

机载激光海洋测深系统接收FOV的研究

李 凯¹ 张永生¹ 刘笑迪² 童晓冲¹

¹解放军信息工程大学地理空间信息学院, 河南 郑州 450002

²中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

摘要 以“多次前向、单次后向散射”激光测深回波信号数学模型为理论基础,分析了接收FOV对激光测深回波信号的影响。讨论了不同海水深度情况下FOV损失因子与接收器FOV之间的关系。以辨别力指数 D 作为激光测深性能评价标准,分析了晴空条件下机载激光测深系统辨别力指数 D 与接收器FOV的关系,进一步得到在不同最大探测水深情况下的最优FOV。根据分析结果可以对机载激光测深系统的接收FOV进行优化,为我国研究新型的机载激光测深系统提供理论依据。

关键词 激光技术; 机载激光测深; 回波信号; 辨别力指数 D ; FOV

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0701005

Study on Airborne Laser Bathymetric System Receiver Field of View

Li Kai¹ Zhang Yongsheng¹ Liu Xiaodi² Tong Xiaochong¹

¹*Institute of Geography and Space Information, The PLA Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450002, China*

²*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*

Abstract The effect of receive field of view (FOV) on laser sounding echo signals is analyzed based on “multiple-forward scattering and single-backscattering” laser sounding echo signal mathematical model. The relationship between the FOV loss factor and the receiver FOV is discussed under different depths. D -index of discriminability of airborne laser bathymetric system is served as a performance evaluation criterion and the relationship between it and receiver FOV is analyzed. Further, the optimal FOV for different maximum detection depths is derived. The result in this paper can contribute to the optimization of FOV of airborne laser bathymetric system. Thus theoretical basis for the development of new airborne laser bathymetry system is provided.

Key words laser technique; airborne laser bathymetry; echo signals; D -index of discriminability; field of view

OCIS codes 010.0280; 010.3310; 010.3640; 010.4450

1 引 言

激光技术是一种重要的用于主动探测的遥感手段,在地形测绘、气溶胶特性探测^[1-2]等领域都得到了广泛的应用。机载激光测深技术是一种在机载平台上利用激光光束直接对浅海海底定位的遥感技术。利用蓝绿波段(532 nm)激光在海水中传播时的穿透性,可将机载激光扫描测距技术应用于浅海测量^[3]。然而,即使在衰减较小的蓝绿波段,由于海水复杂的光学性质,激光的穿透性能也很有限。因此,长期以来,如何提高机载激光测深系统的回波探测能力一直是机载激光测深技术的研究重点。

激光由发射器出发,经过大气、气-水界面、海水、再经海底返回被接收器接收是一个非常复杂的辐射传输过程。尤其是在光学性质复杂的海水中传输时,由于光子的多次散射效应,接收信号具有很大的不确定性,从而使得激光测深回波信号的解析模型比较复杂,难以在工程应用中发挥作用^[4]。激光测深回波信号的基本模

收稿日期: 2015-01-28; 收到修改稿日期: 2015-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(41201392, 41401534)、地理信息工程国家重点实验室开放基金项目(SKLGIE2013-M-3-1)

作者简介: 李 凯(1992—),男,硕士研究生,主要从事机载激光测深理论方面的研究。E-mail: likai_rs@163.com

导师简介: 张永生(1963—),男,博士,教授,主要从事摄影测量与遥感理论方面的研究。E-mail: yszhang2001@vip.163.com

型是由 Dolin 等^[5]提出的,通常被称为 Dolin-Levin 模型。该模型全面的对激光探测系统的探测机理进行了理论模拟,但是由于模型过于复杂,在实际的应用中,经常使用其简化模型^[6]。Kopilevich 等^[7]对该模型进行改进,新建立的模型更加适用于工程领域,且适用于窄视场(FOV)接收器和船载激光。Kopilevich 等^[8]进一步考虑了光轴偏离垂直方向的情况,给出了更具一般性的激光回波信号的数学模型(以下称 Kopilevich 模型)。

激光在海水传输过程中的衰减与接收器的 FOV 有很大的关系,当光子多次散射后,其最终的出射方向超出了接收 FOV 范围,就会造成光子的损失。因此,为了使激光能够接收更深范围的回波信号,增加激光测深能力,接收器 FOV 一般较大(40~80 mrad),假设 FOV 足够大,能够覆盖激光发散角在水面上的横截面,则由 FOV 造成的信号损失就不会对浅水测量中激光脉冲回波信号造成严重影响。当水深增加,光子的散射次数增多,最终超出接收视场范围的光子也越多,对激光脉冲回波信号的影响也越大。同时,接收视场越大,进入接收器的背景太阳噪声也越大,这又使得回波信号的信噪比降低。董志伟等^[9]利用系统仿真的方法研究了回波信噪比对激光雷达测绘精度的影响,然而,激光测深系统的信号分布与地面测绘激光雷达不一致,这就需要使用不同的分析方法。因此,接收 FOV 对于激光测深性能的影响复杂,需要综合考虑海水水深、水体光学性质、背景辐射光等因素。

