BRDF 大气影响订正环的收敛性研究

李 小 文
(中国科学院遥感应用研究所 北京 100101)

摘 要 定量遥感要求对星载或机载遥感数据进行大气影响订正.精确的大气订正则需要知道下垫面的方向性反射(或辐射)特征,而这正是定量遥感所要知道的. 这就形成了一个死循环. 为了解开这个死结,MODIS可见/近红外产品采用了考虑地表BRDF的迭代订正. 然而迭代订正的收敛性是有待研究的问题. 胡宝新等用大量的模拟来表明该算法的收敛性,但模拟很难耗尽各式各样的可能情况. 本文旨在从理论上研究该订正环的收敛性并阐明收敛的条件.

关键词 BRDF, 大气订正, 收敛性

1 考虑地表BRDF的大气订正

卫星遥感器观察到大气顶部的反射可以表达为大气辐射传输参数与地表方向性反射参数的函数[1]

$$\rho_{toa} = \rho_{dd}^{-} + [T_{-} \cdot R \cdot T_{+} - t_{dd}^{-} \,|R|\, \cdot \rho_{ff}^{+} t_{dd}^{+}] / (1 - R_{ff} \rho_{ff}^{+}) \tag{1}$$

这里符号基本沿用文献[1],其意义为:

ρ_{toa}: 传感器在大气顶部观察到的反射率;

ρ_{dd}^{-}: 阳光进入大气顶部后,向传感器方向的路径散射反射率;

t_{dd}: 阳光直射穿透大气层的传输率;

t_{dd}^{+}: 地表反射穿透大气层到达传感器的传输率;

ρ_{ff}^{+}: 地表散射光向上遭遇大气的路径反射;

R_{ff}: 地表的半球反射率(扇入扇出);

T_{-}, T_{+}和R则分别是大气的下向传输,上向传输矩阵和地表的方向反射矩阵:

$$T_{-} = [t_{dd}^{-} \quad t_{df}^{-}]$$

$$T_{+} = \begin{bmatrix} t_{dd}^{+} \\ t_{fd}^{+} \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} R_{dd} & R_{df} \\ R_{fd} & R_{ff} \end{bmatrix}; \quad |R| = R_{dd} R_{ff} - R_{df} \cdot R_{fd}$$

这里t_{dd}^{-}、t_{dd}^{+},R_{ff}上文已作解释,其余下标df表示直入扇出(方向—半球),fd表示扇入直出(半球—方向)。换言之,R_{df}是给定入射方向半球反射的平均,R_{fd}是给定观察方向半球入射的平均,R_{ff}则是BRDF对输入输出双半球的平均。

在作大气订正时,通常我们假定所有的大气辐射传输参数(ρ, t)均为已知,ρ_{toa}是观测值. 困难在于R未知,包含一个未知的二向性反射R_{dd}和地表BRDF的3个平均值,一共4个未知数.

在对地表BRDF完全无知且仅有一个观测值ρ_{toa}的情况下,无可奈何,我们只能假定地表为朗伯表面,从而将大气影响简化为:

$$\rho_{toa} = \rho_{dd}^{-} + \frac{T_{-} I T_{+} \cdot r}{1 - \rho_{ff}^{+} \cdot r} \tag{2}$$

这里I为2×2单元矩阵,从(2)式可以解出地表的朗伯假定反射率r:

$$r = \frac{\rho_{toa} - \rho_{dd}^{-}}{\rho_{ff}^{+}(\rho_{toa} - \rho_{dd}^{-}) + T_{-} T_{+}} \tag{3}$$

BRDF订正环的第一步,就是对多个不同方向的ρ_{toa}求出对应的r值,用来拟合地表的BRDF. 胡宝新等的模拟计算表明朗伯假定可以导致相当大的误差[2]。但迄今未见对这种误差原因及性质的分析.

2 朗伯假定下大气纠正的误差分析

用(2)式代替(1)进行大气纠正所造成的误差可以解析表达,如前所述,(1)式中有4个未知数,我们将其表达为一个未知数R_{dd}和3个独立误差源的函数,即:$\Delta R_{df} = R_{dd} - R_{df}$, $\Delta R_{fd} = R_{dd} - R_{fd}$, 和$\Delta R_{ff} =$

收稿日期:1997-05-07

$R_{dd}-R_{ff}$。我们注意到(1)式分子的第二项是5个传输参数的乘积差，远小于第一项为3个传输参数的乘积和。我们在下面将忽略第二项以简化表达式。

从而(1)式可以改写为：

$$\rho_{toa}-\rho_{dd}^{-}=\frac{R_{dd}\cdot T_{-}\cdot I\cdot T_{+}-T_{-}\Delta R\cdot T_{+}}{1-\rho_{ff}^{+}\cdot(R_{dd}-\Delta R_{ff})} \tag{4}$$

$$R_{dd}=\frac{(\rho_{toa}-\rho_{dd}^{-})\cdot(1+\rho_{ff}^{+}\Delta R_{ff})+T_{-}\cdot\Delta R\cdot T_{+}}{\rho_{ff}^{+}(\rho_{toa}-\rho_{dd}^{-})+T_{-}\cdot I\cdot T_{+}}$$

