

机载激光探测空中目标脉冲回波特性研究

寇添¹ 王海晏¹ 王芳¹ 陈闽² 徐强³

¹空军工程大学航空航天工程学院, 陕西 西安 710038

²解放军驻613所军代室, 河南 洛阳 471000

³解放军95949部队, 河北 沧州 061000

摘要 分析了空中目标态势的影响因素以及与激光脉冲回波参数的关系;考虑了目标的距离、速度、进入角和尺寸等因素对脉冲时延和展宽的影响,建立了相应的关系模型,得出了不同因素对脉冲时延和展宽有不同影响程度的主要结论;探讨了激光大气斜程传输过程,提出了一种激光大气斜程透射率计算方法,对一般的激光大气传输能量衰减模型进行了改进,得出激光脉冲能量随距离的增大和目标投影面积的减小而呈现指数衰减规律;搭建了实验系统平台,并对实验采集的回波数据进行了分析;对比了脉冲展宽理论计算结果与实测结果,二者相对误差控制在6%以内,具有很好的符合程度,验证了所建模型的有效性。得出的结论具有为反演空中目标态势信息提供一定参考的价值。

关键词 探测器;激光主动探测;脉冲时延;脉冲展宽;能量衰减

中图分类号 TN249 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0414001

Research on Pulse Echo Characteristic of Airborne Laser Detecting Air Target

Kou Tian¹ Wang Haiyan¹ Wang Fang¹ Chen Min² Xu Qiang³

¹Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China

²Unit No.613 Institute of Chinese People's Liberation Army, Luoyang, Henan 471000, China

³Unit No.95949 of Chinese People's Liberation Army, Cangzhou, Hebei, 061000, China

Abstract By analyzing the effect of some factors to air target, the relation between the factors and laser pulse echo parameter has been studied. Considering the effect of distance, speed, entering angel and target size to the time delay and broadening of pulse, the relation model is built, and the main conclusion of the different effects of different factors to pulse time delay and broadening is obtained. Based on the discussion of the process of laser atmospheric transmittance in the slant path, a calculating method of laser atmospheric slant transmittance is proposed, and the general model of energy attenuation of laser transmittance is improved and the exponential decay of laser energy changing with the increase of distance and decrease of projection area is concluded. Based on the experiment system built, the measured echo datas are analyzed. Through calculating and comparing the theoretical result and measured result, the relative error is in 6% and it is a better coincidence, which has verified the effectiveness of built model. The conclusion has significant referenced value on the inverse of air target situation.

Key words detector; laser active detection; pulse time delay; pulse broadening; energy attenuation

OCIS codes 040.5160; 140.3538; 250.0040

1 引言

信息化网络作战条件下对于空战来说,快速获取战场态势信息在很大程度上影响着空战的胜负。一般

收稿日期: 2014-10-21; 收到修改稿日期: 2014-11-11

基金项目: 国家自然科学基金(61172083)

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,主要从事光电技术原理及应用方面的研究。E-mail: whh_shx@sohu.com

来说,空中目标态势信息主要包括载机与目标的距离、高度差和速度,以及目标相对于载机的进入角、方位角和俯仰角,这些信息是评估目标威胁程度的关键因素^[1-2]。目前,利用机载多脉冲雷达能够对远距目标实施精确测距,但仅凭这单一因素不足以对空战目标做出准确判断,这在一定程度上也限制了对来袭目标威胁态势的全面预测。

激光主动探测因其受光源、环境、辐射和干扰等因素影响较小,其在远距目标态势感知以及暗弱小目标探测方面发挥着重要优势^[3-6]。激光脉冲发射角较小,脉冲持续时间短,能量集中,具有较大的瞬时功率,这使得激光脉冲可以有效保证探测距离、探测精度和抗干扰性等作战条件。对战场环境探测过程中,激光脉冲回波携带着战场目标反馈回来的信息,这种回波特性一般包含脉冲时延、展宽和能量衰减等参数,而这些参数与目标特性的关系是本研究的重点。脉冲能量衰减是由于大气对激光能量的散射吸收作用而衰减变小^[7-9];脉冲时延就是因为双方相对距离、速度、进入角的实时变化而使得相邻脉冲间隔延长或缩短;脉冲展宽则是因为这些态势信息的实时变化以及大气环境作用而使得脉冲宽度发生变化。

通过深入分析脉冲回波特性,可以解析出脉冲回波隐含着目标距离、速度、进入角等关键态势信息,这极大地增强了载机对战场目标信息的感知,这种脉冲回波特性也为下一步的目标威胁和火力分配提供了可靠的信息。因此,本文将深入分析空战目标对激光脉冲回波特性的影响,得到的回波特性结论也可反演空战态势信息,同时将会给未来空战主角无人机的自主判断决策空战态势提供有力参考。

