

机载激光测深唯像雷达方程

朱晓 杨克成 徐启阳 李再光

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要 依据机载蓝绿激光测深脉冲的传输过程, 将激光束在海水中向下和向上传输视为二个不同的传输过程, 并利用水下激光束传输唯像模型和水下有限尺寸光源的距离定律, 建立了机载激光测深唯像雷达方程, 该方程可更精确地计算机载激光测深的能力和较全面地分析影响机载激光测深能力的诸因素。

关键词 激光海水传输, 水下有限尺寸光源

1 引言

机载激光测深原理是通过探测飞机上发射的蓝绿激光脉冲在水面和水底反射信号的时间差, 测量出海水的深度。因此, 探测出海底蓝绿激光脉冲返回信号是机载激光测深的关键。激光雷达方程是计算海底激光回波能量和确定机载激光测深系统参数的根据。现有的激光雷达方程要么对激光回波能量的估算比较粗糙, 无法对机载测深系统参数进行设计; 要么就是利用 Monte Carlo 模拟方法来计算激光回波能量, 但这又过于复杂。Hickman 和 Levis 已经证明机载激光测深能力不仅与海底反射系数和海水衰减系数有关, 而且在很大程度上依赖于海水的散射系数与衰减系数之比^[1]。本文依据机载蓝绿激光脉冲的传输过程, 将激光从海面向海底的传输与海底向海面的传输视为二个传输过程, 并利用水下激光束传输唯像模型和水下有限尺寸光源的距离定律, 建立了机载激光测深唯像雷达方程。该雷达方程除了和一般的雷达方程包括飞机高度、海水衰减系数、接收视场、接收孔径等变量外, 还包括海水散射系数与衰减系数之比、折射率等变量。这使得该方程可更精确地计算机载激光测深的能力和较全面地分析影响机载激光测深能力的诸因素。

2 雷达方程的建立

机载激光测深信号的传输过程: (1) 飞机到海面之间空气中的传输; (2) 空气与海水的界面传输; (3) 海面到海底的传输; (4) 海底反射; (5) 海底到海面的传输; (6) 海水与空气的界面传输; (7) 海面到飞机之间空气中的传输; (8) 接收光学镜头到光电探测器。在这些传输过程中, 我们作以下假设: (1) 飞机到海面之间和海面到飞机之间空气中的传输是等效的, 都以空气对蓝绿激光的衰减系数 α_1 描述; (2) 空气与海水的界面传输同水与空气的界面传输是

等效的,都以海水对蓝绿激光的透过率 T 描述;(3)经海底反射后的激光脉冲为漫射光,且在机载接收视场范围内为均匀分布。在实际的机载激光脉冲传输过程中,由于空气和空-水界面(或水-空界面)对蓝绿激光的衰减同海水比起来要小得多,因而,激光在海水中的传输是最重要的物理过程。

本文将“海水中光束传播唯像模型”^[2]引入机载激光测深雷达方程,用来描述海面到海底的激光束传输过程。“海水中光束传播唯像模型”的特色在于:(1)海水散射系数与衰减系数之比在大于、等于 0 到小于、等于 1 的全范围内该模型都适用;(2)该模型计算结果与 Duntley 实验结果非常吻合;(3)便于分析和计算。

我们已假设经海底反射后的激光脉冲为漫射光,其理由有:(1)准直激光束在海水中传输 1.4 个衰减长度(衰减长度的个数是海水衰减系数与海水深度的乘积)后,准直光和散射光的光通量各占一半^[3];(2)准直激光束在海水中传输 11.2 个散射长度(散射长度的个数是海水散射系数与海水深度的乘积)后,就全部成为漫射光,而且光通量的分布与角度无关^[2];(3)经粗糙海底反射后,进一步加强了海水中激光的漫射效应。可以认为,被激光照明的海底在机载光学接收系统的视场内是一水下有限尺寸漫射光源,该光源传输到机载接收系统的光能需通过水下有限尺寸光源的距离定律进行计算,且漫射光在水中向上传输时的海水衰减系数以漫射系数 k 描述。

