

## 空间在轨激光成像雷达指标优选宏模型

李荣华<sup>1,2</sup>, 温帅方<sup>1</sup>, 肖余之<sup>2</sup>, 李金明<sup>1</sup>

(1. 大连交通大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116023;

2. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109)

**摘要:** 凝视成像激光雷达技术是空间非合作目标位姿测量重要手段。激光雷达指标选取极大影响航天器载荷, 优化选取激光雷达指标, 使之既能满足空间任务需求, 又能有效减少航天器载荷, 减少能源消耗, 意义重大。传统解决此问题的方法是通过经验选取, 激光雷达指标与目标属性相容性宏模型的提出, 可以为激光雷达激光输出功率、分辨率、视场角和测距精度四项指标选取提供理论依据。具体的, 利用目标尺度和雷达目标距离计算雷达分辨率和视场角初值, 对雷达最大可测距离进行迭代求解, 为优化激光雷达发射功率提供依据。充分利用深度共生矩阵二阶参数迭代优化, 确定雷达最优分辨率和视场角。最后, 通过点云配准算法迭代得出测量该目标的合适的测距精度。实验结果表明, 激光雷达宏模型优化选取的雷达指标满足雷达指标选择的需求。

**关键词:** 激光雷达指标; 优化选取; 目标属性; 宏模型; 迭代

**中图分类号:** TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0230003

## Indexes optimization macro model of on-orbit imaging lidar in space

Li Ronghua<sup>1,2</sup>, Wen Shuaifang<sup>1</sup>, Xiao Yuzhi<sup>2</sup>, Li Jinming<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116023, China;

2. Aerospace System Engineering Shanghai, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** The staring imaging lidar, whose indexes selection influences the load of spacecrafts seriously, is an important method for the pose measurement of non-cooperation target in space. Selecting the indexes of lidar reasonable is significant, opposite to the traditional method by experience, making it not only satisfy the demands of space mission, but also effectively reduce the load of spacecrafts and energy consumption. Macro model for compatibility between indexes of on-orbit lidar and attribute of target was proposed to provide a theoretical basis for indexes selection of lidar. Four indexes included lidar output power, lidar resolution, lidar field angle and lidar ranging precision. The processes were as follows. The initial values of the lidar resolution and field angle can be calculated by the scale of the target and distance between lidar and target. The transmitting power can be acquired by iterating the maximum

收稿日期: 2017-08-10; 修订日期: 2017-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(51505059); 上海航天科技创新基金(SAST 基金)(SAST2016016); 辽宁省自然科学基金(201602121)

作者简介: 李荣华(1983-), 男, 副教授, 博士, 主要从事非合作目标三维位姿测量技术等方面的研究。

Email: lironghua705@163.com

measurement distance. The reasonable resolution and field angle can be measured by iterating the second order parameters of the target surface depth co-occurrence matrix. The ranging precision of the lidar can be acquired by iterating the result of the point clouds registration algorithm. The experimental result of lidar indexes selection shows that proposed model can satisfy the requirement for the lidar parameters optimal selection.

**Key words:** indexes of lidar; optimal selection; attribute of target; macro model; iteration

## 0 引言

近年来,以卫星维修、寿命延长及垃圾清理为目的在轨服务技术成为航天高技术领域的研究热点,而空间非合作目标的相对位姿测量是其关键技术之一<sup>[1]</sup>。激光雷达具备抗干扰、受光照影响小等优势,是空间目标相对位姿测量最为理想的工具<sup>[2]</sup>。应用激光雷达对空间非合作目标进行位姿测量尚处于地面验证阶段,至今没有国家实现在轨验证。针对空间在轨激光雷达,保守或过度的指标选择都将对在轨系统产生极其不良的影响。因此,解决激光雷达的指标优化选择问题对于实现激光雷达的空间非合作目标位姿测量具有重要意义。

由于被测目标运动形式难以预测,只有单次快速测量才能够保证测量精度,凝视型成像激光雷达<sup>[3]</sup>凭借其“瞬时”成像的特点成为空间非合作目标三维位姿测量最为理想的类型。文中通过对凝视成像激光雷达工作原理和目标特性的研究,提出了激光成像雷达指标与目标属性相容性迭代宏模型,旨在解决此问题。所谓激光雷达指标与目标属性相容性迭代宏模型,是将激光雷达指标、目标属性和参数初值三类参数之间建立相互联系的关系模型,其仅考虑模型参数之间的输入输出特性,使结构复杂程度明显降低,它的输入参数为目标属性和参数初值,输出参数为凝视成像激光雷达发射功率、分辨率、视场角和测距精度四项性能指标。

