

文章编号 1004-924X(2015)增-0000-07

统计回归大气透过率廓线的实时计算

程楚雄^{1*}, 王雪莹¹, 程洪玮²

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;
2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要: 由于仅简单地用几种典型的大气透过率来反演大纬度范围单幅遥感图像的遥感信息会产生较大的误差, 本文提出了实时计算统计回归透过率廓线的方法。首先, 基于非均匀大气的 Curtis-Godson (CG) 近似方法, 建立了统计回归方程和等效光学质量计算方法; 然后, 以 MODTRAN 计算的 6 种大气模式的透过率廓线及其大气剖面数据为样本, 计算了统计回归参数, 并验证了模型精度; 最后, 提出了透过率天顶角修正公式, 实现了斜程透过率廓线计算。仿真结果表明, 透过率廓线计算平均最大误差为 1.39%, 单波段透过率廓线计算时间小于 0.08 s。该模型与实测温湿度数据结合, 可实时计算观测点的透过率廓线, 不仅有效地提高了遥感图像信息反演精度, 还扩大了模型的应用范围。

关键词: 大气遥感; 大气透过率; 统计回归; 天顶角修正; MODTRAN

中图分类号: P407 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20152313.0000

Real-time calculation of statistical regression atmospheric transmittance profile

CHENG Chu-xiong^{1*}, WANG Xue-ying¹, CHENG Hong-wei²

(1. College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China)

* Corresponding author, E-mail: nudtcheng@163.com

Abstract: As many single remote sensing images have extended multiple latitudes, their remote sensing information retrieved by several simple atmospheric transmittances will generate to many big errors. To solve above problems, a real-time calculation method of statistical regression transmittance profile was proposed. Firstly, a regression prediction equation and an equivalent optical mass calculation method were established based on the Curtis-Godson (CG) approximate method of homogeneous atmosphere. Then, by taking the MODTRAN's 6 types of atmospheric transmittance profiles and the corresponding atmospheric profile data as samples, statistical regression parameters were calculated, and the model's precision was verified. Finally, a correction formula for transmittance zenith angle was presented and the slant path transmittance profile calculation was implemented. The simulation results show that the average biggest error of transmittance profile is 1.39%, and calculation time of single band is less than 0.08 s. Combined with measured data of temperature and humidity, this model can calculate the transmittance profile at the observation point in real-time, thus not only im-

proves effectively retrieval accuracy of remote sensing image. but also expands the model's application ranges.

Key words: atmospheric remote sensing; atmospheric transmittance; statistical regression; zenith angle correction; MODTRAN

1 引言

大气透过率是遥感信息反演(如地表温度、水汽含量、云顶性质等)中必不可少的参数,也是红外系统设计需要考虑的首要因素,其精度的高低对结果具有重要影响。国内外许多学者对大气透过率进行了深入研究。目前主要借助 LOWTRAN^[1]、MODTRAN^[2] 和 FASCOD^[3] 等国际流行的大气辐射传输软件来计算大气透过率,它们提供了 6 种大气模式和 1 种用户输入模式。这 6 种大气模式难以涵盖全球范围的大气条件,而用户输入模式虽然能够计算特定大气条件的透过率,但时效性差,不便于软件的集成开发,难以满足一些工程应用的需求。1995 年,魏合理^[4] 等人编制了红外辐射大气透过率计算软件包,增加了国内若干地点的大气模式,但使用的大气条件为 1960~1969 年间的观测结果,与当前大气条件有一定差异。陈秀红^[5] 等基于 LBLRTM^[6] 模型研制了红外大气透过率模式软件 IATM,提高了计算速度和精度,嵌入了我国典型地区近年来逐月平均的大气模式,但仍难以满足实时计算全球特定大气条件下大气透过率的需要。此外,吴晗平^[7]、周国辉^[8]、王迪^[9] 等给出了大气透过率的简便算法,魏合理^[10]、吴荣华^[11]、李红云^[12] 等进行了基于红外辐射测量的大气修正研究。由于影响大气透过率的因素十分复杂,计算时需要考虑大气分子的吸收、分子连续吸收、大气散射和气溶胶衰减等因素,实现难度较大。

