

机载激光距离选通成像大气后向散射光强研究

寇 添 王海晏 王 芳 王 领

空军工程大学航空航天工程学院, 陕西 西安 710038

摘要 结合距离选通技术在机载激光主动成像中的应用,对距离选通模型参数的时序关系进行了分析,得出了大气后向散射范围和单位截面的脉冲前点和后点时刻;给出了大气后向散射光强计算方法,并对机载激光主动成像斜程探测距离进行了修正;利用散射截面上点的物像关系,建立了探测成像系统光路图,给出了散射截面反射点与增强电荷耦合器(ICCD)探测器面接收点位置光强的对应关系;通过数字仿真分别得到水平和斜程探测器面光强的变化规律,以及像面上的光强分布情况;搭建了外场实验平台,得到实测结果与仿真结果的数据相对误差基本控制在5%以内,具有很好的符合程度,实测结果验证了所建模型的实效性。

关键词 大气光学;激光主动成像;距离选通;大气后向散射;成像系统;光强分布

中图分类号 TN249 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0113003

Study on Back-Scattering Light Intensity in Airborne Laser Range-Gated Imaging

Kou Tian Wang Haiyan Wang Fang Wang Ling

School of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University,
Xi'an, Shaanxi 710038, China

Abstract Based on the application of range-gated technology in the airborne laser detection imaging system, temporal relations of the parameters in the model of range gating are analyzed in detail and effective scope of atmospheric backscatter and the before- and after-pulse points of the unit section are obtained. A horizontal range-gated imaging model is established and the calculation method of back-scattering light intensity is given, and then tilt detection distance of airborne laser active imaging is revised. Based on the object-image relation of points on the scattering section, the light path diagram of detecting imaging system is built and the corresponding relationship of light intensity between scattering points and receiving points is provided. The variation regularity and distribution of light intensity on the detector under horizontal and tilt detection are gained. An outfield test platform is set up, and the relative error between measured data and simulation results is controlled within five percent, the measured data are consistent with the simulation results to a higher degree, which demonstrates the effectiveness of the built model.

Key words atmospheric optics; laser active imaging; range gating; atmospheric backscatter; imaging system; light intensity distribution

OCIS codes 010.1310; 110.4280; 040.1520; 140.3538; 290.1350

1 引 言

与机载红外设备相比,机载激光成像设备抗电磁干扰和抗隐身能力强,具有较高的角度、距离和速度分辨率优势,可在漆黑的夜晚、能见度低的恶劣天气条件下,探测暗弱目标,其在军事上的远距目标识别、精确制导等领域有着广泛的应用前景^[1]。机载激光主动探测成像过程中,由于大气对激光能量的散射和吸收作

收稿日期: 2014-07-08; 收到修改稿日期: 2014-10-10

基金项目: 航空科学基金(20095596014)

作者简介: 寇 添(1990—),男,硕士研究生,主要从事光电探测与对抗方面的研究。E-mail: shanxiakkt@163.com

导师简介: 王海晏(1968—),男,博士,副教授,主要从事光电火控技术、航空火力指挥与控制等方面的研究。

E-mail: whh_shx@sohu.com

用,使得被探测有用信号变得弱小,甚至会淹没在强烈的后向散射光信号当中,不能较好地探测和识别目标。因此,有效地克服后向散射是激光主动成像系统必须解决的关键问题^[2]。文献[3-7]在激光主动成像方面主要集中在水下探测研究,大气探测研究文献相对偏少。目前,利用距离选通技术^[8]是实现激光主动探测成像的最佳手段,可以填补被动成像许多缺点,可全天候工作,具有提高像质、不受环境光源影响等优点。

