

文章编号: 1007-4619(2005)06-0625-09

高分辨率机载遥感数据的交叉辐射影响及其校正

肖 青^{1,2}, 柳钦火¹, 李小文¹, 陈良富¹, 刘 强¹

(1. 中国科学院 遥感应用研究所 遥感信息科学重点实验室, 北京 100101;

2. 核工业北京地质研究院 遥感重点实验室, 北京 100029)

摘 要: 地表的复杂性在可见光 近红外波段体现在由非均匀造成的交叉辐射影响和非朗伯双向反射特性两个方面, 为此利用 MODTRAN4 和大气点扩散函数的解析近似分析了低空机载测量中影响交叉辐射的各种因素。结果显示, 对于机载测量, 大气交叉辐射影响随测量条件不同而改变, 需要实时计算。为此, 将改进的大气点扩散函数的解析近似算法结合 MODTRAN4 辐射传输模型, 设计了校正大气交叉辐射影响的算法。对 AMTIS 图像的处理结果显示, 该算法提高了地表反射比的计算精度。

关键词: 高分辨率; 航空遥感; 交叉辐射

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A

1 引 言

一般将非目标像元对目标像元辐射的贡献称之为“交叉辐射”(Cross Radiance)。非观测目标反射的光子, 经过大气的散射而达到传感器, 从而在某种程度上使地物的边缘产生模糊, 造成图像的钝化和失真。交叉辐射来自目标像元周边的散射影响, 影响权值(衰减系数)取决于到目标像元的距离、地表的物质组成、反射发射特性(BRDF)、像元的尺度和波长^[1,2]。许多年来, 一些专家学者一直致力于这方面的研究。Kaufman^[3]的研究结果表明: 交叉辐射的影响依赖于传感器的空间分辨率; Tanre 等对 TM 的交叉辐射影响进行了分析并设计了处理方法^[4]。牛铮、胡宝新等给出了大角度斜视条件下大气点扩散函数的解析近似表达式^[5,6]。Reinersman 利用蒙特卡洛(M-C)方法模拟的结果表明^[7], 像元尺度越小交叉辐射所占的比例越高, 波长越短邻近效应越强; Vermote 等^[8]使用 M-C 模拟了垂直观测和大倾角(70°)观测时交叉辐射的影响; Lee 和 Schott 发表了较为完整的邻近数学表达和半球模型^[9]。

从目前的文献来看, 大部分采用大气点扩散函数对遥感数据的交叉辐射特征进行分析和处理, 而

大气点扩散函数的获取方法主要有蒙特卡洛(M-C)模拟和大气点扩散函数的解析近似两种方法。M-C 模拟方法研究大气点扩散函数的文章较多^[10,11], 由于 M-C 方法可适用于任何复杂的辐射传输过程, 可以非常好地进行定性和定量分析。但是, 由于它是基于大量统计的结果, 精度与计算次数相关, 并且较为复杂, 对于低空机载测量, 由于像元具有更高的地表分辨率, 更大的测量天顶角, 且传感器处于对流层底部气溶胶时空变化最显著的高度, 客观上需要一个灵活快速的方式, 获得大气点扩散函数用于交叉辐射影响的去除。牛铮、胡宝新等在考虑单次散射的条件下, 给出了大角度斜视条件下大气点扩散函数的解析近似表达。该解析表达可以较为灵活地计算在不同气溶胶光学厚度和观测几何条件下大气的点扩散函数。但是由于其主要是针对星载数据而言, 因此在计算过程中对视场等的近似不适合于机载数据获取方式。

本文中对胡宝新等人大气点扩散函数的解析近似表达进行了必要的改进, 使之能够适应于机载数据的获取方式, 并计算了各种条件下大气的点扩散函数, 利用其分析了交叉辐射作用的幅度和范围, 以及计算环境平均反射率的方法, 同时利用 MODTRAN4 从传感器入瞳辐射中环境辐射所占比例的角度分析

收稿日期: 2004-05-23; 修订日期: 2004-07-20

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX3-SW-338); 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077900)资助。

作者简介: 肖青(1971—), 男, 高级工程师。2002年6月毕业于中国科学院遥感应用研究所, 获遥感与地理信息系统博士学位。现工作于核工业北京地质研究院遥感重点实验室。研究领域: 遥感机理。已经发表论文十余篇。

了低空机载测量中各种非均匀地表的环境辐射的影响。在此基础上利用大气点扩散函数的解析近似和 MODTRAN4 设计了交叉辐射影响的处理方法。

2 原 理

2.1 交叉辐射

传感器所接受到的辐射如图 1, 由 3 部分组成^[3]: 大气的程辐射, 来自地表的直接辐射和反射辐射, 来自视场外邻近像元经大气的多次散射传至传感器方向的辐射。