随着遥感探测技术的发展,纵跨多纬度乃至覆盖全球的单幅遥感图像不断涌现,简单地用几种典型的大气透过率来反演整幅图像的遥感信息将带来较大误差。针对该问题,本文提出了一种统计回归大气透过率的实时计算方法,可实时计算不同地区、季节大气条件下的大气透过率廓线,为云信息反演及大气程辐射计算等提供必要的参

数。首先,从非均匀大气的 Curtis-Godson(CG)近似法入手,推导了统计回归模型,并建立了等效光学质量的计算方法;然后,以 MODTRAN 计算的 6 种大气模式的透过率廓线及其大气剖面数据为样本,计算了统计回归参数,并用 NCEP 再分析资料提供的温湿度数据验证了模型精度;最后,提出天顶角修正公式,实现斜程透过率廓线的计算,扩大了模型的应用范围。该统计回归模型算法简单、计算快速、精度较高,与实测温湿度数据结合可实时计算透过率廓线,可应用于遥感图像的信息反演。

2 统计回归大气透过率模型

统计回归大气透过率模型(Statistical Regression Atmospheric Transmittance Model, SRATM)包括建立统计回归方程、数据准备、计算等效光学质量和天顶角修正 4 部分。本文重点讨论 10~15 μm 长波红外大气透过率廓线的实时计算。

2.1 统计回归方程

对于一般非均匀路径的光谱吸收计算,通常采用 CG 近似法将整个非均匀路径转换为等效均匀路径,并寻找一组吸收系数和吸收气体含量,使得非均匀路径的吸收气体光谱的光学厚度为^[13]:

$$\tau_{\lambda} = \int_{\Delta z} k_{\lambda}(p_z, T_z) \rho dz = \bar{k} \cdot \bar{u}, \quad (1)$$

其中: ρ 为吸收气体的质量浓度; z 为大气层高度; p_z, T_z, k_{λ} 分别为 z 高度大气层的气压、温度和光谱质量吸收系数; \bar{k} 为等效质量吸收系数; \bar{u} 为等效光学质量。则气体分子的光谱吸收透过率可表示为:

$$t_{\text{mole}, \lambda} = \exp(-\tau_{\lambda}) = \exp(-\bar{k} \cdot \bar{u}). \quad (2)$$

整层大气的光谱透过率为气体分子吸收、分子连续吸收、散射以及气溶胶衰减等各部分透过率之积。对于 10~15 μm 长波红外辐射而言,主要吸收气体为水汽和 CO_2 , 则整层大气光谱透过率可表示为:

$$t_{\lambda} = t_{\lambda, H_2O} \cdot t_{\lambda, CO_2} \cdot t_{\lambda, other}, \quad (3)$$

其中: t_{λ, H_2O} 为水汽的光谱透过率; t_{λ, CO_2} 为 CO_2 的光谱透过率; $t_{\lambda, other}$ 为其它因素的光谱透过率, 包含大气散射和气溶胶衰减等。上述各透过率可通过 MODTRAN 计算得到。

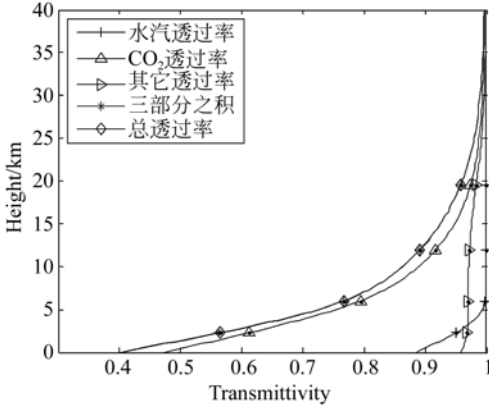


图 1 亚北极冬季 13.185 ~ 13.485 μm 波段的垂直透过率廓线

Fig. 1 Vertical transmittance profile of subarctic winter in 13.185 ~ 13.485 μm band

