

# 船载微波波高计的船体颠簸校正技术

郑正奇<sup>1</sup>, 蒋传纪<sup>1</sup>, 殷杰羿<sup>1</sup>, 阮志伟<sup>1</sup>, 康 伟<sup>1</sup>, 张静静<sup>1</sup>

(1. 华东师范大学 电子工程系, 上海 200062)

**摘要:** 提出了一种可用于船(舰)载的 Ku 波段微波波高计, 它是一种非接触式的波高测量设备, 可架设于船头, 动态测量海浪波高参数. 为了修正船体颠簸对测量结果的影响, 在微波探测单元上设置了加速度传感器, 提出了两种不同的数学模型——加速度匀变模型和简谐振动模型, 分别计算船体的实时颠簸位移, 并对理论上可能出现的最大误差进行了分析. 测量结果表明, 两种模型均能有效地校正船体颠簸的影响, 实测海浪波高的平均误差小于 8%.

**关键词:** 微波波高计; 船载; 颠簸; 校正; 加速度计

中图分类号: P716.22 文献标识码: A 文章编号: 0253- 4193(2001)04- 0100- 06

## 1 引言

船(舰)载测量波高在远洋运输和军事等方面均十分需要, 但长期以来一直都没有得到很好的解决, 主要有两个方面的原因, 一是传统的波高测量设备大多是接触式波高计或浪潮仪, 如浮标式波高计、压力传感式波高计/浪潮仪、超声波波高计等等, 它们或者浮于海面, 或者沉于海底, 不能跟随船体移动, 因此难以用于船载测量; 另一个原因是船体在海洋中受到海浪的影响而产生颠簸, 测量海浪波高时没有静止参照物, 因此不能正确地测量海浪波高. 本文提出了用 Ku 波段微波波高计测量海浪波高, 它是一种非接触式的波高探测设备, 架设于船头, 可跟随船体移动, 在移动过程中实时测量波高. 为了消除船体颠簸对测量波高的影响, 在探测单元上设置了加速度传感器, 通过测量船体的加速度来反演船体的颠簸位移, 从而得到了实际的海浪波高.

## 2 Ku 波段微波波高计的工作原理

如图 1 所示, Ku 波段微波信号垂直照射海面, 海面波浪的垂直运动速度为  $v(t)$ , 则微波信号经海面反射后, 回波信号中包含的多普勒频率  $f_D$  可表达为

收稿日期: 2000- 09- 02; 修订日期: 2001- 01- 15.

基金项目: 国家“863”青年基金资助项目(818-Q-11).

作者简介: 郑正奇(1964-), 男, 江苏省宜兴市人, 副教授, 从事海洋遥感技术研究.

$$f_D = 2v(t)/\lambda_0, \quad (1)$$

式中,  $\lambda_0$  为射频信号的工作波长. 在接收机中, 海面反射信号和发射机耦合过来的微波信号进行混频, 混频后就得到了多普勒频率  $f_D$ . 为了判别  $f_D$  的正负, 在接收机中的相检混频电路采用两个间隔为  $\lambda_g/8$  ( $\lambda_g$  为微波波导波长) 的相位检波二极管  $D_1$  和  $D_2$  同时检测  $f_D$ .

假设在某一时刻  $t$ , 检波管  $D_1$  与海面的距离为  $Z$ , 微波源信号到  $D_1$  处可表达为

$$U(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (2)$$

若  $D_1$  和  $D_2$  引起的相位滞后均为  $\varphi_0^1$ , 则经过  $D_1, D_2$  后的微波信号可表达为

$$U_{D_1}(t) = A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_0 - \varphi_0^1), \quad (3)$$

$$U_{D_2}(t) = A_2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0 - 2\varphi_0^1 - \frac{\pi}{4}). \quad (4)$$

海面反射后回波信号到达  $D_1$  和  $D_2$  处分别被检波, 经过低通滤波, 并忽略由检波管引起的相位滞后  $\varphi_0^1$ , 可得到多普勒频率分量<sup>[1]</sup>

$$V_{D_1}(t) = A_{D_1} \cos \left[ \frac{2v(t)}{C} \omega_0 t - \frac{4\pi Z}{\lambda_0} \right], \quad (5)$$

$$V_{D_2}(t) = A_{D_2} \cos \left[ \frac{2v(t)}{C} \omega_0 t - \frac{4\pi Z}{\lambda_0} + \frac{\pi}{2} \right]. \quad (6)$$