本文以 Kopilevich 等^[8]提出的激光测深回波信号数学模型为理论基础,分析接收 FOV 对激光测深回波信号的影响,并对特定条件下机载激光测深系统的接收 FOV 进行优化,为我国研究新型的机载激光测深系统提供理论依据。

2 理论背景

2.1 Kopilevich 激光测深模型

国内鲜有对 Dolin-Levin 模型及由 Kopilevich 进一步发展的激光测深回波信号的理论模型分析研究的文献可供参考,而该理论在国外得到了非常成功的应用,目前国际上较成功的机载激光测深系统 SHOALS、CZMIL 均以该理论模型为研究基础。因此本节简要介绍激光测深回波信号模型,为本研究奠定理论基础。

Kopilevich 模型以光束矢量辐照度在吸收/散射介质中的辐射传输为基础。由于可见光在海水中传播时散射具有高度不对称性,因此该模型考虑了光束传输时的多次前向散射、单次后向散射效应。在激光测深中,一般认为激光发射器和接收器位于同一位置。如果假设激光发射脉冲相对于垂直方向的扫描角为 θ_a ,激光器距离海面高度为 H_0 ,水体为均匀分布的介质,折射率为 n ,激光波束发散角为 θ_0 ,接收器 FOV 为 θ_{r0} ,则在 Kopilevich 模型中,有

$$H = H_0 n (\cos \theta_w / \cos \theta_a)^3, \quad (1)$$

$$\theta_t = \theta_0 \cos \theta_a / (n \cos \theta_w), \quad (2)$$

$$\theta_r = \theta_{r0} \cos \theta_a / (n \cos \theta_w), \quad (3)$$

式中 H 、 θ_t 、 θ_r 分别为 Kopilevich 模型中 H_0 、 θ_0 、 θ_{r0} 的等效值, θ_w 是激光脉冲由水气界面进入海水之后的传播方向与垂直方向的夹角,根据折射定律,有

$$\sin \theta_a = n \sin \theta_w. \quad (4)$$

激光波束初始横截面半径 r_0 和接收器孔径半径 r_{r0} 的等效半径 r_t 和 r_r 分别为

$$r_t = r_0 \cos \theta_w / \cos \theta_a, \quad (5)$$

$$r_r = r_{r0} \cos \theta_w / \cos \theta_a. \quad (6)$$

在 Kopilevich 模型中,接收器接收的激光波束海底反射功率 $P_{\text{bot}}(h)$ 、后向散射功率 $P_{\text{bw}}(h)$ 为

$$P_{\text{bot}}(h) = P_0 \frac{\rho_{\text{bot}}}{\pi} \sum \eta \frac{\cos^2 \theta_w}{(H+h)^2} \exp[-2(a+b_b)h / \cos \theta_w] F(h), \quad (7)$$

$$P_{\text{bw}}(h) = P_0 \frac{c\tau_{\text{pulse}}}{2n} \beta_{\pi} \sum \eta \frac{\cos^2 \theta_w}{(H+h)^2} \exp[-2(a+b_b)h / \cos \theta_w] F(h), \quad (8)$$

式中 P_0 是单脉冲在脉冲持续时间 τ_{pulse} 上的平均功率、 c 是空气中的光速, β_{π} 是体积散射函数 $\beta(\theta)$ 取 180°

时数值, Σ 是接收器孔径面积, $\Sigma = \pi r_r^2$, η 是发射器和接收器总的光学系统损失因子, h 是水深, a 、 b_s 分别是水体吸收系数、后向散射系数, ρ_{bot} 是海底反射率。 $F(h)$ 描述了由接收器 FOV、水体光学参数、水深、波束发散角等多种参数导致的接收器接收到回波信号的损失因子, 其表达式为

$$F(h) = \Psi m \exp(-2b_f h / \cos \theta_w) \int_0^{\infty} (x + \sqrt{1+x^2})^{2b_f h / (\cos \theta_w x)} \times \exp\left[-\frac{x^2 m^2}{4} \left(\frac{r_r^2 + r_l^2}{h^2 / \cos^2 \theta_w} + \Theta^2\right)\right] J_1(mx\Psi) dx, \quad (9)$$

$$\begin{cases} \Psi = \frac{\theta_r H + h}{2 h} \\ \Theta = \frac{\theta_l H + h}{2 h} \end{cases}, \quad (10)$$

式中 J_1 是一阶贝塞尔函数, $x = \frac{\vec{\kappa} h}{m}$, $\vec{\kappa}$ 为极坐标中与入射光轴方向正交的位置向量经傅里叶变换后的空间频率, b_f 是水体前向散射系数, 参数 m 与探测深度无关, 可以表示为散射角平均余弦的函数:

$$m = (0.142 - 0.132 \cdot \overline{\cos \theta})^{-\frac{1}{2}}. \quad (11)$$

对于不同类型的海洋水体 $0.86 \leq \overline{\cos \theta} \leq 0.96$, $6 \leq m \leq 8$ 。对于海岸带区域的水体, m 取 $8^{[10]}$ 。

