

# 脉冲式 3D 激光雷达图像数值模拟技术\*

马超杰, 李晓霞, 杨 华, 吴 丹

(解放军电子工程学院安徽省红外与低温等离子体重点实验室, 合肥 230037)

**摘 要:**应用计算机技术进行脉冲扫描 3D 激光雷达图像的数值模拟。在分析其系统组成、工作原理、成像性能等技术指标的基础上推导出相应的数学模型;应用这些数学模型进行 3D 激光雷达图像的计算机数值模拟试验;试验结果表明根据文中的数学模型可以对脉冲式扫描成像的 3D 激光雷达进行较好的描述。

**关键词:**3D 成像激光雷达;数学模型;;数值计算;图像处理

**中图分类号:** TN958.98 **文献标志码:** A

## Numerical Simulation for Pulsed 3D Ladar Images

MA Chaojie, LI Xiaoxia, YANG Hua, WU Dan

(Key Laboratory of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province,

Electronic Engineering Institute of PLA, Hefei 230037, China)

**Abstract:** The numerical simulation for pulsed scanned 3D ladar images was applied with the computer technology. Based on pulsed 3D imaging ladar's system composition, principle of work, imaging performance and corresponding mathematical models were deduced in this paper. Applying these models, the numerical simulation for 3D ladar imaging could be obtained. The experiment result indicates that these models can be a good description for pulsed scanned 3D imaging ladar.

**Keywords:** 3D imaging ladar; mathematical model; numerical calculation; image process

## 0 引言

3D 成像激光雷达(ladar)综合雷达测距原理和光学成像技术能够获取目标的高分辨率 3D 数据信息,是现代战场自动目标识别系统的重要传感器,在武器系统中得到广泛应用。应用计算机技术进行 3D 激光雷达图像的数值模拟研究能够指导 3D 成像激光雷达的设计及研制,同时可预计设计中产生的问题,加快产品研制速度,节约成本<sup>[1-2]</sup>。

文中根据脉冲式 3D 成像激光雷达的系统组成对其成像的全过程从数学角度进行建模分析,并应用所得到的模型进行计算机数值模拟试验。试验结果表明应用文中的数学模型可以对激光雷达图像进行较好的描述。

## 1 脉冲式 3D Ladar 图像生成原理

脉冲式 3D 成像激光雷达通过扫描机构对目

标发射一系列很窄的光脉冲,计算每个光脉冲从发射经过目标散射到返回接收机所经历的时间(渡越时间 TOF, time-of-flight),从而推算出探测器到目标上不同位置的距离信息。

设目标距离为  $R$ ,激光脉冲的渡越时间为  $t$ ,光在空气中的传播速度为  $c$ ,则:

$$R = c \cdot t/2 \quad (1)$$

当前的脉冲式激光雷达大多采用发射单一的高斯窄脉冲进行距离测量。图 1 为脉冲式激光雷达接收信号随时间变化的分布图<sup>[3]</sup>,在距离门限内的能量脉冲(接收脉冲)为从目标表面反射的测量信号,通过高精度的波形采样技术可以获得接收脉冲的细微结构。精确测量发射脉冲与返回激光脉冲的时间间隔  $dt$  成为提高距离测量精度的关键。测距精度  $\Delta R$  与时间间隔  $\Delta t$  的关系,如式(2)所示。影响发射脉冲与接收脉冲时间间隔测量精度的主要因素为脉冲回波信号的波形、

\* 收稿日期:2008-03-07

基金项目:安徽省红外与低温等离子体重点实验室基金(2007A011011F)资助

作者简介:马超杰(1981-),男,河北邯郸人,博士研究生,研究方向:光电工程。

计时触发电路对其测量的工作方式及内部计时电路对于时间间隔的测量量化精度。

$$dR = c \cdot dt/2 \quad (2)$$

应用光学扫描机构对场景进行逐点扫描,便可以获取场景的 3D Ladar 图像信息。对于激光雷达图像的横向分辨率主要取决于发射 / 接收光学系统和光学扫描机构的整体设计,文中假定扫描系统能够在给定的横向测量精度条件下,连续获取扫描视场的距离信息。视场内景物的大量位置信息在三维坐标系统中表示为分离的“点云”或一系列的距离信息,结合计算机智能处理技术还可以将这些点组织为邻接的面片集,形成场景表面的有效估计。应用 3D 图像显示技术可以将场景绘制为“点云”、“距离图”、3D 模型图等,从而有效地再现真实场景的 3D 立体模型。