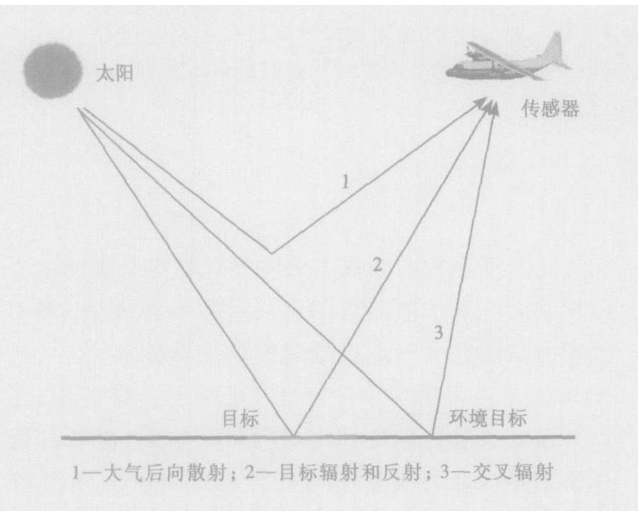


图 1 可见光及近红外波段地气辐射过程

Fig 1 The transmission of radiation between sun with sensor

交叉辐射影响的校正是传感器发展和对遥感数据定量反演精度需求的结果。目前, 对大气交叉辐射影响的研究基本上是针对不同的需要而采取的近似结果^[3, 12], 还没有形成较为成熟适用于不同地表覆盖条件、大气条件、不同传感器和不同飞行高度邻近像元交叉辐射消除的算法。

从可见光到短波红外, 可以忽略地表自身的热辐射, 对于反射率为 $\rho_c(M)$ 的一个像元, 如果周围是朗伯体且均匀的, 其像元的反射率为 ρ_e , 则传感器处的表现反射率可由式 (1) 表示^[10]:

$$\rho^s(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v) = \rho_a(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v) + \frac{T(\theta_s)}{1 - \rho_e S} (\rho_c(M) e^{-\tau/\mu_s} + \rho_e t_h(\theta_v)) \quad (1)$$

式中, S 是大气的半球反照率; $\rho_a(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v)$ 是大气的反射率; $T(\theta_s) = t_h(\theta_s) + e^{-\tau/\mu_s}$ 是太阳入射方向的直射和散射透过率之和; $t_h(\theta_v)$ 是观测方向的散射透过率; $e^{-\tau/\mu_s}$ 是观测方向的直射透过率; $\rho_e t_h(\theta_v)$

表示了来自视场外环境像元反射的辐射。

如果周围像元反射率是不均匀的, 且具有复杂的结构, 为保持式 (1) 的形式, 一般定义一个环境反射率 $\langle \rho(M) \rangle$ 来代表被观测表面所有像元反射率的空间平均:

$$\langle \rho(M) \rangle = \frac{1}{t_h(\theta_v)} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \rho'(x, y) e(x, y, \theta_v) dx dy \quad (2)$$

图 2 中 $M(0, 0)$ 是坐标系统 (x, y) 的原点, $\rho'(x, y)$ 是 $M'(x, y)$ 点的反射率, $e(x, y, \theta_v)$ 表示了每一点对散射透过率 $t_h(\theta_v)$ 的贡献。式 (2) 中将边界设为无限远, 但是当环境像元距目标像元超过一定范围时, 其交叉辐射对目标像元的贡献非常小, 可以忽略, 则可以将 (2) 式改写为:

$$\langle \rho(M) \rangle = \sum_k \sum_l \rho'(x, y) P(x, y, \theta_v) \quad (3)$$

其中, $P(x, y, \theta_v)$ 可以看作作为一个权重函数, 它实际上描述了与像元 $M(0, 0)$ 的距离为 $M'(x, y)$ 的点对目标像元的贡献率, 与地表特征无关的, 我们一般称之为“大气点扩散函数” PSF (Point Spread Function)。交叉辐射的影响可以看作目标表面的辐射场和大气的点扩散函数 PSF 的卷积。大气 PSF 体现了临近像元散射对目标像元辐射亮度的贡献, 因此, 可以通过分析各种条件下大气 PSF 的变化, 来分析交叉辐射的影响。

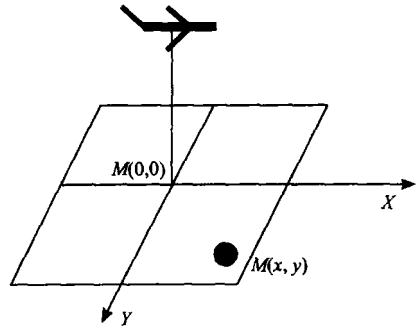


图 2 目标像元与环境像元几何关系示意图

Fig 2 The sketch map indicate the relation between the target and surrounded pixels

2.2 大气点扩散函数的解析近似改进

大气点扩散函数的近似模型从原理上使根据传感器、目标像元和邻近像元构成的几何关系描述来自邻近像元的漫反射再经大气的一次反射而达到传感器的辐射通量, 从而达到大气点扩散函数的解析近似解。这种解析近似同蒙特卡洛的模拟结果有很

好的一致性^[5]。

本文并根据机载测量的特点,进行了如下几点改进:

(1)由于机载测量的高度较低,传感器视场的柱状假设已经不再适用,所以,我们以近似柱体的锥体模拟传感器的视场,从而传感器的视场宽度为观测高度、像元的位置关系以及传感器的瞬时视场角(IFOV)的函数,公式为:

$$d = \text{IFOV}(H / \cos\theta - r \cos\beta - r \sin\beta \tan\alpha') \quad (4)$$

其中, IFOV为传感器的瞬时视场角,其他定义见文献[5]。

(2)以求和代替积分,而不是利用中角近似;