2.2 辨别力指数 D

为了对不同系统激光测深回波信号进行比较分析, 进而优化系统参数, 需要建立一个激光测深性能的评价标准, 依据该标准得到的对应于某系统的结果指数越高, 说明该系统性能越好。在机载激光测深领域, 国际上较多采用辨别力因子 D 作为评判准则, 该因子首先由 Sakit^[11] 提出, 用来度量两个概率分布 A 和 B 可被区分的能力, 其中 A 表示探测器输出端噪声信号的概率分布, B 表示信号和噪声同时存在时的概率分布。辨别力指数 D 的数学表达式为

$$D = |i_B - i_A| / (S_A S_B)^{\frac{1}{2}}, \quad (12)$$

式中 i_A 和 i_B 分别是分布 A 和 B 的均值, S_A 和 S_B 分别是对应的标准差。

Feigels^[10] 认为, 在机载激光海洋测深系统中信号和噪声的分布规律不一致, 而辨别力因子 D 能够更好地描述服从离散泊松分布的光子信号与噪声之间的辨别能力。假设激光测深系统在 Δt 时间内探测器接收到的同时存在信号(海底反射、水体散射等)和噪声的光子数量 m 的概率分布为 $p_{\text{sn}}(m)$, 当仅含有噪声时同等时间内光子数对应的概率分布为 $p_n(m)$ 。由于光信号服从泊松分布, 则激光测深系统探测到的信号的概率分布函数为

$$p_{\text{sn}}(m) = \frac{(\bar{m}_s + \bar{m}_n)^m}{m!} \exp[-(\bar{m}_s + \bar{m}_n)], \quad (13)$$

$$p_n(m) = \frac{(\bar{m}_n)^m}{m!} \exp(-\bar{m}_n), \quad (14)$$

式中 \bar{m}_s 是 Δt 时间内探测器接收到的“信号”光子平均数量, \bar{m}_n 是对应的“噪声”光子平均数量。对于一定的虚警概率 P_f 为

$$P_f = 1 - \sum_{m=0}^{m_0-1} \frac{(\bar{m}_n)^m}{m!} \exp(-\bar{m}_n), \quad (15)$$

式中 m_0 是鉴别阈值。信号捕获概率 P_{ac} 为

$$P_{ac} = 1 - \sum_{m=0}^{m_0-1} \frac{(\bar{m}_s + \bar{m}_n)^m}{m!} \exp[-(\bar{m}_s + \bar{m}_n)]. \quad (16)$$

由于 $p_{\text{sn}}(m)$, $p_n(m)$ 服从泊松分布, 则辨别力指数 D 为

$$D = \bar{m}_s / [(\bar{m}_s + \bar{m}_n) \bar{m}_n]^{\frac{1}{4}}. \quad (17)$$

对于一定的虚警概率 P_f 和不同的 \bar{m}_n 取值, 可以做出信号捕获概率 P_{ac} 随辨别力指数 D 的变化曲线, 如图 1 所示。图 1 中曲线 1~5 分别对应的 \bar{m}_n 分别为 1、10、50、100、150, 从图中可以看出, 不同的曲线之间的差

别很小。这些曲线可以用一个仅与 D 有关的函数很好地拟合^[12]:

$$P_{ac} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}[\operatorname{erfc}^{-1}(2P_f) - D], \quad (18)$$

式中 $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-y^2) dy$ 为补误差函数, $\operatorname{erfc}^{-1}(x)$ 是其反函数。

根据(8)式得出的 P_{ac} 随 D 的变化曲线如图1中曲线6所示。从图1中各曲线可以看出,完全可以使用辨别力指数 D 评价激光测深系统的性能,这样系统的参数优化就变为求使 D 最大的系统参数。由于当虚警概率 $P_f = 10^{-6}$ 时,辨别力指数达到6,信号捕获概率能够达到90%,因此可将辨别力指数 $D = 6$ 设为激光测深系统的最小阈值,并认为辨别力指数小于6的激光测深系统性能较差,难以达到工程应用的目的。

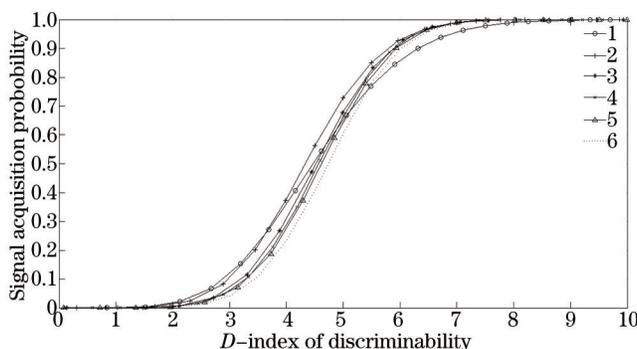


图1 信号捕获概率 P_{ac} 随辨别力指数 D 的变化曲线,虚警概率 $P_f = 10^{-6}$, 曲线1~5分别对应于(14)式中 \bar{m}_n 取值分别为1,10,50,100,150的结果, 曲线6对应于(18)式

