

三维激光成像探测系统建模与仿真

闫小伟¹, 邓甲昊²

1. 中国电子科学研究院, 北京 100041

2. 北京理工大学机电学院, 北京 100081

摘要 激光成像探测系统仿真是评估现有激光成像系统的性能及开发新型激光成像探测技术的有效手段。研究激光脉冲回波信号特性并建立数学模型是应用回波信号检测技术处理回波, 进行激光成像系统仿真的关键。为此以激光发射脉冲模型为基础对激光脉冲回波信号的建模过程和基于单位冲激响应的目标散射特性建模方法作了详尽的推导和描述, 并建立检测算法模型, 最后依据目标成像模板采用单元回波探测线阵化方式进行了推帚式三维激光成像仿真。结果表明, 该仿真系统可实现不同探测条件下线阵推帚式激光成像的有效仿真。

关键词 激光成像; 线阵探测; 冲激响应; 建模; 仿真

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.28.003

Modelling and Simulation of 3D Laser Imaging Detection System

YAN Xiaowei¹, DENG Jiahao²

1. China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China

2. School of Mechatronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract Simulation is an effective method to evaluate the performances of existing laser imaging systems and to develop novel laser imaging detection technologies. The characteristics of laser pulse returned signals and the establishment of the related models are of vital importance for the echo signal processing and the laser imaging simulation. This paper studies the modelling procedure of the returned signals based on the laser transmitted pulse model, and the modelling method for target scattering properties based on the unit impulse response is discussed in detail, to develop detection algorithm models. The simulations of 3D laser imaging based on linear array scanning in the pushing-broom are carried out by means of arraying the single return detection. The results show that the laser imaging simulation can yield the simulated images effectively under a wide variety of conditions.

Keywords laser imaging; linear array detection; impulse response; modelling; simulation

0 引言

激光成像探测是通过激光束对目标进行照射, 目标的后向散射回波经光电成像探测器接收, 通过信号处理获取目标的距离信息和目标的反射强度信息, 进而获得区别于背景的目标距离图像和强度图像^[1]。与毫米波、红外等其他成像探测模式相比, 激光成像探测具有抗电磁干扰、抗隐身能力强, 距离、角度分辨率高, 目标识别能力突出等显著优点^[2]。基于上述优点, 国外发达国家纷纷开展激光成像探测技术的研究工作, 如瑞典国家防卫研究所(FOI)一直从事激光成像技术的研究工作^[3], 在系统建模仿真、目标识别等方面取得了丰厚的

研究成果。

激光成像探测系统仿真将有利于现有激光成像系统的性能评价以及新型激光成像探测技术的研究, 而且其三维成像仿真数据可作为评估激光图像处理和目标识别算法的有效手段。研究激光脉冲回波信号特性并建立数学模型是应用回波信号检测技术处理回波, 进行成像探测系统仿真, 生成目标三维激光图像的关键。为此本文以激光发射脉冲模型为基础对激光脉冲回波信号的建模过程及其影响因素和基于单位冲激响应的目标散射特性建模方法作了详尽的推导、分析和描述, 并建立回波信号检测算法模型, 根据目标仿真成

收稿日期: 2011-06-21; 修回日期: 2011-09-21

作者简介: 闫小伟, 工程师, 研究方向为电子信息系统设计、分析, 建模与评估, 电子信箱: gdgcyxw@163.com

像模板采用单元回波探测线阵化方式进行了推帚式三维激光成像仿真。

1 激光成像探测系统建模

激光成像系统主要由激光发射系统、成像接收系统、分析处理系统等组成^[4]。发射系统的功能是产生激光发射脉冲和确定出射采样图案,接收系统的功能是对与出射采样匹配的激光光束回波的探测与接收,处理系统的功能是对回波信号进行处理,获取回波峰值和目标距离测量值^[5]。本文依据实际激光成像系统的组成,从目标探测系统角度建立了激光成像探测系统模型,主要包括激光发射脉冲模型、脉冲回波信号模型、大气传输模型、回波检测算法模型和目标散射特性模型。探测系统组成如图1所示。本文将大气传输模型作为衰减因素归入回波信号模型中。

