

文章编号: 1001-4322(2004)02-0149-05

## 大气辐射传输模型的比较研究\*

孙毅义, 董 浩, 毕朝辉, 李治平

(烟台大学 数学与信息科学系, 山东 烟台 264005)

摘 要: 讨论了三种通用的大气辐射传输模型的特点和使用限制, 用辐射传输定律作了数值检验, 并与实验测量资料作了比较。结果表明, 氧碘激光和氟化氢泛频 20P4 激光谱线大气透过率的计算值与实验测量值吻合, 氟化氢泛频 20P5 却出现严重偏差。还研究了大气气溶胶种类对大气透过率计算和测量的严重影响。

关键词: 大气传输模型; 大气透过率; 激光大气传输; FASCODE; MODTRAN; LOWTRAN; HITRAN

中图分类号: O438; P421

文献标识码: A

光辐射在大气中传输受到大气吸收和散射的影响, 使到达接收系统的光辐射能量减弱, 同时光辐射也携带了大气本身的信息。根据不同的应用目的, 人们将把辐射源的波长选择在“大气窗口”以增加到达接收系统的能量, 或选择在特定分子成分的吸收峰附近以测量传输路径上这类分子成分的含量。尽管应用目的不同, 它们都需要定量地求得测量时刻的大气透过率和辐射效应, 正确地解释观测(遥感)资料。为此, 大气传输模型一直为光电测量系统的设计人员和一些与地球大气中辐射传输有关的研究(如环境监测、气候学、气象学、激光传输及红外成像技术)所关注, 光辐射大气传输模型的研究和应用越来越受到重视。经过大量大气科学工作者三十多年的努力, 已经成功地开发并建立了宽、窄光谱带和逐个光谱线计算的大气辐射传输模型, 这些传输模型包括多种观测方式, 适用于非常宽的电磁波谱范围及多种可变气象要素。这些实用的大气传输模型对主动或被动型目标辐射传输及背景辐射的计算有着十分重要的应用价值。

本文将简要地介绍目前比较通用的大气辐射传输模型 LOWTRAN<sup>[1]</sup>, MODTRAN<sup>[2]</sup>和 FASCODE<sup>[3]</sup>的共同特点和主要差异, 用辐射传输中常用的 Beer 定律检验大气辐射传输模型, 给出高分辨率大气辐射传输模型对某些具有应用价值的化学激光大气传输的计算结果, 并与已发表的实验观测资料相比较。希望通过介绍和结果的比较, 使一些非大气传输专业的光电设计工程技术人员能够正确选择和使用大气辐射传输模型, 有助于光电系统的设计和仿真, 并能正确地定量解释实际大气环境中观测(遥感)到的资料。

### 1 三种大气辐射传输模型的共同特点和主要差别

LOWTRAN, MODTRAN 和 FASCODE 都是由美国空军地球物理实验室(AFGL)根据不同的应用目的而开发和研制的宽带、窄带和逐线计算的大气辐射传输模型及其相应的应用软件。它们之间相互借鉴, 取长补短, 具有一组共享的公共模块, 在编程时如同拼积木似的互相调用, 这样也便于互相比较。

这三个大气辐射传输模型具有如下共同的特点: 它们都可以在非常宽的电磁波谱范围( $0 \sim 50\,000\text{cm}^{-1}$ ,  $0.2\mu\text{m} \sim \infty$ )内使用, 都涉及了复杂大气条件下多种辐射传输量的计算。在这些计算模型中都包括了 1976 年美国标准大气作为高度函数的温度、压力、密度以及水汽、臭氧、甲烷、一氧化碳和一氧化二氮等 30 种气体混合比的六种参考模型大气, 这些大气模型适合气候学选择的范围。同时还可以根据理论计算或实测资料, 由用户自行定义模型大气, 使这个模型在特定环境下仿真和使用显得特别灵活。此外, 在这些传输模型实用程序中包括了具有代表性的大气、气溶胶、云和雨的模型, 这些复杂的天气环境使它们具有更广泛的应用。模型还包括了水平、垂直、倾斜向上和向下传输等各种复杂的几何关系, 在计算大气倾斜路径及沿着传输路径衰减量时, 都考虑了大气折射和地球的曲率。

