

一种基于重叠因子的同轴警戒激光雷达动态范围压缩方法

刘 敬^{1,2,3}, 金伟其^{1*}, 阙开良²

1. 北京理工大学光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;
2. 河北省保定市天河电子有限公司, 河北 保定 071025;
3. 河北大学电子信息工程学院, 河北 保定 071000)

摘要: 针对警戒激光雷达近场信号过饱和与雨、雾等天气形成的近距离虚假信号造成“虚警”或“漏警”的问题, 研究了一种基于重叠因子的同轴警戒激光雷达动态范围压缩方法。由经典激光雷达方程以及同轴遮挡和激光光斑能量分布的概率密度函数, 建立了激光雷达方程修正模型; 针对商用警戒激光雷达进行了响应曲线测试, 并与基于激光雷达方程修正模型仿真的响应曲线进行对比分析, 验证模型的有效性; 仿真分析了发射透镜半径、光阑半径、激光发散角、接收透镜焦距四个参数对响应曲线的影响, 结果表明: 光阑半径是影响响应曲线的最主要因素, 增大光阑半径可以显著压缩近场信号, 进而压缩响应曲线的动态范围。论文建立的激光雷达方程修正模型对激光雷达初始设计具有重要指导意义及广泛的应用前景。

关键词: 激光雷达; 响应曲线; 动态范围压缩; 基模高斯激光

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230027

0 引言

激光雷达作为一种主动光电探测系统, 广泛应用于机载海洋测量^[1]、气象监测^[2-4]等领域。近年, 自动驾驶^[5-6]等行业应用激光雷达实现避障和导航。

探测距离为公里级的长距离大气探测激光雷达, 以参数反演为应用目的^[7], 较多采用望远系统作为接收光学系统, 激光器发出的光脉冲与大气中的空气分子、气溶胶和云等相互作用形成后向散射光, 后向散射光经望远系统被探测器接收形成后向散射回波信号, 对后向散射回波信号进行算法反演得到大气的相关廓线信息^[8], 精准的后向散射回波信号建模对参数反演至关重要。图 1 所示是采用卡塞格林望远系统的激光雷达^[9], 次反射镜对回波信号存在遮挡。

自动驾驶等行业应用的警戒激光雷达以获取目标距离和告警为应用目的, 通过对回波信号进行“阈值检测”^[10]获取目标距离并告警^[11]。警戒激光雷达在恶劣气象环境(雾、粉尘等)下工作时, 激光雷达出

射的激光入射到水滴或粉尘上会发生散射, 后向散射光形成后向散射回波, 前向散射光在遇到物体后被反射形成目标回波, 后向散射回波会对目标回波的检测造成干扰, 因此, 抑制后向散射回波对警戒激光雷达至关重要, 这一点与大气探测激光雷达不同。警戒激光雷达的探测距离在 10^{-1} 千米量级, 对探测距离要求相对较低, 警戒激光雷达的接收光学系统由望远系统简化为单透镜。图 2 给出采用单透镜作为接收光学系统的旁轴激光雷达和同轴激光雷达的典型光机结构示意图, 旁轴激光雷达的反射镜和同轴激光雷达的发射单透镜对回波信号存在遮挡。

一方面, 针对面目标探测的激光雷达回波信号强度与距离平方成反比^[12], 导致近场信号强度比远场信号强度大几个数量级, 响应动态范围极大。另一方面, 激光雷达发射模块光机结构遮挡部分的接收视场、发射光学系统和接收光学系统非共轴等因素会影响近场信号^[13], 导致回波信号强度并不随距离增加而

收稿日期: 2023-01-13; 修订日期: 2023-04-10

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2021CX02058); 河北大学高层次人才科研启动项目 (521000981120)

作者简介: 刘敬, 女, 讲师, 博士后, 主要从事激光雷达方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 金伟其, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事夜视与红外技术、光电图像处理、光电测试与仪器方面的研究。

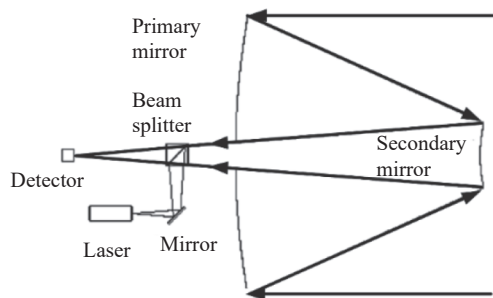


图 1 望远式长距离激光雷达光机结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of optical and mechanical structure for LiDAR using telescopic system

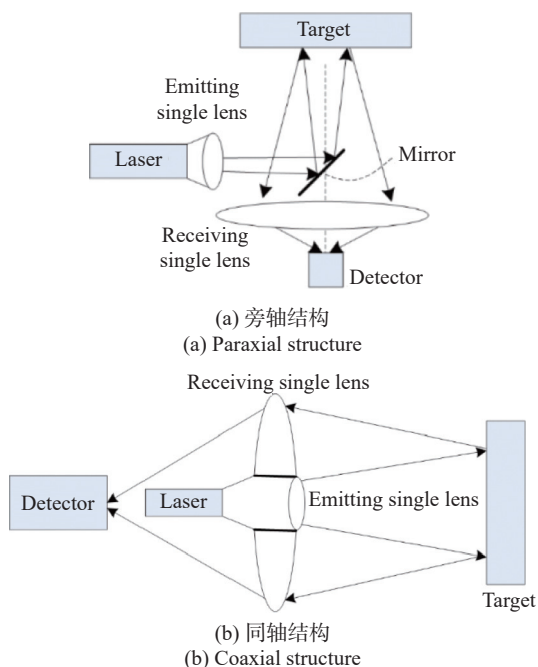


图 2 单透镜接收警戒激光雷达光机结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of optical and mechanical structure for warning LiDAR using single lens receiver

