

文章编号:1001-5078(2007)07-0610-04

1064nm 激光大气透过率数据库的建立与应用

陈前荣, 王国玉, 陈永光, 姚梅, 张文攀, 吴军辉
(解放军63880部队, 河南 洛阳 471003)

摘要:利用 FASCODE 计算出 1064nm 激光的大气透过率, 建成透过率数据库, 该数据库对应的大气模型为中纬度夏季, 斜程范围为 (0 ~ 10) km (间隔 0.1 km), 仰角范围为 0° ~ 90° (间隔 5°), 地面能见度范围为 (5 ~ 20) km (间隔 1 km), 数据库可以根据需要进行扩展。通过对透过率数据曲线进行分析, 发现有极少数的数据点不合常理, 即随距离增加透过率也略微增加, 这是 FASCODE 软件的 Bug。为此, 编写了数据修正程序, 利用人工介入方法剔除不合常理的数据点; 并采用三次 c 样条插值的方法, 补充被剔除的数据点。修正后的数据库, 便于在相关软件的迭代计算中调用, 如用于激光制导武器作战训练、光电对抗仿真等课题的研究。

关键词:1064nm 激光; 大气透过率; 数据库; c 样条插值

中图分类号:P427.2; P412.17

文献标识码:A

Creation and Application of the Atmospheric Transmittance Database for 1064nm Laser

CHEN Qian-rong, WANG Guo-yu, CHEN Yong-guang, YAO Mei, ZHANG Wen-pan, WU Jun-hui
(PLA 63880, Luoyang 471003, China)

Abstract: The atmospheric transmittance database for 1064nm laser is created basing on the FASCODE. The model atmosphere is midlatitude summer. The slant path length covers (0 ~ 10) km with the alternation of 0.1 km. The elevation covers 0° ~ 90° with the alternation of 5°. The surface range covers (5 ~ 20) km with the alternation of 1 km. The database could be enlarged easily. As the transmittance curves being analyzed, a few of data dots shows abnormal that the transmittance swell a little as the path length increasing. So that a bug is found in FASCODE. A rectifying program is compiled to eliminate the abnormal data dots with the help of artificial selection. The eliminated dots are replaced by cube C spline interpolation. The renewed database could be used expediently for iterative computing, which is often confronted in the researches of laser guide weapon training or photoelectricity countermeasure emulate system.

Key words: 1064nm laser; atmospheric transmittance; database; C spline interpolation

1 引言

1064nm 激光大气衰减系数比较小, 工作于该波段的 YAG 激光器技术成熟、可靠, 在激光测距、激光制导、光电对抗等国防领域有十分广泛的应用, 计算 1064nm 激光大气透过率是相关课题研究经常碰到的事情。计算光学大气透过率常用的软件^[1]有: LOWTRAN7, HITRAN, DISORT, PcLnWin (FASCODE), 一般计算波段透过率采用 LOWTRAN7 或 HITRAN, 而计算激光谱线透过率则推荐使用 FASCODE^[2]。PcLnWin 是美国空军 Phillips 实验室

(AFPL) FASCODE 3P 软件的个人计算机版本, 是普遍公认的、以逐条谱线方式计算光学大气透过率和辐射的标准软件。

在激光制导武器作战训练、光电对抗仿真等课题的计算程序中, 由于大气透过率与距离等参数关

作者简介:陈前荣(1972 -), 男, 光学工程专业博士, 现为 63880 部队博士后工作站博士后, 副研究员, 目前从事光电对抗试验与仿真技术研究, 发表科技论文十余篇, 其中 5 篇被 EI 收录。E-mail: Chen_qianrong@126.com.cn

收稿日期:2006-11-28; **修订日期:**2007-02-01

系复杂,常常要用到迭代计算,对大气透过率进行反复的调用。而 PcLnWin 本身是一个独立的软件平台,计算透过率时条件设置十分复杂,很难象函数那样在其他迭代程序里被反复调用;另外,光电对抗仿真系统要求实时性,而若现场利用 FASCODE 计算去获得透过率参数,是不可能做到实时性的,应通过建立数据库的方法解决。

