

文章编号: 1000-7032(2009)02-0261-06

# 直接光强检测方式分析激光遥测水下声场探测灵敏度

谢 晨<sup>1</sup>, 陈名松<sup>1</sup>, 周田华<sup>1,2</sup>

(1. 桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004;

2. 中国科学院上海光学精密机械研究所 先进激光技术与应用系统实验室, 上海 201800)

**摘要:** 激光声遥感探测水下声信号技术, 是比以往任何一种水声探测技术都先进的技术, 但探测系统的灵敏度一直未曾分析。得出了在直接光强检测方式下表面微波的最小可探测幅度值, 并且分析了最小可探测幅度值分别和探测高度、接收孔径的关系。在直接光强检测方式下, 针对水下声场形成的表面微扰现象, 通过建立探测系统的一维物理模型进行理论推算。直接光强检测方式下表面微波的最小可探测幅度值为 0.424 4 mm, 当表面微波幅度超过该值时, 探测系统灵敏度完全满足对水下声场的实时监测要求。

**关键词:** 水下声场探测; 激光声遥感; 最小可探测幅度值; 直接光强检测

中图分类号: O422.2

PACS: 43.30.Pc

PACC: 4330

文献标识码: A

## 1 引 言

激光声遥感探测技术, 是在 20 世纪 80 年代初出现的。1980 年, Hickman 及同事率先进行了激光声遥感探测技术的可行性实验研究。1988 年, 美国的 Lee 等学者也针对这一技术进行了实验, 并提出了激光在水表面受表面波动的强度调制的理论。在国内, 激光声遥感探测技术的研究也已有一定进步: 大连声研究所的李荣福等学者以及孙金祚、戴振宏教授等在实验的基础上, 对激光遥感探测水声信号技术进行了深入的分析, 对 Lee 等的水表面强度调制理论做了补充, 提出了水表面微波振动对入射激光的强度调制理论和水表面微波理论等创造性理论, 为水下声信号激光探测技术的进一步发展奠定了基础, 对我国的水声探测技术的进步具有重要意义。激光声遥感探测水下声信号技术, 在水中利用声波, 在空气中利用光波, 结合两种信道中的最佳物理场来实现遥感探测水下声信号, 是比以往任何一种水声探测技术都先进的技术, 形成强大的技术优势, 将为遥感探测开辟一条新的技术途径, 在飞机对潜通信等应用中将有很好的应用前景。

目前激光探测有三种检测方式<sup>[1]</sup>, 直接光强检测方式、间接光强检测方式、相干检测方式:

a. 直接光强检测方式。利用直接光强检测水表面微波的振动。利用成熟的激光测距技术, 在水表面测得距离的变化, 检测出带有水下声场信息的表面微波。另一种直接检测方法是用接收机接收到的光通量的变化来检测频率。调幅是理论基础, 本文采用的是该方法。

b. 间接光强检测方式。激光束照射到水面前将激光束调制。具体是指激光束通过声光调制器, 利用空间滤波的方法得到主要衍射射线。在同一时间内, 光信号变成载波信号, 频率为 1 000 kHz。经过衔接控制系统后, 调制后的激光照射到受水下声场扰动的水面。再使用光电倍增器作为接收器, 检测携带水下声场信息的激光束。

c. 相干检测方式。为了提高检测灵敏度, 提出了相干检测的方式。主要是指两个高频的相干检测, 其中包括零差接收、外差接收和自差接收。零差接收只有一个激光发射, 用来作为本地振荡器和反射。它可以提供一个由移动的目标或辐射源所产生的多普勒频移的非零中频。外差接收包括一个或两个激光发射器。有两个激光发射器, 一个作为本地振荡器, 另一个是发射载波光。如果只有一个激光发射, 激光束一分为二, 一部分光束经频移后作为本地振荡器。自差接收与外差接收很相似, 采用一个激光发射器。这两种方法之

