

## 激光目标回波模拟器时域特性研究

叶建森,施蕊,田义,马强,王欣,李卓

(北京理工大学 光电学院,北京 100081)

**摘要:** 激光目标回波模拟器是激光制导武器系统半实物仿真中的关键设备。激光目标模拟器的关键技术之一是建立激光脉冲时域特性模型。因此,建立了大气湍流对激光脉冲展宽的模型,将大气等效成多层折射率变化的介质,分析了多层介质对激光脉冲的展宽机理,同时根据目标反射特性建立目标反射特性模型,并对模型做了仿真实验验证。计算了距离在 10 km 时,激光发散角 1 mrad、激光波长 1 064 nm 条件下的脉冲展宽最大值为 10 ns。最后给出了一个平面目标的模拟数据。研究结果可以应用于激光雷达回波目标模拟器中。

**关键词:** 激光制导; 半实物仿真; 目标模拟器; 脉冲展宽; 目标特性

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0471-06

## Time domain characteristics study in laser target echo simulator

Ye Jiansen, Shi Rui, Tian Yi, Ma Qiang, Wang Xin, Li Zhuo

(Photo-Electronic College, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In the hardware-in-the-loop simulation, Laser Target Echo Simulator(LTES) is one of the most important equipment in the Laser Guidance Weapon System (LGWS). The model for the laser pulse features in time domain is a key technology in the LTES. A model of the laser pulse broadening in turbulent atmosphere was constructed. In the model, atmosphere was treated as multi-layer medium with different refractive index. The influence of medium with multi-layer for the laser pulse broadening mechanism, which is propagated in the multilayered medium, was analyzed. Then, the model of the target reflection was also constructed according to the characteristics of the target reflection. Two models were demonstrated by simulation. Moreover, the maximal pulse broadening of 10 ns was obtained when the distance of 10 km, the laser divergence angle of 1 mrad and wavelength of 1 064 nm was assumed. The result of planar target was calculated in final. This model can be applied in the real laser radar echo simulation.

**Key words:** laser guidance; hardware-in-the-loop simulation; target simulator; pulse broadening; target characteristics

收稿日期:2014-06-24; 修订日期:2014-07-27

基金项目:国家自然科学基金(61205116)

作者简介:叶建森(1979-),男,博士生,主要从事激光雷达回波目标模拟器方面的研究。Email:yejiansen@bit.edu.cn

导师简介:李卓(1958-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事目标模拟器方面的研究。Email:lizhuo@bit.edu.cn

## 0 引言

随着激光精确制导武器的应用日益广泛,半实物仿真技术作为激光制导武器系统全寿命周期中的设计、测试和验证作用日趋明显,激光制导武器系统的半实物仿真技术对提高激光制导武器系统的研制质量、加速系统的研制进程有很大的促进作用,其目的就是构建一个激光制导导引头,对目标实施攻击的地面飞行实验环境,用以检测和考核激光导引头探测和跟踪目标的能力。半实物仿真系统中的核心设备是激光目标回波模拟器,而设计激光目标模拟器的关键技术之一是建立激光脉冲时域特性的模型,而时域特性包含脉冲展宽和脉冲波形变化,使得激光脉冲展宽的主要因素是大气后向散射、大气湍流、大气色散和目标反射等<sup>[1-2]</sup>。目前国内外建立的主要模型有:激光回波时域特性的大气湍流模型<sup>[3-6]</sup>,激光回波时域特性的大气散射模型<sup>[7]</sup>,激光回波时域特性的大气色散模型<sup>[8-9]</sup>,目标特性对信噪比的影响<sup>[10]</sup>。上述模型均基于激光大气传输理论,模型比较复杂,不能直接应用到激光目标回波模拟上,为此,文中根据各种因素的影响程度建立了简化的激光回波时域特性模型,可以更好地嵌入到激光目标回波模拟器中。

文中主要考虑大气湍流和目标几何特性对激光脉冲的展宽影响。建立了分层介质的随机折射率模型模拟大气湍流,采用等效折射率法模拟大气湍流对激光脉冲展宽的影响,建立了目标几何特性的反射模型仿真不同形状的物体对激光脉冲的展宽影响。

