

文章编号: 0253-2239(2003)10-1255-6

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*

汪权东 陈卫标 陆雨田 褚春霖

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 详细讨论了机载海洋激光测深系统最大测量深度与相关因子之间的关系, 并利用最小可探测信噪比为判据, 对机载海洋激光测深系统在白天和晚上工作进行了数值模拟, 通过比较最大测量深度与激光脉冲峰值功率、接收视场角、接收口径和光谱接收带宽等关系, 确定了系统的主要参量。以确定的参量建立的系统具有白天 49 m 和晚上 65 m 的最大测深能力, 可完全满足在沿岸带以及岛礁的测量要求。

关键词: 光学测量; 机载海洋激光测深系统; 视场角; 最大测深能力; 信噪比
中图分类号: TN249 文献标识码: A

1 引 言

机载海洋激光测深系统的发展已有三十多年的历史, 从二十世纪七八十年代的探索性系统, 如美国 AOL^[1]、澳大利亚的 WRELADS^[2], 到后来的 LADS MK-II^[3], SHOALS^[4] 等实用型系统的投入使用, 使得这项技术得到了充分发展。在我国由于三大河流的影响, 近海的水质较差, 因此机载海洋激光测深技术在我国一直没有很好发展。但近年来, 随着南海海洋开发的不断深入, 急需对水下地形、岛礁、暗礁以及船只难于进入的海区进行测绘, 而机载海洋激光测深系统是实现这种测绘的最经济、有效的手段^[5]。为此, 我们拟研制一套机载海洋激光测深系统, 实现高精度水下地形测绘。

机载海洋激光测深系统是一套综合的测量系统, 系统包括飞机姿态测定、定位、激光发射、扫描、接收等多个单元部件, 每个单元部件的性能都会影响到系统的最终指标, 因此系统单元部件的参量必须根据整体指标进行优化选择。机载海洋激光测深系统的测量能力主要体现在测点的空间分辨率、最大测深和深度精度, 如 LADS MK-II 已经将激光的发射重复频率提高到 900 Hz, 可以实现最高 2 m×2 m 的网格点分布; 由于多波束声纳技术的发展, 要求机载海洋激光测深系统获得水深精度必须同样满足国际海道测量

规范 IHO-44 的要求, 即对水深浅于 30 m 的精度小于 0.3 m; 关于最大测深能力, 目前国际上已有系统的指标: $kD_{\max} = 3 \sim 5$ (白天为 3~4, 晚上为 4~5), 其中 k 为海水漫衰减系数, D_{\max} 为最大水深。这些新的要求, 使得国际上对机载海洋激光雷达系统的指标也有大幅度提高。因而, 在拟研制的系统中, 激光发射的重复频率将提高到 1 kHz, 以满足空间分辨率的需要; 水深精度将达到 0.3 m, 满足 IHO-44 标准; 在海水光衰衰减系数为 0.2 m^{-1} 时, 要求系统能够达到 50 m 的穿透能力。

针对系统的指标, 本文在综合分析机载海洋激光测深系统参量间关系的基础上, 采用最小可探测信噪比为判据, 分析拟研制系统的最大测深能力; 分别从白天、晚上以及不同海水参量进行数值模拟, 对系统参量进行优化选择, 为系统设计提供理论参考。

2 分析基础

影响系统测量能力主要来自系统的内部参量和外部测量条件, 系统内部参量主要包括激光波长、激光扫描天顶角、发散角、激光脉冲的峰值功率、接收光学口径、接收视场角、系统接收光学带宽、探测器的灵敏度等, 外部条件为飞机的航高、大气能见度、海况、水质参量以及海底反射特性, 其中内部参量应该根据外部测量条件进行适当修改。激光束在大气-海洋界面的传输会影响激光的透过率和深度测量精度。根据菲涅耳定律, 激光入射角小于 30° , 平静海面的反射率在 2% 左右。但是, 海面经常由于

