

基于激光强度分布的激光雷达重叠因子计算及其敏感性分析

王 威¹ 毛飞跃^{1*} 龚 威¹ 李 俊²

(¹ 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079)

² 武汉科技大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081

摘要 激光雷达系统是一种功能强大的遥感设备, 具有较高的时空分辨率和精度, 广泛应用于区域或全球尺度的大气探测。重叠因子是影响激光雷达系统探测近距离大气的一个重要因素, 对其进行精确的计算有利于获得准确探测结果。基于激光强度分布的重叠因子计算方法具有简单实用的特点, 可应用于任意指定激光强度分布和不同系统参数的激光雷达重叠因子求解。利用该算法对重叠因子进行了计算, 并与实验法测量得到的重叠因子进行了对比分析。重点分析了重叠因子对各个参数的敏感性。分析结果为指导激光雷达的系统调试、优化配置和误差控制提供了一定的参考。

关键词 遥感; 光计算; 激光雷达; 重叠因子; 激光强度分布; 系统调试

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0228005

Overlap Factor Calculation Method Based on Laser Intensity Distribution and its Sensitivity Analysis

Wang Wei¹ Mao Feiyue¹ Gong Wei¹ Li Jun²

¹ State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China

² School of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China

Abstract Lidar system is a powerful equipment of remote sensing with high spatial and temporal resolution and accuracy, which is widely used in atmospheric detection in regional or global scales. Overlap factor is an important factor that affects atmosphere detection with lidar system at near range. The accurate calculation is helpful to obtain more accurate detecting results. The overlap factor calculation method based on the laser intensity distribution is simple and practical. The algorithm not only applies to any specific laser intensity distribution, but also to results simulation with different initial parameters setting. Overlap factors are calculated with this algorithm, and calculation results are compared with experimentally measured overlap factor derived from the lidar signal. Moreover, we analyzed the influences of the system parameters on overlap factor and the sensitivity of the overlap factor. The results provide a certain reference to system debugging, optimization configuration and error control of lidar.

Key words remote sensing; optics in computing; lidar; overlap factor; laser intensity distribution; system debugging

OCIS codes 140.3538; 200.4740; 220.4830

收稿日期: 2013-08-12; 收到修改稿日期: 2013-10-10

基金项目: 国家 973 计划(2011CB707106)、国家自然科学基金(41127901, 10978003)

作者简介: 王 威(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学与激光遥感、大气气溶胶监测等方面的研究。

E-mail: wangwei_work@yeah.net

导师简介: 龚 威(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学和激光遥感、地物与大气目标探测等方面的研究。

E-mail: weigong@whu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: maofeiyue@aliyun.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引 言

激光雷达是 20 世纪 60 年代以后发展起来的, 在此前经历了近百年的理论探索和工程准备, 在最近 50 年得到了快速的发展。激光雷达具有较高的时空分辨率和精度, 是一种非常强大的遥感设备, 广泛应用于区域或全球尺度的大气探测研究中^[1-2]。激光雷达分为共轴和双轴两种系统。对于共轴系统, 受某些光学元件的偏差及光学失焦的影响, 常出现近距离望远镜不能完全接收激光雷达回波信号的情况。此外, 共轴系统在调试过程中也存在较大难度, 因此在大气探测激光雷达系统中多采用双轴系统。在双轴激光雷达系统中, 激光发射器和接收器之间有一定的距离, 所以在一定的范围内, 反射的激光光束只有一部分能落入接收望远镜接收视场中。把在一定距离上后向散射落入望远镜接收视场中的能量与该距离上后向散射总能量值之比称为该距离上的重叠因子^[3]。

探讨激光雷达的重叠因子敏感性对优化激光雷达光学系统配置, 修正激光雷达回波信号具有重要作用。对反演后向散射光学信息而言, 需要估算激光雷达重叠因子^[4-5]。重叠因子计算方法主要有解析式^[6-8]、实验式^[9-11]及光线追迹式^[12-13]等方法。一般来说实验方法能得到一个相对较好的反演结果, 但实验方法很难应用到激光雷达信号模拟并指导激光雷达光学系统配置的优化^[3]。例如, 使用同时测量的 CALIPSO 激光雷达信号获得一个地面激光雷达的重叠因子, 需要至少 16 天^[14], 因此不适合用于实时优化激光雷达配置。因此, 常采用解析方法或光线追迹方法计算重叠因子。解析方法简单易实现, 但是只能用于理想的激光能量分布。而光线追迹法可应用到任何一个指定激光强度分布的激光雷达系统上, 缺点是难以满足实时优化激光雷达配置的需要。

