

文章编号: 0258-7025(2003)05-0398-03

532 nm 脉冲激光成像雷达的实验研究

彭勇, 雒仲祥, 向汝建, 郑为民, 张卫

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 介绍了分孔径发射/接收 532 nm 脉冲激光雷达实验装置, 分析了不同条件下背景噪声对脉冲激光雷达成像的影响, 讨论应用时间选通技术和频谱滤波技术对背景噪声的抑制效果, 通过实验研究了小视场条件下工作距离、发射激光能量及能见度之间的关系。

关键词 雷达工程; 脉冲激光雷达; 背景噪声; 信噪比; 能见度

中图分类号 TN 958.98 **文献标识码** A

Primary Experimental Research of 532 nm Pulse Imaging Lidar

PENG Yong, LUO Zhong-xiang, XIANG Ru-jian, ZHENG Wei-min, ZHANG Wei

(Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract In this paper 532 nm pulse imaging lidar experimental equipment was introduced. Both the effects of background noise and the signal-to-noise of 532 nm pulse lidar system under different conditions were analyzed. The relationship of distance, pulse-energy and visibility under narrow view-angle was researched by experiments.

Key words radar engineering; pulse imaging lidar; background noise; signal-to-noise; visibility

1 引言

在被动成像条件下, 由于各种背景辐射的影响, 限制了成像系统对远距离目标成像测量能力。根据脉冲式激光雷达的特点, 目标回光信号与背景噪声存在时序和光谱差异, 对小、暗目标或其局部进行主动照明成像, 采用时间选通和频谱滤波技术可以比较有效地抑制背景噪声和杂波干扰, 可以减小背景辐射的影响, 提高光学系统对小、暗目标的成像识别能力。532 nm 激光雷达的发射激光源为 Nd:YAG 固体激光器二倍频光, 处于可见光波长范围, 探测器 (CCD) 响应率较高, 同时 Nd:YAG 固体激光器技术比较成熟, 体积较小, 工程可靠性高, 在军事、航空与航天等领域有广阔的应用前景。

2 激光雷达距离方程

设发射激光的功率为 P_T , 发射激光的束散角为 Ω_T , 发射系统的孔径为 D , 目标反射面积为 A_R , 目标

反射率为 ρ , 单程大气路径透过率为 T , 接收系统的有效接收面积为 A_C , 设目标为朗伯反射体, 散射立体角 π , 散射功率与 $\cos^2\theta$ 成正比, θ 为入射光线与反射体面法线构成的圆锥角。目标距离为 R , 接收系统接收到的功率 P_R 可以表示为

$$P_R = \frac{P_T}{R^2 \Omega_T} \cdot \rho \cdot A_R \cdot \cos^2\theta \cdot \frac{A_C}{\pi \cdot R^2} \cdot T^2 \quad (1)$$

设目标对接收系统张角为 Ω_0 , 则 Ω_0 可以表示为

$$\Omega_0 = \frac{A_R}{R^2}$$

在局部照明条件下, 发射激光束发散角 Ω_T 小于或等于目标对接收系统张角 Ω_0 , 发射光束仅照亮目标或其特征部位, 此时 $R^2 \Omega_T$ 近似等于目标的反射面积 A_R , 则(1)式简化为

$$P_R = P_T \cdot \rho \cdot \cos^2\theta \cdot \frac{A_C}{\pi \cdot R^2} \cdot T^2 \quad (2)$$

激光通过大气路径时, 由于大气的吸收和散射^[1], 造成能量衰减, 在发射激光能量不太强的条件下, 不考虑大气的非线性效应, 光强随着传输距离 Z

收稿日期: 2002-02-25; 收到修改稿日期: 2002-04-12

作者简介: 彭勇(1974.8—), 男, 中国工程物理研究院应用电子学研究所实习研究员, 主要从事激光雷达和激光导星研究工作。E-mail: fred_peng@163.net