收稿日期: 2008-08-25; 修订日期: 2008-11-24

基金项目: 广西自然科学基金(0832012); 广西区青年基金(0640065); 广西研究生教育创新计划(2008105950810M415)资助项目

作者简介: 谢晨(1984-), 男, 江西吉安人, 主要从事光通信技术方面的研究。

E-mail: chen\_xie@163.com

间的唯一的区别是本地振荡器是否有频移。相干检测可以由本地振荡器增益得到高灵敏度,而且可以适应于每一个调制方式,如调幅、调频和调相。考虑到实际情况,自差接收是最好的方式。

作者所在教研室在 Lee 和 Etal 的研究基础上开发了一套直接光强检测方式激光遥测水下声场探测系统<sup>[2]</sup>。该系统结构是,采用激光发射机发出的一束光到达远处以一定角度倾斜放置的平面镜上,经过镜面-被扰动的水面-镜面反射后,折回并被与发射机同一方向上的探测系统接收。经过探测系统的光电转换,得到一个微弱的电信号,再将该信号进行一定处理,使其适合观察。实验结果表明,该系统可以实现一定区域的激光遥测水下声场。本文主要针对直接光强检测方式,对该遥感检测方案的探测灵敏度进行了理论分析和实验研究。

## 2 表面微扰现象

表面微扰现象是指水下声源发出的声波在水中传播过程中,在传播方向上会对水产生周期性的压力。当声波经水下声信道到达水表面时,水表面就会受到这个周期性压力的作用。再加上水表面本身具有的重力和水表面张力等,水表面上每一点就会形成连续的振动,在水表面表现为驻波或行波,原来平静的水表面就会掀起微小的波动。当探测器的一束激光照射到未被声波激励的水面时,水面像一面镜子,反射光束固定地射向一个方向;当激光照射到受声波调制的粗糙表面时,反射光束不再固定地射向一个方向,而是被散射了。换言之,反射光束就会携带上水表面微小波动的信息。如图 1 所示。

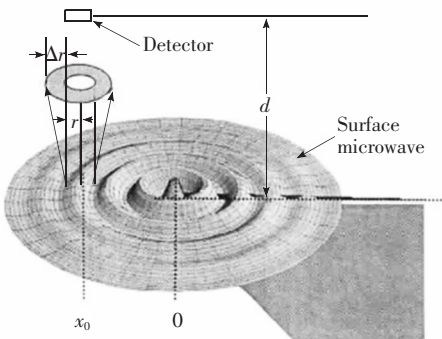


图 1 表面微扰现象

Fig. 1 Phenomenon of surface perturbation

## 3 幅度调制理论基本原理

水表面微波理论是根据水-空气界面不是一个很好的压力释放平台这一事实而提出来的。水下声信号产生的压力变化传到水面时,就形成了一个水面微波。当一束照射到水面的激光反射时,可以理解为水面微波对激光束进行了强度调制。反射回去的激光就携带了水下声信号信息。考虑一维理论系统模型,如图 2 所示。假设系统光接收机固定在  $x_0$ ,接收机光阑尺寸半径为  $r$ ,接收机高出水面  $d$ 。水表面强度调制理论的解释如下:

水和空气界面的水表面微扰是声波压力、表面张力和重力合成作用的结果。因此水下声场在水表面产生的微弱波动的传播速度既不是声波在水中的传播速度,也不是声波在空气中的传播速度,而应该遵循表面张力波和重力波在水表面传播的规律。反射光束探测到的水表面微扰频率才是声波频率。则水表面微波的表达式可以近似地写为:

$$s_m(t) = A_m \sin(k_m x - \omega_m t) \quad (1)$$

其中,  $A_m$  为水表面微波的幅度,  $k_m$  为水表面微波的波数,  $\omega_m$  为水表面微波的频率。

由于水表面微波的因素,部分激光能量会偏离系统接收光阑。图 2 阴影部分代表激光束的偏离。

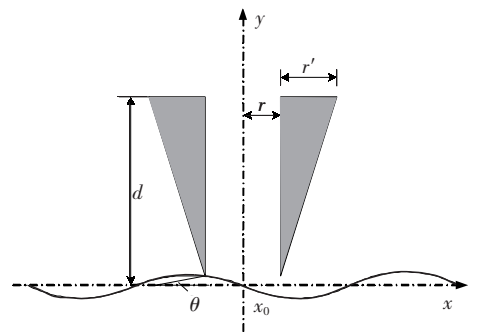


图 2 强度调制原理示意图

Fig. 2 Scheme of intensity modulation principle

由式(1)可得由于水表面微波所造成的斜率的表达式为

$$m(t) = A_m K_m \cos(k_m x - \omega_m t) \quad (2)$$

图 2 中的  $r'$  可表示为

$$r' = d \cdot \text{tg}(2\theta) \quad (3)$$

式(3)中,  $\theta$  是激光照射到水面的入射角度。

如果  $d \gg A$ , 则有

$$\text{tg}(2\theta) \approx 2\theta = 2A_m k_m \cos(k_m x - \omega_m t) \quad (4)$$

这样,光电探测器就检测到一个与接收端有效光阑尺寸成正比的信号,如下式表示:

$$r - r' = r - 2dA_m k_m \cos(k_m x - \omega_m t) \quad (5)$$

这一结果包含直流部分和交流部分,其中直流部分由打在光接收端的恒定光通量产生,而由有效光阑尺寸的变换导致的交流部分实际上就是幅度调制的效果。

幅度调制指数  $m$  可表示为

$$m = \frac{|I_{AC}|}{|I_{DC}|} = 2dkA/r \quad (6)$$

式(6)中,  $d, k, r$  的值是实验参数,只要测得调制指数的大小,根据式(6)就可以求出  $A$  的值。

为了检测从水面反射的激光束,接收端采用平方律光电探测器。如果考虑根据水面反射的光信号来获得强度调制光束,首先设输入激光信号的表达式为

$$e_s(t) = E_c [1 + m \cos(\omega_m t)] \cos(\omega_c t + \phi_c) \quad (7)$$

其中,  $E_c$  为光信号强度,  $m$  为调制指数,  $\omega_m$  为水表面微波的频率,  $\omega_c$  为光频率,  $\phi_c$  光的初始相位。

由于光电探测器是一个平方律形式,所以接收端的输出电流可以表示为:

$$I(t) = D e^2(t) \quad (8)$$

式中  $D$  是相对于输入光强与输出电流之间的比例常数。

将式(8)的右边展开可得:

$$\begin{aligned} I(t) = & DE_c^2 \cos(\omega_c t + \phi_c) + \\ & DE_c^2 m^2 \cos^2(\omega_m t) \cos^2(\omega_c t + \phi_c) + \\ & DE_c^2 m \cos(\omega_m t) - DE_c^2 m \cos[2(\omega_m t)(\omega_c t + \phi_c)] \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)中,由于光频率太高,电设备无法检测到,所以将上式中包含光频率的部分略去,可得

$$I(t) = DE_c^2 m \cos(\omega_m t) \quad (10)$$

可以看出,光接收机包含所需要的水下声信号信息,该信号经过放大和初步的处理后,就可以送入显示设备了。这就是实现水下声信号光电探测所依据的强度调制基本理论。最小可探测幅度值将在下面建模讨论。

## 4 探测灵敏度分析

### 4.1 建立一维物理模型和理论推算

为了方便计算,我们讨论一维情况<sup>[3]</sup>,但不

难将结论推广到二维情形。如图3所示,强度为  $I_0$  的激光束聚焦到水面上  $x_1$  到  $x_2$  处,水下声源位于  $0$  点引起的水面起伏由函数  $f(x, t)$  来描述,  $f(x, t)$  是位置  $x$  和时间  $t$  的函数。