将式(3)推广到波段透过率, 该结论依然成立。如图 1 所示, 13.185 ~ 13.485 μm 波段水汽、 CO_2 及其它透过率之积与总透过率基本重合。于是有:

$$t = t_{H_2O} \cdot t_{CO_2} \cdot t_{other}, \quad (4)$$

其中各透过率均为波段透过率。

同一个波段, 在不同大气条件 1, 2 下有:

$$\begin{cases} t_1 = t_{H_2O, 1} \cdot t_{CO_2, 1} \cdot t_{other, 1} \\ t_2 = t_{H_2O, 2} \cdot t_{CO_2, 2} \cdot t_{other, 2} \end{cases} \quad (5)$$

经计算发现, 10 ~ 15 μm 同一窄波段不同大气条件的 t_{other} 差异较小, 假设 $t_{other, 1} = t_{other, 2}$, 则由式(4)、(5)可得:

$$t_2 = t_1 \cdot \exp(-\bar{k}_{H_2O, 2} \bar{u}_{H_2O, 2} + \bar{k}_{H_2O, 1} \bar{u}_{H_2O, 1} - \bar{k}_{CO_2, 2} \bar{u}_{CO_2, 2} + \bar{k}_{CO_2, 1} \bar{u}_{CO_2, 1}). \quad (6)$$

若 $\bar{k}_{H_2O, 1} = \bar{k}_{H_2O, 2} = k_{H_2O}$, $\bar{k}_{CO_2, 1} = \bar{k}_{CO_2, 2} = k_{CO_2}$, 则式(6)可以表示为:

$$t_2 = t_1 \cdot \exp[-k_{H_2O}(\bar{u}_{H_2O, 2} - \bar{u}_{H_2O, 1}) - k_{CO_2}(\bar{u}_{CO_2, 2} - \bar{u}_{CO_2, 1})]. \quad (7)$$

因此, 由整层大气透过率廓线 t 和等效光学质量 \bar{u}_{H_2O} , \bar{u}_{CO_2} , 通过建立统计回归方程可计算得到当前波段的质量吸收系数 k_{H_2O} , k_{CO_2} 。提出

的统计回归方程为:

$$t = t_0 \cdot \exp[-k_{H_2O}(\bar{u}_{H_2O} - \bar{u}_{H_2O, 0}) - k_{CO_2}(\bar{u}_{CO_2} - \bar{u}_{CO_2, 0})] + c \cdot (\bar{u}_{H_2O} - \bar{u}_{H_2O, 0}), \quad (8)$$

其中: t_0 为亚北极冬季的垂直透过率廓线; $\bar{u}_{H_2O, 0}$, $\bar{u}_{CO_2, 0}$ 分别为亚北极冬季水汽、 CO_2 的等效光学质量; $c \cdot (\bar{u}_{H_2O} - \bar{u}_{H_2O, 0})$ 为修正项。

2.2 数据准备

MODTRAN 内嵌了热带(TROP)、中纬度夏季(MS)、中纬度冬季(MW)、亚北极夏季(SS)、亚北极冬季(SW)及 1976 年美国标准大气(US STD)6 种大气模式。这 6 种大气模式基本上涵盖了全球大气条件变化范围, 大气透过率差异明显。为了获取精细的垂直大气透过率廓线, 本文将整层大气分为 98 层(具体分层如下: 0 ~ 10 km 为 0.25 km/层; 10 ~ 25 km 为 0.5 km/层; 25 ~ 45 km 为 1 km/层; 45 ~ 70 km 为 5 km/层, 以及 80 km 和 90 km), 逐层计算各种大气模式的透过率, 并将计算结果作为统计回归模型样本。MODTRAN 的基本参数设置如下: CO_2 体积混合比为 380×10^{-6} v; 气溶胶模式为农村, VIS = 23 km; 无云和雨; 斜路径至太空, 天顶角为 0° ; 波数为 $667 \sim 10\,000 \text{ cm}^{-1}$ 。