与(3)式相比较，可能误差项

$$\varepsilon_r^0=R_{dd}-r=\frac{(\rho_{toa}-\rho_{dd}^{-})\rho_{ff}^{+}\cdot\Delta R_{ff}+T_{-}\cdot\Delta R\cdot T_{+}}{\rho_{ff}^{+}(\rho_{toa}-\rho_{dd}^{-})+T_{-}\cdot I\cdot T_{+}} \tag{5}$$

$$\Delta R=\begin{bmatrix}0 & \Delta R_{df}\\ \Delta R_{fd} & \Delta R_{ff}\end{bmatrix}$$

式(5)表明，朗伯假定大气纠正所引起的误差可以相当大，正比于特定方向 R_{dd} 对于三均值的偏离，但是其优点是所有的误差项同符号，因而当 R_{dd}为极大值或大于三均值时，r 将低估 R_{dd}，反之 R_{dd}为极小值或小于三均值时，r 将高估 R_{dd}，从而可以将朗伯假定下的大气纠正视作对实际BRDF的一种平滑过程，当 R_{dd}值屇于三均值之间时，误差项很小且彼此抵消，这里因此不作进一步讨论。

式(4)忽略的项($R_{dd}R_{ff}-R_{df}R_{fd}$)可以视作 R_{dd}对第4种平均值的偏离，其造成的误差性质与上面相同，但因很小，常可忽略不计。

对于远大于三均值或远小于三均值的 R_{dd}我们可以将(5)式进一步近似为

$$\varepsilon_r^0\approx\Delta R_{ff}\left(1-\frac{t_{dd}^{-}\cdot t_{dd}^{+}}{\rho_{ff}^{+}(\rho_{toa}-\rho_{dd}^{-})+T_{-}IT_{+}}\right) \tag{6}$$

由于导出(6)式中所用的近似，我们可以将此处的ΔR_{ff}理解为三均值的某种加权平均(如 文献[3]中的 C_1)与 R_{dd}之差值。

3　BRDF 订正环的收敛性

假定我们有多角度遥感观测值，经朗伯订正以后，用来拟合一个BRDF模型，得到相应方向上的模型予期值 R_{dd}^1 及相应的三均值即 R_{df}^1, R_{fd}^1和 R_{ff}^1。

假定我们采用的模型是适当的，拟合的 R_{dd}^1与真实 R_{dd}值的误差则应与上节计算所得误差大致相同。

BRDF订正环的下一步则是定义模型的均值比矩阵 K^1和误差矩阵ΔR^1

$$K^1=\begin{bmatrix}1 & \dfrac{R_{df}^1}{R_{dd}^1}\\ \dfrac{R_{fd}^1}{R_{dd}^1} & \dfrac{R_{ff}^1}{R_{dd}^1}\end{bmatrix};\ \Delta R^1=R-R_{dd}\cdot K^1$$

我们将用 K_{ff}^1 来表示 $K^1(2,2)$，ΔR_{ff}^1 表示$\Delta R^1(2,2)$。BRDF订正环然后求解第一步BRDF订正方程：

$$\rho_{toa}-\rho_{dd}^{-}=\frac{T_{-}K^1T_{+}\cdot r^1}{1-K_{ff}^1r^1\rho_{ff}^{+}} \tag{7}$$

这个方程可以解得第一次BRDF订正值：

$$r^1=\frac{\rho_{toa}-\rho_{dd}^{-}}{T_{-}K^1T_{+}+(\rho_{toa}-\rho_{dd}^{-})\rho_{ff}^{+}\cdot K_{ff}^1}$$

与上节相似，方程(1)可以写成 $R=R_{dd}\cdot K^1+\Delta R^1$的形式，从而解得：

$$R_{dd}=r^1-\frac{T_{-}\cdot\Delta R^1\cdot T_{+}+(\rho_{toa}-\rho_{dd}^{-})\cdot\rho_{ff}^{+}\cdot\Delta R_{ff}^1}{T_{-}K^1T_{+}+(\rho_{toa}-\rho_{dd}^{-})K_{ff}^1\rho_{ff}^{+}} \tag{8}$$

ΔR^1的三元素，例如ΔR_{ff}^1可以写作：

$$\Delta R_{ff}^1=R_{ff}-\frac{R_{dd}}{R_{dd}^1}\cdot R_{ff}^1=R_{ff}^1-\frac{R_{dd}}{R_{dd}^1}\cdot R_{ff}^1+(R_{ff}-R_{ff}^1)$$

R_{ff}^1的估计值依赖于采样的质量和选用BRDF模型的适用性，对于 R_{dd}远大于三均值或远小于三均值的采样来说，我们假定 R_{ff}与R_{ff}^1差别可以忽略，则

$$\Delta R_{ff}^1\approx R_{ff}^1\cdot\left(\frac{-\varepsilon_r^0}{R_{dd}^1}\right)=-K_{ff}^1\cdot\varepsilon_r^0 \tag{9}$$