由式(5), (6)可知, 检波管  $D_1, D_2$  输出的多普勒频率相位差  $\pi/2$ . 若  $v(t)$  为正(海浪波面上升), 则  $V_{D_2}$  超前  $V_{D_1} \pi/2$ ; 若  $v(t)$  为负(波面下降), 则  $V_{D_1}$  超前  $V_{D_2} \pi/2$ . 每当  $Z$  变化  $\lambda_0/8$ , 回波多普勒频率的相位就变化了  $\pi/2$ ,  $V_{D_1}$  和  $V_{D_2}$  必有一个出现过 0 点. 因此, 记录过 0 点次数  $n$ , 就可得到波面的变化高度, 其分辨率为  $\lambda_0/8$ . 结合  $V_{D_1}$  和  $V_{D_2}$  的相位判断, 即可求得海浪波高  $h$  为

$$h = n \lambda_0 / 8. \quad (7)$$

通过对 100 个(或更多的)波高数据群  $h_i$  进行统计平均或 1/3 最大波高平均或 1/10 最大波高平均, 可求得平均波高( $H$ )、有效波高( $H_e = H_{V3}$ )和 1/10 波高( $H_{1/10}$ ).

### 3 船体颠簸补偿校正模型

#### 3.1 加速度匀变模型

##### 3.1.1 船体上下位移与加速度的变化关系

由于船体颠簸, 使得加速度计探测到船体在垂直方向的加速度随时间变化为一曲线, 如图 2 所示. 取一个很小的时间段  $\Delta t$ , 对应船体的加速度由  $a_0$  变化到  $a_1$ , 速度由  $v_0$  变化到  $v_1$ , 位移由  $s_0$  变化到  $s_1$ , 可以近似地把  $a_0$  变化到  $a_1$  的过程看作是线性的. 在  $t_0$  到  $t_1$  之间有

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = a_0 + \frac{a_1 - a_0}{\Delta t} (t - t_0). \quad (8)$$

对上式进行积分得

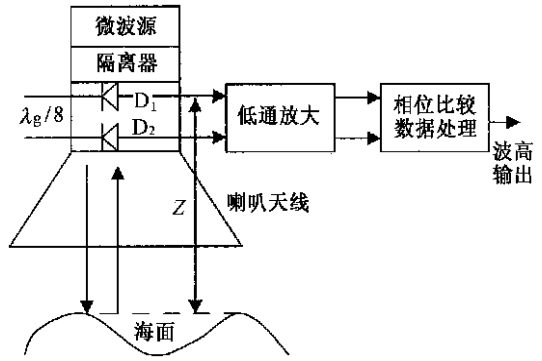


图1 Ku波段相检雷达测量波高

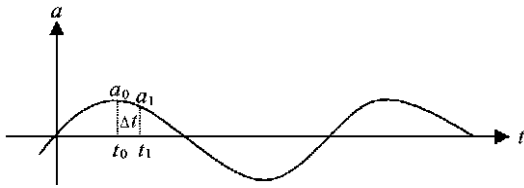


图 2 加速度匀变示意图

$$v(t) = v_0 + a_0(t - t_0) + \frac{a_1 - a_0}{2\Delta t}(t - t_0)^2, \quad (9)$$

对  $v(t)$  再积分, 得到位移

$$s(t) = s_0 + v_0(t - t_0) + \frac{a_0}{2}(t - t_0)^2 + \frac{a_1 - a_0}{6\Delta t}(t - t_0)^3, \quad (10)$$

