

## 风浪因素对海洋波导雷达回波作用机理的研究\*

邵轩<sup>1)2)</sup> 楚晓亮<sup>2)†</sup> 王剑<sup>2)</sup> 许金菊<sup>2)</sup>

1) (中国海洋大学海洋环境学院, 青岛 266100)

2) (中国海洋大学信息科学与工程学院, 青岛 266100)

(2011年9月21日收到; 2012年1月7日收到修改稿)

采用文氏谱模型描述近海海洋动力环境海面的粗糙特征, 并运用海浪谱理论得到风速和均方根高度偏差的关系. 进而应用修正的离散混合傅里叶变换方法和改进的雷达散射系数模型分别计算了电磁波传输损耗和雷达散射系数. 在此基础上, 通过数值计算分析了风浪因素对海洋波导环境雷达回波功率值的影响. 结果表明, 风浪因素对不同观测高度处的传输损耗的影响均不大; 风浪因素对雷达回波功率有显著影响, 并且相对于传输损耗, 雷达散射系数项受风浪因素影响较大因而导致较大的雷达回波功率的变化.

**关键词:** 大气波导, 离散混合傅里叶变换, 海浪谱, 雷达回波

**PACS:** 92.60.Ta

## 1 引言

在复杂多变的低空大气环境中, 温湿度和气压往往会发生急剧变化, 极大地改变大气中折射率的垂向梯度. 电磁波在大气中传播的过程中, 会因为折射发生不同程度的弯曲. 当折射率随高度剧烈减小时, 电磁波陷获于一定厚度的大气层内, 紧贴地面在波导内向前传播, 形成反常的大气波导现象. 低空发生的大气波导能够显著影响雷达探测性能, 因此海上波导环境中雷达回波的研究对提升舰载雷达探测性能有重要指导意义<sup>[1-4]</sup>.

一直以来, 国内外学者对海上大气波导研究十分关注. 曾先后提出了波导模理论<sup>[5]</sup>、几何光学法<sup>[6]</sup>和抛物方程法<sup>[7]</sup>等研究方法. 其中抛物方程法是目前和实际符合相对较好的方法. 抛物方程法的优点是在非均匀大气折射率中可以精确地模拟电磁波的传播过程, 并易于在计算机上快速实现, 因此得到了广泛的应用. 基于分步傅里叶算法的传统抛物方程方法, 受到光滑无限阻抗表面边界条

件的局限, 适用范围较窄. 近年来, 国外学者建议运用离散混合傅里叶变换算法 (discrete mixed Fourier transform, DMFT) 可将研究的范围扩展到更接近于实际情况的有限阻抗边界问题<sup>[8-11]</sup>.

不同风速下呈现不同的海面均方根高度偏差, 从而导致雷达回波功率也有明显差异. 目前, 风浪因素对海洋波导环境雷达回波功率值作用机理的研究国内外开展的工作还较少. Zhao 等研究了风浪因素对海洋大气波导环境电磁波空间传输损耗的影响<sup>[12]</sup>, 但是并没有进一步讨论风浪因素对雷达散射系数 (radar cross section, RCS) 和雷达回波功率的影响. 本文首先采用在我国近海工程中被广泛应用的文氏海浪谱模型描述近海区域的动力环境海面的粗糙特征, 运用海浪谱理论得到风速和均方根波高偏差的关系. 同时采用修正的 DMFT 算法计算电磁波的空间传输损耗. 并结合改进的 georgia institute of technology (GIT) 模型<sup>[13]</sup> 计算雷达散射系数, 得到雷达回波功率值. 最后, 数值分析了不同风浪因素对海洋波导环境雷达回波功率值的作用机理.

\* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2008AA093001) 中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 201113036) 资助的课题.

† E-mail: xlchu@ouc.edu.cn

## 2 随机粗糙海面的海浪谱理论

海面的粗糙程度是海上电磁波传播算法的首要考虑问题. 本文运用海浪谱理论得到海面风场  $U$  和海面均方根高度偏差  $h$  的关系. 假定随机粗糙海面的高度函数  $Z(x, y)$  是宽平稳随机过程, 假定海面任意点高度的均值  $\overline{Z(x, y)}$  均为零, 相关函数  $K(x, y)$  仅随距离矢量  $(x_2 - x_1, y_2 - y_1)$  变化. 而海面均方根高度偏差  $h$  可由海面方向海谱  $S(\omega, \theta)$  计算得到<sup>[10]</sup>, 公式如下:

$$h = \sqrt{K(0, 0)} = \left\{ \int_0^{+\infty} \int_{-\pi}^{+\pi} S(\omega, \theta) d\theta d\omega \right\}^{1/2}. \quad (1)$$

由上式可以看出均方根高度偏差  $h$  取决于海浪谱的形式, 而海浪谱体现了海面对于风场的响应. 考虑到文氏谱模型与我国近海区域实际观测资料符合较好, 这里采用文氏谱模型来得到海面风速和海浪波高偏差的关系. 文献 [14] 给出了文氏海浪谱的具体形式, 并根据文氏海浪谱推导出了均方根高度偏差的计算公式

$$h = \sqrt{1.3748 \times 10^{-3} \frac{U^2}{g} \left( \frac{gX}{U^2} \right)^{0.35}}, \quad (2)$$

其中,  $g$  表示重力加速度, 取值为  $9.8 \text{ m/s}^2$ ,  $U$  为海上  $10 \text{ m}$  高度处的风速,  $X$  为风区范围.