(3)引入灵活的气溶胶相函数。

原选用的 Henyey-Greenstein 相函数为如下形式:

$$P(\theta, g) = (1 - g^2)(1 + g^2 - 2g \cos\theta)^{-3/2} / 4\pi \quad (5)$$

现改为:

$$P(\theta) = \alpha P(\theta, g_1) + (1 - \alpha) P(\theta, g_2) \quad (6)$$

式中, g 为非对称因子。这样通过 α, g_1, g_2 可以模拟不同的气溶胶特征从而对不同气溶胶类型下的大气点扩散函数进行计算。

根据 M-C 模拟的结果^[11], 忽略多次散射会造成一定的误差, 加大像元自身的权重, 但由于忽略的多次散射部分在测量的总辐射中所占的比例很小, 而且我们目前利用大气点扩散函数只是作为一个权

重函数来计算邻近像元的平均反射率, 只有在目标像元与环境像元的反射率差别非常大的时候, 会造成较大误差。

3 交叉辐射对低空机载遥感数据的影响模拟

3.1 MODTRAN4 模拟

MODTRAN4 中, 可以输入像元平均反射率(pixel-average)和环境像元平均反射率(area-average), 通过地表反射率特性不同输入的组合, 根据输出辐射亮度的变化, 可以模拟计算交叉辐射的影响^[10]。

3.1.1 地物间反射率的差别

根据式(1), 在大气散射的作用下, 邻近像元对太阳辐射的反射可以通过大气散射而进入传感器, 对于非均匀地表, 目标像元与周围环境像元的差别决定了交叉辐射在总辐射中的比例。

我们模拟了 AMTIS 的可见光/近红外(VIS/NIR)通道辐射亮度中环境辐射所占比例(图 3(a)), 地表反射率设为常量 24%, 当环境像元的反射比从 2% 变化到 60% 时, 环境像元所占的比例基本上呈线性增加。

图 3(b)给出了下面的模拟计算中作为环境像元和目标像元的反射比。

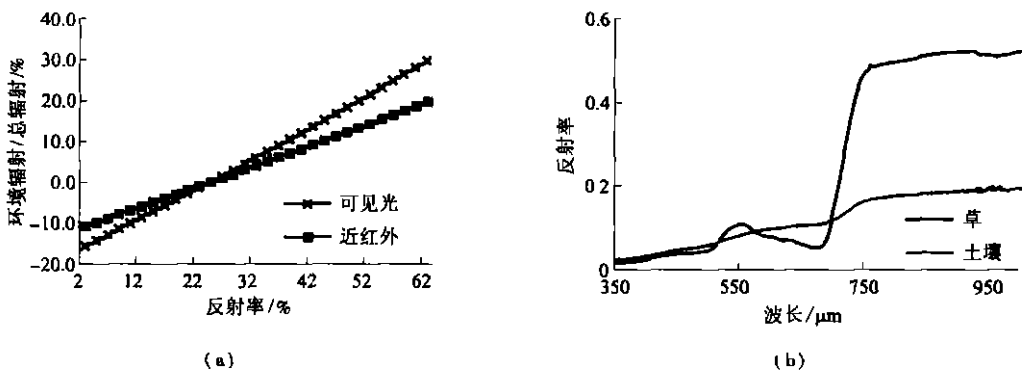


图 3 AMTIS 的可见光/近红外(VIS/NIR)通道辐射亮度中环境辐射所占比例(a), 飞机高度 2km, 乡村气溶胶, 能见度 23km, 地表反射率设为常量 24%。(b)为下面模拟所选用的两种目标的反射比

Fig 3 The proportion of cross radiance in the AMTIS VIS/NIR channels(a), flying height 2km, country aerosol visibility range 23km, set surface reflectance as 24%. (b) figure show the reflectance used for simulation below

3.1.2 观测高度和观测角度

图 4 显示了交叉辐射随观测高度和观测天顶角的变化。图 4(a)中随飞机高度的增加, 交叉辐射增强, 而到一定高度, 变化的幅度将减小。这是因为随高度增加, 散射的路径增加, 交叉辐射增强, 但是由

于气溶胶的分布基本在对流层底部, 当飞机高度增加到一定高度, 散射不再增强, 所以交叉辐射也不再增强。因此交叉辐射与气溶胶的垂直分布是密切相关的。当天顶角小于 35° 时, 交叉辐射随角度的变

化不明显, 40°以后变化较为明显。这里显示的只是

周围环境像元反射率均匀分布的情况。

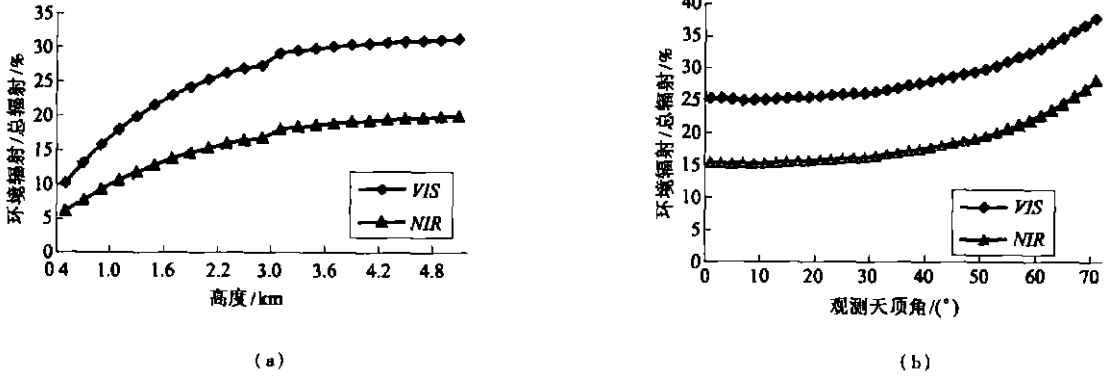


图 4 交叉辐射随观测高度 (a)和观测天顶角 (b)的变化 (目标 环境:草 土壤)

