

激光雷达视场角的研究*

卢益民 杜竹峰 黄铁侠 杨宗凯
(华中理工大学电信系,武汉,430074)

摘要: 在激光雷达的研究中,接收机视场角是一个非常重要的参数。作者利用一种改进的半解析 Monte Carlo 方法对激光雷达接收信号进行了模拟。在作者的模拟中,采用 Henyey-Greenstein 函数的修正公式、加入权值以及放宽判决门限等方法来增进光子的利用效率。由计算结果可以看出,不同的接收机视场角使得接收信号波形有很大的差异。通过分析,我们认为接收机视场角 $FOV = 20 \sim 30\text{mrad}$ 时能够获得较佳的接收信号。

关键词: 激光雷达 接收机视场角 多次散射 Monte Carlo 模拟 接收信号波形

Study on lidar receiver field of view

Lu Yimin, Du Zhufeng, Huang Tiejia, Yang Zongkai

(Department of Electronic & Informational Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: The receiver field of view is a characteristic parameter of lidar and defined by its angular coverage. When laser beam propagates in liquid medium, received signal has the relation with the receiver field of view and beam scattering. We employ a improved semi-analytic Monte-Carlo method to simulate the lidar receiver signal. In order to obtain higher simulation accuracy, we use the modified Henyey-Greenstein function to express the scattering phase function, insert weight collision coefficient of photon, and relax the critical limit in order to increase the calculation efficiency of photon. As known from the simulation results, different receiver field of view produce greatly different received signal waveform. Finally, we concluded that the optimum receiver signal can be obtain when receiver field of view is in the range of $20 \sim 30\text{mrad}$.

Key words: laser lidar receiver field of view multiple scattering Monte Carlo simulation received signal waveform

引 言

作为一个强有力的工具,激光雷达已被广泛地应用于遥感领域。但对其某些方面的研究并不充分。由于多次散射造成的接收信号的不确定性,使得激光雷达模型的建立成为一项棘手的工作。单次散射和二次散射的激光雷达已有精确的模型。虽然许多人在多次散射的研究上得到了一些成果,甚至提出了多次散射的激光雷达信号的解析表达式,但这些表达式或者不全面,或者没有工程实用价值^[1,2]。

通过对多次散射的研究发现,接收机的视场角 FOV 与多次散射激光雷达的接收信号有很大的关系。当 FOV 很小(如 1mrad)时,可以认为接收信号中主要是单次散射和 180° 的后向散射;当 FOV 很大时,多次散射起主要作用^[2]。下面我们就对接收机视场角作一些深入的分

* 国家自然科学基金资助(69402002)。

析。我们所采用的方法是 Monte Carlo 模拟。已经证实, Monte Carlo 模拟方法可以得出与实验方法几乎完全相同的结果^[3]。

Monte Carlo 方法是对光子随机运动轨迹的模拟计算,它模拟了光在浑浊介质中传播的整个物理过程。而介质的主要光学特性包括:衰减系数 c , 单次散射率 σ_0 , 散射相位函数 $P(\theta)$ 等。在 Monte Carlo 模拟中,这些参数都要考虑进去。Monte Carlo 方法的主要优点在于它能进行各种不同情况下的模拟。它的最大缺陷是计算时间过长,在给定的时间内光子到达接收机的概率很小,因此,为得到可靠的统计结果,需要跟踪大量的光子轨迹。Monte Carlo 模拟的基本过程是:构造光子随机轨迹,光子在介质中的多次散射,计算出每个散射点处光子不发生进一步散射而直接到达接收机的概率。

我们研究了光在大气、海水组成的介质中的传递过程。将介质的边界设置成一个锥体,锥体的轴线与光脉冲传播的轴线重合,见图 1 所示。光子位置用一个三维坐标 (X, Y, Z) 表示,光子的起始坐标为: $(0, 0, H)$ 。为提高计算效率,对模型进行了一些简化处理:由于飞机高度 $H = 100\text{m}$,故可认为在大气中光子不发生散射。并且暂时不考虑大气/海水界面的影响。从模拟结果来看,这种处理方法是可行的。

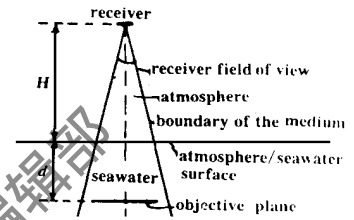


Fig. 1 The geometrical construction of the medium boundary

1 Monte Carlo 方法

下面提出一种改进的半解析 Monte Carlo 方法。假定光束是一个垂直向下的准直入射光束。在模拟中,散射相位函数 $P(\theta)$ 选取的好坏与最后的结果有直接的关系。传统的半解析 Monte Carlo 方法^[4,5]一般采用 Henyey-Greenstein (H-G) 函数来近似地表示散射相位函数:

$$P(\theta) = (1 - g^2) / (1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2} \tag{1}$$

