

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0108-03

# 大视场情况下激光雷达距离方程的修正

李思宁, 刘金波, 李慧子, 程元丽, 王 骥

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 非扫描成像雷达理论中最核心的问题是激光雷达方程的理论计算,经典的激光雷达方程只适用于在一次成像目标很小,目标的向后散射相等的情况下,而大视场照明时在视场内由于光束到地面的入射角不同引起后向散射并不相等,而是符合朗伯定律的随机分布,因此在大视场条件下并不适合,需要进行修正。在大视场条件下对经典的激光雷达方程进行了具体化分析,得到了大视场条件下修正的激光雷达方程。

**关键词** 激光雷达; 非扫描; 雷达方程; 大视场

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A

## Modification of Lidar Equation in Large Field of View

LI Si-ning, LIU Jin-bo, LI Hui-zi, CHENG Yuan-li, WNAG Qi

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology,  
Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** The most important thing in the non-scanning lidar theory is the lidar equation. The classical lidar equation is suitable on the condition that the field of view is very small and the backscattering of the different part of the target is almost same, but it's unsuitable when the field of view is not very small, when the backscattering of the different part of the target is not same but follow the Lambert distribution. This paper analyses the backscattering of the target and gets a modified lidar equation suitable for the condition.

**Key words** laser radar; non-scanning; lidar equation; large field of view

## 1 引 言

非扫描成像激光雷达具有成像帧频高、视场角大、体积小等优点,在航空航天和商业上具有广泛的应用前景<sup>[1]</sup>。2000年,美国相关研究机构就能实现 $64 \times 64$ 像素的非扫描激光成像雷达系统,成像的距离精度小于2.5%,图像处理速度可以达到每秒100帧<sup>[2]</sup>。

非扫描成像雷达理论中的一个重要问题是激光雷达方程的理论计算,经典的激光雷达方程适用于照明光斑内目标的向后散射相等的情况,即假定散射光是在 $2\pi$ 立体角内均匀分布,这一假设只适用于在成像目标较小的情况下。大视场照明时在视场内由于光束照射到目标表面的入射角不同引起后向散射的不同,此时后向散射的分布符合朗伯定律<sup>[3]</sup>,经典的激光雷达方程并不适用,需要进行修正。本文在大视场条件下对经典的激光雷达方程进行具体化

分析,并得到结论。

## 2 大视场条件下激光雷达方程修正

经典的激光雷达方程如下

$$P_R = \frac{P_T}{P^2 Q_T} \rho A_T \frac{A_C}{R^2 \Omega_R} T_A^2,$$

式中 $P_R$ 为接收功率; $P_T$ 为发射功率; $R$ 为目标与发射机的距离; $Q_T$ 为发射波束的立体角; $\rho$ 为目标反射率; $A_T$ 为目标面积, $A_C$ 为接收有效孔径面积; $\Omega_R$ 为目标散射波束的立体角; $T_A$ 为单向传播大气透射率。

大视场照明时在视场内目标的向后散射的分布符合朗伯定律,所以在解决大视场照明的问题时应该对上述经典的激光雷达方程具体化。

把视场分为很多面积微元,每个微元的后向散射遵循朗伯定律,对整个视场积分就得到整个视场

**作者简介:** 李思宁(1968—),男,朝鲜族,黑龙江哈尔滨人,哈尔滨工业大学副教授,主要从事空间光信息和短波长激光方面的研究。E-mail: siningli@sina.com

的后向散射功率。接收机接收到的能量是照明面积上的所有面积微元后向散射的积分。

如图 1 所示,激光雷达发射出的扇面光横向发散的角度为  $\Delta$ ,切向发散的角度为  $\Phi$ ,扫描扇面与地面的夹角为  $\gamma$ 。雷达在前视光束方向与目标的距离为  $R_0$ 。

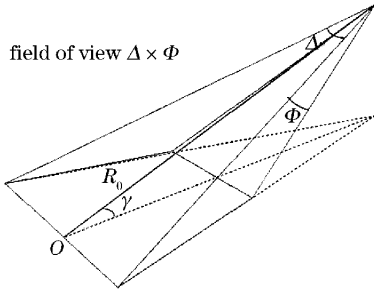


图 1 激光雷达方程修正示意图

Fig. 1 Lidar equation modification

在横向扇面上,扫描扇面的光束是左右对称的,所以在计算反射回波功率时可以先计算一半的照明视场,再乘以 2 得到横向总接收功率,如图 2 所示。

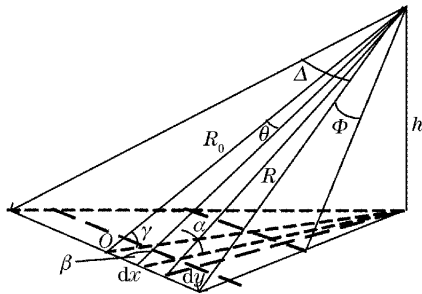


图 2 激光雷达方程具体化分析示意图

Fig. 2 Lidar equation crystallize analysis

在横向扇面的扫描线上取一个线段微元  $dx$ ,  $dx$  的坐标为  $x$ ,  $dx$  与发射机的距离为  $R$ ,照射到  $dx$  上的光束与地面的夹角为  $\alpha$ ,与扫描线的夹角为  $\beta$ ,与发射机正前方发射光束的夹角为  $\theta$ 。