## 3 DMFT 算法和雷达回波功率

### 3.1 有限阻抗粗糙海面边界条件

在很多实际应用中, 将海面边界看作理想导体光滑表面是不合适的. 本文讨论有限阻抗粗糙海面边界的波导问题. 首先, 考虑边界为有限阻抗光滑海面. 边界条件数学表达式如下:

$$\left. \frac{\partial u(x, z)}{\partial z} \right|_{z=0} + \alpha u(x, z)|_{z=0} = 0, \quad (3)$$

$$\alpha = ik \sin \theta \left( \frac{1 - R_0}{1 + R_0} \right), \quad (4)$$

其中  $\alpha$  是阻抗系数,  $\eta$  是海水表面阻抗,  $\mu_0$  是自由空间磁导率,  $\omega$  是电磁波角频率,  $R_0$  是光滑海面 Fresnel 反射系数,  $\theta$  是海面处电磁波的本地掠射角.

为体现粗糙海面的复杂散射效应对电磁波的传播影响, 引入 Miller-Brown 模型对 Fresnel 反射系

数进行修正. 粗糙海面修正反射系数如下<sup>[15]</sup>:

$$R_r = R_s \exp(-\xi) J_0(i\xi), \quad (5)$$

$$\xi = 8 \left( \frac{\pi h}{\lambda} \sin \theta \right)^2, \quad (6)$$

其中,  $R_s$  是光滑海面 Fresnel 反射系数,  $J_0$  是零阶第一类 Bessel 函数,  $\xi$  是粗糙因子,  $h$  是海面均方根高度偏差,  $\lambda$  是电磁波波长. 传播距离内的海面掠射角  $\theta$  可以通过谱估计技术或者几何光学方法计算得到. 而考虑到谱估计技术计算的精确性和稳定性相对较好<sup>[6]</sup>, 本文将采用现代谱估计理论中的 Burg 算法<sup>[16]</sup> 来计算掠射角. 谱估计方法分为以下两步: 首先, 运用 Dirichlet 边界条件由上一步长的场值计算传播到下一步长处的场值; 然后, 应用谱估计技术对下一步长处海面附近的场值进行分析求得最大功率谱值所对应的频率, 即主要空间频率  $k$ , 而掠射角  $\theta$  即可由公式  $\theta = \pi/2 - \arccos(k/k_0)$  计算得到.

### 3.2 混合傅里叶变换算法

首先给出连续形式的混合傅里叶变换对, 形式如下<sup>[9]</sup>:

$$U(p) = \int_0^{\infty} u(z) [\alpha \sin(pz) - p \cos(pz)] dz, \quad (7)$$

$$u(z) = K e^{-\alpha z} + \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} U(p) \times \frac{\alpha \sin(pz) - p \cos(pz)}{\alpha^2 + p^2} dp, \quad (8)$$

其中, 逆变换中  $K$  表示如下:

$$K = \begin{cases} 2\alpha \int_0^{\infty} u(z) e^{-\alpha z}, & \text{Re}(\alpha) > 0, \\ 0, & \text{Re}(\alpha) \leq 0. \end{cases} \quad (9)$$

电磁波抛物方程连续 DMFT 算法的数值解由下式给出:

$$u(x_0 + \Delta x, z) = \exp\left(\frac{ik_0 \Delta x (n^2 - 1)}{2}\right) \times \left\{ \exp\left(\frac{i\alpha^2 \Delta x}{2k_0}\right) \times \exp(-\alpha z) K(x_0) + \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\alpha \sin(pz) - p \cos(pz)}{\alpha^2 + p^2} \times \exp\left(-\frac{ip^2 \Delta x}{2k_0}\right) \right.$$

$$\times \int_0^\infty u(x_0, z') [\alpha \sin(pz') - p \cos(pz')] dz' dp \} \quad (10)$$

场值  $u$  乘以时谐因子  $e^{-i\omega t}$  即可得到空间和时间上变化的波函数  $\Psi(x, z, t)$ . 水平极化时, 电场分量中只有  $E_y$  非零, 波函数  $\Psi(x, z) = E_y(x, z)$ ; 垂直极化时, 磁场分量中只有  $H_y$  非零, 波函数  $\Psi(x, z) = H_y(x, z)$ . 此外, 在数值实现过程中若是直接对上述混合傅里叶变换采用中心差分离散化处理, 会由于  $\text{Re}(\alpha)$  趋于 0 而带来数值结果的不稳定性 [9]. 而采用后向差分算法, 则会有效减少  $\alpha$  盲点问题的出现. 为此, 本文采用辅助函数的后向差分算法在计算机上实现上述过程. 在数值计算中, 高度范围选取为 0—200 m, 计算的传播距离为 100 km. 利用场值  $u$  可以计算得到空间传输损耗  $L$ , 公式为 [17]

$$L = 20 \lg \left( \frac{4\pi}{\lambda} r \right) - 20 \lg(\sqrt{x} |u(x, z)|), \quad (11)$$

其中, 由电波理论可知,  $r$  为接收机到发射机的距离.