的变化遵从比尔(BEER)定律

$$I(\nu, Z) = I_0(\nu) \cdot \exp[-(\alpha + \beta)Z] \quad (3)$$

式中 ν 为光频率, α 为大气吸收系数, β 为大气散射系数, $(\alpha + \beta)$ 称为消光系数, 用 σ_{atm} 表示, 大气路径上消光系数 σ_{atm} 是随距离变化的量。在高空, 大气的分子散射、吸收和气溶胶散射、吸收对激光传输的影响可以比拟, 对于近地和低空传输, 则主要考虑气溶胶的散射和吸收。根据透过率的定义, 距离为 Z 的传输路径的单向透过率 T 可以表示为

$$T(\nu) = \frac{I(\nu, Z)}{I_0(\nu)} = \exp\left[-\int_0^Z \sigma_{\text{atm}}(Z) dZ\right] \quad (4)$$

3 脉冲激光雷达成像的背景噪声

成像系统的背景辐射主要有: 天空背景(云层、大气散射)、地物的反射、地物辐射以及传输路径上的大气分子与气溶胶对发射激光的散射^[2], 这些辐射进入探测器都将形成背景噪声, 影响系统信噪比和像对比度。

对于脉冲激光雷达系统, 可以通过时间滤波技术抑制背景辐射的影响。CCD 为能量积分器件, 设接收系统效率为 η_R , 激光发射功率为 P_T , 激光脉冲时间宽度为 $\Delta\tau$, 发射系统效率为 η_T , 根据距离方程, 探测器接收到的目标回光能量为

$$E_R = P_T \cdot \Delta\tau \cdot \eta_R \cdot \eta_T \cdot \rho \cdot \cos^2\theta \cdot \frac{A_C}{\pi R^2} \cdot \exp\left[-2\int_0^R \sigma_{\text{atm}}(R) dR\right] \quad (5)$$

进入探测系统背景噪声能量为

$$E_{\text{BACK}} = \eta_R \cdot (P_{\text{BACK}} \cdot t + E_{\text{SCATT}}) \quad (6)$$

式中 P_{BACK} 为自然背景辐射平均功率, t 为 CCD 积分时间, E_{SCATT} 为系统接收到的发射激光大气散射光能量

$$E_{\text{SCATT}} = P_T \cdot \Delta\tau \cdot A_C \cdot \eta_R \cdot \eta_T \cdot \int_{L_{g1}}^{L_{g2}} \beta(R) \frac{\exp\left[-2 \cdot \int_0^R \sigma_{\text{atm}}(r) \cdot dr\right]}{R^2} dR \quad (7)$$

在选通时间较短的条件下上式可以近似为

$$E_{\text{SCATT}} \approx P_T \cdot \Delta\tau \cdot A_C \cdot \eta_R \cdot \eta_T \cdot \beta \cdot (L_{g2} - L_{g1}) \cdot \frac{\exp(-2\sigma_{\text{atm}}L_{g1})}{L_{g1}^2} \quad (8)$$

脉冲发射方式下, 应用时间选通技术能够提高成像系统的信噪比, 以下分别讨论采用和不采用时间选通技术时对应的激光雷达系统成像信噪比 SNR_0 和 SNR_1 。设探测器(CCD)的采样频率为 f , 对应积分时间 t , 光开关的通光时间为 Δt 。白天自然

背景强度远大于发射激光大气散射光强度, 背景噪声主要为自然背景辐射, SNR_0 和 SNR_1 可以近似为

$$\text{SNR}_0 = \frac{E_R}{P_{\text{BACK}} \cdot (t)} \quad (9)$$

$$\text{SNR}_1 = \frac{E_R}{P_{\text{BACK}} \cdot \Delta t} \quad (10)$$

信噪比提高的倍数

$$\alpha = \frac{\text{SNR}_1}{\text{SNR}_0} = \frac{1}{f \cdot \Delta t} \quad (11)$$

