

机载激光波束扫描回波脉冲特征分析

胡以华 魏庆农 刘建国 章立民

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘要 本文介绍了脉冲激光束远区场的时空分布, 导出了机载脉冲激光对地面扫描探测时回波脉冲的时域表达关系, 通过数值计算得到了回波脉冲波形及其有关参数随扫描倾角的变化规律, 结果表明不同波束倾角时回波脉冲特征发生了明显的变化。

关键词 机载激光探测 激光波束扫描 激光脉冲

An Analysis of the Characteristics of the Return Pulse in Airborne Laser Beam Scanning

Hu Yihua Wei Qingnong Liu Jianguo Zhang Limin

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanic, Chinese Academy of Science, Hefei 230031)

Abstract In this paper, the spatial and temporal distribution of the pulsed laser beam in a far field is introduced. An expression of the return pulse power in time domain is deduced for an airborne pulsed laser beam scanning and sounding over the ground. The waveforms of the return pulse, its main characteristics and the relations between them and the scanning angle of beam are obtained. It is indicated by the conclusion that characteristics of the return pulse vary distinctly with the scanning angle of the beam.

Key words Airborne laser sounding, laser beam scanning, laser pulse

脉冲激光回波探测最佳信噪比的获得依赖于激光回波脉冲的波形参数, 在一般情况下, 回波特征参数基本保持不变, 可是在激光束作扫描探测时, 由于实际的激光脉冲, 在时间上都具有一定的宽度, 在空间上, 激光束具有一定的发散角, 当激光光束相对于地面的倾角发生变化时, 不同光斑处的回波波形就存在着差异, 最终影响到探测性能的变化, 尤其当激光束在较高空进行大范围扫描时, 这种影响是必须考虑的。

发射脉冲激光波束模型

激光器输出激光脉冲在时域上具有高斯线型, 其发射激光功率可表示为

$$P(t) = P_0 \exp[-k(t' - \tau/2)^2/\tau^2] \quad (1)$$

式中 τ 为半功率脉冲宽度, $k = 4 \ln 2$, 式(1)表示的是关于 $t' = \tau/2$ 对称的波形, 发射脉冲的起点在 $t' = 0$ 处。

对于基模激光, 空中光强度分布也为高斯线型,

$$I(r) = I_0 \exp(-2r^2/w^2) \quad (2)$$

式中 r, w 如图 1 所示, I_0 为光束中心光强。

$w = w_0 \sqrt{1 + (\lambda z/\pi w_0^2)^2}$ 为激光束在距束腰

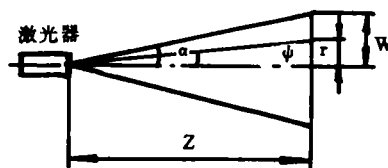


图 1 激光束有关参数示意图

1996 年 11 月 28 日收稿

为 z 处的光束半径, w_0 为束腰半径, λ 为激光波长, r 为距离 z 处激光束上某点到光束中心的距离, 激光束成一发散的波束出射, 如果以 α 表示激光束半发散角, 则有

$$\alpha = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{dw}{dz} = \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (3)$$

这样, 在图 1 中若半径为 r 的点到激光器的连线与光束中心轴线之间的夹角为 Ψ ($-\alpha \leq \Psi \leq \alpha$), 则利用 α 和 w 的表达式并考虑到远场时满足 $\lambda z / \pi w_0^2 \geq 1$, 式(2)可以变换为

$$I(\Psi) \approx I_0 \exp\left[-\frac{2tg^2\Psi}{\alpha^2}\right] \quad (4)$$

从而发射激光束功率的时空分布可表示为

$$P_T(t', \Psi) = P_T \exp\left[-k(t' - \tau/2)^2 / \tau^2\right] \cdot \exp\left[-\frac{2tg^2\Psi}{\alpha^2}\right] \quad (5)$$

