

主动探测回波激光脉冲时域特性

杨雨川, 谭碧涛, 龙 超, 陈力子, 张己化, 陈军燕

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘 要: 利用“猫眼”效应原理实施目标主动探测, 能够快速、准确发现空间光学侦察设备。激光脉冲辐照不同的反射目标, 产生回波经大气传输后具有不同的脉冲展宽, 利用该特性可实现对不同目标的识别和定位。利用光子散射理论分析了近地面气溶胶散射效应引起的脉冲展宽, 给出了影响脉冲展宽的主要因素, 建立了“猫眼”和漫反射背景回波脉冲展宽的计算物理模型; 为验证模型, 设计并实施了基于飞艇平台的动态主动探测验证实验, 实验结果表明: 激光脉冲经过 8~10 km 斜程大气传输, “猫眼”和飞艇背景漫反射回波分别展宽了 20~30 ns 和 90 ns, 与物理模型计算值具有较好的一致性, 验证了物理模型的正确性, 该模型可为区分和提取“猫眼”回波信号提供理论依据。

关键词: 大气散射; “猫眼”效应; 背景漫反射; 脉冲展宽

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)12-3228-06

Time-domain characteristics of active detecting echo laser pulse

Yang Yuchuan, Tan Bitao, Long Chao, Chen Lizi, Zhang Jihua, Chen Junyan

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: The active laser detection basing on "cat's eye" effect can detect space optical observation equipments. The laser pulse transmitting in the atmosphere will be broadened to affect the echo waveform distribution from the target, and the echo pulse width is different from the dissimilar reflective target, which can be used to determine detecting target. Based on the photon scattering theory, the pulse broadening caused by the aerosol scattering effect near the ground was analyzed, the calculation physical model was built to resolve "cat's eye" and diffuse reflection echo pulse broadening and the main factors affecting pulse broadening were provided. The active detecting dynamic tests aiming at the optical cabin loaded on the aeroboast were implemented to validate the physical model, the test results show that the "cat's eye" and background diffusion reflection echo signals are respectively broadened 20~30 ns and 90 ns after 8~10 km slant path atmospheric transmission. Based on the built physical model, the theoretical pulse broadening on dynamic test condition is accordance with the actual test results, which provides theoretical proof to distinguish and pickup "cat's eye" echo signal.

Key words: atmospheric scattering; "cat's eye" effect; background diffuse reflection; pulse broadening

收稿日期: 2013-04-10; 修订日期: 2013-05-15

基金项目: 国家高技术发展计划

作者简介: 杨雨川(1983-), 男, 博士, 主要从事激光技术及应用研究。Email: yyc_online@126.com

0 引言

利用光电系统的“猫眼”效应,即对入射光的强反射现象,用适当面积的激光束扫射、扫描、跟踪远处的光电系统,可实现对空间光电系统的主动探测和精确定位。国内外对基于“猫眼”效应的主动探测技术开展了大量的研究^[1-5],主要集中在分析回波信号幅值的影响因素上。激光脉冲回波信号,除了信号幅值外,脉冲的时间波形也是反映回波信号的主要特征量。主动探测激光辐照到搭载有光电系统的运动平台后,运动平台背景也会产生漫反射回波,从而影响对光学系统窗口的精确定位,通过分析回波信号的时域特性来区分空间平台的光学窗口和平台背景是一个较好的方法。

激光脉冲在大气中传输,受到大气散射的影响,散射路径上的光脉冲相对于直接路径上的光脉冲延时到达接收端,并合成一个比发射脉冲更宽的脉冲信号,这一信道弥散效应的结果类似于微波和无线电波中的多径效应^[6-7]。基于光子散射理论,建立了扩束激光大气散射脉冲展宽物理模型,给出了“猫眼”和背景漫反射回波信号的展宽计算公式。设计了主动探测动态实验,搭载光学吊舱的飞艇进入实验航道后,发射扩束激光脉冲,搜索到飞艇目标后进行小角度扫描,并由大口径回波接收系统中的雪崩二极管(APD)分别测量“猫眼”和背景漫反射回波信号。通过实验,测量了“猫眼”和背景漫反射回波信号脉冲,对多个脉冲进行统计得到不同信号的脉冲展宽量,该实验结果与物理模型的理论计算结果具有较好的一致性,为正确辨识光学系统的“猫眼”回波信号,实现对光电设备的精确定位提供了理论支持。