设  $P_T$  均匀分布在扇面上,则照射到  $dx$  上的功率为  $P_T \frac{\sin \beta dx}{R \Delta} T_A$ ,其中  $\beta$  为激光束与扫描线的夹角。

在切向,在横向微元  $dx$  对应的切向扫描线上,同样取一个线段微元  $dy$ ,  $dy$  的坐标为  $y$ 。则横向微元  $dx$  上分布的光功率又均匀分布在切面上。则照射到面积微元  $dxdy$  上的功率为  $P_T \frac{\sin \beta dx}{R \Delta} \frac{dy}{R_{xy} \phi} T_A$ ,其中  $\phi$  为视场角切向方向大小,  $R = \sqrt{R_0^2 + x^2}$ ,  $R_0$  为

探测器在前视光束方向与目标的距离,  $R_{xy}$  为面积微元  $dxdy$  与发射机的距离。

根据朗伯定理,光束在微元面积  $dxdy$  上发生散射后被接收机接收到的功率为

$$P_T \frac{\sin \beta dx}{R \Delta} \frac{dy}{R_{xy} \phi} \frac{\sin^2 \zeta \rho A_c}{R_{xy}^2} T_A^2,$$

其中  $\zeta$  为照射到面积微元  $dxdy$  的光束与地面的夹角,将上式对  $x, y$  分别从 0 到终点积分,就得到接收机接收到的光功率。如下式所示

$$2 \int_0^{R_0 \tan(\Delta/2)} \int_0^{R_0 \phi} P_T \frac{\sin \beta dx}{R \Delta} \frac{dy}{R \phi} \frac{\sin^2 \zeta \rho A_c}{R_{xy}^2} T_A^2 dx dy,$$

把  $\sin \beta = R_0/R$ ,  $\sin \zeta = (R_0/R_{xy}) \sin \gamma$ ,  $T_A = \exp(-2CR)$ ,  $R_{xy} \approx R - \sqrt{2}y/2$  代入到上式,设  $T_s$  为光学系统单程透过率,则到达探测器焦平面的功率为

$$P_D = \frac{2P_T R_0^3 \rho A_c T_s^2 \sin^2 \gamma}{\Delta \Phi} \times \int_0^{R_0 \tan(\Delta/2)} \int_0^{R_0 \phi} \frac{\exp(-2CR)}{R^3 R_{xy}^4} dy dx.$$

### 3 结 论

在本方案中,假设数据如下:  $\Delta = 10^\circ$ ,  $\Phi = 0.3^\circ$ ,  $P_T = 5 \times 10^6$  W,  $T_s = 0.3$ ,  $R_0 = 1000$  m,  $\gamma = 45^\circ$ ,  $\rho = 0.015$ ,  $C = 2 \times 10^{-4}$  m $^{-1}$ ,  $A_c = \pi \cdot 0.1^2$  m $^2$ 。

编写 Matlab 程序,代入数据计算得探测器接收到的总功率为:  $7.3435 \times 10^{-5}$  W,若采用单狭缝条纹管探测,光敏面由 300 个面元组成,这样光敏面的总面积  $S$  为  $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m} \times 300 = 0.75$  mm $^2$ ,若发射激光脉冲的脉宽  $W$  为 10 ns,则在探测器接收面上的能量密度为

$$\rho_e = \frac{P_D \times W}{S} = \frac{7.3435 \times 10^{-5} \times 10 \times 10^{-9}}{0.75} = 9.79 \times 10^{-13} \text{ J/mm}^2.$$

在实际接收系统中,需要考虑到接收光束的聚焦耦合效率和条纹管本身因工艺原因决定的耦合效率,假设接收系统的聚焦耦合效率为 20%,条纹管本身的耦合效率为 80%,则可知最后得到实际被探测器接收的信号光能量密度为:  $1.57 \times 10^{-13}$  J/mm $^2$ 。

目前国内条纹管能探测到的最小能量密度是  $2 \times 10^{-15}$  J/mm $^2$ ,经过上述理论计算和分析可以得到结论,利用 50 mJ/10 ns 输出的 Nd:YAG 倍频激光器,采用条纹管探测器,可以实现斜下视  $1$  km,  $10^\circ \times 0.3^\circ$  视场的大目标成像。

## 参 考 文 献

- 1 Yan Huimin, Ni Xuxiang, Chen Qilin *et al.*. Study of scannerless laser radar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(9): 861~864  
严惠民, 倪旭翔, 陈奇霖 等. 无扫描三维激光雷达的研究 [J]. *中国激光*, 2000, **A27**(9): 861~864
- 2 Zhao Baosheng, Chen Min. The application of MS-streak tube in three-dimensional lidar system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(12): 1425~1427  
赵宝升, 陈 敏. 采用多狭缝条纹管实现激光三维成像 [J]. *光子学报*, 2004, **33**(12): 1425~1427
- 3 C. G. Bachman. *Laser Radar System and Techniques* [M]. Hu Guilan translated. Beijing: National Defence Industry Press, 1982. 131~135  
C. G. Bachman. 激光雷达系统与技术 [M]. 胡桂兰 译, 北京: 国防工业出版社, 1982. 131~135