激光雷达在工程领域中已经得到广泛的应用。郝刚涛<sup>[4]</sup>通过单目相机与无扫描激光雷达相融合的手段对非合作目标进行了三维位姿测量,其算法有较高的精度和鲁棒性。林祥国<sup>[5]</sup>利用机载激光雷达对电力线进行了三维重建,实现了自动、高精度、正确的重建长距离架空输电线走廊电力线三维模型。

刘玉<sup>[6]</sup>等对基于激光雷达的航天器相对位姿测量技术进行了研究,研究表明:基于激光雷达的航天器相对位姿测量技术方法合理可行,测量精度高。周琴<sup>[7]</sup>等对凝视成像激光雷达的噪声模型进行了分析,建立了三维成像噪声模型,给出了测距误差最小意义下的最优增益距离调制函数。尽管如此,由于地面应用中雷达指标对搭载器载荷影响较小,激光雷达的指标合理选择问题至今还没有人进行理论性研究。文中针对激光雷达指标合理选择问题,提出激光雷达指标与目标属性相容性迭代宏模型,为激光雷达的指标合理选择提供理论依据。

通过建立激光雷达指标与目标属性之间的联系,文中对空间在轨激光雷达对航天器载荷影响最大的四个指标:发射功率、分辨率、视场角和测距精度四个指标进行了优化选取,即在满足测量要求的前提下,选取经济性指标最好的激光雷达指标。其中,低激光输出功率、低分辨率和低测距精度表示经济指标更好。首先根据单个像素在目标位置的宽度、目标尺度和雷达与目标距离得出雷达分辨率和视场角初值。其次,通过激光雷达距离方程计算出雷达的最大可测距离,若目标与雷达距离较远不可测,则增加发射功率,迭代得出最佳发射功率。然后,通过测量点云的深度共生矩阵二阶参数的比对迭代得出满足三维位姿测量要求的合理分辨率,确定测量目标所需分辨率和视场角。最后,通过建立目标坐标系下点云和世界坐标系下点云进行配准迭代验证出雷达的合理测距精度。

## 1 激光雷达宏模型的建立方法

模型所涉及的凝视成像激光雷达指标、目标属性和模型参数初值如表1所示。模型中,输入目标属性和参数初值,输出激光雷达指标。

表 1 宏模型参数

Tab.1 Parameters of macro model

Indexes of lidar		Attribute of target		Initial value of model	
Resolution of lidar	$m \times n$	Reflectivity of target	$\rho_r$	Cross sectional area of beam	$A_r$
Output power of laser	$P_T$	Scale of target	$M \times N$	Pixel width of lidar on target	$t$
Field angle of lidar	$\varphi_x, \varphi_y$	Texture parameter of target surface		Efficiency of receiving device	$\eta_r$
Ranging precision of lidar		3D point clouds of target		Effective receiving area	$A_r$
		Range between lidar and target	$R$		
		Minimum power received by lidar	$P_{\min}$		

1.1 雷达发射参数的计算

凝视激光雷达发射参数的计算结果可以得出雷达的分辨率和视场角的初值。

设目标被照射部分在发射光束横截面方向的投影的外接矩形的长×宽为 $M \times N$ , 即  $A_s = M \times N$ , 定义  $[a]$  为不大于  $a$  的最大整数。探测目标所需的激光雷达分辨率为  $m \times n$ , 单个像素在目标位置所代表的宽度为  $t$ , 如图 1 所示。