为此,我们根据实际需要,利用以 PcLnWin 为平台的 FASCODE,计算出 1064nm 激光在中纬度夏季条件下的大气透过率,建成透过率数据库,该数据库斜程范围为(0~10)km(间隔 0.1km),仰角范围为 0° ~ 90° (间隔 5°),能见度范围为(5~20)km(间隔 1km),该数据库可以根据需要进行扩展。1064nm 激光大气透过率数据库已用于激光制导武器作战训练、光电对抗仿真等课题的研究。

2 1064nm 激光大气透过率数据库的建立

2.1 原始数据的计算

根据光电对抗相关课题的客观需要,在建立透过率数据库时,变化的气象参数是地面能见度,其他气象参数则取典型数值。因为对于激光制导武器的作战环境,1064nm 激光在大气中传输时,其衰减的主要因素是气溶胶^[3],其中气溶胶散射引起的衰减又比吸收大得多,纯净大气中气体分子的吸收和散射导致的衰减与之相比,可以忽略不计^[4]。对于晴朗或含霾等地面能见度相对好一点的天气,大气气溶胶含量和粒子半径分布与能见度相关度很高。因此,1064nm 激光在大气中传输的衰减系数,随能见度变化最大,而受温度、气压等气象参数影响较小,利用 FASCODE 进行计算分析也间接印证了这一点。

路径参数取斜程计算方式,以某海拔高度的地面一点为坐标原点,在垂直平面内建立极坐标系,仰角范围为 0° ~ 90° (间隔 5° 取值),斜程范围为(0~10)km(间隔 0.1km 取值)。气象参数的设置,则取中纬度夏季城市气溶胶模式,天空无云,地面温度 294.2K,一个标准大气压 1.013×10^5 Pa,相对湿度 76.1%,地面能见度范围为(5~20)km(间隔 1km 取值)。经过艰苦的计算,得到三万多个透过率数据,建成初步的 1064nm 激光大气透过率数据库,以满足当前课题的需要。

图 1 是地面能见度为 10km,不同仰角对应的透过率随斜程变化的曲线。可以发现,对于相同斜程,仰角越大,透过率越高,其中在 10° ~ 30° 范围内变化尤为剧烈。不过,当斜程小于 1km 时,不同仰角

的透过率曲线几乎重叠,实际上,将图像局部放大后观察,还是可以发现曲线仍然遵守“仰角越大,透过率越高”的规律,只不过相互差别很小。这有两个原因,其一是由于斜程较小,透过率都比较大,相互数值差异没有拉开,其二是在进行大气分层时,是按照垂直高度每隔 1km 分一层,能够满足通常情况的应用,但要用于考察 1km 斜程内的透过率差异,则显得分层不够精细。这也说明,如果要观测验证斜程大气透过率随仰角变化的情况,以用于地面试验结果的折算,则最好使用释放气象探空气球等覆盖高度范围较大的观测手段,仅仅依赖塔楼等设施,其高度分布是远远不够的。从图中还可以看出,透过率随斜程增加而逐渐减小,一般在靠近地面(2~3)km(垂直高度)范围内,激光大气衰减系数较大,透过率下降很快,而当斜程较大时,透过率下降速度十分缓慢。这是因为对于波长 1064nm 脉冲激光,主要的衰减是气溶胶散射和吸收,而气溶胶集中分布在离地面高度为 3km 的范围内,高空分布很少。