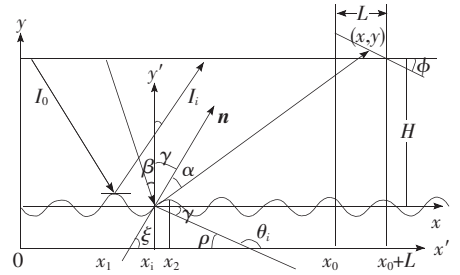


图3 一维物理模型图

Fig. 3 One-dimensional physical model

设  $x_i$  是  $x_1$  与  $x_2$  内  $\Delta x_i$  到  $x_i + \Delta x_i$  的小区间上的任一点。当  $\Delta x_i$  取值充分小时,在小区间  $x_i$  到  $x_i + \Delta x_i$  内  $f(x, t)$  的斜率可以认为取同一个值,即

$$\left. \frac{\partial f(x, t)}{\partial x} \right|_{x=x_i}$$

设入射光线与曲线  $f(x, t)$  在  $x_i$  处的法向  $n$  的夹角为  $\alpha$ ,与  $y$  轴的夹角为  $\beta$ ,  $y$  轴与法向  $n$  的夹角为  $\gamma$ ,则有

$$\alpha = \beta + \gamma \quad (11)$$

而

$$\xi + \rho = \xi + \gamma = \frac{\pi}{2} \quad (12)$$

则

$$\gamma = \rho = \pi - \theta_i \quad (13)$$

$\theta_i$  是  $x_i$  处曲线  $f(x, t)$  的切线与  $x$  轴的夹角。

所以入射光线与法向的夹角

$$\alpha = \beta + \gamma = \beta + \rho = \beta + \pi - \theta_i \quad (14)$$

孔径为  $L$  的接收器迎着反射光  $I_i$  与水平面( $x$  轴)成  $\phi$  角放置,其两端在  $x$  轴上的投影坐标为  $x_0$  与  $x_0 + L$ ,而反射光线与接收器交于点  $(x, y)$ 。

由图3可知

$$\frac{y - H}{L \text{tg} \phi} = \frac{x_0 + L - x}{L} \quad (15)$$

可得

$$y = H + (x_0 + L - x) \text{tg} \phi \quad (16)$$

另一方面

$$x = x_i + [y - f(x_i, t)] \text{tg}(\alpha + \gamma) \quad (17)$$

联立式(16)和式(17)可解出

$$x = \frac{x_i + [H + (x_0 + L) \operatorname{tg}\phi - f(x_i, t)] \operatorname{tg}(\alpha + \gamma)}{1 + \operatorname{tg}\phi \operatorname{tg}(\alpha + \gamma)} \quad (18)$$

由于

$$\alpha + \gamma = \beta + \pi - \theta_i + \pi - \theta_i = 2\pi - (2\theta_i - \beta) \quad (19)$$

所以

$$\operatorname{tg}(\alpha + \gamma) = -\operatorname{tg}(2\theta_i - \beta) \quad (20)$$

利用三角函数公式

$$\operatorname{tg}(2\theta_i - \beta) = \frac{\operatorname{tg}2\theta_i - \operatorname{tg}\beta}{1 + \operatorname{tg}2\theta_i \operatorname{tg}\beta} \quad (21)$$

$$\operatorname{tg}2\theta_i = \frac{2\operatorname{tg}\theta_i}{1 - \operatorname{tg}^2\theta_i} \quad (22)$$

而

$$\operatorname{tg}\theta_i = \left. \frac{\partial f(x, t)}{\partial x} \right|_{x=x_i} \quad (23)$$

于是式(18)中的量  $H, x_0, L, \phi$  及隐含在  $\alpha + \gamma$  中的角  $\beta$  均为已知量, 将式(23), (22), (21) 和(20)代入式(18), 便可求出  $x$  值。

由图 3 可看出, 只要反射光线与接收器交点的横坐标满足条件

$$x_0 \leq x \leq x_0 + L \quad (24)$$

反射光均可进入接收孔径。

联立式(18)和式(24)可得

$$\frac{H + (x_0 + L) \operatorname{tg}\phi + x_i - (x_0 + L) [1 + \operatorname{tg}\phi \operatorname{tg}(\alpha + \gamma)]}{\operatorname{tg}(\alpha + \gamma)} \leq f(x_i, t) \leq H + (x_0 + L) \operatorname{tg}\phi + \frac{x_i - x_0 [1 + \operatorname{tg}\phi \operatorname{tg}(\alpha + \gamma)]}{\operatorname{tg}(\alpha + \gamma)} \quad (25)$$