式中, θ 是散射角; g 是非对称因子,它是 $\cos \theta$ 的平均值, $g = \langle \cos \theta \rangle$ 。H-G 函数的优点是它的解析表达式简单,并且可以很好地再现 Mie 散射的前向峰值相位函数的主要特征,但它却不能正确模拟后向散射^[6]。即当 θ 接近 π 时, $P(\theta)$ 比实际的散射相位函数要小。这就使得光束的后向上光子发生散射的概率减小,不仅增加了计算时间,而且在计算精度上也有所降低。因此,在本文中,为了更好地逼近散射相位函数,采用 Gornette 和 Shanks 提出的 H-G 函数的修正公式^[7]:

$$P(\theta) = \frac{3}{2} \cdot \frac{1 - g^2}{2 + g^2} \cdot \frac{1 + (\cos \theta)^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}} \tag{2}$$

这个函数很好地克服了 H-G 函数的缺点,但它的缺陷是表达式较为复杂。

我们所使用的 Monte Carlo 方法的主要步骤如下:

(1) 光子进入海水之后,光子自由路径长度 L 为 $L = - (1/c) \ln r_1$ (3)

式中, r_1 是 $[0, 1]$ 间均匀分布的随机数, c 是海水衰减系数,散射方向 (θ, ϕ) 由下式决定(其中 ϕ 是方位角):

$$\theta = \arccos\{1 / (2g) [(1 + g^2) - (1 - g^2)^2 / (1 - g + 2gr_3)^2]\} \tag{4}$$

式中, r_2, r_3 是 $[0, 1]$ 间均匀分布的随机数,后一个表达式是由(1)式得到。在此需要说明的一点是,由于(2)式较繁琐,不能反推出 θ 的表达式,因此,用(1)式近似。从后面的结果来看,这种方法是有效的,它仅仅使计算精度有一点降低。光子新的坐标是

$$\begin{aligned} X &= X_1 + L \cdot u \\ Y &= Y_1 + L \cdot v \\ Z &= Z_1 + L \cdot w \end{aligned} \quad (5)$$

式中, (X_1, Y_1, Z_1) 是光子散射前的坐标。当光子发生碰撞时, u, v, w 由下式给出

$$\begin{aligned} u &= \sin \theta \cdot \sin \phi \\ v &= \sin \theta \cdot \cos \phi \\ w &= \cos \theta \end{aligned} \quad (6)$$

(2) 在计算中, 给每个光子赋一个初值为 1 的权值。当光子在海水中发生碰撞或反射时, 权值减少, 当光子发生碰撞时, 权值 W 为 $W = W_1 \cdot \sigma_0$ (7)

式中, W_1 是碰撞前的权值, σ_0 是单次散射率, 当光子发生目标反射时, 权值变为

$$W = W_1 \cdot \sigma_r \quad (8)$$

式中, σ_r 是目标反射率。使用加权技术的目的也是为了提高计算效率。在计算中, 认为吸收发生在散射点之间。

(3) 在每个散射点和反射点处, 对光子的返回概率进行计算^[6]:

$$P = P(\sigma_r) \cdot (A/Z^2) \cdot \exp[-c \cdot (Z - H)] \cdot W \quad (9)$$

式中, A 是接收机面积; Z 是散射点或反射点的深度, $Z = H + d$, d 是散射点或反射点处在水中的深度, 见图 1; $P(\sigma_r)$ 由 (2) 式得到。

(4) 在每次新的散射发生之前, 对光子进行判决: 将光子权值与一个门限值 (如 10^{-5}) 进行比较。当光子权值小于门限值时, 则对此光子的模拟终止。

没有结束的光子, 返回步骤 (1), 继续模拟。光子终止后, 进行下一个光子的模拟, 直到完成所有光子的模拟计算。最后根据光子总的自由路径长度进行区间划分, 然后求出每段内的概率之和。

2 模拟结果与分析

本方法中, 模拟的光子数为 20000 个, 得到的结果与半解析 Monte Carlo 方法使用 100000 个光子所得的结果是相似的, 而计算时间减少了 10 倍以上。

模拟中, 参数设置如下: 飞机高度 $H = 100\text{m}$, 接收机区域的面积 $A = 0.06\text{m}^2$, 目标反射率 $\sigma_r = 0.2$, 单次散射率 $\sigma_0 = 0.6$, 海水衰减系数 $c = 0.1\text{m}^{-1}$, 目标信号深度 $d = 30\text{m}$, 当接收机视场角 $\text{FOV} = 20, 30, 100, 200, 10, 2\text{mrad}$ 时, 接收信号波形的模拟结果见图 2。图中, y 轴是归一化的接收信号概率值。