Fig.1 Relationship between acquisition probability P_{ac} and D -index of discriminability for fixed false-alarm probability $P_f = 10^{-6}$, Curves 1~5 correspond to formula (14) with different \bar{m}_n , i.e. $\bar{m}_n = 1, 10, 50, 100, 150$. Curve 5 corresponds to approximation formula(18)

对于激光测深系统,不考虑探测器系统噪声,当底部反射信号(“有用信号”)存在时,接收端信号功率为

$$P_{sn} = P_{bw} + P_{bot} + P_s + P_{ba}, \quad (19)$$

式中 P_s 是太阳辐射功率, P_{ba} 是大气后向散射功率。则对应于(12)式中分布 A 的信号均值为

$$\bar{P}_{sn} = i_A = \bar{P}_{bw} + \bar{P}_{bot} + \bar{P}_s + \bar{P}_{ba}, \quad (20)$$

\bar{P}_{sn} 、 \bar{P}_{bw} 、 \bar{P}_{bot} 、 \bar{P}_s 、 \bar{P}_{ba} 分别为对应信号功率在探测时间 Δt 内的平均值。分布 A 的方差 S_A^2 可由信号探测器接收功率 P 与光子数量 m 的关系得到

$$m = \frac{P}{e(1 + b_d) / (s_\lambda \Delta t)} = \frac{P}{c_1}, \quad (21)$$

式中 e 是电子电荷量, b_d 为探测器附加噪声因子^[13], s_λ 为探测器光谱敏感度。由于光子信号服从泊松分布,因此光子数量均值 $\bar{m} = S^2(m) = (m - \bar{m})^2$, 因此信号方差为

$$S^2(P) = (P - \bar{P})^2 = (m - \bar{m})^2 \cdot c_1^2 = \bar{P} \cdot c_1. \quad (22)$$

则对应于(12)式中分布 A 的信号方差为

$$S^2(P_{sn}) = S_A^2 = \bar{P}_{sn} \cdot c_1. \quad (23)$$

当探测器仅接收到噪声信号,即底部反射信号不存在时,接收端信号功率为

$$P_n = P_{bw} + P_s + P_{ba}. \quad (24)$$

则对应于(2)式中分布 B 的信号均值和方差为

$$\bar{P}_n = i_B = \bar{P}_{bw} + \bar{P}_s + \bar{P}_{ba}, \quad (25)$$

$$S^2(P_n) = S_B^2 = \bar{P}_n \cdot c_1. \quad (26)$$

因此机载激光测深系统的辨别力因子为

$$D_{bot} = \frac{\bar{P}_{bot}}{\sqrt{c_1 [\bar{P}_{sn} \cdot (\bar{P}_{sn} - \bar{P}_{bot})]^{1/4}}}. \quad (27)$$

3 与模型应用

3.1 参数说明

激光测深系统的测深性能主要受系统内部参数和外界环境因素的影响,然而对于不同的激光测深系统而言,由于系统所采用的信号接收器、波束发散角、接收器 FOV 等设计均有可能不同,因此激光测深系统的最大测深能力也很难用一个精确的公式描述。当前国际上一般采用最大光学深度 $K_d \cdot D_{\max}$ ^[14] 这一参数评价系统测深能力,其中 K_d 指激光工作波长处海水的漫衰减系数,且 $K_d = a + b_b$ 。 D_{\max} 指在该漫衰减系数处激光测深系统可测得的最大水深。经过数十年的技术革新,激光测深系统测深在白天工作模式下最大光学深度一般可达到 3~4 左右^[14-15],而国内相关研究也提出机载激光测深系统的最大光学深度应达到 3.9 左右,才能满足南海近海区域的测绘任务^[16]。南海区域水质在我国周边海域中水质较好,激光穿透性能好,而针对该区域开展测绘任务又具有极特殊的战略意义,因此本文针对该区域研究适合我国相关海域的激光测深系统参数。取激光测深系统最大光学深度指标为 4.0。海区域水底底质以砂质为主^[17],水底反射率 ρ_{bot} 一般在 12% 以上,取最小值 12% 作保守估算。由于国内对南海区域水体体积散射函数 β_{π} 研究较少,取 Maffione 等^[18] 于墨西哥湾实验数值 $0.00064 \text{ m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。

从最大光学深度的表达式中可以看出激光最大测深深度与激光工作波长处海水漫衰减系数相关,当前激光测深系统所采用的激光器多为 Nd:YAG 激光器倍频产生的 532 nm 激光,而由水质测量仪器现场采集的漫衰减系数数据一般提供 490 nm 处的漫衰减系数,Wang 等^[19] 通过对南海区域实测漫衰减系数分析,得到了 412~555 nm 波段漫衰减系数与 490 nm 处漫衰减系数之间的关系:

$$K_d(\lambda) = M(\lambda)K_d(490) + I(\lambda), \quad (28)$$

式中

$$M(\lambda) = -0.0066\lambda + 4.2653, \quad (r^2 = 0.985), \quad (29)$$

$$I(\lambda) = 0.0006\lambda - 0.3076, \quad (r^2 = 0.973), \quad (30)$$

式中波长 λ 处漫衰减系数, r^2 为线性拟合时相关系数。由此可得

$$K_d(532) = 0.7541 \cdot K_d(490) + 0.0116. \quad (31)$$

根据 2003 年在南海近海区域测量的漫衰减系数数据,该区域 $K_d(490)$ 分布范围在 $0.034 \sim 0.852 \text{ m}^{-1}$ 之间^[19]。则由(13)式可得南海近海区域 $K_d(532)$ 分布范围在 $0.037 \sim 0.654 \text{ m}^{-1}$ 。

