

粗糙海面对高频雷达地波空间场分量传播损耗的影响¹

饶亲江 龚中麟

(北京大学电子学系 北京 100871)

摘 要 为研究粗糙海面对高频地波雷达的影响, 本文首先引入了更符合实验结论的粗糙海面相干谱反射系数的修正公式, 并将其代入到雷达方程, 计算了高频雷达地波空间场分量的传播损耗。本文所预期的结果符合架设于海岸的高频地波雷达的实际环境。

关键词 反射系数, 粗糙海面, 高斯分布

中图分类号 TN011, TN957.5

1 前 言

高频雷达地波沿海面传播时, 目标处的场包括空间波场和表面波场, 其中空间波场是指从雷达到目标的直射场和从海面反射以后到达目标的反射场。一般认为, 在高频超视距范围内, 信号主要是沿海面绕射传播; 当目标在雷达视距范围内时, 对于光滑理想导体海面上的目标, 由于直射场与反射场的相位相反, 幅值相等而相互抵消, 目标处的空间波场分量为零, 地波主要为 Norton 表面波。然而, 实际的海面由于海浪的存在, 粗糙面引起的散射将使目标处的空间场不再为零。因而, 反射点所在的地面特性 (表面粗糙度, 电特性参数) 直接影响着目标处反射场的大小和雷达探测范围。为研究粗糙海面对高频地波雷达的影响, 本文引入了修正后的且与实验结果相吻合的粗糙海面相干反射系数, 计算了高频雷达地波空间波场分量在粗糙海面的传播损耗, 并讨论了在高频范围内, 传播损耗与海面粗糙度和雷达工作频率的关系, 最后进行了相关问题的讨论。

2 理论分析

2.1 粗糙海面海浪高度谱分布和表面反射系数 求出任意粗糙面反射系数的严格解是极其困难的, 这是因为除了某些特殊理想的界面, 实际的界面几乎不可能用有限参数来描述, 因此, 只能对实际界面理想化后近似求解。海面的反射系数应该是下述三部分之积, 即光滑平面反射系数、由于地球曲率引起的反射系数减小的扩散因子和海面粗糙度的修正系数, 但由于本文所考虑的是如图 1 所示的雷达附近的低空目标, 故可以近似地将目标放置于平面来分析, 海面的反射系数是光滑平面反射系数和表面粗糙度的修正系数之积。

设海面浪高的标准偏差为 σ_H , 粗糙面的反射系数为 ρ , 一般有^[1,2]

$$r = \rho/\rho_0 = \exp(-2(2\pi\sigma_H/\lambda)^2 \sin^2 \theta_0), \quad (1)$$

其中 ρ_0 是光滑海面的反射系数, θ_0 是掠入射角, 它们的值为 $\rho_0 = [\sin \theta_0 - \sqrt{\epsilon - \cos^2 \theta_0/\epsilon^b}] / [\sin \theta_0 + \sqrt{\epsilon - \cos^2 \theta_0/\epsilon^b}]$ 。 ϵ 是海面的介电常数, 对于垂直极化, 指数 $b = 1$, 对于水平极化, 指数 $b = 0$; $\theta_0 = \tan^{-1}(y/(x - d_1)) = \tan^{-1}(h/d_1)$, $d_1 = (x \cdot h)/(y + h)$ 。以上各式中, 几何参数如图 1 所示。

C. I. Beard^[1] 通过实验的测量值大于由 (1) 式的计算值, 如图 2 所示。因此, 为准确地反映粗糙面对反射系数的影响, 必须寻求更准确、更有效的粗糙面反射系数。

¹ 1998-04-09 收到, 1999-02-03 定稿

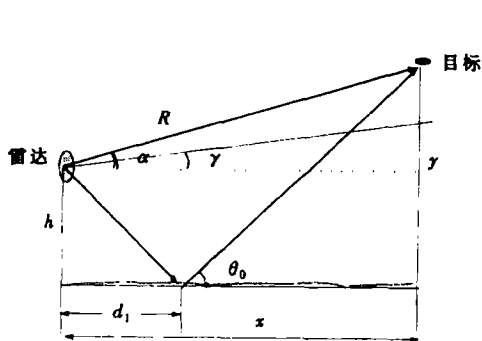


图1 高频雷达地波空间场信号近距传播示意图

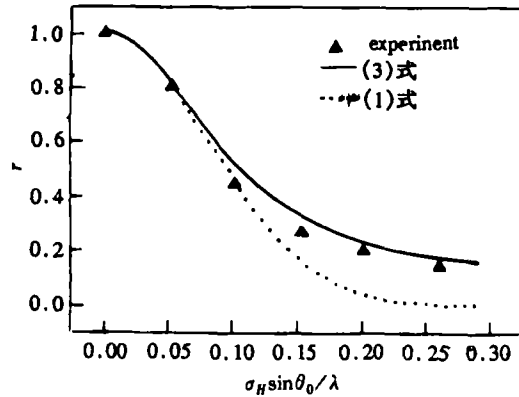


图2 反射系数比值的理论值与实验值的比较

对海浪的多方分析和研究表明, 海浪可视为主要由正弦波叠加组成, 海面浪高的概率密度分布^[2-4]:

