

机载雷达高度计对海况及海面 风速的测量研究*

潘家祎 袁业立 姜景山[†] 郑全安

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266003)

[†](中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100080)

提要 运用我国自行研制的 ZHG-1 型 X 波段机载雷达高度计于 1995 年 4 月 13 日—4 月 18 日在青岛附近海域进行的海上飞行实验数据, 及导出的均方根波高、有效波高、均方根波陡算法模型, 得到了上述海况参数值。又利用高度计海面回波波形下降沿数据计算出海面风速, 结果与实际情况符合。最后对 ZHG-1 型机载雷达高度计测量分辨率进行分析。

关键词 机载雷达高度计 海况参数 海面风速

雷达高度计是 70 年代发展起来的新型海洋遥感仪器, 它具有时间分辨特性, 可以测量出瞬时海面至雷达高度计天线之间的距离, 还可以得到海面对高度计雷达脉冲反射回波波形, 据此可计算出海况参数。另外高度计雷达脉冲的海面回波功率强度或称散射系数(σ^0), 可用于反演海面风速。雷达高度计采取了脉冲压缩技术, 技术难度较大, 被认为是高技术海洋遥感传感器。中国科学院空间中心和中国科学院长春地理所经过多年努力于 1995 年初研制成功我国首台 ZHG-1 型 X 波段机载雷达高度计, 其基本参数为: 中心频率: 9.0GHz; 脉冲宽度: 5ns; 采样门数: 12 个; 采样门时间间隔: 5ns; 天线半功率宽度: 15°; 发射脉冲重复频率: 10—1000Hz 可调。本文报告利用 ZHG-1 型 X 波段机载雷达高度计对海况测量的首次成功实验结果, 导出了 ZHG-1 型机载雷达高度计的海况参数、海面风速算法模型, 并对实验结果进行了分析。

1 实验

ZHG-1 型机载雷达高度计飞行实验区选在青岛附近海域, 如图 1 所示。空中作业平台为“超黄蜂”直升机。1995 年 4 月 13 日—4 月 18 日期间共进行 4 个架次飞行实验。飞行定位是利用机载 GPS, 定位精度为 70m。前二架次实验目的是检测高度计的机械及电性能, 后二架次实验的主要目的是测量雷达高度计海面回波波形用于海况参数的反演计算, 测量高度计至海面距离及进行校准。

海上同步观测实验测量海浪等基本海洋参数, 用于检验高度计数据对海浪参数的反演准确度。在海上共设 2 个观测点: 一是国家海洋局北海分局的麦岛水文观测站, 另一个观测点位于 35° 54' 58" N, 120° 19' 44" E, 即在竹岔岛东南海域, 离岸 9.8km 处, 观测仪器为美国 ENDECO 公司的 956 浮标。956 浮标地面接收处理站设于薛家岛

* 国家航天办公室资助项目。潘家祎, 男, 出生于 1963 年 6 月, 博士, 副研究员。

收稿日期: 1996 年 2 月 1 日, 接受日期: 1996 年 5 月 28 日。

金沙滩, 海上观测点及地面接收站位置见图 1。

2 雷达高度计海面波浪算法

早在 1957 年 Moore 等提出海面平均雷达脉冲回波可以表述为发射脉冲时间域波形、海况、天线增益和距离的叠合积分。Brown(1977) 给出了精确的海面回波数学模型: 海面回波为海面波浪高度起伏概率密度函数与平静海面脉冲响应函数的卷积。Brown 模型是以卷积形式表达的, 计算较为复杂。假设双程天线波束是高斯型的, 雷达脉冲波形、海面波浪高度起伏及波陡的概率密度函数也是高斯型的, Barrick(1972)¹⁾ 推导出海面回波波形 $P(t)$ 的简洁解析表达式为:

$$P(t) = K \frac{X_w}{s^2 H^3} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{t_p}{t_s} - \frac{t}{t_p} \right) \right] \cdot \exp \left[\left(\frac{t_p}{t_s} \right)^2 - \frac{2t}{t_s} \right] \quad (1)$$