在机载海洋激光测深系统中,扫描天顶角对扫描宽度和测深精度影响较大,Guenther^[20] 分析了不同扫描角条件下激光测深的测量误差,认为当扫描角在 $15^\circ \sim 23^\circ$ 为激光扫描的最优值,测量误差较小,Bufton 等^[21] 分析了海浪存在时,入射角对海面反射的影响,得出结论:入射角小于 20° 时反射系数小于 3%,当入射角大于 30° 时,反射系数高达 15%。因此考虑到测量效率、测量精度和回波信号接收概率,本文选择激光扫描角为 20° 。

根据我国南海沿海区域光学性质、国内外机载激光测深系统技术现状,并结合以上分析,相关环境参数和系统参数如表 1 所示。

表 1 相关环境参数和系统参数

Table 1 Relevant environmental parameters and system parameters

P_0 /MW	r_{r0} /m	r_{t0} /m	H_0 /m	θ_a	θ_{t0} / μrad	η	τ_{pulse} /ns
1.5	0.1	5×10^{-6}	500	20°	60	0.62	5
c /(m/s)	K_d / m^{-1}	β_{π} /($\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$)	n	ρ_{bot}	b_f / m^{-1}	m	
3×10^8	0.037~0.654	0.00064	1.33	12%	0.4	8	

3.2 $F(h)$ 与接收器 FOV 的关系

由(7)式可知,激光测深系统的水体后向散射、海底反射回波功率与水体光学性质、激光测深系统参数有关,而其中影响最复杂的就是 $F(h)$ 函数,对于特定的研究区域(水体光学参数、水深等已知), $F(h)$ 与接收器 FOV 有关,而 FOV 在回波功率的计算公式中也仅出现在 $F(h)$ 公式中,接收器 FOV 对 $F(h)$ 的影响直接作用于激光测深的回波功率, $F(h)$ 又被称作 FOV 损失因子^[22]。利用表 1 提供的环境参数和系统参数,计算得到

了不同海水深度情况下 $F(h)$ 与接收器 FOV 之间的关系,结果如图 2 所示。从图 2 可以看出:

- 1) $F(h)$ 随接收器 FOV 的增加而增加,当 FOV 足够大时, $F(h) = 1$, 此时 FOV 不再对回波接收功率产生影响;
- 2) 对于固定的 FOV, 随着探测深度的增加, $F(h)$ 减小, FOV 对回波功率造成的损失增大;
- 3) 当探测水深较浅时, $F(h)$ 达到饱和的速度较快,反之亦然。

单纯的从海底回波接收功率 P_{bot} 来看,为了增大机载激光测深系统的测深能力,接收器 FOV 应取使 $F(h)$ 达到或接近 1 的最小值。例如,当系统最大测深能力指标为 10 m 时,接收器 FOV 设为 30 mrad 就足够了;而当系统最大测深能力指标为 25 m 时,接收器 FOV 应达到 90 mrad 以上。然而实际上,FOV 增大的同时,水体后向散射回波和背景太阳辐射带来的噪声回波能量也会增加,从而使底部回波难以从噪声信号中分离。因此,FOV 并不是越大越好。

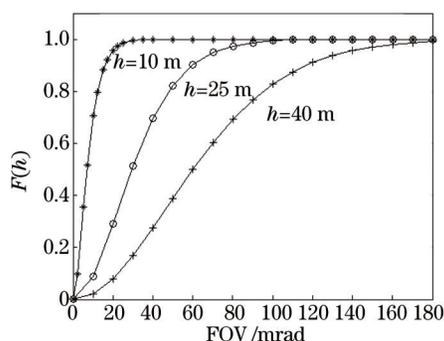


图 2 在不同水深处 FOV 损失因子 $F(h)$ 随接收器 FOV 的变化曲线

Fig.2 Relationship curve between the FOV loss factor $F(h)$ and the receiver FOV under different depths

3.3 基于辨别力指数 D 的接收器 FOV 优化

机载激光测深系统成功探测海底信号的关键不仅在于底部回波信号功率足够大,更重要的是从包含有多种噪声的信号中正确识别底部回波信号。根据第 2 节的分析,对于光信号来说,辨别力指数 D 能够较好的评价信号识别的概率。因此为了确定最优的接收器 FOV,本节分析辨别力指数 D 与接收器 FOV 的关系。