### 3.3 雷达回波功率

雷达回波功率计算公式见 (12) 式 [18]. 由 (12) 式易知回波功率由四项组成: 传输损耗项, RCS 项, 距离项和雷达参数项. 而风浪因素主要通过传输损耗项和 RCS 项对雷达回波功率值产生影响.

$$P_c = -2L + \sigma^0 + 10 \log_{10}(R) + C, \quad (12)$$

其中  $L$  代表海面处的传输损耗,  $\sigma_0$  代表 RCS,  $R$  代表传播距离,  $C$  是和雷达具体参数有关的物理量.

## 4 数值模拟与分析

下面通过数值计算研究风浪因素对表面波导环境雷达回波功率值的影响. 雷达为高斯型天线, 天线高 20 m, 水平极化.

### 4.1 均方根高度偏差和掠射角的计算

阻抗系数  $\alpha$  体现了海水的介电特性和海面粗糙程度对电磁波海面散射的影响, 电磁波传输损耗

受到  $\alpha$  值的影响. 由前面知,  $\alpha$  值的取值依赖于均方根高度偏差  $h$  和掠射角  $\theta$ .

图 1 是通过文氏谱模型得到的风速和均方根高度偏差的关系曲线, 其中设定风浪充分成长, 风区大小  $X = 500$  km. 可以看出, 均方根高度偏差关于风速几乎成线性增长关系. 图 2 计算了不同风速下风区大小对均方根高度偏差的影响. 从中可见, 风速一定时风区大小对均方根高度偏差影响很小, 因此风速对均方根高度偏差的影响占主导地位.

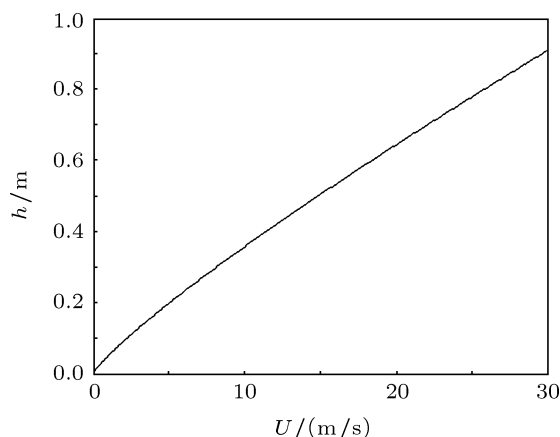


图 1 风速  $U$  和均方根高度偏差  $h$  关系曲线

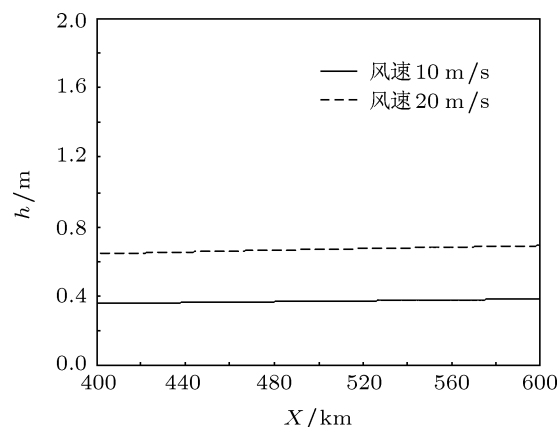


图 2 风速一定时风区大小  $X$  对均方根高度偏差  $h$  的影响

图 3 给出了风速分别是 5 m/s 和 10 m/s 时掠射角在传播距离  $R$  内的变化情况, 其中雷达工作频率为 10 GHz, 表面波导高度为 50 m. 如图所示, 从初始位置到 10 km 处, 掠射角迅速减小, 10 km 以后基本稳定在  $0.19^\circ$  左右; 由于表面波导俘获能力强烈, 电磁波在波导层内上下剧烈跳跃引起的掠射角曲线震荡会很明显; 对比不同风速下的掠射角曲线发

现掠射角的变化趋势几乎一致, 从而发现风浪因素对掠射角的影响很小.

## 4.2 风浪因素对传输损耗的影响

图 4 为表面波导的双折线型修正折射率结构. 从图 4 可见, 在垂直方向上海面高度 50 m 内的大气折射率随高度增加呈递减趋势, 形成俘获电磁波的大气波导层, 电磁波会在这一薄层内紧贴海面弯曲向前传播.