2.3 等效光学质量

描述吸收气体含量的单位很多, 常见的有大气厘米数 D 、质量混合比 ω 、质量浓度 ρ 、体积混合比 φ 等。MODTRAN 中气体含量单位是大气厘米数, NCEP 再分析资料温湿数据是质量混合比。为了便于比较, 将气体含量单位统一为质量浓度, 转换关系如下:

$$\rho = \frac{M}{22.4} \times 10^{-5} \times D, \quad (9)$$

其中 M 为相对分子质量。 $M_{H_2O} = 18.015$, $M_{CO_2} = 44.009$ 。

$$\rho = \rho_0 \times \frac{T_0}{P_0} \times \frac{P(z)}{T(z)} \times \omega, \quad (10)$$

其中: $\rho_0 = 1.293 \text{ kg/m}^3$, 为标准状态的大气密度; $T_0 = 273 \text{ K}$; $P_0 = 1\,013 \text{ hPa}$ 。

$$\rho = \frac{M}{22.4} \times \frac{T_0}{P_0} \times \frac{P}{T} \times 10^{-6} \times \varphi. \quad (11)$$

由 CG 近似可知, 非均匀大气下一定光谱区间的等效光学质量为^[13]:

$$\bar{u} = \int_{\Delta z} \Phi(T) \rho dz, \quad (12)$$

其中: $\Phi(T) = \frac{\sum_i S_i(T)}{\sum_i S_i(T_e)}$, 定义为吸收气体含量

修正函数; T_e 为等效温度。吸收谱线强为:

$$S(T) = \frac{Q_v(T_0) Q_r(T_0)}{Q_v(T) Q_r(T)} \frac{e^{-c_2 E''/T} (1 - e^{-c_2 \nu/T})}{e^{-c_2 E''/T_0} (1 - e^{-c_2 \nu/T_0})}, \quad (13)$$

其中: $Q_v(T)$, $Q_r(T)$ 分别为吸收气体的振动和转动配分函数; c_2 为第二辐射常数; E'' 为谱线低能级能量; ν 为波数。不难看出 $S(T)$ 具有复杂的温度依赖关系。由 HITRAN 可知, $S(T) \propto T$, 进而有 $\Phi(T) \propto T$ 。实验发现, 当修正函数 $\Phi(T) = \left(\frac{T}{T_0}\right)^n$ 时, 统计回归模型的大气透过率廓线的反演效果较好。其中, n 为经验常数, $n = 6$ (水汽), $n = 4$ (CO_2); $T_0 = 310 \text{ K}$ 。则等效光学质量可表示为:

$$\bar{u} = \int_{\Delta z} \left(\frac{T}{T_0}\right)^n \rho dz. \quad (14)$$

2.4 天顶角修正

上述统计回归模型计算得到的是整层大气的垂直透过率廓线。实际上, 遥感图像中绝大多数的观测值是通过倾斜路径到达探测器的, 天顶角越大, 对透过率的影响越大, 因此, 有必要对大气透过率进行天顶角修正。

