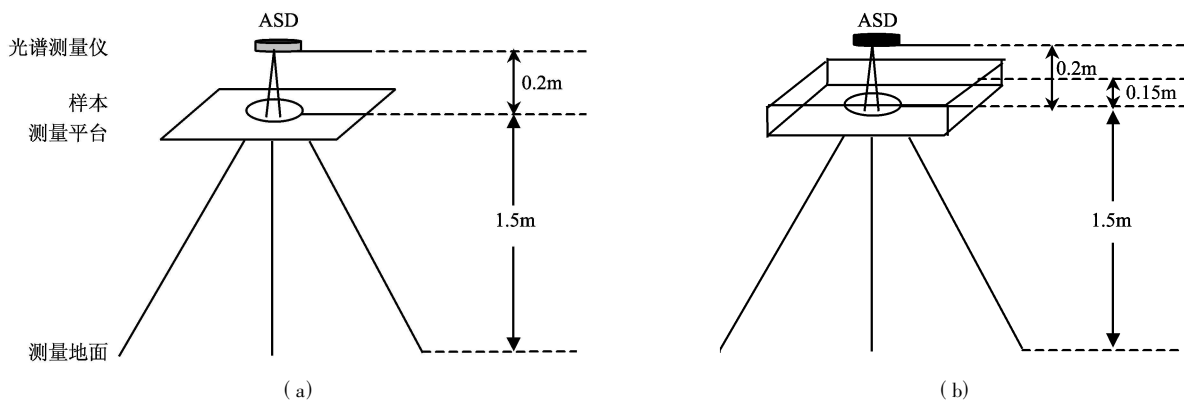


图 1 光谱阻断测量法平台

(a) 改进的 RSPS 和 NASA 平台; (b) 改进的边框平台

Fig 1 Measure platform

(a) improved RSPS and NASA platform; (b) framed platform

效应方案,本研究采用的是 RSPS 和 NASA 的测量设计原理<sup>[17]</sup>;野外测量是获得地物邻近效应的基本技术手段,是通过实验建立邻近效应校正模型的基础步骤,本研究根据实际测量经验和分析对 RSPS 和 NASA 的测量方案和平台作了改进<sup>[4,15]</sup>,改进后对于测量获取沙地的邻近效应值,减少其他散射光的干扰发挥了作用。

### 2.1 测量设计的改进与测量分析

研究中我们对 RSPS 和 NASA 的测量方法进行改进。改进内容包括:测量平台由金属改为粗糙表面木质,平台加长加宽为 50cm×50cm 涂黑,增加了 15cm 高的边框,ASD 光谱探头视场按 5°设计,到目标高度为 0.2m。经过计算,设计数据为:观测目标的直径为 2cm 左右,边框可以阻挡 8.5m 以外的侧面散射光,平台中目标放置地物的直径为 15-20cm,外径 30cm 左右为黑色粗糙木质表面和黑色粗糙木质表面边框。地面测量时 ASD 光谱探头视场按 5°设计,到目标高度为 0.2m。这样,本研究采用了 3 种测量方式:改进的 RSPS 和 NASA 测量平台(图 1(a));边框测量平台(图 1(b))和地面测量方式。地面测量直接测量沙地光谱,测量高度约为 1.50m。测量仪器选用美国 ASD FieldSpec® Specroradiometer 全波段野外光谱仪进行光谱数据测量。波段范围为 350-2500nm;具有 512 个通道,波谱分辨率;可见光波段为 3nm,近红外波段为 10nm。

测量结果对比分析。地面、改进的 RSPS 和 NASA 粗糙表面木质平台测量结果与改进为黑色粗糙木质表面和黑色粗糙木质表面边框平台测量结果,见图 2。图 2(a), (b) 分别选择的是第 3 和第 6