## 1 激光回波时域特性建模

在激光目标回波模拟器设计的过程中,脉冲展宽是主要的参数特性。激光脉冲回波信号在实际传播和反射过程中脉冲展宽的关系表达式为:

$$\Delta\tau = \Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 + \Delta\tau_3 + \Delta\tau_4 \quad (1)$$

式中: $\Delta\tau_1, \Delta\tau_2$ 分别为大气湍流和目标反射对激光脉冲的展宽。 $\Delta\tau_3, \Delta\tau_4$ 分别为大气色散和大气后向散射产生的脉冲展宽。

大气湍流模型由多层折射率随机变化的介质组成。目标模型使用一定倾斜角度的平板表征,不考虑材质对激光吸收作用。

### 1.1 湍流激光传输模型

湍流模型由多层不同折射率的介质构成,具有一定发散角的激光以一个固定的入射角入射时,经过这些折射率不同的介质将产生一定的相位延时,导致激光脉冲宽度的展宽。激光通过大气介质后,受大气湍流影响,导致介质折射率发生变化,激光脉冲展宽。折射率的变化是由大气的温度和气压的变化引起的,不考虑折射率变化的原因,只考虑折射率变化引起的激光脉冲展宽,模型分为  $n$  层,每一层内的大气折射率是均匀的,每层的厚度相同,折射率大小随机变化,则进入介质每层的光线只有在每层的界面上才发生折射,激光传播原理示意图如图 1 所示。

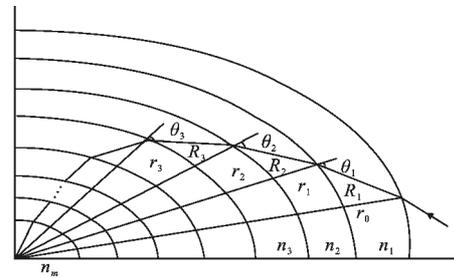


图 1 湍流模型光路示意图

Fig.1 Diagram of optical path in the turbulence model

大气折射率分布与大气压强和温度的分布有关,对于可见光和红外波段大气折射率<sup>[3]</sup>为:

$$n = 1 + 77.6(1 + 7.52 \times 10^{-3} \lambda^{-2}) \frac{p}{T} \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中: $p$ 为大气压(Pa); $\lambda$ 为激光波长( $\mu\text{m}$ ); $T$ 为温度(K)。大气层的温度变化在  $-333 \sim 333 \text{ K}$  之间,大气压强在  $1.00325 \times 10^5 \sim 1.02326 \times 10^5 \text{ Pa}$  范围内变化。

由公式(2)可知,大气折射率主要受激光的波长、环境温度和大气压强的影响。激光在大气传输过程中受到大气湍流影响,大气温度和压强的随机变化会引起折射率的随机变化。因此,激光受到大气湍流影响,主要是折射率变化的影响<sup>[3-4]</sup>。如图 1 所示,假定  $n_0, n_1, n_2, n_3, \dots$  为折射率,  $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots$  为入射角,  $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots$  为折射角,  $r_0, r_1, r_2, r_3, \dots$  为各折射点距球心的距离,  $R_0, R_1, R_2, R_3, \dots$  为光束折射后在各层中光束的传播路径,则在每层界面上有:

$$\begin{cases} n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \varphi_1 \\ n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \varphi_2 \\ n_2 \sin \theta_2 = n_3 \sin \varphi_3 \\ \dots \\ n_{n-1} \sin \theta_{n-1} = n_n \sin \varphi_n \end{cases} \quad (3)$$

另外,根据正弦定理:

$$\frac{r_0}{\sin\theta_1} = \frac{r_1}{\sin\varphi_1}, \frac{r_1}{\sin\theta_2} = \frac{r_2}{\sin\varphi_2}, \frac{r_2}{\sin\theta_3} = \frac{r_3}{\sin\varphi_3}, \dots, \frac{r_{n-1}}{\sin\varphi_n} \quad (4)$$