当大气辐射传输路径与垂直方向的夹角(即天顶角)为 θ 时, 斜程路径 s 与垂直路径 z 的关系为 $s = z/\cos \theta$, 单色谱线的斜程光学厚度为:

$$\tau_{\lambda,s} = \frac{1}{\cos \theta} \tau_{\lambda,z}, \quad (15)$$

其中 $\tau_{\lambda,z}$ 为垂直光学厚度。将式(14)代入式(2)和式(3), 可以得到斜程光谱透过率:

$$t_{\lambda,s} = t_{\lambda,z}^{1/\cos \theta}, \quad (16)$$

其中 $t_{\lambda,z}$ 为垂直光谱透过率。将式(16)直接用于斜程波段透过率的计算, 天顶角越大, 透过率误差越大(如图5所示), 由此可见, 上式并不适用于斜程波段透过率的计算。实验表明, 天顶角修正的经验公式为:

$$t_s = t_z^{1/\cos(0.83\theta)}, \quad (17)$$

可以得到较好的拟合效果。

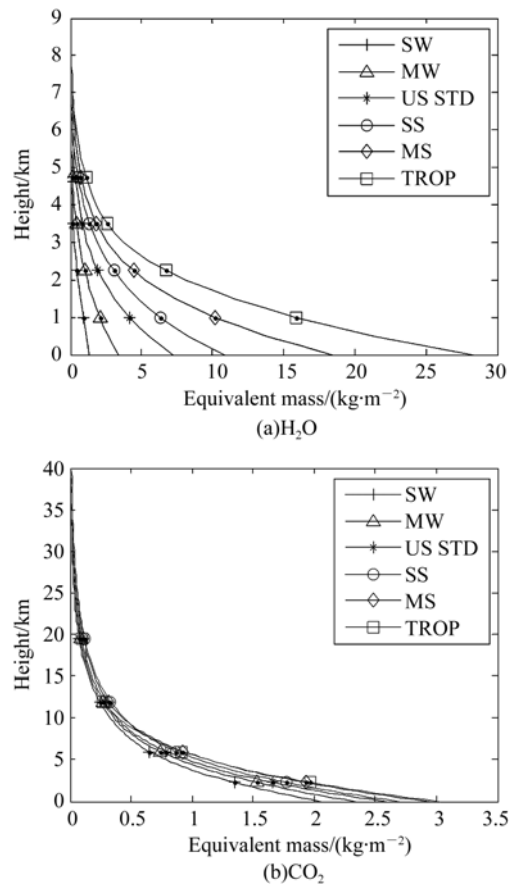


图2 水汽、 CO_2 的等效光学质量廓线

Fig.2 Equivalent optical mass profiles of water vapor and CO_2

3 结果及分析

3.1 计算模型参数

首先, 用 MODTRAN 分层计算 6 种大气模式的垂直透过率廓线。然后, 根据上述等效光学质量计算方法, 计算水汽和 CO_2 的等效光学质量。最后, 将垂直透过率廓线及等效吸收气体含量代入统计回归方程, 以反演的透过率廓线与 MODTRAN 计算结果误差最小为准则, 计算指定波段的统计回归参数 $k_{\text{H}_2\text{O}}$, k_{CO_2} 和 c 。

MODIS 是美国宇航局 (NASA) 为地球观测计划 (EOS) 发射的卫星, 它可同时获得可见光到近红外 (0.405 ~ 14.385 μm) 的 36 个波段, 包括 250, 500, 1 000 m 3 种空间分辨率, 且每天至少获得 2 次白天和 2 次黑夜的数据。鉴于其高光谱分辨率、空间分辨率及数据更新频率, MODIS 数据在地球科学综合研究、地球监

测和应急处理等领域具有非常重要的实用价值。本文计算了 MODIS 31 ~ 36 波段的透过率廓线统计回归参数,并统计分析了反演误差,结果如图 3 所示。

波段 31,32 为透过窗口,主要吸收气体是水汽,随着高度的增加,吸收迅速减小,此时水汽质量的吸收系数较小;波段 33 ~ 34 为吸收波段,主

要吸收气体是水汽和 CO₂,且随着波长的增加,吸收分子的吸收能力不断增强,质量吸收系数不断增大。由表 1 可以看出,本文计算的质量吸收系数 k_{H_2O} , k_{CO_2} 反映了这一变化规律。从误差统计情况看,波段 31,33,34 精度较高,波段 32,35,36 次之,平均误差为 1.39%。