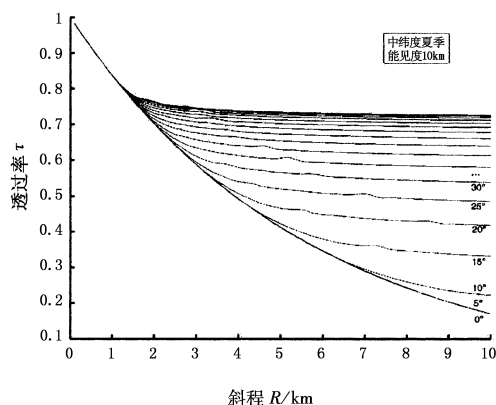


图 1 能见度 10km 时斜程透过率曲线

图 2 显示的是斜程 10km 透过率(地面能见度 10km)随仰角的变化,图 3 显示的是斜程 10km 透过率(仰角 20°)随地面能见度的变化。

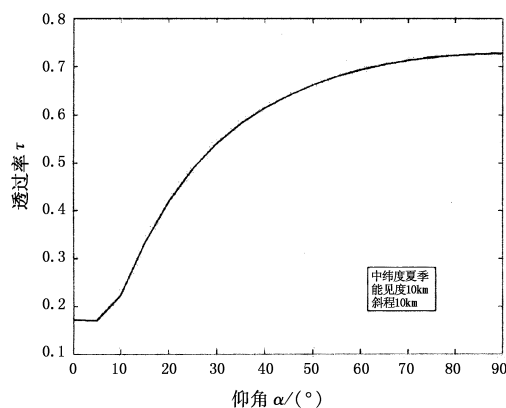


图 2 10km 斜程透过率随仰角变化曲线

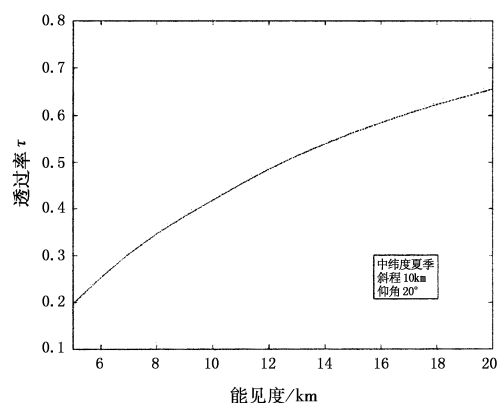


图3 10km斜程透过率随能见度变化曲线

2.2 三次c样条插值修正

仔细观察图1,可以发现有些透过率曲线局部有小起伏,也就是说,有少数数据点,其透过率反而随斜程增加而略微变大,这显然不符合斜程越大透过率越小的规律,利用LOWTRAN7进行计算,也发现类似情况。这种情况的出现,可能源于FASCODE和LOWTRAN7所采用的计算物理模型并非尽善尽美,属于软件的小Bug。当然,由于透过率数值异常波动的幅度非常小,异常数据点也很少,这一小Bug并不能损害FASCODE和LOWTRAN7的权威性。

但是,这些异常数据点显然是不符合物理规律的,而且,它们对单调递减规律的破坏,也可能导致迭代计算不收敛,因此应该加以处理。由于异常数据点很少,通常一条有波动的透过率曲线里,100个数据点中异常点一般只有3~4个,我们采用直接剔除异常点的办法,然后利用三次c样条插值^[5-6],对被剔除的数据点加以补充。c样条是用分段的三次多项式拟合给定的数据点,非常适合于用光滑曲线拟合大量数据点的要求,其主要思想是,在相邻两个节点的区间上做三次多项式,其一阶、二阶导数在每一个数据点上连续的。c样条插值曲线严格经过控制点,与多项式插值拟合等方法相比,更加尊重原始数据,插值误差也比较小。

由于需要检验、处理的数据量很大,我们编写了人工介入的处理程序,程序自动显示每一条透过率曲线,然后人工标出需要剔除的异常数据点,最后软件完成数据插值、检验和数据库的修正、存储。图4显示了修正前后透过率曲线,可以看出,除了异常数据点那一段被平滑并与曲线总体下降趋势一致外,其他部分两曲线基本重合。图5是经过处理的透过率曲线(能见度10km),与图1相比,曲线要平滑得多。