为了解决这一问题, 提出了基于激光强度分布的重叠因子计算方法。该方法同时具有解析方法与光线追迹方法的优点, 简单实用, 可应用到任意指定光学强度分布^[15]。利用该算法对重叠因子进行了计算, 并与实验法计算得到的重叠因子进行对比验证。重点阐述了重叠因子随各个系统参数的变化, 并对其敏感性进行分析。

2 原理与方法

考虑了重叠因子的单次散射激光雷达方程为^[1]

$$P(r) = C \cdot P_0 \cdot G(r) \cdot \frac{A}{r^2} \cdot \beta(r) \exp\left[-2 \int_0^r \alpha(r) dr\right], \quad (1)$$

式中 $P(r)$ 为高度 r 处的回波信号的功率, C 为常数, P_0 为发射激光脉冲功率, $G(r)$ 为高度 r 处的重叠因子, A 为接收望远镜的有效接收面积, $\beta(r)$ 和 $\alpha(r)$ 分别为高度 r 处的后向散射系数和消光系数。

2.1 几何法计算双轴激光雷达系统重叠因子

双轴激光雷达的关键系统参数包括准直激光脉冲的初始直径 D_{L0} , 有效接收望远镜的直径 D_{T0} , 激光发射光束角变化 θ , 接收望远镜接收角 α_r 及两光轴之间的间距 d_0 。通常激光发射光轴和接收望远镜光轴间可能有小幅倾斜, 称为激光光轴倾斜角, 用 ω 表示。在激光脉冲发射高度 r 处, 光轴间距 $d(r)$ 可近似表示为

$$d(r) = d_0 - r\omega. \quad (2)$$

激光束的半径 $R_L(r)$ 和接收望远镜接收半径 $R_T(r)$ 分别为

$$\begin{cases} R_L(r) = \theta r + D_{L0}/2 \\ R_T(r) = \alpha_r r + D_{T0}/2 \end{cases} \quad (3)$$

重叠因子 $G(r)$ 是高度为 r 时, 望远镜所接收的回波信号的总能量与该高度上光束总能量的比值。根据 r 的不同, 重叠因子分为三种情况, 如图 1 所示。由图 1 可知根据高度 r 的不同, 一共可以分为 3 个区域^[15]: 1) $G(r) = 0$ 时, 为探测盲区; 2) $0 < G(r) < 1$ 时, 为过渡区, 也是需要讨论的区域; 3) $G(r) = 1$ 时, 为充满区, 回波信号能够全部被接收。

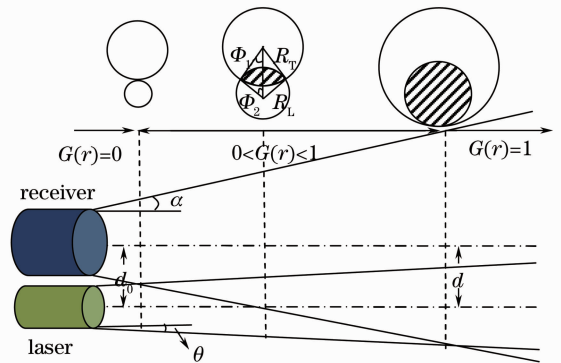


图 1 不同高度下重叠因子的变化分布

Fig. 1 Behavior of overlap factor with changing range

2.2 实验法测量重叠因子

实验法求解重叠因子可选择污染少、自然对流为主的晴朗夜晚, 将激光器与望远镜接收系统水平放置测量, 通过对测量信号进行处理获得实验几何重叠因子^[8]。假设消光系数和后向散射系数为定

值,将 $\ln[P(r)r^2]$ 用 $S(r)$ 来表示,那么(1)式可以转化为

$$S(r) = \ln(C \cdot A \cdot P_0 \cdot \beta) + \ln[G(r)] - 2\alpha_r. \quad (4)$$