将公式(3)和公式(4)联立,消去  $\sin\varphi$ , 则得:

$$\begin{cases} n_0 r_0 \sin\theta_0 = n_1 r_1 \sin\theta_1 \\ n_1 r_1 \sin\theta_1 = n_2 r_2 \sin\theta_2 \\ n_2 r_2 \sin\theta_2 = n_3 r_3 \sin\theta_3 \\ \dots \\ n_{n-1} r_{n-1} \sin\theta_{n-1} = n_n r_n \sin\theta_n \end{cases} \quad (5)$$

由余弦定理可得:

$$\begin{cases} r_0^2 = r_1^2 + R_1^2 + 2r_1 R_1 \cos\theta_1 \\ r_1^2 = r_2^2 + R_2^2 + 2r_2 R_2 \cos\theta_2 \\ r_2^2 = r_3^2 + R_3^2 + 2r_3 R_3 \cos\theta_3 \\ \dots \\ r_{n-1}^2 = r_n^2 + R_n^2 + 2r_n R_n \cos\theta_n \end{cases} \quad (6)$$

由于各折射点距球心的距离、各球面的入射角已知, 则光束折射后可求出实际每层传输路径  $R_1, R_2, R_3, \dots, R_{n-1}$ 。因此, 该模型模拟的实际光学路径可以由公式(7)表示:

$$R = \sum_{j=1}^{n-1} R_j \quad (7)$$

激光传播的直线距离记为  $z$ , 激光经过多层折射率变化的介质的传输距离记为  $R$ , 根据该模型激光束垂直入射, 激光光束最大发散角处光线与最小发散角处光线的光程差为  $R-z$ 。因此, 激光脉冲经过大气湍流介质后, 激光脉冲展宽量为  $\Delta\tau_1$ :

$$\Delta\tau_1 = \frac{R-z}{c} \quad (8)$$

激光的最大发散角为  $\alpha$  mrad, 与最小发散角 0 mrad 的差为最大脉冲展宽量。对光束的发散角细分后与最小发散角 0 mrad 之间都会有一定大小的脉冲展宽, 经过大气湍流后的激光脉冲包含不同传输路径上的激光脉冲, 因此发生脉冲展宽和脉冲形状变化。

### 1.2 目标反射模型

激光脉冲投射在不同形状的目标表面时, 因发散角不同的光反射回波经过的时间将会不同, 反射后经过接收机接收到的脉冲宽度也将发生变化, 最终接收到的回波波形也会发生变化。目标的形状和

激光束发散角的影响共同造成激光脉冲展宽。假定目标为一平板, 建立模型示意图如图 2 所示。该模型可以应用与其他形状目标的激光脉冲的展宽分析, 即将目标剖分为微元, 每个微元用小平面代替, 对每个微元的计算方法相同。

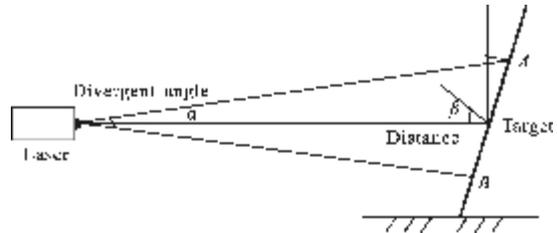


图 2 目标反射光路模型示意图

Fig.2 Diagram of optical path in the target reflection model

激光束的发散角为  $\alpha$ (mrad), 激光发散角为 0 mrad 的光线传输到目标光斑中心的距离  $SO$  为  $z$ , 发散角最大时的光线传播距离分别为  $SA$  和  $SB$ , 目标模型的截面直径尺寸大于激光束在目标上的光斑直径。水平投射的光线与目标模型法线的夹角(目标倾斜角)记为  $\beta$ 。得到公式(9)和公式(10)如下:

$$SA = z + z \tan \frac{\alpha}{2} \tan \beta \quad (9)$$

$$SB = z / \left( \cos \frac{\alpha}{2} + \sin \frac{\alpha}{2} \tan \beta \right) \quad (10)$$