2.1 激光束从海面到海底的传输过程

根据 Paul F. Schippnick 的《海水中光束传播唯像模型》,我们可以得到在水深 R_w 处、 γ 角内(参见图 1),激光向下传输的光功率为

$$P(x, R_w) = P_1 [F_s(x, R_w)(\Phi_2 - \Phi_1) + \Phi_1] \quad (1)$$

式中, $P_1 = P_0 e^{-\alpha_1 R_w} T$; $\Phi_1 = e^{-\alpha R_w}$; $x = (1 - \cos\gamma)/2$; P_0 为机载激光器发射功率; R_w 为飞机高度; R_w 为海水深度; α_1 为大气衰减系数; α 为海水衰减系数; a 为水吸收系数; T 为水面透过率;

$$\Phi_2 = e^{-\alpha R_w} \frac{e^{sR_w} + 1}{e^{sR_w} + e^{sR_w}}; \quad g = g_0 [1 - (\frac{s}{\alpha})^{11.2}]; \quad g_0 = 0.17; \tau_0 = 11.2/s;$$

s 为海水散射系数。

(1) 式中 Φ_1 表示海水中准直光束在海深 R_w 处的光通量; Φ_2 表示海水中散射光与准直光在水深 R_w 处的总光通量,显然它是衰减系数和 s/α 的函数; $F_s(x, R_w)$ 为在水深 R_w 处、 γ 角以内,非准直光在整个水下光场中所占的比例。具体表达式为

$$F_s(x, R_w) = \frac{(x/x_0)^{1-B}}{1 + \frac{1-B}{C - (1-B)} [1 - (1/x_0)^{1-B-C}]} \quad x \leq x_0$$

或

$$F_s(x, R_w) = \frac{1 + \frac{1-B}{C - (1-B)} [1 - (x/x_0)^{1-B-C}]}{1 + \frac{1-B}{C - (1-B)} [1 - (1/x_0)^{1-B-C}]} \quad x \geq x_0$$

式中, $x_0 = 0.03$; $C = 1.5$;

$$B = \frac{B_0 B_1}{(B_0 - B_1) + B_0 e^{b_1 R_w}}$$

式中, $b_1 = 0.33(1-g)s$; $B_0 = 0.865$; $B_1 = 3.25$ 。

在机载激光雷达测深系统中,重要的是机载光学接收系统视场角 ω (ω 为半视场角) 以内的

激光辐射功率。由(1)式可得,当激光束传输到海底时,视场以内的光功率为

$$P(\omega, R_w) = P_0 e^{-\alpha_1 R_w} T [F_s(x, R_w) (\Phi_2 - \Phi_1) + \Phi_1] \quad (2)$$

从图 1 可知

$$R_w \operatorname{tg} \gamma = (R_s + R_w/n) \operatorname{tg} \omega$$

所以

$$\begin{aligned} x &= \frac{1}{2} (1 - \cos \gamma) \\ &= \frac{1}{2} \left\{ 1 - \cos \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{1}{n} + \frac{R_s}{R_w} \right) \operatorname{tg} \omega \right] \right\} \end{aligned}$$

n 为海水折射率。

海底被激光照明的部分为一有限尺寸光源,此光源的半径 R 由机载光学接收系统的视场 ω 决定:

$$R = \left(R_s + \frac{R_w}{n} \right) \operatorname{tg} \omega$$

此有限尺寸光源的亮度 L 为

$$L = \frac{P(\omega, R_w)}{(\pi R)^2} r_s \quad (3)$$

式中, r_s 为海底反射率。

2.2 水下有限尺寸光源的距离定律(接收面在空中)