式中,

$$X_w = \frac{c\tau}{4\sqrt{\ln 2}}, \quad t_p = \frac{2(X_w^2 + 2h^2)^{1/2}}{c}; \quad t_s = \frac{2H\psi_e^2}{c}, \quad \frac{1}{\psi_e^2} = \frac{81n^2}{\psi_B^2} + \left[\frac{\left(1 + \frac{H}{a_e}\right)}{s} \right]^2$$

以上式中, $c=30\text{cm/ns}$ 为光速; H 为高度计相对平均海面的距离; τ 为高度计脉冲单功率点宽度; s 为海浪波陡总均方根值; h 为均方根波高值; a_e 为地球半径; ψ_B 为天线的半功率宽度; $\operatorname{erf}(x)$ 为误差函数; K 为常数包括的因素有发射功率、脉冲压缩增益、天线增益、传输损耗及菲涅尔反射系数。

波高引起的脉冲上升沿的展宽由 t_p 值所表达。天线波束宽度与海浪波陡的联合效应反映在 t_s 参量中, t_s 是描述回波到达最大后衰减程度的量。考虑机载高度计跟踪偏差效应, 时间原点改为 t_0 , 又 $t_s \gg t_p$ 则归一化回波波形 $W(t)$ 为:

$$W(t) = \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{t-t_0}{t_p} \right) \right] \cdot \exp \left[-\frac{2(t-t_0)}{t_s} \right] \quad (2)$$

实验飞行高度 $H=2440\text{m}$, 根据 ZHG-1 型机载雷达高度计参数及考虑 $\frac{H}{a_e} \ll 1$, 有效

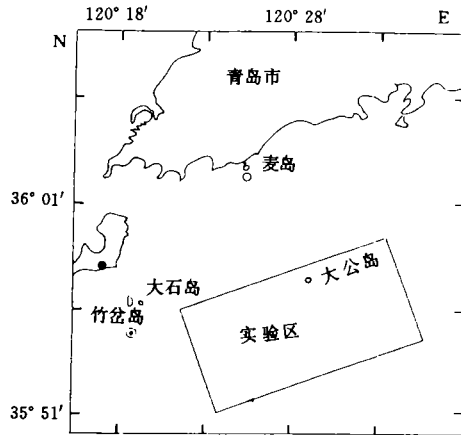


图 1 机载高度计飞行实验海区及海上观测点
Fig. 1 Region of airborne altimeter experiment and in situ measurement location

○ 示麦岛海洋站观测点; ◐ 示 956 浮标测量位置;
● 示 956 浮标接收、处理站位置。

1) Barrick, D. E., 1972. Determination of mean surface position and sea state from the radar return of a Short-Pulse Satellite Altimeter, sea surface topography from space, Tech. Rep. ERL 228-AOML 7(Rockville), pp. 16.1—16.19.

波高 $SWH=4h$ (Neumann, 1966) 得:

$$h=15\left(\frac{t_p^2}{2}-4.508\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$SWH=60\left(\frac{t_p^2}{2}-4.508\right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$s=\left(\frac{16266.67}{t_s}-80.906\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中, t_p, t_s 的单位为 ns; h, SWH 单位为 cm.

3 实验数据处理及海面波浪参数反演计算

实验时高度计发射脉冲频率 1kHz, 海面回波波形取 100 个脉冲 0.1s 的算术平均。反演计算选取第 4 架次具有代表性的 16 个海面回波数据, 每一个回波有 12 个数据点。实验时回波时间跟踪器延时时间以 1ns 的步长递增, 这 16 个波形处于信号门的不同位置。对这 16 个回波信号进行归一化处理, 得到归一化的海面回波数据。回波模型(2)式中共有 3 个待求解的参数: t_0, t_p, t_s 。本文采用了迭代法求出这三个参数, 进而由(3), (4), (5)式得到 h, SWH 及 s 。对这 16 个回波波形数据的反演计算结果见表 1。对表 1 所列的反演结果的统计处理结果见表 2。