$$D(\eta) = (1/(2\pi^{3/2}\sigma_H)) \exp(-\eta^2/(8\sigma_H^2)) \cdot K_0(\eta^2/(8\sigma_H^2)), \quad (2)$$

式中 K_0 是二类零阶虚宗量 Bessel 函数, 设海水表面浪高 η 的随机分布函数为 $D(\eta)$, 由不同 σ_H 值所得到的密度分布曲线如图 3 所示. 对于 $-\eta$, 密度分布曲线以 $D(\eta)$ 轴对称. 将 (2) 式代入表达式^[2] $r = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(\frac{4\pi i}{\lambda} \eta \sin \theta_0\right) D(\eta) d\eta$, 得到

$$r = \frac{\sqrt{2}}{\pi^{3/2}} \int_0^{\infty} x^{-1/2} e^{-x} \cos\left(\frac{8\sqrt{2}\pi\sigma_H}{\lambda} \sqrt{x}\right) K_0(x) dx. \quad (3)$$

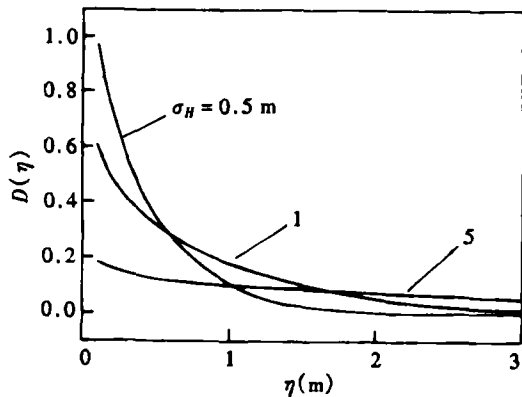


图3 海面浪高的概率密度分布

此结果与实验值的比较如图 2 所示, 可见当 $(\sigma_H \sin \theta_0)/\lambda > 0.1$ 时与实验值的吻合程度较之 (1) 式要好, 函数 $D(\eta)$ 可认为是实际浪高分布的良好近似.

2.2 目标处的空间场分布 目标点的空间场是从雷达天线到目标处的直射场与经反射点反射后的反射场的叠加.

$$E = E_d + E_r = E_0(F(\alpha - \gamma) + r\rho_0 e^{-j(\vartheta + 2\pi\Delta/\lambda)} F(\theta_0 + \gamma)), \quad (4)$$

其中 $\Delta = \sqrt{x^2 + (y+h)^2} - \sqrt{x^2 + (y-h)^2}$ 是直射场与反射场到达目标点所形成的程差, $R = \sqrt{(y-h)^2 + x^2}$ 是目标点到雷达天线的直射距离, E_0 是自由空间场, E_d 是雷达到目标点的直射场, E_r 是经地面反射后到达目标点的场, F 是雷达天线的场方向系数, ϑ 是光滑海面反射系数的相位角. 当目标点的场再向雷达天线反向辐射时, 雷达天线所能得到的

回波功率为

$$P_r' = [P_t G^2 A_e / (16\pi^2)] (F(\alpha - \gamma) + r^t \rho_0 e^{-j(\vartheta + 2\pi\Delta/\lambda)} F(\theta_0 + \gamma))^4 / R^4, \quad (5)$$

其中 P_t 是雷达天线的发射功率, P_r' 是粗糙海面时雷达天线的接收功率 ($t = 1$), P_r 是光滑海面时雷达天线的接收功率 ($t = 0$), G 是天线增益, λ 是雷达波长, A_e 是目标的雷达横截面积, 由此得到由于粗糙海面引起的双程附加传播损耗为

$$\begin{aligned} \text{Loss (dB)} = 10\lg_{10} \frac{P_r'}{P_r} = 10\lg_{10} & \left(F(\alpha - \gamma) + r \rho_0 e^{-j(\vartheta + 2\pi\Delta/\lambda)} F(\theta_0 + \gamma) \right)^4 \\ & - 10\lg_{10} \left(F(\alpha - \gamma) + \rho_0 e^{-j(\vartheta + 2\pi\Delta/\lambda)} F(\theta_0 + \gamma) \right)^4. \end{aligned} \quad (6)$$