Fig 4 Cross radiance variance via observed height and observed zenith (Target/surround: grass/soil)

3.2 大气点扩散函数的解析近似模拟

由于 MODTRAN 所能分析的因素较少, 因此我们利用改进的大气点扩散函数解析近似从以下几个方面进行了分析。

3.2.1 不同观测天顶角下的大气点扩散函数

我们保持 FOV 和飞行高度不变 (分别为: 1m rad 和 2km), 计算了垂直和倾斜 70°时的大气点扩散函数, 结果如图 5。图中色标为权重值取对数

后的结果。在垂直测量条件下, 大气点扩散函数是中心对称的。而在大角度倾斜观测时, 邻近像元的影响不但与像元的相对距离有关, 还与方位角相关, 与观测方位同侧 (图中相对方位角 0°)像元的权重加大, 并且与垂直观测相比, 目标像元的权重降低, 这是由于随测量天顶角增大, 从探测器到中心像元的光学路径增大, 散射作用也随之增强所致。实际机载测量时, 倾斜角度要小于 70°, 但大气点扩散函数随测量角度的变化还是很明显的。

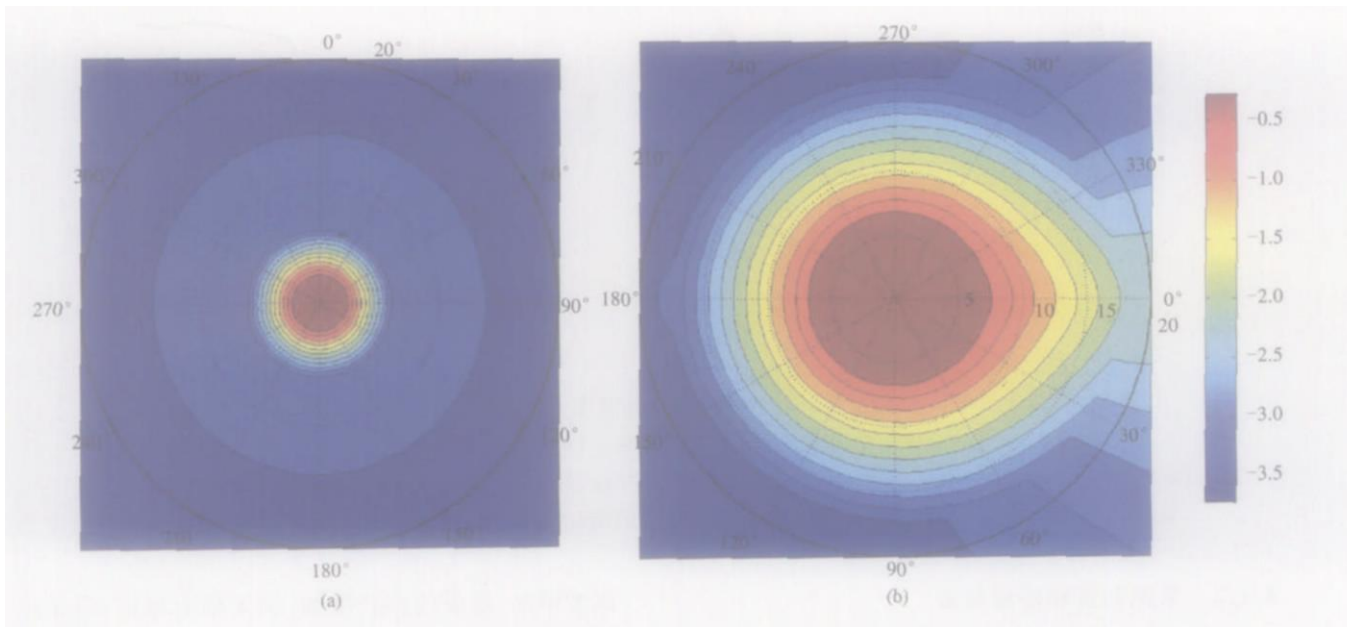


图 5 垂直 ((a), 0°)和斜视 ((b), 70°)条件下点扩散函数二维分布图

Fig 5 The two-dimension distribution map of atmospheric point spread function under Vertical((a), 0°) and off-nadir((b), 70°)

3.2.2 不同像元尺度下的点扩散函数

根据胡宝新^[5]的研究结果,交叉辐射的影响依赖于传感器的空间分辨率,像元尺度越小,交叉辐射项所占比例越高,这一观点已经为许多人所接受。但是实际上对于机载数据而言,像元的尺度是由两个因素决定的,即传感器的IFOV和飞行高度,为了更明确阐述交叉辐射与像元尺度的关系,我们分别从IFOV和飞行高度两个方面分析了机载数据中交叉辐射随像元地面几何分辨率的变化。