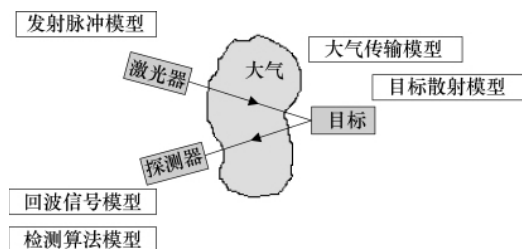


图1 激光成像探测系统组成

Fig. 1 Laser imaging detection system components

1.1 激光发射脉冲模型

建立激光发射脉冲模型是实现脉冲回波信号仿真的前提。激光发射脉冲在时间和空间上具有一定的能量分布,而且其能量的时空分布是相互独立的,激光发射脉冲模型可表示为

$$S_i(x, y, t) = I(x, y)P(t) \quad (1)$$

其中, $I(x, y)$ 为发射脉冲的空间能量分布; x, y 为光束截面横向尺寸; $P(t)$ 为发射脉冲的时间能量分布即脉冲波形。 $I(x, y)$ 模型^[6]为

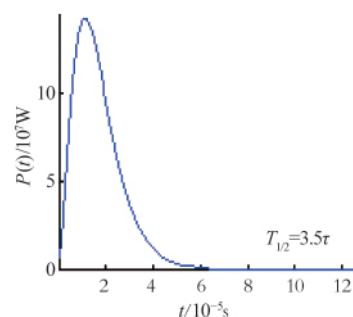
$$I(x, y) = \left(\frac{I_0}{R^2} \right) \exp \left[-2 \left(\frac{x}{R\alpha_x} \right)^{2G_x} - 2 \left(\frac{y}{R\alpha_y} \right)^{2G_y} \right] \quad (2)$$

其中, I_0 为发射脉冲能量; R 为探测距离; α_x, α_y 为激光束横向发散角; G_x, G_y 为超高斯因子, 取值大于等于1。当 $G_x = G_y = 1$ 时, 发射脉冲空间能量呈高斯分布。当 G_x, G_y 大于1时, 空间能量分布将更为集中, 因此通过调整 G_x, G_y 值可改变发射脉冲的空间能量分布。

式(1)中, $P(t)$ 模型^[7]为

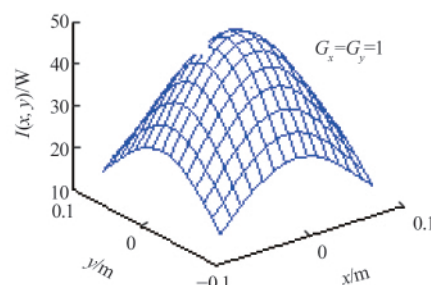
$$P(t) = (t/\tau)^n \exp(-t/\tau) \quad (3)$$

τ 为与脉宽 $T_{1/2}$ (Full Wave at Half Maximum, FWHM) 有关的时间特征参数, 当 $n=1$ 时 $T_{1/2}=3.5\tau$; 当 $n=2$ 时 $T_{1/2}=1.22\tau$ 。 n 取值较大时将获得更加尖锐且对称的发射脉冲波形, 其脉宽由 $T_{1/2}$ 调整。通常, 为了获得较高的测距精度, 脉宽 $T_{1/2}$ 取值应尽可能的小。激光发射脉冲时空能量归一化分布如图2所示。



(a) 时间能量归一化分布

(a) Temporal energy normalized distribution



(b) 空间能量归一化分布

(b) Spatial energy normalized distribution

图2 发射脉冲时空能量归一化分布

Fig. 2 Spatial and temporal energy normalized distribution of transmitted pulse

1.2 激光脉冲回波信号模型

激光发射脉冲 $S_i(x, y, t)$, 经过大气传输在目标表面发生散射, 其中一部分散射能量被探测器接收形成脉冲回波信号 $S_r(x, y, t)$ 。因此, 脉冲回波信号可以认为是发射脉冲受到大气传输效应和探测器探测性能等综合因素的影响并在后向散射作用下形成的。目标表面对激光发射脉冲的散射作用可描述为

$$S_1(x, y, t) = S_i(x, y, t) \otimes h(t) \quad (4)$$

其中, $\otimes$ 表示时间卷积运算, $h(t)$ 为目标表面的单位冲激响应, 该响应取决于目标表面的散射特性。另外, 由目标漫散射引起的相干斑现象会对回波脉冲产生影响, 即

$$S_2(x, y, t) = S_1(x, y, t) F_{\text{speckle}} \quad (5)$$

其中, 相干斑特性 F_{speckle} 由 Gamma 分布增值因子^[8]表示:

$$F_{\text{speckle}} \sim \Gamma(M, S_{av}/(D_{\text{rec}}/D_{\text{speckle}})) \quad (6)$$