可见, 经过两次积分便可得到船体的位移与加速度的变化关系。

### 3.1.2 加速度匀变模型在船体颠簸补偿中的应用

在上述船体位移与加速度的变化关系中, 有如下两个问题需要解决: 一是起始位置的确定, 二是误差的累积。

首先通过控制系统对采集到的加速度值进行统计和判断, 以加速度值为负的最大值对应的时刻作为起始点  $t_0$ , 此时船体处于颠簸的最高点, 速度  $v_0 = 0$ , 可设定起始位移为  $s_0$ , 并根据采集的加速度值随时间的变化开始累积计算船体的颠簸位移和速度。当加速度变为 0 时, 船体到达了平衡位置, 此时船体的颠簸位移为 0, 从而可求得船体实际的颠簸位移。在此基础上继续计算, 可求得船体在一个颠簸周期或任意两个时间间隔  $\Delta t$  之间的位移量。在采集过程中, 由于船体的颠簸周期通常为几秒到十几秒, 而加速度采集计算的相邻时间间隔为几十毫秒, 因此在一个船体颠簸周期中可采集到足够多的加速度值及对应的时刻, 并且可根据采集数据的情况对某些没有采集到的数据和时刻(如加速度为 0 的时刻等)采用插值法以精确求得。

为了防止采集时间长了以后, 由于各种原因使得船体位移值出现误差累积而影响测量精度, 在每次采集了 3~5 个颠簸周期之后, 重新标定船体颠簸实时位移的参考点, 即寻找加速度为负最大值处设定初始速度为 0, 然后再继续计算。

因为实际采集数据时, 编程环境中的时钟并不是一个恒定值, 而易受程序中其他模块的影响, 所以相邻两次读取加速度电压值间的时间差  $\Delta t$  不是用的编程环境里的时钟, 而是每次读数时记录当时时刻, 由相邻两次采样点的时间差值算得的, 这样可以保证每次的  $\Delta t$  都对应当前时刻的即时值, 提高了计算的准确度。

实际测量时, 式(5)、(6)的相对相位在海浪的波峰和波谷点会出现突变, 以此突变时刻作为基准来触发波高计数器工作并与加速度计的采样时刻相对应。波高计数和加速度值的采样同时进行, 相互独立。由于都是采用计算机的时钟, 因此在时间同步方面得到了保证。若在采样的数据中没有对应波峰或波谷时刻的加速度值, 则可利用相邻前后时刻的加速度值进行线性插值计算。

### 3.2 简谐振动模型

在平静的海面船体处于平衡位置, 当有海浪时船体受到波浪的冲击而偏离平衡位置, 这时船体受到一个与位移成正比而方向相反的作用力

$$F = -KX, \quad (11)$$

此作用力使船体产生加速度, 于是得

$$F = m \frac{d^2X}{dt^2} = -KX, \quad (12)$$

式中,  $m$  为船体的质量。上式为二阶常微分方程, 其解为

$$X = A \cos(\omega t + \phi), \quad (13)$$

式中,  $\omega = \sqrt{K/m}$ , 为颠簸角频率;  $A$  为颠簸最大位移. 在波高计上设置一加速度计来测量船体的加速度, 并记录此时加速度对应的时刻, 则通过测量加速度的相邻极值或过 0 点之间的时间差, 可得到船体颠簸周期  $T$ . 因此, 由式(12)可得船体的实时位移与加速度  $a$  和周期  $T$  之间的关系为

$$X = -\frac{m}{K}a = -\frac{a}{\omega^2} = -\frac{T^2}{4\pi^2}a. \quad (14)$$

式(14)说明船体的位移与加速度值成正比, 而方向相反; 只要测得船体的颠簸周期和即时的加速度值, 就可求得船体的即时位移, 从而对波高计所测得的波高进行了校正.

用上述方法计算船体颠簸位移, 关键是需要推算出船的颠簸周期  $T$ . 在实施过程中, 这个周期是通过提取前一个周期, 即前面相邻两个加速度为 0 对应的的时间差得到的. 以加速度的过 0 点作为测量颠簸周期的基准, 其优点是此时船体颠簸速度最快, 时刻提取比较准确, 有利于通过线性插值法求得 0 点加速度时刻. 为了减小颠簸的随机性和读取时间的误差对测量周期造成的影响, 实际测量时可取 3~5 个加速度过 0 点来求颠簸周期.