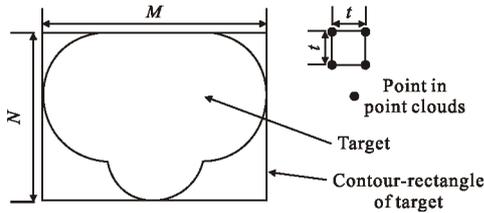


图 1 点云面阵确定示意图

Fig.1 Schematic diagram of point clouds array determination

则雷达分辨率初值为:

$$m = \left[ \frac{N}{t} \right] + 1$$

$$n = \left[ \frac{M}{t} \right] + 1 \quad (1)$$

若激光雷达分辨率为  $m \times n$ , 像素宽度为  $t$ , 则视场的长宽  $L \times H$  为:

$$L = m \cdot t$$

$$H = n \cdot t \quad (2)$$

由预估雷达与目标距离  $R$  可得, 激光雷达成像视场角  $\varphi_x \times \varphi_y$  为:

$$\varphi_x = 2 \arctan \left( \frac{L}{2R} \right)$$

$$\varphi_y = 2 \arctan \left( \frac{H}{2R} \right) \quad (3)$$

1.2 目标的可测性检验

目标的可测性检验是通过对比雷达最大可测距

离和目标距雷达实际距离迭代得出最优的雷达发射功率。

通过激光发射参数和模型的初值参数, 可以得到激光雷达距离方程的参数, 通过距离方程迭代雷达最大可测距离, 可以得出理想的雷达激光发射功率。

由于激光雷达发射机的发散角通常为 mrad 量级<sup>[8]</sup>, 目标对接收机而言可以看作小面元。假设目标与激光雷达的距离为  $R$ , 目标被照射部分在发射激光光束横截面方向的投影面积为  $A_r$ , 目标处的激光光束横截面积为  $A_t$ , 目标的法向为  $O-N$ , 发射机的发射光学系统光轴与目标法向  $O-N$  的夹角为  $\theta$ 。

假设发射机输出的激光功率为  $P_T$ , 目标的反射率为  $\rho_r$ , 接收机的有效接收面积为  $A_r$ , 接收光学系统的效率为  $\eta_r$ , 则激光雷达距离方程的一般形式为:

$$P_r = \frac{\eta_r \rho_r P_T A_r A_t \cos \theta}{\pi R^2 A_t} \quad (4)$$

由公式(4)可知激光雷达可接收的最小功率  $P_{\min}$  对应着最大的可测距离, 则可知激光雷达最大可测距离  $R_m$  为:

$$R_m = \sqrt{\frac{\eta_r \rho_r P_T A_r A_t \cos \theta}{P_{\min} \pi A_t}} \quad (5)$$

预估激光雷达与目标的距离为  $R$ , 则将  $R$  与  $R_m$  进行比较, 若  $R > R_m$ , 则说明激光发射功率不够大, 不能满足测量需求, 需增加雷达发射功率使激光雷达能够测量目标, 重新迭代, 直至  $R_m \geq R$  时迭代结束, 输出雷达功率。

1.3 目标表面纹理特征的验证

通过公式(1)可以求出激光雷达的分辨率初值, 但尚不能确认该分辨率是否能够测量目标表面的纹理特征, 通过纹理特征的验证可以确定合理的雷达

分辨率。

### 1.3.1 目标深度信息的求取

激光雷达测量目标时, 雷达发射器和目标表面任意被测点位置关系如图 2 所示。

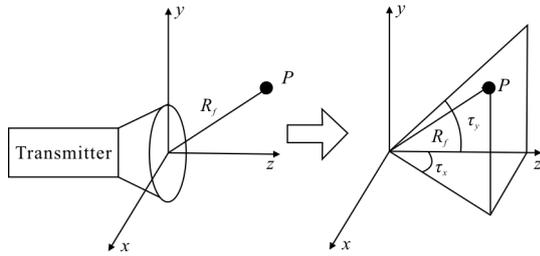


图 2 激光雷达点云坐标

Fig.2 Point clouds coordinate of lidar

由图可知,  $xyz$  为激光雷达坐标系,  $R_f$  为激光雷达测量距离, 激光雷达测量点云深度值为  $z$ , 则深度值的求解如下:

$$z = \frac{R_f}{\sqrt{\tan^2 \tau_x + \tan^2 \tau_y + 1}} \quad (6)$$

### 1.3.2 目标三维点云数据的计算

深度信息和三维坐标的关系如图 3 所示<sup>[9]</sup>。

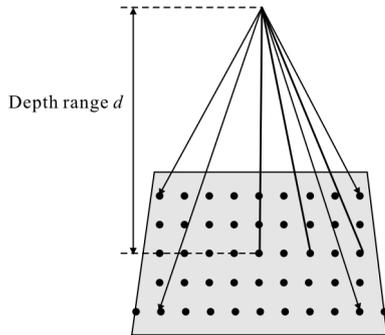


图 3 深度信息和三维点云的关系

Fig.3 Relationship between depth and 3D point clouds

二者的数学关系如公式(7)所示。

$$\begin{aligned} x_w &= \tan \left[ \left( \frac{u-n/2}{n/2} \right) \cdot \frac{\varphi_x}{2} \right] \cdot z \\ y_w &= \tan \left[ \left( \frac{v-m/2}{m/2} \right) \cdot \frac{\varphi_y}{2} \right] \cdot z \\ z_w &= z \end{aligned} \quad (7)$$