其中, Γ 是 Gamma 分布增值因子 (密度因子) 的概率函数, S_{av} 为信号 S_1 的时域均值, D_{rec} 为探测器的孔径, D_{speckle} 为探测器上相干斑的平均直径。

激光成像探测系统是小视场探测, 即激光脚印相对与目标尺寸小的多, 此时激光探测器的探测性能由接收峰值功率因子^[9]描述为

$$F(t) = \frac{E_p}{2\tau} \exp(-2\sigma_{\text{atm}}R) \frac{D_{\text{rec}}^2}{R^2} \eta_{\text{sys}} \quad (7)$$

其中, E_p 为发射脉冲能量, η_{sys} 为系统效率, ψ_{atten} 为大气衰减系数, 可表示为^[10]

$$\psi_{\text{atten}} = \exp(-2R \cdot \sigma_{\text{aer}}) \quad (8)$$

其中, σ_{aer} 为气溶胶衰减, 表达式为

$$\sigma_{\text{aer}} = \frac{3.91}{V_d} \left(\frac{\lambda}{0.55} \right)^{-q} \quad (9)$$

其中, λ 为波长, V_d 为大气可见度, 变量 q 定义为

$$q = \begin{cases} 1.6 & V_d > 50\text{km} \\ 1.3 & 50\text{km} \geq V_d > 6\text{km} \\ 0.585 \cdot V_d^{0.33} & 6\text{km} \geq V_d \end{cases} \quad (10)$$

回波信号中引入探测器性能影响因素, 于是得

$$S_3(x, y, t) = S_2(x, y, t) F(t) \quad (11)$$

在激光探测系统中, 回波噪声 $n_{\text{NEP}}(t)$ 主要来源于探测器对信号的探测与放大环节, 并且近似满足高斯分布

$$n_{\text{NEP}}(t) \sim G(0, \sigma^2) \quad (12)$$

噪声通过噪声有效功率 (NEP) 来衡量, 而噪声有效功率可由高斯分布的标准偏差 σ 表示, 于是回波噪声有效功率为

$$NEP_{\text{total}} = \sqrt{\sigma_{\text{detector}}^2 + \sigma_{\text{ampl}}^2} \quad (13)$$

在 $S_3(x, y, t)$ 中加入回波噪声 $n_{\text{NEP}}(t)$, 最终得到激光脉冲回波信号模型为

$$\begin{aligned} S_r(x, y, t) &= S_3(x, y, t) + n_{\text{NEP}}(t) \\ &= [S_t(x, y, t) \otimes h(t)] F_{\text{speckle}}(t) + n_{\text{NEP}}(t) \end{aligned} \quad (14)$$

1.3 目标散射特性模型

本文用求解目标单位冲激响应 $h(t)$ 的方法建立目标散射特性模型, 因此目标后向散射回波信号可理解为目标对其入射脉冲信号的响应输出。

单位冲激函数 $\delta(t)$ 的能量在具有一定斜度的平面上被均匀散射, 在近散射点采样时刻 $n_c T$ 和远散射点采样时刻 $n_f T$ 之间形成该散射平面的单位冲激响应 $h(t)$, T 为采样周期。表达式为

$$h(t) = 4\pi\rho(x, y) \frac{\delta(t - kT)}{n_f - n_c + 1} \quad k = n_c, \dots, n_f \quad (15)$$

其中, $\rho(x, y)$ 为散射平面上各采样时刻点处的散射属性, 目标表面散射属性 $\rho(x, y)$ 可由双向反射分布函数 (BRDF)^[11] 描述为

$$\rho(x, y, \theta) = \frac{A}{\cos^6\theta} \exp\left(-\frac{\tan^2\theta}{s^2}\right) + B \cos^m\theta \quad (16)$$