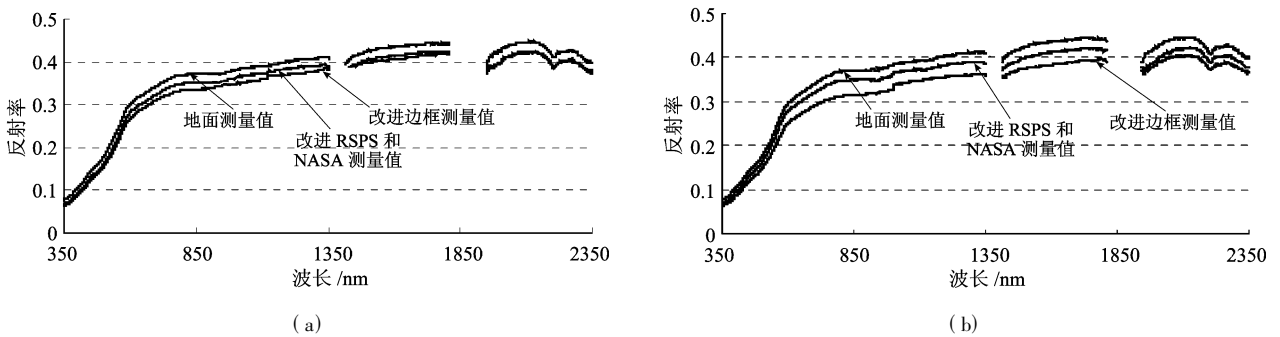


图 2 (a), (b) 分别是第 3 和第 6 个测量点沙地的光谱曲线

Fig 2 (a), (b) show the spectral measurements from site 3 and 6

个测量点沙地的光谱曲线。包括相同测量点上的 3 种测量结果: 地面测量值, 改进 RSPS 和 NASA 平台测量值, 以及改进边框平台测量值。分析结果表明: 图 2(a), (b) 均显示了比较稳定的 3 组光谱曲线的基本变化规律, 体现了沙地邻近效应测量的“光路阻断”测量设计的效果。在测量地物不变、设计不变的条件, 光谱曲线从改进边框测量值, 改进 RSPS 和 NASA 测量值及地面测量值, 反射光谱的变化被认为是解除边框阻挡, 解除台面测量的结果。

## 2.2 ADS40 地面同步测量实验与参量获取

ADS40 是莱卡测量系统与德国航天中心 DLR 共同研发的世界上第一套机载全数字多用途摄影仪, 各种定标参数完整, 具有高分辨率、多波段成像、

形成 3 对立体像对的能力, 可以直接获取数字影像。

2005 年 5 月 11 日, 我们利用“奖状”飞机载荷 ADS40 机载数字影像航空摄影仪在奥运主场馆区实验性飞行的机会, 开展了航空遥感的同步实验。飞行高度 2950m, 地面分辨率为 0.3m, 获得了高分辨率数据。在航空飞行的同时, 开展了同步的地面实验, 实验选择在奥运场馆区的裸地进行, 位置位于  $N40^{\circ}0'10.9''$ ,  $E116^{\circ}22'52.8''$ 。在裸地处共进行了  $3 \times 3$  共 9 个均匀阵列分布的点的测量, 样点间行列间距为 5m。测量仪器采用 ASD 光谱仪, 离样本高度 0.2m; 探头视场角设为  $5^{\circ}$ , 垂直向下测量。测量结果取 5 次的平均值, 测量结果如图 3 所示, 图 3 (a)、(b)、(c)、(d) 分别为第 1、3、5、6 个测量点的光谱曲线。