### 1.3.3 深度共生矩阵理论

激光雷达扫描面阵为深度值的集合, 深度值表达了目标物体表面的形态, 则可以通过点云中深度值的变化来描述目标表面形态。

为描述这种深度值的变化, 文中在灰度共生矩阵<sup>[10]</sup>的基础上, 提出了深度共生矩阵的理念。

深度共生矩阵是灰度共生矩阵的变形, 由深度值代替像素的灰度级, 从而通过分析生成矩阵的特征参数, 获得目标表面复杂程度的量化方法。

在深度图像中, 任意取一点  $(x, y)$  以及偏离它的另一点  $(x+a, y+b)$  形成一个点对, 如图 4 所示。设该点对的深度值为  $(i, j)$ , 即点  $(x, y)$  的深度值为  $i$ , 点  $(x+a, y+b)$  的为  $j$ 。固定  $a$  和  $b$ , 令点  $(x, y)$  在整幅图像上移动, 则会得到各种  $(i, j)$  值。

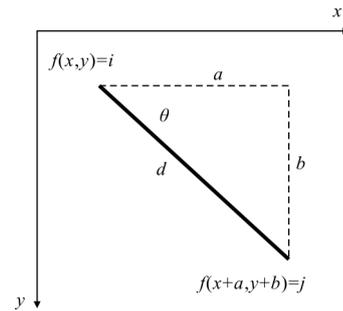


图 4 矩阵节点意义分析图

Fig.4 Analysis diagram of matrix elements significance

在计算空间深度共生矩阵时, 在不影响纹理特征的前提下往往先将原影像的深度级压缩到较小的范围。

在分级时, 每一级的区间大小相等。设深度最大值为  $\max$ , 最小值为  $\min$ , 级数为  $L$ , 区间大小为  $n$ , 则有:

$$L = \frac{\max - \min}{n} \quad (8)$$

在整幅图像中遍历像素点, 获取深度值, 统计每一种深度值出现的频度为  $P(i, j, d, \theta)$  组成方阵  $[P(i, j, d, \theta)]_{L \times L}$  为深度共生矩阵, 即  $W = [P(i, j, d, \theta)]_{L \times L}$ 。深度共生矩阵本质上就是两个激光像素点的联合直方图, 距离差分值  $(a, b)$  取不同的数值组合, 都可以得到图像沿一定方向  $\theta$ 、相隔一定距离  $d = \sqrt{a^2 + b^2}$  的深度共生矩阵。

其数学表达为:

$P(i, j, d, \theta) = \{[(x, y), (x+a, y+b)] | f(x, y) = i; f(x+a, y+b) = j\}$  (9)  
式中:  $\theta$  为深度共生矩阵的生成方向, 通常取  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $135^\circ$  四个方向。

通过深度共生矩阵可以分析图像的局部模式和排列规则等, 但一般并不直接应用得到的共生矩阵, 而是在其基础上获取二次统计量。在获取深度共生矩阵的特征参数之前, 要作正规化处理。令

$$p(i\ j,d,\theta)=P(i\ j,d,\theta)/R_a \quad (10)$$

式中： $R_a$  为正规化常数，是深度共生矩阵中全部元素之和。

深度共生矩阵的二次统计量包括：

$$\text{能量 } W_1 = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L p^2(i\ j,d,\theta)$$

能量是深度共生矩阵各元素平方和，它是深度值变换均匀性的度量，反映了深度值分布均匀程度。如果  $P(i\ j,d,\theta)$  元素值相近， $W_1$  就小，目标表面纹理越细致，反之亦然。

$$\text{熵 } W_2 = - \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L p(i\ j,d,\theta) \times \log_{10} p(i\ j,d,\theta)$$

熵值在一定程度上反应了纹理的复杂程度，纹理越复杂，熵越大。

$$\text{对比度(对角线惯性矩) } W_3 = - \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L [(i-j)^2 \times p^2(i\ j,d,\theta)]$$