* 国家 863(2001AA613010) 资助课题。

E-mail: wbchen@mail.shcnc.ac.cn

收稿日期: 2002-08-15; 收到修改稿日期: 2002-10-16

风浪导致各种泡沫、白泡等白沫,使得海面的反射率大大提高,因此对存在大量白沫的海况下,激光在海气界面的透过率会降低。但在低海况和远离海岸的情况下,白沫的影响是可以忽略的。实际海表可看成是破碎镜面或是波面的反射,反射系数主要与入射角和风速有关。Cox 和 Munk 最早提出了基本的海浪斜率谱统计模型^[6],Bufton 等详细分析了海浪斜率谱与激光反射系数的关系^[7],并得出:在有海浪的情况下,入射角对海面反射影响较大,在入射角小于 20° 时,反射系数小于 3%,但大于 30° 时,反射系数高达 15%。一般的机载海洋激光测深系统的扫描角在 20° 以内(本文系统中设置为 15°),因此为了简化分析模型,海表反射率假设为 0.02。大气能见度,特别是低云、雾也会影响激光在空中的透过率,因此选择晴朗的天气进行测量,本文假设晴空大气能见度为 23 km。另外,飞机航高为 500 m,海底的反射系数为 0.1。

目前,用于机载海洋激光测深系统的发射波长集中在海水的窗口——蓝绿波段,Feigels 比较了几个不同波长对机载海洋激光测深系统的影响,认为对大洋水来说, $0.490 \mu\text{m}$ 最佳,对沿岸水来说, $0.511 \mu\text{m}$ 比 $0.532 \mu\text{m}$ 波长对机载海洋激光测深系统更加有利^[8]。鉴于目前激光技术的限制,另外在这个波段范围,最成熟的激光器为倍频 Nd:YAG 激光器 ($0.532 \mu\text{m}$),因此在系统中选用激光二极管抽运的倍频 Nd:YAG 脉冲激光器。

制约脉冲激光水中穿透能力最主要的因素为海水的混浊度,以海水光束衰减系数 (c) 来度量,但在实际使用中,常常以海水的漫衰减系数 k 作参考。根据俄罗斯在太平洋大量现场数据的基础上,得到 c 和 k 的经验关系为 $k = 0.2c \pm 0.02$ ^[9]。而在海洋调查过程中,一般采用透明度盘来判断海水的透明度。Liu 根据我国黄渤海的现场调查数据得到了透明度盘深度 (D_{disk}) 与光束衰减系数间的关系为 $cD_{\text{disk}} = 4 \sim 5$ ^[10]。我国南海沿岸的透明度盘深度大都在 9 m 以上,因此对应的 c 和 k 分别为 0.45 m^{-1} 和 0.11 m^{-1} 左右。在本文数值模拟中,将选用不同的海水参量进行模拟比较。

扫描天顶角主要影响机载海洋激光测深系统的测带宽度和深度精度,Guenther 分析了不同扫描角对系统的测量误差,并得出在 $15^\circ \sim 20^\circ$ 扫描角引起的深度偏差最小^[11];另外,过小的扫描角使得系统难于避免海表的强烈反射,而过大的扫描角会造成信号强度减弱。为此,在本系统中,扫描角选择在 15° 。

机载海洋激光测深系统接收到的信号主要包括海底反射信号 P_b 、水体的后向散射信号 P_w 、天空背景辐射 P_s 以及大气的后向散射信号 P_a ,可以由下式表示:

$$P = P_b + P_w + P_s + P_a, \quad (1)$$

其中 P_b, P_w 可以表示为

$$P_{i=b,w} = \frac{P_T A_r (1 - \rho_s)^2 \eta G \exp(-2\tau_a) \exp(-2hk) m \theta_r}{(nH + h)^2}, \quad G = \begin{cases} \frac{1}{\pi} \rho_b, & i = b \\ \frac{1}{n} \frac{\tau C}{2} \beta(\pi), & i = w \end{cases} \quad (2)$$