式中第一项表示镜面反射分量, 第二项表示漫反射分量, A, B 为镜面反射和漫反射分量系数, θ 为光束入射角, s 为斜率均方根, 反映目标表面形貌特征, m 为描述漫反射分量的参数。

成像仿真中, 激光脚印 (本文为方形) 被均匀分区采样, 形成许多大小相同的采样区, 假设目标表面由许多小平面对组成, 每个采样区对应其中一个小平面。这也可理解为将激光发射脉冲分束, 各子光束分别照射在激光脚印的不同采样区内, 各子光束能量代表激光发射脉冲能量的一部分, 而且时间能量归一化分布与发射脉冲相同。这样, 通过累加激光脚印各采样区发射脉冲信号与对应目标散射面单位冲激响应

的卷积值, 可生成总的目标散射脉冲回波信号, 其表达式为

$$P_{\text{reflected}}(t) = \sum_{i=1}^{n_{\text{subs}}} I_i P(t) \otimes h_i(t) \quad (17)$$

其中, n_{subs} 为激光脚印采样区的个数, I_i 为第 i 个采样区的能量, $P(t)$ 为归一化激光发射脉冲波形, $h_i(t)$ 为各散射小平面的单位冲激响应。根据卷积分配律, 式 (17) 变换为

$$P_{\text{reflected}}(t) = P(t) \otimes \sum_{i=1}^{n_{\text{subs}}} I_i h_i(t) \quad (18)$$

于是求得单位冲激响应 $h(t)$ 为

$$h(t) = \sum_{i=1}^{n_{\text{subs}}} I_i h_i(t) \quad (19)$$

由于激光脚印各采样区能量值 I_i 及相应的单位冲激响应 $h_i(t)$ 不同, 各采样区回波的延时和峰值功率存在差异, 累加生成的激光脉冲回波信号表现出脉冲展宽、波形畸变、强度衰减等形态, 对激光脉冲发射信号与地物目标作用后的后向散射回波信号作了很好的仿真描述。

1.4 信号检测算法模型

信号检测算法用来从目标的散射回波中估计出目标的距离值。本文中激光成像仿真采用 3 种信号检测算法, 即峰值检测法、恒比定时检测法 (CFD)、匹配滤波法。

被估计的目标距离可以看作回波信号的函数^[9], 即

$$\hat{R}(x, y, z) = f(S_r(x, y, t)) \quad (20)$$

对于峰值检测法, 目标距离估计的计时起止参考点由脉冲信号的峰值点时刻确定 (c 为光速), 此时的距离估计为

$$\hat{R}_{\text{PD}} = f_{\text{PD}}(S_r(t)) = \frac{c}{2} - \arg\max_t S_r(t) - \hat{R}_{\text{PDoffset}} \quad (21)$$

对于恒比定时检测法, 计时起止参考点位于脉冲上升沿接近峰值功率处, 此时的距离估计为

$$\hat{R}_{\text{CFD}} = f_{\text{CFD}}(S_r(t)) = \frac{c}{2} - \text{sol}_t \left\{ S_r(t) = \frac{1}{2} \max_t S_r(t) \right\} - \hat{R}_{\text{CFDoffset}} \quad (22)$$

式中 $\text{sol}_t\{\cdot\}$ 表示满足等式 $S_r(t) = \frac{1}{2} \max_t S_r(t)$ 的 t 解。

对于匹配滤波法, 将输入与输出信号作相关运算, 计时起止参考点位于相关峰处, 此时的距离估计为

$$\hat{R}_{\text{MF}} = f_{\text{MF}}(S_r(t)) = \frac{c}{2} - \arg\max_t C(t) - \hat{R}_{\text{MFoffset}} \quad (23)$$