对 $G(r) = 1$ 区域的测量信号进行线性拟合并进行外推,得到 $S(r)$ 的拟合值 $S_{\text{fit}}(r)$,如图 2 红色实线所示,图 2 为 2010 年 10 月 23 日测量的距离修正信号测量值及其远距离拟合。使用 S_{mea} 表示测量的距离修正对数信号,那么基于 $S_{\text{fit}}(r)$ 和(4)式推导得到重叠因子可表示为

$$G(r) = \exp[S_{\text{mea}}(r) - S_{\text{fit}}(r)]. \quad (5)$$

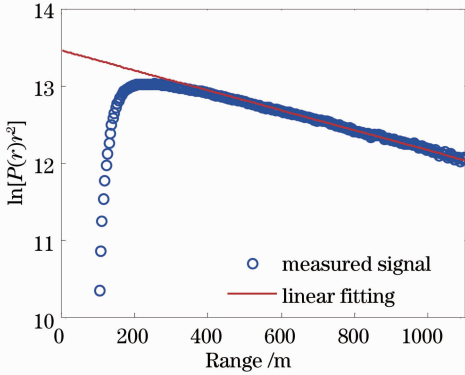


图 2 2010 年 10 月 23 日测量的距离修正信号测量值及其远距离拟合

Fig. 2 Obtained lidar signals on Oct. 23, 2010 and the least-squares linear fitting in the far region

2.3 基于激光强度分布计算重叠因子

基于激光强度分布计算重叠因子^[15]的方法思路是,首先将激光光束强度分布定义为一个 $n \text{ pixel} \times n \text{ pixel}$ 的光斑(也可称为图像或矩阵),然后判断某一高度激光光束横截面的每一个像素是否在望远镜接收视场之内,并将视场内每一个像素的激光强度累加,激光强度累加之和与总的激光强度之比即为重叠因子。图 3 为利用激光强度分布计算几何重叠因子的示意图。如果激光光轴和望远镜中心轴是平行无倾角的,则激光点会落在中心为 O'_L 的虚线框处。然后以望远镜中心点 O 为原点建立一个直角坐标系,其中通过 O'_L 和 O 两点的线为 x 轴,与通过 O 点并与 x 轴垂直的线为 y 轴。则激光点中心 O'_L 的中心坐标为 $(-d_0, 0)$ 。用 v 表示像素的边长,则 $v = 2R_L(r)/n$ 。定义激光强度分布点的一个像素 $A_{i,j}$ (i 和 j 分别是行与列的序列)的坐标值为 (x_i, y_j) ,则像素 $A'_{1,1}$ 的中心坐标可表示为

$$\begin{cases} x'_1 = -[R_L(r) + d_0 - v/2] \\ y'_1 = R_L(r) - v/2 \end{cases}. \quad (6)$$

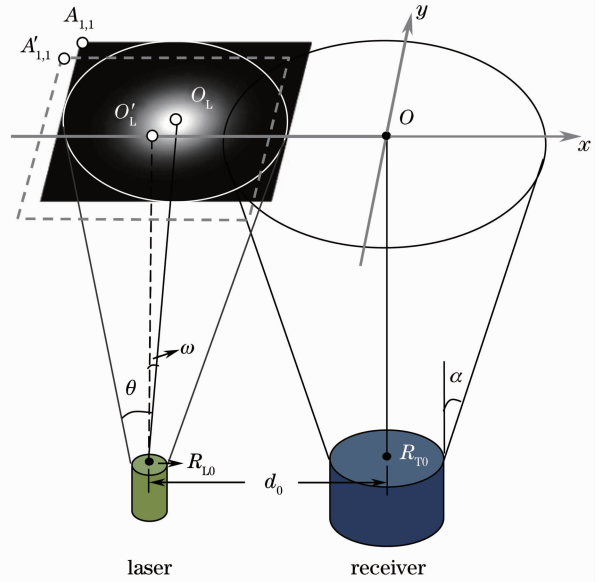


图 3 基于激光强度分布计算双轴激光雷达的重叠因子算法原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the overlap factor calculation method based on laser intensity distribution