单调递减,而是随距离增加呈现先增大后减小的现象。上述两方面对大气探测激光雷达和警戒激光雷达具有不同的影响,下面分别阐述。

对大气探测激光雷达而言:一方面,针对“响应动态范围极大”的问题,可以从硬件电路控制和光学方法两个方面进行“响应动态范围压缩”,在大气探测不是很计较经济成本的前提下也可以采用高性能探测器和存储器来采集和存储大动态范围的回波信号,因此“响应动态范围压缩”对大气探测激光雷达而言不是瓶颈问题。另一方面,光机结构遮挡导致回波信号随距离增加先增大后减小,此时如果仍然按照距离平

方反比反演参数,会造成参数反演的偏差,因此,必须通过“基于光机结构参数进行激光雷达回波建模”修正后向散射回波信号,从而精确反演大气参数,大气探测激光雷达研究重点在对后向散射回波信号进行精准建模,从而“利用后向散射回波信号”实现精确的大气参数反演。通过高性能硬件电路控制方式实现激光雷达响应动态范围压缩^[14-16]存在稳定性不足、串扰强、延迟高、工艺难度大等弊端,且对优质进口芯片的依赖性强。因此,高稳定性光学方法成为该项研究的重点突破方向^[17]。2013年,张冰娜等提出一种复合自动增益控制技术,采用电子学自动增益和接收光学系统通光口径自动调节结合的方式,通过标定实现光学调节^[18]。2015年,李松等提出一种激光雷达回波能量动态范围压缩的实验调整方法,通过在实验中调节发射光轴和接收光轴的夹角、并同时调节探测器的离焦程度实现动态范围压缩^[17]。上述两种光学实验调整方案都能取得较好的动态范围压缩效果,但是对经验具有很强的依赖性。如果能基于光机结构参数建立激光雷达回波的理论模型,则能在激光雷达初始设计阶段对影响激光雷达响应的光机结构参数进行理论分析和优化设计。为了对利用光机结构特性对激光雷达后向散射回波信号进行建模的方法进行定量描述,引入重叠因子(overlap)^[9]的概念,重叠因子定义为探测器的有效接收能量与介质散射/目标反射回波总能量的比值^[19-20]。2005年,Stelmaszczykk对采用望远接收系统的收发旁轴大气探测激光雷达进行重叠因子建模,仅考虑光机结构参数的影响,没有考虑光斑能量分布的非均匀性^[20]。2014年,王威等对采用望远接收系统的收发旁轴大气探测激光雷达进行重叠因子建模,考虑了光斑能量分布和光机结构参数两方面的影响,可应用于任意指定激光强度分布和光机结构参数的大气探测激光雷达重叠因子求解^[21]。2020年,张寅超等推导了大气探测同轴激光雷达的重叠因子计算公式,用薄透镜代替望远镜进行分析计算,通过对均匀发射激光光束区域的视场函数积分与激光光束截面积的比值得到重叠因子^[13]。上述研究均针对大气探测激光雷达,研究的侧重点在于通过重叠因子修正后向散射回波信号,以便“利用后向散射回波信号”精确反演大气参数。

对警戒激光雷达而言:一方面,如前所述“警戒激光雷达在恶劣气象环境(雾、粉尘等)下工作时,激光

雷达出射的激光入射到水滴或粉尘上会发生散射,后向散射光形成后向散射回波,前向散射光在遇到物体后被反射形成目标回波”,由于后向散射光程较短,前向散射经目标反射后光程较长,因此后向散射回波在前,目标回波在后^[22],”近场信号强度远大于远场信号强度”会进一步增强后向散射回波,这导致实施“阈值检测”时将后向散射回波误检测为目标,从而导致激光雷达误告警。另一方面,光机结构对近场信号存在影响,逆向利用这一属性,通过“基于光机结构参数(重叠因子)进行激光雷达回波建模”,探索通过光机结构优化实现近场信号压缩,从而抑制恶劣气象环境(雾、粉尘等)下的后向散射回波、而不影响目标回波,从而较少警戒激光雷达误告警。

警戒激光雷达重叠因子建模研究的侧重点在于“抑制后向散射回波”,通过光机参数优化抑制近场信号、进而抑制恶劣气象环境下的后向散射形成的虚假回波信号,从而获取利于实施“阈值检测”的回波信号、准确检测出目标,而不是把后向散射回波误检为目标。这与大气探测激光雷达研究基于“精准的后向散射回波建模”来反演大气参数存在本质的不同。

针对警戒激光雷达重叠因子建模实现响应动态范围压缩鲜有文献报道,为了解决警戒激光雷达应用中的实际问题,文中针对同轴警戒激光雷达,利用同轴遮挡和激光光斑能量分布非均匀性对重叠因子的影响,提出了一种基于重叠因子的同轴警戒激光雷达动态范围压缩方法。首先,基于同轴激光雷达的光机结构和激光光斑能量分布的概率密度函数,建立激光雷达方程修正模型。然后,针对实际商用警戒激光雷达,对响应曲线进行实测和仿真,验证文中模型的有效性,进而仿真分析发射透镜半径、光阑半径、激光发散角、接收透镜焦距四个参数对响应曲线的影响。