将(9)式的关系代入(8)的三均值差元素，我们有：

$$\varepsilon_r^1\approx\varepsilon_r^0\cdot\left(1-\frac{t_{dd}^{-}\cdot t_{dd}^{+}}{T_{-}K^1T_{+}+(\rho_{toa}-\rho_{dd}^{-})K_{ff}^1\rho_{ff}^{+}}\right) \tag{10}$$

很显然，(10)式可以推广到BRDF订正环的下边的循环，从而有：$|\varepsilon_r^{n+1}|\le|\varepsilon_r^n|$，且同符号；等式在 t_{dd}^{-}或 t_{dd}^{+}为零时成立。简言之，我们迄今证明了：1)对大于三均值或小于三均值的方向性观测，朗伯假定的大气订正有可能造成很大的误差，但不会订正到相反的方向(式6)；2)用朗伯订正后的多角度遥感信号作BRDF模型拟合，如果三均值的拟合误差远小于极端值与这三均值之差，则BRDF订正环收敛于真值。收敛的速度取决于 $t_{dd}^{-}\cdot t_{dd}^{+}$，即大气的二向透明度；但当误差已接近三均值的拟合误差时，收敛的模式开始复杂化。

4 大气订正与BRDF模型拟合的耦连

我们回到最初的问题，式(1)有4个未知数，即给定方向的 R_{dd}和BRDF的三均值，给定多角度遥感有 m 个方向采样，我们有 m 个方程和 $m+3$ 个未知数，这个订正环是依据什么解出这 $m+3$ 个未知数的呢?

这里的关键在于一个合适的BRDF模型。假定这个模型有 n 个参数，那么从这 n 个参数就应该可以计算出 m 个 R_{dd}，以及三平均。从而使整个问题变成用 m 个数据来拟合 n 个未知参数。

那末，很自然的问题就是：能不能把前向BRDF模型三平均的积分定义式与式1直接耦连起来，从而直接从ρ_{toa}来拟合BRDF模型的未知参数呢?

这是一个十分诱人的方向，如果我们知道特定地物的适用模型，而其未知参数不超过3,4个，则直接拟合或许可行，但在地物适用模型未知的情况下，由于式(1)强烈的平滑作用，模型的选择将是十分困难的，正因为如此，在订正环的第一步我们采用了朗伯模型，随着极端值逐步趋于真值，订正环的一个优点是提供了逐步选择更适用模型的可能。

5 结论与讨论

本文通过对BRDF大气订正环的机理研究，证明了文献[2]从模拟中获得的结论具有一定的普遍性。类拟的订正环应可用于热红外多角度遥感的大气订正，这从另一方面也说明了发展比辐射率方向性模型的重要性与紧迫性。

另一方面，本文的研究表明了模型拟合得出正确的三均值在订正环收敛中的重要作用。换言之，由于适用模型的不确定性和方向性采样的局限性，不同模型对同样的采样可能给出相当不同的三均值；例如典型的“碗边”和“反碗边”模型，如果它们的热点到天底点到冷点大致相同而只是到了大倾角观测时才变化趋势相反，而通常多角度采样不包括大倾角的观察，此时“碗边”和“反碗边”模型均能很好拟合观测数据但可能预计(或外延)截然不同的三均值，这在经验或半经验模型拟合中始终是一个严重问题。本文的研究表明，由于ρ_{toa}包含了三均值的信息，而三均值的正确估计将影响订正环的收敛。而这种不同的收敛方式，可能包含着真正BRDF形状的信息。在订正环中比较不同模型的收敛情况，可能有助于选择正确的模型。

致谢：本文的工作承国家自然科学基金49671059及美国宇航局NASA5-31369, ESCAP / NASDA ADEOS 合作研究项目及ECU VEGETATION 项目部分资助。

参 考 文 献

1 李小文，王锦地. 植被光学遥感模型与植被结构参数化，北京：科学出版社，1995.

2 胡宝新，王乐驰，李小文，斯特勒. 大气订正对获取地表BRDF的敏感性. 遥感学报，第一届国际多角度遥感研讨会增刊，1997，1 (增刊)：187-191.

3 胡宝新，李小文，朱重光，斯特勒，一种大气订正的方法 -BRDF大气订正环. 环境遥感，1996，11(2):151-159.

On Convergence of BRDF-based Atmospheric Correction Loop

Li Xiaowen

(*Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing* 100101, *China*)

Abstract Quantiative remote sensing requires atmospheric correction, which requires directional reflectance or emittance of the earth surface as the boundary condition of the radiative transfer problem. But the actual reflectance or emittance characteristics of the earth surface are what the quantitative remote sensing aims at. This presents as a deadlock. In order to solve the problem, Hu *et al.* suggested a BRDF-based correction loop. However the convergence of such an iteration loop is to be studied. Hu *et al.* used simulations to show the loop converging. But it′s not easy to exhaust all the possible cases by simulations. This paper is to analyse theoretically the loop′s convergence and its conditions.

Key words BRDF, Atmospheric correction, Convergence