$W_3$  度量了矩阵值的分布情况和图像的局部变化。从数学角度看， $W$  阵元素远离对角线将导致  $(i-j)^2$  变大， $W_3$  也随之变大， $W_3$  变大表示深度基元对比越强烈，沟纹越深，物体表面复杂程度高。

$$\text{逆差矩 } W_4 = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L p(i\ j,d,\theta) / [1+(i-j)^2]$$

逆差矩又称为局部平稳，它是图像纹理局部变化的度量，反映了纹理的规则程度。纹理越规则， $W_4$  就越大，反之亦然。

### 1.3.4 分辨率的判定条件

在判断当前分辨率是否有效时，需综合运用四种统计量共同判断表面纹理特征，进而判断该分辨率能否有效测量具备该纹理特征的目标。

$$\left| \frac{W-|W|}{|W|} \right| \leq \varepsilon \quad (11)$$

式中： $W$  为当前分辨率下共生矩阵统计量； $|W|$  为统计量阈值，通过给定的特大面阵产生； $\varepsilon$  为给定临界值。

### 1.4 点云位姿精度的验证

目标表面复杂度验证后，需要通过点云配准来迭代得出合适的雷达测距精度。

#### 1.4.1 目标坐标系下的点云生成

目标坐标系下点云为目标 CAD 模型离散化后的致密点云，通常点云数量较多，通过 STEP 模型或 Pro/E 模型即可得到目标坐标系下的点云。

#### 1.4.2 世界坐标系下的点云生成

世界坐标系下的点云理论上为雷达实测点云，在模型中，可以通过模拟得出，该模拟过程大致分为三步：

(1) 通过世界坐标系与目标坐标系的相对位姿真值，把目标坐标系下的点云数据转换成世界坐标系下的点云数据。

(2) 以坐标系原点为零点，以点云中各点为终点得出  $n(n=1,2,3\cdots)$  个向量。将这些向量进行归类，设定阈值，对在阈值范围内同方向的向量规定为一类。

(3) 在同方向的向量中，保留可视部位向量，去除被遮住的远距离向量，每组得出的最后向量即为可视向量，其三维坐标即为可视部位点云坐标，也即是世界坐标系下点云坐标。

#### 1.4.3 点云配准算法

在模型中，用迭代最近点算法 (iterative closest point, ICP) 即 ICP 算法来对两组点云进行配准。

ICP 算法<sup>[1]</sup>实质上是基于最小二乘法的最优匹配方法，它重复进行“确定对应关系点集-计算最优刚体变换”的过程，直到某个表示正确匹配的收敛准则得到了满足。

通过 ICP 算法，将目标坐标系下点云和世界坐标系下点云进行配准，得到旋转矩阵  $R_1$  和移动矩阵  $T_1$ ，进而可以得出配准得到的位置数据  $x_1, y_1, z_1$  和姿态数据  $roll_1, pitch_1, yaw_1$ 。将测量值与标准值进行比对可以得到误差，若误差在允许范围内，即满足公式(12)，则雷达测距精度合适，得到该雷达测距精度，若误差过大，则返回之前的步骤减小点云噪声，重新进行位姿解算，迭代至合格为止。

$$|x_1-x| \leq 0.1\text{ m}; |y_1-y| \leq 0.1\text{ m}; |z_1-z| \leq 0.1\text{ m}$$

$$|roll_1-roll| \leq 1^\circ; |pitch_1-pitch| \leq 1^\circ; |yaw_1-yaw| \leq 1^\circ \quad (12)$$

式中： $x, y, z, roll, pitch, yaw$  为位姿真值。

## 2 模型验证实验

宏模型建立后需通过实验验证其可靠性，文中基于 VC++2010 编译环境对宏模型进行了算法实现，在此基础上，针对具有复杂表面的目标的 10 个测量角度进行了模型的验证。

### 2.1 模型参数初值的确定

通过相关文献查阅，模型的参数初值确定如表 2 所示<sup>[2]</sup>。

表 2 宏模型参数初值

Tab.2 Initial parameters of macro model

Parameter	Symbol	Initial value
Efficiency of receiving device	$\eta_r$	0.7
Output power of laser	$P_r$	10 W
Effective receiving area	$A_r$	0.001 m <sup>2</sup>
Angle between optical axis and target surface normal	$\theta$	0°
Minimum power received by lidar	$P_{\min}$	1 $\mu$ W
Pixel width of lidar on target	$t$	40 mm