表 1 计算结果

Tab. 1 Calculation results for return waveform results

No	t_0	t_p	t_s	h	SWH	s
1	28.4	3.3	105.6	14.5	58.1	0.12
2	23.3	5.1	85.0	47.7	175.0	0.10
3	25.7	3.2	86.9	11.7	46.9	0.10
4	6.6	3.7	70.1	22.9	91.7	0.08
5	3.0	4.1	78.7	29.6	118.4	0.09
6	4.7	5.3	71.2	46.3	185.3	0.08
7	39.9	3.2	218.6	11.7	46.9	-
8	26.2	1.8	94.4	-	-	0.10
9	25.7	2.0	76.5	-	-	0.09
10	20.7	1.9	81.0	-	-	0.09
11	19.4	3.1	67.8	8.2	32.7	0.08
12	16.7	4.8	98.1	39.7	158.9	0.11
13	15.3	3.5	60.6	19.1	76.3	0.07
14	5.6	1.6	64.4	-	-	0.08
15	5.6	3.8	80.9	24.7	98.8	0.09
16	5.1	7.4	55.5	72.0	287.0	0.07

表2 对表1数据的统计处理结果

Tab. 2 Statistical results of the data listed in Tab. 1

\overline{SWH}	\bar{h}	\bar{s}	σ_{SWH}	σ_h	σ_s	\bar{t}_p	\bar{t}_s
114.7	28.7	0.09	71.7	18.0	0.01	3.6	87.2

\overline{SWH} , \bar{h} 表示均值; σ_{SWH} , σ_h , σ_s 表示标准偏差(单位: cm); \bar{t}_p , \bar{t}_s 表示均值。

956 浮标所测的 $SWH=36.3\text{cm}$, $h=24.0\text{cm}$, 高度计测量准确度为 78.4cm 。 σ_{SWH} 表示 SWH 的测量精度为 71.7cm , 这个数据接近 Seasat, Geosat 的 0.5m 精度 ($SWH<1\text{m}$)。由表 2, $\bar{h}=28.7\text{cm}$, 海面均方根波高的测量准确度达到 4.7cm , 而 SWH 是由 h 推算的。由此可见, 在此影响高度计所测有效波高准确度的主要因素是取 SWH 为 $4h$ 的可靠性问题, 而不是高度计的测量误差所致。海面均方根波陡的测量平均值为 0.09 , 精度为 0.01 。 s 值大于实际的重力波波陡, 但考虑 s 也包括海面毛细波波陡, 毛细波波陡比重力波波陡大, s 的计算值是合理的。

4 一种海面风速的新算法及计算结果

s 包含着小尺度波动特征, 如海面毛细波。海面毛细波与海面风速有直接的关系, 这表明利用高度计的海面回波波形的 s 可进一步反演出海面风速, 这样对风速的反演计算可以不用海面散射系数 σ^0 , 而直接用海面回波波形的基本参数 t_s 。根据 Phillips (1966) 的观测数据, 对充分成长的海浪, Barrick(1972)¹⁾ 得到 s 和海面风速的经验关系式:

$$s^2 = 5.5 \times 10^{-3} v \quad (6)$$

式中, v 的单位为 m/s 。根据 (5), (6) 两式可得:

$$v = \left(\frac{89.467}{t_s} - 0.445 \right)^{-1} \quad (7)$$

对海面风速的计算结果见表 3。风速计算的平均值为 $v=1.5\text{m/s}$, 标准偏差为 $\sigma_v=0.4\text{m/s}$ 。麦岛水文站对风速的观测数据为 $v=8.0\text{m/s}$, 风速计算值与麦岛水文站观测数据相差较大。实测风向为 NNW, 实验时风从陆地吹向海面, 麦岛水文站西北面是青岛浮山, 由于风区过短及浮山遮蔽效应, 虽然风很大, 但未产生较高的浪, 麦岛水文站所测波高仅为 $0.2\text{m}(H_{1/10})$, 海面波浪未充分成长, 因而造成高度计测量风速值与观测数据间有较大偏差。如果风向为 S, 风从海洋吹向陆地, 这种偏差就会减少。机载飞行第一架次实验时, 风向为 S, 海浪充分成长, 此时海面浪高为 $0.5\text{m}(H_{1/10})$, 有效波高为 $0.3\text{m}(H_{1/3})$, 与第四架次实验时 956 浮标观测点海况相近。第一架次实验时风速为 1.7m/s , 这与高度计反演出的风速相差较小。 s 包含毛细波波陡也包含重力波波陡, 因此, 利用 s 值反演计算风速, 海浪是充分成长这一条件非常重要, 否则会引起较大误差。对远离陆地的海区及大洋, 大都满足上述条件。

1) 同 2 页脚注 1)。

表3 海面风速计算结果

Tab. 3 Calculation results of sea surface wind speed

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
t_s	105.6	85.0	86.9	70.1	78.7	71.2	218.6	94.4	76.5	81.0	67.8	98.1	60.6	64.4	80.9	55.5
v	2.5	1.6	1.7	1.2	1.4	1.2	-	2.0	1.4	1.5	1.1	2.2	1.0	1.1	1.5	0.9

5 讨论

已知有效波高 SWH 的反演准确度不如海面均方根波高。为了确定有效波高和均方根波高之间的准确定量关系,在此利用了956浮标的海上观测数据。图2为956浮标观测的37对均方根波高及有效波高数据。 SWH 与 h 之间有很好的线性关系(图2),用线性函数进行拟合得出关系式为:

$$SWH = 1.417h - 0.002 \quad (8)$$

这种关系与 Longuet - Higgins(1952)对波高的统计分析一致。根据(8)式可将(4)式修改变为:

$$SWH = 21.255 \left(\frac{t_p^2}{2} - 4.508 \right)^{\frac{1}{2}} - 0.002 \quad (9)$$

由(9)式得到 $\overline{SWH} = 40.7\text{cm}$, 这非常接近实测数据,准确度在5.0cm之内。 SWH 的测量精度也得到改善为25.4cm。

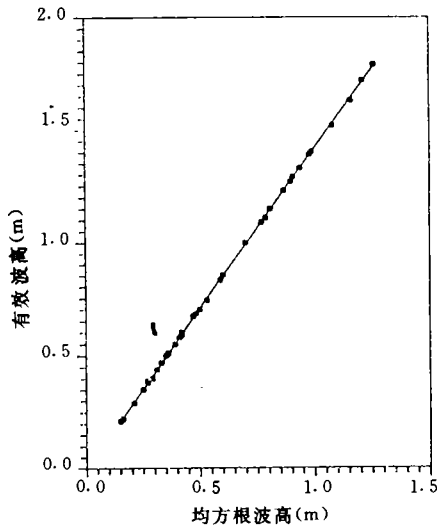


图2 956浮标观测到的海面均方根波高及有效波高数据

Fig. 2 Rms ocean wave height and significant wave height measured by 956 buoy

高度计对海浪的测量分辨率是其重要参数,标志高度计的性能指标。对ZHG-1型机载高度计 $\tau = 5.0\text{ns}$, $X_w = 45.05\text{cm}$, $\Delta t_p = 2.5\text{ns}$, 由 t_p 与 h 的关系式可得 h 的分辨率(Δh)为:

$$\Delta h = 18.75 \left[\left(\frac{45.04}{h} \right)^2 + 2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

式中, Δh , h 的单位为 cm。(10)式表明当 h 减小, Δh 变大即均方根波高 h 分辨率变差,而当 h 增大, Δh 减小即 h 的分辨率提高。 $h = 70\text{cm}$ 时, Δh 已经很接近极限值 26.5cm。仅当 $h < 70\text{cm}$, Δh 对 h 的依赖关系较为显著。本次实验海况 $h = 24.0\text{cm}$, $\Delta h = 44.1\text{cm}$, 有效波高的分辨率为 $\Delta SWH = 62.5\text{cm}$ 。

t_s 与 H 的关系式表明 t_s 与高度计测量高度成正比,因此星载高度计的 t_s 值远大于机载高度计的。当 $s = 0.04$ 时, Geosat 卫星高度计所测海面回波波形的 t_s 值为 600 (取 $\psi_B = 1.5^\circ$), 这就使得星载高度计的 t/t_s 值较小,回

