

文章编号 1004-924X(2008)02-0319-06

激光主动成像系统信噪比模型的研究

庞春颖^{1,2,3}, 张涛^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 长春理工大学, 吉林 长春 130022)

摘要:根据主动成像系统的成像过程,通过分析目标与背景的辐射特性、大气的后向散射特性、距离选通特性以及激光发射器和接收器的性能,建立了激光主动成像系统的信噪比模型。利用工作波长为 $0.532\ \mu\text{m}$ 的固体激光器、ICCD相机以及基于CPLD技术设计的距离选通同步控制板,进行了距离选通激光主动成像实验。实验结果表明:理论模型与实际图像的信噪比平均误差为2.58 dB,证实了该模型的合理性。

关键词:主动成像;信噪比;距离选通;后向散射

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A

Signal-to-noise ratio model of laser active imaging system

PANG Chun-ying^{1,2,3}, ZHANG Tao^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*
3. *Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*)

Abstract: According to the imaging process of laser active imaging system, the signal-noise ratio model of laser active imaging system is established by analyzing the reflection characters of target and background, atmosphere backscattering character, range gating character and the performance of laser and receiver. By using a $0.532\ \mu\text{m}$ solid laser, an ICCD camera and a range gated sync control plate based on CPLD technology, the laser active imaging experiment is done. The experimental results indicate that the average error of SNR between theoretical model and real image is 2.58 dB, which shows the SNR model is reasonable.

Key words: active imaging; signal-to-noise ratio(SNR); range gating; backscattering

1 引言

激光主动成像系统的工作原理与激光雷达基

本相同。系统用激光器作为照明光源,辐射脉冲照明目标,利用接收系统来接收探测目标反射回的光辐射并最后成像。主动成像的工作方式克服了被动成像系统易受环境光源影响的缺点,尤其

适用于在微光、夜视和散射介质中的成像以及远程小暗目标及深空目标的探测成像^[1-3]。

主动成像系统中,照明的激光光束和目标回波信号会在大气路径传输的过程中受大气衰减、目标反射、背景辐射和大气悬浮微粒后向散射的干扰而严重影响系统性能,降低了系统的成像质量。近年来,人们结合脉冲激光器和选通增强型 CCD 摄像机(ICCD),研制了距离选通主动成像系统。距离选通激光成像技术以时间的先后分开不同距离上的散射光和目标反射光,使由被观察目标反射回来的辐射脉冲在摄像机选通工作的时间内到达摄像机并成像,从而克服传统被动成像和连续主动成像的许多缺点,使其具有成像清晰、对比度高等优点^[4-7]。对于激光主动成像技术的研究,目前国内仍处于实验室的研究阶段。作为主动成像系统的理想照明光源、高效率的光学接收系统、主动成像系统的关键技术等都是这一领域应该重点解决的问题。本文通过系统分析,建立了系统的信噪比模型。该模型可用于衡量系统性能,进行系统参数和结构的优化设计。

2 信噪比模型

信噪比是衡量系统探测能力的一个重要指标。本文结合基于距离选通技术的激光主动成像系统的结构(结构框图如图 1 所示),综合考虑在激光束传输路径中所有影响信噪比的因素,根据信噪比定义并借助激光雷达模型,建立了系统信噪比模型^[8-9]。

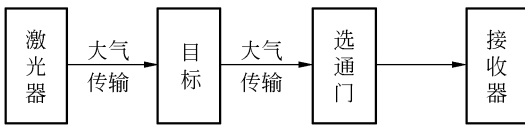


图 1 激光主动成像系统框图

Fig. 1 Diagram of laser active imaging system

2.1 目标反射的信号能量

有源激光雷达观察距离为 R 的目标,激光器的发射功率为 $P_t(W)$,激光束的发散角为 θ ,激光

束立体角为 Ω_{laser} 。激光束经大气传输,目标反射,再经大气传输到达接收器的镜头,此时激光束功率 $P_r(W)$ 如下^[10]:

$$P_r = P_t \cdot \frac{A_\Delta}{R^2 \Omega_{\text{laser}}} \cdot \frac{A_r}{R^2} \cdot T_{\text{atm}}^2(R) \eta_t \eta_r, \quad (1)$$

式中: η_t —激光发射器的效率;

η_r —接收器的接收效率;

A_r —接收器的有效面积(即为接收系统的入瞳面积);

A_Δ —入射到目标的激光束有效横截面积;

$T_{\text{atm}}(R)$ —单程大气透过率。

大气透过率 $T_{\text{atm}} = \exp \left[- \int_0^R \sigma_{\text{ext}}(R) dR \right]$, σ_{ext} 为大气总消光系数,与激光波长和各种气象条件有关。