2 脉冲时延和展宽特性分析

2.1 目标态势对脉冲时延的影响

建立一般的空战目标态势图如图1所示,图1中O点是载机的起始点,A点是目标的起始点, R_0 与 Δh 是载机与目标初始距离和高度差,D点和C点是载机和目标在t时刻后的位置, β 是载机与目标航向的夹角, q_t 是态势变化中目标相对于载机的进入角, φ_t 是载机相对于目标的俯仰角。

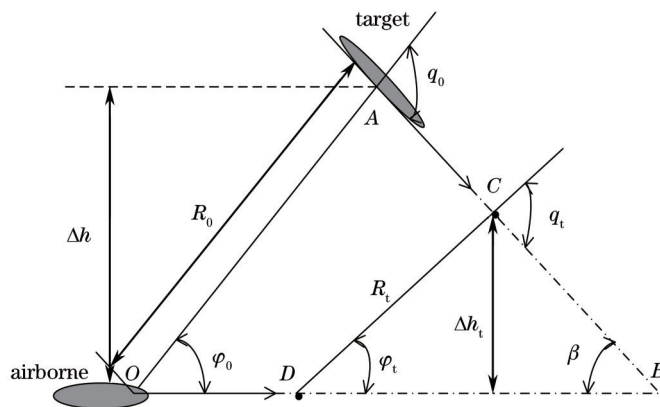


图1 任意夹角态势下脉冲时延分析示意图

Fig.1 Analysis diagram of pulse time delay under arbitrary angle

根据态势图中几何关系可知:

$$\begin{cases} \overline{BD} = [R_0 \sin(\pi - q_0) / \sin \beta] - V_T t \\ \overline{BC} = (R_0 \sin \varphi_0 / \sin \beta) - V_S t \end{cases}, \quad (1)$$

式中 V_T 和 V_S 分别是目标和载机速度,由此可得到在此空战目标态势中激光脉冲时延表达式为:

$$\Delta t = \frac{2\sqrt{\overline{BC}^2 + \overline{BD}^2 - 2 \cdot \overline{BC} \cdot \overline{BD} \cdot \cos \beta}}{c}, \quad (2)$$

式中 c 是光脉冲传播速度。根据上述模型,即可得到探测距离对脉冲时延的影响以及在不同时刻下时延 Δt 随目标速度的变化规律,如图2和图3所示。图2是在时刻 $t=10$ s 时的情况,脉冲时延 Δt 随着探测距离的增大而呈现线性关系式的增大,这种变化规律对于研究载机超视距作战时具有一定的意义;而在较小距离范围内呈现减小的趋势,这种规律则对于研究视距内空战具有很好的参考意义。

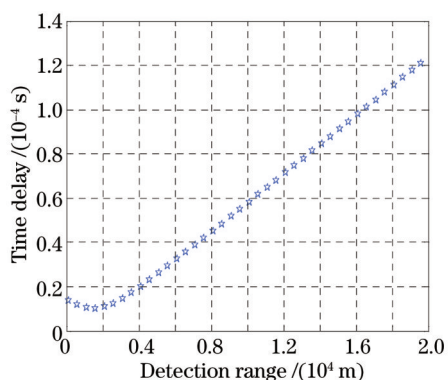


图2 时延随探测距离的变化

Fig.2 Time delay changing with operating range

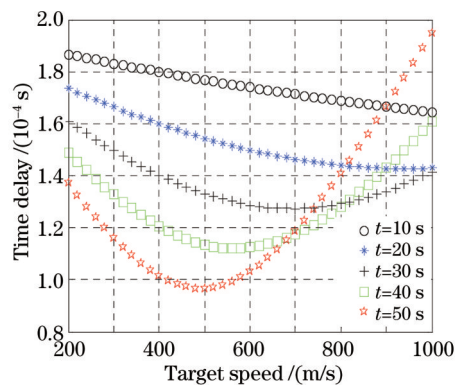


图3 时延随目标速度的变化

Fig.3 Time delay changing with target speed

从图3中可以看出,不同时刻、不同速度对时延的影响都不同,当时间 $t \leq 20s$ 时,目标速度越大,时延 Δt 呈现递减趋势;当时间 $t \geq 20s$ 时,时延 Δt 随着目标速度的增大出现先减小后增大的现象,随着时间 t 的不断增大,这种现象越明显,且向着低速方向移动;时间越长,时延 Δt 在总体上是减小的,但随着速度的不断增加,时延 Δt 会再次快速上升。这是因为目标在与载体接近的过程中又快速远离,因此时延 Δt 会出现这种现象。