图6(a)为保持飞行高度(2km),采用不同的IFOV 1m rad、2m rad、4m rad(相应机下点空间分辨率为2m、4m、8m)进行计算,得到的交叉辐射在总辐射中所占百分比随半径变化情况;图6(b)是在保持IFOV不变(1m rad),飞行高度从2km增加到10km时,交叉辐射在总辐射中所占百分比变化情况(其他模拟条件:气溶胶光学厚度为0.2;大气分子光学厚度为0.02)。在图6(a)中,随IFOV的增大,即像元几何

分辨率的降低,交叉辐射的影响也随之降低,受影响半径减小。分析认为随视场按倍数增大,接收到的目标像元辐射强度几乎成倍数增长,而接收的交叉辐射强度增强的幅度远小于目标像元增强的幅度。而在图6(b)中,随飞行高度增加,像元尺度的增大,交叉辐射在总辐射中的比例没有降低,而是增强了,受影响半径未变。其原因很可能是随高度增加,在保持IFOV不变的条件下,目标像元的贡献并没有增大(目标像元对传感器所张的立体角未变),由于气溶胶和大气分子光学厚度增加,散射作用增强,交叉辐射在总辐射中的比例也随之增加。由于交叉辐射随高度的变化由气溶胶和大气分子的垂直分布决定,在模拟时设定气溶胶等效高度为2km,大气分子等效高度为8km,所以在2km以后由于气溶胶的散射影响已经消失,交叉辐射主要受分子散射影响,变化较小。而在大气分子等效高度以上,由于主要的散射作用已经消失,因此交叉辐射的量值几乎不再变化。

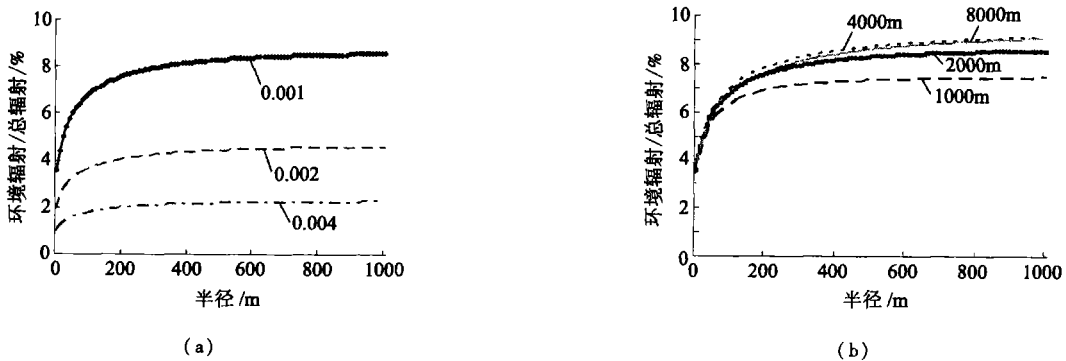


图 6 不同视场角(a)和不同飞行高度(b)交叉辐射所占的比例

Fig 6 The proportion of cross radiance variance with IFOV and flying height

从上面的分析可以看出,对于机载高分辨率遥感数据而言,由于数据获取平台出于大气参数变化较大的区间,交叉辐射的影响受观测高度和观测瞬时视场角两个方面因素确定的,而不是单一像元的地表几何分辨率。

3.2.3 不同气溶胶光学厚度和相函数下的大气点扩散函数

气溶胶光学厚度与相函数对交叉辐射的影响利用大气点扩散函数也进行了分析(其中航高设定为2km,瞬时视场角1m rad),结果如图7。图7(a)显示了气溶胶光学厚度对交叉辐射的影响程度和作用半径。随气溶胶光学厚度的增大,散射作用增强,交叉辐射在总辐射中所占的比例加大,作用的范围也再随气溶胶光学厚度增大而增大。气溶胶的散射相函

数对交叉辐射的影响也是很明显的,如图7(b),当将格林斯坦相函数中的不对称因子 g 从0.5增加到0.9时,交叉辐射的影响将减弱,作用半径也减小。

4 低空机载遥感交叉辐射校正

交叉辐射影响的研究是传感器发展和对遥感数据定量反演精度需求的结果。通过以上对影响交叉辐射的各种因素分析不难发现,在不同地表覆盖、大气光学特征、不同传感器光学参数和不同飞行高度等条件下,大气交叉辐射影响是不同的,需要根据实际情况对大气的交叉辐射影响进行处理。目前对大气交叉辐射的校正基本上是利用M-C模拟的结果针对不同的需要而采取的近似处理方法,缺乏对复

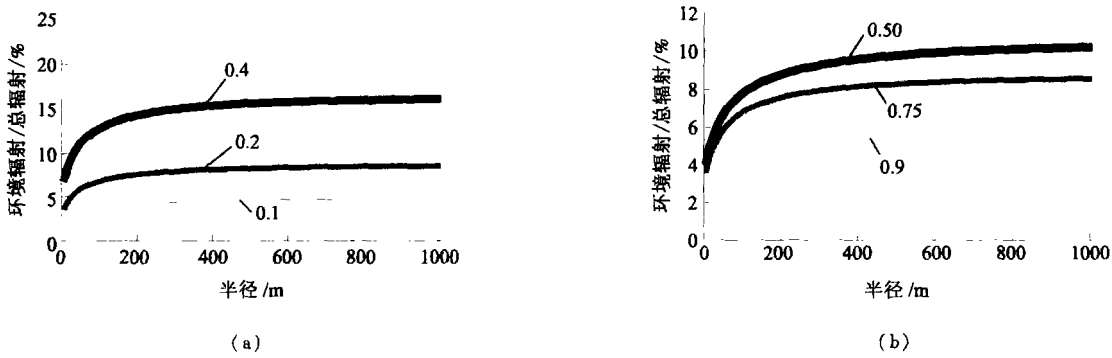


图 7 气溶胶不同光学厚度 (a) 和不同相函数 (b) 条件下交叉辐射所占的比例

Fig 7 The proportion of cross radiance variance with aerosol optical depth and phase function