从理论上讲,机载激光测深系统在夜间工作更加有利,此时噪声信号中太阳辐射信号 $P_s = 0$ 。然而出于安全操作等因素,很多情况下机载激光测深系统在白天开展作业任务。因此本文主要分析系统在白天的作业能力。根据表 1 参数, $\frac{P_{bot}}{\pi}$ 与 $\frac{c\tau_{pulse}}{2n}\beta_{\pi}$ 的比值大于 105。则

$$P_{bot}(h) \gg P_{bs}(h). \quad (32)$$

当激光探测深度变大时,底部回波功率变小,而太阳辐射照度不变,当测量水深达到系统最大探测能力时,回波功率中太阳辐射功率远大于底部回波功率,即 $P_s(h) \gg P_{bot}(h)$ 。Feigels^[10]的实验还表明,当水深小于 60 m 时, $P_{bs}(h)/P_{bot}(h) < 10$, 则 $P_{bot}(h)/P_{bs}(h) > 30$ 。据此,机载激光测深系统白天工作时,辨别力指数 D 可由 (27)式简化为

$$D = \frac{\overline{P_{bot}}}{\sqrt{c_1 P_s}}. \quad (33)$$

根据文献[23]给出的太阳背景噪声公式,太阳辐射功率可表示为

$$P_s = I_s A_s \Delta\lambda \Sigma \eta / H^2. \quad (34)$$

式中 $\Delta\lambda$ 是接收器光谱带通滤波器半宽,取 1 nm。 A_s 为接收器 FOV 探测覆盖面积

$$A_s = \pi \left[r_{r0} + H \tan\left(\frac{\theta_{r0}}{2}\right) \right]^2. \quad (35)$$

I_s 为海面测量的海水太阳漫辐射量,晴空时海表处可接收的典型太阳漫辐射平均值由文献[24]给出。在波长 532 nm 处该辐射量为 $0.7 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 。

取漫衰减系数 $K_d = 0.1 \text{ m}^{-1}$, 由最大光学深度指标, 此时激光测深系统最大测深深度应达到 40 m。由(33)式计算得到的激光测深系统达到最大测深能力时辨别力指数 D 随接收器 FOV 的变化如图 3 中实线所示。从图中可以看出, 当 FOV 为 15 mrad 时, 辨别力指数 D 达到 6, 能够满足识别底部信号的阈值要求。然后随着 FOV 的增大, D 也增大, FOV 为 79 mrad 时, D 达到最大值 18.58; 此后 D 随着 FOV 增大缓慢减小, 当 FOV 达到 365 mrad 时, D 减小至信号探测阈值。因此, 对于设定的系统参数和环境参数而言, 为达到最大探测能力, FOV 的取值范围为 15~365 mrad, 最优 FOV 为 79 mrad。由于南海近海区域漫衰减系数变化范围较大, 因此针对不同的区域, 激光测深系统最大探测深度也会发生变化, 图 4 表示了在达到激光测深系统最大光学深度情况下, 由于水质参数变化引起最大探测水深发生变化时, 辨别力指数 D 随接收器 FOV 的变化, 为方便显示, 纵坐标采用对数坐标。从图 4 可以看出, 当最大可测水深增加时, 使辨别力指数 D 达到最大值的 FOV 右移。需要注意的是, 当水深达到 81 m 时, 即使在最优 FOV 处辨别力指数也没有达到 6, 因此理论上可以认为在该参数设计情况下, 当水深大于 81 m 时, 激光测深系统就无法识别回波信号。

如果(33)式对 FOV 求偏导, 并令 $\frac{\partial D}{\partial \theta_0} = 0$, 可以得到在不同最大探测水深情况下的最优 FOV, 如图 5 所示。根据图 5, 可以优化选择机载激光测深系统的 FOV。如果海底地形比较平坦, 或者所研制的系统针对某一特定区域, 例如测区水深范围在 $(25 \pm 5) \text{ m}$ 范围内, 接收器 FOV 设置为 37 mrad, 可使辨别力指数 D 在测区范围内平均值达到最大, 且在整体水深范围内, D 都能够超过阈值。这就可以最大化海底回波识别概率, 获得更多的激光脚点三维数据。如果海底地形起伏较大, 或者为使机载激光测深系统广泛应用于海岸带区域, 则应选择最大预期可测深度的最优 FOV 为接收器 FOV。例如水深变化范围为 0~40 m, 若接收器 FOV 设置为 10 m 处最优 FOV, 即 8 mrad, 而由图 4 可知, 使辨别力指数 D 达到阈值的最小 FOV 为 15 mrad。则在探测 40 米深度水域时, 由于辨别力指数 D 小于阈值, 就会导致底部回波信号探测概率降低, 甚至获取不到有用信号, 从而降低了原始数据的可用性。