2.2 目标态势对脉冲展宽的影响

空中目标的距离、速度以及进入角发生着实时变化,这会引起激光光轴相对目标的角度发生变化,光斑内各点到光源处高度差发生变化,从而导致各点的回波时延发生变化,使得回波脉冲发生展宽^[10]。图4是任意夹角态势下脉冲展宽示意图, $\overline{AA'} = L$ 是目标长度, P 是目标尺寸中点, $\angle AOA'$ 是目标在接收器中的视场角, OP 为视场中心线, OA 与中心线的夹角为 ϕ_1 , OA' 与中心线夹角为 ϕ_2 。

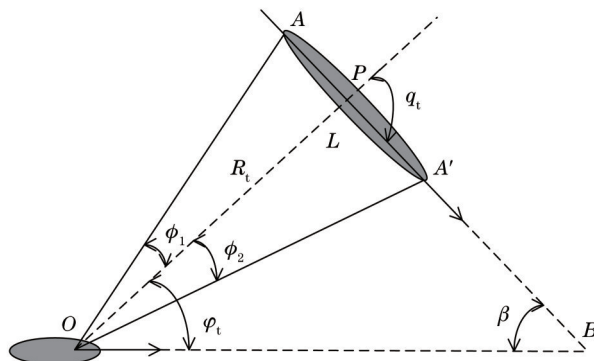


图4 任意夹角态势下脉冲展宽分析示意图

Fig.4 Analysis diagram of pulse broadening under arbitrary angle

由图4的基本几何关系可以得到:

$$\begin{cases} \overline{OA} \cdot \sin \phi_1 = (L/2) \sin q_t \\ \overline{OA'} \cdot \sin \phi_2 = (L/2) \sin(\pi - q_t) \end{cases} \quad (3)$$

式中

$$\begin{cases} q_t = \varphi_t + \beta \\ \overline{OA} = (R_t \cdot \sin q_t) / \sin(\pi - \phi_1 - q_t) \\ \overline{OA'} = [R_t \cdot \sin(\pi - q_t)] / \sin(q_t - \phi_2) \end{cases}, \quad \begin{cases} \tan \phi_1 = \frac{(L/2) \sin(\pi - q_t)}{R_t - (L/2) \cos(\pi - q_t)} \\ \tan \phi_2 = \frac{(L/2) \sin(\pi - q_t)}{R_t + (L/2) \cos(\pi - q_t)} \end{cases} \quad (4)$$

由上述模型可得到激光脉冲展宽表达式为

$$\Delta \tau = 2(\overline{OA} - \overline{OA'})/c, \quad (5)$$

理论上脉冲展宽应该与目标进入角、尺寸长度以及距离有关^[11]。图5是探测距离对脉冲展宽的影响,从图5中可以看出探测距离 R_t 从0变化到40 km过程中,当探测距离大于目标尺寸数量级 10^3 以上时,激光脉冲展

宽 $\Delta\tau$ 并没有发生明显变化,由此得出结论是远距探测对脉冲展宽基本上没有影响。图6是不同目标尺寸下进入角对脉冲展宽的影响,当目标相对于载机的进入角越大,脉冲展宽则越小;当目标尺寸越大,脉冲展宽总体上呈现增大的趋势,但随着进入角的不断增大,不同目标尺寸对脉冲展宽影响越来越小。