如图 1 所示,设机载激光接收光学系统的有效口径为 D ,则有效接收面积为 $A_s = \pi D^2/4$;水下光源的半径为 R ,亮度为 L ,在水深 R_w 处(称 R_w 为真实深度);考虑到水介质折射率的影响,该光源的视在深度为 R_w/n (即不考虑折射率的影响,入射光线的延长线)。可以证明,在真实深度处水下光源的半径和在视在深度处光源的半径在机载测深情况下是相等的。

在水下有限尺寸光源中取一面元 dS ,该面元向机载激光接收光学系统所张的立体角为 $d\Omega$,则受照面 A_s 处的光通量为

$$d\phi = L dS \cos \theta' d\Omega \quad (4)$$

式中

$$dS = y d\beta dy; \quad d\Omega = \frac{A_s \cos \theta'}{(R_w / \cos \theta')^2}$$

A_s 为 $d\Omega$ 在水面截获的面积;

从图 1 可得

$$\cos^4 \theta' = \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)^2 + 2 \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \frac{1}{n^2} \frac{(R_s + R_w/n)^2}{(R_s + R_w/n)^2 + y^2} + \frac{1}{n^4} \frac{(R_s + R_w/n)^4}{[(R_s + R_w/n)^2 + y^2]^2} \quad (5)$$

将(5)式代入(4)式,积分整理后得

$$\phi = \frac{\pi L A_s}{n^2} \left[\left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \operatorname{tg}^2 \omega + \frac{2}{n^2} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \ln(1 + \operatorname{tg}^2 \omega) + \frac{1}{n^4} \sin^2 \omega \right] \quad (6)$$

当 $n = 1$ 时, $\phi = \pi L A_s \sin^2 \omega$, 此即为空气中有限尺寸光源的距离定律^[4]。

2.3 机载激光测深唯像雷达方程的建立

将(3)式代入(6)式,同时考虑到海底漫射光在海水中以漫射系数 k 指数衰减, k 的取值为

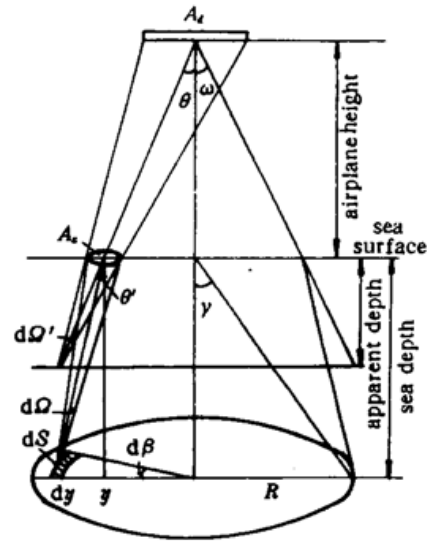


Fig. 1 Schematic diagram showing the underwater finite size source distant law

$$k = a + g_0[1 - (s/\alpha)^{11.2}]s \tag{7}$$

到此,我们可得到机载激光测深唯像雷达方程的最终表达式

$$P = P_0 e^{-2\alpha_1 R} \cdot T_1^2 [F_s(x', R_w)(\Phi_2 - \Phi_1) + \Phi_1] e^{-kR} \cdot T_2 \times \frac{1}{n^2} [(1 - \frac{1}{n^2}) + \frac{2}{n^2}(1 - \frac{1}{n^2}) \ln(1 + \text{tg}^2 \omega)]^{1/2} + \frac{1}{n^4} \cos^2 \omega T_1 f \tag{8}$$

式中, T_1 为接收光学系统的透过率; f 为光电倍增管的量子效率。

3 分析与讨论

为便于分析与计算,取机载激光测深系统及海水水质的典型参数如下:

飞机飞行高度	500 m;	激光发射功率	2 MW;
光学接收系统全视场角	50 mrad;	光学接收系统透过率	45%;
光电倍增管的量子效率	10%;	水面透过率	98%;
水底反射率	1 %;	海水折射率	1.34;
海水散射系数与衰减系数之比	0.6;	海水衰减系数:	0.3 m ⁻¹ ;
空气衰减系数	0.17 km ⁻¹ 。		