实际中,测量中激光发射器和望远镜接收器间可能存在小倾角,可把倾角 ω 表示为 (ω_1, ω_2) ,其中 ω_1 和 ω_2 分别代表激光由 O'_L 点处向 x 方向和 y 方向的倾角。倾角的存在会造成光斑从虚线框中移出。同时, O'_L 的移至 O_L ,那么 $A_{1,1}$ 的坐标值可写为

$$\begin{cases} x_1 = -[R_L(r) + d_0 - v/2] + r\omega_1 \\ y_1 = R_L(r) - v/2 + r\omega_2 \end{cases}. \quad (7)$$

激光强度分布的任一像素的坐标可从 $A_{1,1}$ 推导出,即

$$\begin{cases} x_i = x_1 + (i-1)v \\ y_j = y_1 - (j-1)v \end{cases}. \quad (8)$$

激光强度分布的一个像素 $A_{i,j}$ 与接收望远镜的中心间的距离 R 为

$$R = \sqrt{x_i^2 + y_j^2}. \quad (9)$$

通过以下规则判断 $A_{i,j}$ 是否在望远镜的接收视场内:如果 $R \leq R_T$,那么 $A_{i,j}$ 在望远镜的接收视场内且有效,否则其在望远镜的接收视场之外且无效。定义矩阵 M 记录有效的像素,然后通过使用以下规则进行判断:对于距离为 r 时的每一个像素如果像素 $A_{i,j}$ 有效,则 $M_{i,j}$ 等于 $A_{i,j}$ 的强度 $I_{i,j}$,否则 $M_{i,j}$ 为 0。这样一来,距离为 r 时的重叠因子就等于 M 和 I 的积分之比,即

$$G(r) = \sum_{i,j=1}^n M_{i,j} / \sum_{i,j=1}^n I_{i,j}. \quad (10)$$

一般来说,该方法可应用到任何指定激光的强

度分布。只要输入一个实测或者模拟激光强度分布,就可以得到相应的激光雷达重叠因子的结果。

2.4 激光强度分布测量

测量激光强度分布的原理图如图 4 所示。其中,分束镜可以将激光中的能量分为两部分,丢弃掉占 95% 的那部分,将占总能量 5% 的那部分进一步用衰减片来削弱其能量,避免损坏 CCD 摄像机。CCD 摄像机位于聚焦透镜的焦点处,用以获得激光强度分布并在计算机中进行显示。假设在高度 r 平面上的激光强度分布与焦距处测量的激光强度分布一致。计算中,在各个高度上都使用焦距处测量得到的 $n \text{ pixel} \times n \text{ pixel}$ 光斑,但是随着高度的增加,每个像素代表的面积随着激光光束横截面的增大按比例放大。

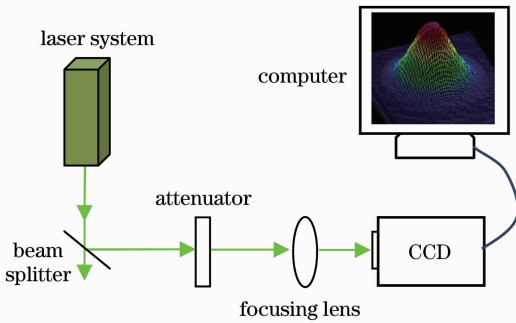


图 4 激光强度测量的原理图

Fig. 4 Schematic diagram of the laser intensity measurements

3 结果与讨论

3.1 与实验测量结果对比

为了证实基于激光强度分布计算激光雷达重叠因子方法的精度,利用 2010 年 10 月 23 日测量的数据,将计算的重叠因子与实验法计算的结果进行对比。系统在实验中所使用的发射-接收系统的几何参数,如表 1 所示。

表 1 激光雷达发射-接收系统的几何参数

Table 1 Geometric parameters of the transmitter-receiver systems

Parameters	Value
Initial diameter of the laser pulse D_{L0}/m	0.01
Half width divergence angle θ/mrad	0.50
Effective receiver telescope diameter D_{T0}/m	0.20
Receiver acceptance angle α/mrad	0.65
Initial separation distance d_0/m	0.22
Laser inclination angle $(\omega_1, \omega_2)/\text{mrad}$	(0, 0)