式中 P_T 为激光脉冲峰值功率, A_r 为望远镜接收面积, η 为系统光学效率, ρ_s, ρ_b 分别为海表、海底的反射系数, τ_a 为大气光学厚度, $\beta(\pi)$ 为海水后向散射系数, n 为海水折射率, h 为水深, H 为飞机航高; $\tau C/2$ 为距离分辨率,其中 C 为光速, τ 为接收器的积分宽度; m 为与系统接收视场角 θ_r 相关的因子, m 的取值采用 Feigels 提出的模型^[12],他的模型给出了海水散射系数、视场角与多次散射的关系。当 θ_r 足够大时,系统衰减系数接近 k ,在 θ_r 很小时,系统衰减系数接近 c ,因此 θ_r 的合理选择可以大大提高系统性能。

P_s 为天空背景辐射噪声,其值为 $P_s =$

$I_s A_r \Delta\lambda \Omega$,其中 I_s 为背景辐照度, $\Delta\lambda$ 为光谱接收带宽, Ω 为接收立体角。由于采用距离选通技术,激光的空气后向散射基本可以忽略,但是海面反射激光在空气的散射信号也会成为探测噪声,这部分影响是非常小的,为了简化分析,这里假设 $P_a = 0$ 。表 1 为本文数值模拟采用的系统参量,其中有些参量可变。

对机载海洋激光测深系统进行优化设计,需要寻找一个评判准则,信噪比是最常用的评判准则。针对信号和噪声的分布规律一致的情况下,特别像背景噪声,热噪声等与信号无关的噪声,利用信噪比准则评估一个系统是十分有效的。Feigels 认为对激光雷达系统来说,特别是距离选通的成像激光雷达,当信号

散粒噪声或者量子光子噪声占主要噪声的情况下,采用 D 因子来代替信噪比可以更好地评估激光雷达系统的性能,因为这时信号和噪声的分布规律是不一致的^[13]。对机载激光测深系统来说,噪声源主要是背

景噪声、探测器的热噪声、前置放大器噪声等,而信号的散粒噪声并不是最主要噪声,因此,笔者认为采用因子 D 与采用系统信噪比是等同的,而且信噪比更加简单、直观。

Table 1 Parameters for the simulation of airborne laser bathymetry

P_T /MW	2	H /m	500
A_r /m ²	0.05	n	1.34
$\Delta\lambda$ /nm	0.5	ρ_s	0.02
θ_r /mrad	10~50, variable	ρ_b	0.1
η	0.3	τ_a	0.08
τ /ns	10	$\beta(\pi)/m^{-1}s^{-1}$	10^{-4}
Nadir angle	15°	k	0.08~0.2 m ⁻¹ , variable
Detector	Shallow: Avalanche Photodiode Deep: Photomultiplier tube	I_s	0.014 mW · sr ⁻¹ · cm ⁻² · nm ⁻¹

机载海洋激光测深系统的信噪比可以由下式表示:

$$R_{SN} = \begin{cases} P_b s(\lambda) / \sqrt{2eB[s(\lambda)(P_b + P_s) + i_d] + 4kTB/R}, & \text{PMT} \\ P_b s(\lambda)M / \sqrt{2eBM^2 F[s(\lambda)(P_b + P_s) + i_d] + 4kTB/R}, & \text{APD} \end{cases} \quad (3)$$

式中 B 为探测器电子学频宽, i_d 为探测器暗电流, M 为雪崩二极管(APD)增益, F 为 APD 噪声过剩因子, $s(\lambda)$ 为探测器的灵敏度, P_b 、 P_s 分别为背景和信号噪声功率, k 为波尔兹曼常量, T 为探测器工作温度, R 为负载电阻。可以看出,光电倍增管(PMT)和雪崩二极管的信噪比是不同的,光电倍增管的 R_{SN} 主要由其散粒噪声、暗电流和热噪声决定的;而对雪崩二极管来说,探测器的增益会增加额外噪声,因此需要合理选择探测器的工作电压,使之工作在最佳增益状态。

对采用时间间隔测量的激光测距系统来说,系统信噪比的取值需要根据探测概率来确定。信号的探测概率可以表示为

$$P_d = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{R_{TN}} \exp\left[-\frac{(t - R_{SN})^2}{2}\right] dt,$$