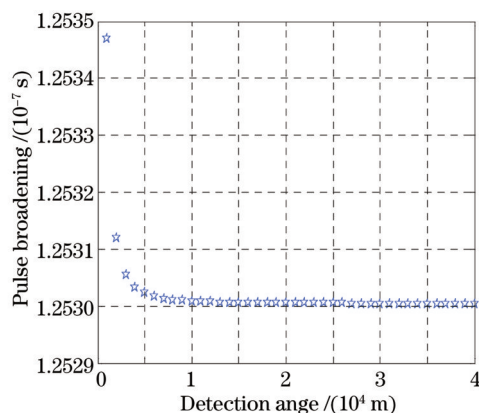


图5 探测距离对脉冲展宽的影响图

Fig.5 Effect of detection range to pulse broadening

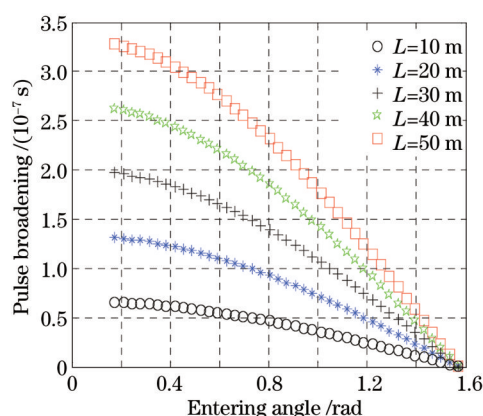


图6 进入角对脉冲展宽的影响

Fig.6 Effect of entering angle to pulse broadening

3 激光脉冲回波能量衰减分析

空中目标距离是影响脉冲回波能量衰减的最大因素,其他因素都可以忽略。激光在大气中传输时,由于大气的湍流效应以及大气分子对激光的散射和吸收作用,造成通过大气传输的激光脉冲能量严重衰减,恶劣天气衰减的程度可能达到 10^4 以上^[12-13],因此,在尽可能避免大气影响的条件下,需要对激光脉冲大气传输一般衰减建模进行改进。激光大气传输一般衰减模型为^[14]

$$Q_r = \frac{Q_0 \eta_t S_t \eta_a D_r^2 \eta_r}{4\pi \alpha^2 R^4} \quad (6)$$

式中 Q_0 为激光单脉冲平均能量, Q_r 为接收到的激光脉冲能量, D_r 为接收系统光学孔径, α 是激光发散角, η_t 与 η_r 分别是激光脉冲发射和接收光学系统透射率, η_a 是大气透射率, S_t 为目标有效反射面积, R 为载机上激光器与目标间的距离。一般模型并没有准确反映激光脉冲传输以及大气衰减的具体过程,为尽可能实际地反映激光脉冲回波能量衰减规律,需要对激光传输的每一个环节予以细致考虑,建立激光脉冲大气传输模型如图7所示。

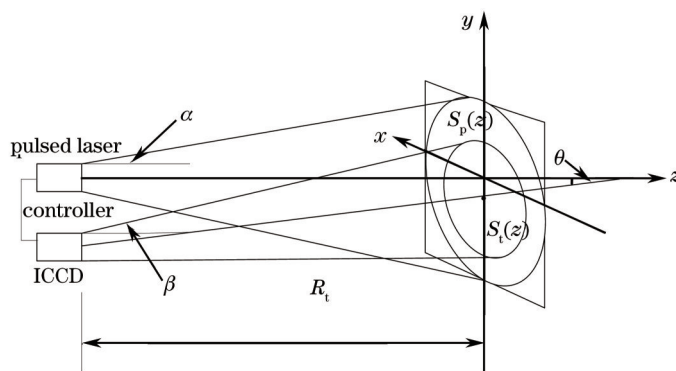


图7 激光脉冲大气传输模型

Fig.7 Model of laser pulse atmospheric transmission

图7中 z 轴为发射光轴,目标投影截面与发射器距离为 R_t ,激光脉冲发射与接收轴线夹角为 θ , $S_p(z)$ 为投影截面上激光脉冲照射圆斑面积,圆斑半径 $r_d(z) = D_r/2 + R_t \tan \alpha$, α 为激光发散角。 $S_t(z)$ 为目标在投影截面上的有效投影面积,接收器与投影截面的有效距离 $R'_t = R_t / \cos \theta$,目标相对于接收器孔径的立体投影角

$\Omega = \pi(D_r/2)^2/R_1'^2$, 接收器接收到的目标有效投影面积 $S_1'(z) = S_1(z)\sin\theta$ 。一般来说, 机载激光器在载机空战过程中, 通常是激光斜程传输问题, 因此在考虑斜程大气透射率 $\eta_a(R)$ 前提下, 接收器接收的脉冲能量为

$$Q_r = \frac{P_0 \eta_i \eta_a(R) \tau_d'}{S_p(z)} \cdot \rho(\lambda) S_1'(z) \Omega \eta_r = \frac{Q_0 \cdot \eta_i \eta_a(R) \tau_d'}{\tau_d [r_d(z)]^2} \cdot \rho(\lambda) S_1(z) \sin\theta \cdot \frac{(D_r/2)^2 \eta_r}{(R_1/\cos\theta)^2}, \quad (7)$$

式中 P_0 为激光脉冲功率, τ_d 和 τ_d' 分别为激光发射脉宽和接收脉宽; $\rho(\lambda)$ 为某一激光波长的目标反射系数; 式中 $\eta_a(R)$ 是作用距离的隐函数, 由于不同大气层对激光的衰减程度不一样, 因此不能利用传统公式 $\eta_a(R) = \exp(-\mu R)$ 进行简单求解, 综合考虑各种因素的影响, 得到大气透射率模型为

$$\eta_a(R) = \exp\left[-(\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n) \frac{\Delta h}{(n-1)\sin\varphi_1} \left(1 + \frac{1}{\cos\theta}\right)\right], \quad (8)$$

