维普资讯 http://www.cqvip.com

第9卷 第3期 台 湾 海 峡 Vol. 9, No. 3
1990年9月 JOURNAL OF OCEANOGRAPHY IN TAIWAN STRAIT Sep., 1990

利用海骚回波推测海面风浪

周笃诚 陈亿署
(汕头气象台,515041)

【摘要】 本文根据我国海岸雷达的实际情况,提出了直接测量海骚回波强度和直接测定海骚回波最大距离的方法,并利用实测资料,建立了最大风速与海骚回波最大距离的相关关系式及海骚回波最大距离与海面风浪关系曲线。

为了保证海上船只安全航行,海浪预报十分重要。目前,我国已在海岸线上组成713和714型天气雷达探测网,这些雷达都能在不受地、物阻挡的方位探测到海面骚动的回波。经验表明,海骚回波的强度是随着海面风浪强度的变化而变化的,若能研究出海骚回波强度与风浪的定量关系,并在沿海雷达站网中推广应用,这对开展海洋气象服务,保证近海船只安全航行是有重要意义的。

一、测量海骚回波强度的几种方法

早在1968年,Barrick[1]就提出了一个镜面反射模式来计算海面上每单位面积的雷达反射横截面 σ^0,他假定海骚上光滑面的曲率半径远大于雷达电磁波的波长,这时海面上的骚动可看成无数小镜面的集合体。虽然这一假定适合于风波或涌浪,但根据 Stokes 波的极限波高和破碎现象的理论计算,波峰形成的角度不可能<120°,否则波陡 $\delta=H/\lambda$ 就会超过1/7,波浪就要破碎,这就要求雷达有-60°的俯角。而目前我国的海岸雷达仅有-2°的俯角,因此,这种方法是难以使用的。1968年 Wright[2]提出一个共鸣散射模式来测定海面每单位面积的一次后向散射横截面,他假定海骚上光滑面的长度比雷达电磁波的波长短,并把坡度作为比1小的微小粗面看待。但是,这一假设仅适用于极短周期的重力波和表面张力波,而实际海面上,表面张力波是存在并重叠在风波之上的,因此单独计算表面张力波是不完善的。

为了适应我国海岸雷达的实际情况,我们提出直接测量海骚回波强度和直接测定海骚回波最大距离两种方法,然后根据海面实测风速与雷达所测得的海面单位面积后向散射率 σ^0 和海骚回波最大距离 R 分别建立拟合曲线,从而达到推算海面风浪的目的。

二、直接测量海骚回波强度的方法

根据 Long[3]给出的适用于窄波束、小俯角条件下的海骚回波方程:

$$P_r=\frac{P_tG^2\lambda^2C\tau\varphi_A}{128\pi^3r^3}\sigma^0\sec\theta \qquad (1)$$

本文于1989年5月12日收到。

维普资讯 http://www.cqvip.com

式中，P_t 为雷达发射功率，G 为天线增益，λ 为雷达波长，C 为光速，τ 为脉冲宽度，φ_A 为波束水平宽度，θ 为波束轴线俯角，r 为海骚至天线距离。对于某一特定雷达，P_t、G、λ、C、τ、φ_A 均为常数。根据汕头气象台探测海骚情况，θ 一般都取0°，因此 $\sec\theta=1$，引进常数 C'：

$$C' = \frac{P_t G^2 \lambda^2 C \tau \varphi_A}{128\pi^3} \tag{2}$$

那么式(1)可简写为：

$$P_r = C'\sigma^0/r^3 \tag{3}$$

引进最小可测功率 P_{rmin} 和中频衰减分贝数 N，即

$$P_r = P_{rmin} \cdot 10^{N/10} \tag{4}$$

将式(4)代入式(3)，并令 $B=P_{rmin}/C'$，可得

$$\sigma^0 = Br^3 \cdot 10^{N/10} \tag{5}$$

此式即可根据某一距离 r 处海骚回波的衰减值 N 求出单位面积的后向散射率 σ^0。

对于国产713型雷达，$P_t=2\times10^5$W，$G=40$dB，$\lambda=5.6\times10^{-2}$m，$C=3\times10^8$m/s，$\tau=2\times10^{-6}$s，$\varphi_A=0.0227$rad，$P_{rmin}=2\times10^{-14}$W，由此可算得 $B_{713}\approx5.76\times10^{-18}$。

