

# 激光相位测距原理应用于测 波浪剖面的问题讨论

谭世祥

(国家海洋局海洋仪器研究所)

**提要:** 本文结合实验着重分析激光相位测距原理应用于测海洋波浪剖面的可能性和局限性。

## On the problems of profiling the ocean waves based on the laser phase ranging principle

Tan Shixiang

(Institute of Oceanographic Instrumentation, National Bureau of Oceanography)

**Abstract:** The possibility and limitation of applying the laser phase ranging principle to profiling the ocean waves are emphatically analysed with the experimental results.

### 基本原理

通过不同路程的两相干光波的相位差, 与该光波所通过的路程的时间差成正比。假设光波是在均匀介质中传播, 速度  $c$  一定, 那么, 传播的时间  $\tau$  就正比于所通过的距离  $H$ 。

如光波为氦-氖激光(6328 Å), 正弦调制, 频率为  $f_0$ , 表达式<sup>[1]</sup>:

$$A_1 = \Delta A_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1)$$

其中  $\Delta A_m$  是调制波振幅;  $\omega_0$  是角频率 ( $\omega_0 = 2\pi f_0$ );  $t$  是时间;  $\varphi_0$  是初相。相角为:

$$\kappa = \omega_0 t + \varphi_0 \quad (2)$$

将这一被调制的光束射向一目标, 再返回原处被接收, 就有一段时间延迟, 设为  $\tau$ 。相角改变为:

$$\kappa' = \omega_0(t + \tau) + \varphi_0 \quad (3)$$

相位差:

$$\phi = \kappa' - \kappa = \omega_0 \tau \quad (4)$$

假设目标是不运动的, 则:

$$\tau = \frac{2H}{c} \quad (5)$$

由式(4)、(5)可得

$$\phi = \omega_0 \frac{2H}{c}$$

$$H = \frac{c}{2\omega_0} \phi = \frac{c}{4\pi f_0} \phi \quad (6)$$

由式(6)可知, 只要已知调制频率  $f_0$  和相位差  $\phi$ , 就可以求出距离  $H$ 。而调制频率往往是已知的量, 这样, 距离  $H$  就正比于相位差  $\phi$ , 这便是相位测距的基本原理。

$\phi$  之中, 可能包括了数个整周期和一周期的部分, 所以, 它的通式是:

$$\phi = 2\pi N + \Delta\phi$$

收稿日期: 1980年8月8日。

$$H = \frac{c}{2\omega_0} (2\pi N + \Delta\phi)$$

$$= \frac{c}{2f_0} \left( N + \frac{\Delta\phi}{2\pi} \right) \quad (7)$$

其中  $N$  为零和正整数。

测量装置方框图见图 1。光学探头中的氩-氟激光器，输出波长为  $6328 \text{ \AA}$ 。经声光调制器载上信息频率，再通过光学准直系统发出，由随动系统的平面镜垂直射到海面。回光经平面镜进入探头，通过接收望远镜系统和窄带滤光片，到光电转换器变为电信号，进入接收回路，进行处理后和基准信号  $f_0$  一同送入显示系统显示。这里就框图中几个部分简述如下：

1. 不同带宽信号控制系统。这一部分的加入，是因为海面回波幅度变化很大，且变化的速度也不同，为了适应这一变化，随时给出较好的信号波形到显示系统是必不可少的。

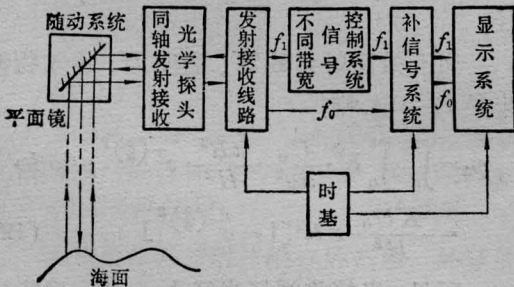


图 1 方框图

2. 补信号系统。激光射到海面，相互作用机理复杂，有时丢信号，特别在海洋表面是小风浪、平滑泳浪时就更多些。为了保持后面显示系统正常工作，当信号丢失时就自动补上，以保持原测数据不变，再来信号时，在此基础上累计。

3. 显示系统。其一是解决相位测距的多值性问题， $N$  值解算一般是采用多通道来解决，但我们是测波浪高度，并不关心仪器本身到波浪之间的绝对距离，只关心波浪的相对变化值，所以我们设计了单通道，将仪器到波浪之间光尺的整数倍  $N$  去掉，而只留波浪