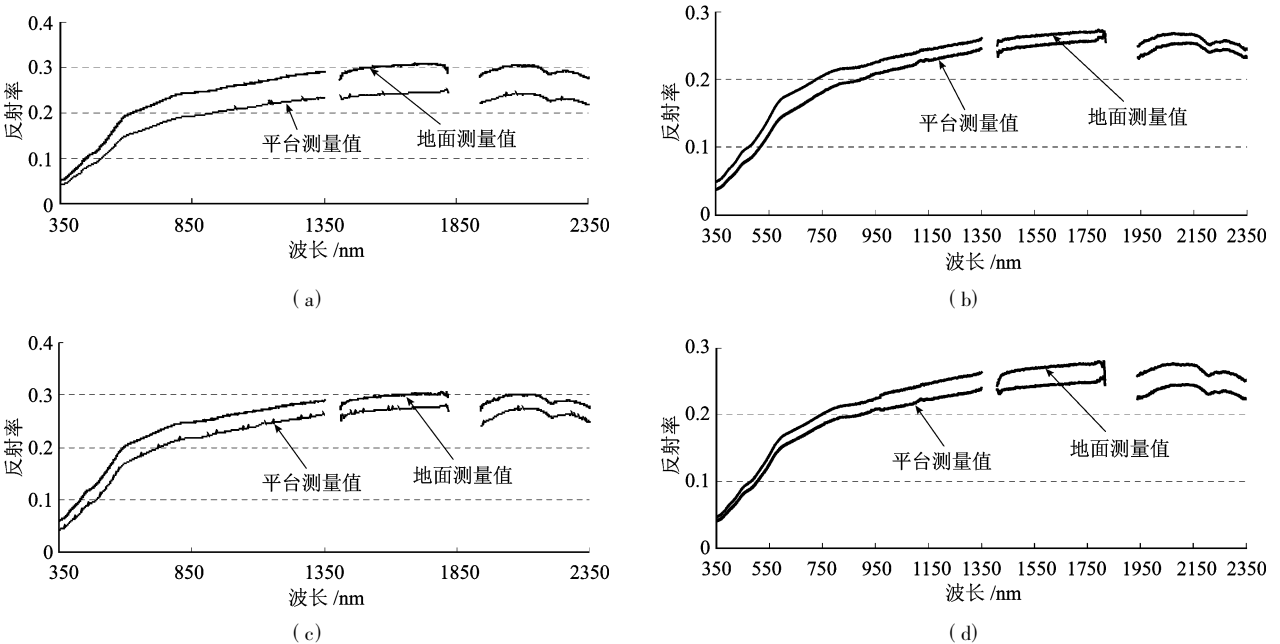


图 3 奥运场馆裸地光谱曲线

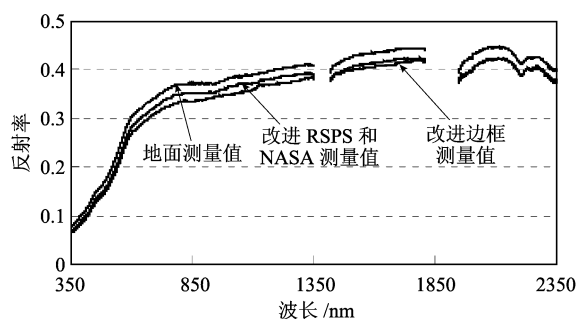
Fig 3 Spectral of the bare land

### 2.3 Landsat 5地面同步测量实验与参量获取

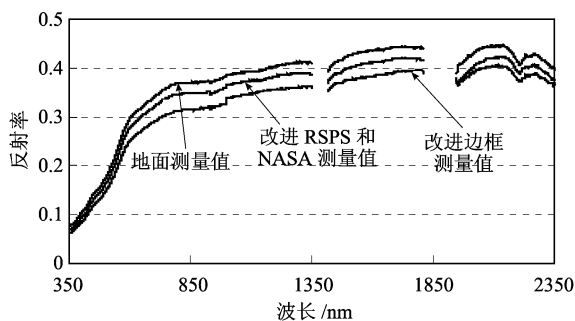
2005年 7月 25日,我们进行了 Landsat 5的地面同步实验。地点选在河北省怀来县官厅水库南侧的天漠(N40°17', E115°41')。天漠位于怀来县官厅水库南侧燕山北坡沙漠,地表为均一的沙地。

同步实验测量沙地的地表反射率。共进行了 3×3共 9个均匀阵列分布的点的测量,样点间行列间距为 70m。沙地为风积沙,在双目显微镜下观察沙样本,该处沙样整体呈黄褐色,粒度比较均匀,颗粒呈棱角-次棱角粒状,为典型的风成沙。其中石英,白色,占 65%,粒度 0.08-0.15mm,呈棱角-次棱角粒状。长石,黄-肉红色,占 30%,粒度 0.1-0.3mm,呈棱角-次棱角粒状。暗色矿物以角闪石为主,灰-黑色,占 5%,粒度 0.01-0.1mm,呈棱角粒状。

测量时天气状况非常好,能见度在 30km左右。在测量时,ASD光谱仪离样本高度 0.2m,探头视场



(a)



(b)

图 4 实验沙地光谱曲线

Fig 4 Spectral of the sand collected at Tianmo

### 3 测量数据分析

在成像过程中,视场内的地表辐射可以视为一个紧密排列的点光源阵列,传感器所获取的图像就是这些点光源成像结果的集合<sup>[17]</sup>。理想状态下,点光源与图像上的像元是一一对应的;对于每一个点光源,系统只在一个点上产生响应,其余点上的响应都是 0。在实际的成像系统中,每一个点光源的图像并不是一个对应的点,而是一个扩散了的强度向周围减弱的模糊图像,其强度分布就是 PSF(也称为冲激响应函数)。这样,图像中像元所记录的辐射能量不只是来源于地表的对应点,而且包括邻近范