在夜间, 自然背景强度远小于发射激光在传输路径上散射光强度, 背景噪声主要为发射激光的散射光, 此时信噪比 SNR_0 和 SNR_1 表示为

$$\text{SNR}_0 = \frac{E_R}{E_{\text{SCATT}}} = \frac{A_R}{\Omega_{\text{laser}} L_0^4} \frac{\exp\left[-2\int_0^{L_0} \sigma_{\text{atm}}(r) dr\right]}{\int_0^L \beta(R) \frac{\exp\left[-2\int_0^R \sigma_{\text{atm}}(r) dr\right]}{R^2} dR} \quad (12)$$

$$\text{SNR}_1 = \frac{E_R}{E_{\text{SCATT}}} = \frac{A_R}{\Omega_{\text{laser}} L_0^4} \frac{\exp\left[-2\int_0^{L_0} \sigma_{\text{atm}}(r) dr\right]}{\int_{L_1}^{L_2} \beta(R) \frac{\exp\left[-2\int_0^R \sigma_{\text{atm}}(r) dr\right]}{R^2} dR} \quad (13)$$

$$\alpha = \frac{\int_0^L \beta(R) \frac{\exp\left[-2\int_0^R \sigma_{\text{atm}}(r) dr\right]}{R^2} dR}{\int_{L_1}^{L_2} \beta(R) \frac{\exp\left[-2\int_0^R \sigma_{\text{atm}}(r) dr\right]}{R^2} dR} \quad (14)$$

在水平传输路径上, 大气散射系数 $\beta(R)$ 和消光系数 $\sigma_{\text{atm}}(R)$ 不随距离变化, 则

$$\alpha = \frac{e^{-2\sigma_{\text{atm}}L_2} - e^{-2\sigma_{\text{atm}}L_1}}{e^{-2\sigma_{\text{atm}}L_1} - 1} \quad (15)$$

4 实验装置

实验原理光路如图 1 所示, 采用分孔径发射/接收方式, 激光雷达发射系统孔径 $D_1 = 60$ mm, 光学效率 $\eta_1 = 75\%$, 发射源为 Nd:YAG 固体激光器, 工作波长 $\lambda = 532$ nm, 最大脉冲能量为 1000 mJ, 脉冲宽度 $\Delta\tau = 10$ ns。雷达接收孔径 $D_2 = 450$ mm, 效率 $\eta_2 = 18\%$, 探测器为弱光 CCD, 采样频率 $f = 25$ Hz, 探测灵敏度 0.02 Lux, 像面尺寸 5 mm × 7 mm。

为了研究激光雷达工作距离 R 和能见度 V 与激光发射能量间的关系, 分析小视场条件下激光雷达成像问题, 分别对 550 m, 1120 m 和 1750 m 距离的目标进行了系列实验。为了充分利用发射激光能量, 实验中调整激光雷达发射系统发射角, 使发射光

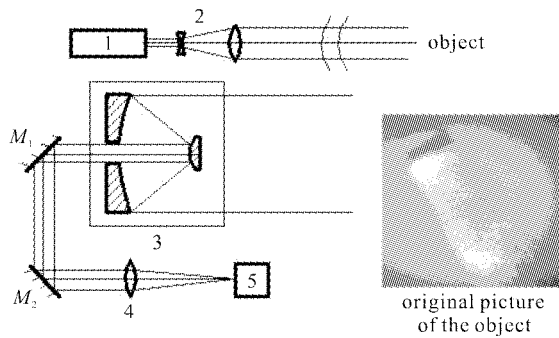


图 1 激光雷达实验光路

1: Nd:YAG 激光器; 2: 发射器; 3: 接收器; 4: 成像透镜; 5: CCD

Fig. 1 Schematic of the lidar experiment

1: Nd:YAG laser; 2: emitter; 3: receiver;
4: imaging lens; 5: CCD

束照亮目标或其关键特征部位, 目标光斑直径为 500 mm, 此时雷达方程简化为(5)式。

5 结果分析及讨论

大气的消光系数 σ_{atm} 与能见度关系密切^[2,3]。在实际工作中能见度可以方便地测量, 因此得出能见度与激光雷达工作距离关系曲线对实际应用有一定的指导意义。

