

# 水下激光探测及其应用中的若干问题

杨 国 成

(精密机械工程系)

## 摘 要

本文叙述激光在水下探测中的一些应用,对激光在海水介质中的传输特性与海水的光学性质进行了讨论,说明水下激光探测应考虑若干问题。

## 一、前 言

近年来,随着海洋开发和水下探测技术的发展,对光波在海水介质中的信息传输日益感到兴趣。以往在水中无线传输信息,基本上都是利用超声波,因为超声波在水中的传播特性是最佳的。而从很长的无线电波到很短的紫外线,它们在水中的传播性能都很差,以致在陆地上广为使用的无线电波和微波在水中几乎不能使用。不过光波却有些例外,相对微波而言,它在水中的衰减还是较小的。一般认为,光波在水中的传播性能仅次于超声波。它在可见光谱区域存在着一窄范围的“透明窗口”。若利用这一范围内的在水中衰减较小的波长,就可一定距离内进行无线传输信息。激光是具有独特优点的光源,它的出现为光波在水中的应用提供一种新手段,受到人们的极大重视。

激光与超声波相比,具有能量高、方向性好、频率高、单色性好、传播速度快(在水中为 $2.25 \times 10^8$ 米/秒)等许多优点。但它在水中的衰减比超声波大,故传输距离不能很长。而超声波的优点是以水为介质传播时,衰减很小,可以传播很远的距离。但它的频率低、波束发散度太大(一般为几度)、传播速度太小(在水中约 $1.5 \times 10^3$ 米/秒),因此探测精度较低,分辨率也不高<sup>[1]</sup>,响应速度慢,且易受干扰,排除比较困难。所以,激光在海洋开发与水下探测中应用是十分有效的,它和超声波可以相互补充地发挥各自的优点,成为水中无线传输信息的二种主要手段。

## 二、在水下探测中的激光应用

水下探测对于国民经济和军事上来说具有重要的意义。水下目标通常有不动目标(如海

本文1986年2月24日收到。

底地貌、礁石、暗沟、障碍物、水下建筑工程等)和活动目标(如潜艇、舰船、鱼雷、鱼群、其它浮游物等)。对这些水下目标的探测,以往是利用水声技术,即声呐技术。虽然声呐所能探测的距离长,但它的探测精度与分辨率却不高。

采用激光技术来探测水下目标,可以获得较高的探测精度和良好的分辨率,且具有快速响应的优点。

水下激光探测装置的基本原理与激光雷达相类似,它与大气激光雷达的区别在于传输介质和密封问题,以及激光波长。图1是一种水下激光测距的装置框图。为了探测地貌或目标物体(如障碍物)的形状,可以采用高重复率的脉冲激光和高精度的显示方法<sup>[3]</sup>,并以二维扫描进行工作(水下激光扫描雷达)。

水下激光探测装置可获得目标的距离与方位的数据,同时在终端显示方面可从目标的影像来间接判别目标的性质和大小,也可借助电视直接观察目标的性质和大小。

水下激光探测的直接应用对象是固定目标和活动目标。机载激光海深测定仪可以大面积地测量近海与大陆架的海深,用于了解海底状况和绘制海底地形图。利用水下激光探测装置可以在水中定点或机动地探测海中礁石与其它障碍物,并可能用于探测有限距离上的水下活动目标,如潜艇等。水下激光电视对于海底探索与资源调查,以及对船底、桥墩、大坝、海底电缆等建筑工程的探查起着重要的作用。

日本于七十年代末利用声波和光波共用的生物资源观测系统,通过电视摄像头与传输装置能在船上直接观察鱼类等的活动情况,工作深度可达200米<sup>[4]</sup>。美国研制的S-105型水下电视摄像机可使用的最大水深达2000米<sup>[5,6]</sup>。

但由于海水对光波的强烈衰减,水下激光进行无线传输信息的可探测距离受到较大的限制。所以,许多专家认为:要从位于水下目标获得活动的、用眼睛看得见的信息,并把它传到很远的距离,能使侦察人员借助电视得到它所提供的一系列重要资料,可以利用声波进行探测,再进行声电转换变成电学图象,然后再转换为光学像进行观察。这种水下搜索与探测的方法可方便地消除信息传输与光在水中透明度的依赖关系。