由实验方法测量的重叠因子如图 5(a) 蓝色点

线所示,图 5(b)~(d) 分别为利用理想高斯分布、测量的激光强度分布和均匀分布计算得到的三个重叠因子。

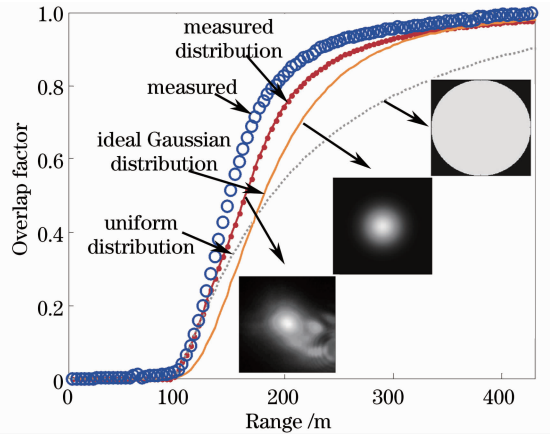


图 5 实验测得的及基于不同分布计算得到的重叠因子

Fig. 5 Measured overlap factor and calculated overlap factors based on different distributions

由图 5 可知,在 0~100 m 范围内,这 4 种分布的重叠因子基本都为 0。除了均匀分布外,其他 3 种分布的重叠因子在 400 m 处接近 1,说明此时激光束几乎完全包含在望远镜接收视场中。在距离为 100~400 m 时,根据理想高斯激光强度分布和测量而得的激光强度分布的重叠因子与实验测量得到的重叠因子最为接近,但是实验测得的激光强度分布可能由于测量误差,导致结果有些偏差。均匀强度分布的重叠因子比其他分布的增长稳定,但是由于现实中主要能量在激光束中心,而均匀强度分布的激光并非如此,因此通过均匀强度分布而得到的重叠因子在 100 m 以后就与实际情况有了较大的偏差。此外,对于每一台激光雷达其激光光束强度分布并不一样,利用理想高斯分布进行计算具有普适性,因此,后续基于理想高斯分布对参数影响进行分析。

3.2 初始参数对结果的影响

3.2.1 光轴平行的情况

对于双轴激光雷达系统,如果光轴平行,激光光束会逐步进入望远镜接收视场,直到完全进入。光轴平行是比较理想的情况,但是重叠因子仍然受激光发散光束角、望远镜接收角和激光束中心与望远镜中心之间的距离影响。

1) 激光发射光束角的影响

图 6 为重叠因子与激光发射光束角的关系,可知当望远镜接收半角和光轴距离设置为默认值,激光发射光束角越小,进入望远镜接收视场的距离越

大；激光发射光束角越大，进入望远镜接收视场的距离越小。几种情况下都会在 100 m 左右开始进入望远镜接收视场。随着高度的增加，激光发射光束角越大，重叠因子达到 1 的高度也就越大。这是因为虽然激光光束一边能很快地进入视场，但是激光光束的另外一边却难以进入望远镜的接收视场。比如图 6 中激光发射光束角为 0.7 mrad 的情况，激光发射光束角比望远镜的接收半角大，那么在这种情况下，重叠因子就不可能达到 1。如果光束在望远镜的接收视场之内（即激光发射光束角比望远镜接收角小），那么随着高度的增加，重叠因子则能达到定值 1，此时激光光束完全进入视场，如图 6 中激光发射光束角为 0.5 mrad 的情况，在 500 m 时便完全进入视场了。

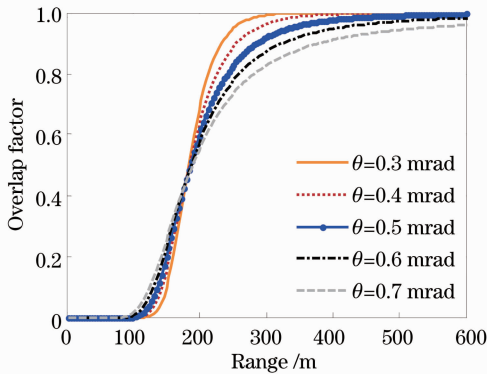


图 6 重叠因子与激光发射光束角 θ 的关系

Fig. 6 Relationship between overlap factor and laser emitting beam angle θ

2) 望远镜接收半角的影响

图 7 为重叠因子与望远镜半角的关系，可知激光发射光束角固定为 0.5 mrad 时，望远镜接收半角越大，激光光束越容易进入望远镜接收视场。而且望远镜接收半角越大重叠因子越上升越快，越早达