对于平面漫反射目标, A_Δ 可以写为如下两种形式:

(1) 当入射到目标的激光束面积大于目标面积 A_{target} 时

$$A_\Delta = \frac{\rho \cos \alpha}{\pi} \times A_{\text{target}}, \quad (2)$$

式中: α 为入射光线与反射体面法线的夹角。

(2) 当入射到目标的激光束面积小于目标面积 A_{target} 时

$$A_\Delta = \frac{\rho}{\pi} \times \Omega_{\text{laser}} R^2. \quad (3)$$

将 A_Δ 代入式(1),分别得到当激光器将目标全部照明时(目标处的激光束面积大于目标表面积 A_{target})的接收器镜头处激光功率为式(4)和激光器局部照明时(激光束面积小于目标表面积 A_{target})的接收器镜头处的激光功率为式(5)。

$$P_r = P_t \eta_t \eta_r \times \frac{\rho \cos \alpha}{\pi} \times A_{\text{target}} \times \frac{1}{\Omega_{\text{laser}} R^2} \times \frac{A_r}{R^2} \times T_{\text{atm}}^2, \quad (4)$$

$$P_r = P_t \eta_t \eta_r \times \frac{\rho}{\pi} \times \frac{A_r}{R^2} \times T_{\text{atm}}^2. \quad (5)$$

距离选通成像系统的通用模型必须包括激光脉冲和门函数之间的时间关系,考虑累积一幅视频图像的脉冲重频,将式(1)加以修正,于是得到在摄像机开门时间 $\Delta\tau$ 内,接收系统所接收到的目标反射信号能量 E_{target} :

$$E_{\text{target}} = PRF \eta_r \eta_t \times \frac{A_\Delta}{\Omega_{\text{laser}} R^2} \times \frac{A_r}{R^2} \times \int_0^T g(t + 2R/c) \times P_s(t) dt \times \exp[-2 \int_0^R \sigma_{\text{ext}}(R) dR], \quad (6)$$

式中: PRF —累积一幅图像的脉冲重复频率;

$g(t)$ —门函数(摄像机快门打开时 $g(t) = 1$, 其余时刻 $g(t) = 0$);

c —光速;

$P_s(t)$ —激光脉冲功率;

t —摄像机的开门时间。

在门内($g(t) = 1$)消光系数为常数的条件下, 如果是单脉冲成像(即距离选通门开门时间为激光脉冲宽度 t_p), 并且激光对目标的照明为局部照明, 则式(6)可以简化为

$$E_{\text{target}} = E_p \eta_r \eta_t \frac{\rho}{\pi} \times \frac{A_r}{R^2} \times \exp(-2\sigma_{\text{ext}} R), \quad (7)$$

式中: $E_p = P_t \times t_p$ 为激光脉冲能量(单位: J)。

2.2 传输过程中的背景辐射能量

日光等自然辐射源在接收器上产生的背景功率, 用下式表示^[10]:

$$P_{\text{backgr}} = L_\lambda \times \Delta\lambda \times \eta_r \times \frac{\rho_{\text{backgr}}}{\pi} \times \Omega_r \times A_r, \quad (8)$$

这里 L_λ 为背景光谱辐射, $\Delta\lambda$ 为光学带通滤波器带宽, Ω_r 为接收器立体角, ρ_{backgr} 为背景平均反射系数。在选通门间隔 $\Delta\tau$ 范围内探测到的背景能量为:

$$E_{\text{backgr}} = P_{\text{backgr}} \times \Delta\tau, \quad (9)$$

进一步整理得:

$$E_{\text{backgr}} = L_\lambda \Delta\lambda \eta_r \times \frac{\rho_{\text{backgr}}}{\pi} \times \Omega_r A_r \Delta\tau. \quad (10)$$

2.3 后向散射能量

在主动成像系统中, “照明”系统通常安装在观察镜的附近, 照射远方目标的光束光轴几乎沿着观察镜的光轴, 当光束通过大气时会被散射, 其中一部分散射光逆向进入观察系统, 这就是后向散射。后向散射法在像平面上造成噪声, 使图像对比度和清晰度下降。后向散射的计算是复杂的, 它和多种因素相关: 大气的散射系数, 散射的角分布, 接收器和照明器的距离, 接收器视场角, 照明器的照明视场等。为了研究后向散射对激光照明作用的影响, 引入了如图2所示的物理模型^[11-12]。

