

激光大气雷达系统中重合系数的计算*

胡克伟¹, 李松¹, 周辉², 王润峰³

(1. 武汉大学电信学院, 湖北武汉 430079; 2. 武汉大学测绘学院, 湖北武汉 430079;
3. 河北省第二测绘院, 河北石家庄 050031)

摘要: 为了满足探测的目的, 有效获取和反演雷达数据, 需要对激光雷达系统的参数进行设计。给出了激光大气雷达系统中重合系数(几何因子)的计算方法, 并且结合我校现有的激光大气雷达系统的技术参数, 从对 0~3 km 的气溶胶后向散射回波的有效探测出发, 讨论了系统参数对重合系数的影响和利用改变系统参数的方法改变重合系数, 以实现激光雷达系统优化设计的可行性。计算和分析表明, 该方法简单、直观、有效。

关键词: 激光雷达; 重合系数; 气溶胶; 后向散射

中图分类号: TN24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)02-00164-04

Calculating of the lidar overlap function*

HU Ke-wei¹, LI Song¹, ZHOU Hui², WANG Run-feng³

(1. School of Electronics Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 3. Bureau of Surveying and Cartography of Hebei Province, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: To meet the command of detecting and inversion lidar dates, lidar crossover function must be calculated. In this article, a numerical method of calculating the lidar overlap function (geometrical factor) is presented. Based on our technical parameter of the lidar system, and starting from efficiently exploring backscattering echo which comes back from the 0~3 km aerosol, the influence of each system parameter on the overlap function and the way of changing the overlap function by altering the system parameters in particular are discussed. The feasibility study of optimal design of the lidar system is also carried out. The calculation and analysis results indicate that the method presented in this article is simple, intuitionistic and efficient.

Key words: Lidar; Overlap function; Aerosol; Backscatter

0 引言

通常情况下激光大气雷达系统可以分为共轴和双轴两大类。由于大气分子和气溶胶的散射回波强度

小, 且在较大的探测范围内回波的动态范围很大, 因此系统一方面需要采用大口径的望远镜和高灵敏度的光电探测器以提高对高空回波的探测能力, 另一方面又需要避开低空较强的散射回波以压缩回波的动

收稿日期: 2004-08-23; 修订日期: 2004-09-10

* 基金项目: 地球空间环境与大气测量教育部重点实验室开放研究基金资助项目

作者简介: 胡克伟(1974-), 男, 辽宁沈阳人, 硕士, 主要从事激光雷达的设计与数据反演方面的研究。

态范围。因此在大气探测激光雷达系统中多采用双轴系统。

在双轴系统中,激光器发射的光束发散角很小;为避免杂散光的干扰,接收系统的视场角也控制得很小,发射的激光脉冲只有传输一定距离之后才能和接收系统在空间发生重合,从而进入接收机的视场被有效探测。随着传输距离的不同,重合部分光强占总光强的比例不同。这意味着即使其他参数完全一样,激光大气雷达系统也会因为发射光束与接收视场重合系数的不同而产生不同的接收回波。而大气雷达系统的接收回波是正确反演各种大气参数的基础。因此,在激光雷达方程中必须引入重合系数的概念,对散射回波的反演必须先对散射回波进行重合系数的修正^[1,2]。

在双轴的激光大气雷达系统中,发射和接收光轴的距离和夹角、激光发散角、接收视场角等参数均可改变重合系数的分布,使激光雷达系统能够有效探测特定距离范围内的散射回波。文中用数值计算的方法计算重合系数,根据计算结果详细分析了各系统参数对重合系数的影响;针对武汉大学激光雷达系统的参数和对系统具体的应用目的,对影响重合系数的各参数进行了优化设计,为正确、合理使用该激光雷达系统提供了理论依据。

1 激光大气雷达系统重合系数的计算方法

在双轴激光大气雷达系统中,激光器反射的激光光束只有一部分能落入接收机视场。把在一定距离上落入视场中的光束能量与该距离上光束的总能量值之比称为该距离上的重合系数。可见,双轴激光大气雷达发射的激光脉冲在一定距离上只有一部分起作用,因此必须对激光雷达方程作修改。引入了重合系数后的激光雷达方程为^[3]:

$$P_r(R) = P_t L \beta(R) A f(r) R^{-2} T^2(R) \quad (1)$$

$$T(R) = \exp \left[- \int_0^R \sigma(r) dr \right] \quad (2)$$

式中 $R=ct/2$; $L=c\eta/2$; $P_r(R)$ 为在距离 R 处的接收回波功率; P_t 为发射激光脉冲功率; $\beta(R)$ 为高度 R 处气溶胶体后向散射系数; A 为接收望远镜的有效面积; $f(r)$ 为高度 r 处的重合系数; $\sigma(r)$ 为高度 r 处的大气

消光系数; c 为光在空气中的速度; t 为回波的到达时刻; η 为激光脉冲的持续时间。可以看出,接收功率除了受到系统参数和环境参数的影响外,还受到重合系数的影响,可以通过改变重合系数改变在某一距离上的回波接收功率。