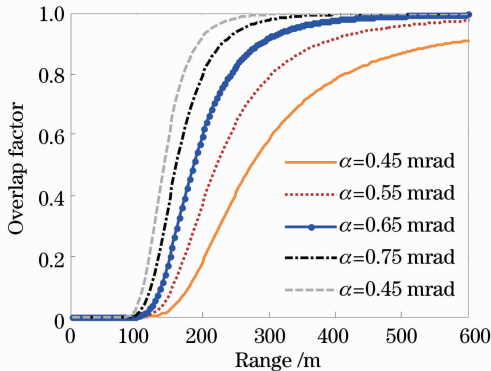


图 7 重叠因子与望远镜接收半角 α 的关系

Fig. 7 Relationship between overlap factor and receiver half angle α

到 1。比较图 6 和图 7 可知，激光发射光束角越小，望远镜接收半角越大，越有利于信号的接收。对于低空信号的接收，尤其需要压缩激光发射光束和增大的望远镜接收半角。但是，望远镜的接收半角越大，接收的背景噪声也就越大。所以，望远镜的接收半角较大有利于对低空大气的探测，此时有效探测距离比较低。对于高空信号的探测，就需要利用较小的望远镜接收半角。如果需要完整的高低空信号，就需要使用两个镜筒分别接收信号，之后将高低空信号进行拼接处理^[16]。图 7 中望远镜接收半角为 0.45 mrad 的情况，与图 6 中激光发射光束角为 0.7 mrad 的情况一样，由于激光发射光束角比望远镜的接收半角大，重叠因子无法达到 1。

3) 光轴之间距离（望远镜有效接收半径）的影响

激光发射光束角和望远镜接收半角都设置为默认值，得到重叠因子随着光轴距离变化而变化的情况，如图 8 所示。可知减小激光发射光束光轴和望远镜光轴之间的距离，能有效地降低激光光束进入视场的高度。对比光轴距离为 0.22 m 和 0.16 m 的情况，重叠因子达到 1 的高度也由 500 m 降到了 250 m 左右。光轴越近，越有利于对于低空信号的探测。此外，还验证了望远镜有效接收半径变化与重叠因子的关系。由图 8 可知，望远镜有效接收半径增加 0.06 m，与光轴之间距离减少 0.06 m 是等效的。激光发射光束初始直径的变化与望远镜有效接收半径变化是一样的，都与光轴距离变化等效。

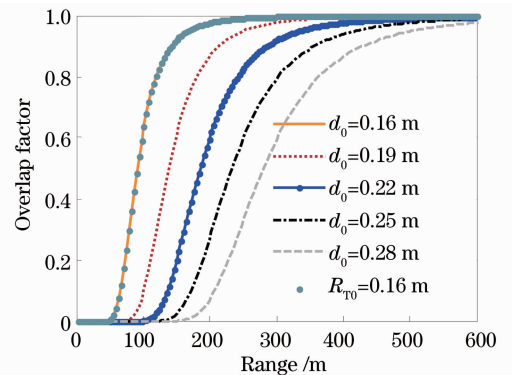


图 8 重叠因子与光轴距离 d_0 和望远镜有效接收半径 R_{T0} 的关系

Fig. 8 Relationship between overlap factor and initial separation distance d_0 and telescope effective receiver radius R_{T0}

3.2.2 光轴失衡的情况

在实际情况下，光轴之间不存在绝对的平衡，使

得光轴之间存在一个较小的夹角。将这个夹角分为两个夹角 ω_1 、 ω_2 并分别进行讨论,更能直接反映出往哪个方向的倾斜更有利于重叠因子的增加。此时,激光发射光束角、望远镜接收视场半角和光轴之间的距离设为默认值,主要考虑光轴的夹角 ω_1 和 ω_2 的变化对重叠因子的影响。

1) $\omega_2=0, \omega_1$ 变化

由图 9 所示重叠因子与光轴角 ω_1 的关系可知,在 ω_2 不变的情况下, $\omega_1=0$ 时,重叠因子曲线居于中间位置。如果 ω_1 往 $-x$ 方向改变,由图 3 可知,激光光束进入望远镜接收视场的趋势变缓。当 ω_1 往 x 正方向改变时,重叠因子增加趋势加快。因此,为了得到近地面的信号,可能需要将 ω_1 略微向正方向倾斜。但是值得注意的是,如果倾斜角度太大可能使远端偏离视场。当倾斜角度为 0 时,重叠因子增长快而且能在完全进入视场后保持为 1,这是系统的较佳状态。