P_T 为光束中心处的最大功率。

回波脉冲构成

假设激光器在空中 A 点对地扫描照射, 并进行同轴接收。如图 2 所示, 激光束中心轴线与天底之间的夹角为 Φ 。

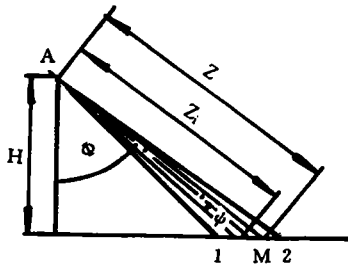


图 2 激光束对地面照射示意图

图中 H 为激光器和探测器的高度, 点 1、2 之间是一束光束所照射到的目标范围, M 是 1、2 之间的任一点。点 1、2 之间的所有点都会给出持续时间等于脉宽的后散射激光信号。

为了分析问题方便又不失一般性, 假定所分析的目标是一维的。我们的目的是要找出回波脉冲波形的时间关系, 对于脉冲波形内的任何时刻 t , 一定会在被照射区域内找到一点 M , 它到激光器之间的距离为 z , 使 $z = ct/2$ 成立。 t 时刻的接收功率中, 除了包括点 M 的后向散射

功率的贡献之外, 点 1、2 之间的很多点都有贡献, 但在式(1)的发射脉冲时域假定下, 对于脉宽为 τ 的发射脉冲, 只有那些到探测器的距离 z_i 满足 $z_i = z - ct'/2$ (其中 $0 \leq t' \leq \tau$) 的目标点所散射的回波才会在 t 时刻同时到达探测器, 因而只有点 M 左边的一些点对 t 时刻的回波功率有贡献。

根据激光探测后向散射的原理, 探测器接收的功率是发射功率与一个传输因子 $\gamma(z)$ 的乘积, t 时刻的功率经过空间积分而得到

$$P_R(t) = \int_{\Psi_1}^{\Psi_2} P_T(\Psi, t') \gamma(z_i) d\Psi \quad (6)$$

其中

$$\gamma(z) = S_r \sigma A(z) / \pi z^2 \quad (7)$$

$\gamma(z)$ 代表着大目标而且接收视场角大于激光发散角时的传输因子, S_r 为接收有效面积, σ 为目标反射率, 在本文的分析过程中认为它是各向一致的, $A(z)$ 为与距离有关的激光双程总衰减系数, 为了分析问题的方便也假设它为常数 A 。

从图 2 可以看出,

$$z_i = H / \cos(\Phi + \Psi) \quad (-\alpha \leq \Psi \leq \alpha) \quad (8)$$

$$t' = t - 2H/c \cdot \cos(\Phi + \Psi) \quad (9)$$

将式(5)、(7)、(8)、(9)代入式(6)可以得到

$$P_R(t) = \frac{P_T S_r \sigma A}{\pi} \int_{\Psi_1}^{\Psi_2} \exp\left[-\frac{k}{\tau^2} \cdot \left(t - \frac{2H}{c \cdot \cos(\Phi + \Psi)} - \frac{\tau}{2}\right)^2 - \frac{2tg^2\Psi}{\alpha^2}\right] \cdot \frac{\cos^2(\Phi + \Psi)}{H^2} d\Psi \quad (10)$$

积分限为

$$\Psi_1 = \arccos\left(\frac{H}{c \cdot t/2 - c \cdot \tau/2}\right) - \Phi$$

$$\Psi_2 = \arccos\left(\frac{H}{c \cdot t/2}\right) - \Phi$$

由式(10)可知, 激光回波脉冲时域功率分布与波束扫描倾角 Φ 、波束发散角 α 、高度 H 、发射脉冲宽度 τ 有关。不过, 在具体系统的激光扫描探测时, α 、 H 、 τ 都是基本确定的, 只是 Φ 在不断地变化, 所以有必要详细分析回波脉冲波形特征随扫描倾角的变化规律, 找出激光脉冲扫描探测器设计时参考的依据。

回波脉冲参数的变化规律

激光回波脉冲信号的特征参数主要由它的波形形状、峰值、宽度来表示,在诸如测距的激光脉冲探测时还需要给出回波脉冲的准确到达时间。在机载脉冲激光扫描探测与测距时,主

要考虑一般的工作情况下飞机飞行在几千米的高度,而且波束扫描限于 $\pm 0.5\text{rad}$ 之间,目前的脉冲激光器波束发散角为毫弧度量级,发射脉冲宽度为纳秒量级,这里在这些参数范围内,讨论脉冲激光回波的上述主要特征随扫描倾角的变化规律。

