

中红外波段高空大气传输透过率及热辐射计算

刘丹丹^{1,2}, 黄印博¹, 戴聪明^{1,2}, 魏合理¹

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气成分与光学重点实验室,
安徽 合肥 230031; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 使用逐线积分(LBL)及四种版本高分辨率分子吸收数据库(HITRAN 96、2k、04 及 08 版本)对比计算了中红外 2~5 μm 波段在中纬度夏季(45°N, 7 月)模式高空大气下行传输的大气分子透过率及热辐射, 结果表明: 透过率随着下行传输路径减小而增大, 热辐射随着传输路径的减小而降低, 适当的减小传输路径可以降低高空大气对光电系统应用的影响。96、2k 和 04 版本数据库在三种不同传输路径上透过率的平均绝对偏差均较小, 但在某些波段绝对偏差较大, 如 HITRAN2k 在 100~10 km 传输路径上的绝对偏差最大达到了 0.81; 96、2k 和 04 版本数据库在三种不同传输路径上热辐射的平均绝对偏差的数量级均为 10^{-6} , 04 版本的平均绝对偏差并非在所有路径中是最小的。计算不同传输路径的大气透过率和热辐射时, 采用旧版本的数据库在某些波段可能会产生相当大的误差。

关键词: 大气透过率; 热辐射; HITRAN 数据库; LBLRTM 软件

中图分类号: O432.1; P427.1 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)09-2324-06

Calculation of upper atmospheric transmittance and radiation in mid-infrared region

Liu Dandan^{1,2}, Huang Yinbo¹, Dai Congming^{1,2}, Wei Heli¹

(1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 220031, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The mid-infrared atmospheric transmittance and radiation were calculated with four different HITRAN databases using LBL software. Results show that atmospheric transmittance is increases with the transmission path decreases. Radiation decreases with the transmission path decreases. The transmittance average absolute deviation of HITRAN96, HITRAN2k and HITRAN04 is small in the three downlink propagation. But the transmittance absolute deviation is larger in some bands, such as the maximum absolute deviation of HITRAN2k up to 0.81 in transmission path from 100 to 10 km. The radiation average absolute deviation level of HITRAN96, HITRAN2k and HITRAN04 is 10^{-6} in the three downlink propagation. The deviation caused by old versions of the database should be considered for calculating infrared atmospheric transmittance and radiation. The difference caused by different versions of the database should be considered.

Key words: atmosphere transmittance; radiation; HITRAN database; LBLRTM software

收稿日期: 2013-01-07; 修订日期: 2013-02-14

基金项目: 国家自然科学基金(40905009)

作者简介: 刘丹丹(1986-), 女, 硕士生, 主要从事激光大气传输数值计算方面的研究。Email: baobaoldd@126.com

导师简介: 黄印博(1976-), 男, 研究员, 博士, 主要从事激光大气传输理论及实验方面的研究。Email: ybhuang@aiofm.ac.cn

0 引言

在大气遥感、目标辐射测量和红外工程设计与性能评估等方面都必须考虑大气和环境的影响,大气分子吸收是大气辐射收支平衡的重要因素,其吸收光谱具有显著的窗口特性,选择吸收小的微窗口对激光工程应用极其重要,但是即使在低分辨率的大气窗口区,也可能存在许多弱的大气吸收线,而在高分辨率的大气光谱中,即使在吸收带上也有可能存在波段很窄的大气微窗口^[1]。目前,研究高空大气辐射传输比较有效的方法是利用辐射传输软件进行相关的理论计算,国际上常用的辐射传输软件主要包括:LOWTRAN^[2]、MODTRAN^[3-6]适用于中低光谱分辨和宽带的光学工程的应用,FASCODE^[6]以及逐线积分辐射传输模式LBLRTM(简称为LBL,其使用方法见参考文献[5])等^[6-8],适用于高光谱分辨率、单色波长的激光等的应用。这些辐射传输软件的分子吸收谱线参数均来自高分辨率分子吸收数据库(简称HITRAN数据库),目前最新版本是HITRAN 08版本,该版本是在前几版HITRAN数据库的基础上进行了相关修正,包括谱线的增加、删除以及谱线位置偏移的修正^[6],如:HITRAN08中的H₂O、CO₂谱线相对HITRAN2k分别增加了3 529和204 424条,相对HITRAN04分别增加了70和203 714条^[9],被认为是目前最准确的HITRAN数据库。不同版本HITRAN数据库在计算大气透过率和热辐射时存在一定的差别,因此有必要对不同版本HITRAN数据库进行对比分析,以便选择最准确的HITRAN数据库及合适的辐射传输软件进行相关的理论计算。