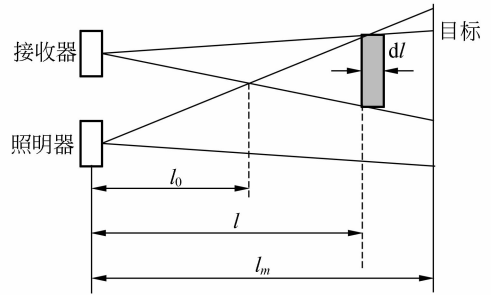


图2 后向散射模型

Fig. 2 Model of backscattering

设从激光器和接收器到它们的视场开始交叠的最近的距离为 l_0 , 到目标的距离为 l_m , 则在 l_0 和 l_m 之间接收器接收到的后向散射通量为:

$$\phi_{\text{bsc}} = \frac{\sigma_{\text{ext}} A_r}{8\pi} I_0 \Omega \int_{l_0}^{l_m} \frac{\exp(-2\sigma_{\text{ext}} l)}{l^2} dl. \quad (11)$$

则在摄像机开门时间 $\Delta\tau$ 内, 后向散射能为:

$$E_{\text{bsc}} = \phi_{\text{bsc}} \eta_r \eta_t \Delta\tau. \quad (12)$$

假设在摄像机选通门开门时间 $\Delta\tau$ 内, 对应的后向散射为单次散射(即距离门 $\Delta R = R_2 - R_1 = c \cdot \Delta\tau$), 考虑到激光照明器和激光接收器的工作效率, 将 ϕ_{bsc} 代入式(12), 并将公式中的距离用 R 表示, 则后向散射能可以表示为:

$$E_{\text{bsc}} = E_p \eta_r \eta_t A_r \times \frac{\sigma_{\text{ext}}}{8\pi} \times \int_{R_1}^{R_2} \frac{\exp(-2\sigma_{\text{ext}} R)}{R^2} dR, \quad (13)$$

如果门宽很短, 上式中的积分可以简化, 表示为式(14)

$$E_{\text{bsc}} = E_p \eta_r \eta_t A_r \times \frac{\sigma_{\text{ext}}}{8\pi} \times \Delta R \frac{\exp(-2\sigma_{\text{ext}} R_1)}{R_1^2}. \quad (14)$$

2.4 系统信噪比

根据信噪比定义, 整个系统信噪比可以表示为:

$$\text{SNR} = \frac{E_{\text{target, pix}}}{E_{\text{backgr, pix}} + E_{\text{bsc, pix}} + E_{e, n}}, \quad (15)$$

式中 $E_{\text{target, pix}}$ 、 $E_{\text{backgr, pix}}$ 、 $E_{\text{bsc, pix}}$ 分别为接收器每个像元所探测的目标信号能量, 背景辐射能量和后向散射能量。 $E_{e, n}$ 为管子的等效噪声能量。将 $E_{\text{target, pix}}$ 、 $E_{\text{backgr, pix}}$ 、 $E_{\text{bsc, pix}}$ 及 $E_{e, n}$ 代入式(15), 得出整个系统的信噪比模型如下:

$$\text{SNR} = \frac{E_p \eta_t \eta_r A_r \times \frac{\rho}{\pi} \times \frac{\exp(-2\sigma_{\text{ext}} R)}{R^2}}{L_\lambda \Delta\lambda \eta_r \times \frac{\rho_{\text{backgr}}}{\pi} \times \frac{1}{f^2 N_p^2} \times \Omega_r A_r \Delta\tau + E_p \eta_t \eta_r A_r \times \frac{1}{f^2 N_p^2} \times \frac{\sigma_{\text{ext}}}{8\pi} \int_{R_1}^{R_2} \frac{\exp(-2\sigma_{\text{ext}} R)}{R^2} dR + E_{e,n}}, \quad (16)$$

进一步整理得:

$$\text{SNR} = \frac{E_p \eta_t \eta_r \frac{\rho}{\pi} \times \frac{\exp(-2\sigma_{\text{ext}} R)}{R^2}}{L_\lambda \Delta\lambda \eta_r \frac{\rho_{\text{backgr}}}{\pi} \Omega_r \Delta\tau + E_p \eta_t \eta_r \frac{\sigma_{\text{ext}}}{8\pi} \int_{R_1}^{R_2} \frac{\exp(-2\sigma_{\text{ext}} R)}{R^2} dR + \frac{E_{e,n} \times f^2 N_p^2}{A_r}}, \quad (17)$$