杂条件下获取数据的应变能力。MODTRAN4 提供了环境像元平均反射率的输入选项,可以用来进行交叉辐射影响的校正^[12],但对 PSF 的处理基本采用近似方法。在此我们以处理低空机载测量数据为目的,将 MODTRAN 辐射传输方程与大气点扩散函数的解析算法相结合,设计了对大气交叉辐射影响校正的算法。该算法主要由以下几个部分组成:

(1) 传感器所接受到的辐射亮度,可以根据式 (1) 表示成如下形式^[12]:

$$L^* = A\rho / (1 - \rho_e S) + B\rho_e / (1 - \rho_e S) + L_A \quad (7)$$

式中, ρ 是像元的反射率; ρ_e 是周围像元的平均反射率; S 是大气的半球反照率; L_A 是大气的程辐射; A 、 B 是由大气和观测几何条件决定。由于机载测量地表分辨率很高,可以认为这 4 个参量是由大气参数决定的,与地表参数无关,大气参数一经确定,式 (7) 的关系就唯一地确定了。

将实测大气参数输入到 MODTRAN 中,通过不同的地面反射比设置,分别求 (6) 式中的 A 、 B 、 L_A^* 、 S 。方法如下:

① 设 $\rho = \rho_e = 0$ 计算出 L_A , 这时 $L_A = L^*$ 即程辐射。

② 设定 $\rho_e = 0$, $\rho = 1.0$, 根据 (6), 则有 $A = L^* - L_A$ 。

③ 设 $\rho = 0$, ρ_e 分别设定为 1 和 0.5, 则可以组成方程组:

$$\begin{cases} L_{1.0} = L_A + B / (1 - S) \\ L_{0.5} = L_A + 0.5B / (1 - 0.5S) \end{cases} \quad (8)$$

解方程组 7 得:

$$\begin{cases} S = (2L_{0.5} - L_{1.0} + L_A) / (L_{1.0} - L_{0.5}) \\ B = (L_{1.0} - L_A) \times (1 - S) \end{cases} \quad (9)$$

一般在处理一个地区的数据时,当大气和气溶

胶类型确定以后,通过计算在不同大气光学厚度、气溶胶光学厚度和大气柱水汽含量下的上述 4 个参量组成一个 LUT。在数据处理时可根据实时的大气参数在 LUT 中内插,得到各校正系数,而无需每次都进行繁琐的辐射传输计算。

(2) 根据 MODTRAN 输出中的大气参数 (气溶胶光学厚度和分布, 大气光学厚度), 以及数据获取参数 (IFOV, 航高) 等计算不同测量天顶角下的大气 PSF。在处理过程影响速度和精度的一个因素就是 PSF 范围的确定。我们在处理过程中根据传感器的信噪比参数确定了 PSF 的范围。因为目前传感器的信噪比在可见光 近红外波段基本上小于 300:1, 所以通过对不同半径下的辐射亮度进行积分, 当两次积分值相差小于 1/300 时, 利用这时的半径确定 PSF 的范围。

(3) 由 (3) 式计算地表的平均反射率

(4) 反射率反演: 将 ρ_e 代入式 (6), 求解地表反射率 ρ 。

重复步骤 3 和 4, 进行迭代, 直到两次计算的结果相差小到一个阈值。

我们对 AMTIS 的可见光、近红外图像利用上述方法进行了交叉辐射校正。

交叉辐射校正后在图像上的直接效果近似于对图像的反差增强, 只是一种基于定量化计算的图像增加, 如图 8 (a), (b) 两幅校正前后的对比。但我们进行交叉辐射校正的真正目的是反演地表真实的反射率值。图 9 为从处理后图像中抽取的反射率剖面, 图 9 (a) 曲线取自于可见光通道, 图 9 (b) 取自近红外通道。