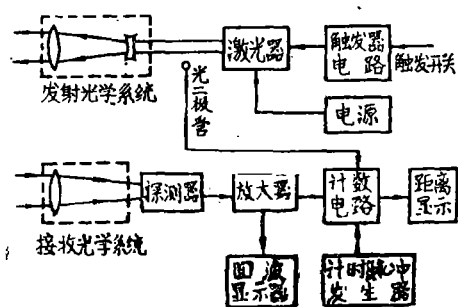


图1 水下激光测距装置框图

### 三、水下激光探测应用中的若干问题

#### 1. 海水介质中激光的衰减特性

海水是一个复杂的物理-化学-生物系统,它含有一系列成分(生物微粒、微生物、各种色素、悬浮物等)。这些成分是以一定范围的浓度、温度及与外部介质的交换而存在的。海水中激光的传播会由于海水所含有多种成分的吸收与散射而引起光的强烈衰减,使水下探测的距离减小,分辨率降低。光在海水中的衰减规律服从朗伯指数定律,即

$$P = P_0 \exp(-\alpha L) \tag{1}$$

式中,  $P_0$ 和 $P$ 分别为传输距离等于零和 $L$ 时的激光功率(瓦);  $\alpha$ 是包括吸收和散射在内的衰减系数(米<sup>-1</sup>)。衰减长度 $L_0 = \frac{1}{\alpha}$ (米), 在一个衰减长度距离上, 激光束功率减小到初始值的 $\frac{1}{e}$ , 即 0.37倍。显然, 衰减长度越大, 则  $\alpha$ 越小, 从式(1)可知, 单位长度上激光功率的损失也就越小。

激光在海水介质中的衰减大小(或透过率)不仅与海水中含有的悬浮粒子、浮游生物和各种色素的情况有关, 并随悬浮物质和浮游生物的组成、大小、浓度而发生变化, 而且与所采用的激光波长密切相关。图 2 是蒸馏水和海水的衰减系数<sup>[2]</sup>。从图中可看到, 它与波长的依赖关系是十分明显的。同时, 由于各个海域的海水成分不同, 浑浊程度不一, 其衰减特性也出现相当大的差别。这一点从图 3 得到较清楚的说明。从图 3 看到不同海域的衰减特性有很

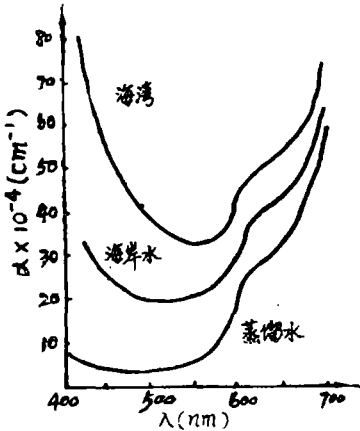


图 2 蒸馏水和海水的衰减系数

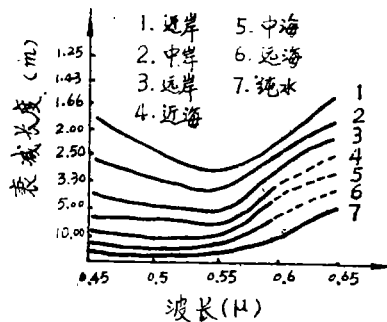


图 3 不同海域的光衰减

大的差别。另外从图 2、图 3 还可看到衰减最小的波长是兰绿光波段。

我们利用 $1.06\mu$ 、 $0.53\mu$ 、 $0.6328\mu$ 三种不同波长的激光对泉州湾沿岸(泉州洛阳与后渚)海水进行了衰减特性的测量, 实验结果也较好地表明 $0.53\mu$ 波长的激光的衰减比其余两种小。

图 4 是含浮游生物海水和纯海水的衰减特性对照。图 4 说明: (1)含有浮游生物的海水对光的衰减比纯海水大; (2)纯海水对波长为 $0.4-0.58\mu$ 的光波衰减较小, 而对波长大于 $0.58\mu$ 的光波衰减显著增大; (3)含浮游生物的海水, 绿光部分衰减系数最小, 即在绿光处海水有一个“透明窗口”<sup>[7]</sup>。

资料报道<sup>[2]</sup>: 光在海水介质中传播时, 在5000埃波长附近有一个较宽的透过带。在 $0.5\mu$ 波长处, 西太平洋北部的最透明海水的光衰减系数可达 $0.03\text{米}^{-1}$ , 这个数值与蒸馏水在该波长处的光衰减系数几乎相同。而在较浑浊的洛杉矶沿岸海水中的光衰减系数为 $0.736\text{米}^{-1}$ , 要比前者数值大20多倍。

2. 影响海水光学性质的因素

激光在水下探测中应用时，应当考虑海水光性质对光传播的影响，海水光学性质的破坏会使水下激光探测产生困难。

影响海水光学性质的主要三种成分是纯水、被溶解物(无机的和有机的)、悬浮物(矿物和有机物，包括浮游物)。此外还有气泡和湍流引起的光学非均匀性。图 5 表示海水中不同

