

## 对地观测激光成像基准回波脉冲研究\*

张立, 陈育伟, 张海洪, 胡以华, 舒嵘, 薛永祺

(中国科学院上海技术物理所, 上海 200083)

**摘要:** 激光回波脉冲探测在对地观测的地物反射率反演、高度测量和形态测量等方面具有极其重要的用途。引入了对地观测激光成像基准回波脉冲的概念, 并指出了它在对地观测激光成像系统中的重要意义。提出了获取基准回波脉冲的方法, 通过实验, 采集了一系列激光回波波形, 经过处理, 获取了对地观测激光成像系统的基准回波脉冲。最后对基准回波脉冲进行了理论分析, 讨论了它的若干应用。

**关键词:** 对地观测; 激光成像; 激光回波; 基准回波

**中图分类号:** TN24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)03-0260-04

## Research on basic wave of laser imaging for earth observation\*

ZHANG Li, CHEN Yu-wei, ZHANG Hai-hong, HU Yi-hua, SHU Rong, XUE Yong-qi

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** The concept of basic wave of laser return in laser imaging for earth observation is put forward. Its important meaning is discussed. And the method of getting the basic wave is also given. According to the experiment, a series of laser return are digitized and the basic wave is acquired after processing. At last, the basic wave is analyzed and its application is discussed.

**Key words:** Earth observation; Laser imaging; Laser return; Basic wave

### 0 引言

对地观测激光成像技术是主动遥感领域一个重要的研究方向<sup>[1]</sup>。通过地物目标激光回波脉冲获取地物特性是国际上的一个研究热点。激光回波脉冲不仅可以精确反映目标的距离, 还可以获取目标的灰度信息。更为重要的是, 由地物目标的回波特性可以

反演出目标的细节信息, 例如树叶的垂直分布结构或获取隐藏的目标等<sup>[2~8]</sup>。

激光回波脉冲不仅反映了接收功率, 而且反映了接收能量的空间和时间分布, 是一系列因素的综合表征<sup>[9]</sup>。因此, 相对于出射激光脉冲的脉冲宽度, 激光回波脉冲都会获得展宽甚至分裂, 尤其是对复杂目标成像时, 激光回波脉冲的形状会变得相当复杂。

为了对激光回波脉冲进行分析, 借鉴国际上的研

收稿日期: 2003-09-20; 修订日期: 2003-10-24

\* 基金项目: 国家 863 计划项目(2001AA131050); 上海市科委重大项目(025115022); 国家自然科学基金资助项目(49981001)

作者简介: 张立(1973-), 男, 河南濮阳人, 工程师, 在读博士, 研究方向为主动及被动光学遥感系统。

究成果<sup>[1]</sup>, 本文引入对地观测激光成像基准回波脉冲的概念。所谓对地观测激光成像基准回波脉冲是指激光从空间垂直照射到地面漫反射平面目标而获取的归一化的激光回波脉冲回波波形。

对地观测激光成像基准回波脉冲可以视为最典型的、归一化的激光回波脉冲。它将外界目标对激光回波脉冲的影响降到最小, 集中反映了除目标之外的激光脉冲的空间和时间分布与接收电路的系统响应共同作用的结果。

利用基准回波脉冲可以反推出系统响应特性, 将接收的激光分布特性和激光回波脉冲对应起来, 从而推导出地面的特征。对于复杂的激光回波脉冲, 应用对地观测激光成像基准回波脉冲, 可以将简单目标从复杂目标背景中分离出来, 具有相当广泛的军事用途。

### 1 激光基准回波脉冲采集系统与方法

实验系统采用脉冲激光器发射激光, 利用雪崩二极管探测激光回波脉冲, 将信号放大后送至高速数据采集卡进行数字化, 并将结果记录和显示, 基本组成如图 1 所示。

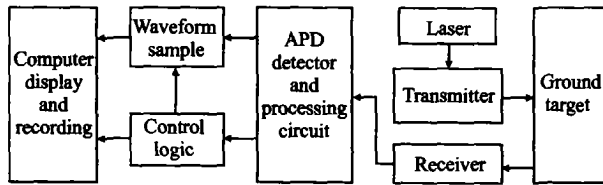


图 1 实验系统的基本组成  
Fig. 1 Diagram of experiment system

实验系统的主要技术指标:

作用距离为 255 m; 激光波长为 1064 nm; 激光脉冲宽度为 7 ns; 激光脉冲功率为 1 mJ; 激光脉冲重复频率为 10 Hz; 激光发散角为 0.3 mrad; 回波探测器为 APD; 回波波形采样率为 2 GHz; 回波波形量化位数为 8 bit。

选取一个平面目标, 使激光垂直入射到该表面。同时, 应考虑该平面与激光器间的距离, 使激光照射的区域完全落在接收视场内。

在激光出射处加衰减片控制激光输出的能量, 并

获取不同激光输出能量时的激光回波脉冲。通过对波形特性和系统特性的分析, 剔除了饱和的波形, 从而得到 16 组对应不同出射激光能量的回波脉冲, 并记录下对应的波形。

### 2 基准回波脉冲的获取

#### 2.1 基准回波脉冲获取的原理

激光回波波形采集系统可近似为线性系统。

设激光回波波形为  $y(t)$ , 对于普通目标,  $y(t)$  可近似表示为:

$$y(t) = x(t) * h_1(t) * h_2(t) * h_3(t) * h_4(t) + \xi(t) \tag{1}$$

式中 \* 表示卷积;  $x(t)$  为激光发射脉冲;  $h_1(t)$  为从激光器到目标大气扰动引起的冲击响应;  $h_2(t)$  为由目标调制引起的冲击响应;  $h_3(t)$  为从目标到激光器大气扰动引起的冲击响应<sup>[9]</sup>;  $h_4(t)$  为激光回波波形采集系统的系统响应;  $\xi(t)$  表示加性噪声。

对于较近距离, 大气的扰动可以忽略:

$$h_1(t) \approx \delta(t) \tag{2}$$

$$h_3(t) \approx \delta(t) \tag{3}$$

则公式(1)可简化为:

$$y(t) = x(t) * h_2(t) * h_4(t) + \xi_1(t) = (x(t) * h_4(t)) * h_2(t) + \xi(t) \tag{4}$$

当激光垂直入射到平面漫反射目标时, 反射回去的激光归一化能量的时间分布可以认为与入射时相同, 有:

$$h_2(t) = \delta(t) \tag{5}$$

这时的激光回波脉冲  $y(t)$  就是特定目标的回波波形  $y_2(t)$ :

$$y_2(t) = x(t) * h_4(t) + \xi(t) \tag{6}$$

运用最大不失真滤波对  $y_2(t)$  进行处理, 可估计出对应平面目标的回波脉冲  $\hat{y}_2(t)$ , 它就是基准回波脉冲:

$$\hat{y}_2(t) = x(t) * h_4(t) \tag{7}$$

将公式(7)代入公式(4), 得:

$$y(t) = \hat{y}_2(t) * h_2(t) + \xi(t) \quad (8)$$

所以,只要得到了 $\hat{y}_2(t)$ ,根据实际目标的激光回波波形 $y(t)$ ,便可估计出目标调制引起的冲击响应 $h_2(t)$ ,它可以反演出地物的层次分布。

只有激光垂直入射到平面时所获取的非饱和激光回波波形才可以称之为基准回波脉冲,它在回波识别中发挥着非常重要的作用。激光回波脉冲波形在一定程度上可以视为基准波形的平移、放大、压缩和组合。因此,基准回波脉冲必须有一定的代表性。

对于地面试验,可以选取一平面物体,使激光垂直入射到该表面。同时,应考虑物体与激光器件的距离,使激光照射的区域完全落在接收视场内。文中采用的就是这种方法。

目前,我国对于机载试验还没有进行尝试。从国外的文献看,为了获取基准回波脉冲,飞机起飞后通常会飞过平整的地面或者海面,从而获取基准波形。

## 2.2 获取基准回波脉冲的数据处理算法

通过激光基准回波脉冲采集方法获取一系列激光回波脉冲波形,然后采取以下算法进行处理:

(1) 计算噪声均方根;(2) 对波形进行滤波;(3) 去除直流分量;(4) 波形归一化;(5) 对于一系列波形的特征参数进行统计和平均,得到基准回波脉冲。

通过计算回波脉冲的上升时间和下降时间分布,可以发现,对于非饱和激光回波,其归一化的波形特征具有很大的相似性,这是提出基准回波脉冲的基础;对于饱和激光回波,其归一化的波形特征不具有很大的相似性。在实际应用中,应该避免使用饱和波形。

获取的基准回波脉冲波形如图 2 所示,此波形是分析其他复杂波形的基准。

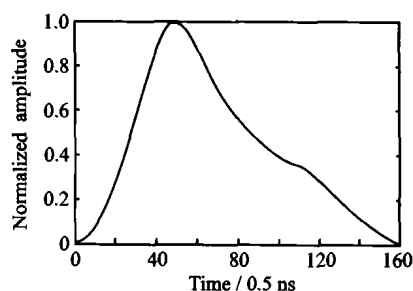


图 2 基准回波脉冲

Fig. 2 Basic wave of laser return

在不同出射激光能量情况下,对同一目标,激光回波脉冲波形的相似性是获取基准回波脉冲的基础。文中采样的 16 组激光回波脉冲覆盖了系统响应的线性区。通过分析数据得知,各组回波脉冲的上升沿和下降沿相对于出射激光能量有较稳定的关系,各组激光回波脉冲波形具有相似性。这对应了激光照射在不同后向散射率地表的情形,基准回波脉冲对这种后向散射波形进行了归一化。

## 3 基准回波脉冲特性分析和应用

### 3.1 基准回波脉冲特性分析

常规地物目标为漫散射体,没有特殊的反射方向,其激光光斑内的目标表面结构随 $x$ 、 $y$ 的分布特征可用函数 $\xi(x,y)$ 表示<sup>[10]</sup>:

$$\xi(x,y) = \xi_0 + x \tan s_x + y \tan s_y + \Delta\xi(x,y) \quad (9)$$

式中 $\xi_0$ 是常量; $s_x$ 、 $s_y$ 分别是二维方向激光脚印内的目标表面平均斜率; $\Delta\xi(x,y)$ 是激光脚印内的目标表面随机粗糙度。假定激光作 $x$ 方向一维线性扫描,扫描倾角为 $\varphi$ ,光束发散半角为 $\alpha$ 。数值计算表明:在一定入射角度范围内,近距离目标的表面斜率对 ns 量级脉冲展宽的贡献可以忽略;近距离光束曲率对脉冲展宽的贡献也可以忽略,则激光回波均方根宽度可以表示为:

$$E(\sigma_p^2) = (\sigma_f^2 + \sigma_{OPT}^2) + \frac{4Var(\Delta\xi)}{c^2 \cos^2 \phi} + \frac{4z^2 \tan^2 \alpha \sin^2 \phi}{c^2} \quad (10)$$

式中 $\sigma_f$ 是系统响应均方根脉宽; $\sigma_{OPT}$ 是激光脉冲的均方根宽度。从公式(10)可以得出:如果激光脉冲宽度为 ns 量级,光束发散角为 mrad 量级,脉冲回波展宽主要由激光脚印内的目标表面粗糙度和激光脉冲的入射角决定。在正入射和小角度入射情况下,脉冲展宽主要由目标表面粗糙度决定。

因此,通过测量不同种类地物目标的激光回波展宽,可以确定不同种类目标的表面结构<sup>[11]</sup>(尤其是表面粗糙度),建立脉冲展宽与目标特征的对应关系;通过研究同一地物目标不同入射角的波形展宽,可以建立入射角与波形展宽的对应关系。