3 计算实例和讨论

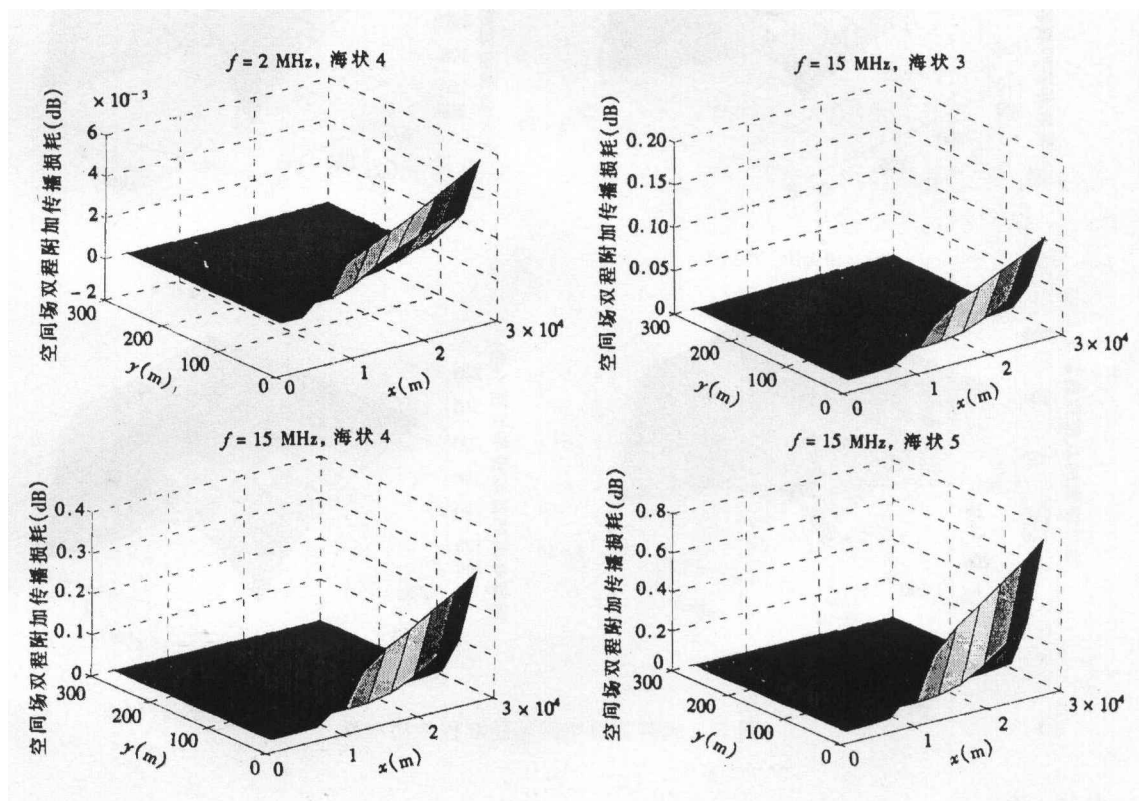


图4 粗糙海面引起空间场的双程附加传播损耗

设天线方向系数 $F = \sin \varphi$, 天线高度 $h = 5\text{m}$, 海水介电常数 $\varepsilon_r = 75$, 电导率 $\sigma = 5\text{S/m}$. 用 (6) 式计算由于粗糙海面引起的空间场双程附加传播损耗, 海水表面浪高的标准偏差分别为 $\sigma_H = 1.5\text{m}$ (海状 3), 2.5m (海状 4) 和 4m (海状 5), 计算曲线如图 4 所示. 可见, 在粗糙海面附近, 空间场的双程附加传播损耗不仅与雷达工作频率有关, 而且与海面粗糙度和目标所在位置有关: (1) 当目标在较高位置时, 粗糙海面引起的高频地波中的空间场的附加传播损耗为零, 但在较低位置, 附加损耗随目标到雷达距离增大而增大. 而高频地波雷达的探

测目标一般在低空和较远区域,因此,空间场对目标的影响可能存在。(2)对于某一雷达频率,海面的粗糙度越大,空间场的双程附加传播损耗也越大,在高频地波雷达频率范围内的低频区,附加传播损耗几乎为零,但在高频区,随高频地波空间场的传播距离增大,双程附加传播损耗有所增加。

图5计算高频地波中的空间场分量在粗糙海面的双程传播损耗,结果表明:即使在近距低空目标处,高频地波中的空间场分量也并不为零,而是随目标到雷达的距离不同而呈明显的干涉现象。