式中 μ_n 表示高度差 Δh 中每一大气层所对应的斜程衰减系数, 其值跟大气能见距 R_v 和载机位置高度 H 有关。当激光单脉冲平均能量 $Q_0=200$ mJ, 载机高度 $H=2$ km, 大气能见距 $R_v=20$ km, 目标相对于载机仰角 $\varphi_1=15^\circ$, 根据所建模型得到脉冲回波能量随距离 R 和目标有效投影面积 S_1 之间的变化规律如图 8 所示。

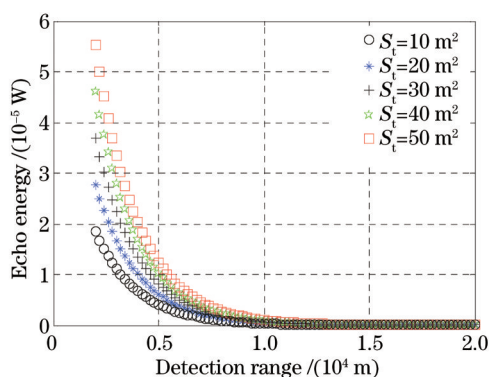


图 8 回波能量随距离和目标投影面积的变化

Fig.8 Echo energy changing with distance and projected area of target

由数值仿真结果看出, 脉冲回波能量随着距离的增大呈现指数衰减规律, 当距离增大至 10 km 时, 回波能量衰减到 μW 数量级; 当达到 40 km 时, 回波能量可衰减到 nW 数量级。目标投影面积越大, 回波能量也越大, 实际空战中, 目标投影面积的变化受进入角的影响, 回波能量的变化不但直接反应着距离信息, 而且也隐含着目标进入角信息。

4 实验研究与数据分析

4.1 实验系统搭建

以上从理论层面对激光脉冲回波特性进行了分析, 所建模型是否符合实际情况还需要进一步设定实验

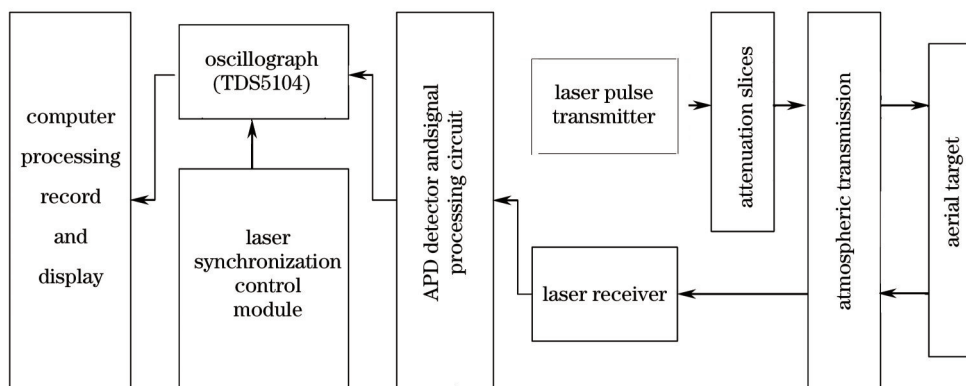


图 9 脉冲回波特性测试系统

Fig.9 Test system of laser pulse echo characteristic

进行实测。在理论分析基础上,按照实际条件,搭建实验系统如图9所示。

实验系统采用 532 nm 脉冲激光器,脉冲频率为 50 Hz,激光在空间的分布形式为椎体,能量分布符合高斯分布。接收系统采用 5 mm×5 mm 的雪崩光电二极管探测器(APD),最低可探测数十纳瓦的光学信号^[15]。激光脉冲发射部分通过衰减片控制光功率的变化,探测器探测到经过目标反射的回波脉冲后,将回波信号经过前置放大器放大后送至数字示波器 TDS5104 进行数字化,并显示和记录结果,最后利用计算机对示波器存储的数据进行处理和分析。实验所需参数、大气条件以及其他相关参数如表 1 所示。

表 1 激光脉冲回波特性实验参数

Table 1 Experiment parameter of laser pulse echo characteristic

λ /nm	α /rad	η_i	η_r	D_r /m	P_{peak} /MW	P_0 /W	τ_d /ns	R /km	R_v /km
532	0.0015	0.86	0.88	0.15	50	5	10	1	15