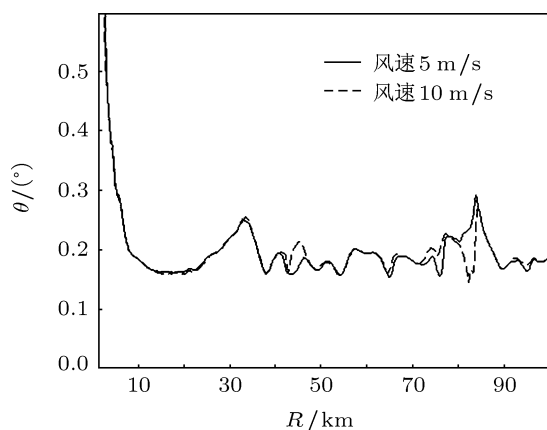


图 3 不同风速下的掠射角比较

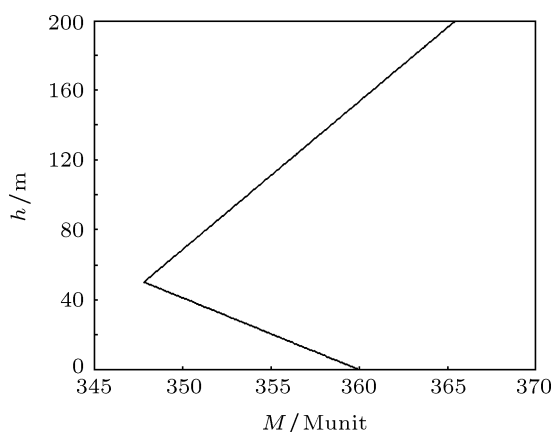


图 4 表面波导的双折线型折射率

图 5 至图 8 分别给出了不同雷达频率和波导高度环境下风速取值为 2.5 m/s, 5 m/s, 7.5 m/s 和 10 m/s 时传输损耗曲线的比较, 其中每幅图的 (a), (b), (c) 和 (d) 的观测高度分别为 30 m, 20 m, 10 m 和 0.1 m,  $R$  为传播距离, 雷达工作频率取 9 GHz 和 6 GHz, 表面波导高度取 50 m 和 60 m. 由图可见, 表面波导电磁波传播过程中, 信号的衰

减过程较为平缓, 电磁波可紧贴海面传播上百公里, 且天线高度位置能量衰减相对最弱, 海面附近能量衰减相对较显著; 风浪因素对不同观测高度上传输损耗的影响不大.

## 4.3 风浪因素对雷达回波功率值的影响

采用针对大气波导改进的 GIT 模型计算了不同风速下传播距离范围内雷达 RCS 值. 首先给出在传播距离范围内 RCS 平均值和平均震荡幅度随风速的变化情况, 如图 9 和图 10 所示, 其中雷达频率为 9 GHz, 表面波导高度为 50 m. 从图 9 可以看出风速在 0—3 m/s 范围内, RCS 平均值随风速变化剧烈, 而风速大于 3 m/s 时, RCS 平均值随风速缓慢变化. 从图 10 可以看出 RCS 平均震荡幅度与随风速增大几乎呈线性递减趋势. 图 11 给出了不同风速下传播距离内 RCS 的变化情况, 风速变化范围为 1 m/s 至 9 m/s, 间隔为 2 m/s, 其中雷达频率为 9 GHz, 表面波导高度为 50 m. 由图 11 可以看到风浪因素对 RCS 影响非常显著, 风速越大 RCS 值越大, 这表明风速越大海面反射电磁波的能力越强. 同时也可以看出风速越大, RCS 在距离范围内震荡越小.

由图 5(d) 和图 11 比较发现, 在海面风速不随距离变化的情况下 RCS 曲线的平均震荡幅度只有几个 dB, 而传输损耗本身曲线的震荡可达到二十几个 dB, 因此, 反映在雷达回波功率中传输损耗项的震荡幅度是 RCS 项的 6 倍左右. 这与 Gerstoft 等在文献 [15] 所述的“RCS 的震荡幅度大概只有几个 dB, 而传输损耗的震荡幅度在 30 个 dB 左右”的观点相符合. 因此, 可以肯定, 同一海面风速下雷达回波中的传输损耗项对回波功震荡幅度贡献明显大于 RCS 项.

本文继续探讨海面风速随距离改变的情况. 由气象数据可知在海面 100 km 范围内风速可以出现 2 m/s 左右的震荡幅度. 在这种实际风场下, RCS 曲线的震荡幅度可增至十几个 dB, 在低风速下甚至可增至几十个 dB, 而传输损耗本身曲线的震荡幅度几乎不受风浪因素影响, 因此, 反映在雷达回波功率中 RCS 项的震荡幅度明显增大, 传输损耗项的震荡幅度仅为 RCS 项的 2 到 3 倍左右. 因此, 在实际风场中, RCS 对回波功震荡幅度贡献将明显增强.