由于本文探讨的是最小可探测幅度值, 只对式(25)中的左半部分进行讨论。

$$\frac{H + (x_0 + L) \operatorname{tg}\phi + x_i - (x_0 + L) [1 + \operatorname{tg}\phi \operatorname{tg}(\alpha + \gamma)]}{\operatorname{tg}(\alpha + \gamma)} \leq f(x, t) \quad (26)$$

式(26)中量  $H, x_0, L, \phi, x_i$  均为已知量,  $f(x_i, t)$  在该约束范围内, 反射光可以进入接收孔径。根据作者所在教研室实验的所测光路图数据,  $H = 1\,470\text{ mm}$ ,  $x_0 = 15\,000\text{ mm}$ ,  $\phi = \frac{\pi}{4}$ ,  $\alpha + \gamma = 82.443^\circ$ ,  $L = 6 \times 10^{-2}\text{ cm}$ ,  $x_i = 3\,920\text{ mm}$ 。

而频率为  $\omega$ , 处于水下  $x = 0$  处点源振动激起的沿  $x$  方向传播的水表面微波的形式为

$$f(x_i, t) = A J_0(kx_i) e^{i(\omega t - \pi/2)} \quad (27)$$

式(27)中,  $J_0(kx_i)$  为零阶贝塞耳函数,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\omega = 2\pi\nu$ 。其中  $\lambda$  为水表面微波的波长,  $A$  为水表面微波的振幅, 为了分析的具体化, 本文  $\nu$  取 100 Hz。根据色散关系  $\omega^2 = gk \operatorname{tg}kh_0 \left(1 + \frac{Tk^2}{\rho g}\right)$ , 取  $h_0 \rightarrow \infty$  时, 可以得出  $\lambda = 3.6 \times 10^{-1}\text{ cm}^{[3]}$ 。

又水表面微波的表达式为

$$f(x_i, t) = A \sin(kx_i - \omega t) \quad (28)$$

由式(26)的约束条件, 再代入实验光路图数据可以得到

$$0.424\,4\text{ mm} \leq f(x_i, t) \quad (29)$$

再由式(28)可知,

$$A = \frac{0.424\,4\text{ mm}}{\sin(kx_i - \omega t)} \quad (30)$$

式中  $k = \frac{2\pi}{3.6 \times 10^{-1}\text{ cm}}$ ,  $x_i = 3\,920\text{ mm}$ ,  $\omega = 2\pi\nu$  均为已知量。

当  $\sin(kx_i - \omega t) = 1$  时, 可以得到表面微波的最小可探测幅度值。

$$A = 0.424\,4\text{ mm} \quad (31)$$

当表面微波的最小可探测幅度值  $A = 0.424\,4\text{ mm}$  为直接光强检测方式下, 反射光刚好可进入接收孔径。

## 4.2 计算机模拟与数值分析

接收孔径大小固定时, 用计算机仿真表面微波的最小可探测幅度值与探测高度的变化曲线, 见图 4。随着探测高度提高, 可探测的幅度极限值也随着提高。这说明在直接光强检测方式激光遥测水下声场, 提高飞机的飞行高度, 会提高探测系统的探测灵敏度。

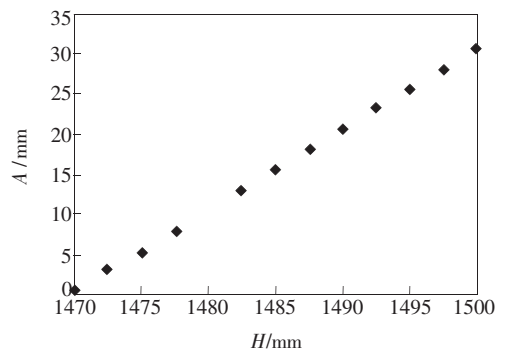


图 4 计算机仿真探测极限与探测高度的变化曲线  
Fig. 4 Computer simulation curve of detection limit vs detection height