文中拟针对中红外波段高空大气下行传输场景,开展不同版本HITRAN数据库大气分子吸收透过率和热辐射的计算及其对光电系统应用影响的研究。选择逐线积分辐射传输模式(LBLRTM)软件及HITRAN96、HITRAN2k、HITRAN04和HITRAN08四种版本数据库分别计算了中纬度夏季(45°N,7月)、2~5 μm波段下行传输(从大气顶到某一初始高度)时的大气透过率,选择了三种常用的传输场景:整层大气100~0 km,大气层顶100 km到对流层顶10 km及15 km,并按波长平滑到0.5 nm带宽,同时分别计算

了其他三种版本相对HITRAN08版数据库的大气光谱透过率和大气热背景辐射的偏差。

1 基本理论^[9]

大气透过率T的表达式为:

$$T(\lambda, l) = \exp \left[- \int_0^l \rho k(\lambda, l) dl \right]$$

对分子吸收,上式中的吸收系数k可表示为多条分立谱线在波数ν的吸收系数之和:

$$k(\nu, z) = \sum_i \sum_j S_{ij} f(\nu - \nu_{j0})$$

式中:i表示对计算波长点上有吸收贡献的各种分子的求和;j为所考虑的带宽范围内所有的吸收谱线;S为线强;ν₀为谱线的中心波长,谱线线型函数f(ν₀)在不同高度取不同的线型。对于中低光谱分辨率,大气透过率用带宽范围内的平均透过率来表示,即:

$$\langle T_{\Delta\lambda}(\lambda, l) \rangle = \int_{\Delta\lambda} T_{\Delta\lambda}(\lambda, l) d\lambda$$

对于热辐射,利用计算的分层光学厚度,根据黑体辐射的公式可以得到向下强度的公式:

$$I_{\nu}^{\downarrow}(\tau, -\mu) = \int_0^{\tau} B_{\nu}(\tau') \frac{d}{d\tau'} T_{\nu} \left(\frac{\tau - \tau'}{\mu} \right) d\tau'$$

2 大气透过率的计算结果

利用逐线积分辐射传输模式(LBLRTM)软件及HITRAN08版本数据库计算了中纬度夏季、2~5 μm波段三种传输路径上的大气透过率,如图1所示。三种传输场景下的大气透过率谱线非常密集,在常见的窗口3~5 μm也存在较大的吸收,且2.7 μm和4.3 μm为强吸收带,但吸收带的宽度随着传输路径的减小而变窄,如在100~0 km的传输路径时,2.7 μm和4.3 μm波长附近透过率为0。在100~10 km、100~15 km传输路径,2.7 μm和4.3 μm波长附近的谱线均有一定程度的增多,透过率较100~0 km传输路径对应的波段有所增大。其他波段的透过率随着传输路径的减小均有一定程度的增大,主要原因是高空大气分子含量少,对谱线的吸收减弱,致使透过率随着下行传输路径减小而增大。