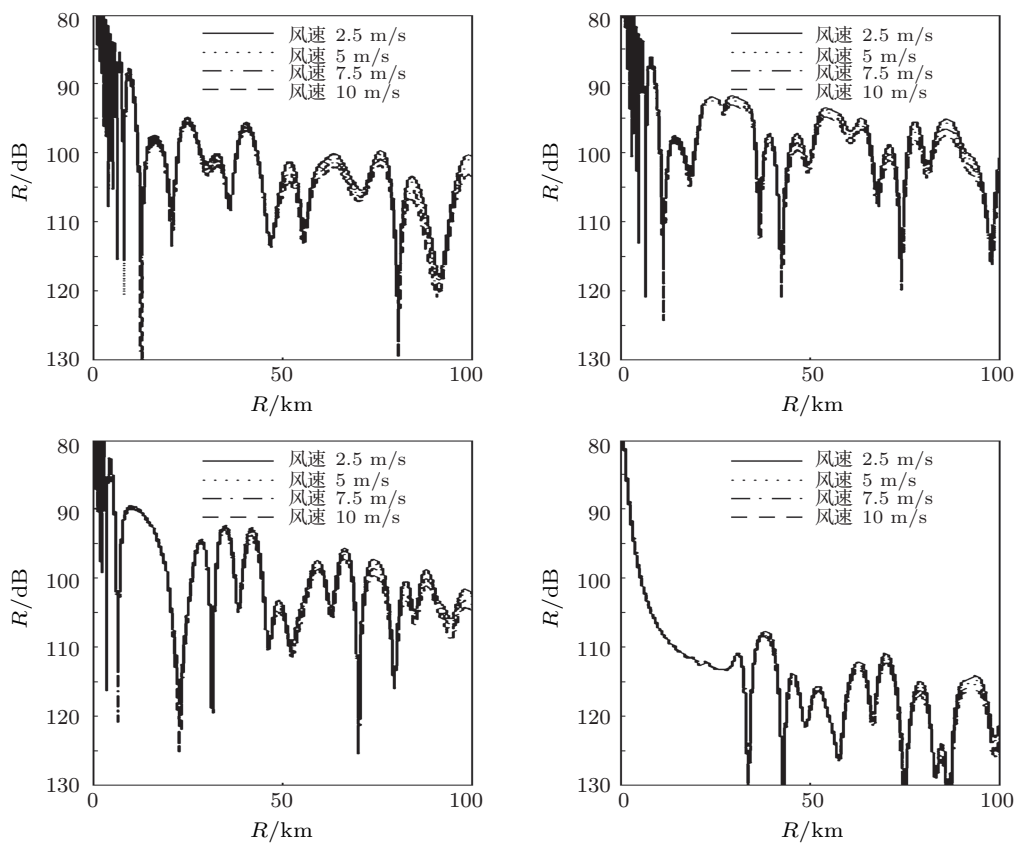


图5 雷达频率 9 GHz, 波导高度为 50 m (a) 30 m; (b) 20 m; (c) 10 m; (d) 0.1 m

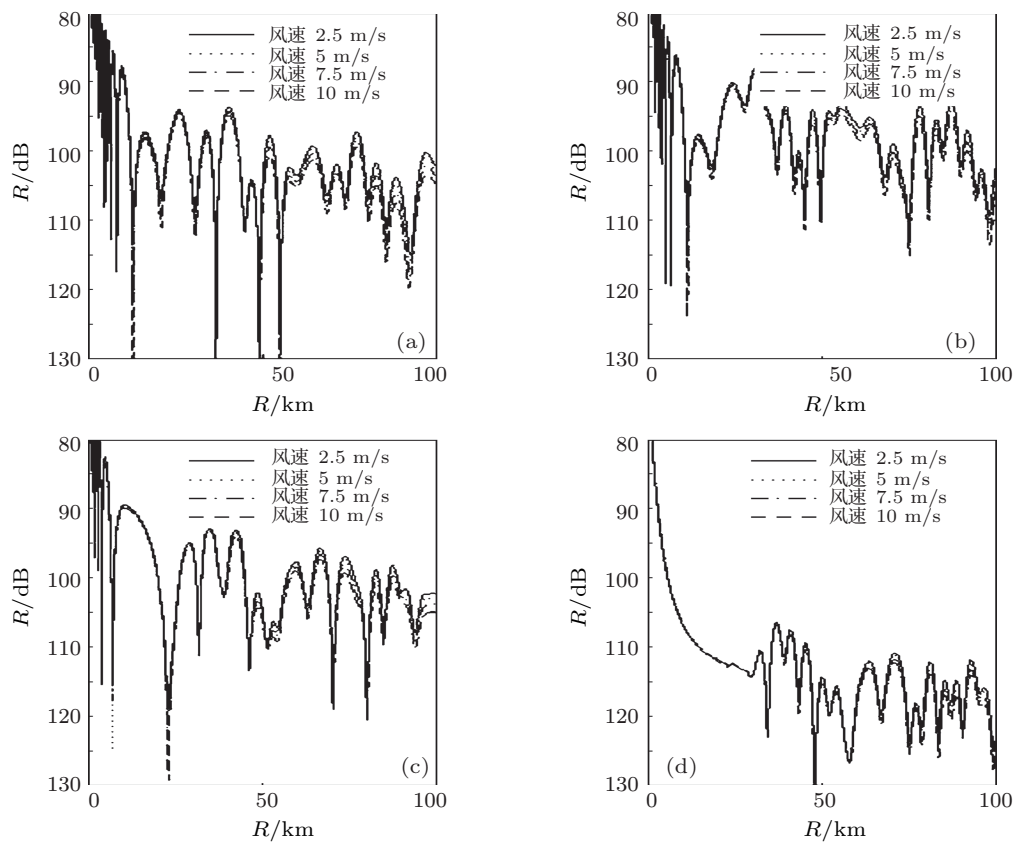


图6 雷达频率 9 GHz, 波导高度为 60 m (a) 30 m; (b) 20 m; (c) 10 m; (d) 0.1 m

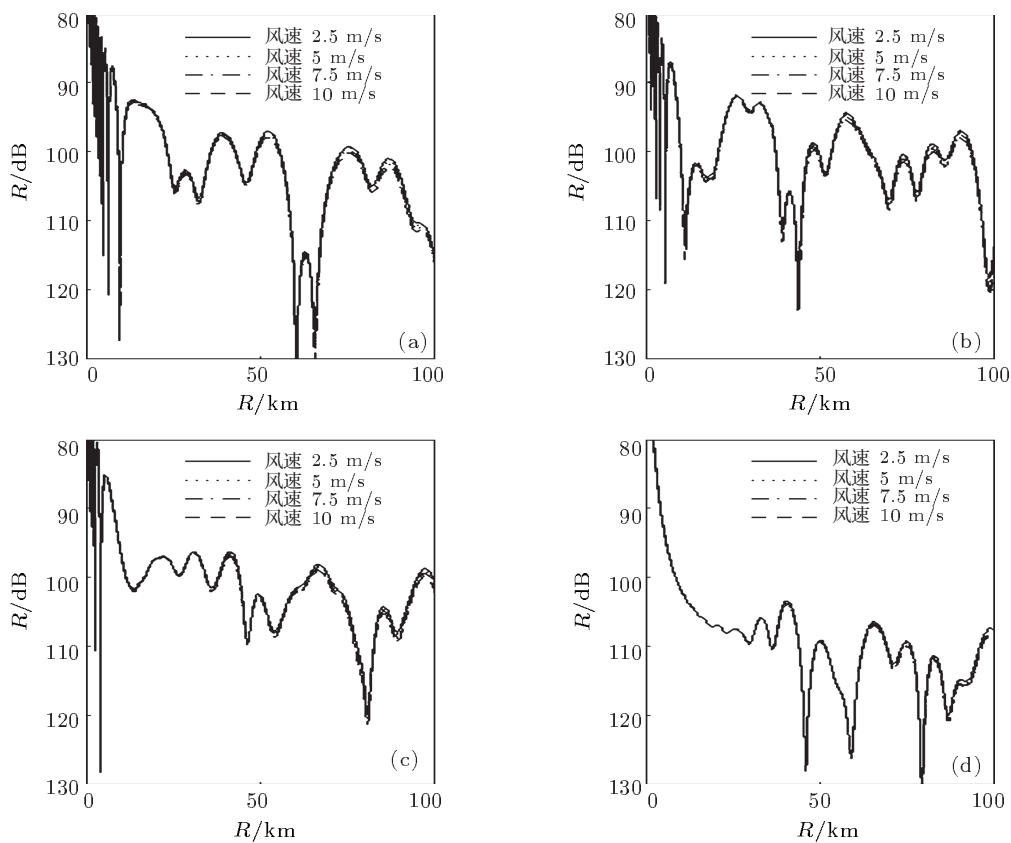


图 7 雷达频率 6 GHz, 波导高度为 50 m (a) 30 m; (b) 20 m; (c) 10 m; (d) 0.1 m

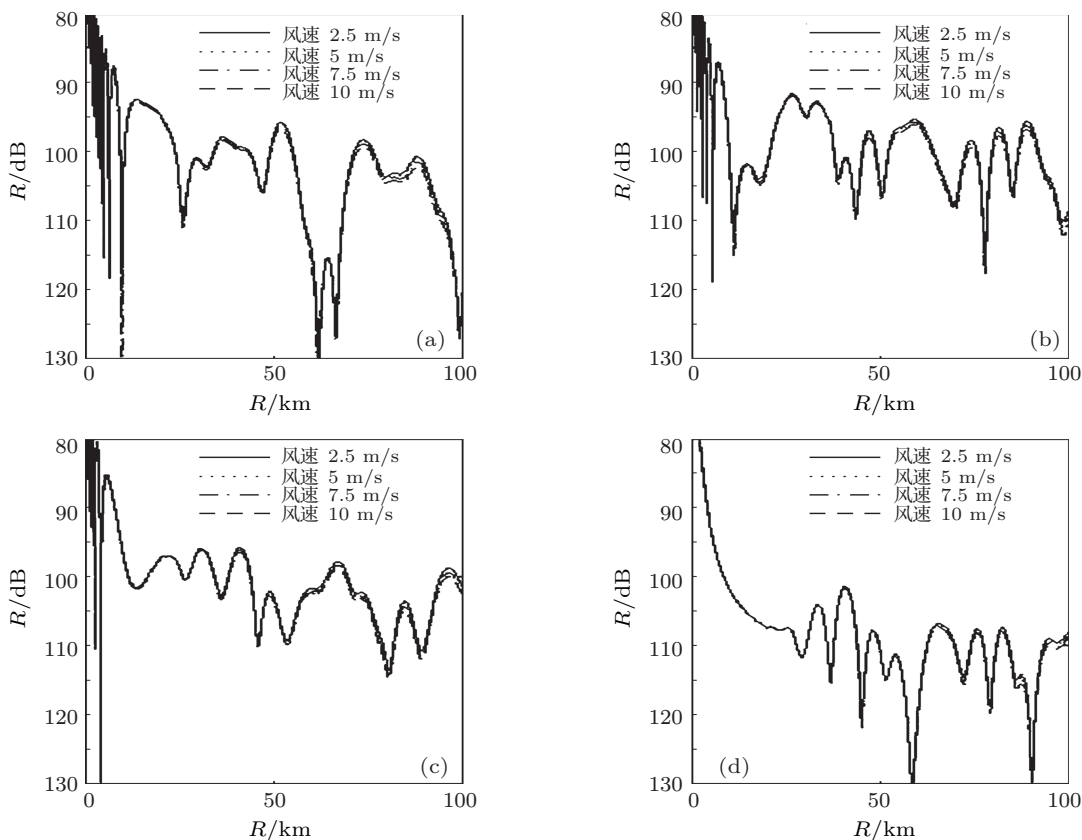