1 基于同轴遮挡和激光光斑能量分布的激光雷达方程修正模型

1.1 经典激光雷达方程

根据辐射传输理论,当目标满足朗伯体特性、发射激光脉冲与目标表面正交、目标面积大于激光脉冲发散角所形成的光斑面积时,激光雷达方程可表达为^[12, 23]:

$$E(h) = \frac{\eta_o \rho(h) T_a(h)^2 A_r P_t}{\pi h^2} \quad (1)$$

式中: h 为目标与激光雷达间的距离; $E(h)$ 为激光雷达接收到的回波信号; P_t 为激光雷达发射的激光功率; η_o 为光学系统的效率; $\rho(h)$ 为距离 h 处目标的反射率; $T_a(h)$ 为单程大气透过率; $A_r = \pi D^2/4$ 为光学系统的有效接收面积, D 为接收透镜口径。

1.2 同轴激光雷达方程修正模型

1.2.1 同轴遮挡

图 3 所示的同轴激光雷达,发射透镜通过外圈机构镶嵌在接收透镜的中心,外圈机构起到光阑的作用。激光通过发射透镜发射出去,发射激光被发射视场内的待测目标反射形成回波信号,回波信号通过接收透镜被探测器接收。

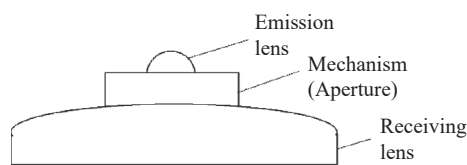


图 3 同轴激光雷达的发射透镜和接收透镜

Fig.3 Emission lens and receiving lens of coaxial LiDAR

同轴激光雷达发射视场和接收视场如图 4 所示。发射透镜上方、边界线 01 和边界线 02 之间的区域为发射视场、即激光发散角。接收透镜上方、边界线 11 和边界线 21、边界线 12 和边界线 22 之间的区域为接收视场。

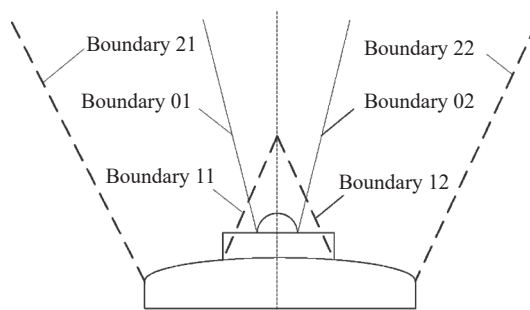


图 4 同轴激光雷达发射视场和接收视场

Fig.4 Emission and receiving fields of view for coaxial LiDAR

实际上,光阑会对接收视场造成遮挡,图 4 中光阑会对接收视场的边界线 11 和边界线 12 造成遮挡,实际的接收视场如图 5 所示,将边界线 11 修正为边界线 31,边界线 12 修正为边界线 32。通常,接收透镜半径 $D/2$ 大于 $R + b \times \tan k$,其中 R 为光阑半径, b 为光阑的高度, k 为接收视场角,由接收透镜焦距和探测

器光敏面积决定。一般接收视场角 k 大于激光发散角 t , 因此接收视场外侧边界线不会影响发射视场与接收视场的交叠, 可以将边界线 21 简化为边界线 41, 将边界线 22 简化为边界线 42, 简化后的视场交叠示意图如图 6 所示。由于光阑的遮挡, 只有在发射视场和接收视场交叠时, 待测目标反射的回波信号才能被接收透镜接收, 距离激光雷达 h 处的“有效接收范围”为发射视场与接收视场交叠的区域。

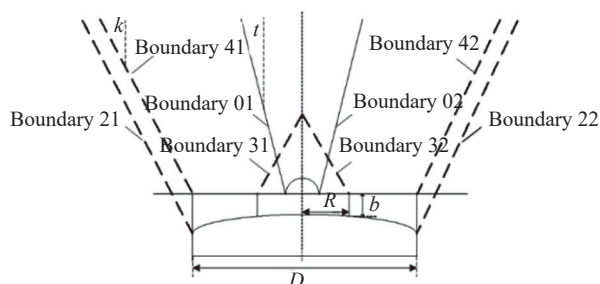


图 5 考虑遮挡时同轴激光雷达视场交叠示意图

Fig.5 Schematic diagram of overlapping field of view for coaxial LiDAR considering occlusion

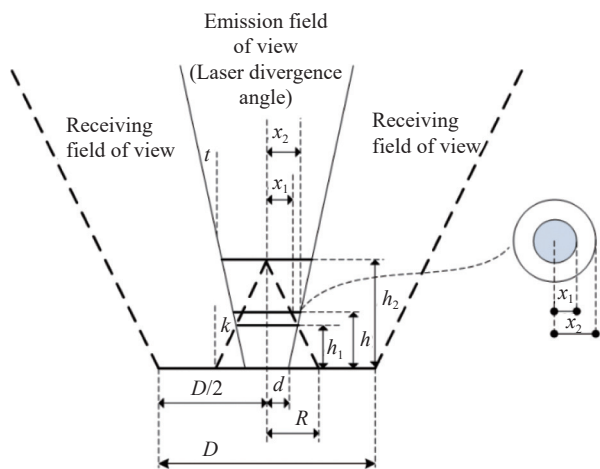


图 6 同轴激光雷达视场交叠简化示意图

Fig.6 Simplified diagram of overlapping field of view for coaxial LiDAR

根据发射视场与接收视场的交叠程度把距离 h 划分为盲区、过渡区和明区。其中, 盲区为发射视场与接收视场不交叠的区域, 过渡区为发射视场和接收视场部分交叠的区域, 明区为发射视场与接收视场完全交叠的区域。