式中: f 为接收光学系统焦距, N_p 为接收管分辨率。

3 主动成像实验

在夜间对野外 2 km 处目标进行了激光距离选通主动成像实验。实验中采用外触发的固体激光器, 工作波长为 $0.532 \mu\text{m}$, 平均功率为 150 mW, 激光器的发散角为 1.5 mrad, 发射效率为 1。大气消光系数为 $\sigma_{\text{ext}} = 0.1/\text{km}$, 目标为 $\rho = 0.3$ 的漫反射目标, 背景 $\rho_{\text{backgr}} = 0.1$ 。接收器为 Basler201b 摄像机, 镜头直径 $D = 80 \text{ mm}$, 焦距 $f = 80 \sim 200 \text{ mm}$, 接收管分辨率 $N_p = 60 \text{ lp/mm}$, $\Delta\lambda = 0.1 \mu\text{m}$, 等效噪声能量 $E_{e,n} = 6 \times 10^{-20} \text{ J/pixel}$ 。利用 CPLD 设计了同步控制实验板, 实现脉冲激光器和选通相机的同步控制, 保证在目标回波信号到达相机的瞬间打开相机快门。电路板可控制延迟时间和选通脉冲宽度。当目标距离 $R = 2 \text{ km}$, 延迟时间 $\tau = 1.33 \mu\text{s}$ 时, 激光器发射激光脉冲, 延迟 $1.33 \mu\text{s}$ 后启动相机对目标成像。实验结果如图 3 和图 4 所示。



图 3 连续激光照明成像

Fig. 3 Continuous laser illumination imaging

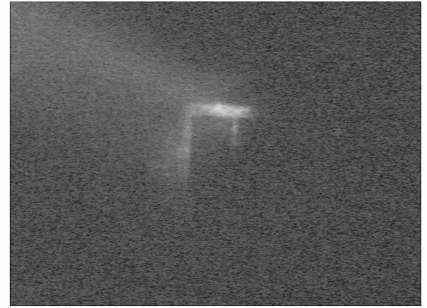


图 4 脉冲激光照明成像

Fig. 4 Pulsed laser illumination imaging

4 实验结果分析

为了验证信噪比模型, 首先利用 MATLAB 软件计算实验图片的信噪比, 结果如表 1 所示。然后, 应用已建立的信噪比模型(公式(17))计算系统的信噪比, 计算结果如表 2 所示。

表 1 利用 MATLAB 软件计算的实验图片的信噪比

Tab. 1 Results of SNR based on MATLAB

激光照明方式	信噪比(dB)
连续激光照明	2.857
脉冲激光照明(脉冲频率 1 Hz)	6.87
脉冲激光照明(脉冲频率 50 Hz)	16.25
脉冲激光照明(脉冲频率 500 Hz)	19.65

表 2 利用信噪比模型计算的信噪比

Tab. 2 Results of SNR based on SNR model

激光照明方式	信噪比(dB)
连续激光照明	6.0
脉冲激光照明(脉冲频率 1 Hz)	9.61
脉冲激光照明(脉冲频率 50 Hz)	17.91
脉冲激光照明(脉冲频率 500 Hz)	21.32

比较表1和表2的计算结果,可见实际图像的信噪比由理论模型计算的信噪比小,但是信噪比结果的趋势相同,由此可见信噪比模型的正确性。通过实验可以得出以下结论:

(1)当激光束的发散角较小,照明到目标的局部时,激光束的发散角不直接影响系统的信噪比。但发散角过小往往又造成对目标捕获的困难、捕获时间长。由此可见光束发散角的选择是进行系统设计时应考虑的一个重要问题。

(2)采用距离选通方式,可以减小后向散射和背景辐射。但是如果激光脉冲能量较小,累积一幅图像需要多个脉冲,此时后向散射的影响不可忽略,所以可考虑采用偏振的方法来区别目标回波信号和后向散射光。

(3)在传输过程中,由于大气对激光能量的衰减减小了系统的探测距离,降低了系统的信噪比,所以应根据系统不同的工作环境,选择大气窗口的激光波长,以减小大气对激光能量的衰减。

实际计算的信噪比比理论计算结果偏小的原因分析如下:

(1)后向散射能量的计算是在门宽很短的理想情况下做的近似计算。但由于激光器能量有限,必须增大开门时间,所以造成理论计算结果偏大;

(2)由于测定的目标距离存在一定的误差,所以导致延时时间存在误差,因此造成后向散射能量的增大,从而降低了系统的信噪比。

5 结 论

本文依据激光主动成像系统的成像原理,给出了激光主动成像系统目标反射的信号能量、背景辐射能量和后向散射能量的计算公式,建立了系统的信噪比模型。介绍了主动成像实验,计算了系统的信噪比。最后,分析了实验结果以及信噪比理论值与实际值之间存在误差的原因。实验结果表明:理论模型计算的信噪比与实际图像的信噪比平均误差为2.58 dB,该信噪比模型可用于基于距离选通的激光主动成像系统性能的分析评价。