对于国产714型雷达，$P_t=6\times10^5$W，$G=37$dB，$\lambda=10.6\times10^{-2}$m，$C=3\times10^8$m/s，$\tau=1\times10^{-6}$s，$\varphi_A=0.0349$rad，$P_{rmin}=1.259\times10^{-14}$W，由此可算得 $B_{714}\approx5.71\times10^{-19}$。

将 B_{713} 和 B_{714} 的值分别代入式(5)，即可算出相应的衰减值 N 和距离 r 处的 σ^0 值(表1，2)。

表1 713型雷达 σ^0 值

Tab. 1 The σ^0 values of Model 713 radar

σ^0(dB) \ N(dB) / r(m)	0	10	20	30	40	50	60
1×104	5.76×10^{-6}	5.76×10^{-5}	5.76×10^{-4}	5.76×10^{-3}	5.76×10^{-2}	5.76×10^{-1}	5.76×10^{0}
2×10^4	4.61×10^{-5}	4.61×10^{-4}	4.61×10^{-3}	4.61×10^{-2}	4.61×10^{-1}	4.61×10^{0}	4.61×10^{1}
3×10^4	1.56×10^{-4}	1.56×10^{-3}	1.56×10^{-2}	1.56×10^{-1}	1.56×10^{0}	1.56×10^{1}	1.56×10^{2}
4×10^4	3.69×10^{-4}	3.69×10^{-3}	3.69×10^{-2}	3.69×10^{-1}	3.69×10^{0}	3.69×10^{1}	3.69×10^{2}
5×10^4	7.20×10^{-4}	7.20×10^{-3}	7.20×10^{-2}	7.20×10^{-1}	7.20×10^{0}	7.20×10^{1}	7.20×10^{2}
6×10^4	1.24×10^{-3}	1.24×10^{-2}	1.24×10^{-1}	1.24×10^{0}	1.24×10^{1}	1.24×10^{2}	1.24×10^{3}
7×10^4	1.98×10^{-3}	1.98×10^{-2}	1.98×10^{-1}	1.98×10^{0}	1.98×10^{1}	1.98×10^{2}	1.98×10^{3}
8×10^4	2.95×10^{-3}	2.95×10^{-2}	2.95×10^{-1}	2.95×10^{0}	2.95×10^{1}	2.95×10^{2}	2.95×10^{3}
9×10^4	4.20×10^{-3}	4.20×10^{-2}	4.20×10^{-1}	4.20×10^{0}	4.20×10^{1}	4.20×10^{2}	4.20×10^{3}
1×10^5	5.76×10^{-3}	5.76×10^{-2}	5.76×10^{-1}	5.76×10^{0}	5.76×10^{1}	5.76×10^{2}	5.76×10^{3}

各海岸雷达站可根据所使用的雷达型号的各种参数，制作更详细的 σ^0 值查算表，然后再将历史资料中的 σ^0 值与同时间的海面实测风速与波高分别建立相关曲线，这样就可根据海岸雷达在任何时刻测得的 σ^0 值查算出近海海域上某一点的风速和波高。进而再摸索出其变化规律，结合天气形势和海洋资料做出海面风浪预报，开展海洋气象服务。