激光束经过目标反射后, 脉冲展宽为:

$$T_A = \frac{z + z \tan \frac{\alpha}{2} \sin \beta}{c} \quad (11)$$

$$T_B = \frac{z}{c \left( \cos \frac{\alpha}{2} + \sin \frac{\alpha}{2} \tan \beta \right)} \quad (12)$$

最大脉冲展宽为:

$$\Delta\tau_2 = T_A - T_B \quad (13)$$

文中设计的激光目标回波模拟器根据所设计的大气湍流模型和激光目标发射模型, 激光回波脉冲的最后延时满足线性关系, 可以用公式(14)表示:

$$\Delta\tau = 2\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 \quad (14)$$

在设计激光回波目标模拟器时, 可根据激光武器和现场需求调整脉冲展宽量  $\Delta\tau_1, \Delta\tau_2$ , 以满足激光脉冲回波展宽的需求。

## 2 模型仿真与分析

### 2.1 湍流模型

模型仿真条件: 激光波长为 1.064  $\mu\text{m}$ , 脉冲宽度

为 20 ns, 激光发散角最大为 5 mrad, 激光器探测距离  $z$  的范围为 10 km, 折射率  $n$  的随机变化范围根据公式 (2), 大气温度随机变化范围为  $-333\sim 333$  K, 大气压强取值范围为  $1.003\ 25\times 10^5\sim 1.023\ 26\times 10^5$  Pa。

由公式(7)和公式(8), 大气湍流模型算法仿真在激光传输距离不同时, 脉冲展宽量与激光发散角之间的变化关系曲线如图 3 所示。由公式(5)和公式(6)可知激光脉冲展宽量主要由激光的传输距离、介质折射率和激光发散角决定, 而介质的折射率由地面温度的随机变化决定。介质的分层数根据实际需要, 取某一特定值可接近实际大气湍流折射率变化特征, 而对激光脉冲展宽量数量级影响不大。将湍流模型传输距离分别取 20 km、10 km 和 5 km, 介质平均分为 100 层, 每层厚度分别为 200 m、100 m 和 50 m, 其他条件如上文所述, 对不同传输距离分别计算了 20 次, 由于折射率的随机变化, 使得脉冲展宽量也是随机分布。脉冲展宽量的随机分布区域图形如图 3 所示, 容易看出由温度和压强的随机变化导致了折射率的随机变化, 而折射率的随机变化最终导致了脉冲展宽量的随机变化; 脉冲展宽量随探测距离的增大而逐渐增大; 在激光传输距离确定时, 脉冲展宽量随激光发散角增大而增大; 由脉冲展宽量的分布情况可以看出, 激光发散角为 5 mrad、传输距离分别为 20 km、10 km 和 5 km 时, 脉冲展宽量分布区域分别为 11 ns、7 ns 和 3 ns, 因此, 当激光发散角一定时, 激光传输距离越远, 脉冲展宽量的随机分布区域越宽。

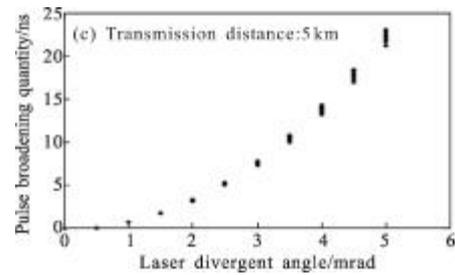
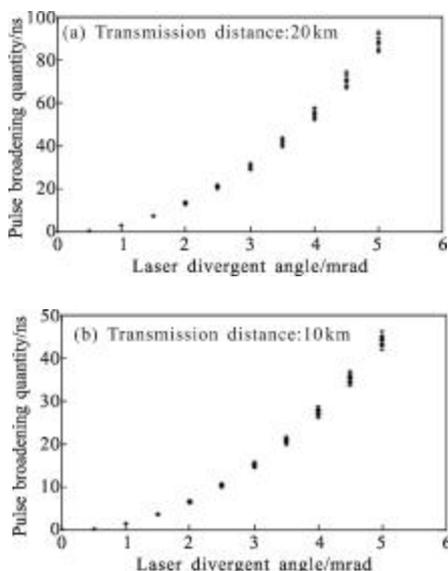