接收信号的优劣, 不仅由目标信号幅度来决定, 更应该由目标信号的相对幅度, 即目标信号幅度与背景噪声幅度的比值来判断。从我们模拟的目标深度 $d = 30\text{m}$ 的情况来看, $\text{FOV} = 20\text{mrad}$ 和 $\text{FOV} = 30\text{mrad}$ 的目标信号波形较好, 而 $\text{FOV} = 100\text{mrad}$ 和 $\text{FOV} = 200\text{mrad}$ 的目标接收波形就差得多, 视场角越大, 接收信号波形越差。这里值得注意的是, $\text{FOV} = 15\text{mrad}$ 时的接收波形 (图略) 比 $\text{FOV} = 20\text{mrad}$ 时要差, 但 $\text{FOV} = 10\text{mrad}$ 和 $\text{FOV} = 2\text{mrad}$ 的目标接收波形 (见图 2e, 图 2f) 却比 $\text{FOV} = 20\text{mrad}$ 的接收波形要好。通过分析, 我们认为, 这可能是由于目标深度仅 30m 造成的。目标深度不大, 则当接收机视场角很小时, 可以认为接收信号中几乎没有多次散射信号, 而只有单次散射和 180° 的后向散射; 当目标深度加大后, 即使接收机视场

角很小,但由于散射体积的加大,还是有不少多次散射信号会被接收机所接收。此时目标信号波形就会变坏。

为验证上面的猜测,我们对目标深度 $d = 50\text{m}$ 进行了模拟。将前面的模拟参数作少许改变,海水衰减系数 $c = 0.05\text{m}^{-1}$, 目标深度 $d = 50\text{m}$,其它参数不变。计算结果见图 3。

从图中不难发现,FOV = 20mrad 时的目标信号波形最好,而 FOV = 10mrad 和 FOV = 2mrad 的接收波形都要稍差一些,因此,证实了我们的假设。对深度更大的目标进行模拟的结果也说明了这一点。对比两组曲线,可以看到,后一组曲线光滑性比前一组要差得多,这是由于多次散射的影响造成的。

接收机视场角的模拟结果与通常的看法有一定的差异。一般认为,FOV 越大,覆盖范围

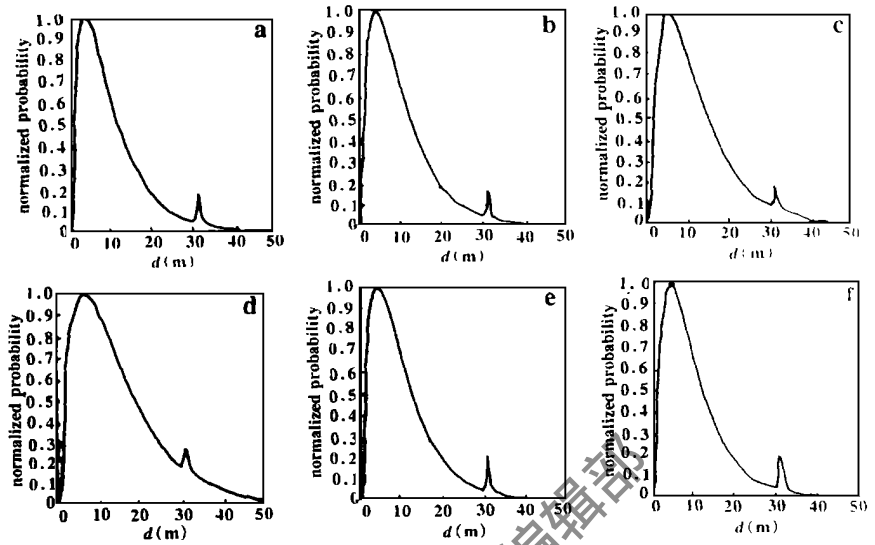


Fig. 2 The simulation results of received signals for different FOVs and for distance $H = 100\text{m}$, target reflectivity $\rho = 0.2$, target depth $d = 30\text{m}$, single scattering rate $\sigma_0 = 0.6$ and attenuation coefficient of water $c = 0.1\text{m}^{-1}$
 a—FOV = 20mrad b—FOV = 30mrad c—FOV = 100mrad d—FOV = 200mrad
 e—FOV = 10mrad f—FOV = 2mrad