1 大气散射对发散激光脉冲传输展宽的理论分析

激光脉冲展宽效应主要是由大气介质的散射效应所引起的,而大气散射效应主要是大气层中的气溶胶所引起的。参考文献[8]将经典电子散射理论应用到光子散射研究中,分析了海水散射效应引起的水下激光脉冲传输延迟效应,该模型主要是针对细激光束,分析扩束发散激光时需要模型进行修正。

考虑图 1 所示的扩束激光脉冲大气传输模型,

激光脉冲扩束发射(先聚焦后发散),由于大气气溶胶粒子散射效应的作用,光子的传输轨迹长度将随不同的散射路径而不同,时间轨迹长度的不同将引起脉冲展宽。图中,激光器与接收系统的间距为 d ;发射激光的发散角为 Φ ,焦点位置在 1 km 附近;“猫眼”光学系统的视场角为 Ψ_0 ;“猫眼”系统回波发散角为 Ψ_r ,该角度与光学系统的焦距有关;回波接收系统视场为 Ψ_r 。

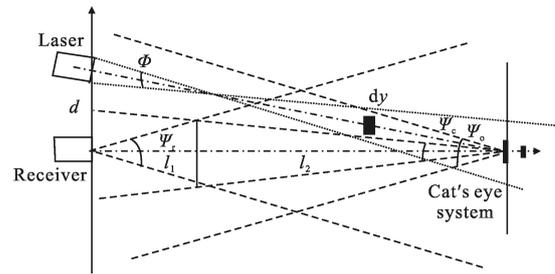


图 1 激光探测和接收示意图

Fig.1 Sketch of laser detecting and receiving

光子在气溶胶粒子中的散射角分布满足标量散射位相分布函数 $P(\gamma_0)$,可以得到近似光子有效散射投影角^[9]:

$$\sigma = (\omega_0 \tau \langle \gamma_0 \rangle^2)^{1/2} = (\omega_0 \tau \int_0^\pi \gamma_0 P(\gamma_0) d\gamma_0)^2 \quad (1)$$

式中: $\omega_0 = b/c$ 为大气单程散射反照率, c 为大气体衰减系数, b 为大气体散射系数; $\tau = b \cdot V$ 为大气体积 V 范围内的散射体个数,也就是体积范围内光子与气溶胶粒子相互作用的次数,进而可以用 $\omega_0 \tau$ 描述体积 V 范围内光子被散射的次数。 γ_0 为光子与粒子单次碰撞时的散射角, $P(\gamma_0)$ 为粒子标量散射位相函数,在实际应用中,一般通过实验测定各个散射方向上的散射光强度,然后拟合经验公式。对于气溶胶粒子产生的米散射,粒子直径与激光波长近似,有如下经验公式^[10]:

$$P(\gamma_0) = 2b\eta/\gamma_0 \exp(-\eta \times \gamma_0), \eta \approx 10 \quad (2)$$

从图 1 可以看出,散射区域 V 应该是激光发射锥体与“猫眼”系统接收锥体的相交部分,和“猫眼”系统发散锥体与回波系统接收锥体的相交部分,该区域由实验几何配置决定。如图 1 所示的结构,“猫眼”回波信号的散射体积公式为:

$$V = \frac{\pi}{3} \left[r_1^2 z_f + \left(\frac{\Phi}{2} \right)^2 (z - z_f)^3 \right] - \frac{\pi}{3} \left[\frac{\Phi(z - z_f)}{4} \right]^2.$$

$$\left[\left| \frac{d+r_1+\frac{\Psi_0}{2}z}{2} - \frac{\Phi(z-z_f)-2(d+r_1)}{2z} \right| + \left| \frac{d-r_1-\frac{\Psi_0}{2}z}{2} - \frac{\Phi(z+z_f)-2(d-r_1)}{2z} \right| \right] + \frac{\pi l_1}{3} \left(l_1 \frac{\Psi_r}{2} \right)^2 + \frac{\pi l_2}{3} \left(l_2 \frac{\Psi_c}{2} \right)^2$$

$$l_1 = \frac{z\Psi_c}{\Psi_r + \Psi_c}, l_2 = \frac{z\Psi_r}{\Psi_r + \Psi_c} \quad (3)$$