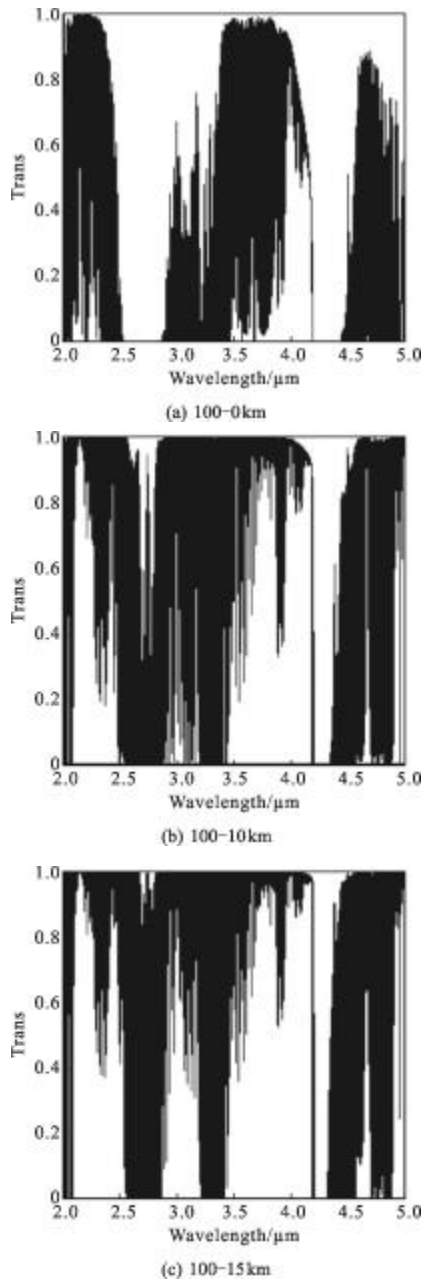


图 1 HITRAN08 单色大气光谱透过率
Fig.1 Results of transmittance with HITRAN08

图 2 是三种传输路径下将单谱线光谱平滑到 0.5nm 分辨率及 HITRAN96、HITRAN2k 和 HITRAN04 相对 HITRAN08 版本的偏差。对 100~0 km 传输路径而言，HITRAN96、HITRAN2k 和 HITRAN04 的偏差主要集中在三个波段(2.0~2.5、2.8~4.2、4.4~5.0 μm)。特别是在 3.5~4.0 μm 波段，2k 版本的部分谱线丢失致使 2k 版本的平均绝对偏差比 96、04 版本的大 1 个数量级，平均绝对偏差达到了 0.0224。96、04 版本的平均绝对偏差分别为 0.00764 和 0.00685。HITRAN 数

数据库的最大绝对偏差由大到小的顺序依次为 HITRAN2k(0.86)、HITRAN04(0.37)及 HITRAN96(0.22)。图 2(a1)~(c1)为大气透过率平滑到 0.5 nm 的结果，(a2)~(c2)HITRAN96 的偏差，(a3)~(c3)HITRAN2k 的偏差，(a4)~(c4)HITRAN04 的偏差。