围内的点。邻近像元的影响可以看作是地表辐射场和 PSF 的卷积,因此 PSF 的物理意义是它描述了邻近像元对遥感器总辐射亮度贡献率的空间分布。

角设为 5°,垂直向下测量。参考板的放置与光谱仪的扫描探头测量方向保持垂直。目标与参考板同时测量,每组测量在 1m 之内完成,每次测量前后都要进行标准板测量以校准仪器,测量结果取 5 次的平均值。保证参考板放置的水平性并减小光谱仪调整时间,以确保测量的准确度。实测的光谱数据经参考板数据校正后,得到地物的光谱曲线(图 4)。图 4 分别是第 3 个测量点和第 6 个测量点实测的光谱值。可以看到,平台上的测量值比地面的测量值低。这是由于平台上的测量值在同一条件下排除了一部分来自相邻地表与大气之间的多次散射影响反射率的缘故。这样,平台上测量的反射率比地面测量的反射率更接近于地面反射率。两种反射率曲线在可见光绿-红波段、近红外和短波红外区域差异依次增大。另外,在地面实测时同时测量了平板和边框平台内样品的反射率值,由于带边框平台的测量值排除了一部分天空散射光,因此其测量值比平板上的测量值要低,更接近于地表真实反射率。

围内的点。邻近像元的影响可以看作是地表辐射场和 PSF 的卷积,因此 PSF 的物理意义是它描述了邻近像元对遥感器总辐射亮度贡献率的空间分布。

#### 3.1 二维 PSF 与邻近影响的方向性

点扩散函数可以近似看作一个二维高斯函数:

$$\text{PSF}(d) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right] = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{d^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

式中,  $\sigma$  是 PSF 的高斯宽度,  $(x, y)$  是以目标像元为坐标原点时某一像元的图像坐标,  $d$  即是该像元与目标像元间的距离。PSF 在整个区域上的积分结果为 1。地表瞬时视场 (GIFOV) 被定义为 PSF 的半峰值全宽 (the Full Width at Half Maximum, FWHM),

这样,  $\sigma$  和 GIFOV (即地面分辨率) 间的关系为:

$$GIFOV = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma \approx 2.36\sigma \quad (2)$$

根据 (1) 式, 像元在图像上产生一个以该像元为中心的二维高斯分布, 见图 5, 其剖面图见图 6. 整幅图像是由每个像元所产生的高斯分布叠加的结

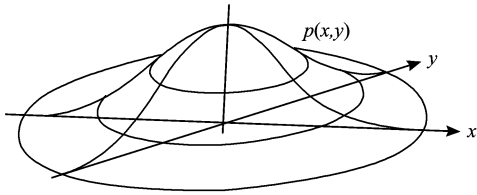


图 5 单个像元所产生的高斯分布示意图  
Fig 5 Gaussian distribution of a single pixel

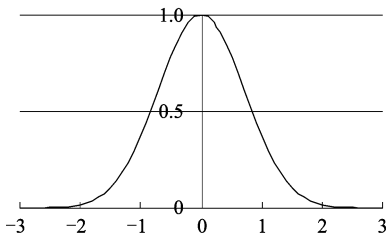


图 6 单个高斯点的剖面图  
Fig 6 Profile of a single Gaussian point

果。由于高斯分布只有在距离中心大约一个 GIFOV 以外才降到峰值的 1% 以下, 距离该像元较近的位置都会受到该像元引起的邻近效应的影响。但真实情况下, 由于大气的散射作用, PSF 的空间形状比 (1) 式平缓, 通常洁净的大气状况下  $\sigma$  的范围在 (0.5-0.75GIFOV) 之间, 因此邻近效应的影响范围更大。

为进一步说明和表现平面上各像元间的相互作用, 我们设计一种由 A、B 两种像元组成的“棋盘格”图案, 见图 7(a)。图 7(a) 中白色代表亮像元 A, 灰色代表暗像元 B。像元值在行、列两个方向交替变化: 与亮像元相邻的四个像元均为暗像元, 而与暗像元相邻的四个像元均为亮像元。在这里讨论三种位置的像元: 像元中心、像元中点 (两像元间的中点) 和对角线中点 (四个像元的中点), 在图 7(b)、(c)、(d) 中分别以  $\Delta$ 、\*、O 表示。由于一个像元的高斯分布在距离中心大约一个 GIFOV 以外降到峰值的 1% 以下, 因此在这里距离大于 2GIFOV 的像元间的影响忽略不计。图 7(b)、(c)、(d) 中的斜线部分即为像元中心、像元中点、对角线中点与目标像元距离小于 2GIFOV 邻近效应的影响范围。