式中: r_1 为发射光束口径; z_f 为发射光束的焦距; l_1 和 l_2 为回波信号与接收系统视场相交位置对应的轴向距离。漫反射条件下的散射体积 V_{diff} 为:

$$V_{\text{diff}} = \frac{\pi z}{3} (r_1^2 + r_2^2 + r r_2) + \frac{\pi l_1}{3} \left(l_1 \frac{\Psi_r}{2} \right)^2 + \frac{\pi l_2}{3} \cdot \left[r_2^2 + r_2 \left(\frac{\Psi_c}{2} l_2 + r_2 \right) + \left(\frac{\Psi_c}{2} l_2 + r_2 \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中: r_2 为辐射在背景上的光斑面积。类比经典电子散射理论中的处理方法, 将大气中的粒子看作不带电的球性粒子, 入射光子与粒子之间的散射可采用类似电子散射的方法进行处理。根据参考文献[8]的推导过程, 最终得到脉冲展宽量的表达式为:

$$\Delta T = \frac{2zn}{C} \left\{ \frac{8}{27\omega_0\tau \int_0^\pi \gamma_0 P(\gamma_0) d\gamma_0} \cdot \left[\left[1 + \frac{9}{4} \omega_0\tau \int_0^\pi \gamma_0 P(\gamma_0) d\gamma_0 \right]^{3/2} - 1 \right] \right\} \quad (5)$$

式中: z 为脉冲单程传输距离, m; C 为光速, m/s; n 为传输介质的折射率。

2 验证实验设计与实施

建立了以“猫眼”效应为基础的主动探测空间光电设备动态实验平台。“猫眼”效应的原理是入射到光学镜头视场内的光线经过物镜聚焦到探测器光敏面或者分化板上后, 一部分光沿原光路反射回来。该动态实验平台主要包括: 激光脉冲发射装置、飞艇载体、装有对地观察 CCD 相机的光学吊舱和脉冲回波接收系统。工作模式如下: 利用“猫眼”效应原理, 发射高频调制的 532 nm 激光脉冲, 通过传动机构可实现对动态目标的实时跟踪和瞄准, 飞艇携带装有对地观察 CCD 相机的光学吊舱升空进入实验航道, 经激光辐照后在发射位置附近采用回波接收系统测量脉冲回波信号。工作模式及构成框图如图 2 所示。

实验工作过程如下: 飞艇起飞后通过发送机体 GPS 信号, 导引激光和回波系统对准飞艇; 飞艇进入

实验航道后, 光电吊舱的 CCD 相机光学系统指向发射区域, 发射设备接到工作指令, 向目标发射脉冲激光, 同时进行小角度扫描辐照不同位置, 包括: 飞艇背景和光学吊舱, 回波接收系统收集光信号并聚焦到探测器光敏面上转换为电信号, 经放大和 A/D 转换后将回波信号保存到计算机中。实验过程中存在天空辐射背景, 但该信号为直流信号, “猫眼”和漫反射信号都是交流信号易与之区分。

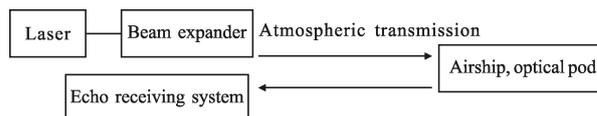


图 2 实验模式框图

Fig.2 Block diagram of experiment mode

3 实验结果

分别测量了 8 km 和 10 km 航捷点位置的回波信号。输出激光脉冲宽度(半高全宽)为 150 ns, 重复频率为 10 kHz, APD 的 A/D 采样频率为 500 MHz, 采样位数为 8 位, 输出电压范围为 ± 1 V。为了提高脉冲信号的采集效率, 设置采集触发电平为几十毫伏, 且仅输出脉冲峰值附近的有限个采样点, 因此实际输出的数据点远少于 A/D 系统的采样点数, 8 km 位置测量的典型脉冲信号如图 3 所示。由于光源为高重频的脉冲激光, 因此测量到的回波信号为一系列的周期性脉冲信号, 且图 3 中记录的脉冲波形具有