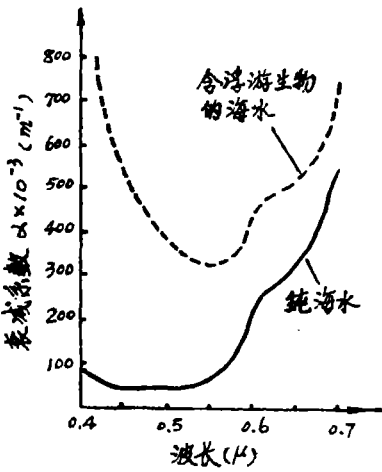


图 4 两种不同海水的光衰减特性<sup>[7]</sup>

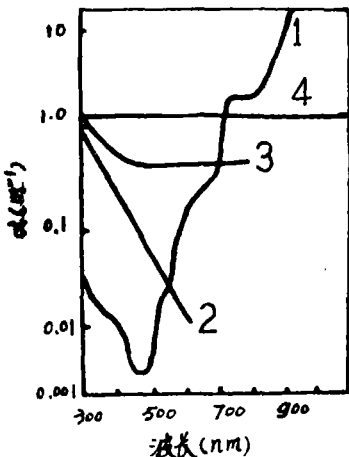


图 5 海水各种成分的 $\alpha$ 与波长的关系<sup>[8]</sup>

成分的衰减情况<sup>[8]</sup>。曲线 1 是光在纯水中的衰减特性。纯水是海水的主要成分，纯水的光衰减主要是吸收与散射引起的，且随激光波长的不同而产生较大的变化。曲线 2 表示光通过被溶解有机质的衰减情况，在兰色和紫色波段，光衰减值增大很快。曲线 3 主要和矿物微粒有关。曲线 4 是生物形成的大颗粒引起的光衰减，如硅藻类，有孔虫、腐屑等，这种光衰减对各种波长来说基本上是相同的，并且数值较大。

3. 海水介质中光的吸收与散射

一般地说，衰减系数是吸收系数与散射系数的总和，即  $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$ 。  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  分别为吸收系数和散射系数。海水对光的吸收与散射，不仅引起光的迅速衰减，而且会使探测的信噪比明显下降，以及限制了可探测距离。

(1) 海水中主要的光吸收成分是纯水、被溶解物和浮游植物的各种色素。图 6 是不同海域的海水的吸收系数随波长变化的情况<sup>[7]</sup>。从光谱吸收曲线可知，离岸越近，海水水质就越差，吸收系数越大。同时吸收系数也随波长而异。在海水中，最低吸收值通常出现在 510nm 附近，对某些较透明的海水，最低吸收值移到 490nm，甚至在 470nm 附近，而在较浑浊的海水中，最低吸收值出现在 570nm 附近。

(2) 在海水中有两种类型的光散射，即分子散射和悬浮粒子散射。

根据瑞利散射定则，对于海水分子或海水中所含的细小粒子，若其半径小于波长，则散

射系数与波长的四次方成反比,即波长愈短,散射愈强。对于较大的微粒(半径大于波长),散射系数与波长的平方成反比。悬浮粒子的散射则与悬浮物的浓度、大小、分布有关。

海水的光散射可以用体积散射函数和全散射系数表示<sup>[2]</sup>。设散射体积 $dV$ 上的照度为 $E$ ,入射光方向与散射光方向的夹角为 $\theta$ ,在散射方向上的光强为 $dI(\theta)$ ,则体积散射函数 $\beta(\theta)$ 可表示为

$$\beta(\theta) = \frac{dI(\theta)}{E \cdot dV} \quad (2)$$

如图7所示。

体积散射函数与全散射系数 $\alpha_2$ 之间有下列关系<sup>[2]</sup>:

$$\alpha_2 = 2\pi \int_0^\pi \beta(\theta) \sin\theta d\theta \quad (3)$$

值得注意的是:水分子和水中存在的浮游粒子会引起光的前向散射和后向散射。由于后向散射的作用,会严重影响水下探测的分辨率。当来自目标的反射和后向散射有同一量级时,目标物体的分辨将是不可能的<sup>[1]</sup>。所以在水下激光探测装置中应尽量降低后向散射的影响。