图 8 雷达频率 6 GHz, 波导高度为 60 m (a) 30 m; (b) 20 m; (c) 10 m; (d) 0.1 m

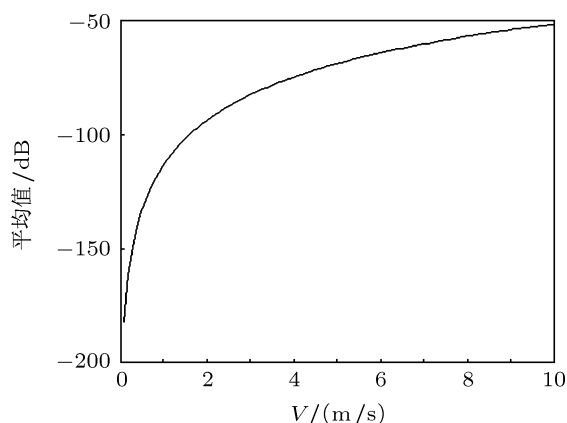


图9 RCS平均值随风速的变化

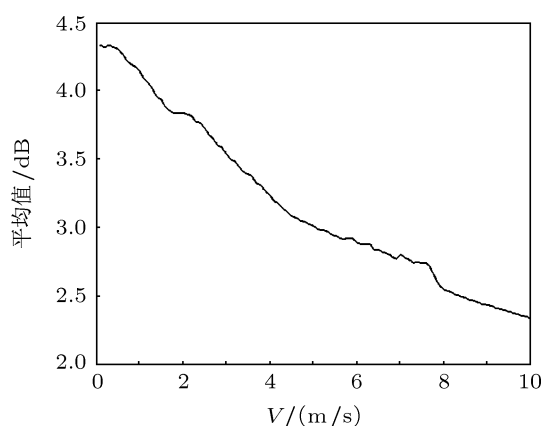


图10 RCS平均震荡幅度随风速的变化

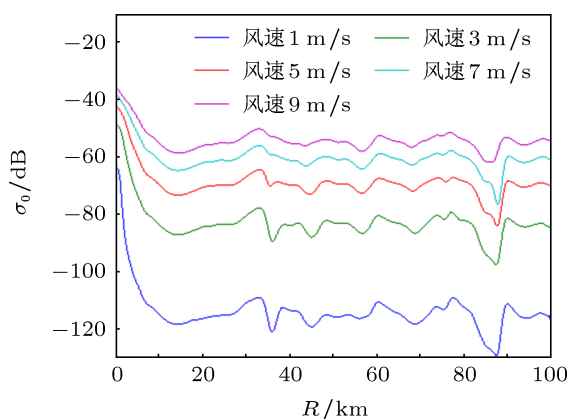


图11 不同风速下的RCS比较

Gerstoft等在文献[15]中计算雷达回波功率值时将RCS项看作常数处理,而本文在计算雷达回波功率的过程中利用修正的GIT模型具体计算了雷达回波功率中的RCS项.图12计算了不同风速下波导发生时的雷达回波功率值,风速分别为1 m/s,