搭建的实验系统选择在晚上开阔的机场跑道上进行数据实测,这样可以避免白天杂光以及障碍物的干扰,以期得到接近真实的激光脉冲回波特性规律。目标选取面积为 $S_t = 1\text{ m} \times 5\text{ m}$ 的薄板置于 1 km 外的地方,由于条件和场地的限制,只能静态模拟空战态势中的距离和进入角等信息,目标进入角 q 通过变换薄板与激光发射光轴的夹角来实现。

4.2 实验结果与数据分析

分别在距离目标 400、600、800、1000 m 处对目标进行垂直照射,激光脉冲平均能量 $Q_0=200\text{ mJ}$,用图像的平均灰度反映每次成像时激光脉冲回波能量,图像序列的平均灰度随着距离的变化规律如图 10(a)~(d)所示。

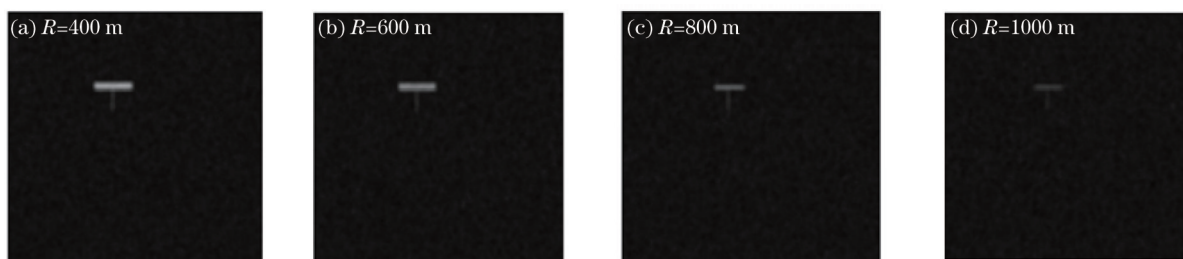


图 10 目标反射的回波能量随距离的变化

Fig.10 Reflected echo energy of target changing with distance

表 2 激光回波能量实测数据

Table 2 Measured data of laser echo energy

n	D /m								
	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
1	185.06	166.43	149.33	135.75	121.34	112.26	102.71	96.57	89.25
2	184.32	165.86	150.16	134.94	120.66	113.18	102.83	96.52	90.17

激光垂直照射中,对不同距离处激光脉冲回波能量进行记录,同一距离下,进行两组实验,每个数据都

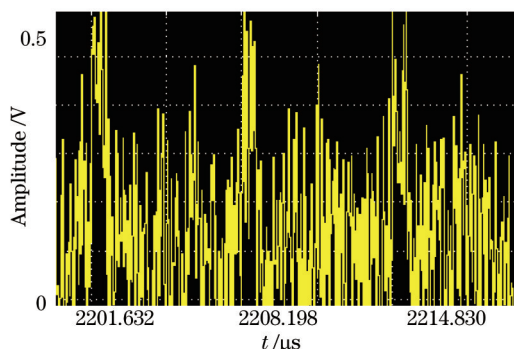


图 11 目标反射的回波波形采集

Fig.11 Waveform collection of echo of target

是10次实测数据的平均值,如表2所示,数据单位为J。结合图10和表2实测数据可以看出,激光回波能量在开始距离增大时变化显著,随着距离逐渐增大,接收器接收到的脉冲回波能量变化渐渐趋于平缓,近似呈现指数衰减的规律,验证了激光衰减模型的正确性。

接着选定1000 m的距离位置,调整激光轴线与目标的夹角为10°,进行脉冲回波波形的采集,回波能量的相对大小以接收到的脉冲能量与发射脉冲能量比值表示,如图11所示的电压响应波形图。

从图11采集的波形可以看出,目标回波并不是十分清晰,而是夹杂着大量杂波,这是由于大气后向散射造成的。图11中的回波能量有所降低,且脉冲峰值间距延迟了6 μs左右。