波波形衰减较为缓慢。再由 t_s 与 ψ_B 及 s 的关系式可知: 引起海面回波波形衰减的因素有二个, 一是高度计天线波束角 ψ_B 有限, 另一个为海面粗糙度, 由海面波浪波陡 s 表示。 ψ_B 减少使回波波形衰减加剧, s 增大时, 回波波形衰减趋于平缓。星载高度计 ψ_B 较小, 因而 ψ_B 对回波波形衰减的影响大于海面粗糙度(海面波浪波陡 s) 的作用。另外由于 ψ_B 小, 星载高度计姿态对回波波形影响很大, 因此用机载高度计回波波形反演 s 较星载高度计可靠, 可以说是一种成功方法。

6 结语

利用我国研制的第一台 ZHG-1 型机载高度计在海上成功地进行了试飞实验。根据实验数据及算法得出海面均方根波高 h , 有效波高 SWH 及海面波浪均方根波陡 s 。对计算结果的统计分析及与海上现场同步观测数据比较表明, 机载高度计所测海面均方根波高为 28.7cm, 精度为 18.0cm, 准确度为 4.7cm; 有效波高为 40.7cm, 精度为 25.4cm, 准确度为 5.0cm; 海面均方根波陡测量值为 0.09, 精度为 0.01。计算出的海面风速值为 1.5m/s, 精度为 0.4m/s。

参 考 文 献

- Berger, T., 1992. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **20**(3): 295—309.
- Brown, G. S., *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **AP-25**(1): 67—74.
- Longuet-Higgins, M. S., 1952, *J. Mar. Res.*, **11**(3): 245—266.
- Moore, R. K., Williams, C. S., 1957, *Proc IRE*, **45**(2): 228—238.
- Neumann, G., Pierson, W. J., 1966. *Principles of Physical Oceanography*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs (N. J.), pp. 1—351.
- Phillips, O. M., 1966, *Dynamics of the Upper Ocean*, Cambridge University Press (London), pp. 109—139.

STUDY ON MEASUREMENT OF SEA STATE AND SEA SURFACE WIND SPEED BY AN AIRBORNE RADAR ALTIMETER

Pan Jiayi, Yuan Yeli, Jiang Jingshan[†], Zheng Quanan

(First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266003)

^{*}(Application and Research Center for Space Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract The paper reports use of experimental data obtained by a ZHG-1 airborne altimeter over the Qingdao' adjacent sea area, China (in April, 1995) to derive the algorithm for calculating rms wave height, significant wave height, and rms wave slope. A new algorithm for getting the sea surface wind speed from the return waveform instead of the scatter coefficient was also developed. The calculation results showed the precision and accuracy were 18.0cm and 4.7cm for rms wave height, 25.4cm and 5.0cm for significant wave height respectively, and that the rms wave slope and its precision were 0.09 and 0.01 respectively. Considering that the rms wave slope includes the capillary wave slope in addition to the gravity wave slope the result was reasonable. The sea surface wind speed and its accuracy from the altimeter data was 1.5m/s and 0.4m/s respectively. The wind speed was not consistent with the in situ measurement data, but this discrepancy was mainly due to the not full development of the ocean waves because of the NNW wind direction. The derived algorithms was used to get the measurement resolution of the rms ocean wave height as

$$\Delta h = 18.75 \left[\left(\frac{45.04}{h} \right)^2 + 2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

where h is the rms ocean wave height and Δh is the resolution of h . In this experiment Δh measured by the ZHG-1 airborne altimeter was 44.1cm.

Key words Airborne radar altimeter Sea state parameter Sea surface wind speed