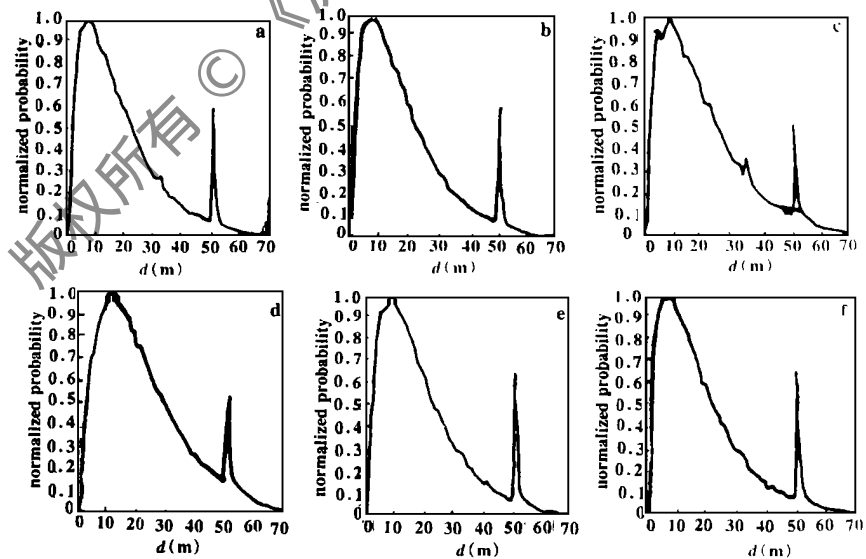


Fig. 3 The simulation results of received signals for different FOVs and for distance $H = 100\text{m}$, target reflectivity $\rho = 0.2$, target depth $d = 50\text{m}$, single scattering rate $\sigma_0 = 0.6$ and attenuation coefficient of water $c = 0.05\text{cm}^{-1}$
 a—FOV = 20mrad b—FOV = 30mrad c—FOV = 100mrad d—FOV = 200mrad
 e—FOV = 10mrad f—FOV = 2mrad

脉冲激光测距机的测距误差分析

戴炳明 张 雏 李东石

(军械工程学院,石家庄,050003)

摘要: 从理论上分析了脉冲激光测距机的测距误差,主要由晶体振荡器的振荡频率稳定性、接收系统的响应时间以及激光脉冲宽度三个因素的影响所致,测距误差范围是 - 5m ~ 10m。

关键词: 脉冲激光 测距机 测距误差

Analysis of ranging error of pulse laser ranger

Dai Bingming, Zhang Chu, Li Dongshi

(College of Ordnance Engineering, Shijiazhuang, 050003)

Abstract: This paper theoretically analyzed the ranging error of a pulse laser ranger. We considered the main factors of ranging circuits, such as the stability of oscillating frequency of crystal oscillator, response time of receiving system and width of laser pulse. The ranging error can be controlled in the range - 5m ~ 10m for design of a pulse laser ranger

Key words: pulse laser ranger ranging error

引 言

由于激光具有方向性好、单色性好、亮度高的特点,因此,激光测距和光学测距相比,有精

越大,接收到的光信号越多,信号强度也越大。但模拟情况是 FOV 大了,效果反而不好。这只能说明,FOV 加大以后,虽然接收到的目标信号有所增加,但同时也使多次散射对总的接收信号的贡献加强,即接收到的背景噪声也越大。故 FOV 的增大造成了目标信号相对幅度变小。

通过以上分析,我们得出如下结论:接收机视场角 FOV 既不能太大,也不能太小。视场角太大,接收到的背景噪声随之加大,目标信号的相对幅度减小;视场角太小,虽然背景噪声减少,但目标信号强度也大大减小,目标信号的相对幅度还是会降低。由模拟计算结果,我们认为激光雷达的接收机视场角 $FOV = 20\text{mrad} \sim 30\text{mrad}$ 是非常适宜的。

参 考 文 献

- 1 Zaccanti G, Brusaglioni P, Gurioli M *et al.* Appl Opt, 1993; 32(9): 1590 ~ 1597
- 2 Bissonnette L R. Appl Opt, 1996; 35(33): 6449 ~ 6465
- 3 Steinvall K O, Kopparl K K, Karlsson V C M. Opt Engng, 1993; 32(6): 1307 ~ 1321
- 4 Poole L R, Venable D D, Campbell J W. Appl Opt, 1981; 20(20): 3653 ~ 3656
- 5 Tinet E, Avrillier S, Tualle J M. J O S A A, 1996; 13(9): 1903 ~ 1915
- 6 Platt C M R. J Atm Sci, 1981; 38(1): 156 ~ 167
- 7 Gornette W M, Shanks J G. Appl Opt, 1992; 31(6): 3152 ~ 3160

作者简介: 卢益民, 男, 1945 年 8 月出生。教授。主要从事图像处理、激光通信及深潜的教学与研究。