3.1 海水衰减系数对海底激光回波能量的影响

图 2、图 3 是机载激光测深系统在典型条件下利用机载激光测深唯像雷达方程计算出的激光回波能量与所探测的海水深度在不同水质条件下的关系。图 2 的横轴是所探测到的海水深度,单位为 m。纵轴为对数坐标,是接收到的海底激光回波功率,单位为 W。图 3 的横轴是探测到的海水深度,单位以无量纲参数——衰减长度的个数表示,纵轴同图 2。图 2、图 3 中 5 条曲线分别对应的海水衰减系数:0.15 m⁻¹(曲线 1),0.2 m⁻¹(曲线 2),0.25 m⁻¹(曲线 3),0.3 m⁻¹(曲线 4),0.35 m⁻¹(曲线 5)。对比图 2、3 可知,当横轴直接以米为单位表示海水深度时,在同一深度,不同的海水衰减系数对探测的激光回波能量影响很大;而当横轴以衰减长度的个数表示海水深度时,在同一衰减长度的个数,不同的海水衰减系数对探测的激光回波能量影响很小。因此,可探测到的衰减长度的个数是衡量机载蓝绿激光测深系统探测能力的重要指标。

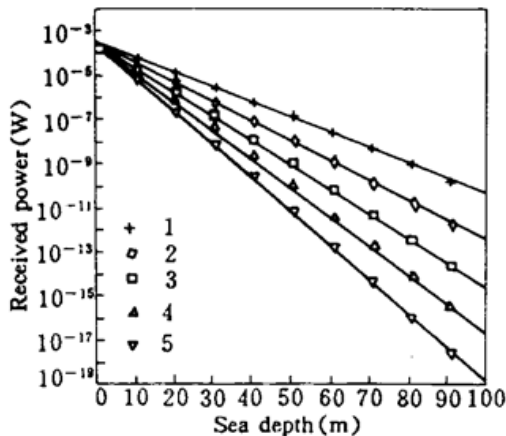


Fig. 2 The dependance of the attenuation coefficient of sea water on the received laser echo power

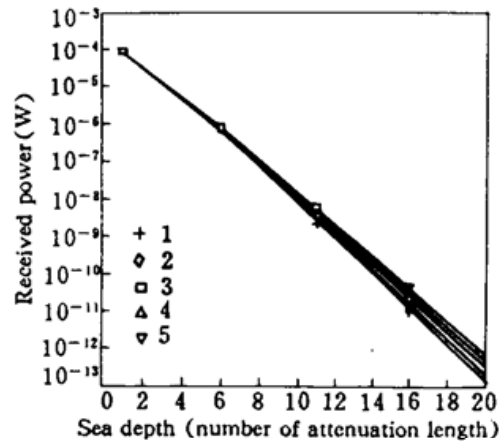


Fig. 3 The dependence of the attenuation coefficient of sea water on the the received laser echo power (the sea depth unit is the numbers of attenuation length)

3.2 海水散射系数与衰减系数之比对海底激光回波能量的影响

图 4 表示在典型参数条件下,海水散射系数与衰减系数之比对海底激光回波能量的影响。图 4 中,曲线 1, 2, 3, 4, 5 分别对应于海水散射系数与衰减系数之比为 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 时的情况,纵、横坐标同图 3。可以看出,在海水衰减系数和海水深度相同的条件下,海水散射系数与衰减系数之比越大,海底激光回波能量就越强,且随着水深度的增加,海底激光回波能量相差越来越大。因此,对机载蓝绿激光测深系统而言,水质参数除海水的衰减系数外,海水散射系数与衰减系数之比也是非常重要的。图 5 中四组曲线表示不同的海水衰减系数和海水散射系数与衰减系数之比对海底激光回波能量的影响。第一组曲线表示,当海水散射系数与衰减系数之比为 0.1 时,不同的衰减系数(取值同图 4)对海底激光回波能量的影响。第二、三、四、五组曲线的海水散射系数与衰减系数之比取值分别为 0.3, 0.5, 0.7, 0.9。可以看出,当横轴以衰减长度的个数表示海水深度时,在同一海水散射系数与衰减系数之比,不同的海水衰减系数对探测的激光回波能量影响很小,但不同的海水散射系数与衰减系数之比对回波能量的影响就很大。因此,可以得出结论,当海水深度以衰减长度的个数表示时,海水散射系数与衰减系数之比是衡量机载蓝绿激光测深系统探测能力的重要指标。