变化高度的相对值；其二是在所测时间里将波高的最大值选出，予以数码显示。

## 讨 论

随着海况不同，测值的误差大小也是不同的。中风浪和较大风浪，测值误差较小；愈趋小风浪和平滑泳浪，所测值误差愈增大，而且离散性大，到测值不可信。下面逐一分析：

因为 
$$H = \frac{c\phi}{4\pi f_0}$$

设  $c = \frac{c_0}{\mu}$ ， $\mu$  为大气折射率

所以依误差传递公式有<sup>[2]</sup>：

$$\Delta H = \frac{c_0}{2\mu f_0} \cdot \frac{\Delta\phi}{2\pi} - \left( \frac{\Delta f_0}{f_0} - \frac{\Delta c_0}{c_0} + \frac{\Delta\mu}{\mu} \right) H \quad (8)$$

假设作用距离为 300 米，精度要求为  $\pm 0.2$  米，要求各参数误差小于  $10^{-4}$  量级即可，从 (8) 式看，右边第二项与距离有关的三参数，都能保证在  $\pm 10^{-6}$  以上，所以这一项可忽略不计（陆地测距仪，一般测程大，此项重点考虑），只需考虑第一项，引起第一项的误差一个是仪器本身，二是复杂的海面。

1. 海面反射。不少文章谈到，有的认为海面是个朗伯反射体；有的认为是镜面反射，我们说都有一定道理，主要是看从那一角度出发。如果从整个海面看，说它是朗伯反射体，当然不会提出什么疑义。那么，从平静的海面有限小块来看，说它是镜面反射，也有道理，关键是应该从光束射到海面的光斑大小和海面粗糙程度比较而言。如在海面光斑为  $\phi 10 \sim 20$  厘米时，一般在 3~6 级海况下，这时以漫反射为主，有适当的接收系统，接收到的信号较稳定，误差小。但当海况在 3 级以下时，镜面反射成分变大，所测值离散性会增大，尽管考虑了丢信号问题和不同带宽的接收回路，所测值误差还是很大。

2. 波形失真。复杂的海面反射，引起了

调制波波形失真,使其正弦波不成其正弦波,这便失掉了相位测距的基本条件。如在理想情况下,见图2所示的前半部,一定的波浪高度有相应的时间差  $\Delta t_1$ ,但由于海面的作用,虽然波浪高没有变,而回波  $f_1$  的波形却有了失真,如图2的右半部分,时间差变为  $\Delta t_2$ ,造成了  $\Delta t_2 - \Delta t_1$  的误差。

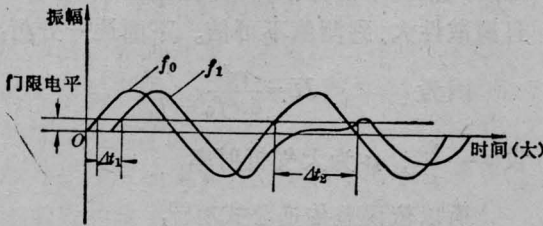


图2 主波  $f_0$  和回波  $f_1$  比较

3. 在激光相位测距仪中,实际上是把氦-氖激光作为载波来应用,它可以用下式表述:

$$A = A_0 \sin(\Omega t + r) \quad (9)$$

从这一简谐振荡表达式可以看到,如果要进行纯调幅,即将  $A_0$  振幅随时间而变化,当其调制函数为正弦波时,瞬时值即可改写为下式<sup>[3]</sup>

$$a(t) = A_0 [1 + M \sin(\omega_0 t + \varphi_0)] \sin(\Omega t + r) \quad (10)$$

见图(3)。其中  $A_0$  为载波(激光)振荡幅度;调制系数  $M = \frac{\Delta A_m}{A_0}$ ;  $\Delta A_m$  是包络(调制波)变化幅度;  $\Omega$  是载波角频率;  $\omega_0$  是调制波角频率;  $r$  是载波初相;  $\varphi_0$  为调制波初相。

经过调制器输出的调幅波,将它射到海

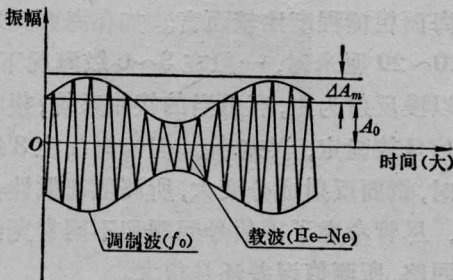


图3 振幅调制

面,反射回来,到接收机经光电转换解调后即

$$A_1 = \Delta A_m \sin[\omega_0(t + \tau) + \varphi_0]$$

问题是被调后的激光束射向海面,反回光束是否还能保持图3那样完整的包络?假设氦-氖激光为单模(TEM<sub>00</sub>),光束横截面的能量按高斯分布。设发射器到海面高度为  $H$ , 光束在海面的截面积半径为  $a$ , 激光束在海面的能量分布便为<sup>[4]</sup>:

$$p(\rho) = \frac{U_0}{\pi a^2} e^{-\left(\frac{\rho}{a}\right)^2} \quad (11)$$

其中  $U_0$  为总能量。

又设海面为朗伯反射体,为计算方便,设接收发射系统垂直海面,则接收物镜所接收到反射面积元  $ds$  所反射的能量为(略去其它损失):

$$dp_1 = K \frac{U_0}{\pi a^2} \frac{\pi R^2}{H^2} e^{-\left(\frac{\rho}{a}\right)^2} ds$$

其中  $K$  为有效反射系数;  $R$  为接收物镜半径。

当有效反射系数  $K$ 、高度  $H$ 、接收物镜半径  $R$  一定,则:

$$p_1 = \int_0^{2\pi} \int_0^b K \cdot \frac{U_0}{\pi a^2} \cdot \frac{\pi R^2}{H^2} \cdot e^{-\left(\frac{\rho}{a}\right)^2} \rho d\rho d\varphi = \frac{KU_0}{H^2} \pi R^2 [1 - e^{-\left(\frac{b}{a}\right)^2}] \quad (12)$$

可见,当接收视场半径  $b = a$  时,已收到的激光能量来自几乎是整个反射光斑的各部分且为反射光能量的绝大部分,而这能量不因海面作用而变化,也就是说,这时所接收的能量的变化规律即为光源的变化规律——调制函数的变化规律,在这种条件下,只要高度  $H$  (也就是作用距离)合适,回波就能保持包络原形。

可是,当海面反射不是朗伯反射体,这种现象,多出现于前面所述小风浪和平滑泳浪情况,我们说,有效反射系数  $K$  就不是个定值,这是因为在水面光斑范围内,可以说是小镜面反射体的集合,水面风浪愈大,小镜面愈小,逐渐趋近于漫反射体;水面风浪愈小,小



镜面就逐渐扩大,有时整个光斑内是一个大反射镜。如果这反射镜有一适当倾角,这时,投射光全部反射到接收视场之外,使其接收不到光能,所以,我们可以认为,这时的有效反射系数  $K$  为“0”。可见,反射系数  $K$  就不是一个常数,而是随光照射海面不同位置,不同时间而变化的一个函数,它可写为  $K(\rho, t)$ 。海面为朗伯反射体时,  $K$  为常数,是它的一种状态。因此  $p_1$  就随着  $K(\rho, t)$  而变化,也就是说,水面反射的回波,又经过一次调制,这样它就保持不了信号包络的原形。

$K(\rho, t)$  具体是什么样的函数,还很难给出,但它应是下述诸因素的综合结果:

飞行体(乘仪器)运动速度和其姿态的变化;

波浪运动引起的海表面的状态变化;

海洋表面水质的变化;

由于外界因素如风等影响,海表面状态的变化等。

## 几点意见

1. 激光调幅比相的测距原理应用于海浪的剖面测量中,虽然在激光能量大小、发散角大小、接收回路等方面作了很多研究,取得

了一定成果,但在小风浪和平滑泳浪情况下,复杂的海面反射,破坏了相位测距的基本条件,使其有一定的局限性。

2. 如果采用脉冲测浪高,脉冲选取,就要严于陆地目标,不能只考虑利用脉冲前沿或后沿较陡获取高精度,脉宽必须窄,程度视要求精度而异,仅就这一考虑,应为:

$$|\Delta H| \geq \frac{1}{2} T c_0$$

$$T \leq \frac{2|\Delta H|}{c_0}$$

其中  $\Delta H$  为设计仪器所要求精度;  $T$  为脉冲宽度;  $c_0$  为光速。

精度要求愈高,激光脉宽就愈窄,这就给激光器本身带来更高要求;也必须采用响应速度更高的光电转换器件和频带更宽的脉冲放大器;也需要有相应高的计数系统等,这对设计者来说,要全面衡量。

## 参考文献

- [1] A. A. 盖尼克著,梁增勇等译;《微波测距仪》,中国工业出版社,1965年,pp6~8.
- [2] 冯师颜编;《误差理论与实验数据处理》,科学出版社,1964年,pp43~44. 高林奎,宋玮编;《激光测距》第十章,人民铁道出版社,1977年.
- [3] 天津大学精仪系编译;《激光技术》,科学出版社,1972年,pp488~490.
- [4] M. I. 斯科尔尼克主编,谢卓译;《雷达手册》,国防工业出版社,1978年,pp10~31.