盲区的边界距离 h_1 为盲区-过渡区的交界面与激光雷达(发射透镜)之间的距离, 过渡区的边界距离 h_2 为过渡区与明区的交界面与激光雷达(发射透镜)

之间的距离。根据几何关系, 可得 h_1 和 h_2 的计算式:

$$h_1 = \frac{R-d}{\tan t + \tan k}, \quad h_2 = \frac{R}{\tan k} \quad (2)$$

由于光阑对接收视场的遮挡, 激光雷达的“有效接收范围”随待测目标距离 h 变化而变化。假设 $x_1(h)$ 是距离 h 处接收视场的内侧边界与光轴的距离, $x_2(h)$ 是发射视场的半径, 则:

$$x_1(h) = \tan k \left(\frac{R}{\tan k} - h \right) \quad (3)$$

$$x_2(h) = d + h \tan t$$

当 $h \leq h_1$, 即待测目标在盲区时, 发射视场和接收视场不交叠, 接收透镜不能接收到回波信号, 此时有效接收范围为 0; 当 $h_1 < h < h_2$, 即待测目标在过渡区时, 发射激光被反射后和接收视场部分交叠, 此时有效接收范围为环形区域, 环形区域的内圆半径为 $x_1(h)$ 、外圆半径为 $x_2(h)$; 当 $h \geq h_2$, 即待测目标在明区时, 发射激光被反射后的回波信号被接收视场全部接收, 此时相当于 $x_1(h)$ 为 0, 明区的有效接收范围为半径为 $x_2(h)$ 的圆形区域。

当激光光斑能量分布均匀时, 可用“有效接受范围”的归一化面积作为重叠因子 $f(h)$:

$$f(h) = \begin{cases} 0 & h \leq h_1 \\ \frac{\pi x_2^2 - \pi x_1^2}{\pi x_2^2} & h_1 < h < h_2 \\ 1 & h_2 \leq h \end{cases} \quad (4)$$

然而, 实际的激光光斑能量分布往往并不均匀, 因此, 不能直接用“有效接收范围”的归一化面积作为重叠因子, 需要考虑激光光斑的能量分布来确定重叠因子, 进而用重叠因子修正激光雷达方程。

1.2.2 考虑激光光斑能量分布的同轴激光雷达方程修正模型

基于“有效接收范围”内激光光斑能量分布的概率密度函数, 计算“有效接收范围”内能量分布概率密度函数的积分, 并用能量分布概率密度函数在半径为 $x_2(h)$ 的圆形区域的积分进行归一化, 得到重叠因子。通过重叠因子对激光雷达方程进行修正, 得到激光雷达方程的修正模型。

以高斯光束为例, 图 7 是一种基模高斯光束光斑

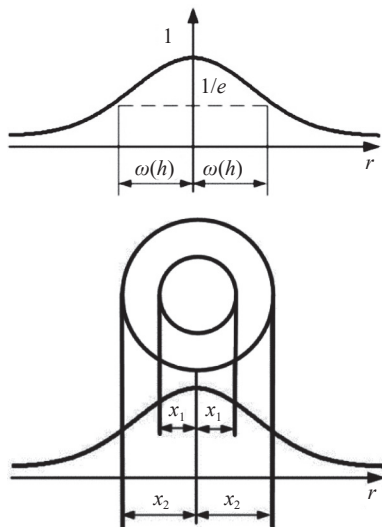


图 7 基模高斯光束光斑能量分布示意图

Fig.7 Schematic diagram of spot energy distribution of fundamental mode Gaussian laser

能量分布示意图, 距离 h 处的激光光斑能量分布的概率密度函数满足:

$$PDF(h, r) = E_0 \frac{\omega(0)}{\omega(h)} \exp(-r^2/\omega^2(h)) \quad (5)$$

式中: E_0 为距离 $h = 0$ 处激光光斑中心的能量; r 为距离 h 处激光光斑横截面内某点与光轴的距离; $\omega(h)$ 为距离 h 处的激光光束束腰半径, 对于图 6 的激光雷达, $\omega(h) = x_2(h)$ 。

距离 h 处的总光能量 $E_{total}(h)$ 是激光光斑能量分布的概率密度函数在半径为 $x_2(h)$ 的圆形区域的积分, 为:

$$E_{total}(h) = \int_{-x_2}^{x_2} PDF(h, r) dr \quad (6)$$

有效接收光能量 $E_{eff}(h)$ 是激光光斑能量分布的概率密度函数在“有效接收范围”内的积分, 为:

$$E_{eff}(h) = \begin{cases} 0, & h < h_1 \\ \int_{-x_2}^{x_2} PDF(h, r) dr - \int_{-x_1}^{x_1} PDF(h, r) dr, & h_1 < h < h_2 \\ \int_{-x_2}^{x_2} PDF(h, r) dr, & h \geq h_2 \end{cases} \quad (7)$$