因此探测概率的取值又与阈值噪声比 R_{TN} 有关。如虚警概率取 10%, 在 $R_{TN} = 3$ 时的探测概率大于 90%。显然,这样的探测概率和虚警概率是不够的。机载激光测深系统的回波波形一般采用高速数字化来采样,通过观测整个波形来确定海底的位置。由于具有一定的先验知识(如根据船测资料可以知道海底的大致深度),对信噪比的要求大大降低,只要海底的反射脉冲高于背景噪声起伏即可。在某些作者的模拟过程中,选择 $R_{SN} = 1.5$ 作为最小可探测信噪比,但在本文中,考虑到模拟计算忽略了诸如海浪影响、探测器热噪声等因数,把海底可探测的最小信噪比定义为 3。在下面的模拟过程中,选择一定内部和外部参量,计算某一

深度的信噪比,并把 $R_{SN} = 3$ 所对应的深度假定为最大测量深度 h_{max} 。

由于海水对激光的强烈衰减,使得近海表与水下几十米的信号动态范围差 6~7 个量级,而一般高速数字化仪的动态范围只有 2~3 个量级,因此无法满足测量要求。采用分离通道法(如图 1),即海底回波信号由分束镜分成两路,每路结合各自最佳的 θ_r 和 $\Delta\lambda$, 这样可以有效地减小每个通道信号的动态范围。利用灵敏度相对较低的雪崩二极管和较小接收视场角测量浅水回波,利用高灵敏度的光电倍增管配合大的接收视场角测量深水回波,从而使每个探测器的信号动态范围与波形数字化仪相匹配。为了兼顾两个通道的测量信号,必须对分束镜的分束比进行优化。如果 k 取 0.2 m⁻¹, 并利用系统的其它参量进行模拟计算,在分束比为 0.2 : 0.8(浅水 : 深水) 时,浅水通道可以确保获取 5 m 以下水深信息。鉴于南海沿岸水的 k 基本

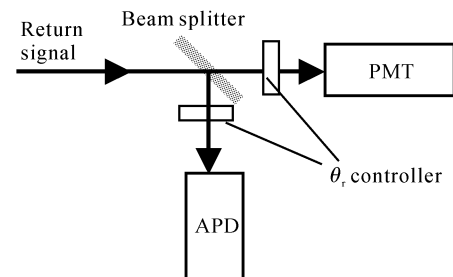


Fig. 1 Block diagram of multi-channel receiver of airborne laser bathymetry. PMT: photo multiplier tube; APD: avalanche photodiode, θ_r : angle of field-view

小于 0.2 m^{-1} , 因此该分束比可以运用在南海测量中。由于本文的重点是分析系统的最大穿透能力, 对浅水通道将不作详细分析; 另外深水通道利用距离选通和空间零阻滤波器技术, 可有效避开了海表的强烈反射, 因此光电倍增管的疲劳、后脉冲等效应也忽略不计。

3 数值模拟

系统期望的最大测深指标为: 在 $c=0.2 \text{ m}^{-1}$ 时 (或 $k \approx 0.08 \text{ m}^{-1}$), 具有 50 m 的最大测深能力。海底信号能否准确测量, 关键取决于信噪比的大小。图 2 计算了发射激光峰值功率为 2 MW , 海水漫衰减系数为 0.08 m^{-1} , 接收带宽 0.5 nm , 在太阳辐射背景条件下得到的不同水深的系统信噪比随接收口径和视场角的变化。 R_{SN} 基本上随 d 增大而增大, 但变化并不明显; 同样增大 θ_r 也可略微提高系统 R_{SN} ; 另外, d

和 θ_r 对深水的效果比浅水明显, 这说明浅水海底信号的强度已经远大于背景噪声, 因此对浅水来说 (小于 20 m), 即使在白天工作, 也能有效地获取海底信号, 也即系统近似工作在信号引起的散粒噪声限下; 但随着深度的增加, 海底反射信号已经与背景噪声相当或者更小, 系统退化到背景噪声限下工作, 因此如果没有很好的背景抑制措施, 无法有效获取海底信号。图 3 比较了不同接收光谱带宽对最大测量深度的影响。 $\Delta\lambda$ 越窄, 系统的最大测深能力随之增加; 对相同 $\Delta\lambda$, h_{max} 随 d 增加而增加。因而, 与其增加系统接收口径, 还不如有效地减小接收的光谱带宽, 但是在减小干涉滤光片的光谱带宽的同时, 也会减小信号透射率。与目前国内外系统的比较, 系统的接收带宽选择在 0.5 nm , 图 3 中看出, 采用 25 cm 接收口径, 系统在白天的最大测深能力接近 49 m 。