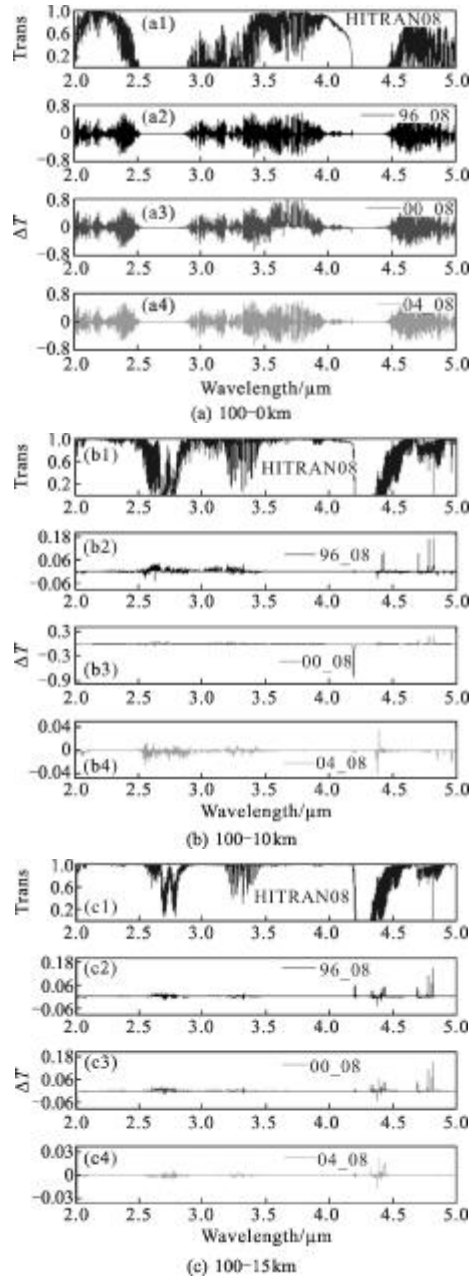


图 2 大气透过率平滑到 0.5 nm 时的计算结果及 HITRAN96、2k、04 相对 HITRAN 08 的绝对偏差
Fig.2 Results of transmittance with HITRAN 08 with 0.5 nm spectral resolution and HITRAN 96, 2k, 04 compared with HITRAN 08

对 100~10 km 传输路径而言，HITRAN96、2k 和 04 版本的偏差的数量级均在 0.001 以下，就其平均

绝对偏差而言,与 HITRAN08 相比较, HITRAN04 数据库计算的结果与之最为接近,其次是 HITRAN2k,相差最大的是 HITRAN96。但 HITRAN2k 在这个波段范围内的最大绝对偏差达到了 0.811 88。

对 100~15 km 传输路径而言, HITRAN96、2k 和 04 三种版本的绝对偏差均很小,最大不超过 0.15。与 HITRAN08 相比较, HITRAN04 与之最为接近,平均绝对偏差仅为 $4.99E-4$,最大绝对偏差仅有 0.06。HITRAN96、HITRAN2k 版本的偏差较相近,其平均绝对偏差分别为 0.001 03 和 0.001 05,最大绝对偏差基本相同。

表 1 是 HITRAN96、HITRAN2k 和 HITRAN04 计算的大气透过率相对 HITRAN08 版的绝对偏差的平均值及最大值。随着传输距离的减小, HITRAN96、HITRAN2k 和 HITRAN04 三种版本数据库的平均绝对和最大绝对偏差均有所减小,例如:传输距离由 100 km 传输到 0 km 减小到由 100 km 传输到 10 km 时: HITRAN96 的平均绝对偏差和最大绝对偏差分别减小了 4.7% 和 20.9%, HITRAN2k 的平均绝对偏差和最大值分别减小了 82.3% 和 5.97%, HITRAN04 的平均绝对偏差和最大值分别减小了 91.0% 和 89.6%。总体而言,在三种传输路径上 HITRAN04 更接近 HITRAN08 的计算结果, HITRAN2k 与 HITRAN08 的计算结果相差最大。在 100~0 km 的传输路径上, 04 版本的平均绝对偏差最小,次之是 96 版本,在 100~10 km 的传输路径时, 04 版本的平均值仍最小,次之的是 2k 版本。在 100~15 km 的传输路径时, 04 版本的平均值较 100~10 km 时的稍有所增大,但与 96 和 2k 版本的相比很小。

表 1 96、2k 和 04 计算的大气透过率相对 08 的绝对偏差的平均值及最大值

Tab.1 Results of HITRAN96, HITRAN2k and HITRAN04 compared with HITRAN08 altitude(km)

Altitude /km	$\sum \Delta T_{96} $	$\sum \Delta T_{00} $	$\sum \Delta T_{04} $	$ \Delta T_{96} _{max}$	$ \Delta T_{00} _{max}$	$ \Delta T_{04} _{max}$
100-0	0.007 64	0.022 38	0.006 85	0.220 92	0.863 46	0.369 84
100-10	0.007 28	0.003 94	6.13554E-4	0.1746 8	0.811 88	0.038 38
100-15	0.001 03	0.001 05	4.99367E-4	0.149 74	0.149 97	0.603 5

3 热辐射的计算结果

利用 LBLRTM 软件及 96、2k、04 和 08 四种版本 HITRAN 数据库进一步分析了中纬度夏季 2~5 μm 波段,三种传输路径下行传输时的大气热辐射背景,并将波长平滑到 0.5 nm 带宽,计算了 96、00 和 04 相对 08 版本 HITRAN 数据库的绝对偏差。