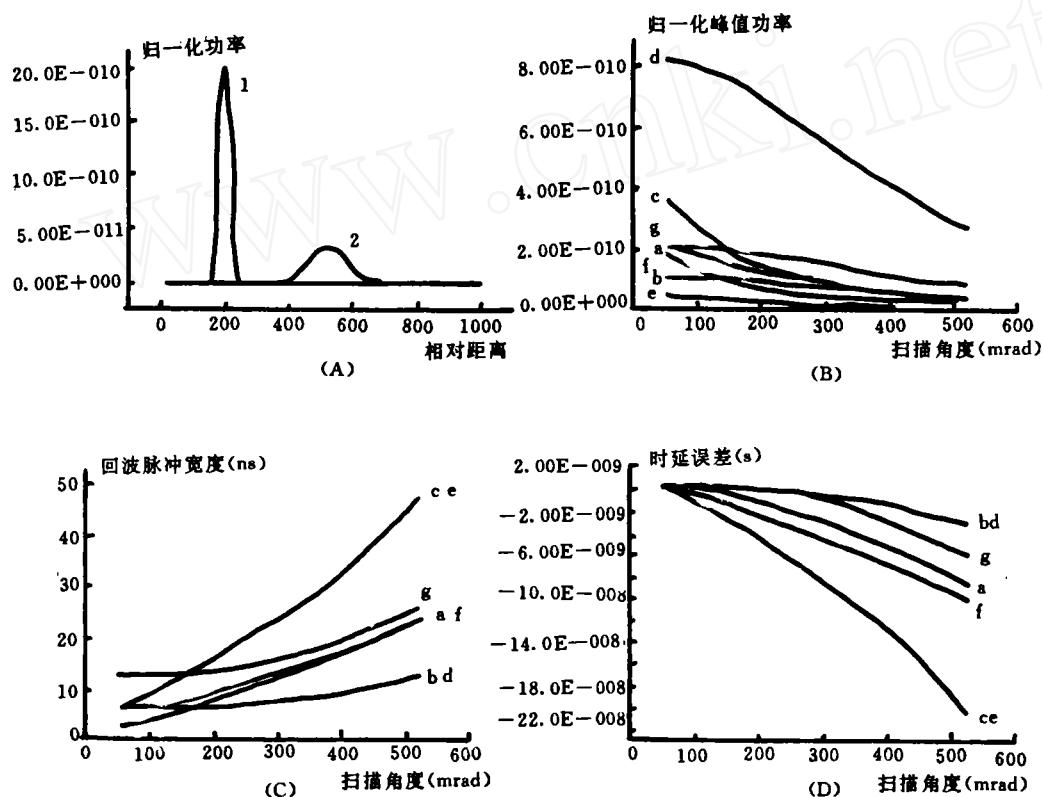


图 3 回波脉冲参数变化规律曲线

图 3 给出了由式(10)经过数值计算而得到的回波脉冲及其主要参数变化规律曲线,其中曲线 a-g 分别对应不同的 α 、 τ 、 H 值如下表所示,曲线 a 对应我们在某机载扫描测距系统中使用过的一个具体情况。从以上曲线中可以得到以下主要结果。

曲线	a	b	c	d	e	f	g
$\alpha(\text{mrad})$	1.5	0.75	3	1.5	1.5	1.5	1.5
$\tau(\text{ns})$	6	6	6	6	6	3	12
$H(\text{m})$	3000	3000	3000	1500	6000	3000	3000

① (A)图表示两种扫描角度情况下归一化的回波脉冲功率波形,是式(10)所示的积分号内的计算结果,曲线1对应的扫描角度为 0.05rad ,曲线2对应的扫描角度为 0.5rad ,通过拟合可以看出它们都是高斯型的,但脉冲幅度、宽度明显不一样。

② (B)图表示的是回波脉冲归一化峰值功率随扫描角度 Φ 的变化规律,从曲线看峰值功率随扫描角度的变化规律
(下转第 108 页)

取 $A=0.9$, $L=9210960\text{J/kg}$,
 $T_b=2467^\circ\text{C}$, 则由式(13)算得: $V=280\text{m/s}$ 。