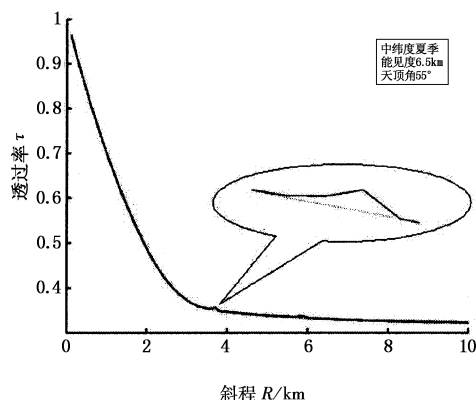


图4 c样条插值修正前后透过率曲线对比

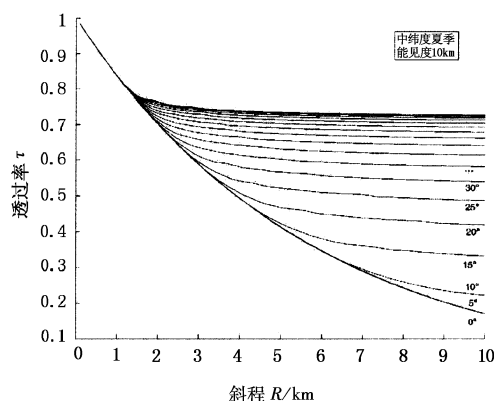


图5 修正后的斜程透过率曲线

3 应用

应用修正后的1064nm激光大气透过率数据库时,还需要利用数据插值,毕竟仰角、斜距等各数据间取值还有一定步长。图6三维显示了从原点到垂直截面上各点间斜程透过率,可以看出,透过率曲面光滑连续。因此,采用双线性插值或双三次c样条插值^[7],可以保证插值结果与直接利用FASCODE计算的结果之间误差很小。

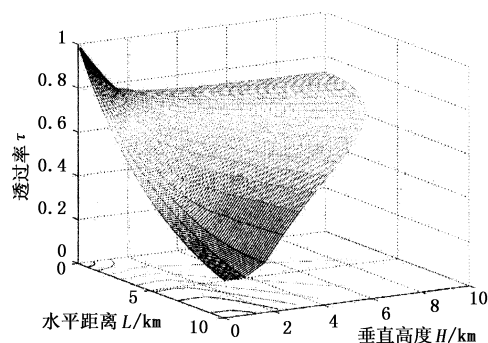


图6 透过率数据三维显示

这里给出应用透过率数据库,利用迭代方法求解激光制导武器探测激光指示信号作用距离范围的算例。这里将目标设定为一个反射率 $\rho=0.2$ 的激光漫反射靶,靶面倾斜 45° 放置,并朝向激光制导导弹来袭方位。当采用地面照射攻击模式^[8-10]时,激

光导引头(或机载激光光斑跟踪器)探测激光指示信号作用距离(即捕获目标距离) R 为:

$$R = \sqrt{\frac{U_0}{\pi u_1}} \cdot \sqrt{\rho \cdot \tau_{\text{指目}}(R_{\text{指目}}, \vec{q})} \cdot \sqrt{\tau_{\text{弹目}}(R, \alpha, \vec{q})} \cdot \sqrt{\cos(\alpha - \pi/4)} \quad (1)$$

其中, U_0 为指示激光输出单脉冲能量; u_1 为激光导引头能量密度探测阈值; $\sqrt{\frac{U_0}{\pi u_1}}$ 即为理想作用距离(靶面反射率、大气透过率、余弦函数值均为1时); $R_{\text{指目}}$ 为激光指示器到目标间的(水平)距离; $\vec{q}$ 为气象参数,包括能见度、温湿压等; $\tau_{\text{指目}}$ 为激光指示器到目标间的激光大气透过率; α 为弹目视线仰角; $\tau_{\text{弹目}}$ 为弹目间斜程的激光大气透过率。由于 $\tau_{\text{指目}}$ 隐含了 R 这一变量,因此 R 的求解必须通过迭代得出。为了使迭代计算不溢出且快速收敛,迭代公式为:

$$R^{(i+2)} = \sqrt{\frac{U_0}{\pi u_1}} \cdot \sqrt{\rho \cdot \tau_{\text{指目}}(R_{\text{指目}}, \vec{q})} \cdot \sqrt{\tau_{\text{弹目}}((R^{(i)} + R^{(i+1)})/2, \alpha, \vec{q})} \cdot \sqrt{\cos(\alpha - \pi/4)} \quad (2)$$

当 $(R^{(i+2)} - R^{(i+1)}) < 0.003\text{km}$ 时,停止迭代。实际计算中, $U_0 = 100\text{mJ}$, $u_1 = 6\text{fJ}/\text{cm}^2$, $R_{\text{指目}}$ 取典型值5km,弹目视线仰角 α 依次取 $1^\circ, 2^\circ, \dots, 90^\circ$,迭代过程中,调用能见度为10km的激光大气透过率数据库,利用双三次c样条插值方法求解透过率 $\tau_{\text{弹目}}$ 和 $\tau_{\text{指目}}$,得到激光导引头(或机载激光光斑跟踪器)探测激光指示信号作用距离范围,如图7中的虚线。