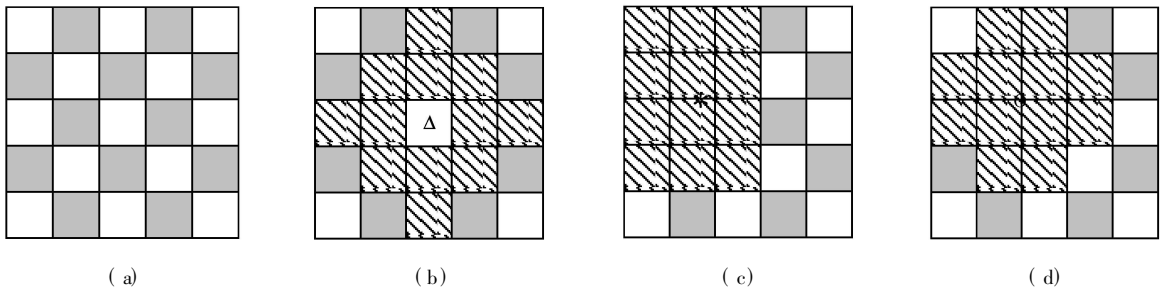


图 7 不同位置所受到的邻近像元的 PSF 影响范围

(a) 亮暗像元的棋盘格局; (b) 像元中心的影响范围; (c) 像元中点的影响范围; (d) 对角线中点的影响范围

Fig 7 PSF effect scope of adjacency pixels on different locations

(a) chessboard pattern of bright and dark pixel (b) effect scope of pixel center; (c) effect scope of pixel midpoint (d) effect scope of pixel diagonal midpoint

据图 7(b), 像元 A 中心的值  $D_{1A}$  受到除其本身外的相邻 12 个像元的影响:

$$D_{1A} = A \times \text{PSF}(0) + 4B \times \text{PSF}(d) + 4A \times \text{PSF}(\sqrt{2}d) + 4B \times \text{PSF}(2d) \quad (3)$$

与此类似, 像元 B 中心的值  $D_{1B}$  受到除其本身外的相邻 12 个像元的影响:

$$D_{1B} = B \times \text{PSF}(0) + 4A \times \text{PSF}(d) + 4B \times \text{PSF}(\sqrt{2}d) + 4A \times \text{PSF}(2d) \quad (4)$$

由图 7(c), 像元中点的值  $D_2$  受到相邻 12 个像元的

影响:

$$D_{2A} = D_{2B} = A \times \text{PSF}(0) + B \times \text{PSF}(0) + 2A \times \text{PSF}(\sqrt{5}d/2) + 2B \times \text{PSF}(\sqrt{5}d/2) + A \times \text{PSF}(1.5d) + B \times \text{PSF}(1.5d) + 2A \times \text{PSF}(\sqrt{13}d/2) + 2B \times \text{PSF}(\sqrt{13}d/2) \quad (5)$$

由图 7(d), 对角线中点的值  $D_3$  受到相邻 12 个像元的影响:

$$D_{3A} = D_{3B} = 2A \times \text{PSF}(\sqrt{2}d/2) + 2B \times \text{PSF}(\sqrt{2}d/2) + 4A \times \text{PSF}(\sqrt{10}d/2) + 4B \times \text{PSF}(\sqrt{10}d/2) \quad (6)$$

### 3 2 ADS40同步实测数据分析

2005年 5月 11日航空同步实验后得到每一个样点的地表反射率值。先考察两个相邻点之间的相互影响。取两个相邻实测点  $A, B$ , 测量点  $A$  的实测光谱值为 0.17914, 测量点  $B$  的实测光谱值为 0.141811, 两个点相邻 3m。根据式 (1) 做出两个点的点扩散函数, 并将二者所产生的邻近效应在连线上相叠加, 见图 8。图中横坐标代表像元中心点之间的实际距离, 纵坐标代表反射率值。