图 3 是三种传输场景将单谱线光谱平滑到 0.5 nm 分辨率及 96、2k、04 相对 08 版本的偏差,对 100~0 km 传输路径而言, HITRAN96 和 HITRAN04 的绝对偏差主要集中在 4.5~5.0 μm 波段,而 2k 版本的绝对偏差主要集中在 4.5~5.0 μm 、3.5~4.0 μm 波段,在 3.5~4.0 μm 波段的偏差数值均为负值,说明在波段可能存在谱线丢失;三种版本的绝对偏差最大不超过 $0.001 2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm})$, 04 版本与 08 版本的计算结果更为接近,平均绝对偏差值为 $3.76E-6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm})$, 96、2k 版本的平均偏差分别为 $9.62E-6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm})$ 和 $7.34E-6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm})$ 。

对 100~10 km 传输路径而言,分辨率平滑到 0.5 nm 时, 2.0~4.2 μm 波段比较平滑,在 4.25 μm 左右热辐射先增大后减小。从绝对偏差图可以看出: HITRAN96 的绝对偏差为 0, HITRAN04 版本数据库的最大绝对偏差较 HITRAN2k 的稍大,其平均绝对偏差较 HITRAN2k 的平均值大 1 个数量级,分别为 $1.33E-7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm})$ 和 $4.09E-8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm})$ 。就其平均绝对偏差的值而言, HITRAN96 与 HITRAN08 计算的热辐射相同, HITRAN2K 比较接近 HITRAN08, HITRAN04 与 HITRAN08 相差稍大, HITRAN2k 的绝对偏差集中在较窄的波段 4.25~4.5 μm , HITRAN04 的绝对偏差集中在 4.2~4.5 μm 和 4.8 μm 左右。

对 100~15 km 传输路径而言,分辨率为 0.5 nm 时,与 100~10 km 传输场景偏差图相似,即在 4.25 μm 左右热辐射先增大后减小,但在 4.5~5 μm 波段的热辐射变化较慢,在 4.75 μm 左右热辐射稍有变化。从绝对偏差图可以看出: HITRAN96、HITRAN2k 数据库的绝对偏差很相近,其最大值相同($6.21E-5$), HITRAN04 的最大绝对偏差($3.81E-5$)小于 96 和 2k 版本的值; HITRAN96、HITRAN2k 的平均绝对偏差基本接近,分别是 $1.60E-7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm})$ 和 $1.55E-7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm})$, HITRAN04 的平均绝对偏差比 96、2k 版本的小 1 个数量级,其值为 $9.19E-8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm})$,但三种版本数据库偏差主要集中的波段均很窄, HITRAN96、HITRAN2k 的偏差主要集中在 4.2~4.5 μm 及 4.7~4.8 μm 波段, HITRAN04 的偏差主要集中在 4.2~4.5 μm 波段。

图 3 (a1)~(c1) 为热辐射平滑到 0.5 nm 的结果, (a2)~(c2) 为 HITRAN96 的偏差, (a3)~(c3) 为 HITRAN2k 的偏差, (a4)~(c4) 为 HITRAN04 的偏差