2 距离选通时序模型分析

在距离选通成像中,激光初始脉宽 τ_p ,探测器延迟时间 t_{del} 和选通门宽 τ_d 三个参数之间的时序关系以及激光脉冲传输过程如图 1 所示。

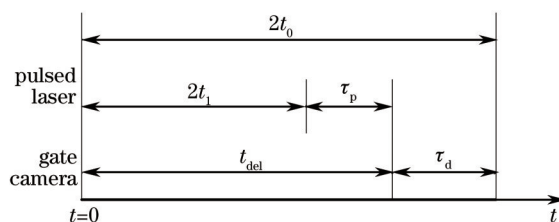


图 1 激光脉冲传输与选通时序关系

Fig.1 Temporal relation between pulse propagation and gate reception

图 1 反映了激光脉冲发射与增强电荷耦合器(ICCD)探测面接收的两个时序过程, t 轴表示时间轴, $2t_0$ 和 $2t_1$ 表示激光脉冲经大气传输后,其脉冲前沿分别在 $v_p t_0$ 和 $v_p t_1$ 距离处大气截面后向散射回到探测器面的时刻, v_p 为光在大气中的传输速度。当选通系统经过 t_{del} 延迟即将开门时刻,有 $t_{del} = 2t_1 + \tau_p$,在这一时刻($v_p t_1$ 距离处),探测器面刚好能接收到后向散射光能量;当选通系统再经过 τ_d 开门时段即将关门时刻, $2t_0 = t_{del} + \tau_p$,在这一时刻($v_p t_0$ 距离处),探测器面刚好接收不到后向散射光能量。距离选通的时序过程说明增强电荷耦合器探测器对大气后向散射光有一定的接收范围,这个范围 l_z 应该满足不等式

$$v_p t_1 = \frac{1}{2} v_p (t_{del} - \tau_p) \leq l_z = v_p t \leq v_p t_0 = \frac{1}{2} v_p (t_{del} + \tau_p). \quad (1)$$

实际应用中,该范围内大气截面的后向光散射能否被探测器接收还取决于选通时序。文献[9]在分析水体后向散射时,给出了 $v_p t$ 处单位水体截面后向散射对应的脉冲前点和后点时刻,在大气中这个结论应为

$$\begin{cases} t_b = \min(\tau_p, t_{del} + \tau_d - 2t) \\ t_f = \max(0, t_{del} - 2t) \end{cases}. \quad (2)$$

3 单次成像大气后向散射光强累积计算模型

3.1 水平后向散射光强计算

水平距离上进行距离选通的激光主动成像,可认为机载探测器所在的大气层分布均匀,该层大气衰减系数和后向散射系数都为常数,忽略大气湍流和热晕效应^[10],建立脉冲激光后向散射模型如图 2 所示。图 2 中 z 轴为接收光轴; x 轴、 y 轴垂直于 z 轴,在散射截面上;散射截面与探测器面距离为 l_z ;探测器与发射器

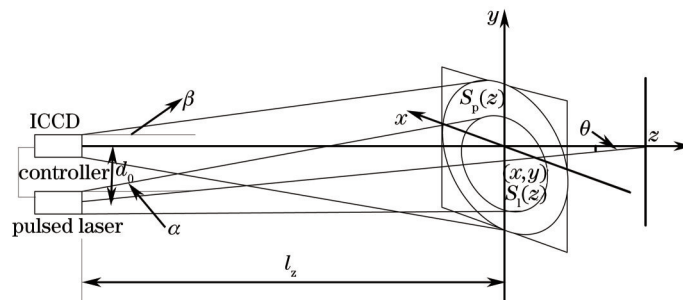


图 2 激光脉冲后向散射模型

Fig.2 Model of laser pulse backscatter

间距为 d_0 ;脉冲激光发射与接收轴线夹角为 θ ; $S_1(z)$ 为散射截面上脉冲激光照射圆斑面积; $S_p(z)$ 为探测器接收视场在散射截面上的投影面积。

如图 2 所示,脉冲激光在散射截面上的圆斑半径为

$$r_1(z) = (r_p + l_z \tan \alpha) \cos \theta, \quad (3)$$

式中 r_p 为距离 l_z 处的发射扩束镜半径; α 为激光发散角。探测器在散射截面上的视场半径为

$$r_d(z) = r_c + l_z \tan \beta, \quad (4)$$

式中 r_c 为探测器光学系统入瞳半径; β 为接收半视场角。散射截面上脉冲激光垂直截面圆心与探测器视场圆心间距 $d = d_0 - l_z \tan \theta$ 。若脉冲激光功率为 P_0 , 机载探测器处于大气层高度 H 时总衰减系数为 $\gamma(\lambda)$, 则距离 l_z 处散射截面所受的光照度为

$$E_1(z) = \frac{P_0 \exp[-\gamma(\lambda)l_z]}{S_1(z)} = \frac{P_0 \exp[-\gamma(\lambda)l_z]}{\pi[r_1(z)]^2}. \quad (5)$$