对于基准波形,  $Var(\Delta\epsilon) = 0, \phi = 0$ , 公式(10)可简化为:

$$E(\sigma_p^2) = (\sigma_j^2 + \sigma_{OPR}^2) \quad (11)$$

因此,基准回波脉冲的获取综合考虑了激光的发射和系统响应的脉宽。对于复杂的激光回波波形,通过一定的算法,可以集中注意力分析地面起伏和入射角的影响。

基准回波脉冲在理论上应为高斯脉冲,文中得到的基准回波脉冲的前沿接近于高斯分布,后沿有拖尾现象,并非理想的高斯脉冲。这是理想情况和试验的差异。在理论分析中,一般假设回波脉冲是一系列高斯脉冲的叠加。这 and 实际测量得到的结果相比,只是一种近似。因此,要想精确反演地物特征,必须知道系统的基准回波脉冲,并在此基础上进行修正。

此外,系统的响应与温度和操作方法有关,不同的温度和操作会影响系统的响应。对于机载对地观测激光成像系统,可以在每次起飞时选择地物获取基准回波脉冲,消除温度和操作带来的影响。

### 3.2 基准回波脉冲的应用

#### (1) 基准回波脉冲在树高识别中的应用

为了在复杂的回波中判断地面的位置,将此波形的最后一部分的波形特征与激光直接照射到平整地面的激光回波的波形特征进行比较,如果特征一致即可认为此波形就是地面反射的激光波形;如果不一致,可能是地面反射的波形已经淹没在噪声之中,则此时的树高检测不出来。

#### (2) 基准回波脉冲在隐藏目标识别中的应用

为了从复杂的激光回波波形中判别出隐藏目标,可将该波形分解成一个基准回波脉冲和信号波形的和。通过这种类似“扣除”的算法,可以将隐藏的目标识别出来。

## 4 结论

基准回波脉冲在对地观测激光成像系统中具有重要的意义,通过对基准回波脉冲的研究,可以获取系统的响应特征。

基准回波脉冲在理论上是高斯脉冲,试验表明,基准回波脉冲的前沿可近似为高斯脉冲的前沿,基准回波脉冲的后沿在高斯脉冲后沿的基础上有展宽和拖尾。一般认为,激光回波脉冲是一系列高斯脉冲的叠加。实验表明,必须对原来的分解为高斯脉冲的算法进行修正。

基准回波脉冲的获取应该遵循一定的规则,并通过实验来进行。基准回波脉冲不是公用的,而是该系统所特有的。根据基准回波脉冲,可以利用复杂波形反演出复杂目标的空间分布特性,这就为以后复杂目标回波模型的建立奠定了基础。

### 参考文献:

- [1] Harding D J, Lefsky M A. Lidar altimeter measurement of canopy structure [R]. America Government Report 2000. N000021335.
- [2] Frank E Hoge. Recent advances in laser remote sensing[A]. SPIE[C]. 1999,3707. 2-9.
- [3] Ove Steinvall. Airborne laser radar: systems and methods for reconnaissance and terrain modeling[A]. SPIE[C]. 1999,3707. 12-26.
- [4] John D Aber. A method for estimating foliage-height profiles in broad-leaved forest[J]. Journal of Ecology, 1979, 67: 35-40.
- [5] MacArthur R H, Horn H S. Foliage profile by vertical measurements[J]. Ecology, 1969, 50: 802-804.
- [6] Mats Nilsson. Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system[J]. Remote Sens Environ, 1995, 56: 2-7.
- [7] J Bryan Blair, David L Rabine, Michelle A Hofton. The laser vegetation imaging sensor: a medium-attitude, digitization-only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography [J]. Photogrammetry & Remote Sensing, 1999, 54: 115-122.
- [8] Juha Hyyppa, Hannu Hyyppa. Forest inventory based on laser scanning and aerial photography[A]. SPIE[C]. 2000, 4035. 106-117.
- [9] Churoux P, Besson C. Model of burst imaging lidar through the atmosphere[A]. SPIE[C]. 2000, 4035. 324-331.
- [10] Gardner C S. Target signatures of laser altimeters: an analysis [J]. Applied Optics, 1982, 21(3): 448-453.
- [11] James B Abshire, Xiaoli Sun, Robert S Afzal. Mars orbiter laser altimeter: receiver model and performance analysis[J]. Applied Optics, 2000, 39(15): 2449-2460.