根据上节的分析, 交叉辐射的强弱与地表反射率的反差成正比, 相邻像元的反差越大, 交叉辐射越

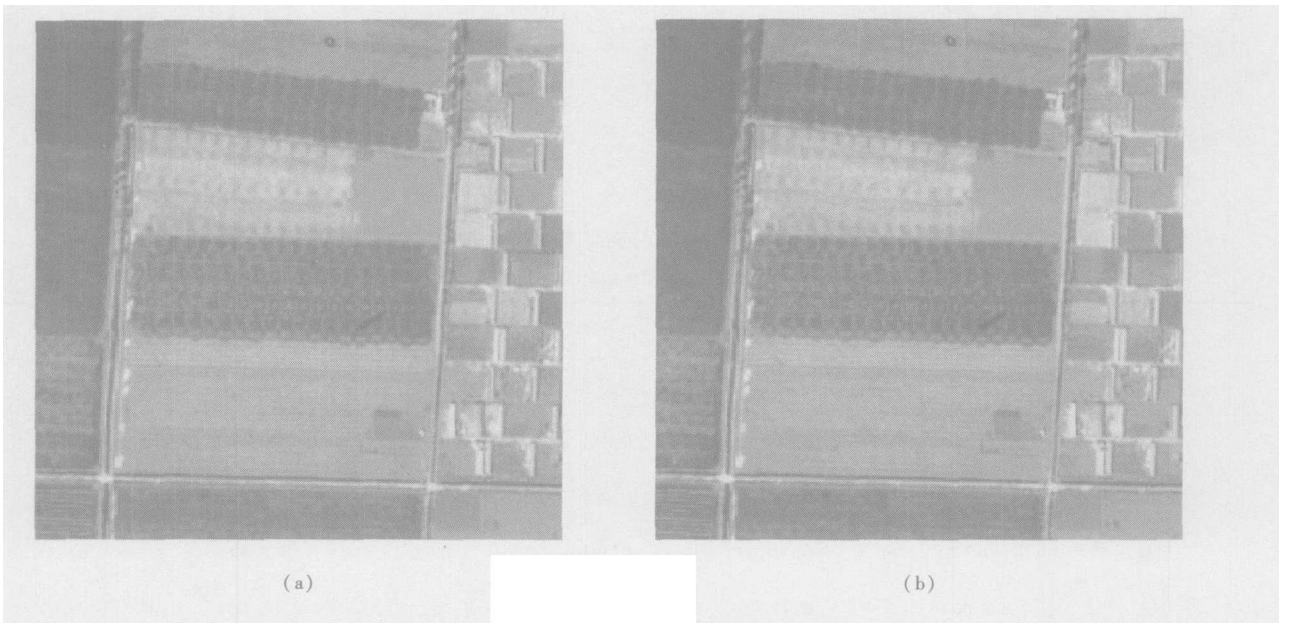
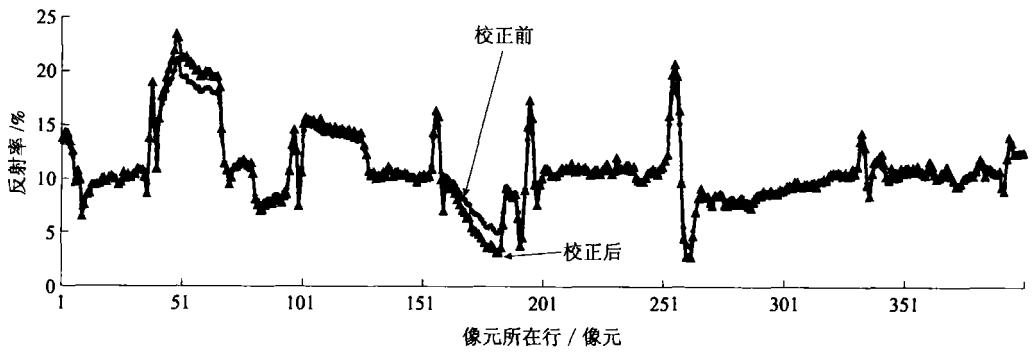
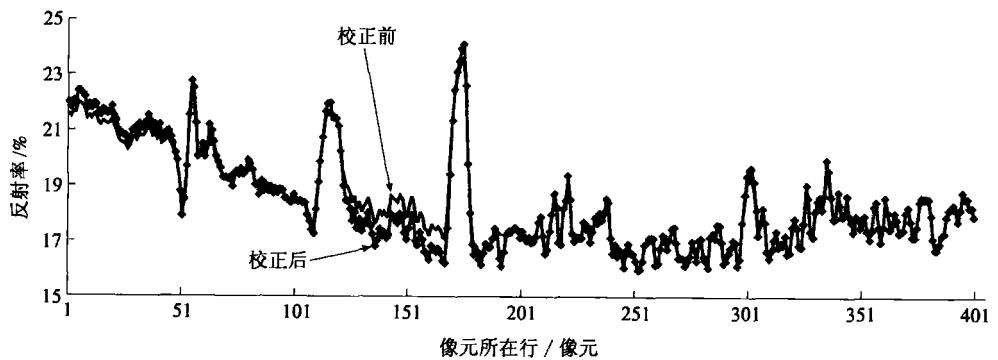


图 8 AMTIS 的交叉辐射校正 ((a)校正前; (b)校正后)

Fig 8 The image of AMTIS ((a) before cross radiance corrected; (b) after corrected)



(a)



(b)

图 9 交叉辐射校正后反射率的变化 ((a)可见光通道; (b)近红外通道)

Fig 9 The change of AMTIS reflectance before and after cross radiance correction ((a) VIS band; (b) NIR)

强。从图 9 中交叉辐射校正后反射率曲线的对比中可以发现,在相邻像元反射率差别较大的地方,处理前后的差别越明显;而在反差较小的地方,交叉辐射影响较弱,所以校正后反射率的变化很小。

我们利用地表反射率实测数据对交叉辐射校正

后的结果进行了验证。表 1 为地表实测反射率值与交叉辐射校正后结果的比较。经过交叉辐射校正后,如图 9 中所示,比未校正前更接近于地表实测值。

表 1 地面实测反射率值与交叉辐射校正前后结果的比较

Table 1 The comparison of the surface reflectance before and after cross radiance correction