这些辐射传输模型都利用了 HITRAN<sup>[4,5]</sup>数据库中的基本分子常数, 然而, 它们采取了各不相同的处置方法把这些常数换算成透过率和辐射度, 显然, 这些辐射传输模型具有不同的精确性。下面我们将讨论这些模型在应用这个信息时所采取的不同方法。

\* 收稿日期 2003-05-30; 修订日期 2003-08-18

作者简介: 孙毅义(1937—), 男, 研究员, 从事大气光学(激光传输)和卫星遥感资料定量化研究, E-mail: ies@ytu.edu.cn

在 HITRAN 数据库出现之前,LOWTRAN4A 利用  $20\text{ cm}^{-1}$  分辨率的经验透过函数和有效吸收系数。从 LOWTRAN5 开始首次引入 HITRAN80,以后,LOWTRAN 的每个新版本都在分子成分的数目和计算效率上作了改进。直到 1986 年 LOWTRAN7 把吸收带模型直接与 HITRAN86 连接,使用单参数(压力)带模型(吸收系数)加上分子密度尺度函数。利用最小二乘方方法与逐线计算的透过率拟合,作了大量光学厚度的计算。MODTRAN 除了把 LOWTRAN  $20\text{ cm}^{-1}$  (FWHM)的光谱分辨率和在  $5\text{ cm}^{-1}$  (bin)光谱间隔上作分子吸收计算改进为  $2\text{ cm}^{-1}$  (FWHM)的光谱分辨率和在  $1\text{ cm}^{-1}$  (bin)光谱间隔上作分子吸收计算外,它使用了三个与温度有关的参数(吸收系数、线密度参数和平均带宽),使之更精确地服从分子跃迁的温度和压力关系(能级粒子数和 Voigt 线形)。

由于 LOWTRAN 局限于 Lorentz 压力为主的线形,只适用于 30km 以下的高度,而 MODTRAN 同时考虑了 Lorentz 压力加宽和 Doppler 移动(与温度有关)加宽相结合的 Voigt 线形,可以在更高高度上使用。但是,在高于 60km 的高度上,大部分分子不再处于局地热力平衡状态,这意味着有些分子带的强度不再由环境温度确定。MODTRAN 没有对非局地热力平衡态的分子带进行合理的处理,它的适用高度限于 60km 以下。

另外,与 FASCODE 精确计算每一层大气的光学厚度的做法不同,MODTRAN 采用适合于地球大气中中等温度变化的 Curtis-Godson 近似,通过一个等效均匀路径来代替多层路径的计算,因而,MODTRAN 不可能达到 FASCODE 的精度。

FASCODE 是一个完全的逐线 Beer-Lambert 算法,它以最精细的光谱分辨率“精确”计算孤立的、重叠的分子谱线,这样的光谱分辨率与任意版本的 HITRAN 的分子成分跃迁资料相兼容。通过对每一层分子吸收、散射效应(分子和气溶胶)及一些连续吸收的计算,FASCODE 提供了“精确”透过率计算的处理。并且 FASCODE 考虑了非局地热力平衡状态的处理,原则上它的应用高度不受限制。因此,FASCODE 通常用作评估遥感系统和/或参数化带模型的基准。

## 2 Beer-Lambert 方程符合程度的检验

Beer 定律也称布给(Bouguer)定律,是大气辐射传输中常用的定律。沿着  $z$  方向传播的平面波,以微分形式书写的布给定律为

$$dI(\nu) = -I(\nu)\alpha(\nu,z)dz \quad (1)$$

式中  $dI(\nu)$  是波数为  $\nu$  的单色辐射强度  $I(\nu)$  通过媒质层厚度  $dz$  以后的强度变量,  $\alpha(\nu,z)$  为媒质的衰减系数。(1)式的积分表达式为

$$I(\nu) = I_0(\nu)\exp[-\alpha(\nu,z)L] \quad (2)$$

在厚度为  $L$  的均匀媒质层内传输,(2)式可以写成

$$I(\nu) = I_0(\nu)\exp[-\alpha(\nu)L] \quad (3)$$

式中  $I_0(\nu)$  为初始辐射强度,指数  $\alpha(\nu)L$  称为媒质层的光学厚度,通常用  $\tau(\nu)$  表示。

实际上,布给定律是指单色辐射的传输方程。根据定义,带模型不能服从布给定律。但是,人们通常也用它来计算用平均波长表示的带模型的传输。问题在于:所有吸收带模型基本上都计算“全程”的量,而不作分层计算,这样势必带来一定的误差。MODTRAN 也不进行分层计算,而进行了压力(或密度)加权的整个空气柱总量的计算。这种加权量连同带模型光谱参数(光谱间隔中的光谱线的平均数和平均强度,加上附加的连续吸收来描述超过  $1\text{ cm}^{-1}$  间隔的扩展线型)可以求得分子成分的全程透过率,于是,总的透过率是全程各个分子成分透过率、散射衰减和连续吸收透过率的乘积。