探测器所能接收的大气后向散射体范围内的体积元 $dV = S_1(z)dl_z$, 由 dV 产生的后向散射光强度为 $dI = \sigma(\lambda)E_1(z)dV$, 被探测器接收到的后向散射光功率为

$$dP_1(z) = \Omega \exp[-\gamma(\lambda)L_1]dI = \Omega\sigma(\lambda)P_0 \exp[-\gamma(\lambda)(l_z + l_z/\cos \theta)]\frac{1}{S_1(z)}dl_z, \quad (6)$$

式中探测器对体积元所张立体角 $\Omega = \pi r_c^2/l_z^2$; L_1 为散射光传输距离; $\sigma(\lambda)$ 为大气后向散射系数。探测器在散射体范围所能接收到的光累积强度为

$$I = \int_{r_p'}^{r_p''} P_1(z)(t_b' - t_t')dl_z. \quad (7)$$

3.2 斜程后向散射光强计算

机载激光主动成像最具实际意义的是斜程探测, 这种情况下, 每层大气后向散射系数以及总衰减系数都不相同, 因而需要对这两个参数进行特殊考虑, 以求取精确的光散射强度。对于光路斜程传输问题, 一般将其等效为水平路程, 对斜程进行修正^[11]。由于衰减系数 $\gamma(\lambda) = \sigma(\lambda) + \delta(\lambda)$, 其中 $\sigma(\lambda)$ 和 $\delta(\lambda)$ 分别为散射系数和吸收系数, 它们受大气密度影响最大。考虑到大气压随高度的变化规律 $P_H = P_0 \exp(-0.123H)$, 通过斜程等效模型可将距地高为 $H_1 \sim H_2$ 的斜程等效为近地水平路程 L_2 :

$$L_2 = \frac{\exp(-0.123H_1) - \exp(-0.123H_2)}{0.123 \sin \varphi}, \quad (8)$$

式中 φ 为地平线与光传输方向的夹角, 与 L_2 相应的衰减系数取近地值 $\gamma_0(\lambda)$, 此时后向散射参数 $\sigma(\lambda)$ 也取近地大气值 $\sigma_0(\lambda)$ 。将 $L_2, \gamma_0(\lambda), \sigma_0(\lambda)$ 代入(6)式, 可求得斜程后向散射光强度。

4 探测器像面上大气后向散射光强分布

在距离选通成像系统中, 散射截面上每点都遵循物像成像关系。增强电荷耦合器探测器上接收到的光强位置分布与散射截面上每点后向散射光强位置相对应, 且后向散射光强在实际应用中并不是集中于一点, 而是形成一个弥散光斑^[12], 因此建立如图 3 所示的成像关系图。 O 和 O' 分别为成像系统坐标原点和像面坐标原点; P 和 P' 分别为物、像点, 其坐标分别为 (x, y, l_z) 和 (x', y', L_p') ; 物方和像方介质折射率为 n 和

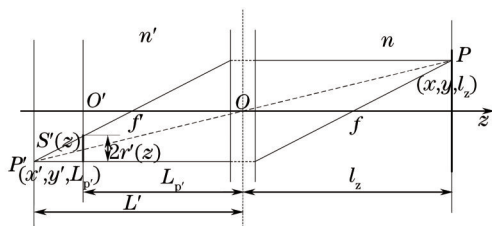


图 3 散射截面上点的成像关系图

Fig.3 Imaging diagram of points in the scattering cross section

n' , 弥散斑直径为 $2r'(z)$ 。

在该成像系统中, 有 $\frac{f'}{f} = \frac{n'}{n}$, $\frac{1}{f} = \frac{1}{L'} + \frac{1}{l_z}$; 垂轴放大率公式为 $\frac{y'}{y} = -\frac{f'}{f} \cdot \frac{L'}{l_z}$, 由于大气距离选通光学成像系统两侧介质折射率都为大气, 即 $n = n'$, 因此

$$\begin{cases} \frac{x'}{x} = -\frac{L'}{l_z} = \frac{y'}{y} \\ \frac{2r'(z)}{y'} = \frac{L' - L_p}{L' - f'} \end{cases}, \quad (9)$$