激光大气雷达系统接收大气散射的回波功率,并根据回波功率反演大气参数,因此,准确确定重合系数,对大气回波功率进行修正,才有可能正确反演大气参数。目前,较为普遍地确定重合系数的方法有两种,一是数值算法^[4],通过计算定积分确定重合系数的数学表达式并最终求得各高度的重合系数。由于计算过程中积分函数和积分区域的精确表达复杂,数学推导过程比较繁琐;二是实验法^[3],从公式(1)出发,并且作一些假设,观测多组数据,通过斜率法,最终确定重合系数,该方法不需要知道系统参数,但最终结果受实验条件和环境参数影响较大,且不能对系统设计时的参数选择进行指导。文中选用数值算法确定重合系数。

图 1 是影响重合系数各参数的示意图。图中, W_r 为接收望远系统半径, θ_r 为接收系统的半视场角, W_t 为激光腰斑半径, θ_t 为激光光束的半发散角。从图中可以看出:在双轴激光雷达系统中,具有一定发散角的激光光束只能在一定的区域范围内与接收系统视场重合,且在不同高度上与接收视场重合的范围也不同。发射的激光光束与接收视场的重合区域即为计算

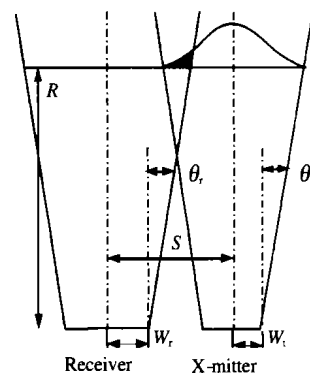


图 1 影响重合系数分布的参数

Fig.1 Parameters of affecting overlap function

重合系数时的积分区域。显然,当光斑与接收机视场均呈圆对称分布时,这一区域的大小与激光光束的发散角、望远系统的视场角、发射系统和接收系统光轴

之间的距离及两者间的不平行度、两者间的距离有关。任一参数的改变均可影响重合系数的分布。在任意高度截面上重合系数分布如图 2 所示。图 2 中左边的圆代表接收系统在某一高度上有效视场的范围,右边的圆代表整个激光光束在该截面上的分布。但发射和接收系统光轴完全平行时,两个圆相交部分是重合系数的积分区域,否则积分区域将是两圆重叠区域在该截面上的投影。

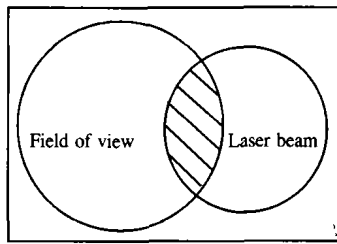


图 2 计算重合系数的积分区域

Fig.2 Integral area of calculating overlap function

为了计算重合系数的分布,仅知道积分区域的分布是不够的,还需要在积分区域内确定被积分函数,即激光光场的解析表达式。在理想情况下,一般假设激光器工作在基横模模式下,在垂直于光轴方向的截面内其振幅呈高斯分布^[5]。因此求解重合系数的问题就转化为对高斯函数求定积分的问题。由图 1 可以看出,积分限为两个锥体的空间相交部分在高度 R 截面的投影。用自编程序求解了在不同情况下,包括在发射与接收系统光轴严格平行条件下不同光束发散角、不同光轴间距离、不同接收视场角;以及在发射与接收系统光轴不严格平行,彼此间存在一定夹角条件下不同光束发散角、不同光轴间距离、不同接收视场角时重合系数的分布图。

2 计算结果和初始参数对重合系数的影响

2.1 光轴平行

目前用于观测低空气溶胶的激光雷达系统望远镜口径参数为 $W_r=20$ cm,接收系统中光电转换器件是高灵敏度的 APD,光敏面直径 0.8 mm,激光雷达工作波长 $\lambda=1064$ nm, $W_t=2$ mm,若发射系统与接收光学系统的光轴平行,则改变光束发散角、视场角和

光轴间距离时求得的重合系数的分布分别如图 3~图 5 所示。图中横坐标代表传输距离 R ,单位是 km;纵坐标代表重合系数。

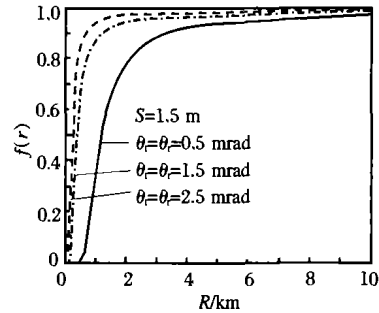


图 3 重合系数的分布

Fig.3 Distribution of overlap function

从图 3 可以看出, S 不变,随着激光的发散角和接收视场角的增加,重合系数达到 0.8 的值的距离减小,从 2~3 km 下降到 0.5 km 左右。从图 4 可以看出,在 S 和激光发散角不变的情况下,随着接收视场角的增加,重合系数达到 0.8 的距离减小得更多,从 3 km 下降到 0.2~0.3 km,而且图 4 中的虚线和点划线表明,重合系数上升得很快,除了很小的一段不能探测的距离(重合系数大约为零)外,重合系数很快达到 1。图 3 与图 4 相比可以看出,激光发散角对重合系数的影响,大的激光发散角不利于观测近距离的回波。对激光雷达系统,为了能有效接收低空回波信号,应该压缩激光的发散角和增加接收系统的视场角,但增加视场角会有更多的背景光进入视场,减小了回波信号的信噪比。