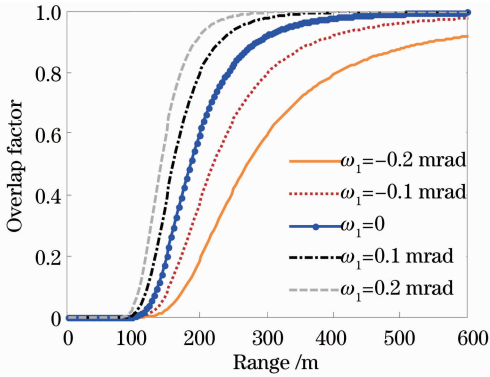


图 9 重叠因子与光轴夹角 ω_1 的关系

Fig. 9 Relationship between overlap factor and laser inclination angle ω_1

2) $\omega_1=0, \omega_2$ 变化

图 10 为重叠因子与光轴夹角 ω_2 的关系,在 ω_1 不变的情况下, $\omega_2=0$ 时,重叠因子变化最快,最先达到 1。不管 ω_1 是往 y 方向还是一 y 方向改变,对重叠因子的影响都不大。这是因为往 y 的正负方向倾斜都不能使激光光束进入望远镜接收视场速度加快,反而可能使得在远端处激光偏离视场。因此,在调试过程中, y 方向需要尽量垂直向上,与接收望远镜方向尽量保持平行。

3) ω_1, ω_2 同时变化

图 11 为重叠因子与 ω_1, ω_2 的关系,其中 ω_1, ω_2 同时由 -0.4 mrad 到 0.4 mrad 变化。可以发现,在 ω_1, ω_2 同时为 0 时,重叠因子的增长比较理想。如果 ω_1, ω_2 都往负方向偏离,则很难进入望远镜接收视

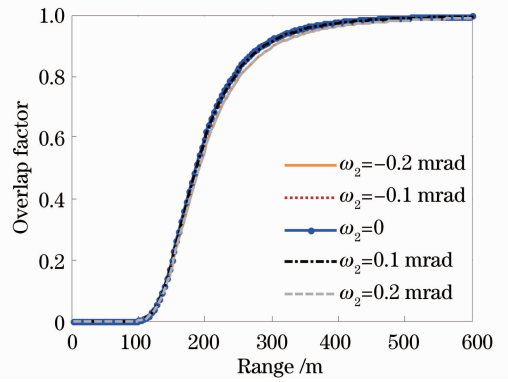


图 10 重叠因子与着光轴夹角 ω_2 的关系

Fig. 10 Relationship between overlap factor and laser inclination angle ω_2

场;而当 ω_1, ω_2 往正方向偏离并超过一定的值时,激光光束在某一高度就会偏离出望远镜的接收视场。这种情况下,重叠因子会在某一高度取得一个极大值,然后逐渐变小。 ω_1, ω_2 略微的正方向偏离有利于接收近距离的回波信号,负向偏离则相反。所以,在调试系统时,为了得到更准确、更远距离的回波信号,应尽量避免光束偏离出视场的情况。

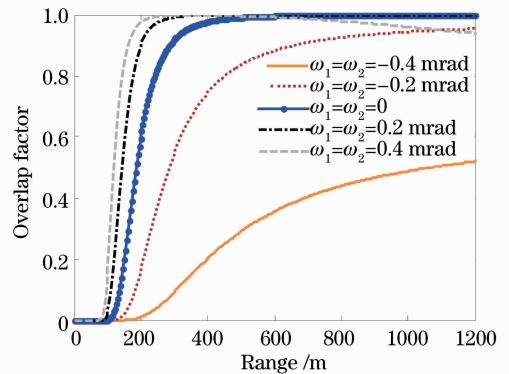


图 11 重叠因子与 ω_1 和 ω_2 的关系(ω_1, ω_2 同时从 -0.4 mrad 到 0.4 mrad 变化)

Fig. 11 Relationship between overlap factor and laser inclination angle ω_1 and ω_2 (ω_1 and ω_2 change from -0.4 mrad to 0.4 mrad, simultaneously)