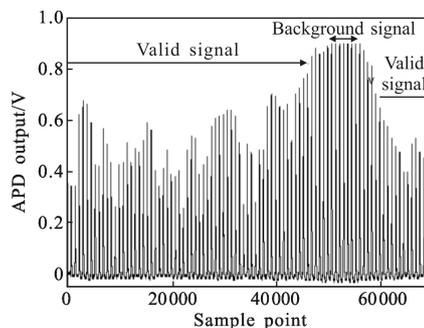


图 3 8 km 位置主动探测回波信号波形图

Fig.3 Waveform of echo signal for active detection at 8km location

较好的保真性。图 3 对数据段进行了标注, 有效信号段为光学窗口的“猫眼”回波信号, 背景信号段对应为激光辐照在飞艇表面产生的漫反射信号。为便于观察, 图 4 将“猫眼”回波信号和背景漫反射信号分别进行了放大, 结果表明背景漫反射信号和“猫眼”

信号的脉冲展宽量分别约为 90 ns 和 30 ns, 漫反射信号的脉冲展宽更为显著。而且, 此段测量数据的结果表明背景漫反射信号强度强于猫眼信号, 原因主要有两个: 实验采用的猫眼系统孔径小, 有效直径不足 3 cm, 而且系统内部存在遮光光阑, 导致入射猫眼系统的功率原本就较弱; 测量背景漫反射信号时, 大部分探测激光都落在了飞艇背景上, 导致漫反射源的功率增强(与辐照面积成正比)。综合以上两个因素, 使得此段测量数据中漫反射回波信号强度大于猫眼回波信号。

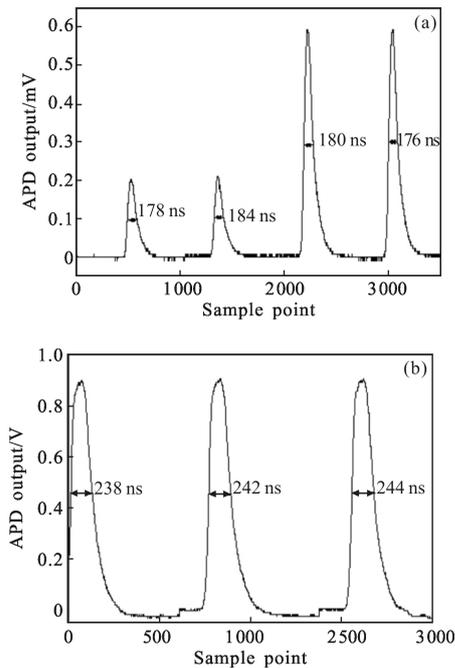


图 4 猫眼回波信号波形图和背景漫反射信号波形图

Fig.4 Waveform of cat's eye echo signal and background diffuse reflection signal

在航捷点位置 8 km 和 10 km, 分别采集了回波信号, 其中 8 km 光电吊舱对应的焦距约为 50 mm, 10 km 光电吊舱对应的焦距约为 100 mm。提取回波脉冲的宽度并进行统计分析, 结果如表 1 所示, 在 8~10 km 范围内“猫眼”回波信号平均脉宽展宽了 20~30 ns, 单个

表 1 脉冲宽度统计结果(单位: ms)

Tab.1 Statistical results of pulse width(Unit: ms)

	Mean value	Standard deviation	Max value	Min value
8 km	184.86	7.56	194	176
10 km	169.05	7.68	184	156

脉冲展宽量存在一定程度的起伏。8 km 位置背景漫反射回波信号的脉冲展宽约为 90 ns。

4 计算结果和讨论

由公式(5)可知, 脉冲的单程传输距离 z , 大气体衰减系数 c , 大气体散射系数 b , 光子散射角 γ_0 , 散射体积 V (包括输出激光脉冲的发散角, 吊舱 CCD 光学系统的视场角和反射发散角, 回波接收系统的接收角度范围)均影响脉冲展宽。其中, 已知量包括传输距离 z , 体衰减系数 c , 输出激光脉冲的发散角 $\Phi=0.6$ mrad, 回波接收系统的接收范围 $\Psi_r=3$ mrad, Ψ_c 为几个毫弧度(焦距范围内 $\Psi_c < 4$ mrad)。体衰减系数一般可以用一个与能见度有关的经验公式来表示:

$$c = \frac{3.912}{v} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-q} \quad (6)$$