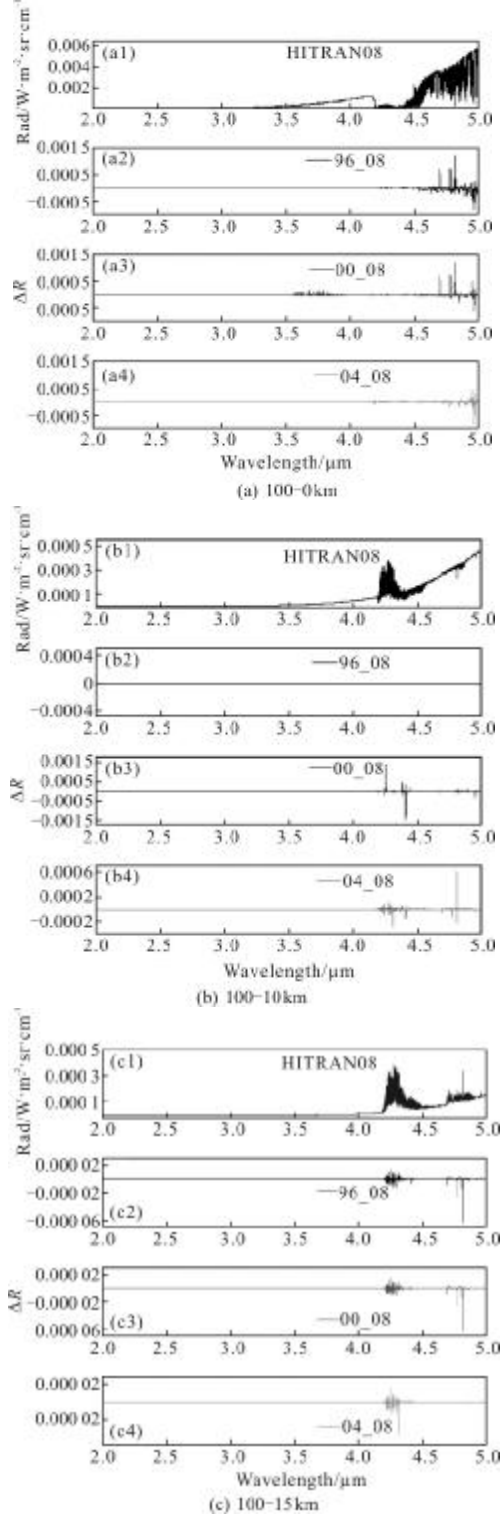


图 3 热辐射平滑到 0.5 nm 的计算结果及 HITRAN96、2k、04 相对 HITRAN 08 的绝对偏差

Fig.3 Results of radiation with HITRAN 08 with 0.5 nm spectral resolution and HITRAN96, 2k, 04 compared with HITRAN 08

表 2 是 HITRAN96、HITRAN2k、HITRAN04 数据库在三种下行传输距离上的热辐射的平均绝对偏差和最大绝对偏差, HITRAN96、HITRAN2k、HITRAN04 在三种传输路径上的平均绝对偏差分别不超过 $9.62E-6 W/(m^2 \cdot sr \cdot cm)$ 、 $7.34E-6 W/(m^2 \cdot sr \cdot cm)$ 和 $3.76E-6 W/(m^2 \cdot sr \cdot cm)$ 。HITRAN96、HITRAN2k 的绝对偏差在 100~10 km 传输路径上最小; HITRAN04 的绝对偏差随着传输路径的减小逐渐减小, 例如: 传输路径由 100~0 km 减小到 100~10 km, HITRAN04 版本的平均绝对偏差减小了 96.4%, 传输路径由 100~0 km 减小到 100~15 km, HITRAN04 版本的平均绝对偏差减小了 30.8%。在不同的传输路径上, HITRAN04 的平均绝对偏差并不是最小的, 例如: 在 100~10 km 传输路径, HITRAN96 的平均绝对偏差最小。

表 2 96、2k 和 04 计算的热辐射相对 08 的绝对偏差平均值及最大值

Tab.2 Results of HITRAN96, HITRAN2k and HITRAN04 compared with HITRAN08 altitude

Altitude /km	$\sum \Delta T_{96} $	$\sum \Delta T_{00} $	$\sum \Delta T_{04} $	$ \Delta T_{96} _{max}$	$ \Delta T_{00} _{max}$	$ \Delta T_{04} _{max}$
100-0	9.624 1 E-6	7.339 42 E-6	3.761 61 E-6	0.001 2	0.001 19	8.331 E-4
100-10	0	4.092 35 E-8	1.329 39 E-7	0	1.44E-5	6.14E-5
100-15	1.602 27 E-7	1.551 76 E-7	9.196 53 E-8	6.21E-5	6.21E-5	3.81E-5