成像的背景包括传输路径上的大气粒子对发射激光散射和天体的散射, 在夜间天体的背景辐射影响小, 此时影响激光雷达成像的背景噪声主要为大气对发射激光(532 nm)的散射光, 实验中照明能量与激光雷达工作距离及能见度的关系如图 2 所示, 图 3 为实验结果。在能见度较高的条件下, 实验结果和理论计算基本一致。能见度低时气溶胶散射系数较大, 散射背景增强, CCD 成像背景强度变大, 为了获得同样的对比度需要的能量增加, 造成实测数据比理论值偏大。

因为目标特性随背景变化而变化, 在复杂背景中目标特性不断变化, 对目标图像处理 and 识别极为不利。利用脉冲激光雷达技术可以将目标统一为亮目标, 减小、消除背景噪声对目标特性的影响。

大气湍流对成像的影响很大, 静态目标实验发现, 虽然不同的单帧图像质量在实验过程中基本一致, 但在不同帧图像中目标的位置变化很大, 这种“抖动”造成长曝光系统成像质量下降^[4]。在短曝光条件下, 成像的曝光时间小于大气的“冻结”时间, 大气闪烁效应的影响将得到抑制。

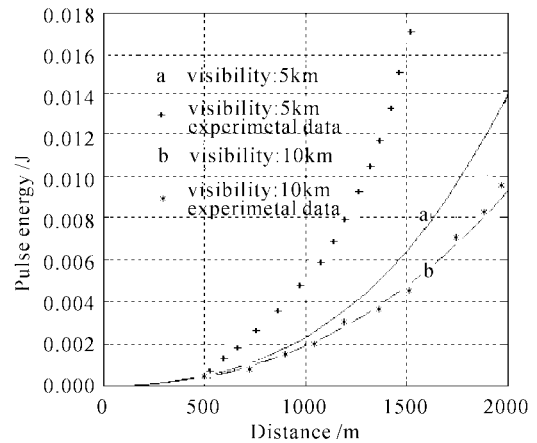


图 2 不同能见度条件下发射能量与工作距离关系曲线

Fig. 2 Curve of distance vs. emit energy under different visibility

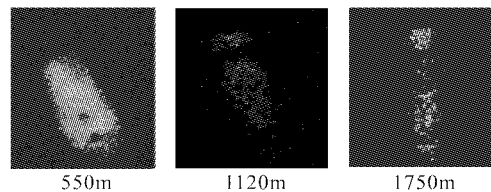


图 3 不同距离目标成像

Fig. 3 Image of different distance object

6 结 论

分析了不同条件下背景噪声对脉冲激光雷达成像的影响, 得到应用时间选通技术和频谱滤波技术条件下雷达成像的信噪比(SNR), 通过实验研究小视场条件下工作距离、发射激光能量及能见度之间的关系, 证明短曝光成像能够减小大气湍流对光学系统的影响, 提高像的质量。

参 考 文 献

- 1 Lü Baida. Propagation and Control of High-Power Laser [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999. 237~245 (in Chinese)
- 2 C. G. Bachman, Hu Guilan (translate). Laser Radar System and Techniques [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1982. 63~120 (in Chinese)
- 3 Ove Steinvall, Göran Bolander. Performance of gated viewing systems [R]. FOV-R-98-00712-612-408-SE, February 1998, ISSN1104-9154
- 4 Zhang Yixin, Chi Zeying. Light-Wave Propagation and Imagine in Atmosphere [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1997. 177~191 (in Chinese)