3. 表面材料汽化层厚度

由(13)式可求得汽化层厚度 Z' 的公式:

$$Z' = \int_0^\tau V dt = \frac{Aq_0\tau}{\rho(cT_b + L)} \quad (14)$$

当 $\tau=30\text{ns}$, $q_0=10^9\text{W/cm}^2$ 时, 激光冲击
2024T62 铝合金表面的汽化层厚度可估算得:
 $Z'=8.4\mu\text{m}$

结 论

(1) 根据理论分析, 激光冲击强化能使金属材料表面温度在一纳秒之内升高到汽化温度, 急剧汽化膨胀的金属蒸汽发生爆炸, 从而产生激光能量支持的冲击波;

(2) 当用激光功率密度为 10^9W/cm^2 , 脉冲宽度为 30ns 的强激光冲击强化 2024T62 时,

(上接第 111 页)

率随着扫描角度的增大而减小, 不仅随 $\cos^2(\Phi)/H^2$ 变化, 而且功率变化趋势明显地依赖 α 的大小, 在 α 较大时, 功率随 Φ 的变化经很明显, 如图中曲线 c, 而功率随 Φ 的变化趋势与 τ 的关系不明显。

③ (C) 图表示回波脉冲宽度随 Φ 的变化规律, 回波脉冲宽度定义为回波前后沿半功率点之间的时间差, 当扫描角度增大时, 回波脉冲被展宽(展宽值为回波脉宽与发射脉宽之差), 对于曲线 a, Φ 增大 10 倍时脉冲宽度展宽近 3 倍, 由图中可得到其宽值与 α 、 H 的乘积近似成正比, 如曲线 c、e 和 b、d, 而与发射脉冲宽度 τ 几乎无关, 如由线 a、f、g。

④ (D) 图表示在任一个 Φ 的情况下, 回波脉冲相对于发射脉冲的时延与相同距离下、波束倾斜角度为 0 时的时延之差, 可以看出, 在以一定倾斜角度扫描时, 回波脉冲相对于发射脉冲的时延比垂直探测时要小, 对于曲线 a, $\Phi=0.5\text{rad}$ 时的时延误差达 -8ns , 亦即提前了 8ns , 回波时延误差也近似与 α 、 H 的乘积成正比, 而

其汽化层厚度达 $8.6\mu\text{m}$ 。因此, 欲对航空铝合金材料进行无损激光冲击处理, 保护工件表面, 则必须在工件待处理表面上进行涂层保护, 涂层厚度必须大于汽化深度;

(3) 由于激光冲击强化时间极短, 目前还不具备实际测出激光冲击温度场的条件。

参 考 文 献

- [1] 闫毓禾等编著,《高功率激光加工及其应用》,天津,天津科学技术出版社,1994,4
- [2] [苏]Ф.Ф.沃道瓦托夫等,《激光在工艺中的应用》,北京,机械工业出版社,1980,3
- [3] 余承业等编著,《特种加工新技术》,北京,国防工业出版社,1995,1
- [4] 王家金主编,《激光加工技术》,北京,中国计量出版社,1992,11

与发射脉冲宽度关系不大。

结 论

由以上分析可见, 在机载脉冲激光对地扫描时, 由于扫描倾角的变化, 回波脉冲参数也随之变化。脉冲宽度的展宽及其变化使得探测器的匹配滤波放大性能变坏而导致输出信噪比的降低, 脉冲峰值功率的起伏变化会给恒虚警探测带来影响, 回波时延误差的不确定性将导致时间或距离测量的误差增大。因此, 在进行一定的探测性能和测距指标的脉冲激光波束扫描探测器的设计时, 必须考虑这些因素, 在信号处理电路设计中采用相应对策。

参 考 文 献

- [1] R. Krawczyk et al., *Applied Optics*, 1993, 32, 20
- [2] Barry J. Rye et al., *J. Opt. Soc. Am.* 1990, A7, 12
- [3] Jack L. Bufton, *Proc. of the IEEE*, 1989, 77
- [4] 魏余灵等, 电子测量与仪器学报, 1997, 7, 3