4 结 论

介绍了基于激光强度分布的重叠因子计算方法,而且讨论了重叠因子对各参数的敏感性。在光轴平行的情况下,减小激光发射光束角,增大望远镜接收角有利于获取近场信号,但也增加了背景噪声。如果需要获取远场信号,就需要减少望远镜的接收角。并且,望远镜接收角一定要大于激光发射光束角,否则重叠因子无法达到 1。在光轴失衡的情况下, x 方向上的正负倾斜对重叠因子的影响很大,正

方向上的略微倾斜有利于重叠因子迅速进入视场,但是倾斜过多也会在远端偏离视场。 y 方向上的正负倾斜对重叠因子的影响很微弱,但是在倾斜角度为 0 时,重叠因子增长最快,这也是调试时系统的最佳状态。此外,要尽量避免光轴完全失衡的情况。

参 考 文 献

- 1 V A Kovalev, W E Eichinger. Elastic Lidar: Theory, Practice, and Analysis Methods [M]. New York: Wiley-Interscience, 2004. 53—56.
- 2 Dai Yongjiang. Theory of Lidar [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 1—6.
戴永江. 激光雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 1—6.
- 3 K Stelmaszczyk, M Dell’Aglia, S Chudzynski, *et al.*. Analytical function for lidar geometrical compression form-factor calculations [J]. Appl Opt, 2005, 44(7): 1323—1331.
- 4 Yan Jixiang, Gong Shunsheng, Liu Zhishen. Environmental Monitoring Lidar [M]. Beijing: Science Press, 2001. 155—156.
阎吉祥, 龚顺生, 刘智深. 环境监测激光雷达[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 155—156.
- 5 Wang Shaolin, Cao Kaifa, Hu Shunxing, *et al.*. Analysis and measurement of lidar geometrical factor [J]. Laser Technology, 2008, 32(2): 147—150.
汪少林, 曹开法, 胡顺星, 等. 对激光雷达几何因子的分析与测量 [J]. 激光技术, 2008, 32(2): 147—150.
- 6 T Halldorsson, J Langerholc. Geometrical form factors for the lidar function [J]. Appl Opt, 1978, 17(2): 240—244.
- 7 J Harms, W Lahmann, C Weitkamp. Geometrical compression of lidar return signals [J]. Appl Opt, 1978, 17(7): 1131—1135.
- 8 F Mao, W Gong, J Li. Geometrical form factor calculation using Monte-Carlo integration for lidar [J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(4): 907—912.
- 9 K Tomine, C Hirayama, K Michimoto, *et al.*. Experimental determination of the crossover function in the laser radar equation for days with a light mist [J]. Appl Opt, 1989, 28(12): 2194—2195.
- 10 S W Dho, Y J Park, H J Kong. Experimental determination of a geometric form factor in a lidar equation for an inhomogeneous atmosphere [J]. Appl Opt, 1997, 36(24): 6009—6010.
- 11 U Wandinger, A Ansmann. Experimental determination of the lidar overlap profile with Raman lidar [J]. Appl Opt, 2002, 41(3): 511—514.
- 12 R Velotta, B Bartoli, R Capobianco, *et al.*. Analysis of the receiver response in lidar measurements [J]. Appl Opt, 1998, 37(30): 6999—7007.
- 13 I Berezhnyy. A combined diffraction and geometrical optics approach for lidar overlap function computation [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(7-8): 855—859.
- 14 J Su, M P McCormick, Z Liu, *et al.*. Obtaining a ground-based lidar geometric form factor using coincident spaceborne lidar measurements [J]. Appl Opt, 2010, 49(1): 108—113.
- 15 W Gong, F Y Mao, J Li. OFLID: Simple method of overlap factor calculation with laser intensity distribution for biaxial lidar [J]. Opt Commun, 2011, 284(12): 2966—2971.
- 16 Huang Lifeng, Gong Wei, Li Jun, *et al.*. Signal splicing of dual-receiver Mie scattering lidar in atmospheric remote sensing [J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(4): 705—719.
黄立峰, 龚威, 李俊, 等. 大气遥感双视场米散射激光雷达信号拼接[J]. 遥感学报, 2012, 16(4): 705—719.

栏目编辑: 张 腾