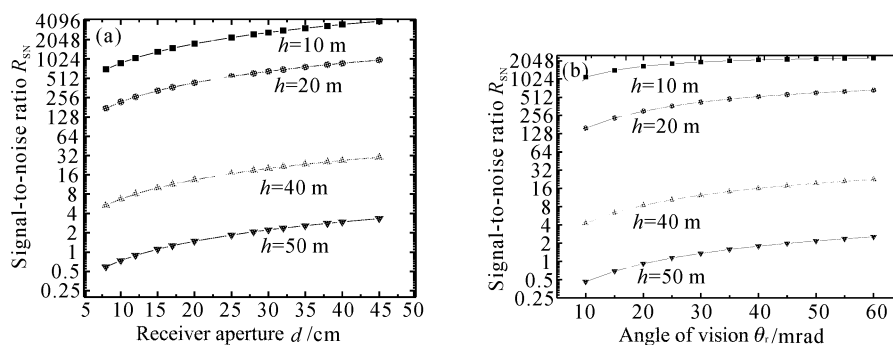


Fig. 2 Change of signal-to-noise ratio with the receiver area (a) and angle of field-view (b), the parameters in the simulation are used as follows: (a) $P_T=2 \text{ MW}$, $k=0.08 \text{ m}^{-1}$, $\Delta\lambda=0.5 \text{ nm}$, $\theta_r=40 \text{ mrad}$; (b) $d=240 \text{ mm}$

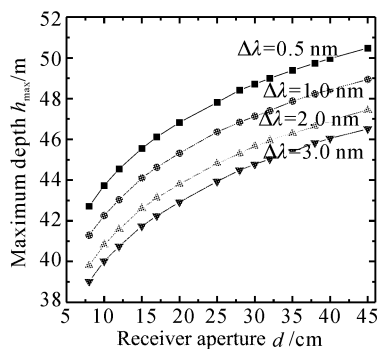


Fig. 3 Relationship between maximum penetrability and receiver area under different receiver spectral bandwidth, the parameters in the simulation are used as follows: $P_T=2 \text{ MW}$, $k=0.08 \text{ m}^{-1}$, $\theta_r=40 \text{ mrad}$

系统在白天工作时, 接收带宽是影响信噪比的最主要的指标, 激光发射功率和接收视场角对最大测深能力也有一定影响。在太阳背景辐照下, 飞机高度

500 m (与下面计算条件相同) 的条件下, 模拟了系统在白天的测深能力与两者的关系。图 4(a) 为不同水质参量下, h_{max} 与 P_T 的关系。 h_{max} 随 P_T 的增加而增加, 但是贡献非常有限, 特别是在水质较差的情况。随着海水透明度的增加, h_{max} 迅速增加。 h_{max} 随 θ_r 的变化 [见图 4(b)], 存在类似的现象, 在混水条件下, 增加 θ_r 几乎不增加 h_{max} , 随着 k 值减小, θ_r 的作用逐渐明显。因而可说明, 对白天工作, 增加激光功率和接收视场角, 对系统的测深能力的提高有限; 在一定水质和背景噪声下, 增加激光发射功率, 可增加信噪比; 但增大接收视场角, 噪声也会随之增大, 在背景噪声限下, 可能会导致信噪比的降低; 水质参量对 h_{max} 的影响远大于其它因子。鉴于机载条件的限制, 高重复频率的大功率全固态激光器仍有一定技术难度, 激光脉冲的峰值功率选择为 2 MW 。

从上述的数值分析看出, 太阳的背景辐射是系

统白天工作的最主要障碍之一。图 5 比较了不同天气情况下,系统的最大测深能力随接收视场角的变化。随着背景噪声的减弱, h_{\max} 随 θ_r 增加越来越大。如 $\theta_r=50$ mrad,白天和晚上的 h_{\max} 相差近 16 m。图 6 为晚上工作时(黑夜状况下),最大探测深度与激光脉冲峰值功率、接收孔径的关系。可以看出,晚上