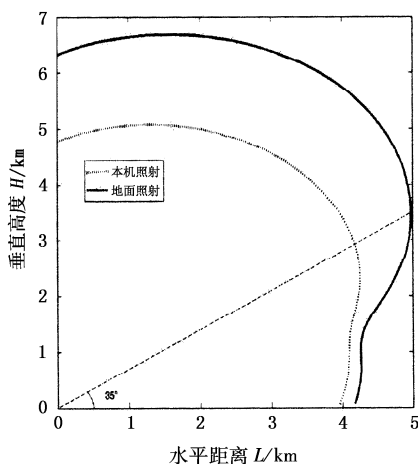


图7 激光制导武器作用距离范围

当采用本机照射攻击方式时,由于 $R_{\text{指目}} \approx R_{\text{弹目}} \equiv R$,故 $\tau_{\text{指目}} \approx \tau_{\text{弹目}}$,则作用距离公式为:

$$R = \sqrt{\frac{U_0}{\pi u_1}} \cdot \sqrt{\rho} \cdot \tau_{\text{弹目}}(R, \alpha, \vec{q}) \cdot \sqrt{\cos(\alpha - \pi/4)} \quad (3)$$

迭代公式为:

$$R^{(i+2)} = \sqrt{\frac{U_0}{\pi u_1}} \cdot \sqrt{\rho} \cdot \tau_{\text{弹目}}((R^{(i)} + R^{(i+1)})/2, \alpha, \vec{q}) \cdot \sqrt{\cos(\alpha - \pi/4)}$$

$$\sqrt{\cos(\alpha - \pi/4)} \quad (4)$$

迭代计算得到作用距离范围,如图7中的实线。美军利用激光制导武器攻击目标时,弹道大致的仰角一般取 35° 左右,由图7可以看出,这个弹道仰角对应的捕获目标斜距和水平距离都近乎为最大值,这样可以降低投弹飞机的毁伤概率。

4 结论

利用FASCODE计算出1064nm激光在中纬度夏季城市气象模型(无云)条件下的大气透过率,建成透过率数据库。通过对透过率数据曲线进行分析,发现有极少数的数据点不合常理,即随距离增加透过率也略微增加。为此,编写了数据修正程序,利用人工介入的方法剔除不合常理的数据点,采用三次c样条插值的方法,补充被剔除的数据点。修正后的数据库,便于在相关软件的迭代计算中调用,如用于激光制导武器作战训练、光电对抗仿真等课题的研究,并给出了迭代求解激光制导武器作用距离范围的数据库应用实例。

参考文献:

- [1] 吴健,杨春平,刘建斌. 大气中的光传输理论[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2005:210-232.
- [2] 姚梅,郭豪,赵宏鹏,等. 两种大气传输软件在红外探测系统性能仿真计算中的应用及其比较[J]. 电子对抗试验,2006,(3):24-25.
- [3] 丛明煜,邵成勋,王学孝. 1.06 μm 激光半主动制导的目标与大气环境模型[J]. 红外与激光工程,2000,29(4):71-77.
- [4] 杨洋,赵远,乔立杰,等. 南京达1.06 μm 激光的大气传输特性[J]. 红外与激光工程,1999,28(1):15-19,35.
- [5] Shoichiro Nakamura. Numerical analysis and graphic visualization with MATLAB(梁恒,刘晓艳译. 科学计算引论——基于MATLAB的数值分析)[M]. 北京:电子工业出版社,2002.
- [6] John H Mathews, Kurtis D Fink. Numerical methods using Matlab(陈渝,周璐,钱方,等译. 数值方法:MATLAB版)[M]. 北京:电子工业出版社,2002.
- [7] 陈前荣,陆启生,成礼智. 基于方向微分的运动模糊方向鉴别[J]. 中国图像图形学报,2005,10(5):590-595.
- [8] 孙植勋,张安. 激光制导炸弹武器系统及其作战方式研究[J]. 航空兵器,2001,(5):26-29.
- [9] 冯龙龄. 大气散射对激光武器系统作战效能的影响及对策[J]. 兵工学报,2003,24(4):520-524.
- [10] B Cable, A Piranian. Testing and proving the GBU-24 laser-guided bomb from the U. S. Navy's F-14 aircraft [R]. AD19991004,1998,139(2):1-9.