式中: v 为能见度, km; λ 为光波波长, nm; λ_0 为 550 nm; q 为与能见度有关的参数。实测能见度为 27 km, 体衰减系数为 0.1513 km^{-1} ($q=1.3$)。单程散射反照率随波长的变化较小, 从可见光到红外谱波段, 其值由 0.6 到 1.0 变化, 计算时选取 0.8。

由公式(3)和(5), 可计算得到实验条件下的“猫眼”信号脉冲展宽量, 结果如图 5(a)所示。图 5(a)给出了展宽量随“猫眼”系统回波发散角 Ψ_c 的变化关系, 由图可知, Ψ_c 在毫弧度量级, 对应的展宽量为几十纳秒与实验结果一致。根据公式(5)和参考文献[6-8], 相同条件下脉冲展宽量随传输距离增大而增加, 表 1 中 8/10 km 的实验统计结果却与之相反, 其主要原因: 散射体积 V 是决定脉冲展宽量的主要因素, 而回波发散角又是决定散射体积 V 的主要参量, 该参量与光电吊舱的有效焦距有关, 10 km 动态实验条件下, 焦距动态变化导致回波发散角变小(散射体积 V 减小), 脉冲展宽量也随之减小。当激光脉冲传输距离远大于 10 km, 发散光束的扩散严重, 此时远离光轴中心的激光能量较弱, 产生的散射可忽略, 散射体积 V 可近似简化为传输路径 z 与发射光束出口口面积 πr_1^2 的乘积。

利用公式(4)和公式(5), 计算图 3 中 8 km 位置漫反射信号的展宽量, 结果如图 5(b)所示。图 5(b)为漫反射条件下的脉冲展宽计算结果, 脉冲展宽量初始随漫反射角增大而增加, 最后趋于稳定, 脉宽增加

约 80 ns, 与图 3 的实测值非常接近, 其展宽量大于“猫眼”信号回波脉冲展宽量的原因为, 实验中采用了发散激光束, 8 km 位置光束直径约为 4.3 m, 该光斑辐照在飞艇背景上, 回波辐射面积大于“猫眼”系统, 且漫反射回波的传输角度大于“猫眼”信号回波(毫弧度量级)的发散角, 因此漫反射信号具有更大的散射体积, 对应的脉冲展宽量也更大。由于光学系统猫眼信号的脉冲展宽量与平台背景漫反射回波的脉冲展宽量不同, 通过实测回波信号的脉冲宽度便可实现对平台上搭载光学目标的识别定位。

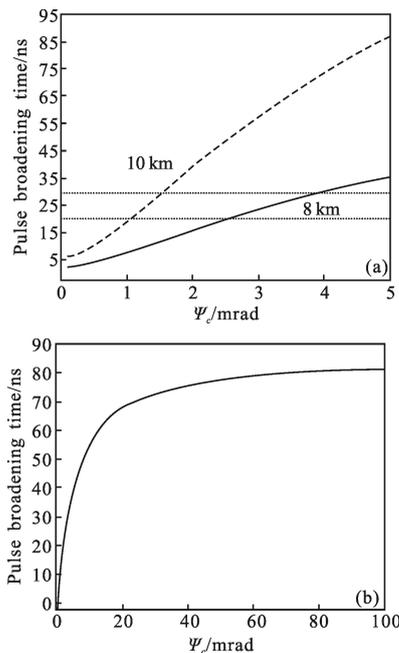


图 5 “猫眼”和漫反射回波脉冲展宽计算结果

Fig.5 Cat's eye and diffuse reflection echo pulse broadening time results

参考文献[7]对几千米范围内大气引起的脉冲展宽进行了计算, 展宽量为几个纳秒, 参考文献[12]在两个山顶上分别架设了激光发射器和接收装置, 发射激光脉冲 30 ns, 经过云层传输接收端的脉冲展宽到 1~10 μ s, 脉冲展宽量相差如此之大, 究其原因是因为散射体积不同, 散射体积越大, 不同光子传输路径的延时越大, 光脉冲展宽也就越大。为避免强激光损坏猫眼光学系统的成像芯片, 该次实验采用了发散激光束, 回波辐照面积和散射体积均较大; 试验中猫眼信号回波的发散角在毫弧度量级, 具有较大的后向回返激光散射体积; 同时, 测量系统较大的接收孔径和视场范围也是导致散射体积较大的原因之