探测高度固定时,用计算机仿真表面微波的最小可探测幅度值与接收孔径的变化曲线,见图5。随着接收孔径减小,可探测的幅度极限值随着提高。说明在直接光强检测方式激光遥测水下声场,缩小接收孔径,会提高探测系统的探测灵敏度。然而接收孔径不能一味缩小,接收孔径过小将不利于实际应用。

实际机载应用时,应用条件远达不到实验室

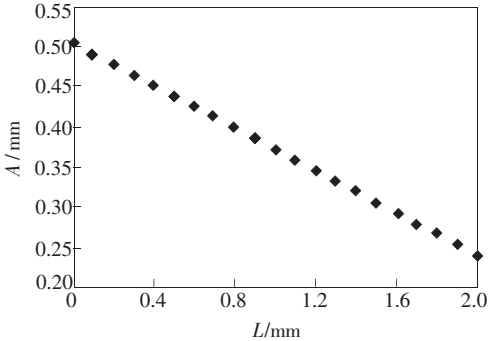


图5 计算机仿真探测极限与接收孔径的变化曲线

Fig. 5 Computer simulation curve of detection limit vs receiving aperture

的光路条件,比如飞行高度、接收孔径等。根据实际机载应用时的数据<sup>[4]</sup>,飞机的航高为500 m,水上光束的斜程为500 m,水下光束的斜程为50 m的情况下,出射光束以15°的天顶角进行扫描。经过计算得出表面微波的最小可探测幅度约为2.122 mm,这个值约为最小理论可探测幅度值的5倍。

## 5 结 论

详细讨论了在直接光强检测方式下,通过理论计算分析一维探测系统模型,得出该遥感检测的表面微波的最小理论可探测幅度值0.424 4 mm,并且计算机仿真出了该值与探测高度、接收孔径的关系图。结论表明,当表面微波幅度超过的0.424 4 mm时,探测系统具有较高的探测灵敏度,完全满足对水下声场的实时监测要求。但是该系统探测灵敏度尚有提高的空间。如果需要达到更高的灵敏度,可以根据上述结论,改变系统的探测高度和接收孔径,或者采用新的探测方式,比方基于多普勒频移、相干探测方式等。

## 参 考 文 献:

- [1] Zhou Tianhua, He Ning. The laser remote sensing of underwater acoustic signal [C]. *Guilin: Proceedings of ISAPE*, 2006, 617-619.
- [2] Lee M S, Bourgeois B S, Hsieh S T, et al. A laser sensing scheme for detection of underwater acoustic signals [C]. *USA: South Knoxville, Conference Proceedings of IEEE*, 1988, 253-257.
- [3] Cui Guihua, Li Rongfu, Tian Zuoxi, et al. A laser remote sensing study for detection of under water acoustic signals [J]. *Ship Science and Technology (舰船科学技术)*, 2002, 24(1):46-50 (in Chinese).
- [4] Hu Shanjiang, He Yan, Zang Huaguo, et al. A new airborne laser bathymetry system and survey result [J]. *Chin. J. Lasers (中国激光)*, 2006, 33(9):1163-1167 (in Chinese).

## Sensitivity Analysis of Underwater Sound Field with Laser Remote Sensing by Direct Detection

XIE Chen<sup>1</sup>, CHEN Ming-song<sup>1</sup>, ZHOU Tian-hua<sup>1,2</sup>

(1. School of Information & Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;

2. Advanced Laser Technique & Applied System Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** Laser remote sensing of the underwater sound field is more advanced detection technology for underwater object search, however, the sensitivity of the detection system had not been analyzed. This article analyzed three laser remote sensing methods for underwater sound field, and then studied the surface micro-

wave formed from underwater sound field. It was obtained through the theoretical calculation that the minimum detection limit of amplitude was 0.424 4 mm for surface microwave. By analyzing the relationship between the minimum detection limit of amplitude, the height of sender and the aperture of receiver, it was understood for the theoretical basis of influence factors for the detection of underwater sound field, also provided for the basic idea for improving sensitivity.

**Key words:** detection of underwater sound field; laser remote sensing; the minimum detection limit of amplitude; direct detection

**CLC number:** O422.2

**PACS:** 43.30.Pc

**PACC:** 4330

**Document Code:** A