表 1 列出了用三种大气传输模型计算氧碘化学激光大气透过率以及  $2.7\mu\text{m}$  水汽吸收带附近某波长处的大气透过率的结果。其中水平传输是在地面温度 285 K,相对湿度 92%, $\text{CO}_2$  的体积分数为  $360 \times 10^{-6}$ ,地面能见度 10km 和农村气溶胶情况下的计算结果。而在倾斜向上传输中,采用了美国标准大气,地面能见度 10km,农村气溶胶和  $30^\circ$  观测天顶角的情况。表中  $T_n$  为  $n\text{ km}$  水平传输路径的透过率, $T_{n_1-n_2}$  为高度  $n_1$  到高度  $n_2$  之间的大气透过率。由表可见,在这样最通常的情况下,由于吸收带模型处理分子成分吸收的方式与 FASCODE 不同,LOWTRAN 和 MODTRAN 的计算结果显然带有一定的误差。其中,LOWTRAN 计算的透过率与布给定律偏离的绝对误差将超过 7%,MODTRAN 小于 3%,FASCODE 小于 1%。由此可见,MODTRAN 基本上符合 Beer-Lambert 定律,而 LOWTRAN7 显然具有较大的偏差,也就是说在使用 LOWTRAN7 时需要注意到它的精

度。这就是为什么从 20 世纪 90 年代起 ,MODTRAN 已经取代了 LOWTRAN7 的原因。MODTRAN 这种处理方式与 FASCODE 的计算已经十分接近。

表 1 三种大气传输模型符合 Beer 定律的检验

Table 1 Numerical tests for the three models through Beer's law					
horizontal paths					
wavelength/cm <sup>-1</sup>	model	atmospheric transmittance			
		$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_1 \times T_2$
7 603.138	FASCODE 3	0.839 6	0.701 8	0.586 7	0.589 2
	HITRAN2000				
7 603	MODTRAN	0.776 2	0.617 0	0.494 8	0.478 9
	HITRAN96				
7 605	LOWTRAN 7	0.654 1	0.496 0	0.386 4	0.324 4
slant paths					
wavelength/cm <sup>-1</sup>	model	atmospheric transmittance			
		$T_{0-2}$	$T_{2-5}$	$T_{0-5}$	$T_{0-5} \times T_{2-5}$
7 603.138	FASCODE 3	0.775 5	0.959 9	0.744 4	0.744 4
	HITRAN2000				
7 603	MODTRAN	0.726 2	0.920 2	0.678 8	0.668 2
	HITRAN96				
7 605	LOWTRAN 7	0.617 5	0.825 6	0.566 3	0.509 8
atmospheric transmittance near 2.7μm absorption band for slant paths					
wavelength/cm <sup>-1</sup>	model	atmospheric transmittance			
		$T_{0-2}$	$T_{2-5}$	$T_{0-5}$	$T_{0-2} \times T_{2-5}$
3 411	FASCODE 3	0.610 3	0.848 5	0.524 2	0.518 7
	HITRAN2000				
3 411	MODTRAN	0.517 6	0.783 8	0.422 8	0.405 7
	HITRAN96				
3 410	LOWTRAN 7	0.304 4	0.541 0	0.232 9	0.164 7

另外 ,由表还可以见到 ,这三个模型计算得到的大气透过率数值差别很大 ,这是由于三个模型具有不同光谱分辨率所致。在研究激光大气传输时 ,千万不能用低分辨率大气辐射传输模型 ,而在计算宽光谱带大气透过率时 ,为了保证必要的精度 ,最好使用 MODTRAN ,当然也可以使用 FASCODE ,但需花费大量的时间求积分。