图 3 脉冲展宽量与激光发散角的关系

Fig.3 Relationship diagram between pulse broadening quantity and laser divergent angle

由图 3 可知, 在该模型的仿真条件下, 激光脉冲展宽在发散角最大为 5 mrad 时脉冲展宽量达到最大, 发散角在 0~5 mrad 的范围内展宽量逐渐增大, 激光发散角为 0 mrad 时脉冲展宽量为 0 ns。因此, 该模型可以近似真实地仿真激光在大气湍流条件下的脉冲展宽特性。

## 2.2 目标反射模型仿真与分析

激光脉冲最大传输距离 10 km, 其他条件如上文所述, 经过目标形状及激光发散角, 分析脉冲展宽与激光的发散角、目标模型倾斜角的关系。假定所设计目标模型为漫反射目标, 不考虑目标特性对激光的吸收, 服从朗伯余弦反射定律, 脉冲激光对目标发射激光, 当激光以不同的发散角入射目标时, 回波波形脉冲宽度展宽特性以及前后沿对称性会发生变化。该模型可以仿真不同形状目标物体的反射情况, 用于分析不同形状物体对激光脉冲展宽的影响, 可以用于激光目标模拟器中仿真不同形状目标的反射回波脉冲波形变化。

模型仿真图如图 4 所示。该图描述了激光束的发散角  $\alpha$  分别为 0.5 mrad、1 mrad 和 5 mrad 时脉冲展宽量随目标倾斜角  $\beta$  的变化关系曲线。可以看出, 当

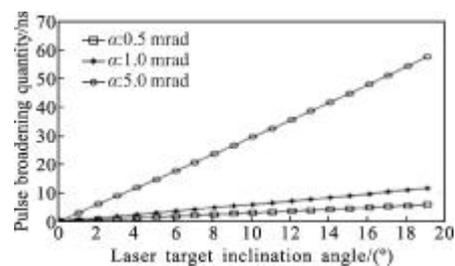


图 4 脉冲展宽量与目标倾斜角的关系

Fig.4 Relationship diagram between pulse broadening quantity and target inclination angle

目标倾斜角为某一定值时,脉冲展宽量随激光发散角增大而增大,当发散角为一定值时,脉冲展宽量随激光目标的倾斜角  $\beta$  增大而增大。当倾斜角  $\beta$  为  $10^\circ$ , 发散角为 0.5 mrad、1 mrad 和 5 mrad 时所产生的脉冲展宽量分别为 2 ns、5 ns 和 28 ns。由结果可以看出,在激光发散角一定的条件下,通过调整目标模型倾斜角来改变脉冲展宽量,从而模拟不同形状物体的回波信号。

### 2.3 目标模拟器脉冲宽度仿真分析

根据以上研究,应用于某激光回波目标模拟器,该目标模拟器要求激光波长为 1.064 nm, 脉冲宽度为 20 ns, 激光传输距离为 10 km, 发散角为 1 mrad, 大气压强范围为  $1.003\ 25 \times 10^5 \sim 1.023\ 26 \times 10^5$  Pa, 温度变化范围为  $-333 \sim 333$  K, 目标倾角为  $10^\circ$  时, 目标模拟器经过湍流和目标反射模型后脉冲展宽量为  $\Delta\tau=10$  ns, 其中湍流模型产生脉冲展宽量为  $2\Delta\tau_1=4$  ns, 目标反射展宽量为  $\Delta\tau_2=5$  ns。其他条件不变,假设目标以  $3 \times 3$  划分为 9 个区域,如图 5 所示,每个区域都遵循以上所建立激光目标反射模型,设区域 1,4,7 的倾角为  $3^\circ$ , 区域 2,5,8 的倾角为  $10^\circ$ , 区域 3,6,9 的倾角为  $5^\circ$ 。



图 5 目标模型结构图

Fig.5 Diagram of target model structure

目标的每个部分有不同的表面反射,分别对应 9 个区域,每个区域的光程会有所不同,激光脉冲延时不同,每个区域使用相同的目标展宽模型,由于目标形状的不同,会造成脉冲展宽量的不同。通过激光分别扫描每个区域,根据不同的传输距离和脉冲展宽量来模拟目标的激光脉冲回波波形,从而使目标形状再现,目标分成 9 个区域的仿真结果如表 1 所示。