用距离 h 处总光能量 $E_{total}(h)$ 对 $E_{eff}(h)$ 进行归一化, 得重叠因子 $f(h)$ 如公式 (8) 所示:

$$f(h) = \frac{E_{eff}(h)}{E_{total}(h)} = \begin{cases} 0, & h < h_1 \\ \frac{\int_{-x_2}^{x_2} PDF(h, r) dr - \int_{-x_1}^{x_1} PDF(h, r) dr}{\int_{-x_2}^{x_2} PDF(h, r) dr}, & h_1 < h < h_2 \\ 1, & h \geq h_2 \end{cases} \quad (8)$$

将公式 (8) 所示重叠因子 $f(h)$ 与公式 (1) 所示的面目标激光雷达方程相乘, 建立激光雷达方程修正模型, 获取修正信号 $E_c(h)$ 为:

$$E_c(h) = \frac{\eta_o \rho(h) T_a(h)^2 A_r}{\pi h^2} P_t \cdot f(h) \quad (9)$$

2 实验及仿真

利用保定市天河电子技术有限公司 GL-1130 型号警戒激光雷达 (参数如表 1 所示) 采集响应曲线, 并基于 GL-1130 的参数进行仿真计算, 通过对比分析实测和仿真响应曲线, 验证文中模型的有效性。

为了定量分析, 将实测和仿真响应曲线均进行归一化处理。基于模型仿真响应曲线, 除了表 1 的光学参数和机械结构参数, 还需激光雷达的出射能量 P_t 、光学系统的接收效率 η_o 、目标的反射率 $\rho(h)$ 、大气的单程透过率 $T_a(h)$ 等参数。这四个参数均不影响重叠

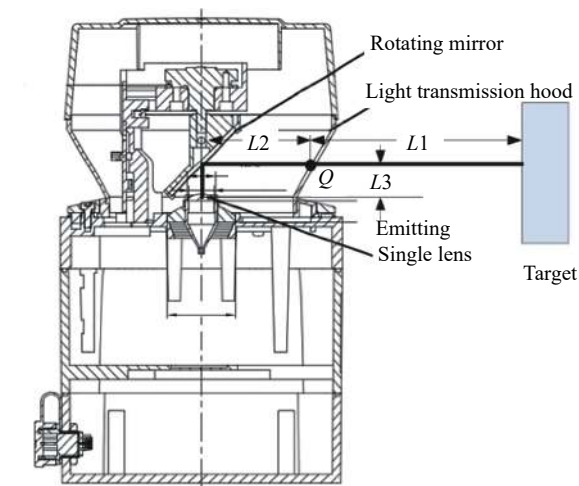
因子 $f(h)$, 故取 $P_t=1$ 、 $\eta_o=1$ 、 $\rho(h)=1$ 、 $T_a(h)=1$ 的仿真响应曲线。

响应曲线的实验原理及测试现场见图 8, 将激光雷达置于测试轨道一端, 将靶标置于测试轨道的可移动小车上, 固定激光雷达的参数设置, 采集靶标在不同距离处的回波信号, 并依据回波信号绘制响应曲线。

表 1 GL-1130 警戒激光雷达参数

Tab.1 Parameters for GL-1130 warning LiDAR

Parameter	Value
Radius of emitting lens d /mm	5.75
Radius of aperture R /mm	7
Laser divergence angle(emission field of view) $2t$ /mrad	6
Diameter of receiving lens D /mm	30
Focal length of receiving lens f /mm	40
Diameter of APD ϕ /mm	0.5
Receiving field of view $2k = \phi/f$ /mrad	13



(a) 测试示意图
(a) Test diagram



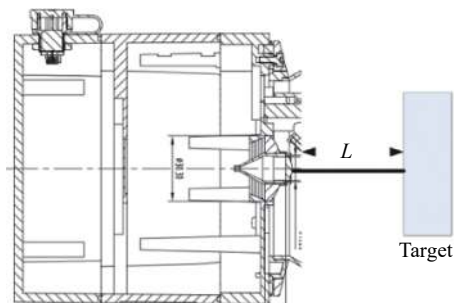
(b) 测试场景
(b) Test scene

图 8 带透光罩和旋转反射镜的响应曲线实验原理及测试现场
Fig.8 Response curve test principle and test site with light transmission hood and rotating mirror

在实际测量时,目标与激光雷达发射透镜之间的距离 $L=L_1+L_2+L_3$ 。其中, L_1 为目标与透光罩之间的距离, $L_2=48.17\text{ mm}$ 为透光罩与旋转反射镜之间的距离, $L_3=12.03\text{ mm}$ 为旋转反射镜和发射透镜之间的距离。 L_2 和 L_3 可根据激光雷达光学、机械设计参数确定。但实际测量时激光与透光罩的交点 Q 并不易确定,因此目标与透光罩之间的距离 L_1 也不易确定。

为了实验方便,在实际测试响应曲线时,摘掉激光雷达的透光罩和旋转反射镜,如图 9 所示放置激光雷达,直接测量目标到发射透镜的距离。

表 2 给出了实测不同距离回波的归一化峰值,并仿真了相应距离处修正前后回波的归一化峰值及重



(a) 测试示意图
(a) Test diagram



(b) 测试场景
(b) Test scene

图 9 不带透光罩和旋转反射镜的响应曲线测试实验原理及测试现场
Fig.9 Response curve test principle and test site without light transmission hood and rotating mirror