一。参考文献[11]对脉冲展宽对机载激光扫描仪性能的影响进行了理论分析, 得到回波脉冲宽度随扫描角度增加而增大, 与文中的实验和分析结果相一致。

5 结论

主动探测脉冲激光在大气中传输, 受到近地面气溶胶粒子散射的影响, 发生脉冲展宽, 利用展宽量的差异可用来区分空间目标光电系统和载体背景的回波信号, 实现对光电系统的精确定位。为了描述激光脉冲展宽和区分“猫眼”、背景漫反射回波信号, 结合光子散射模型和大气气溶胶散射特性, 建立了脉冲展宽物理模型, 模型中传输距离, 大气体衰减系数, 大气体散射系数, 光子散射角和散射体积均将影响脉冲展宽量。在主动探测动态实验中, 分别测量到了“猫眼”和漫反射回波信号, 结果表明: 脉冲经过 8~10 km 传输, “猫眼”回波信号脉宽增加了 20~30 ns, 激光辐照飞艇产生背景漫发射, 8 km 漫反射回波信号脉宽增加了约 90 ns。基于理论模型计算了实验条件下的脉冲展宽量, 计算与实测结果具有较好的一致性, 为识别和提取“猫眼”回波信号, 实现光电系统精确定位提供了理论依据。

参考文献:

- [1] Wu Dengxi, Wang Shiyu, Zheng Yongchao. Experiment on the atmospheric turbulent influence on active far IR laser detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(6): 986-990. (in Chinese)
吴登喜, 王石语, 郑永超. 大气湍流对红外激光主动探测影响的试验[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(6): 986-990.
- [2] Lei Ping, Xing Hui, Xue Ting, et al. Analysis of detecting capability for active laser detection system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(6): 981-983. (in Chinese)
雷萍, 邢晖, 薛挺, 等. 激光主动探测系统的探测能力分析[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(6): 981-983.
- [3] Lecocq C, Deshors G, Lado-bordowsky O, et al. Sight laser detection modeling[C]//SPIE, 2003, 5086: 280-286.
- [4] Glaser I. Diffractive surface for cat-eye array retro-reflectors [C]//SPIE, 2008, 7100: 71001Q-1-71001Q-9.
- [5] Titterton D H. A review of the development of optical countermeasures[C]//SPIE, 2004, 5615: 1-15.
- [6] Liang Bo, Zhu Hai, Chen Weibiao. Simulation of laser communication channel from atmosphere to ocean [J]. *Acta*

- Optica Sinica*, 2007, 27(7): 1166–1172. (in Chinese)
- 梁波, 朱海, 陈卫标. 大气到海洋激光通信信道仿真[J]. 光学学报, 2007, 27(7): 1166–1172.
- [7] Han Cheng, Bai Baoxing, Yang Huamin, et al. Study and simulation of air influence on laser pulse transmission delay time[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(8): 2046–2050. (in Chinese)
- 韩成, 白宝兴, 杨华民, 等. 大气信道对激光脉冲延迟时间影响的仿真研究[J]. 光学学报, 2009, 29(8): 2046–2050.
- [8] Stotts L B. Closed form expression for optical pulse broadening in multiple-scattering media [J]. *Appl Opt*, 1978, 17(4), 504–505.
- [9] Jerlov N G. *Marine Optics* [M]. New York: Elsevier Scientific Pub Co, 1976.
- [10] Arnush D. Underwater Light-beam propagation in the small-angle-scattering approximation [J]. *J Opt Soc Am*, 1972, 62(9): 1109–1111.
- [11] Guo Guanjun, Jiao Weiyan, Qu Shiliang, et al. Effect of pulse spreading on the ranging performance of airborne laser scanner[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(3): 51–60. (in Chinese)
- 郭冠军, 焦威严, 曲士良, 等. 脉冲展宽对机载激光扫描仪性能的影响[J]. 光学工程, 2010, 37(3): 51–60.
- [12] Bucher E, Lerner R M. Experiments on light pulse communication and propagation through atmospheric clouds [J]. *Appl Opt*, 1973, 12(10): 2401–2414.