其中, $C(t) = S_r(t) \otimes S_r(-t)$ 。

将 3 种信号检测算法分别用于回波脉冲信号计时止点的检测, 结果如图 3 所示。

目标距离估计方程式 (21)~式 (23) 中的尾项表示目标距离估计的偏差项, 即将信号检测算法用于发射脉冲信号计时起点的检测, 由计时起点决定的距离估计初始值, 如式 (24)、式 (25)、式 (26) 所示。

$$\hat{R}_{\text{PDoffset}} = \frac{c}{2} - \arg\max_t S_r(t) \quad (24)$$

$$\hat{R}_{\text{CFDoffset}} = \frac{c}{2} - \text{sol}_t \left\{ S_r(t) = \frac{1}{2} \max_t S_r(t) \right\} \quad (25)$$

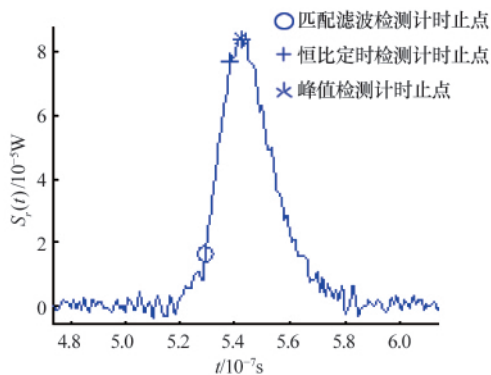


图3 回波脉冲信号计时止点

Fig. 3 Timing terminal point of echo pulse

$$\hat{R}_{M\text{offset}} = \frac{c}{2} - \arg\max_t S_i(t) \otimes S_i(-t) \quad (26)$$

2 激光成像探测系统仿真

2.1 成像仿真模板

为实现三维激光成像仿真,需要建立目标的 CAD 三维模型,再将其导入 Matlab 中转化为 Patches 模型(文中用 Matlab 进行系统仿真),通过 Patches 模型生成与成像视角相对应的具有较高分辨率(本文为 1cm×1cm)的激光图像仿真模板,模板表示了仿真系统可以成像的范围,反映了目标表面的几何特征,然后根据成像模板采用单元回波探测线阵化方式进行推帚式成像仿真,成像仿真模板如图 4 所示。

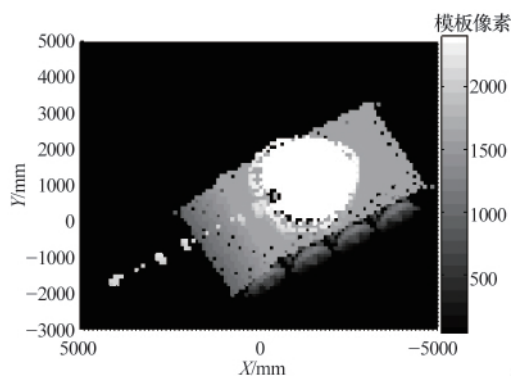


图4 激光成像仿真模板

Fig. 4 Laser imaging simulation template

图 4 中,右边的灰度标尺代表模板像素的高度值,像素越亮则高度值越大,像素越暗则高度值越小。由于 Patches 模型表面数据的不完整性,成像仿真模板中目标上出现了漏空像素。漏空像素在最终仿真图像上会有一定的体现,但不会影响到整体成像效果和成像系统性能评价。

2.2 仿真流程

在成像仿真之前,首先要选择成像仿真模板,不同的模板具有不同的成像视角。本文主要针对对弹载三维激光成像探测系统对目标进行近距俯视成像仿真。成像的方位角可任

意,俯角在 60°—90°之间。图 4 中方位角为 0°,俯角为 60°。然后通过设置弹体飞行高度(水平飞行)、速度、距离参数并结合发射脉冲模型中的光束发散角和脉冲重复频率参数,确定成像采样方案。最后设置仿真系统其他各模型参数,进行回波波形仿真和目标信息提取,进而实现基于激光线阵扫描的均匀或非均匀采样成像,并生成激光仿真图像。系统仿真流程如图 5 所示。