3 与外场测量资料的比较

要从已发表的文献中寻找和选择合适的大气光谱传输外场测量资料是相当困难的 ,因为开展这类实验测量需要高精度的测量设备和长距离、长时间的测量资料的积累 ,并要求详细记录实验期间各种有关的气象参数。为了说明 FASCODE3P 的实用价值 ,选择了具有应用潜力的 1.315μm 高能碘激光( COIL )和氟化氢泛频 20P4 20P5 激光谱线大气透过率的实验测量<sup>[ 6 7 ]</sup>结果。我们根据现场测量资料中提供的温度、水汽含量和能见度数值以及实验距离 ,用 FASCODE3 软件和 HITRAN2000 进行了上述三种激光波长大气透过率的计算。表 2 列出了 FASCODE3( HITRAN2000 )在与实验条件相同的情况下的计算结果 ,为便于比较 ,表中同时列出了已发表的实验测量到的大气透过率数值。

表 2 FASCODE3 ( HITRAN2000 ) 的计算结果及与实验测量结果的比较

Table 2 Comparison between the results calculated by FASCODE3 ( HITRAN2000 ) and measured by some groups

laser line		atmospheric transmittance	
line	wavelength	calculated value	measured value *
20P4	7 568.590	0.8 136	0.765
20P5	7 516.819	0.7 755	0.105
COIL	7 603.138	0.942	0.919

\* The measured transmittance for 20P4 and 20P5 are for 1km path length taken from[ 7 ] , the value of COIL is for 460m taken from[ 6 ] .

由于上述两次外场实验均未提供大气气溶胶的类别 ,在计算中我们把合肥地区实验的气溶胶类别假定为农村地区气溶胶( 这一假定已经通过 FASCOD2 计算结果与实验测量结果的比较所证实<sup>[ 8 ]</sup> ) ,而把四川绵阳实验测量的气溶胶类别假定为城市上空气溶胶。注意 :表中所列的 COIL 结果是指 460m 传输距离上的大气透过率 ,而 20P4 和 20P5 是指 1km 传输距离上的大气透过率。

由表可见 ,对于 20P4 和 COIL 激光谱线 FASCODE3( HITRAN2000 )与实验测量的结果基本吻合 ,其中出现的一些小的偏差( 小于 5% ) ,可能来自实验测量本身的误差以及所提供的气象参数所含的误差。但是 ,对氟化氢泛频 20P5 激光而言 ,理论模型与实验测量值之间出现了极大的偏差 ,这种偏差已无法用气象参数、实验测量等误差和大气的吸收成分的瞬时改变来解释。

为了探讨这种偏差可能发生的原因 ,我们计算了氟化氢泛频激光谱线附近的大气透过率的光谱分布。图 1 分别展示了用 FASCOD3P( HITRAN2000 )计算的 COIL 氟化氢泛频激光 20P4 20P5 和 20P6 附近的大气透过率光谱分布曲线。由图可见 ,如果激光波长发生偏移 ,可能引起透过率数值的极大差异。但文献 [ 7 ]没有提到实验过程中是否作了激光波长的实时监测和定标 ,使分析误差来源难以进行。