维普资讯 http://www.cqvip.com

表2　714型雷达σ^0值

Tab. 2　The σ^0 vaaues of Model 714 radar

σ^0(dB) \ N(dB) / r(m)	0	10	20	30	40	50	60
1×10^4	5.17×10^{-7}	5.17×10^{-6}	5.17×10^{-5}	5.17×10^{-4}	5.17×10^{-3}	5.17×10^{-2}	5.17×10^{-1}
2×10^4	4.14×10^{-6}	4.14×10^{-5}	4.14×10^{-4}	4.14×10^{-3}	4.14×10^{-2}	4.14×10^{-1}	4.14×10^{0}
3×10^4	1.40×10^{-5}	1.40×10^{-4}	1.40×10^{-3}	1.40×10^{-2}	1.40×10^{-1}	1.40×10^{0}	1.40×10^{1}
4×10^4	3.31×10^{-5}	3.31×10^{-4}	3.31×10^{-3}	3.31×10^{-2}	3.31×10^{-1}	3.31×10^{0}	3.31×10^{1}
5×10^4	6.46×10^{-5}	6.46×10^{-4}	6.46×10^{-3}	6.46×10^{-2}	6.46×10^{-1}	6.46×10^{0}	6.46×10^{1}
6×10^4	1.12×10^{-4}	1.12×10^{-3}	1.12×10^{-2}	1.12×10^{-1}	1.12×10^{0}	1.12×10^{1}	1.12×10^{2}
7×10^4	1.77×10^{-4}	1.77×10^{-3}	1.77×10^{-2}	1.77×10^{-1}	1.77×10^{0}	1.77×10^{1}	1.77×10^{2}
8×10^4	2.65×10^{-4}	2.65×10^{-3}	2.65×10^{-2}	2.65×10^{-1}	2.65×10^{0}	2.65×10^{1}	2.65×10^{2}
9×10^4	3.77×10^{-4}	3.77×10^{-3}	3.77×10^{-2}	3.77×10^{-1}	3.77×10^{0}	3.77×10^{1}	3.77×10^{2}
1×10^5	5.17×10^{-4}	5.17×10^{-3}	5.17×10^{-2}	5.17×10^{-1}	5.17×10^{0}	5.17×10^{1}	5.17×10^{2}

三、直接测定海骚回波最大距离的方法

实际上，雷达所接收到的返回功率不仅包括波浪本身的反射和散射，还包括波浪破碎时溅散出的水滴群和泡沫的后向散射，而且后者可能更为重要。从海面上风力达到5级或5级以上时出现白浪和开始探测到海浪回波可以作为佐证。因此，可引进气象雷达方程：

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 A_e \sigma^0}{(4\pi)^3 r^4} \tag{6}$$

式中，A_e为天线有效面积，其余各因子的含义与式(1)相同。其中P_t、G、λ、A_e对于某一特定雷达不说均为常数，如果P_r固定在某一数值，那么

$$\sigma^0 \propto r^4 \tag{7}$$

根据 Phillips[4]及 Mitsuyasu 和 Honda[5]的推算和实验，得出海面的风速U与σ^0有如下的关系：

$$\sigma^0 \propto U^{9/4} \tag{8}$$

从式(7)与式(8)可知$U\propto r^{16/9}$，即海面风速与海骚回波的距离有接近二次方的关系。当中频衰减为0 dB时，海骚回波的最大距离处$P_r=P_{rmin}$。因此，可利用海骚回波的最大距离与实测海面风速建立关系曲线，从而利用海骚回波最大距离的数值来查算海面风速的数值。

本文采用的资料为汕头雷达站1983—1987年所探测到的811个海骚回波样本资料。其中属于台风或热带低压外围引起的海骚回波样本106个，占全部样本的13.1%，其余705个样本均与冷空气大风有关，占全部样本的86.9%。由于汕头雷达站的特定地理位置及周围地物的阻挡，海骚回波均出现在第一象限，即方位93°—180°，因此未将海域分开进行统计。另外，汕头附近海面的强风绝大多数是来自偏北至偏东方向，而且所收集的811个海骚回波样本资料也都是该方向的强风所引起的，故本文结论仅适合于偏北至偏东风的推算。

考虑到海骚回波最大距离可扩伸到100km以及海面波浪的传播特性和海面风资料的来源，我们把风浪资料所收集的范围限制在厦门、马公、东沙、汕尾4个测站所包围的海域。其海面风资料具体取自东山、南澳每天8次定时的观测资料，云澳、遮浪每天2次定时的观测资料，马

维普资讯 http://www.cqvip.com

公、东沙每天02:00,08:00和14:00的观测资料,以及上述海区的零星船舶记录。由于雷达回波资料取样的不定时以及风先于浪的具体情况,我们把海骚回波与前2h内所出现的海面风速进行相关分析,其单相关系数为0.872。