### 2.2 目标属性的确定

目标三维 CAD 模型如图 5(a)所示,设坐标系  $O_0-X_0Y_0Z_0$  为目标坐标系,将其离散化后模型点云如图 5(b)所示,其坐标为世界坐标系下的点云坐标。

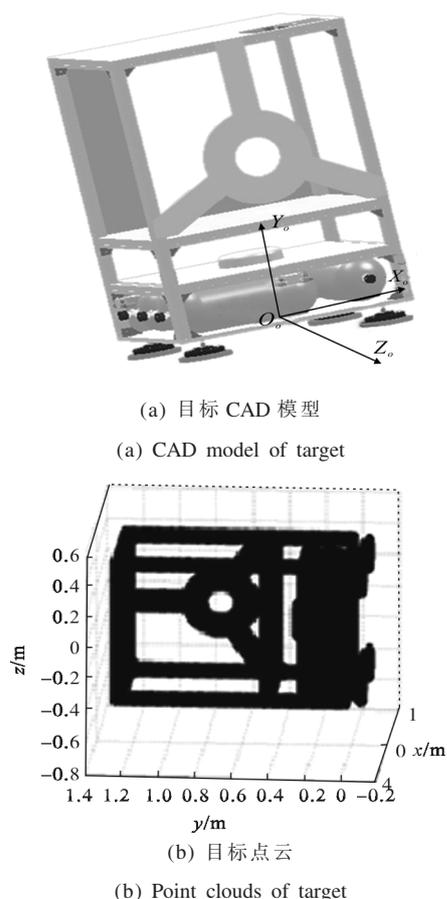
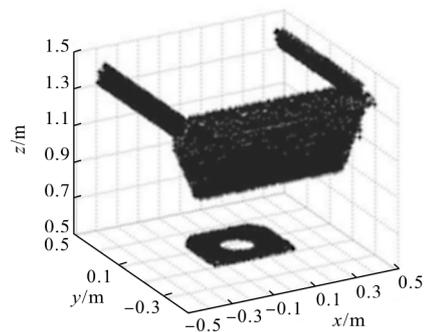


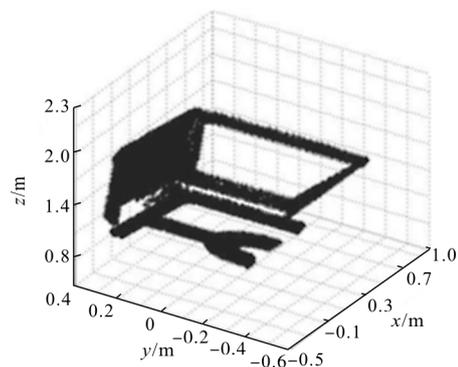
图 5 目标三维 CAD 模型及离散化点云

Fig.5 3D CAD model and discretization point clouds of target

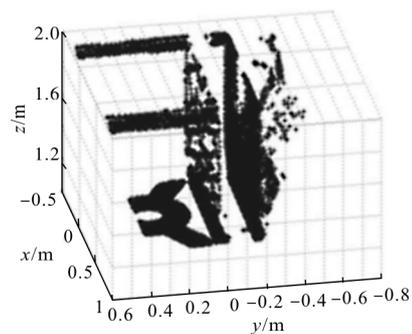
在实验中定义激光雷达系统与目标之间的距离为 5 m,以此可以仿真得出 10 个不同角度模拟测量点云,如图 6 所示。对应的点云位姿数据如表 3 所示。