解此方程组可得

$$r'(z) = \frac{1}{2} \left[\frac{L_p f' + (f' - L_p) l_z}{f'^2} \right] \cdot \rho', \quad (10)$$

式中 $\rho' = \sqrt{x'^2 + y'^2}$, 物点 $P(x, y, l_z)$ 被照亮且处于探测器视场中应满足

$$\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{r_d(z)} \leq 1 \cap \frac{\sqrt{[x - (d_0 - l_z \tan \theta)]^2 + y^2}}{r_1(z)} \leq 1. \quad (11)$$

探测器面上 (x', y', L_p) 点弥散斑接收 $P(x, y, l_z)$ 点单位面积散射的光强为

$$dI(x', y', L_p) = dP(x, y, l_z) (\hat{i}'_b - \hat{i}'_t) / S_1(z). \quad (12)$$

弥散斑 (x', y', L_p) 接收全部散射截面 $S_1(z)$ 的光强为

$$\Delta I(x', y', L_p) = \iint_{S_1(z)} dI(x', y', L_p) \rho' d\rho' d\phi. \quad (13)$$

距离选通范围内大气后向散射光强在探测器面上的分布为

$$I(x', y', L_p) = \int_{r_{p'i}}^{r_{p'b}} \Delta I(x', y', L_p) dl_z. \quad (14)$$

5 仿真与实验

假定实验中采用 532 nm 波长的激光器, 其发射激光的分布形式在空间中为理想锥体, 激光横模能量分布为高斯分布, 发射重复频率为 100 Hz。机载探测器处于高空 2 km 处, 大气能见度为 3 km, 发射与接收装置具体参数如表 1 所示。在上述散射光计算模型的基础上, 根据装置参数分别进行了大气水平和斜程后向散射光强的仿真计算。

表 1 距离选通成像系统参数

Table 1 Parameters of laser range-gated imaging

$t_{del} / \mu s$	$\tau_d / \mu s$	τ_p / ns	r_e / cm	r_p / cm	f / mm	$\theta / (^\circ)$	$\alpha / (^\circ)$	$\beta / (^\circ)$	d_0 / cm	P_0 / W
3	1	20	2.5	5	300	0.5	5	5	30	10

图 4 是水平距离选通情况下, 探测器面上后向散射光强随时间的变化。图中的时间是从选通门延迟 3 μs 后的时刻开始, 可以看出, 目标距离越远, 探测器所能接收到的选通范围反射的后向光强越弱, 光强基本上全部集中在 20 ns 左右。图 5 反映的是斜程距离选通, 即后向散射光强在 700 m 等距离情况下随 φ 角的变化规律。光束轴线向下与水平夹角 φ 值增大时, 后向散射光强值呈下降趋势, 这是符合实际情况的。因为越靠近地表, 大气分子颗粒密度越大, 此时随着 φ 角的增大, 后向散射光强应该增大, 但由于受到平均密度高的大气分子颗粒作用, 平均衰减系数 $\gamma(\lambda)$ 大于后向散射系数 $\sigma(\lambda)$ 的作用效果, 使得能够返回到探测器的光强呈下降趋势, 这也验证了所建模型的实效性。

图 6 和图 7 是水平和斜程两种情况下, 大气后向散射光强在探测器面分布情况的仿真和获取的图像灰度值实测结果; 图 6 的选通范围是水平距离 300 m 处; 图 7 的选通范围是 $\varphi = 60^\circ$ 、斜程为 500 m 处, 从仿真结果看, 光强相对集中于中心位置。激光距离选通成像画面一般不能够清晰反映后向散射光强在探测器面的变化情况, 因此需要将获得的光强灰度图像通过 Matlab 软件计算出图像的灰度值, 这样可以直观地看到后

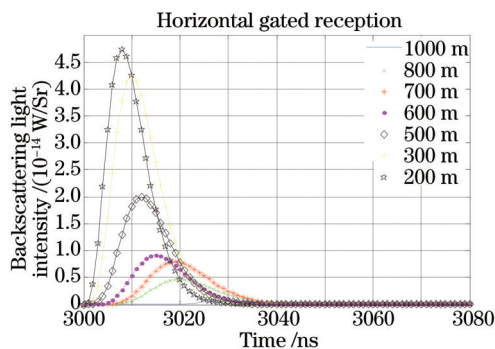


图4 水平距离后向散射光强随时间变化曲线

Fig.4 Curves of back-scattering light intensity changing with time under horizontal distance