叠因子。因为实测数据在小于 215 mm 的距离未测到信号, 215 mm 以内的距离为激光雷达盲区, 所以从 215 mm 距离开始仿真。修正前数据根据公式 (1) 仿真得到, 修正后数据根据公式 (1)~(9) 仿真得到。激光雷达实测的信号值是 0~128 之间的整数、用最大值进行归一化得到 (0,1) 范围的小数, 不同距离仿真数据在小数点后三位有差别, 综上, 选择数据保留到小数点后三位。理论上, 修正前回波强度随距离增加单调递减。仿真数据中, 修正前回波之所以在 215 mm 处信号取最大值 1, 是因为用 215 处的信号值对其他距离的信号值进行归一化。根据表 2 绘制的响应曲线如图 10 所示。

比较分析实测、仿真数据: 实测数据在 1096 mm 处出现回波强度峰值, 并向两侧减小; 修正前仿真数据的回波强度随着目标距离单调递减、与实测数据不符; 在重叠因子的影响下, 修正后仿真数据在 895 mm 出现回波强度峰值、与实测峰值位置 1096 mm 较为接近, 且修正后回波强度向峰值两侧减小、与实测数据的变化趋势类似; 过渡区与明区的交界面与激光雷达(发射透镜)之间的距离 h_2 的仿真结果为 1104 mm, 在明区距离之外, 重叠因子取值为 1 并保持不变, 表 2

表 2 归一化激光雷达响应曲线实测数据和仿真数据

Tab.2 Measured data and simulation data of normalized LiDAR response curve

Distance <i>h</i> /mm	Measured data	Simulation data before correction	Corrected simulation data	Overlap factor
0	-	-	-	-
215	0.533	1.000	0.250	0.084
653	0.779	0.562	0.938	0.559
810	0.859	0.457	0.991	0.726
895	0.940	0.413	1.000	0.811
983	0.975	0.374	0.998	0.894
1096	1.000	0.332	0.983	0.993
1369	0.995	0.261	0.779	1.000
1739	0.827	0.207	0.618	1.000
2389	0.635	0.159	0.475	1.000
2969	0.501	0.137	0.408	1.000
4028	0.338	0.114	0.341	1.000
5052	0.231	0.102	0.306	1.000
6205	0.166	0.094	0.281	1.000
7047	0.117	0.090	0.269	1.000

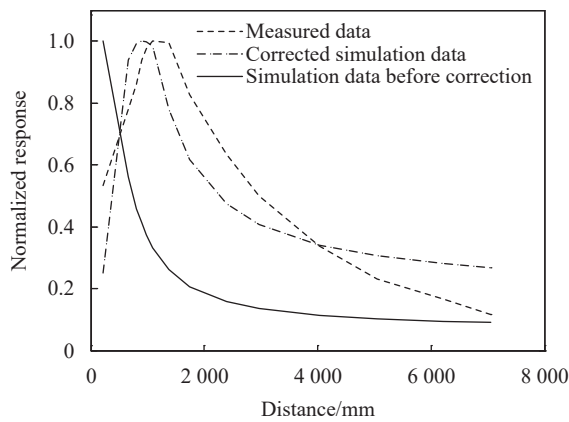


图 10 归一化激光雷达响应曲线

Fig.10 Normalized LiDAR response curve

中实测距离取离散值, 1096~1369 mm 之间的重叠因子未进行仿真, 因此, 表 2 中重叠因子数值从 1369 mm 距离开始取 1 并随着距离增加恒定为 1。考虑激光雷达制造过程中的加工装调误差等因素的影响, 实际峰值位置应略大于修正模型预测的 895 mm, 与实测的 1096 mm 更为接近。修正后仿真数据和实测数据的 Pearson 相关系数为 0.9085, 表明仿真响应曲线与实测响应曲线相关性较强, 有效证明了文中所建模型的有效性。

根据模型, 发射透镜半径 d 、光阑半径 R 、激光发散角 $2t$ 、接收视场角 $2k$ 是影响重叠因子的四个参数。接收 APD 直径 φ 和接收透镜焦距 f 决定接收视场角 $2k$, 商业产品化 APD 直径一般有 0.8 mm 和 0.5 mm 两个规格, 文中系统选择 0.5 mm 直径, 因此接收视场角 $2k$ 取决于接收透镜焦距 f 。接收透镜直径 D 不影响重叠因子, 只决定系统的有效接收面积。因此, 仿真分析发射透镜半径 d 、光阑半径 R 、激光发散角 $2t$ 、接收透镜焦距 f 四个参数对响应曲线的影响。仿真中的其他参数取值为 $P_r=1$ 、 $\eta_o=1$ 、 $\rho(h)=1$ 、 $T_a(h)=1$ 、 $D=30$ mm, 仿真结果如图 11 所示。可以看出, 发射透镜半径 d 增加、激光发散角 $2t$ 减小或接收透镜焦距 f 增大, 可以略微压缩响应曲线的动态范围, 但不显著; 光阑半径 R 增大可以显著压缩响应曲线的动态范围。因此, 在激光雷达的光机设计阶段可以考虑通过增加光阑半径实现回波信号动态范围的压缩。通过增大警戒激光雷达的光阑半径, 可以有效压缩近距离相对于远距离的响应, 从而实现后向散射回波相对于目标反射回波的压缩, 从而减小恶劣气象环境对警戒激光雷达告警的影响。同时, 光阑半径增大会带来 APD 有效接收的回波信号总体强度降低的问题, 此问题可以通过增大接收透镜的口径解决。