经计算, 实测点  $A$  处叠加后的值为 0.188006, 点  $B$  对实测点  $A$  的贡献为 0.0088657, 占 4.7%; 实测点  $B$  处叠加后的值为 0.153643, 点  $A$  对实测点  $B$  的贡献为 0.0118313, 占 7.7%。

进一步考虑 9 个点的情况, 分别用 9 个点地面、平台测量的反射率, 对 (1) 式在整个区域上进行积

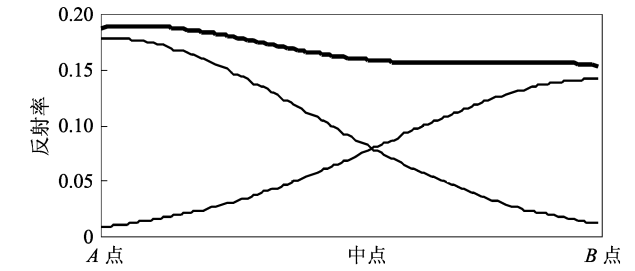
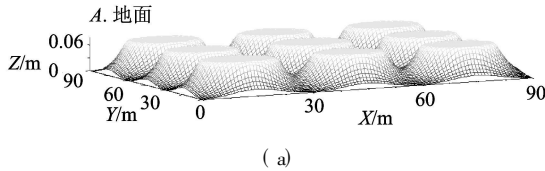


图 8 相邻像元间高斯分布的叠加

Fig 8 Overlay of the Gaussian distribution of neighbor pixels

分。积分结果的叠加体现了地面、平台样品的不同测量结果所引起的邻近效应强度的差异, 见图 9。图 9 中的  $X, Y$  轴坐标为测量点的平面位置,  $Z$  轴坐标为积分结果叠加所得的反射率。为突出邻近效应在测量点之间的效果, 图中只保留了反射率低于 0.06 的部分。

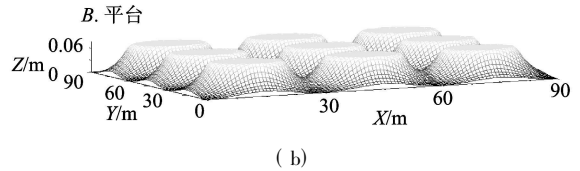


图 9 ADS40同步数据邻近效应三维图示

Fig 9 Three dimension of adjacency effect

由于排除了一部分来自相邻地面与大气之间的多次散射影响, 平台测量的反射率低于地面测量的反射率。图 9 中, 测量中心点、测量点中点, 对角线中点的值平台测量值均低于地面测量值, 表明像元的反射信号对周围像元的影响不同, 邻近效应的强度也有所不同。

为了进一步比较测量中心点、测量点中点, 对角线中点的邻近效应影响, 将这 3 个位置的点按照距离远近做散点图, 见图 10。从图 10 可以看出, 像素中点在  $B$  点处对像素中心点的邻近效应影响最大, 而对角线中点在  $A$  点处对像素中心点的邻近效应影响最大。

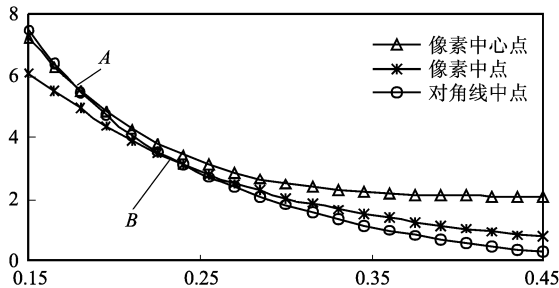


图 10 不同位置像素的邻近效应影响

Fig 10 Adjacency effect of different location among pixels

### 3 3 TM 同步实验数据分析

2005年 7月 25日同步实验后, 将测量结果进行 5 次平均, 得到每一个样点的地表反射率值。根据 (1) 式, 单一像元在图像上产生一个以该像元为中心的二维高斯分布, 如图 6 考察两个相邻点之间的相互影响。取两个相邻实测点  $A, B$ , 测量点  $A$  的实测光谱值为 0.370967, 测量点  $B$  的实测光谱值为 0.386786, 两个点相邻 30m。根据式 (1) 做出两个点的点扩散函数, 并将二者所产生的邻近效应在连线上相叠加, 见图 11。图中横坐标代表像元中心点之间的实际距离, 纵坐标代表反射率值。