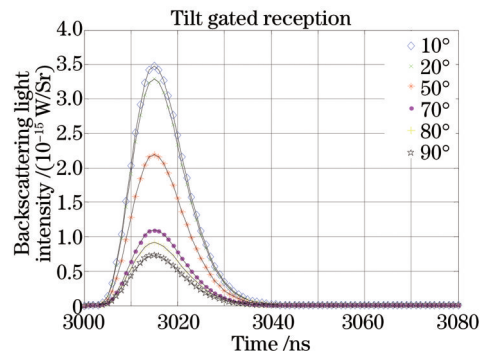


图5 斜程等距700 m后向散射光强随时间变化曲线

Fig.5 Curves of back-scattering light intensity changing with time under tilt 700 m equidistance

向散射光强在探测器面上的变化情况。因此,通过在外场搭建实验平台,测量中将激光束固定方向,不进行光束转动扫描,先得到光强实测结果,再将探测器获得的图像光强分布相应转变为灰度值分布,如图6(b)和图7(b)所示,实测图纵坐标为灰度值,灰度值的大小反映了光强的大小。实际应用中,发射激光的分布形式并不十分理想,其横模能量分布存在中心强、越靠边缘越弱的现象,这使得激光照射在物体表面呈现能量分布不均匀的圆斑。由于系统噪声和暗电流等因素的影响,大气后向散射光强分布充满了整个探测器面,略微集中于中心位置。

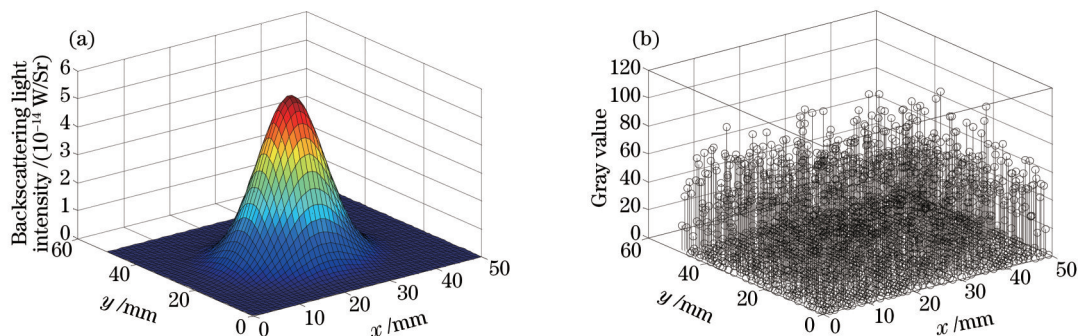


图6 水平成像探测器面光强和图像灰度分布。(a) 光强分布仿真结果;(b) 图像灰度实测结果

Fig.6 Distribution of light intensity and image gray value on the detector plane in horizontal imaging. (a) Simulation result of light intensity distribution; (b) experiment result of image gray value

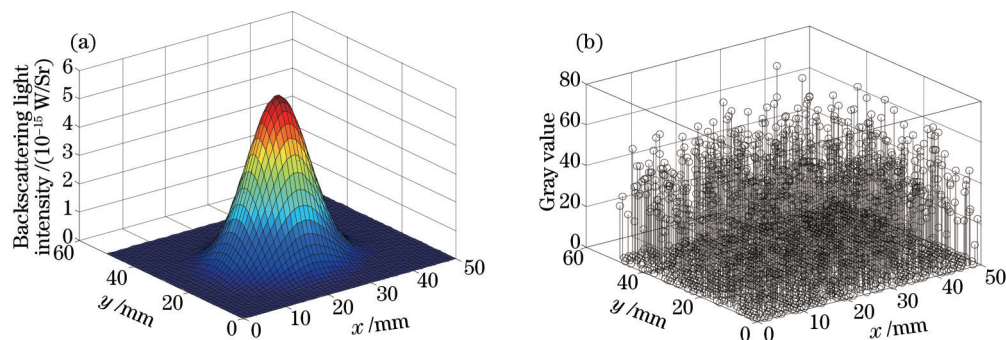


图7 斜程成像探测器面光强和图像灰度分布。(a) 仿真结果;(b) 图像灰度实测结果

Fig.7 Distribution of light intensity and image gray value on the detector plane in tilt imaging. (a) Simulation result of light intensity distribution; (b) experiment result of image gray value