工作时[见图 6(a)], h_{\max} 相对于白天的情况[见图 4(a)]有大幅度增加。同样,增大接收口径也会大大增加 h_{\max} ,因此,机载海洋激光测深系统在晚上工作,增加激光脉冲峰值功率、接收孔径和接收视场角,都可以大大提高系统的测深能力。

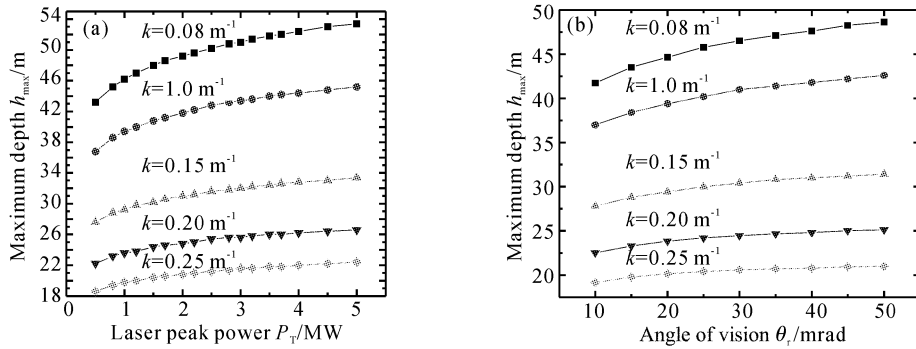


Fig. 4 Change of maximum penetrability with (a) peak power and (b) angle of vision under the different diffuse attenuation coefficients in daytime. The parameters in the simulation are used as follows: (a) $k=0.08 m^{-1}$, $\Delta\lambda=0.5 nm$, $d=240 mm$, $\theta_r=40 mrad$; (b) $P_T=2 MW$

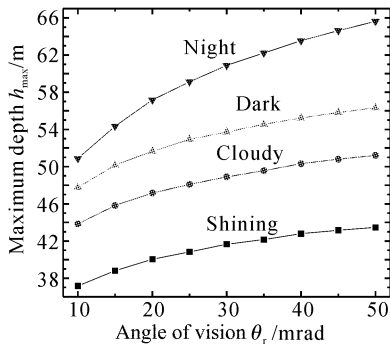


Fig. 5 Relationship between maximum penetration depth and angle of vision under the different background. The parameters in the simulation are used as follows: $P_T=2 MW$, $k=0.08 m^{-1}$, $\Delta\lambda=0.5 nm$, $d=240 mm$

结论 本文通过讨论影响机载海洋激光测深系统最大测量深度的因子之间的关系,采用最小可探测信噪比为判据,详细分析了机载海洋激光测深系统在白天和晚上工作时,系统的最大测深能力。通过比较最大测量深度与激光脉冲峰值功率、接收视场角、接收口径和光谱接收带宽等关系,结合目前激光技术等发展的限制,确定了以下的主要系统参量:

- 激光脉冲峰值功率: 2 MW;
- 接收口径: 240 mm;
- 光谱接收带宽: 0.5 nm;
- 系统接收视场角: 50 mrad(最大);
- 采用这样参量的系统,结合表一中的其它外部