由表 1 数据可以看出,回波脉冲的宽度和脉冲延时量随着目标形状的不同而不同。在目标模拟器

应用中,根据脉冲延时和脉冲宽度的信息控制模拟器光源脉冲的脉冲宽度和延时。因此,回波脉冲的宽度和脉冲延时量以及目标的形状参数是激光目标模拟器中的重要参数。

表 1 平面目标仿真数据

Tab.1 Planar target simulation data

Area	Pulse delay /ns	Turbulent pulse broadening /ns	Reflection pulse broadening /ns	Echo pulse broadening /ns
1	66671.91	1.52	1.74	23.26
2	66675.42	1.50	5.87	27.37
3	66684.3	1.52	2.91	24.43
4	66671.91	1.49	1.74	23.25
5	66666.67	1.65	5.87	27.52
6	66649.04	1.49	2.91	24.40
7	66661.43	1.76	1.74	23.50
8	66657.92	1.78	5.87	27.65
9	66649.04	1.81	2.91	24.72

## 3 结 论

文中主要建立了湍流激光传输模型和目标反射模型,通过数值模拟计算分析了激光脉冲展宽量随激光脉冲发散角、介质折射率和传输距离的变化关系;分析了激光脉冲展宽量随激光束发散角和目标模型倾斜角的变化关系。由仿真计算结果可以看出,所建模型可较方便地用于激光目标回波模拟器,根据设计需求调整有关参数改变脉冲展宽量,可以近似模拟实际激光大气湍流传输时域脉冲展宽特性和目标反射时域脉冲展宽特性。计算了距离在 10 km 时,激光发散角 1 mrad,激光波长 1 064 nm 条件下的脉冲展宽最大值为 10 ns。最后给出了一个平面目标的模拟数据。所研究结果可以应用于激光雷达回波目标模拟器中。

### 参考文献:

- [1] Wu Jian, Yang Chunping, Liu Jianbin. Optical Transmission Theory in the Atmosphere[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2005: 128 -208. (in Chinese)

- 吴健, 杨春平, 刘建斌, 等. 大气中的光传输理论 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005: 128-208.
- [2] Rao Ruizhong. Modern Atmospheric Optics [M]. Beijing: Science Press, 2012: 481-505.
- 饶瑞中. 现代大气光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 481-505.
- [3] Kelly D E, Young C Y, Andrews L C. Temporal broadening of ultrashort space-time Gaussian pulses with applications in laser satellite communication [C]//SPIE, 1998, 3266: 231-240.
- [4] D E Tjin Tham Sjin Kelly, Larry C Andrews. Temporal broadening and scintillations of ultrashort optical pulses [J]. Waves in Random Media, 1999, 9(3): 307-325.
- [5] Dang N T, Pham A T. Performance improvement of FSO/CDMA systems over dispersive turbulence channel using multi-wavelength PPM signaling [J]. Optics Express, 2012, 20(24): 26786-26797.
- [6] Solignac P A, Brut A, Selves J L, et al. Attenuating the absorption contribution on Cn2 estimates with a large-aperture scintillometer [J]. Boundary-Layer Meteorol, 2012, 143(2):261-283.
- [7] Stotts L B. Closed form expression for optical pulse broadening in multiple-scattering media [J]. Appl Opt, 1978, 17: 504-505.
- [8] Gibbins C J. Propagation of very short pulses through the absorptive and dispersive atmosphere [J]. Proc Inst Elect Eng, 1990, 137(5): 304-310.
- [9] Marcuse D. Pulse distortion in single-mode fibers. 3: chirped pulses[J]. Applied Optics, 1981, 20: 3573-3579.
- [10] Wang Xiusheng, Niu Yanxiong, Zhang Peng, et al. Numerical simulation about effect of target shape on laser range finder' s ranging performances [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(11): 28-31. (in Chinese) 王秀生, 牛燕雄, 张鹏, 等. 目标形状对激光测距能力影响的数值模拟研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(11): 28-31.