## 4 船体颠簸补偿校正方案及误差分析

### 4.1 船体颠簸补偿校正方案

根据上述理论模型, 在进行船体颠簸补偿校正时, 采用波峰校正方案.

在海面上, 波浪和船的运动满足

$$V_w = V_m + V_s, \quad (15)$$

式中,  $V_w$  为实际被测波面的运动速度;  $V_m$  为船体与被测波面的相对速度;  $V_s$  为船体的颠簸速度. 船体的上下颠簸对探测结果造成的影响是增加或降低探测系统探头与波面的相对速度.

控制系统每次在波谷时刻读取船体的加速度值, 换算成船体的颠簸位移  $h_1$ ; 在波峰时刻读取微波系统测量的波浪上升高度  $h_2$ , 同时再次读取船体的加速度值, 换算成船体的颠簸位移  $h_3$ , 则这三者的合成值  $h$  为实际的波高.  $h$  的表达式为

$$h = h_2 + (h_3 - h_1). \quad (16)$$

### 4.2 波峰校正方案的误差分析

在波峰或波谷附近时, 由于波面的速度变慢, 使得出现在波峰、波谷之前或之后波面与船体的相对运动速度可能为 0 的情况, 造成探测系统判断波峰、波谷点提前或延迟, 导致探测系统多算或少算多普勒频率脉冲, 使测量出现误差.

如图 3 所示, 假设在波峰时波面速度为 0 而船体还在向上运动, 使得探测系统对波峰点  $B$  的判断提前到了  $A$  点, 造成波高数值少算了  $\Delta h$ .

在时刻  $t_1$  船体向上的速度  $v_1$  与波面  $A$  点的向上速度  $v_2$  相等, 造成探测系统误判  $A$  点为波峰. 假设波面在  $t_2$  时刻到达波峰点  $B$ , 船体在  $t_3$  时刻到达最高点, 即  $v_1$  比  $v_2$  收敛得慢, 故船体在  $\Delta t$  时间内移动的垂直距离  $\Delta h_s$  大于波

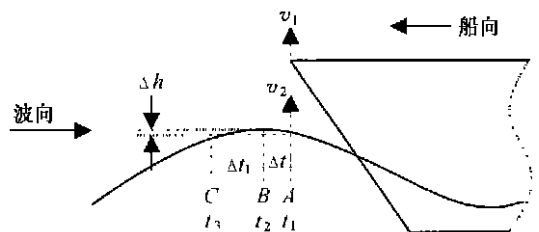


图 3 船体和波浪的相对运动

面移动距离  $\Delta h$ .

可用加速度匀变模型分析. 设船体在  $A, B, C$  点处的加速度分别为  $a_1, a_2, a_3$ , 由式(9)、(10)可求得<sup>[2]</sup>

$$\Delta h_s = -\frac{2a_3 + a_1}{6} \Delta t^2 - 2\Delta t \Delta t_1 \frac{2a_3 + a_1}{6} - \frac{a_1 - a_2}{6} \Delta t_1^2. \quad (17)$$

通常  $\Delta t$  很小,  $a_1 \approx a_2$ , 所以式(17)中第三项相对于前两项可忽略不计. 对  $\Delta h_s$  的大小可作如下估计: 假设有一个 4.89 m 的波浪, 其周期为 8 s, 通常大船的颠簸周期远大于波浪周期, 若船的颠簸周期为 16 s, 船的上下颠簸位移不超过 2 m, 则由式(10)可得船的最大加速度为  $0.1875 \text{ m/s}^2$ . 假设  $\Delta t = 0.5 \text{ s}$ ,  $\Delta t_1 = 1 \text{ s}$ , 则由式(17)可求得  $\Delta h < \Delta h_s < 0.1875 \text{ m}$ , 由于船体颠簸周期大于波浪周期, 在一个波浪周期中不会在波峰和波谷同时出现上述造成误差的情况, 因此波峰校正方案引入的误差小于  $\Delta h$ , 即相对误差小于 3.83%.

## 5 测试结果

对船体颠簸校正的两种模型分别用计算机编程, 并应用于实际的 Ku 波段微波波高计进行了实验室模拟测量和船载实测.