4 结 论

文中利用 LBL 及四个版本 HITRAN 数据库 (HITRAN96、HITRAN2k、HITRAN04 及 HITRAN08) 对比计算了中纬度夏季 (45°N, 7 月) 模式在中红外 2~5 μm 波段、三种传输路径 (100~0 km, 100~10 km 及 100~15 km) 下行传输大气分子透过率和背景热辐射, 主要有以下几点结论:

(1) 三种场景下的大气透过率随着传输路径的减小而增大, 热辐射随着传输路径的减小而减小, 主要原因是高空大气分子含量少, 对谱线的吸收减弱, 致使透过率随着下行传输路径减小而增大, 基于这

一特点,可以适当的减小下行传输距离来降低大气对光电系统应用的影响。

(2) 不同传输距离、不同版本 HITRAN 数据库计算的透过率及热辐射的偏差集中的波段及平均值不同,在相同的传输路径上的 HITRAN04 数据库计算透过率的平均绝对偏差最小,HITRAN2k 数据库的平均绝对偏差最大,尤其是在近地面时 $3.5\sim 4.0\ \mu\text{m}$ 波段,可能是由于 HITRAN2k 的 H_2O 分子谱线在该波段范围内丢失造成的。对于使用 HITRAN2k 计算结果作为依据的实验需要重新验证,尤其是 $3.5\sim 4.0\ \mu\text{m}$ 波段的相关实验。

(3) HITRAN96、HITRAN2k、HITRAN04 在三种不同传输路径上热辐射的平均绝对偏差分别不超过 $9.62\text{E}-6\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{cm})$ 、 $7.34\text{E}-6\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{cm})$ 和 $3.76\text{E}-6\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{cm})$ 。HITRAN96、HITRAN2k 的热辐射绝对偏差在 $100\sim 10\ \text{km}$ 路径上最小;HITRAN04 的热辐射绝对偏差随着传输路径的减小而逐渐减小,且在不同的传输路径上,HITRAN04 的热辐射平均绝对偏差并不是最小的。

在文中所设定的背景下,偏差集中的波段不是很宽,尤其是计算热辐射时,偏差均集中在窄的波段。因此在进行相关计算之前,选择最佳的辐射传输及 HITRAN 数据库进行计算分析是较为重要的。如果需要高精度透过率和热辐射的计算结果,建议最好选择 HITRAN08 进行相关的计算。

参考文献:

- [1] Rao Ruizhong. Modern Atmospheric Optics [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [2] Kneizys F X, Shettle E P, Gallery W O, et al. Users Guide to Lowtran, 1988, 7[R]. AFGL-TR-88-0177.
- [3] Berk A, Anderson G P, Acharya P K, et al. MODTRAN4 User's Manual [M]. Hanscom AFB MA: Air Research Laboratory Space Vehicle Directorate Air Force Material Command, 1997.
- [4] Wang Di, Li Chengfang, Xiong Fei. The method of calculate the transmittance of infrared radiation through atmosphere and compared with MODTRAN [J]. Optical Technique, 2006, 32(8): 0293-0300. (in Chinese)
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 (8): 0293 - 0300.
- [5] Chen Xiuhong. Development of the combined atmospheric radiative transfer software [D]. Heifei: Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics the Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)
陈秀红. 通用大气辐射传输软件 CART 研制 [D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2010.
- [6] Chen Xiuhong, Wei Heli, Xu Qingshan. Infrared atmospheric transmittance calculation model [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(5): 811-816. (in Chinese)
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.
- [7] Feng Xuan, Zhao Fengsheng, Gao Wenhua. Effect of the improvement of the HITRAN database on the radiative transfer calculation[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer calculation, 2007, 108: 308-318.
- [8] Feng Xuan, Zhao Fengsheng. Effect of changes of the HITRAN database on transmittance calculations in the near-infrared region [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer Calculation, 2009, 110: 247-255.
- [9] Liou Guonan. An Introduction to Atmospheric Radiation[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004. (in Chinese)
廖国南. 大气辐射导论[M]. 北京: 气象出版社, 2004.