由于实验平台的限制,不易在机载上实现不同高度数据的测量,只对斜程情况下后向散射光强随距离和角度的变化进行了实验测量。测量过程中,为避免大气扰动因素的影响,每一个实验数据都进行了5次测量,求取平均值作为最后实测数据结果,如表2所示,尽量避免了各种因素对数据结果的影响。从表2中可

以看出,在同一角度下,光强整体上随着距离的增大而减小;不同距离处后向散射光强在小角度下相差较大,大角度下相差较小,这说明光束倾斜程度对后向散射光强有一定影响。

表2 不同斜程角度下后向散射光强实际测量结果(W/Sr)

Table 2 Measured results of back-scattering light intensity under different tilt angles

φ	L					
	100 m	300 m	500 m	700 m	900 m	1100 m
0°	2.1×10^{-13}	4.5×10^{-14}	1.9×10^{-14}	5.6×10^{-15}	3.0×10^{-15}	6.8×10^{-16}
10°	1.8×10^{-13}	4.0×10^{-14}	9.6×10^{-15}	3.5×10^{-15}	2.2×10^{-15}	5.2×10^{-16}
20°	1.1×10^{-13}	3.2×10^{-14}	7.7×10^{-15}	3.3×10^{-15}	9.6×10^{-16}	4.5×10^{-16}
30°	9.2×10^{-14}	2.3×10^{-14}	5.3×10^{-15}	2.9×10^{-15}	7.1×10^{-16}	3.3×10^{-16}
40°	7.9×10^{-14}	1.4×10^{-14}	4.5×10^{-15}	2.4×10^{-15}	5.9×10^{-16}	2.5×10^{-16}
50°	6.3×10^{-14}	7.8×10^{-15}	4.0×10^{-15}	2.1×10^{-15}	4.2×10^{-16}	1.2×10^{-16}
60°	5.8×10^{-14}	5.7×10^{-15}	3.5×10^{-15}	1.6×10^{-15}	3.5×10^{-16}	9.1×10^{-17}
70°	4.6×10^{-14}	4.1×10^{-15}	2.6×10^{-15}	1.1×10^{-15}	2.1×10^{-16}	7.8×10^{-17}
80°	3.9×10^{-14}	3.5×10^{-15}	9.7×10^{-16}	8.9×10^{-16}	1.3×10^{-16}	6.0×10^{-17}
90°	2.7×10^{-14}	2.1×10^{-15}	7.7×10^{-16}	6.7×10^{-16}	9.2×10^{-17}	5.3×10^{-17}

为了更加清晰地对比实测数据与仿真数据,根据修正的斜程后向散射光强计算方法,对不同斜程角下500 m和700 m距离处后向散射光强进行了仿真计算,所得数据如表3所示。通过表3的两组数据与表2中实测数据的对比可知,数据仍存在一定范围的浮动,这是因为难以完全消除系统噪声和暗电流等因素的影响,但在一定误差范围内,仿真结果的光强变化规律与实测数据的变化趋势基本上保持一致。为了定量计算出误差范围,通过拟合仿真和实测数据,得到两对相应的曲线,如图8所示。在每一对曲线上等间距地取两组相对应的仿真和实测数据,每组19个数据,再根据相对误差计算公式,计算每对曲线上的相对误差,结果基本在5%以内。拟合其他仿真和实测数据,相对误差也有相同的结果。

表3 不同斜程角度下后向散射光强仿真计算结果(W/Sr)

Table 3 Simulation results of back-scattering light intensity under different tilt angles

L	φ									
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
500 m	1.7×10^{-14}	9.2×10^{-15}	7.5×10^{-15}	5.1×10^{-15}	4.6×10^{-15}	4.2×10^{-15}	3.3×10^{-15}	2.7×10^{-15}	9.9×10^{-16}	7.7×10^{-16}
700 m	5.5×10^{-15}	3.3×10^{-15}	3.4×10^{-15}	2.7×10^{-15}	2.3×10^{-15}	2.0×10^{-15}	1.7×10^{-15}	1.2×10^{-15}	8.5×10^{-16}	6.7×10^{-16}