表 1 统计回归模型参数及反演误差

Tab.1 Parameters and retrieval errors of statistical regression model

序号	波段宽度/ μm	$k_{H_2O}/10^{-2}$	k_{CO_2}	$c/10^{-2}$	最大误差/%	误差均值/%	误差方差/%
31	10.780 ~ 11.280	0.003 5	0	1.737 6	1.17	-0.03	0.25
32	11.770 ~ 12.270	1.174 2	0	1.166 8	1.72	-0.08	0.35
33	13.185 ~ 13.485	5.289 3	0.382 1	0	1.00	-0.04	0.40
34	13.485 ~ 13.785	4.538 7	0.683 9	0	1.12	-0.10	0.44
35	13.785 ~ 14.085	7.387 0	1.027 3	0.003 9	1.36	0.13	0.62
36	14.085 ~ 14.385	20.565	2.332 9	1.583 4	1.96	-0.38	0.68

引起误差的主要原因有:(1)等效吸收气体含量修正函数 $\Phi(T)$ 存在偏差;(2)对大气分子吸收考虑不全面,仅考虑了水汽及 CO₂ 的吸收透过率;(3)6 种大气模式的 t_{other} 并不完全相等,存在一定的偏差;(4)没有对水汽的连续吸收进行有效的拟合。

和风速等大气环境参数。本文从大气温度和比湿两组数据中分别选取(45°N,120°E)春分、夏至、秋分、冬至以及(15°N,120°E)夏至、(60°N,120°E)夏至 12 时等 6 组不同地区、季节的温湿度数据,在进行高度订正后代入 MODTRAN 计算各自的垂直透过率廓线,如图 4 所示,将计算结果与模型反演的透过率廓线进行比较,以验证模型精度,测试误差如表 2 所示。CO₂ 是典型的均匀混合气体,其含量取 380×10^{-6} 。

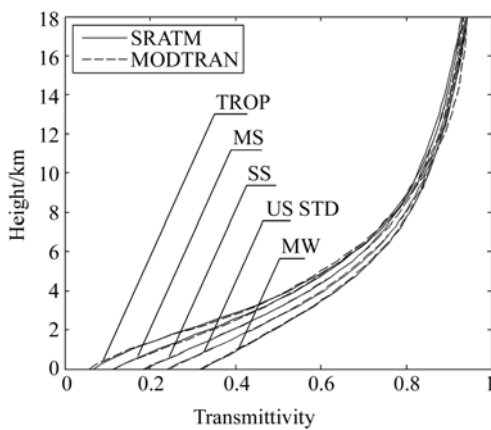


图 3 13.185 ~ 13.485 μm 波段大气透过率廓线反演误差
Fig.3 Retrieval errors of atmospheric transmittance profile in 13.185 ~ 13.485 μm band

3.2 验证模型精度

NCEP 再分析资料是美国国家环境预报中心提供的全球气象资料数据库,包含大气温度、湿度

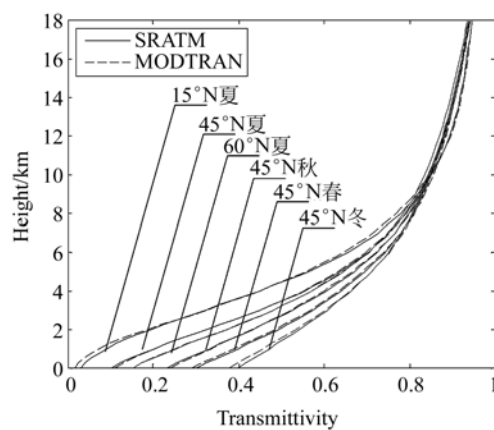


图 4 13.185 ~ 13.485 μm 波段统计回归模型测试误差
Fig.4 Testing errors of statistical regression model of atmospheric transmittance profile in 13.185 ~ 13.485 μm band