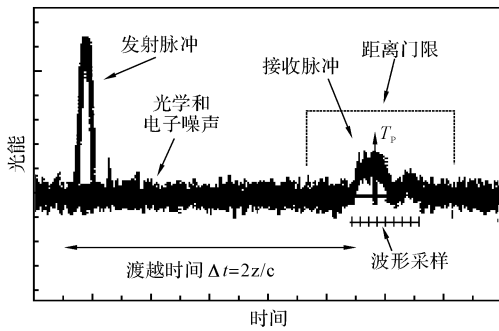


图 1 Ladar 接收信号时间分布图

## 2 脉冲式 3D Ladar 距离测量精度分析

### 2.1 脉冲回波信号波形因素

对于短距离(< 500m)窄脉冲激光雷达的测量应用,大气湍流对于脉冲波型的影响可以忽略,影响脉冲回波信号波形的主要因素为目标表面分布特征对于发射脉冲波型的展宽。在发射脉冲激光脚印内,目标表面变化引起不同部分的返回时间也不尽相同。接收脉冲的形状和变化范围根据目标的表面特性决定,目标表面的形状主导着脉冲展宽和返回的整个波形的形状。表面粗糙度更进一步增加了脉冲展宽,反射率控制了反射能量的大小<sup>[4]</sup>。因而,接收波形可以具有表面结构、粗糙度和反射率的信息。对于长脉冲(数 ns 级)漫反射粗糙表面的返回信号可近似看为高斯脉冲信号,设返回脉冲面积中心(pulse centroid)

平均延迟均值  $T_p$ ,返回脉冲的  $1/e$  半宽度均方根(RMS) $\sigma_p$ 。

Gardner 从三维视角考察漫反射表面特征对于激光高度计返回脉冲波形的影响,并推导出了  $T_p$  和  $\sigma_p$  的统计分布参数(期望和方差)表达式<sup>[5]</sup>。脉冲平均延迟的期望  $T_p$  与脉冲中心的传播延迟、光束发散角引起的相位波前曲率附加延迟、光束指向与天底的夹角  $\phi$  和光束指向角的跳动等部分引起的偏差有关。返回脉冲宽度的均方误差包括系统效应、表面粗糙度的影响、光束与天底的夹角、表面斜率及光束曲率的影响。

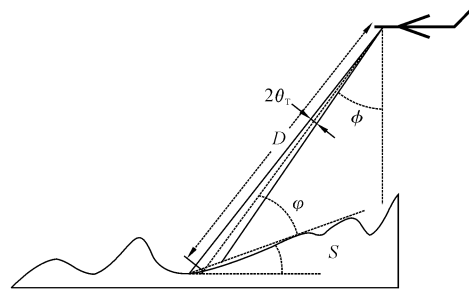


图 2 激光雷达测量的几何关系图

如图 2 所示,设  $\theta_T$  为激光光束的  $1/e$  半宽度的发散角,  $D$  为激光雷达距离照射面元的距离,  $S$  为照射表面面元与水平面的夹角,  $\phi$  为光束方向与表面面元的夹角,根据几何知识可以得到式(3)~式(5):

$$\phi = \pi/2 - (\theta_T + S) \quad (3)$$

$$\tan^2 S = \tan^2 S_x + \tan^2 S_y \quad (4)$$

$$D = Z/\cos\phi \quad (5)$$

这里假定不考虑光束指向角的跳动和表面粗糙度的影响(对于人工目标,近距离作用下光斑面积内目标表面结构分布变化不大),且激光束的发散角很小(mrad),将 Gardner 导出的公式进行如下简化。其中  $F$  为探测器的超噪系数,  $\langle N \rangle$  为接收光子数的均值,  $K_s$  为接收区域与散斑相关区域的比值,  $\sigma_1$  为发射脉冲宽度,  $\sigma_h$  为系统化噪声,若系统采样周期为  $\Delta t$ ,则:

$$\sigma_h = \Delta t / \sqrt{12} \quad (6)$$

$$E(T_p) = \frac{2D(1 + \tan^2\theta_T)}{c} \quad (7)$$

$$E(\sigma_p^2) = (\sigma_1^2 + \sigma_h^2) + \frac{4D^2 \tan^2\theta_T}{c^2} \tan^2(\phi + S) \quad (8)$$

$$\text{Var}(T_p) = \frac{F(\sigma_1^2 + \sigma_h^2)}{\langle N \rangle} + \left( \frac{F}{\langle N \rangle} + \frac{1}{2K_s} \right) \cdot$$

$$\frac{4D^2 \tan^2 \theta_r}{c^2} \tan^2 (\phi + S) \quad (9)$$

$$\text{Var}(\sigma_p^2) \simeq \frac{F(\sigma_i^2 + \sigma_n^2)}{2\langle N \rangle} + \frac{F}{\langle N \rangle} \frac{2D^2 \tan^2 \theta_r}{c^2} \tan^2 (\phi + S) \quad (10)$$