对接收的波形信号进行处理,得到处理后的单个脉冲波形信号如图12所示。图13是单个发射脉冲波

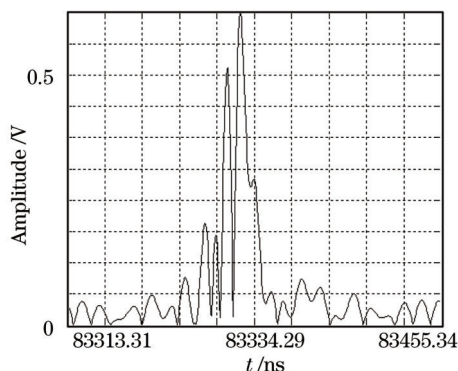


图12 单个脉冲回波波形

Fig.12 Waveform of single pulse echo

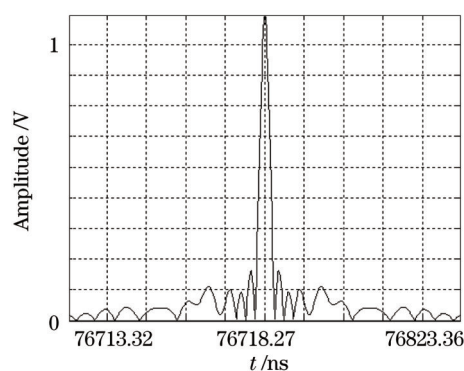


图13 单个发射脉冲波形

Fig.13 Waveform of single transmitted pulse

形图,由两幅图的比较可以发现,回波脉冲明显发生了展宽,且展宽32 ns左右。

为了直观地对比脉冲展宽实测数据与理论数据误差大小,根据本脉冲展宽的计算方法,得到不同夹角下脉冲展宽数值理论计算结果如表3所示,数据单位为ns。同时又对距离目标600 m和1000 m处进行了脉冲展宽测试,所得实验数据如表4所示。通过表3的实验数据与表4中两组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以及大气后向散射等因素的影响,但在一定误差范围内,理论计算结果的脉冲展宽变化规律与实测数据的变化趋势基本上保持一致。

表3 激光脉冲展宽理论计算数据

Table 3 Simulation data of laser pulse broadening

D /m	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
400	32.957	29.123	25.681	21.524	16.862	12.364	8.257	3.602	2.216
600	33.012	29.207	25.727	21.639	16.924	12.482	8.331	3.687	2.214
800	33.108	29.332	25.799	21.705	17.051	12.516	8.403	3.692	2.219
1000	33.215	29.461	25.865	21.861	17.117	12.573	8.452	3.707	2.217

表4 激光脉冲展宽实测数据

Table 4 Measured data of laser pulse broadening

D /m	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
600	31.324	27.418	24.363	22.705	16.413	11.806	8.712	3.557	2.102
1000	31.452	27.823	25.916	22.461	16.662	13.108	8.811	3.852	2.164

表3和表4数据都反映了脉冲展宽随着激光光轴与目标夹角的增大而减小的规律。为了定量计算出误差范围,通过拟合理论和实测数据,得到两对相应的曲线如图14所示。在每一对曲线上等间距地取两组相对应的理论和实测数据,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,脉冲展宽的理论数据与实测数据误差基本在6%以内,这说明了本模型在反演空中目标态势信息中具有一定的准确性,同时也验证了所建模型的有效性。从两组不同距离下的拟合数据关系看出,数值大小上并没有太大差异,再次验证了距离对脉冲展宽的影响很小。拟合其他理论计算和实测数据,相对误差也有相同的结果。

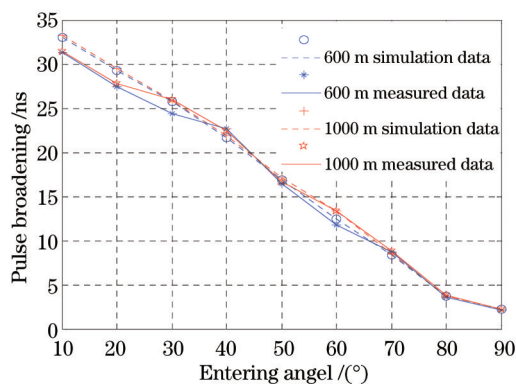


图 14 理论数据与实测数据之间的误差

Fig.14 Error between theoretical and measured data

5 结 论

基于激光主动探测理论,通过解析激光脉冲回波特性,建立了空中目标信息与脉冲回波时延、展宽和能量衰减参数之间的关系模型,同时从理论上讨论了它们的变化关系。根据空中目标特性对回波参数的影响规律,在文中所搭建的实验条件下,所构建模型的脉冲展宽数值理论结果与实测数据结果的相对误差控制在6%以内,二者数据具有很好的符合程度,验证了模型的有效性。利用理论计算和实测结果,为战场目标态势信息的反演提供了一定的参考价值。在实际空战中,回波脉冲展宽效应也会导致时间或距离探测的误差增大^[16-17]。因此,在进行激光探测的硬件系统设计以及后续数据处理和对目标回波特性的反演研究中,都必须考虑激光脉冲回波的展宽特性。