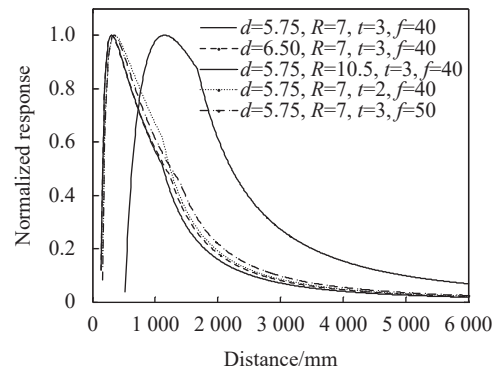


图 11 不同参数设置的归一化响应曲线仿真

Fig.11 Normalized response curve simulated with different parameter settings

3 总结与展望

文中针对警戒同轴激光雷达响应动态范围压缩问题, 提出了一种基于重叠因子的同轴警戒激光雷达动态范围压缩方法。基于同轴遮挡和激光光斑能量

分布的概率密度函数,建立了激光雷达方程修正模型,并采用商用警戒激光雷达进行响应曲线测试,实测曲线和仿真曲线具有较高的相关性,验证了文中修正模型的有效性。仿真分析了发射透镜半径 d 、光阑半径 R 、激光发散角 $2t$ 、接收透镜焦距 f 四个参数对响应曲线的影响,仿真结果表明,光阑半径 R 是影响响应曲线的最主要因素,增大光阑半径可以显著压缩响应曲线的动态范围。该模型已用于指导现有警戒激光雷达产品的优化、尤其是港口、矿山等恶劣气象环境下(雾、粉尘)应用的警戒激光雷达的优化设计,具有重要实际指导意义和广泛的应用前景,天河电子相关激光雷达产品已经投入市场应用。

光阑半径增大会带来 APD 有效接收的回波信号总体强度降低的问题,这一问题可以通过增大接收透镜的口径解决,但接收透镜口径的增大又会造成激光雷达整体体积、质量的增加。因此,实际激光雷达的设计生产中,应综合考虑性能指标、有效载荷等因素,进行总体设计。

参考文献:

- [1] He Sailing, Li Shuo, Chen Xiang, et al. Application of hyperspectral imager and lidar in marine biological detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(6): 20211033. (in Chinese)
- [2] Li Guangfu, Nan Gangyang, Pan Dongyang, et al. Research on signal acquisition and processing of lidar wind measurement system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(S2): 20210467. (in Chinese)
- [3] Di Huige, Hua Dengxin. Research status and progress of Lidar for atmosphere in China (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(3): 20210032. (in Chinese)
- [4] Lu Xianyang, Li Xuebin, Qin Wubin, et al. Retrieval of horizontal distribution of aerosol mass concentration by micro pulse lidar [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(7): 1697-1704. (in Chinese)
- [5] Wu Xiru, Xue Qiwei. 3D vehicle detection for unmanned driving system based on lidar [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(4): 489-497. (in Chinese)
- [6] Zou Q, Sun Q, Chen L, et al. A comparative analysis of LIDAR SLAM-based indoor navigation for autonomous vehicles [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(7): 6907-6921.
- [7] Xu Junjie, Bu Lingbing, Liu Jiqiao, et al. Study on airborne high spectral resolution lidar detecting optical properties and pollution of atmospheric aerosol [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0710003. (in Chinese)
- [8] Tian Xiaomin, Liu Dong, Xu Jiwei, et al. Review of Lidar technology for atmosphere monitoring [J]. *Journal of Atmospheric and Environment Optics*, 2018, 13(5): 331-341. (in Chinese)
- [9] Ihor B. A combined diffraction and geometrical optics approach for LIDAR overlap function computation [J]. *Optics and lasers in Engineering*, 2009, 47(7-8): 855-859.
- [10] Ogawa T, Wanielik G. TOF-LIDAR signal processing using the CFAR detector [J]. *Advances in Radio Science*, 2016, 14: 161-167.
- [11] Li Y, Duthon P, Colomb M, et al. What happens to a ToF Lidar in fog? [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 22(11): 6670-6681.
- [12] Shu Rong, Xu Zhihai. Imaging Principle and Motion Error Compensation Method of Lidar [M]. Beijing: Science Press, 2014: 8. (in Chinese)
- [13] Zhang Yinchao, Wang Chen, Chen He, et al. Calculation method of lidar geometric factor based on field of view [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(10): 1001001. (in Chinese)
- [14] Zhao Duliang. A discrimination and optimization method for near-field saturation of lidar: CN, ZL202011304590.9 [P]. 2021-03-16.
- [15] Wan Xueping. A correction method of laser radar signal transition region: CN, ZL201711488594.5 [P]. 2018-10-12.
- [16] Guo Shougang, Li Song. Design of time discrimination circuit for large dynamic range LiDAR [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2021, 42(1): 144-150. (in Chinese)
- [17] Li Song. Compression method for dynamic range of echo energy of lidar system: CN, ZL201510167154.4[P]. 2015-06-17.
- [18] Zhang Bingna, Huang Genghua, Shu Rong, et al. Automatic adjustment technology of diaphragm used for large dynamic laser ranging with centimetre grade precision [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1788-1792. (in Chinese)
- [19] Velotta R, Bartoli B, Capobianco R, et al. Analysis of the receiver response in LIDAR measurements [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(30): 6999-7007.
- [20] Stelmasczyk K, Dellaglio M, Chudzynski S, et al. Analytical function for LIDAR geometrical compression form-factor