需要说明的是, 从(7)、(33)式可知, 辨别力因子还与单脉冲激光器发射功率 P_0 、接收器孔径面积 Σ 、激光脉冲扫描角 θ_a (θ_w) 等系统参数有关。当这些参数变化时, 图 3 中纵坐标也会随之改变, 但是横坐标和辨别力指数 D 随接收器 FOV 的变化曲线不会发生改变, 因此不同最大探测水深情况下的最优 FOV 不会改变。这时只需要最优 FOV 下辨别力指数 D 大于阈值, 则最优 FOV 仍然有效。例如对于图 3 中最优 FOV 为 79 mrad, 此时辨别力因子 D 为 18.58, 而系统单脉冲激光器发射功率 $P_0 = 1.5 \text{ MW}$, 当系统接收器孔径面积和扫描角不变时, 激光器发射功率最小值为

$$P_{\min} = P_0 \cdot \frac{6}{18.58} = 0.48 \text{ MW} . \tag{36}$$

此时辨别力指数 D 随接收器 FOV 的变化如图 3 中虚线所示, 虚线表示激光器发射功率为 0.48 MW 时辨别力指数最大值刚好到达阈值的情况。因此, 由于激光在浅海浑浊区域的衰减较快, 在设计机载激光海洋

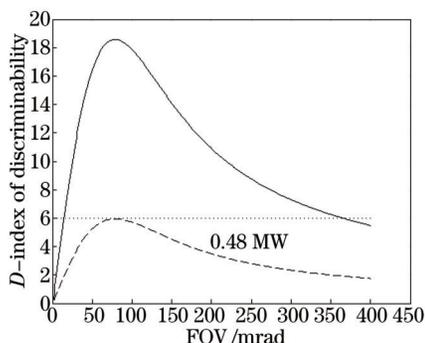


图 3 探测水深 40 m 时, 辨别力指数随 FOV 的变化
Fig.3 Curve of D -index of discriminability varies with the angle of view when the depth is 40 m

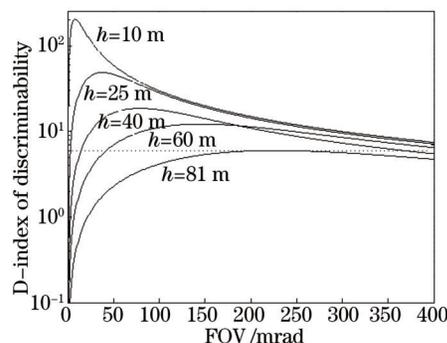


图 4 不同水质(不同最大探测水深), 辨别力指数随 FOV 的变化, 虚线表示辨别力指数为 6
Fig.4 Curve of D -index of discriminability varies with the angle of view with different water conditions. Dashed line represents D -index of discriminability is 6

测深系统时,应采用高能量、窄脉冲激光器,这也是机载海洋激光测深系统的一个研制难点。其他系统参数如接收器孔径面积 Σ 、激光脉冲扫描角 θ_a (θ_w) 对辨别力指数有类似的影响,但是机载激光海洋测深系统作为一个复杂的光、机、电高度集成的系统,又是在高度动态变化的海面作业,因此在保证辨别力因子大于阈值的情况下,机载激光海洋测深系统的其他参数设计还要考虑多种因素,所以需要作专门讨论,这方面的内容另文介绍。

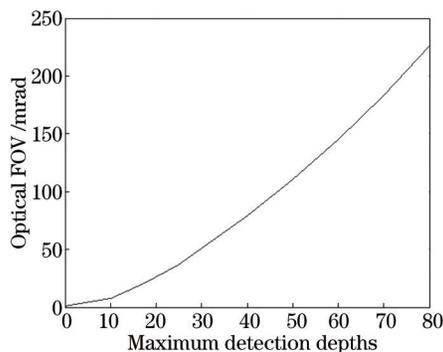


图5 最优FOV与不同最大探测水深的关系

Fig.5 Optimal FOV for different maximum detection depths

4 结 论

以“多次前向、单次后向散射”激光测深回波信号数学模型为理论基础,分析了接收FOV对激光测深回波信号的影响。该模型理论和实际上都得到了广泛的应用,国内研究多以蒙特卡洛方法分析回波信号,模型建立比较复杂,本模型具有清晰的数学表达式,且数值计算简单,易于模拟,为激光测深系统回波信号的研究提供了另一种的方法。因此对该模型进行了简要介绍。由于在激光测深回波信号模型中,主要由接收器FOV造成的损失为 $F(h)$ 函数,因此讨论了不同海水深度情况下 $F(h)$ 与接收器FOV之间的关系。实验结果表明:

- 1) $F(h)$ 随接收器FOV的增加而增加,当FOV足够大时, $F(h) = 1$,此时FOV不再对回波接收功率产生影响;
- 2) 对于固定的FOV,随着探测深度的增加, $F(h)$ 减小,FOV对回波功率造成的损失增大;
- 3) 当探测水深较浅时, $F(h)$ 达到饱和的速度较快,反之亦然。

由于机载激光测深系统成功探测海底信号的关键不仅在于底部回波信号功率足够大,更重要的是从包含有多种噪声的信号中正确识别底部回波信号。因此以辨别力指数 D 作为激光测深性能评价标准,分析了晴空条件下机载激光海洋测深系统辨别力指数 D 与接收器FOV的关系,进一步得到在不同最大探测水深情况下的最优FOV。根据分析结果可以对机载激光测深系统的接收FOV进行优化,为我国研究新型的机载激光测深系统提供理论依据。