参 考 文 献

- 1 Xiao Liang, Huang Jun, Xu Zhongshu. Modeling air combat situation assessment based on combat area division [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 9(10): 1309-1313.
肖亮,黄俊,徐钟书.基于空域划分的超视距空战态势威胁评估[J].北京航空航天大学学报,2013,39(10):1309-1313.
- 2 Tu Shuai, Zhang Xiaoyu, Ouyang Zhonghui, *et al.*. Improvement on algorithms for target threat assessment and target assignment in air combat [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2011, 32(9): 47-50.
涂帅,张晓瑜,欧阳中辉,等.改进的空战目标威胁评估与目标分配算法[J].四川兵工学报,2011,32(9):47-50.
- 3 Yang Yuchuan, Tan Bitao, Long Chao, *et al.*. Time-domain characteristics of active detecting echo laser pulse [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(12): 3228-3233.
杨雨川,谭碧涛,龙超,等.主动探测回波激光脉冲时域特性[J].红外与激光工程,2013,42(12):3228-3233.
- 4 Huang Tao, Hu Yihua, Zhao Gang, *et al.*. Target extraction and classification base on imaging lidar range image [J]. J Infrared Millim Waves, 2011, 30(2): 179-183.
黄涛,胡以华,赵钢,等.基于激光成像雷达距离图像的目标提取与分类技术[J].红外与毫米波学报,2011,30(2):179-183.
- 5 Zhao Nanxiang, Hu Yihua, Lei Wuhu, *et al.*. Small target imaging method based on the laser echo waveform analysis [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(4): 748-752.
赵楠翔,胡以华,雷武虎,等.激光回波波形分析小目标检测成像方法[J].红外与激光工程,2009,38(4):748-752.
- 6 Xu Xiaowen. Study on the Technologies for Detecting Small Dark Target with Laser Active Imaging [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 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.
- 7 Han Cheng, Bai Baoxing, Yang Huamin, *et al.*. Study and simulation of air influences on laser pulse transmission delay time [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(8): 2046-2050.
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 D E Kelly, C Y Young, L C Andrews. Temporal broadening of ultra-short Gaussian space-time pulses with applications in laser satellite communications [C]. SPIE, 1998, 3266: 231-240.

- 9 Jing Xu, Wu Yi, Hou Zaihong, *et al.*. Study of irradiance fluctuations for laser beam propagation in atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11): 3110–3116.
靖 旭, 吴 毅, 侯再红, 等. 湍流大气中激光传输光强起伏特征研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(11): 3110–3116.
- 10 Xu Qiang, Wang Haiyan, Wang Fang, *et al.*. Identifying moving target from background with airborne laser multi-pulse stretching [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(12): 1336–1340.
徐 强, 王海晏, 王 芳, 等. 机载激光多脉冲展宽识别运动目标和地面背景[J]. *激光与红外*, 2013, 43(12): 1336–1340.
- 11 Ma Pengge, Qi Lin, Yang Yi, *et al.*. Study on airborne multipulse ladar target signal simulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0128001.
马鹏阁, 齐 林, 羊 毅, 等. 机载多脉冲激光雷达目标信号模拟器的研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0128001.
- 12 Du Yongcheng, Yang Li. Attenuation characters of laser for guided weapons in fine water sprays [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0402005.
杜永成, 杨 立. 制导武器激光在细水雾中的衰减特性[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0402005.
- 13 Wu Zhensen, You Jinguang, Yang Ruike. Study on laser attenuation character in sand and dust storms [J]. *Chinese J Lasers*, 2004, 31(9): 1075–1081.
吴振森, 由金光, 杨瑞科. 激光在沙尘暴中的衰减特性研究[J]. *中国激光*, 2004, 31(9): 1075–1081.
- 14 Li Yingchun, Tang Liming, Sun Huayan. Performance analysis of laser active imaging system used for spatial object [J]. *Journal of the Academy of Equipment Command & Technology*, 2008, 18(1): 65–69.
李迎春, 唐黎明, 孙华燕. 空间目标的激光主动成像系统性能分析[J]. *装备指挥技术学院学报*, 2008, 18(1): 65–69.
- 15 M S Oh, H J Kong, T H Kim, *et al.*. Reduction of range walk error in direct detection laser radar using a Geiger mode avalanche photodiode [J]. *Opt Commun*, 2010, 283(2): 304–308.
- 16 Luo Hanjun, Yuan Xiuhua. Accuracy of photon pulsed heterodyne detection system [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(12): 1208004.
罗韩君, 元秀华. 光子脉冲外差探测系统的测距精度[J]. *中国激光*, 2013, 40(12): 1208004.
- 17 Jiang Haijiao, Lai Jiancheng, Wang Chunyong, *et al.*. Research on ranging property of laser radar and its range accuracy [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(5): 0514001.
姜海娇, 来建成, 王春勇, 等. 激光雷达的测距特性及其测距精度研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(5): 0514001.

栏目编辑: 刘丰瑞