把海骚回波最大距离与相应的前2h内海面最大风速进行线性拟合,得出如下的二次线性方程:

$$V = 0.156\,3R^2 + 0.727\,5R + 2.17 \qquad (9)$$

式中,R 代表海骚回波的最大距离,单位为10km,V 代表前2h内海面的最大风速,单位为m/s。各实测值与拟合曲线的平均绝对偏差仅为0.12m/s,极端最大偏差为4.4m/s。为了便于查算,我们把式(9)绘制成曲线(图1)。图中的小圆点为对应的海骚回波某一距离档上的平均风速。由图1可见,拟合曲线与平均风速都比较接近。在对外开展海洋气象服务中,海面风力都是按风的等级来预报的。可见此拟合曲线的准确率已超过业务预报服务的需求。当海骚回波最大距离<50km时,海面没有强风;当海骚回波最大距离达到50km时,推算的海面风力为5级;此后,海骚回波最大距离每增加10km,海面风力就增大1级,这样十分容易记忆,方便使用。在近年来我台的预报服务中,已证明这种换算是切实可行的。

关于海骚回波最大距离与海面波浪的关系,由于无法找到波浪实测资料,零星的船舶记录可靠性极差,因此只好采用风套浪的办法。我们采用各国常用的SMB风浪换算曲线①进行比较分析。考虑到汕头近海的强风多是从黄海、东海经台湾海峡南下的,故取风区长度为1 000km,其次本海域的强风多数持续时间较长,因而取风时为10h,从而由图1中所查算出的风速通过SMB图表的转换,最后建立了图2的海骚回波最大距离与波高($H_{1/10}$)、波浪周期和波长的换算曲线。由此曲线所查出的波浪数据能满足日常海洋服务之需求。

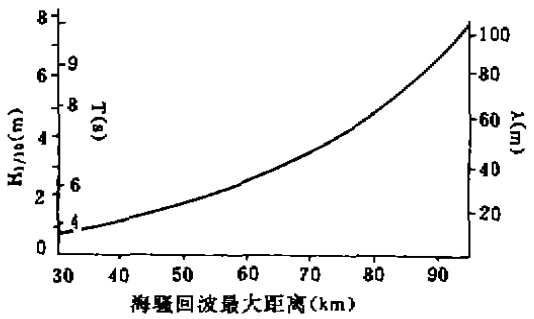

图1 海骚回波最大距离与前2h内最大风速的拟合曲线

Fig. 1 Fitting cuver for maximum distance of the sea clutter echoes and maximum wind speeds in the previous 2h at sea level

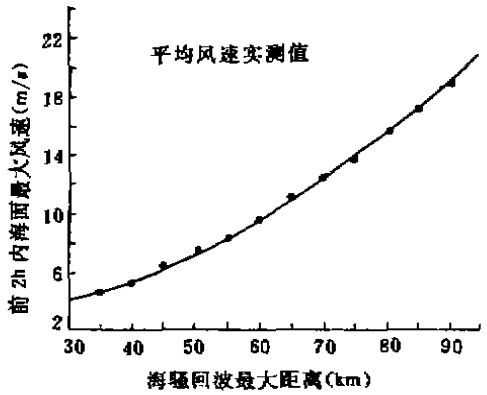

图2 海骚回波最大距离与 $H_{1/10}$、T 和波长换算曲线

Fig. 2 Curve of conversion between the maximum distance of sea clutter echoes and waves $H_{1/10}$, periods, wavelengths

① 钱志嘉,《海浪及其预报》讲义(2)。

维普资讯 http://www.cqvip.com

四、应用举例

1988年10月12—17日，由于受北方冷空气南下影响，我市近海出现了海骚回波。12日14:00时，海骚回波最大距离60km，此后海骚回波逐渐扩伸，13日11:00时达到最高值85km，13日14:00时海骚回波最大距离逐渐收缩，16日20:00时减缩到40km。图3标示出10月12—17日海骚回波最大距离以及由图1和图2查算出的相应的海面最大风速、波高和海面实测风浪的变化曲线，由图可见：