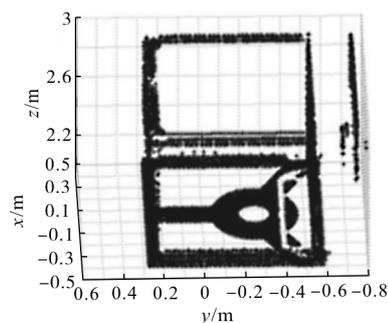
(a) 第一组点云  
(a) 1st point clouds



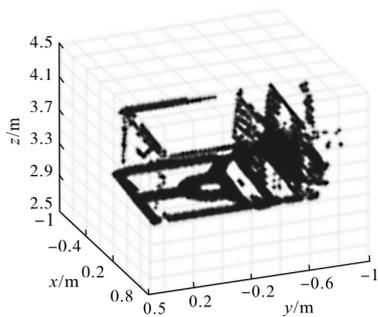
(b) 第二组点云  
(b) 2nd point clouds



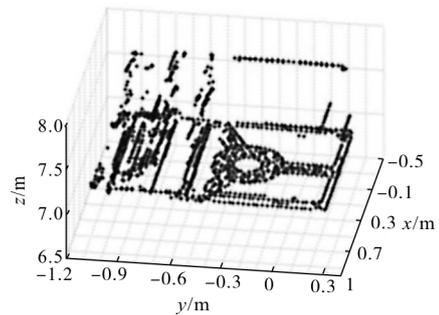
(c) 第三组点云  
(c) 3rd point clouds



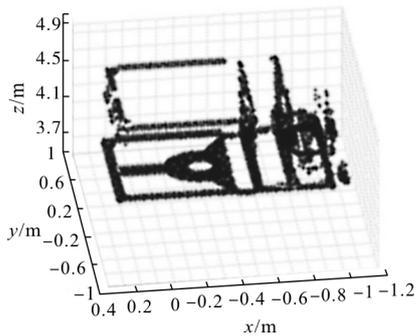
(d) 第四组点云  
(d) 4th point clouds



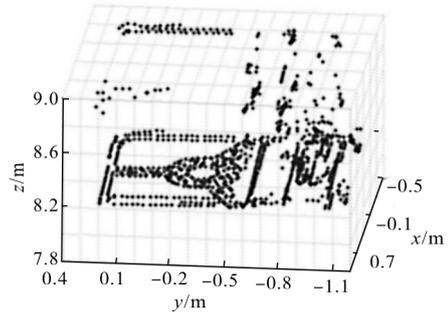
(e) 第五组点云  
(e) 5th point clouds



(i) 第九组点云  
(i) 9th point clouds



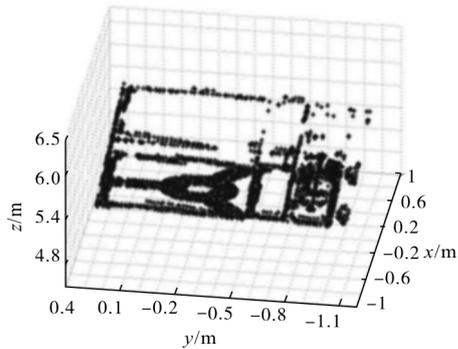
(f) 第六组点云  
(f) 6th point clouds



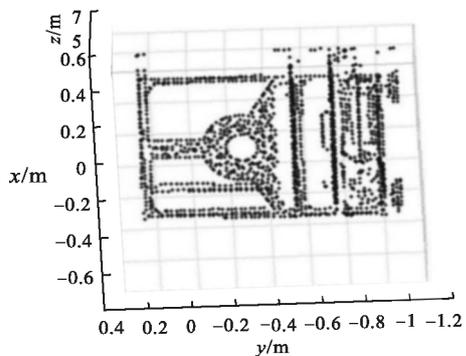
(j) 第十组点云  
(j) 10th point clouds

图 6 测量点云

Fig. 6 Measurement point clouds



(g) 第七组点云  
(g) 7th point clouds



(h) 第八组点云  
(h) 8th point clouds

实验选用的世界坐标系与激光雷达坐标系重合。世界坐标系与激光雷达坐标系取相同位置，其中  $O_w-X_wY_wZ_w$  为世界坐标系。

表 3 点云位姿数据

Tab.3 Pose data of point clouds

Group No.	x/m	y/m	z/m	Pitch/(°)	Pitch/(°)	Roll/(°)
1	0	-0.75	1	0	0	0
2	0	-0.5	1.5	0	10	0
3	0	-1	1.5	-1	-5	-1
4	0	-1	2.5	0	0	0
5	0	-1	3.5	0	10	0
6	0	-1	4.5	0	0	0
7	0	-1	5.5	5	7	3
8	0	-1	6.5	-1	5	-1
9	0.3	-1	7.5	-1	5	-1
10	0.05	-1	8.5	-1	5	-1