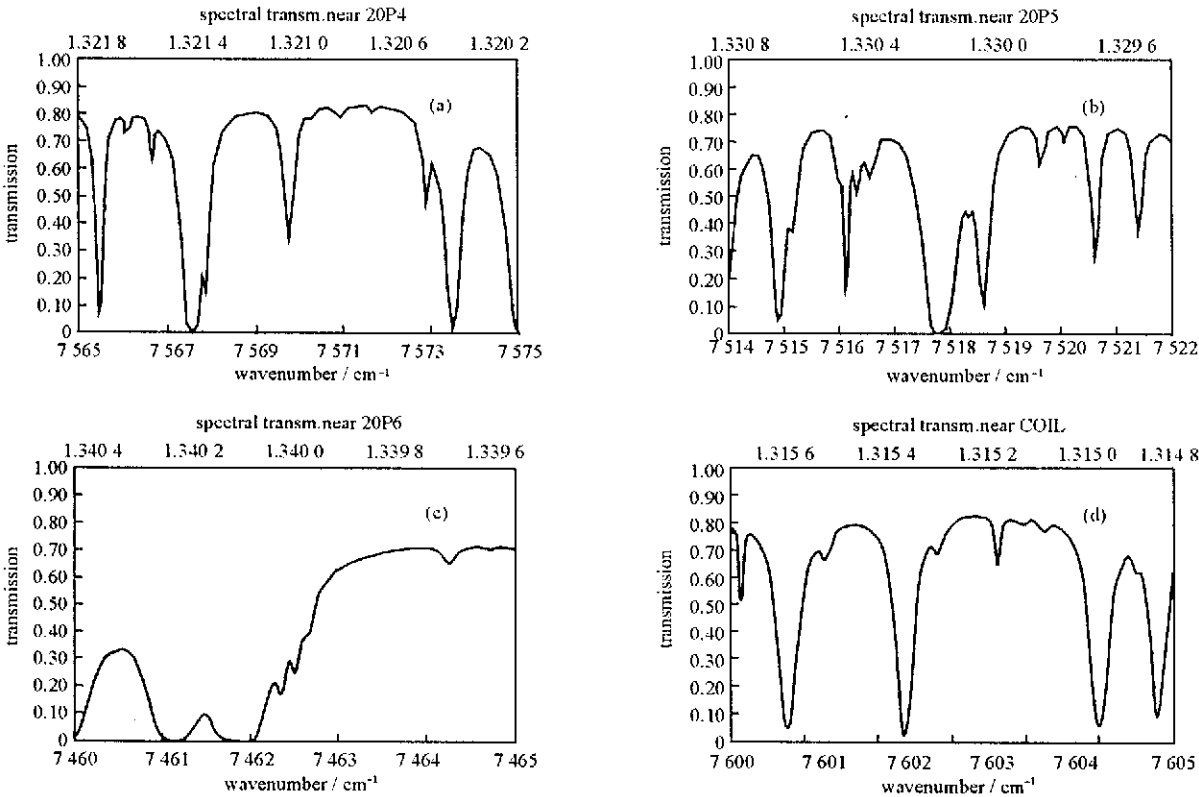


Fig. 1 Spectral distributions of atmospheric transmittance calculated by FASCODE3 ( HITRAN2000 ) for near HF overtone laser lines 20P4( a ) , 20P5( b ) , 20P6( c ) and near COIL( d )

图 1 用 FASCOD3P 和 HITRAN2000 计算的氟化氢泛频 20P4( a ) , 20P5( b ) , 20P6( c ) 以及 COIL( d ) 激光谱线附近的大气透过率光谱分布曲线。

我们所引用的上述两次实验测量资料均无气溶胶类别的实际测量。为了说明气溶胶类别对大气透过率的影响 ,表 3 给出了气溶胶类别对氟化氢泛频激光谱线 20P4 和 20P5 大气透过率计算结果的影响。由表可见 ,不同气溶胶类别对透过率计算结果的影响不同 ,其绝对最大差别可达 20% ,已经远远超出 FASCODE 模型的计算精度。

表 3 气溶胶类别对氟化氢泛频激光大气透过率计算结果的影响

laser line		type of atmospheric aerosol							
line	wavelength	rural	fog-adv	fog-rad	urban	desert	trop. -50	marine	navy
20P4	7 568.590	0.823 9	0.639 0	0.623 0	0.813 6	0.853 5	0.850 5	0.678 2	0.709 5
20P5	7 516.819	0.785 4	0.608 2	0.592 8	0.775 5	0.813 6	0.810 9	0.645 9	0.675 9

4 结 语

大气辐射传输模型的正确选择和应用无论在工程设计和应用或科学计算中都十分重要。LOWTRAN7 曾在 20 世纪 80 年代 ,由于它具有适当的精度 ,特别是它的操作简便 ,被一些非光谱工作者广泛地使用 ,在历史上起到了重要的作用。针对 LOWTRAN7 的局限性 ,MODTRAN 除了在光谱分辨率作了改进外 ,它使用了三个与

温度有关的参数 ,比 LOWTRAN7 只用单个参数带模型更精确。但是 ,MODTRAN 没有考虑到非局地热力平衡状态 ,它的使用高度限于 60km 以下。而且 ,它在计算大气光学厚度的方法中采用了一个等效均匀路径来代替多层路径的计算 ,尽管提高了计算速度 ,但是它的计算精度受到一定的限制。FASCODE 是一个完全的逐线算法 ,它计算每一层分子的吸收 ,散射效应( 分子和气溶胶 )及一些连续吸收 ,提供了“ 精确 ”透过率计算的处理。并且考虑了非局地热力平衡状态的处理 ,通常用作评估辐射传输的基准。