经计算, 实测点  $A$  处叠加后的值为 0.395141, 点  $B$  对实测点  $A$  的贡献为 0.0241742, 占 6.1%; 实测点  $B$  处叠加后的值为 0.409972, 点  $A$  对实测点  $B$  的贡献为 0.0231854, 占 5.6%。在样点相隔 30m 的情况下, 两个相邻点邻近效应的影响在 5%—6% 左右。与 ADS40 同步实验相比, ADS40 地面实验时的相邻点间距小, 而邻近效应的影响大, TM 地面实验时的相邻点间距大, 邻近效应的影响小。

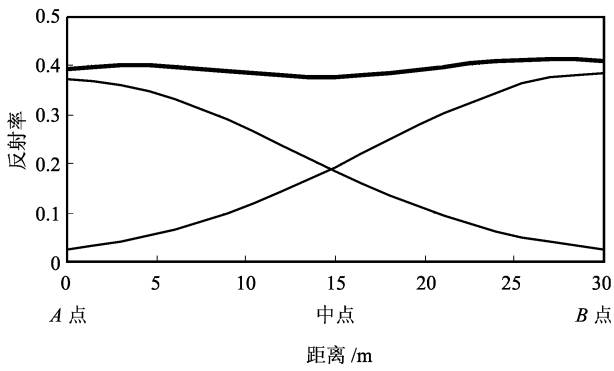


图 11 相邻像元间高斯分布的叠加

Fig 11 Overlay of the Gaussian distribution of neighbor pixels

进一步考虑 9 个点的情况, 分别用 9 个点地面、

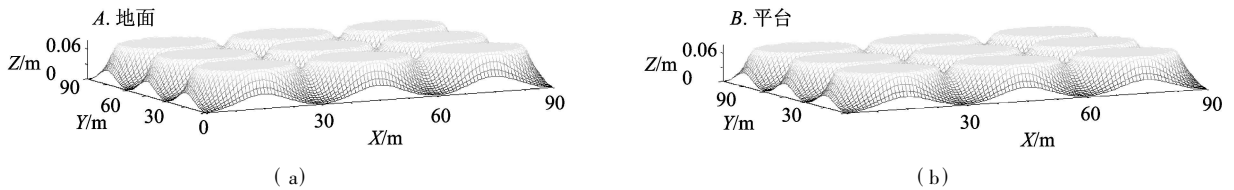


图 12 TM 同步数据邻近效应三维图示

Fig 12 Three dimension of adjacency effect

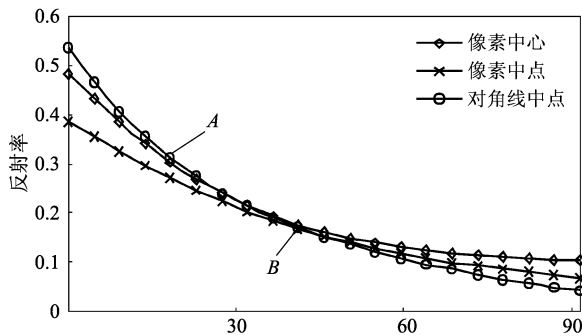


图 13 不同位置像素的邻近效应影响

Fig 13 Adjacency effect of different location among pixels

## 4 结论与讨论

当前遥感邻近效应参数获取方式可以概括为 3 种: (1)利用影像自然目标对比度获取; (2)利用地表标准材料做成的靶标获取; (3)利用辐射传输模型光路设计的测量获取(简称为 RSPS 和 NASA 方案)。本论文主要介绍采用第 3 种设计和测量原理,改进测量方案和测量装置,并且对测量结果进行了对比分析,改进方法测量结果可以排除更多的散

平台测量的反射率,对(1)式在整个区域上进行积分。积分结果的叠加体现了地面、平台样品的不同测量结果所引起的邻近效应强度的差异,见图 12。图 12 中的  $X$ 、 $Y$  轴坐标为测量点的平面位置,  $Z$  轴坐标为积分结果叠加所得的反射率。同样,为突出邻近效应在测量点之间的效果,图中只保留了反射率低于 0.06 的部分。

由于排除了一部分来自相邻地面与大气之间的多次散射影响,平台测量的反射率低于地面测量的反射率。将测量中心点、测量点中点、对角线中点这 3 个位置的点按照距离远近做散点图,见图 13。从图 13 可以看出,像素中点在  $B$  点处对像素中心点的邻近效应影响最大,而对角线中点在  $A$  点处对像素中心点的邻近效应影响最大。