表2 统计回归模型测试误差

Tab.2 Test error of statistical regression model

(%)

波段宽度/ μm	45°N 春		45°N 夏		45°N 秋		45°N 冬		15°N 夏		60°N 夏	
	最大 误差	平均 误差	最大 误差	平均 误差	最大 误差	平均 误差	最大 误差	平均 误差	最大 误差	平均 误差	最大 误差	平均 误差
10.780~11.280	0.10	0.01	3.17	-0.04	1.81	-0.08	0.63	0.06	5.07	0.17	0.92	0.04
11.770~12.270	0.21	-0.01	3.86	-0.08	2.36	-0.14	1.02	0.08	8.33	0.06	1.29	0.04
13.185~13.485	1.08	0.12	0.71	-0.02	0.93	0.03	2.02	0.07	1.78	0.35	0.83	-0.14
13.485~13.785	0.86	0.18	0.83	-0.18	0.74	0.04	1.41	0.26	1.16	0.20	1.06	-0.37
13.785~14.085	1.11	0.32	1.28	-0.03	1.27	0.26	1.18	0.39	1.81	0.15	1.14	-0.18
14.085~14.385	0.76	-0.07	2.18	-0.44	1.31	-0.01	0.68	-0.01	3.31	-0.01	1.95	-0.69

结果表明,除15°N夏季、45°N夏季的个别数据反演误差偏大外,其余反演误差均较小,与统计回归模型统计的误差基本一致。

3.3 天顶角修正结果

图5为高度0,2,5,10 km,天顶角从0~60°的MODTRAN计算的大气透过率与由式(16)直接修正及经验公式修正的透过率对比示意图。据统计,由经验公式修正后的透过率与MODTRAN

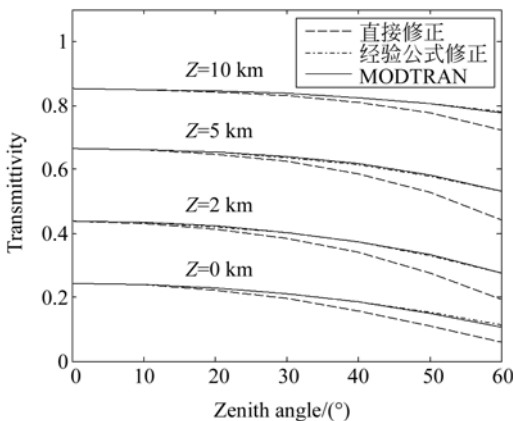


图5 大气透过率天顶角修正示意图

Fig.5 Sketch map of atmospheric transmittance zenith angle correction

计算结果的最大误差为0.77%,均值为-0.02%,方差为0.2%。

4 结论

本文从非均匀大气的CG近似方法入手,建立了统计回归方程及等效光学质量的计算方法,以MODTRAN计算的6种大气模式的透过率廓线及其温度、气压、水汽和CO₂剖面数据为样本,计算了统计回归参数并进行了误差分析。从NCEP再分析资料中获取了6组不同地区及季节的大气温湿度数据,验证了模型精度。最后提出一种大气透过率天顶角修正的经验公式,将垂直透过率拓展到斜程透过率,扩大了模型的应用范围。本文用统计回归方法实现了复杂的大气透过率计算,既简化了计算过程,提高了计算速度,又不需要太多专业知识,降低了应用门槛,便于工程应用。计算结果表明,该模型反演的平均最大误差为1.39%,单波段透过率廓线的计算时间不足0.08 s。该方法与实测的温湿度数据相结合,可实时计算观测点的大气透过率廓线,从而避免了用几种典型大气模式的透过率近似替代所引入的误差,有效地提高了遥感图像信息的反演精度。

参考文献:

- [1] KNEIZYS F X, SHETTLE E P, ABREU L W, *et al.*. *User Guide to LOWTRAN7*[M]. Hanscom AFB AFGL-TR-88-0177. Air Force Geophysics Laboratory, MA 01731, 1988.
- [2] BERK A, ANDERSON G P, ACHSRYA P K, *et al.*. *MODTRAN4 User's Manual*[M]. Hanscom AFB MA: Air Force Research Laboratory Space Vehicle Directo-

rate Air Force Material Command, 1997.