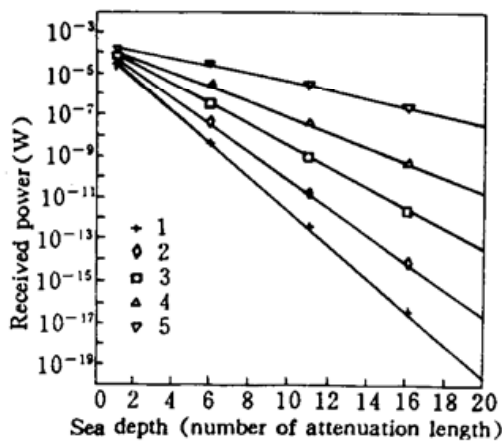


Fig. 4 The dependence of the albedo of sea water on the the received laser echo power (the sea depth unit is meter)

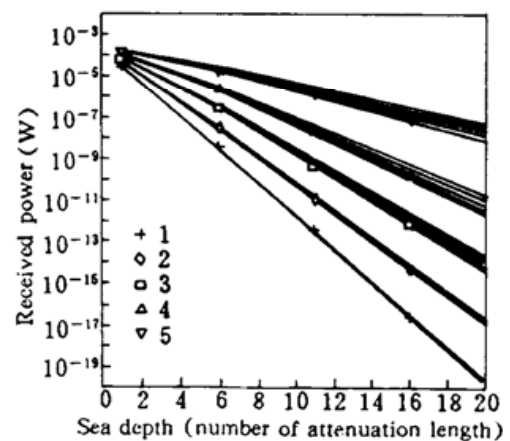


Fig. 5 The dependence of the albedo and the attenuation coefficient of sea water on the the received laser echo power (the sea depth unit is the numbers of attenuation length)

3.3 机载光学系统接收视场角对海底激光回波能量的影响

机载光学系统接收视场角是机载激光测深系统的重要参数,因为它直接涉及探测信号的信噪比。在背景噪声一定的前提下,机载光学系统接收视场角的选取应以接收到最多海底激光回波能量为标准。图 6 为在典型参数条件下,机载光学系统接收视场角(半视场)从 0 到 40 mrad 变化时,不同的海水深度对海底激光回波能量的影响。横轴为机载光学系统接收视场角,单位为 mrad,纵轴同图 2。图 6 中曲线 1, 2, 3, 4, 5 分别对应海深(以衰减长度的个数为单位) 4, 8, 10, 12, 14。从图 6 中可知,对不同的海深,机载光学系统对海底激光回波能量的接收都有一最佳视场角,且这些最佳视场角(全视场)都在 50 mrad 左右。这一结论同澳大利亚机载蓝绿激光测量海底地貌系统的视场角选取是一致的^[5]。图 7 为在典型参数条件下(海深以 6 个衰减长度计),机载光学系统接收视场角(半视场)从 0 到 40 mrad(半视场)变化时,不同的飞行高度对海底激光回波能量的影响。纵、横坐标同图 6。图 7 中曲线 1, 2, 3, 4, 5 分别对应飞机高度 0 m, 100 m, 300 m, 500 m, 1000 m。从图 7 可知,飞行高度越低,最佳视场角越大,但当飞行高