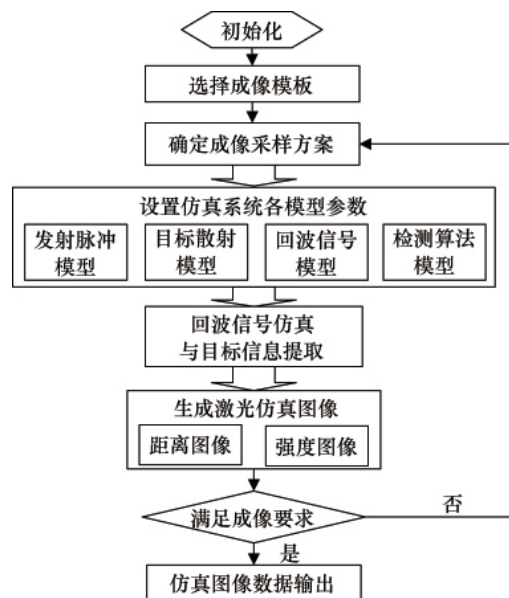


图5 激光成像探测系统仿真流程

Fig. 5 Simulation flow of laser imaging detection system

2.3 三维成像仿真

本文以图 4 中仿真模板为例进行线阵推帚式成像仿真。图 6 为激光成像探测系统仿真界面。为了获得均匀采样的激光仿真图像,在弹体飞行速度为 200m/s,飞行高度为 70m,飞行距离 5m,光束发散角为 0.2°时,发射脉冲重复频率必须为 708Hz,过大或过小的脉冲重复频率将获得非均匀采样的激光仿真图像。其他系统模型参数设置如图 5 所示,此时获得的激光图像像素数为 17×35,即线阵推帚扫描线数为 17,每行扫描线包含 35 个像素,成像结果如图 7 所示。

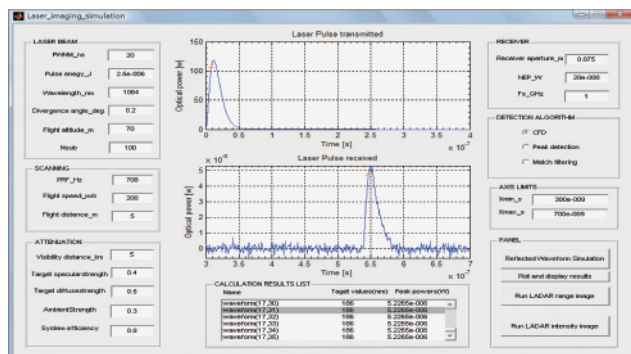


图6 激光成像探测系统仿真界面

Fig. 6 Simulation interface of the laser imaging detection system

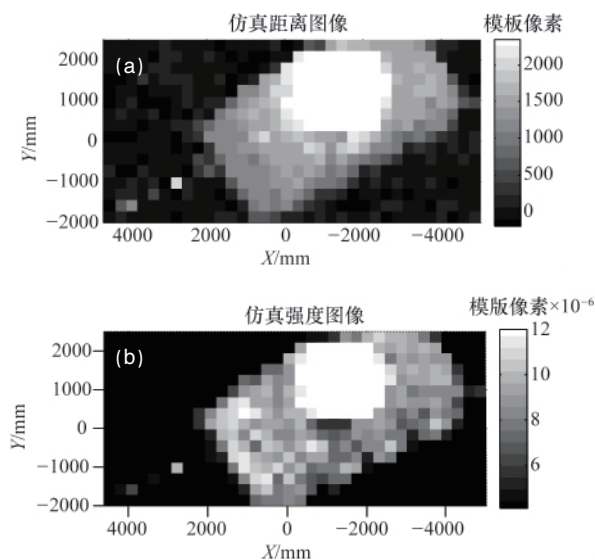


图 7 激光仿真图像
Fig. 7 Laser simulation image

激光仿真图像中的像素大小代表激光脚印的大小,像素的灰度代表成像数据值的大小。在仿真距离像中,目标的灰度层次分明,较好地反映了目标高度值的变化,而在仿真强度像中,目标强度值分布比较散乱,但是目标轮廓清晰可辨。

这很好地反映了由目标散射特性、检测误差和噪声等因素引起的目标回波强度的变化,突显了目标与背景的差异。

另外,增加激光脚印采样区的个数 N_{sub} 和系统采样频率 F_s ,会提高回波信号仿真精度和测距分辨率,从而改善仿真图像的成像效果。但是过高的 N_{sub} 和 F_s 值将降低系统的仿真效率。