图 4 为简谐振动模型的实验室测试结果. 图中左边部分是波高计对衰减振荡摆动目标的测量结果, 置于目标上的加速度计没有工作, 测量的结果是一个幅度逐渐衰减的变化曲线; 图中右半部分是进行颠簸校正时, 对于同样的目标摆动高度所测量的结果, 可见由于加速度计与目标同步摆动, 校正后所测量的波高结果接近于 0.

图 5 为加速度匀变模型的一组船载实测结果. 实验是在造波池 ( $69 \text{ m} \times 46 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ ) 中进行的, 波高计置于约 4 m 长的船上, 对规则波进行测量, 并用标准浪高仪 (WS-550 伺服式浪高仪, 精度为毫米级) 进行同步对比测量. 多组测量结果 (表 1) 表明, 平均波高的误差均小于 8%.

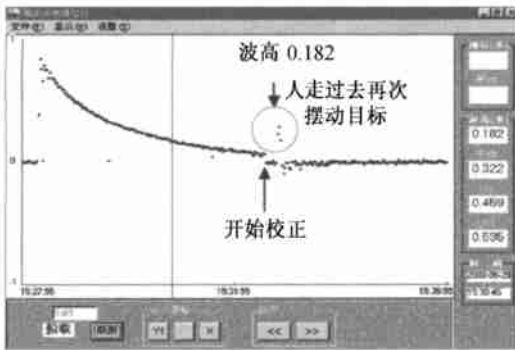


图 4 简谐振动模型的实验室测试结果

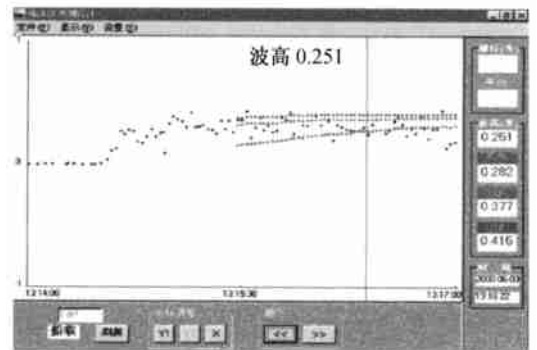


图 5 加速度匀变模型的船载实测结果

表 1 船载规则波定点测量平均波高和标准浪高仪对比结果

试验编号	平均波高/mm		相对误差 (%)
	浪高仪	本系统	
1	140.7	129.59	7.90
2	136.8	141.38	3.35
3	159.8	153.08	4.21

## 6 结论

讨论了用于船载波高测量的微波波高计的工作原理和船体颠簸校正的两种模型, 并给出了实施方法和误差分析. 长期以来人们对船体颠簸补偿方面作了不少研究, 但一直没有能够找到有效的消除误差累积的办法, 本文提出的两种模型均能较好地解决这一问题, 且得到了实验和实测结果的证实.

### 参考文献:

- [1] 郑正奇, 蒋传纪, 殷杰羿, 等. Ku 波段海表波高/潮位探测系统的研究[J]. 微波学报, 2000, 16(3): 214~219.
- [2] 阮志伟. Ku 波段雷达海洋波高和潮位探测系统的研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2000.

## Compensation for influence of ship jolt on ship-borne wave height meter

ZHENG Zheng-qi<sup>1</sup>, JIANG Chuan-ji<sup>1</sup>, YIN Jie-yi<sup>1</sup>, RUAN Zhi-wei<sup>1</sup>,  
KANG Wei<sup>1</sup>, ZHANG Jing-jing<sup>1</sup>

(1. Department of Electronic Engineering, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** A Ku-band microwave wave-height meter is proposed. It is a remote wave-height detecting equipment. It can be set up on the head of a ship to detect wave-height dynamically. In order to compensate for the ship jolt, an accelerometer is taken over the microwave detecting unit. Two mathematical models — acceleration uniform changing model and simple harmonic vibration model are proposed to compute the shift of ship moving, and the possible theoretical maximal error is discussed. The result shows that two models can compensate for the shift of ship moving effectively, the mean error of wave-height is less than 8%.

**Key words:** microwave wave height meter; ship-borne; jolt; compensation; accelerometer