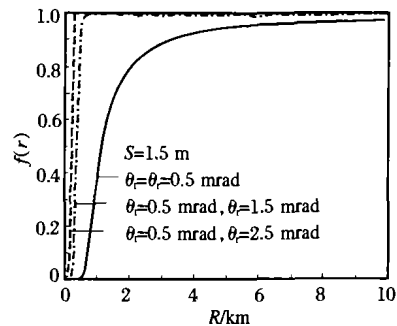


图 4 重合系数的分布

Fig.4 Distribution of overlap function

图 5 中的曲线表明,在激光发散角和接收系统的

视场角不变的情况下,减小双轴系统的两个轴之间的距离,使重合系数达到 0.8 的距离从 3 km 减小到 0.5 km,系统能有效接收低空回波信号。

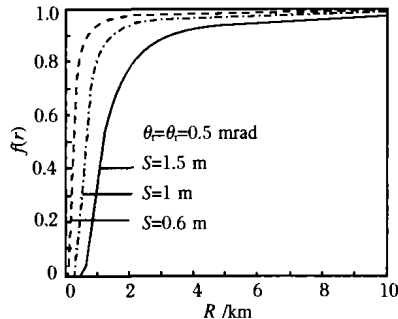


图 5 重合系数的分布

Fig.5 Distribution of overlap function

2.2 光轴失调

事实上,双轴激光雷达系统发射光轴和接收光轴不可能严格平行。将两者间夹角用符号 p 表示,当接收系统光轴与发射系统光轴在系统的上方交汇时,规

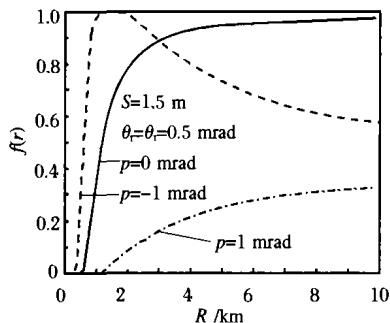


图 6 重合系数的分布

Fig.6 Distribution of overlap function

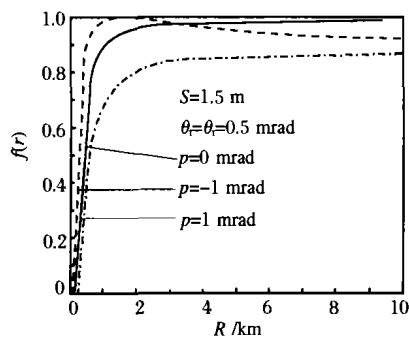


图 7 重合系数的分布

Fig.7 Distribution of overlap function

定 p 为负;反之 p 为正。可以得到在不同夹角条件下重合系数的分布,如图 6、图 7 所示。

以上两图表明,由于失调,重合系数可能会在某一范围内取得较大值。负的失调角度有利于观测近距离的回波,而正的失调角度则相反。因此,在调整系统时,应尽量避免出现正的失调角度。

3 结论

介绍了通过编程用计算机计算重合系数的方法,并给出了一些具体的计算结果,根据这些计算结果,可以分析系统参数对重合系数的影响。对于正在设计中的激光雷达系统,由于本方法计算速度快,可以选择不同的初始参数对重合系数进行计算,选择最有利于观测的重合系数曲线,从而可以指导系统初始参数的选择。

需要指出的是,本文没有考虑大气对传输中的激光的影响。另外,在高散射的气象条件下,应考虑多散射效应,对重合系数进行修正^[3,6]。

参考文献:

- [1] 阎吉祥, 龚顺生, 刘智深. 大气监测激光雷达[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] 钟志庆, 周军. 微脉冲激光雷达探测信号的数值模拟计算[J]. 量子电子学报, 2003, 20(5): 618-622.
- [3] Tomine K, Hirayama C, Michimoto K, et al. Experimental determination of the crossover function in the laser radar equation for days with a light mist [J]. Appl Opt, 1989, 28: 2194-2195.
- [4] Kenneth Sassen, Gregory C Dodd. Lidar crossover function and misalignment effects[J]. Appl Opt, 1982, 21: 3162-3165.
- [5] 周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [6] [美] E J 麦卡特尼. 大气光学: 分子和粒子散射[M]. 北京: 科学出版社, 1988.