- calculations [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(7): 1323-1331.
- [21] Wang Wei, Mao Feiyue, Gong Wei, et al. Overlap factor calculation method based on laser intensity distribution and its sensitivity analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0228005. (in Chinese)
- [22] Kutila M, Pyykönen P, Holzhtüter H, et al. Automotive LiDAR performance verification in fog and rain [C]//2018 21st International Conference on Intelligent Transportation System (ITSC), 2018: 1695-1701.
- [23] Li Duan, Xu Lijun, Xie Xinhao, et al. Co-path full-waveform LIDAR for detection of multiple along-path objects [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 111: 211-221.

A dynamic range compression method for coaxial warning LiDAR based on overlap factor

Liu Jing^{1,2,3}, Jin Weiqi^{1*}, Que Kailiang²

(1. MOE Key Laboratory of Photoelectric Imaging Technology and System, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Baoding Galaxy Electronic Technology Co., Ltd., Baoding 071025, China;

3. College of Electronic and Information Engineering, Hebei University, Baoding 071000, China)

Abstract:

Objective The warning LiDAR used in industries such as autonomous driving and smart mining obtains target distance and alerts by threshold detection of echo. When an warning LiDAR works in an adverse environment (fog, dust, etc.), the emitted laser pulse will be scattered when it hits water drops or dust. Backscattered light will form backscattering echo, and forwardscattered light will be reflected when encountering an object to form a target reflection echo. Backscattering echo will interfere with the detection of target reflection echo. Therefore, backscattering echo compression is essential for the warning LiDAR.

Methods For the detection of surface targets, the intensity of the LiDAR echo is inversely proportional to the square of the distance, resulting in the intensity of the near-distance echo being several orders of magnitude greater than the intensity of the far-distance echo. Because the optical path of the backscattering echo is shorter than that of the target reflection, the backscattering echo is in front of the target reflection echo. The optical and mechanical structure of the LiDAR transmission module obstructing the receiving field of view can affect the near-distance responsibility, resulting in the echo strength not monotonically decreasing with distance, but first increasing and then decreasing with distance. By reverse utilizing this attribute, we can model the LiDAR echo based on the optical and mechanical structural parameters (overlap factor) to achieve near-distance echo compression, thereby compressing backscattering echo in adverse environments (fog, dust, etc.) without affecting target reflection echo, and thus reducing false alarm rate. A dynamic range compression method for coaxial warning LiDAR based on overlap factor is proposed utilizing the influence of coaxial occlusion and non-uniformity of laser spot energy distribution on overlap factor (Fig.4-7).

Results and Discussions LiDAR with parameters in Tab.1 is used to measure response curve and parameters in Tab.1 is used to get simulated response curve. Table 2 presents datas of the measured normalized response curves, simulated normalized response curves, and overlap factors. The response curve plotted according to Tab.2 is shown (Fig.10). Comparative analysis of measured data and simulation data is conducted. The measured data showed a peak echo intensity at 1 096 mm and decreased to both sides; The echo intensity of the simulated data

before correction monotonically decreases with the target distance and does not match the measured data; The simulated data after correction showed a peak echo intensity at 895 mm, which was closer to the measured peak position of 1 096 mm. Moreover, the corrected echo intensity decreased towards both sides of the peak and showed a similar trend to the measured data. Considering the influence of factors such as processing and adjustment errors in the manufacturing process of LiDAR, the actual peak position should be slightly larger than the predicted 895 mm by the modified model, which is closer to the measured 1 096 mm. The Pearson correlation coefficient between the corrected simulation data and the measured data is 0.908 5, indicating a strong correlation between the simulation response curve and the measured response curve, effectively proving the effectiveness of the model built in this paper. Based on the above conclusions, simulation analysis is conducted to investigate the effects of four parameters on the response curve, which are the radius of the transmitting lens d , the radius of the aperture R , the divergence angle of the laser $2t$, and the focal length of the receiving lens f . The simulation results show that an increase in the radius d of the transmitting lens, a decrease in the laser divergence angle $2t$, or an increase in the focal length f of the receiving lens can slightly compress the dynamic range of the response curve, but not significantly; Increasing the aperture radius R can significantly compress the dynamic range of the response curve.

Conclusions Therefore, in the optical and mechanical design stage of LiDAR, it is possible to effectively compress the response at near distance relative to far distance by increasing the aperture radius of the warning LiDAR, thereby achieving compression of the backscattering echo relative to the target reflection echo to reduce the impact of adverse weather conditions on warning LiDAR. This model has been used to guide the optimization of existing warning LiDAR products, especially for the optimization design of warning LiDAR applications in adverse weather environments such as autonomous driving and smart mining. It has important practical guidance significance and broad application prospects.

Key words: LiDAR; response curve; dynamic range compression; fundamental mode Gaussian laser

Funding projects: Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (2021CX02058); Advanced Talents Incubation Program of the Hebei University (521000981120)