度超过 300 m 后,最佳视场角(全视场)仍在 50 mrad 左右。

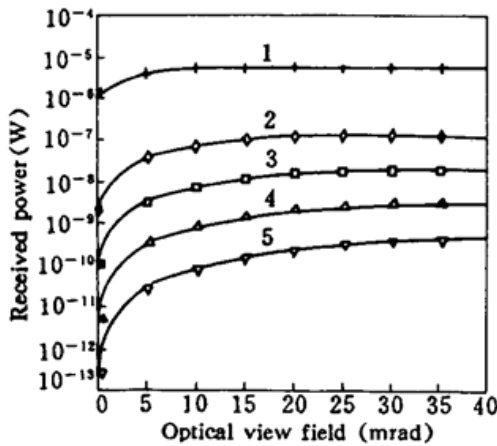


Fig. 6 The dependence of the optical view on the the received laser echo power at different sea depth

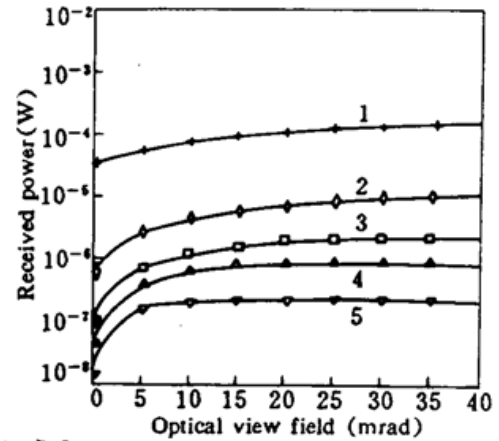


Fig. 7 The dependence of the optical view field on the the received laser echo power at different airplane height

4 结 论

从机载激光测深脉冲的传输过程建立起来的机载激光测深唯像雷达方程,除了和一般的雷达方程包括飞机高度、海水衰减系数、接收视场、接收孔径等变量外,还得出了当海深以衰减长度的个数表示时,机载接收系统接收到的海底激光回波能量只与海水的散射系数与衰减系数之比(s/a)有关,而与衰减系数的大小无关;且机载光学系统接收视场角的选取应以接收到最多海底激光回波能量和最少背景噪声为标准。在机载激光测深系统中,无论飞机的高度是多少或探测的海深是多少,接收系统的视场都宜选择在 50 mrad 左右。

参 考 文 献

- 1 R. M. Measures. Laser Remote Sensing. New York; John Wiley & Sons, Inc., 1984. 414~422
- 2 Paul F. Schippnick. Phenomenological Model of Beam Spreading in Ocean Water. *Proc. SPIE*, 1990, 1302 Ocean Optics X: 13~37
- 3 Seibert Q. Duntley. Light in the Sea. *Opt. Soc. Am. J.*, 1963, 53(2): 214~233
- 4 吴继宗, 叶关荣 编. 光辐射测量. 北京: 机械工业出版社, 1992. 58~60
- 5 M. F. Penny, R. H. Abbot, D. M. Phillips *et al.*. Airborne laser hydrography in Australia. *Appl. Opt.*, 1986, 25(13): 2046~2058

Airborne Laser Bathymetry Phenomenological Lidar Equation

Zhu Xiao Yang Kecheng Xu Qiyang Li Zaiguang

(National Laboratory of Laser Technology, H. U. S. T., Wuhan 430074)

Abstract On the basis of the airborne blue-green laser depth-measuring pulse transmission process and treating the laser light paths propagating downward and upward the sea as different transmission processes, an airborne laser bathymetry lidar equation is obtained through the phenomenological model of beam spreading in ocean water and the underwater finite source distant law. The depth-measuring capability of a bathymetry lidar is accurately calculated and the factors affecting the depth-measuring capability of a bathymetry lidar are analyzed.

Key words laser transmission in ocean water, underwater finite size source distant law