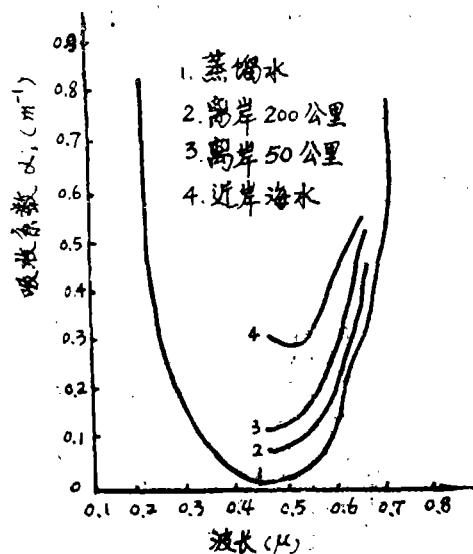


图6 不同海域海水的光吸收

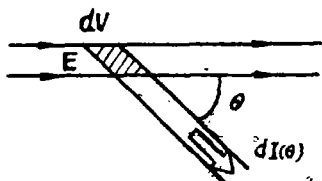


图7 体积散射示意图

能传输的距离可由下式估算

$$L = \frac{2.3}{\alpha} \lg \left( \frac{P_0}{P} \right) \quad (4)$$

式中, $P_0$ 和 $P$ 分别为发射功率和最小可探测功率(探测器), $\alpha$ 为衰减系数,则 $L$ 就是激光在海水所能传输的最远距离。例如,当 $P_0 = 10^8$ 瓦, $P = 10^{-14}$ 瓦,若透明海水的光衰减系数为 $0.03 \text{米}^{-1}$ (在 $0.5 \mu$ 波长处),则其可传输的最远距离为1500米(单向)。假设以洛杉矶沿岸海水在 $0.522 \mu$ 处的衰减系数为 $0.736 \text{米}^{-1}$ 进行计算的话,则在上述同样条件下,其所能传输的最远距离只有62米左右。可见衰减系数的影响之大。

我们设想提高激光器的发射功率,并同时提高探测器的探测灵敏度,或许能成倍增加激光在海水中的传输距离,但实际并不有效。提高激光的发射功率和探测器的探测灵敏度,对延长激光水下传输距离并无显著作用。这是因为发射功率与最小可探测功率处于对数之中。例如, $P_0 = 10^8$ 瓦(增大1000倍),最小可探测功率 $P = 10^{-16}$ 瓦(灵敏度提高100倍),在洛杉

矶沿岸海水中, 在 $0.522\mu$ 光波长处的衰减系数取为 $0.736\text{米}^{-1}$ , 则其可传输的最远距离为78米。与前述比较仅增加16米。这显然是不可取的技术方案。

从上述分析可知: 激光发射功率对光在海水中的传输距离的影响大大小于衰减系数, 衰减系数对光在海水中的传播距离起着关键性的作用。

#### 四、结 束 语

激光在水下探测(包括水下测距、水下电视)中的应用是激光在海洋上应用的一个重要方面, 也是目前水下应用可能性最大的一个领域。特别是激光水下电视和水中照明, 发展是比较迅速的。但是, 水下激光探测与光在海水介质中的传播特性密切相关。决定水下激光探测距离的主要因素是衰减系数, 而激光发射功率的影响并不显著。

一般说来, 海水中“透明窗口”波长处于兰绿波段。不同海区与不同水质下的“透明窗口”波长值有一定的差别。选择激光光源时应考虑到不同海水状况下的这种差别。同时应重视后向散射对水下激光探测的强烈影响。

由于激光在海水介质中的衰减较大, 使其探测的作用距离受到相当大的限制。因此在长距离的应用中不如超声波优越。但在有限距离内, 激光作为水下探测的应用手段有其独特的优点。随着海洋开发与探索的发展, 可以预料激光和超声波一样将在水下探测中起着重要的作用。

#### 参 考 文 献

- [1] 稻荷隆彦, 国外激光, 2(1971), 31—39.
- [2] 黑木敏郎编, 海洋测定法, 东京出版会, (1972).
- [3] 稻场文男等, レーザーハンドブック, 朝仓书店, (1973).
- [4] 石井丈夫, 海洋科学(日), 11, 11(1979).
- [5] 山口市十郎, Ocean Age, 13, 9(1981), 25—32.
- [6] 富谷邦彦等, Ocean Age, 13, 9(1981), 13—18.
- [7] 上海水产学院编, 海洋学, 农业出版社, (1983).
- [8] B. M. 卡缅科维奇等主编, 沈积均等译, 海洋水文物理学, 海洋出版社, (1983).
- [9] B. B. Соколов, Доклады АН СССР, 234, 3(1977), 568—571.
- [10] Cordor H. R., Appl. Opt. 21, 16(1982)

## Some Problems in Underwater Detection With Laser and Its Applications

Yang Guocheng

### Abstract

This paper deals with some applications of Laser in underwater detection, and discusses, the transmission performance of Laser in sea water medium and optical properties of sea water. Some problems in Laser detection of underwater must be considered and proposed.