3 m/s, 5 m/s, 7 m/s和9 m/s,雷达频率为9 GHz,表面波导高度为50 m.为了一般性的说明问题,雷达参数项设为0.由图可见,随风速增加,相邻两条曲线在传播距离内的平均值差别和每条曲线的平均震荡幅度逐渐变小.

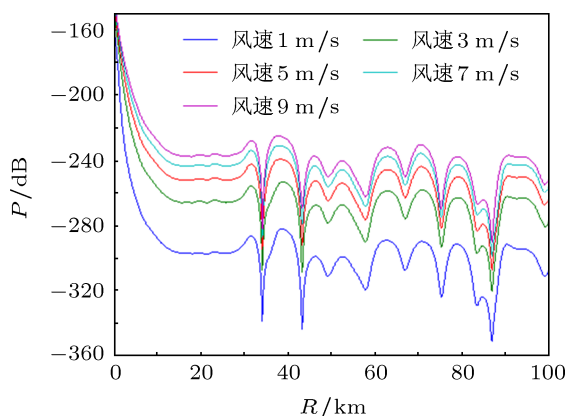


图12 不同风速下的雷达回波功率比较

为不失一般性,以风速为3 m/s和7 m/s的两条曲线进行分析.两条曲线在整个传播距离内平均差值为21.3 dB,而每条曲线的震荡幅度为20 dB左右,两条曲线差值显著;另外,传输损耗项对回波功率变化的贡献度为5%,RCS项对回波功率变化的贡献度为95%.联系图9易知,RCS项对回波功率变化的贡献度会随着风速的降低而更加明显.这表明风浪因素对雷达回波功率值的影响很明显,不同风速下的海面主要通过RCS项对雷达回波功率造成影响,而通过传输损耗项对雷达回波功率也产生一定的改变,并且风浪因素对雷达回波功率值的影响程度与风速大小紧密相关.