### 2.3 模型结果

针对实验模型,宏模型计算出的雷达指标如表 4

第二列所示。在之前的激光雷达测量目标时,通常采用经验估算的方式选择激光雷达指标,针对该目标,参考文献[6]的研究小组做了若干组实验,经验指标值如表 4 第三列所示。

表 4 宏模型计算值和指标经验值

Tab.4 Calculating value of macro model and empirical value of indicator

Indexes	Calculated value	Empirical value
Output power of laser/W	14	20
Resolution of lidar	36 (h)×49 (v)	42 (h)×57(v)
Field angle of lidar	12.3°(h)×16.6°(v)	12°(h)×16°(v)
Ranging precision of lidar/mm	5	1

由表可知,宏模型计算得到的凝视成像激光雷达指标与雷达测量经验值基本相近,甚至经济指标更好。因此,文中提出的激光雷达宏模型可以对凝视成像激光雷达发射功率、雷达分辨率、雷达视场角和雷达测距精度四个参数进行合理的选取。

### 3 结 论

凝视成像激光雷达是空间非合作目标相对位姿测量的理想工具,针对空间中的激光雷达指标严重影响航天器成本的问题,文中提出了激光成像雷达指标与目标属性相容的迭代宏模型,旨在解决激光雷达的指标合理选取问题。模型包括雷达发射参数的计算、目标可测性的检验、目标表面纹理特征的验证和点云位姿精度的验证四部分。通过目标尺度和雷达与目标距离计算测量该目标所需的雷达分辨率和视场角初值。通过迭代雷达最大可测距离获取合适的激光雷达发射功率。通过深度共生矩阵二阶参数比较迭代出测量该目标合适的雷达分辨率和视场角。通过 ICP 算法配准,对配准结果进行迭代得到测量该目标的合适的测距精度。实验结果证明,该模型优化选择的激光雷达指标与传统的经验选择指标值相近,甚至在满足测量精度要求的情况下经济性更好,从而说明,文中提出的凝视成像激光雷达宏模型可以为空间三维凝视成像激光雷达指标合理选择提供理论依据。

### 参考文献:

- [1] Liang Bin, Gao Xuehai, Pan Le, et al. Formation proximity of GEO non-cooperation target based on PSO multiple impulse guidance law [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2015, 47(10): 7-12. (in Chinese)
- [2] Guo Yulan, Wan Jianwei, Lu Min, et al. Three dimensional orientation estimation for lidar target [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(4): 843-850. (in Chinese)
- [3] Chen Feng, Zhu Jie, Gu Dongqing, et al. Relative navigation technology of space non-cooperative target based on imaging lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45 (10): 1030005. (in Chinese)
- [4] Hao Gangtao, Du Xiaoping, Zhao Jiping, et al. Relative pose estimation of noncooperative target based on fusion of monocular vision and scannerless 3D LIDAR [J]. *Journal of Astronautics*, 2015, 36(10): 1178-1186. (in Chinese)
- [5] Lin Xiangguo, Zhang Jixian. 3D Pow line reconstruction from airborne lidar point cloud of overhead electric power transmission corridors [J]. *Acta Geodaetia et Cartographica Sinica*, 2016, 45(3): 347-353. (in Chinese)
- [6] Liu Yu, Chen Feng, Wang Ying, et al. Measurement of relative position and pose between two spacecrafts based on laser lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0817003. (in Chinese)
- [7] Zhou Qin, Zhang Xiuda, Hu Jian, et al. Noise analysis of staring three-dimensional active imaging laser rader [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(9): 0908005. (in Chinese)
- [8] Yan Jie, Ruan Youtian, Xue Peiyao. Active and passive optical image fusion technology [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8 (3): 378-385. (in Chinese)
- [9] Qu Hengkuo, Zhang Qingyuan, Ruan Youtian. Laser radar based on scanning image tracking [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 242-247. (in Chinese)
- [10] Akar O, Gungor O. Integrating multiple texture methods and NDVI to the Random Forest classification algorithm to detect tea and hazelnut plantation areas in northeast Turkeyf [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, 36(2): 442-464.
- [11] Wang Xin, Zhang Mingming, Yu Xiao, et al. Point cloud registration based on improve iterative closest point method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(9): 2068-2077. (in Chinese)
- [12] Shu Rong, Xu Zhihai. Principle of Laser Radar Imaging and Motion Error Compensation Method [M]. Beijing: Science Press, 2014: 10-27. (in Chinese)