- [3] CLOUGH S A, KNEIZYS F X, SHETTLE E P, *et al.*. *Atmospheric radiance and transmittance: FASCOD2[A]*// Sixth Conference on Atmospheric Radiation[C]. Williamsburg, VA, 1986.
- [4] 魏合理, 宋正方. 红外辐射大气透过率的计算[J]. 红外与毫米波学报, 1995, 14(2): 159-160.
- WEI H L, SONG ZH F. The calculation of infrared atmospheric transmittance [J]. *J. Infrared Millim.*

- Waves, 1995, 14(2): 159-160. (in Chinese)
- [5] 陈秀红, 魏合理, 徐青山. 红外大气透过率的计算模式[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 811-816.
- CHEN X H, WEI H L, XU Q SH. Infrared atmospheric transmittance calculation model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 811-816. (in Chinese)
- [6] AER's Radiative Transfer Working Group. AER's public release radiative transfer models and databases [Z/OL]. <http://WWW.rtweb.aer.com>. [2002-09-30]
- [7] 吴晗平. 红外辐射大气透过率的工程理论计算方法研究[J]. 光学精密工程, 1998, 6(4): 35-43.
- WU H P. Research into theoretical calculation method on engineering of transmittance of infrared radiation through atmosphere[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6(4): 35-43. (in Chinese)
- [8] 周国辉, 刘湘伟, 徐记伟. 一种计算红外辐射大气透过率的数学模型[J]. 红外技术, 2008, 30(6): 331-334.
- ZHOU G H, LIU X W, XU J W. A math model of calculate the atmospheric transmittance of infrared radiation[J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(6): 331-334. (in Chinese)
- [9] 王迪, 李承芳, 熊飞. 大气红外辐射传输的简便算法与MODTRAN 的比较[J]. 光学技术, 2006, 32(增): 293-298.
- WANG D, LI CH F, XIONG F. The method of calculate the transmittance of infrared radiation through atmosphere and compared with MODTRAN [J]. *Optical Technique*, 2006, 32 (Suppl.): 293-298. (in Chinese)
- [10] 魏合理, 陈秀红, 詹杰, 等. 红外辐射测量的大气修正[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(6): 472-478.
- WEI H L, CHEN X H, ZHAN J, et al.. Atmospheric correction in the measurement of infrared radiance [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(6): 472-478. (in Chinese)
- [11] 吴荣华, 王江安, 任席闯, 等. 空中目标红外辐射多波长大气透过率实时反演算法[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(11): 1650-1654.
- WU R H, WANG J A, REN X CH, et al.. Real-time inversion algorithm of multi-wavelength atmospheric transmissivity for aerial target infrared radiation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(11): 1650-1654. (in Chinese)
- [12] 李云红, 张龙, 王延年. 红外热像仪外场测温的大气透过率二次标定[J]. 光学精密工程, 2010, 18(10): 2143-2148.
- LI Y H, ZHANG L, WANG Y N. Second calibration of atmospheric transmission coefficients on temperature measurement of infrared thermal imager in fields [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2143-2148. (in Chinese)
- [13] 饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- YAO R ZH. *Modern Atmospheric Optical* [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)

作者简介:



程楚雄(1985 -),男,湖南湘潭人,主要从事空间信息获取与处理技术的研究。E-mail: nudtcheng@163.com

导师简介:



程洪玮(1964 -),男,广西宾阳人,博士,研究员,主要从事航天系统总体设计、遥感科学等方面的研究。E-mail: chenghongwei999@sina.com.cn