(1)总的变化趋势是一致的。(2)实测风速与查算风速偏差在0.0—4.0m/s之间，平均绝对误差为1.48m/s。(3)实测风力的脉动性大于查算出的风力。12日17:00—20:00时的实测风速减小和16日08:00时实测风速的突然增大都未引起海骚强度的变化，故查算出的风力变化比较平稳。这是由于海浪增幅的惰性和实测风速来源的不稳定性所致。(4)实际风速达到最大值时，海骚回波约滞后6h。(5)这次过程在本海区仅找到16日08:00时一个船舶记录，所报告的风速14m/s，比海岛站的报告偏大2m/s。船舶报告的波高为2.5m，比由海骚回波推算的波高偏低0.2m。(6)16日20:00时至17日20:00时海面实测风速已减小到6m/s，海骚回波最大距离仍维持40km，这是由于风尾余浪未消的缘故。

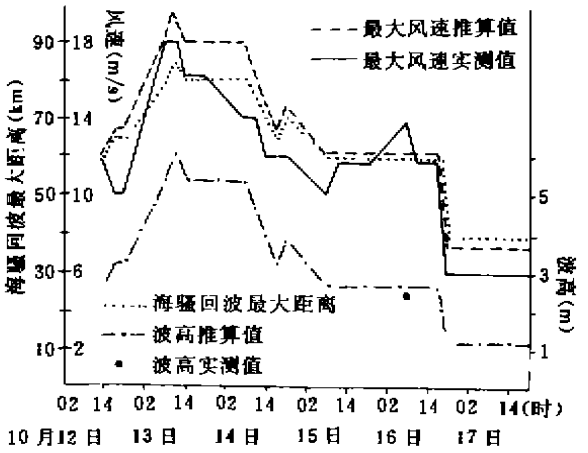

图3　海面风浪的推算结果与实测风浪的比较

Fig. 3　The check for calculating results of winds and waves with practical observation values of winds and waves

由于我台714天气雷达是遥控观测，直接测量海骚回波强度有困难，历史资料中也未积累海骚回波强度的数据，因此，多年来我台都是采用直接测定海骚回波最大距离的方法。实践表明，使用此法具有简单方便、及时、准确的优点，在海洋气象服务中已发挥积极的使用。

参　考　文　献

[1] Barrick, D. E., Rough Surface Scattering Based on the Specular Point Theory, *IEEE Trans. Antenna and Propa.*, Ap. 16(1968) 449—454.

[2] Wright, J. W., A New Model for Sea Clutter. *IEEE Trans. Antenna and Propa.*, Ap. 16(1968). 217—223.

[3] Long, M. W, *Radar Reflectivity of Land and Sea*, 1975.

[4] Phillips, O. M., *The Dynamics of the Upper Oceans*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1966, 216.

[5] Mitsuyasu, H. and T. Honda, The High Frequency Spectrum of Wind Generated Waves, *Jour. Oceanogr. Soc. Japan*, 30(1974), 185—198.

维普资讯 http://www.cqvip.com

A study to infer the sea surface winds and waves from clutter echoes sea

Zhou Ducheng and Chen Yishu

(*Shantou Meteorological station, Shantou*, 515041)

Abstract

This paper puts forward for the drect determination of both the intensities of the sea clutter echoes and the maximum distances of the sea clutter echoes and for the construction of the relationships between the intensity or the maximum distance of the sea clutter echoes and the sea surface winds and waves. In the paper the authors processed 811 sea cluther echoes collected by Shantou Radar Station from September 1983 to December 1987. Based on contrast analyses, a linear regression equation was found, which says that the maximum distance of the sea clutter echoes correspond with the sea surface winds in the previous two hours, its average absolute error being 0. 12m/s and extreme maximum error 4. 4m/s. Beside, based on the relationships between the sea surface winds and the waves, a relation curve of the maximum distances of the sea clutter echoes and the wave heights is established.

KEYWORDS Wave forecasting, wind, sea clutter