参考文献:

- [1] 周立伟,刘玉岩. 目标探测与识别[M]. 北京:北京理工大学出版社,2002.
ZHOU L W, LIU Y Y. *Target Detection and Identification*[M]. Beijing: Beijing University of Science and Technology Press, 2002. (in Chinese)
- [2] MCDONALD T E. Range-gated imaging experiments using gated intensifiers[J]. *SPIE*, 1999, 3642:142-148.
- [3] DAVID D, STEVE B. Long-range laser illuminated imaging: analysis and experimental demonstrations[J]. *Opt. Eng.*, 2001, 40(6):1001-1009.
- [4] LENA K. Gated viewing in the atmosphere—a study of performance limits[J]. *SPIE*, 2002, 4723:57-68.
- [5] 王智,金光,杨简,等. 激光主动照明成像技术:分析和实验证明[J]. 长春理工大学学报, 2004, 27(4):100-104.
WANG ZH, JIN G, YANG J, *et al.*. Laser active illuminated imaging: technological analysis and experimental demonstrations[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2004, 27(4):100-104. (in Chinese)
- [6] 薛玲玲,陈波,尼启良,等. 17.1 nm 波段光电成像系统分辨率的实验研究[J]. 光学精密工程, 2005, 13(2):226-230.
XUE L L, CHEN B, NI Q L, *et al.*. Experimental study of the resolution of an optoelectronic imaging system at 17.1 nm based on MCP detector[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2):226-230. (in Chinese)
- [7] 徐晓静,元秀华,黄德修. 影响激光大气通信距离的诸因素分析[J]. 光学精密工程, 2004, 12(5):493-496.
XU X J, YUAN X H, HUANG D X. Analysis of the parameters influencing the distance of free space laser communication[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(5):493-496. (in Chinese)
- [8] 戴永江. 激光雷达原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2002.

DAI Y J. *Laser Radar Principle*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. (in Chinese)

[9] 彭勇, 雒仲祥, 向汝建, 等. 532 nm 脉冲激光成像雷达的实验研究[J]. 中国激光, 2003, 30(5): 398-400.

PENG Y, LUO ZH X, XIANG R J, *et al.*. Primary experimental research of 532 nm pulse imaging ladar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(5): 398-400. (in Chinese)

[10] STEINVALL, OLSSON H. Gated viewing for target detection and target recognition[J]. *SPIE*, 1999, 3707: 432-448.

[11] 张敬贤, 李玉丹. 微光与红外成像技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.

ZHANG J X, LI Y D. *Low-light and Infraed Imaging Technique*[M]. Beijing: Beijing University of Science and Technology Press, 2004. (in Chinese)

[12] 李丽, 高雅允, 王霞, 等. 水下距离选通成像系统后向散射光的计算[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(4): 488-491.

LI L, GAO ZH Y, WANG X, *et al.*. Optical backscatter calculation s for an underwater range-gated imaging system[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2003, 23(4): 488-491. (in Chinese)

作者简介: 庞春颖(1971—), 女, 吉林长春人, 博士研究生, 主要从事激光主动成像和智能光电仪器方面的研究。E-mail: pangchunying8888@163.com

张 涛(1964—), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光主动成像方面的研究。

● 下期预告

唇动图像序列的加权组合特征分析

王蒙军¹, 李 刚¹, 林 凌¹, 曾锐利^{1,2}

(1. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院 天津 300072; 2. 军事交通学院 天津 300161)

为了充分利用参与特征融合的不同唇形特征的有效鉴别信息, 使得合成的新特征向量具有更强的分类能力, 首先采用加权组合的方法, 选取唇形区域的几何特征向量和由离散余弦变换描述子表述的唇形轮廓特征向量进行特征融合, 通过实验得到一组较优的加权因子, 合并两类特征, 形成新的特征向量; 然后应用隐马尔可夫模型对新的特征向量进行学习和识别, 分析识别效果。基于独立汉字发音的实验结果表明: 加权组合两类特征后所形成的新特征向量比单纯采用任何一种特征向量都能够提高唇形识别的效果; 配比不同的加权因子, 最多可将识别率提高 2.5%。可见加权组合的特征融合方法使得两组特征能够以比较均衡的比例参与融合, 有利于提高唇形识别的效果。