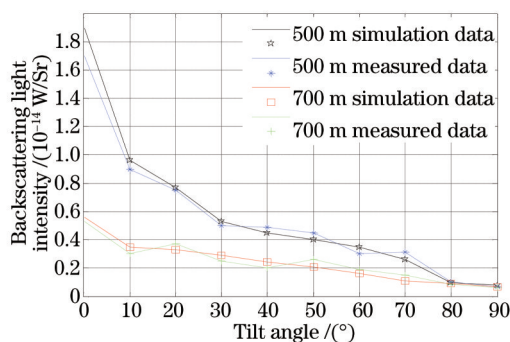


图8 仿真数据与实测数据的拟合曲线对比

Fig.8 Fitting curve comparison between simulation and measured data

6 结 论

通过深入分析距离选通成像原理,将所构建模型仿真数据结果与实测数据结果的相对误差控制在5%以内,两种数据具有很好的符合程度。从实测数据可以看出,探测成像更远的距离在于增大激光脉冲功率,或者减小激光束散角,或者同时对两者进行技术改进。实测结果是在一定的大气能见距离下获得的,数据

的准确性还需要对探测系统噪声和信号进行优化处理。利用仿真和实测结果,可根据探测器面上散射光强的异常变化,判断目标距离;在目标距离确定的情况下,通过调整距离选通参数可得到像质更好的图像;可为模拟战场激光干扰红外导引头以及激光制导武器性能评估实验提供理论参考。

参 考 文 献

- 1 Yang Yi, Ding Quanxin, Zhang Chunfeng. New development of airborne laser imaging technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 620-625.
羊毅,丁全心,张春风. 机载激光成像技术新进展[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(4): 620-625.
- 2 Xu Xiaowen. Study on Using Laser Active Imaging to Detect Dim Target[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2004.
徐效文. 应用激光主动成像探测小暗目标的技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2004.
- 3 He D M, Gerald G L S. Laser gated-ranging for underwater robot vision in turbid waters[C]. SPIE, 2002, 4546: 11-22.
- 4 Wang Lei, Xu Zhiyong, Zhang Qiheng, *et al.*. Design and experiment of range-gated underwater laser imaging system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(5): 051101.
王磊,徐智勇,张启衡,等. 距离选通水下激光成像系统设计及实验[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(5): 051101.
- 5 Tulldahl H T, Andersson P, Olsson A, *et al.*. Experimental evaluation of underwater range-gated viewing in natural waters[C]. SPIE, 2006, 6395: 639506.
- 6 Han Hongwei, Zhang Xiaohui, Ge Weilong. Study of the mode and maximum detecting performance of underwater laser range-gated imaging system[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(1): 0109001.
韩宏伟,张晓晖,葛卫龙. 水下激光距离选通成像系统的模型与极限探测性能研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(1): 0109001.
- 7 Wang Xiangwei, Zhou Tianhua, Chen Weibiao. Study on laser backscattering properties by ship wakes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(1): 14-18.
王向伟,周田华,陈卫标. 舰船尾流激光后向散射特性研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(1): 14-18.
- 8 Bai Lianfa, Zhang Yi, Chen Qian, *et al.*. Some problems in the process of range-gated imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 57-61.
柏连发,张毅,陈钱,等. 距离选通成像实现过程中若干问题的探讨[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(1): 57-61.
- 9 Huang Youwei, Wang Xia, Jin Weiqi, *et al.*. Temporal model of underwater laser range-gated imaging and pulse stretching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11): 3177-3183.
黄有为,王霞,金伟其,等. 水下激光距离选通成像与脉冲展宽的时序模型[J]. *光学学报*, 2010, 30(11): 3177-3183.
- 10 Wang Haiyan. The Principle and Application of Photoelectric Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. 10-31.
王海晏. 光电技术原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008. 10-31.
- 11 Wu Hanping. Infrared Search System[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013. 94-97.
吴晗平. 红外搜索系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013. 94-97.
- 12 Ge Weilong, Hua Lianghong, Zhang Xiaohui, *et al.*. Calculation of water backscattering light energy distribution in range-gated underwater laser imaging system[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2013, 25(2): 53-56.
葛卫龙,华良洪,张晓晖,等. 距离选通激光成像水体后向散射光能量分布计算[J]. *海军工程大学学报*, 2013, 25(2): 53-56.

栏目编辑: 吴秀娟