目标物	地表实测值		交叉辐射校正前		交叉辐射校正后	
	可见光	近红外	可见光	近红外	可见光	近红外
靶标 1	0.046	0.157	0.051	0.161	0.047	0.159
靶标 2	0.068	0.190	0.069	0.183	0.067	0.191
土壤	0.147	0.212	0.133	0.205	0.140	0.211
小麦	0.064	0.172	0.065	0.168	0.064	0.170

5 结 论

交叉辐射影响的研究是传感器发展和对遥感数据定量反演精度需求的结果。在此我们利用 MODTRAN4 和大气点扩散函数的解析近似模型,从传感器入瞳辐射中环境辐射所占比例的角度分析了低空机载测量中交叉辐射随气溶胶光学厚度和相函数、传感器的视场、观测高度和观测角度、地物间反射率的差别等因素的变化规律。结果显示机载遥感数据中交叉辐射的量值是各种综合因素的影响。尤其重要的是对于机载高分辨率遥感数据而言,交叉辐射的影响是受观测高度和观测瞬时视场角两个方面因素确定的,而不是单一的像元的地表几何分辨率。

目前对大气交叉辐射的校正基本上是利用 M-C 模拟的结果针对不同的需要而采取的近似处理方法,缺乏对复杂条件下获取数据的能力。根据对影响交叉辐射的各种因素分析的结果,以处理低空机载测量数据为目的,将 MODTRAN4 辐射传输方程与大气点扩散函数的解析算法相结合,设计了对大气交叉辐射影响校正的算法,并利用该算法对 AMTIS 可见光、近红外数据进行了处理,结果显示出较高的反射率计算精度。当然该方法目前还具有局限性(没有考虑多次散射),需要进一步的改进。

参 考 文 献 (References)

- [1] Kaufman Y J. Solution of the Equation of Radiative Transfer for Remote Sensing over Nonuniform Surface Reflectivity [J]. *J Geophys Res*, 1982, **20**: 4137-4147.

- [2] Tanre D, Herman M, Deschamps P Y, et al. Influence of the Background Contribution upon Space Measurement of Ground Reflectance [J]. *Applied Optics*, 1981, **20**(2): 3676-3684.
- [3] Kaufman Y J. Effect of Earth's Atmosphere on the Contrast for Zenith Observations [J]. *J Geophys Res*, 1979, **84**(6): 3165-3172.
- [4] Tanre P, Deschamps Y, Duhaut P, et al. Adjacency Effect Produced by the Atmospheric Scattering in Thematic Mapper Data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, **92**(D10): 12000-12006.
- [5] Hu B X, Li X W, Zhu C G, et al. Deriving the Atmospheric Point Spread Function of Off-nadir Remote Sensing [J]. *Journal of Image and Graphics*, 1996, **1**(1): 19-29. [胡宝新, 李小文, 朱重光等. 大倾角光学遥感中大气点扩散函数的近似模型 [J]. *中国图象图形学报*, 1996, **1**(1): 19-29.]
- [6] Niu Z, Zhu C G, Wang C Y. Analysis of Atmospheric Cross Radiation in a Slant Viewing Angle [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1997, **11**(2): 88-93. [牛铮, 朱重光, 王长耀. 斜视角度下大气交叉辐射影响分析 [J]. *遥感学报*, 1997, **11**(2): 88-93.]
- [7] Philip N Reinersman, Kendall L Carder. 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.
- [8] Vermote E, Tanre D, Deuze J L, et al. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum [R]. *6S user guide Version 0*, 1994.
- [9] Lee Schott, Lee C, Sanders John R, Schott et al. A VNIR/SWIR Atmospheric Correction Algorithm for Hyperspectral Imagery with Adjacency Effect [J]. *Remote sensing of*

Environment 2001, 78: 252–263

[10] Adler-Golden S M, Mathew M W, Bemstein L S et al
Atmospheric Correction for Shortwave Spectral Imagery Based on
Modtran[A]. AVIRIS workshop[C]. 1999.

[11] Yu B. Computer Simulation of Atmospheric Point Spread
Function[D]. Master thesis of Peking University. 2000 [于
伯. 大气点扩散函数的计算机模拟[D]. 北京大学硕士论

文, 2000.]

[12] Berk G P, Anderson L, Bemstein S et al. MODTRAN4
Radiative Transfer Modeling for Atmospheric Correction [A].
Proceedings of SPIE Optical Spectroscopic Techniques and
Instrumentation for Atmospheric and Space Research III
[C], 1999.

Analysis and Correction of Atmospheric Cross Radiation for High Geometric Resolution Airborne Remote Sensing Data

XIAO Qing^{1,2}, LIU Qin-huo¹, LI Xiao-wen¹, CHEN Liang-fu¹, LIU Qiang¹

(1. LASIS Institute of Remote Sensing Applications CAS Beijing 100101, China;

2. Beijing Research Institute of Uranium Geology Beijing 100029, China)

Abstract: The complexity of surface parameters can be characterized by cross radiance and BRDF in VIS/NIR band. In this paper, MODTRAN⁴ code and atmospheric point spread function were used for the simulation and analysis of the influences of a set of factors on cross radiance. The results show that the variance of cross radiance could be resulted from every factor, so it must be computed on the basis of measurement conditions. A new methodology is developed to eliminate cross radiance from total radiance based on modification of analytical solution of PSF and combination of it with radiation transfer code of MODTRAN. The applications to AMTIS image show a good precision.

Key words: high geometric resolution; airborne remote sensing; cross radiance