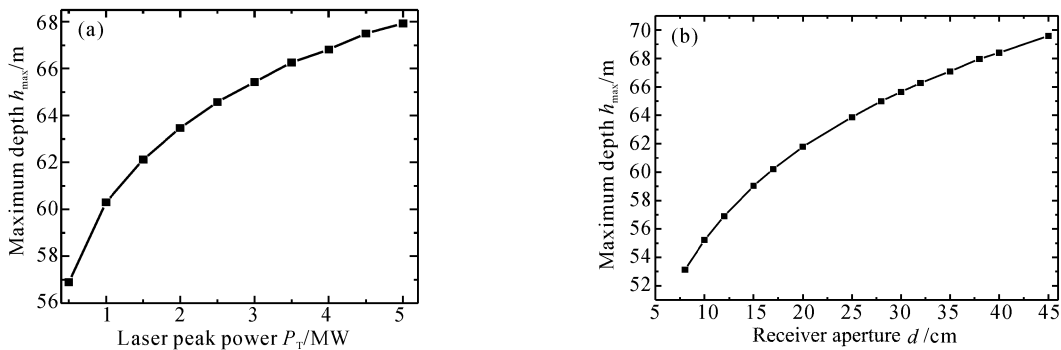


Fig. 6 Variability of maximum penetrability to (a) peak power and (b) receiver area in night time. The parameters in the simulation are used as follows: (a) $k=0.08 m^{-1}$, $\Delta\lambda=0.5 nm$, $d=240 mm$, $\theta_r=40 mrad$; (b) $P_T=2 MW$

测量条件,可以得到拟研制的机载海洋激光雷达系统的最大测深能力为

白天:49 m,对应的 $kD_{\max}=3.9$;

晚上:65 m,对应的 $kD_{\max}=5.2$;

可以看出,系统的最大测深能力与目前国际上存在的系统指标基本相当,而具有这样指标的系统可以实现我国南海近海岸、以及岛屿附近暗礁等测量的要求。

参 考 文 献

- 1 Hoge F E, Swift R N, Frederick E B. Water depth measurement using an airborne pulsed neon laser system. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(6):871~883
- 2 Penny M F, Abbot R H, Phillips D M *et al.*. Airborne laser hydrography in Australia. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(13):2046~2058
- 3 Sinclair M. Australians get on board with new laser airborne depth sounder. *Sea Technol.*, 1998, (6):19~25
- 4 Guenther G C, Brooks M W, LaRocque P E. New capabilities of the SHOALS airborne lidar bathymeter. *Rem. Sens. of Environ.*, 2000, **73**:247~255
- 5 Irish J L, White T E. Coastal engineering applications of high-resolution lidar bathymetry. *Coastal Engng.*, 1998, **35**(1,2):47~71
- 6 Cox G, Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter. *J. Opt. Soc. Am.*, 1954, **44**(11):838~850
- 7 Bufton J L, Hoge F E, Swift R N. Airborne measurements of laser backscatter from the ocean surface. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(11):2603~2618
- 8 Feigels V I, Kopilevich Yu I. Optimization of laser wavelength in oceanographic lidars. *Proc. SPIE*, 1996, **2964**:128~137
- 9 Heifrean K C, Li Wu, Zhang Xingmei. *Optics Ocean and Atmosphere*. Ocean University of Qingdao Press, 1991, 193
- 10 Liu Z S. Estimate of maximum penetration depth of lidar in coastal water of China sea. *Proc. SPIE*, 1990, **1302**:655~661
- 11 Guenther G C, Thomas R W L. Effects of propagation-induced pulse stretching in airborne laser hydrography. *Proc. SPIE*, 1984, **489**:287~296
- 12 Feigels V I. Lidars for oceanological research: criteria for comparison, main limitations perspectives. *Proc. SPIE*, 1992, **1750**:473~484
- 13 Feigels V I, Kopilevich Yu I. Russian airborne lidar systems: comparative analysis and new ideas. *Proc. SPIE*, 1999, **3761**:130~141

Analysis of Relationship Between Parameter Choice of Airborne Laser Bathymetry and Maximum Penetrability

Wang Quandong Chen Weibiao Lu Yutian Chu Chunlin

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 15 August 2002; revised 16 October 2002)

Abstract: The relationship between parameters of airborne laser bathymetry (ALB) and its maximum penetration depth is discussed. The minimum detectable signal-to-noise ratio is taken as the criteria of choosing parameter. The performance of ALB in daytime and nighttime is evaluated, and the relationship between maximum penetration depth and transited peak power, receiver aperture, angle of field-view, and spectral bandwidth is demonstrated. The ALB system with the chosen parameters has a penetrability of 49 m in daytime and 65 m in nighttime. It is matched the requirement of costal charting and rack detection.

Key words: optical measurement; airborne laser bathymetry; angle of field-view; maximum penetration depth; signal-to-noise ratio