射光的干扰;在两个相邻像元邻近效应分析的基础上,增加了 9 个点邻近像元效应分析和建立计算公式;结果表明:在满足高斯条件和影像平坦性要求的前提下,直线高斯相邻点 ( $d = 2R$ ) 条件下亮度分布交叉点在 ( $d = R$ ),像元分辨率相互影响约为 12.5%,实际测量中亮度分布交叉点和相互影响偏向于亮度值相对低的像元。

遥感科学界为了从遥感数据中获得真实地表信息,艰苦地开展了大气校正、BRDF 校正,以及近些年提出的邻近效应校正。在遥感高分辨率数据应用规模和定量要求驱使下,邻近效应校正越来越受到重视,面临的问题越来越复杂,复杂问题的解决还得依靠遥感界共同探索、质疑和争论,只有这样才能展现遥感科学的发展活力。

## 参考文献 (References)

[ 1 ] Lee C Sanders, Schott John, Raqueno Rokinda. A VNIR SWIR Atmospheric Correction Algorithm for Hyperspectral Imagery with Adjacency Effect[ J ]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 78: 252-263.

[ 2 ] Christopher O Justice, Eric Vermote, John RG Townshend, et al. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land Remote Sensing for Global Change Research[ J ]. *IEEE*

- Transaction on Geosciences and Remote Sensing*, 1998 **36**(4): 1228–1249.
- [ 3 ] Kaufman Y J. The Atmospheric Effect on Remote Sensing and Its Correction [ A ]. *Theory and Applications of Optical Remote Sensing* [ C ], 1989. New York: Wiley.
- [ 4 ] Ma J W, Li X W, Chen X, *et al*. Target Adjacency Effect Estimation Using Ground Spectrum Measurement and Landsat5 Satellite Data [ J ]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006 **44**(3): 729–735.
- [ 5 ] Takashima 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.
- [ 6 ] 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.
- [ 7 ] Vermote E, 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**: 675–686.
- [ 8 ] Richter R. On the In-flight Absolute Calibration of High Spatial Resolution Spaceborne Sensors Using Small Ground Targets [ J ]. *Int J. Remote Sensing*, 1997 **18**(13): 2827–2833.
- [ 9 ] Borel C C, Siegfried A W, Gerstl A. Adjacency Blurring Effect of Scenes Modeled by the Radiosity Method [ A ]. *Proc SPIE* [ C ], 1992 **92**: 620–624.
- [ 10 ] Lu D R, Duan M Z. Atmospheric Correction and Aerosol Remote Sensing Based on Radiative Transfer Model Computation [ A ]. *Proc ACRS* [ C ], 1999.
- [ 11 ] Xu X R, Wang P R. Atmospheric PSF Calculation Using Monte Carlo [ J ]. *Journal of Remote Sensing*, 1999 **3**(4): 268–279. [ 徐希儒, 王平荣. 用蒙特-卡罗方法计算大气 PSF [ J ]. *遥感学报*, 1999 **3**(4): 268–279. ]
- [ 12 ] Huang G, Townshend J R G, Liang S, *et al*. Impact of Sensor's Point Spread Function on Land Cover Characterization Assessment and Deconvolution [ J ]. *Remote Sensing of Environment*, 2002 **80**: 203–212.
- [ 13 ] Pinilla Ruiz G, Ariza López F J. Restoring SPOT Images Using PSF-derived Deconvolution Filters [ J ]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002 **23**(12): 2379–2391.
- [ 14 ] Bin Cong. Encoding Neural Networks to Compute the Atmospheric Point Spread Function [ A ]. *The International Conference on Information Technology: Coding and Computing (ITCC'00)* [ C ], 2000.
- [ 15 ] Feng G, Ma J W, Chen J P. PSF Correction for Satellite Images [ J ]. *Journal of Quantum Electronics*, 2005 **22**(4): 657–663. [ 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): 657–663. ]
- [ 16 ] Kenneth R. Castleman and Digital Image Processing [ M ]. Publishing House of Electronics Industry, 2002.
- [ 17 ] Stephen J. Schiller, Dennis Heider, Mary Pagnutti, *et al*. Implementation of Vicarious Calibration for High Spatial Resolution Sensors. SPRS Workshop on Radiometric and Geometric Calibration, 2003.