参 考 文 献

- 1 Li Jun, Gong Wei, Mao Feiyue, *et al.*. Dual field of view lidar for observing atmospheric aerosols over Wuhan[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1201001.
李 俊, 龚 威, 毛飞跃, 等. 探测武汉上空大气气溶胶的双视场激光雷达[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1201001.
- 2 Cao Nianwen, Yan Peng. Aerosol classifications method by lidar measurements[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1101003.
曹念文, 颜 鹏. 基于激光雷达探测的气溶胶分类方法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1101003.
- 3 Zhai Guojun, Wang Keping, Liu Yuhong. Technology of airborne laser bathymetry[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2014, 34(2): 72-75.
翟国君, 王克平, 刘玉红. 机载激光测深技术[J]. 海洋测绘, 2014, 34(2): 72-75.
- 4 Lu Yimin, Du Zhufeng, Huang Tiexia, *et al.*. Study on lidar receiver field of view[J]. Laser Technology, 1999, 23(1): 46-50.
卢益民, 杜竹峰, 黄铁侠, 等. 激光雷达FOV的研究[J]. 激光技术, 1999, 23(1): 46-50.
- 5 Dolin L S, Savel'ev V A. Characterization of back scattering signal at pulse radiation of turbid medium by a narrow directional light

- beam[J]. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 1971, 7(5): 505–510.
- 6 Dolin L S, Levin I M. *Theory of Underwater Vision (Reference Book)*[D]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991.
- 7 Kopilevich Y, Feigels V, Surkov A. Mathematical modeling of input signals for oceanographic lidar systems[C]. *SPIE*, 2003, 5155: 30–39.
- 8 Kopilevich Y I, Surkov A G. Mathematical modeling of the input signals of oceanological lidars[J]. *J Opt Technol*, 2008, 75(5): 321–326.
- 9 Dong Zhiwei, Zheng Liwei, Fan Guoxiang, *et al.*. Impaction of signal noise ratio for mapping accuracy of lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(s2): s228002.
董志伟, 郑立威, 范国祥, 等. 回波信噪比对激光雷达测绘精度的影响[J]. *光学学报*, 2014, 34(s2): s228002.
- 10 Feigels V I. Lidars for oceanological research: criteria for comparison, main limitations perspectives[C]. *SPIE*, 1992, 1750: 473–484.
- 11 Sakitt B. Indices of discriminability[J]. *Nature*, 1973, 241(5385): 133–134.
- 12 Feigels V I, Kopilevich Y I. Russian airborne lidar systems: comparative analysis and new ideas[C]. *SPIE*, 2003, 3761: 130–141.
- 13 Guenther G C. *Airborne Laser Hydrography: System Design and Performance Factors*[R]. Rockville: MD National Oceanic and Atmospheric Administration, 1985.
- 14 Feigels V I, Kopilevich Yu I. Particularities of hydro lidar missions in the Asia–Pacific region[C]. *SPIE*, 2014, 9262: 92620X.
- 15 Feigels V I. Prediction of SHOALS–3000 Performance in China[R]. *Optech International*, 2009.
- 16 Wang Quandong, Chen Weibiao, Lu Yutian, *et al.*. Analysis of relationship between parameter choice of airborne laser bathymetry and maximum penetrability[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(10): 1255–1260.
汪权东, 陈卫标, 陆雨田, 等. 机载海洋激光测深系统参量设计与最大探测深度能力分析[J]. *光学学报*, 2003, 23(10): 1255–1260.
- 17 Liu Xiqing. Map of the newwst bottom material types of China off shore continental shelf[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1992, 12(4): 11–20.
刘锡清. 最新中国近海陆架底质类型图[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1992, 12(4): 11–20.
- 18 Maffione R A, Dana D R. In-situ characterization of optical backscattering and attenuation of lidar applications[C]. *SPIE*, 1996, 2964: 152–162.
- 19 Wang Guifen, Cao Wenxi, Yang Dingtian. Variation in downwelling diffuse attenuation coefficient in the northern South China Sea[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2008, 26(3): 323–333.
- 20 Guenther Gary C, Thomas Robert W. Effects of propagation – induced pulse stretching in airborne laser hydrography[C]. *SPIE*, 1984, 489: 287–296.
- 21 Bufton Jack L, Hoge Frank E, Swift Robert N. Airborne measurements of laser backscatter from the ocean surface[J]. *Appl Opt*, 1983, 22(17): 2603–2618.
- 22 Carr D. *A Study of the Target Detection Capabilities of an Airborne Lidar Bathymetry System*[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2013.
- 23 Kung R T V, Itzkan I. Absolute oil fluorescence conversion efficiency[J]. *Appl Opt*, 1976, 15(2): 409–415.
- 24 Austin R W. *The Remote Sensing of Spectral Radiance from Below the Ocean Surface*[M]. London: Academic Press, 1974: 317–344.

栏目编辑: 何卓铭