通过布给定律的检验 ,带模型出现一定的偏离。其中 LOWTRAN7 可以出现大于 7% 的误差 ,MODTRAN 小于 3% ,而逐线计算的 FASCODE 则小于 1%。

另外 ,计算结果表明 ,大气气溶胶种类对光传输有着十分重要的影响。在极端情况下 ,由此产生的大气透过率的绝对差可达 20%。在野外实验测量中需要考虑对这一参数的监测。

通过模型计算与实际大气中实验测量的比较 ,合肥地区开展的氧碘激光传输实验的测量结果得到了证实。而四川绵阳开展的氟化氢泛频激光大气透过率实验测量结果只得到了部分证实 ,氟化氢泛频 20P5 的光谱透过率测量值还有待于进一步实验论证。

为了开展单色波长大气传输应用研究工作的方便 ,FASCODE3 已作了汉化。

参考文献：

[ 1 ] Kneizys F X , Shettle E P , Abreu L W , et al. User guide to LOWTRAN 7[ M ]. AFGL-TR-88-0177. Air Force Geophysics Laboratory , Hanscom AFB , MA 01731 ,1988.

[ 2 ] Berk A , Bernstein L S ,Robertson D C. MODTRAN : a moderate resolution model for LOWTRAN 7[ M ]. GL-TR-89-0122 , Air Force Geophysics Laboratory , Hanscom AFB , MA 01731-5000 ,1989.

[ 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 ] Rothman L S , Gamache R R , Goldman A , et al. The HITRAN database : 1986 edition[ J ]. *Appl Opt* ,1987 ,**26** :4058.

[ 5 ] Massie S T ,Goldman A. Absorption parameters of very dense molecular spectra for the HITRAN compilation[ J ]. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer* , 1992 ,**48**( 5/6 ) :713—719.

[ 6 ] 杨高潮 ,韩守春 ,邵石生 ,等. 1.315 $\mu\text{m}$  光解碘激光的大气透过率测量实验[ J ]. 强激光与粒子束 ,1993 ,**5**( 4 ) :527—530. ( Yang G C , Han S C , Shao S S , et al. Measurement of atmospheric transmittances for 1.315 $\mu\text{m}$  photolytic iodine laser. *High Power Laser and Particle Beams* ,1993 ,**5**( 4 ) :527—530 )

[ 7 ] 杨维东 ,刘冬燕 ,金行星 ,等. 氟化氢泛频 20P4 ,20P5 激光谱线大气传输性能实验[ J ]. 强激光与粒子束 ,2002 ,**14**( 5 ) :685—688. ( Yang W D , Liu D Y , Jin X X , et al. Experimental of atmospheric transmittances for 20P4 and 20P5 lines of HF overtone laser. *High Power Laser and Particle Beams* ,2002 ,**14**( 5 ) :685—688 )

[ 8 ] 孙毅义 ,李治平 ,杨波. 高分辨率大气传输模型 FASCOD2[ J ]. 量子电子学报 ,1997 ,**14**( 1 ) :75—80. ( Sun Y Y , Li Z P and Yang B , High resolution radiative transfer model FASCOD2. *Chinese Journal of Quantum Electronics* ,1997 ,**14**( 1 ) :75—80 )

Inter-comparison of models for radiative transfer in the atmosphere

SUN Yi-yi , DONG Hao , BI Zhao-hui , LI Zhi-ping

( Department of Mathematics and Information Science , Yantai University , Yantai 264005 , China )

**Abstract** : The characteristics and limits of the general three models of radiative transfer in the atmosphere are discussed. Numerical tests were carried out by means of both the radiative transfer’s law and the transmittances measurements in the real atmosphere. The results show that there are very good agreements between the transmittance measured in the fields and calculated by the model for COIL and HF overtone 20P4 lines , but big error for HF overtone 20P5. Moreover , the significant influence of aerosol types on transmittance of the laser beam through the atmosphere is studied.

**Key words** : Atmospheric radiative transfer models ; Atmospheric transmittance ; Laser through the atmosphere ; LOWTRAN ; MODTRAN ; FASCODE ; HITRAN