### 2.2 计时触发测量方式

计时触发电路需要提供高精度的开始信号和停止信号。选择合理的计时触发方式是精确测量脉冲渡越时间的关键因素。由于系统内噪声的干扰和多种因素引起的接收脉冲展宽,增加了时间测量的不确定性。为了克服接收脉冲信号的不确定性引起的测量误差,研究工作者提出了许多时间估计测量算法。例如脉冲前沿阈值法,峰值鉴别法,50% 恒比鉴别法(CFD),脉冲面积中心法(Pulse Centroid),脉冲中点法(Pulse Mid-Point),等<sup>[6]</sup>。其中脉冲面积中心法(Pulse Centroid)和 50% 恒比鉴别法具有较好的抗噪声能力,定时精确,应用广泛。

脉冲面积中心法对整个接收信号进行波形采样,能够适用于具有不同表面特征的目标返回信号。若发射的脉冲在空间和时间上符合高斯分布,可以应用 2.1 中的公式进行接收脉冲返回时间和脉冲宽度的估计。恒比鉴别法(多用 50%)根据信号幅度动态调整阈值电平的大小,因而能有效去除脉冲幅度变化带来的时间漂移(Walk Error),给出较高的定时性能,但实现较为复杂。图 3 为恒比定时测量电路的工作原理图。输入的脉冲信号分为两路分别进行延时反向和衰减处理,然后输入比较电路进行零交叉检测,得到的零点就是需要测量的计时信号。计时漂移误差主要受系统信噪比的影响,精度可以达到 100ps 的水平<sup>[7]</sup>。

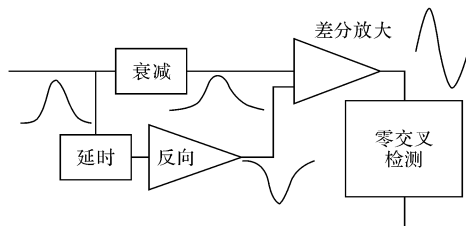


图 3 恒比定时测量电路工作原理图

### 2.3 时间间隔测量精度

时间间隔测量电路能够准确测量开始信号和停止信号的时间间隔。目前主要有 3 种方法:

模拟法、数字法和数字插入法。模拟法通过对电容充放电进行时间间隔测量,测量精度可以达到 ps 级,但是由于非线性效应,随着测量距离增加,精度会降低。数字法应用高频同步时钟脉冲对时间间隔进行测量,测量精度受时钟频率限制,多为 ns 级。数字插入法基于数字测量的方法,继承了数字测量范围大线性好的优点。其采用多种技术将单个时钟周期的时间间隔扩展为 K 倍,将时间间隔的测量精度提高为时钟周期的 1/K。应用基于 FPGA 的延迟线插入法,测时精度可以达到 100ps 的水平<sup>[7-8]</sup>。

## 3 脉冲扫描 3D Ladar 图像的表示方法

脉冲扫描式 3D 成像激光雷达通过扫描机构对目标发射一系列很窄的光脉冲,获取场景内分布目标上不同位置处的距离信息,结合计算机智能处理技术和图像显示技术能够有效地再现真实场景的 3D 立体模型。通常的激光雷达图像表示方法有距离表示法和三维点图表示法两种方式。文中应用 3 维 CAD 模型进行目标表示,结合计算机图形学技术在构建的三维场景中实现 3D Ladar 图像的绘制。

### 3.1 距离表示法

距离表示法是指直接应用激光雷达传感器到目标上各点处的距离来表示获取的三维场景信息。如图 4 所示,相对于基准参考点,  $P(x_0, y_0, z_0)$  为激光雷达传感器的空间坐标,目标上任意一点  $O(x, y, z)$  与激光雷达的欧式距离值由式 (11) 可以得到。

$$D = |OP| = \sqrt{\sum (O_i - P_i)^2} \quad i = x, y, z \quad (11)$$

为了便于计算机处理,首先设定激光雷达传感器的位置和扫描视场,得到扫描的空间场景范围,应用光线遮挡判断获取场景中的点是否与传感器满足“通视”条件。对于满足条件的点计算出与传感器的距离。考虑到实际应用中的限制,计算出每一点处微面元的斜率 S,此点到传感器的视线与 z 轴的夹角,并结合激光光束的发散角  $\theta_r$  和系统内部噪声,得到相应的激光回波信号波

形;应用激光雷达计时触发测量原理和时间间隔测量方法,求出激光雷达系统获取的距离值  $\hat{D}(\phi, \theta, \theta_T, S)$ 。求出目标 CAD 模型每个顶点与传感器位置的的距离值,通过插值技术得到目标上任意点的距离值,这样便可以绘制出 3D Ladar 的距离表示图。