3 结论

本文依据实际激光成像系统的组成,从目标探测系统角度建立了三维激光成像探测仿真系统,该系统可实现回波信号的精确仿真和线阵推扫式三维激光成像仿真,生成激光仿真距离和强度图像。激光仿真图像对激光成像探测效果进行了有效描述,这为采用线阵探测器的推扫扫描成像探测技术

的研究与开发提供了支持。另外,目标的 Patches 模型将作为该类型目标识别的匹配参考模型存入模型库,其成像仿真数据可用于目标识别算法的性能评估。

参考文献 (References)

- [1] 孙志慧, 邓甲昊. 国外激光成像探测系统的发展现状及其关键技术[J]. 科技导报, 2008, 26(3): 74-79.
Sun Zhihui, Deng Jiahao. *Science and Technology Review*, 2008, 26(3): 74-79.
- [2] 韩绍坤. 激光成像雷达技术及其发展趋势 [J]. 光学技术, 2006, 32(S): 494-496.
Han Shaokun. *Optical Technique*, 2006, 32(S): 494-496.
- [3] Steinvall O, Kiasen L, Gronwall C. 3D laser sensing at FOI-Overview and system perspective[C]. Laser Radar Technology and Applications IX. Orlando, FL, USA, Apr 12, 2004.
- [4] 张英远, 刘劲松, 李东源. 用于对空探测的激光成像雷达设计[J]. 光电工程, 2008, 35(1): 36-39.
Zhang Yingyuan, Liu Jinsong, Li Dongyuan. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(1): 36-39.
- [5] 陈育伟, 张立, 胡以华. 对地观测激光成像的回波阵列探测技术[J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(3): 169-175.
Chen Yuwei, Zhang Li, Hu Yihuan. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2004, 23(3): 169-175.
- [6] Carlsson T, Steinvall O, Letalick D. Signature simulation and signal analysis for 3-D laser radar [R]. Sweden: Swedish Defence Research Agency, 2001.
- [7] Steinvall O, Chevalier T, Larsson H. Data collection and simulation of high range resolution laser radar for surface mine detection [C]. Laser Radar Technology and Applications XI. Orlando, FL, USA, April 19, 2006.
- [8] Goodman J W A. Random walk through the filed of speckle [J]. *Optical Engineering*, 1986, 25(5): 610-612.
- [9] Gronwall C, Steinvall O, Gustafsson F, *et al.* Influence of laser radar sensor parameters on range-measurement and shape-fitting uncertainties [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(10): 101-111.
- [10] Steinvall O. Waveform simulation for 3-d sensing laser radars[R]. Sweden: Div of Sensor Technology, Defence Research Establishment, 2000.
- [11] Steinvall O. Effects of target shape and reflection on laser radar cross sections[J]. *Appl Opt*, 2000, 39(24): 4381-4391.

(责任编辑 岳臣)

·科学共同体介绍·

中国古生物学会

1927年,中国留德古生物学者**孙云铸**、**杨钟健**磋商成立中国古生物学会。1929年8月31日,**孙云铸**、**杨钟健**等10名中国古生物学家在北平召开中国古生物学会创立大会,推选**孙云铸**任会长。经**杨钟健**倡议,1947年12月25日在南京中央研究院地质研究所召开中国古生物学会复活大会,登记会员47人。1956年6月16-18日,中国古生物学会在北京召开第一次全国会员代表大会,

通过了新会章,选举了新理事会,推选**杨钟健**为理事长,**王鸿祯**为秘书长。

中国古生物学会(Palaeontological Society of China)是中国古生物科学技术工作者跨行业、跨部门自愿结合、依法登记成立,具有公益性、科学性、非营利性的法人社会团体,是中国科学技术协会的组成部分。

中国古生物学会目前有2500多名会员。下设微体古生物学会、孢粉学会、古脊椎

动物学会、古植物学会、化石藻专业委员会、介形类专业委员会、古生态专业委员会。出版《古生物学报》。设立尹赞勋地层古生物学奖励基金。1979年7月加入国际古生物协会。

2009年10月14日,中国古生物学会在南京召开第10次全国会员代表大会,选举**杨群**为第10届理事会理事长,**周忠和**、**季强**、**董金南**、**孙革**为副理事长,**王永栋**为秘书长。

(责任编辑 陈广仁)