## 5 结论与展望

不同风速下海面响应不尽相同.风浪因素对海洋波导环境雷达回波功率作用机理的研究,目前国内外的学者们开展的工作还比较少.本文采用文氏海浪谱模型描述近海区域的海面的粗糙特征,并运用现代功率谱估计技术得到传播距离内海面掠射角的变化.在此基础上,利用修正的DMFT算法,计算电磁波的空间传输损耗.并结合改进的GIT模型计算雷达散射系数,数值分析了不同风浪因素对海洋波导环境雷达回波功率值的作用机理.结果表明

风浪因素对不同观测高度处的传输损耗的影响均不大; 风浪因素对雷达回波功率有显著影响, 并且其中 RCS 项对雷达回波功率值变化的影响大于传输损耗项; 在计算 RCS 时必须要考虑当时的风浪

因素. 因而, 在分析处理大气波导环境下的舰载雷达数据时有必要考虑风浪因素的作用. 本文的结果对于大气波导环境舰载雷达工作性能的研究有一定参考价值.

- 
- [1] Sheng Z, Huang S X 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4328 (in Chinese) [盛峥, 黄思训 2009 物理学报 **58** 4328]
- [2] Sheng Z, Huang S X, Zeng G D 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4335 (in Chinese) [盛峥, 黄思训, 曾国栋 2009 物理学报 **58** 4335]
- [3] Sheng Z, Huang S X, Zhao X F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6627 (in Chinese) [盛峥, 黄思训, 赵小峰 2009 物理学报 **58** 6627]
- [4] Zhao X F, Huang S X, Sheng Z 2010 *Chin. Phys. B* **19** 04921
- [5] Wait J R 1980 *Radio Sci.* **15** 667
- [6] Reza A, Webster A R 2005 *IEEE Antenn Propag.* **53** 3785
- [7] Kuttler J R, Dockery G D 1991 *Radio Sci.* **26** 381
- [8] Dockery G D, Kuttler J R 1996 *IEEE Antenn Propag.* **44** 1592
- [9] Kuttler J R, Janaswamy R 2002 *Radio Sci.* **37** 1021
- [10] Levy M F 2000 *Parabolic equation methods for electromagnetic wave propagation* (London: IEE Press) pp77—84
- [11] Fabbro V, Bourlier C, Combes P F 2006 *Progress In Electromagnetic Research* **58** 243
- [12] Zhao X F, Huang S X 2010 *Radioengineering* **19** 601
- [13] Paulus R A 1990 *IEEE Antenn Propag.* **38** 1765
- [14] YU Yu-xiu 2000 *Random wave and its applications for engineering* (Dalian: Dalin University of Technology Press) pp155—173 (in Chinese) [俞聿修 2000 随机波浪及其工程应用 (大连: 大连理工大学出版社) 第 155—173 页]
- [15] Freund D E, Woods N E, Ku H C, Awadallah R S 2006 *IEEE Antenn Propag.* **54** 1292
- [16] HU Guang-shu 2003 *Digital signal processing (second editon)* (Beijing: Tsinghua University Press) pp552—554 (in Chinese) [胡广书 2003 数字信号处理 (北京: 北京大学出版社) 第 552—554 页]
- [17] Barrios A E 2003 *Proceedings International Radar Conference Adelaide, Australia, September 3–5, 2003* p77
- [18] Gerstoft P L, Rogers T, Krolik J L, Hodgkiss W S 2003 *Radio Sci.* **38** 8053



# Study on effect of wind waves on radar echoes in atmosphere duct oversea\*

Shao Xuan<sup>1)2)</sup> Chu Xiao-Liang<sup>2)†</sup> Wang Jian<sup>2)</sup> Xu Jin-Ju<sup>2)</sup>

1) ( College of Physical and Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100, China )

2) ( College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China )

( Received 21 September 2011; revised manuscript received 1 January 2012 )

## Abstract

The Wen's wave spectrum model is adopted to describe the rough sea surface, and the relation between wind and ocean waves using sea wave spectrum theory is derived. The improved discrete mixed Fourier transform algorithm and the modified rader scattering coefficient model are used to calculate radio propagation loss and radar cross section respectively. On this basis, the influence of wind waves on radar echoes in the environment of atmosphere ducts is analysed by using numerical calculations. The results show that the influences of wind on propagation loss at different heights are different; wich respect to the propagation loss, rader scattering coefficient influenced by waves of factors is large, which results in large change in the radar echo power.

**Keywords:** atmosphere ducts, discrete mixed Fourier transform, ocean wave spectrum, radar sea clutter

**PACS:** 92.60.Ta

---

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2008AA093001), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities ( Grant No. 20113036 ).

† E-mail: xlchu@ouc.edu.cn