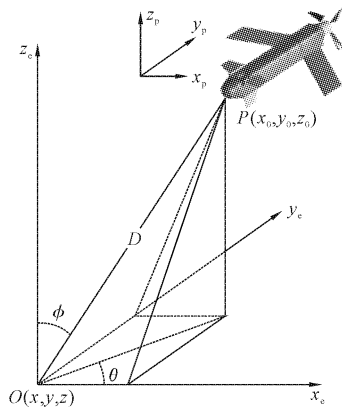


图 4 激光雷达测距几何关系图

### 3.2 高度点图分布表示方法

高度分布模型是通过应用激光雷达获取的场景逐点距离值,结合相应的测量角度,反演出场景实际的三维分布模型。为了便于处理,这里同样从场景目标的角度来建模。对 2.1 中获取的激光雷达场景距离图像  $\hat{D}(\phi, \theta, \theta_T, S)$ ,应用式 (12) 可以求解相应的空间坐标值  $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ 。

$$\begin{pmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} - \hat{D} \begin{pmatrix} \sin\phi\cos\theta \\ \sin\phi\sin\theta \\ \cos\phi \end{pmatrix} \quad (12)$$

### 3.3 模拟结果

应用文中提出的方法,可以设定不同的激光雷达系统工作参数(位置、视线轴、视场角、光束发散角、发射脉冲宽度、时间测量方法等)。设定图 5(a)和图 5(c)的视角参数为(300m, 45°, 30°),图 5(b)和图 5(d)的视角参数为(300m, 60°, 30°),忽略系统采样性能的影响,采用 100ps 精度的 50% 恒比鉴别法进行时间测量,对放置于平面的 Hummer 车(忽略表面粗糙度)进行 3D 激光雷达图像数值模拟,结果如图 5 所示。图 5(a)和图 5(b)为距离分布图,应用不同的颜色/灰度值表示与 Ladar 的距离信息;图 5(c)和图 5(d)为目标的 3 维分布点图(这里将空间坐标进行了一定的旋转,以具有更好的可视化效果)。可见 3D 激光雷达系统能够较好地反映出目标的空间结构,是一种有效的军用传感器。

## 4 结论

试验结果表明根据文中数学模型可以对脉

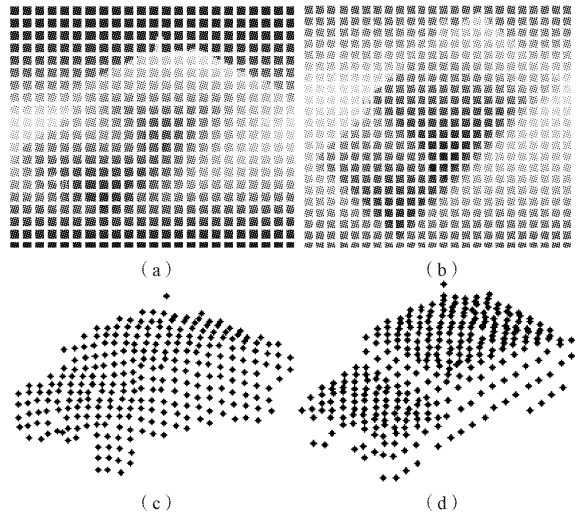


图 5 Ladar 的距离图像和“点云”图像

冲式扫描成像的 3D 激光雷达进行较好的描述。今后,可以进一步建立微观模型,细化激光脉冲从发射、脉冲与目标表面反射及脉冲接收的全过程,得到更为精确的数值模拟结果。

### 参考文献:

- [1] 马超杰,孙晓泉,李晓霞. 基于激光成像雷达制导系统的仿真设计[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(6):655-659.
- [2] 马超杰,吴丹. 新体制军用激光雷达成像技术[J]. 航空兵器, 2007(4):25-29.
- [3] Bufton J L. Laser altimetry measurements from aircraft and spacecraft[J]. Proc. IEEE, 1989, 77(3):463-477.
- [4] Gardner C S. Target signatures for laser altimeters: An analysis[J]. Appl. Opt. 1982, 21(3):448-453.
- [5] Gardner C S. Ranging performance of satellite laser altimeters[J]. Proc. IEEE, 1992, 30(5):1061-1072.
- [6] N Thomas et. al. The BepiColombo laser altimeter (BELA): Concept and baseline design[J]. Planetary and Space Science, 2007, 55(10):1398-1413.
- [7] 秦石乔. 脉冲半导体激光器高速三维成像激光雷达研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2005.
- [8] 张立,陈育伟,胡以华. 高性能时间间隔测量装置及其在激光成像中的应用[J]. 红外技术, 2004, 26(3):71-74.