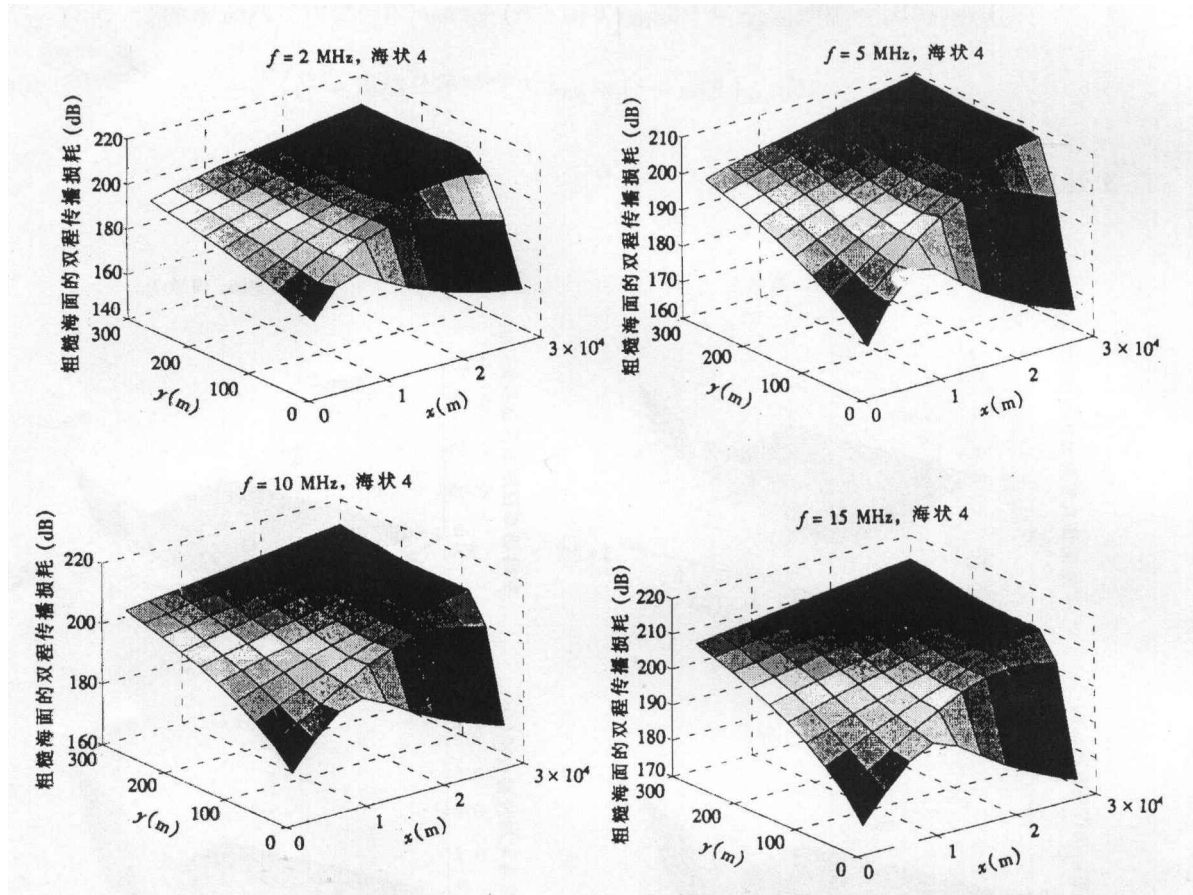


图5 粗糙海面空间场的双程传播损耗

4 结 论

综上所述:在高频段的低端:2-5MHz,即使在海状4级的情形下,由于电波波长远大于浪高,粗糙海面对空间波场所产生的附加损耗是很小的,在此条件下,可以仅考虑表面波场的影响;但在高频频段的高端部分,特别是对于低空目标,高频地波中的空间波场在粗糙海面传播的附加损耗,随着频率和传播距离的增大而增大,此时,粗糙海面对高频地波空间场的影响必须考虑。因此,在处理粗糙海面对高频地波的影响时,可以将粗糙海面的影响分波段、分地域处理。这样既考虑了粗糙海面的实际影响,也使模拟计算大为简化。

参 考 文 献

- [1] Beard C I. Coherent and incoherent scattering of microwave from the ocean. IRE, Trans., on AP, 1961, AP-9: 470-483.
- [2] Long W L. Radar Reflectivity of Land and Sea. D. C. Heath & Company. 1975, 101-106.
- [3] Miller A M, *et al.* New derivation for the rough surface reflection coefficient and for the distribution of sea wave elevation. IEE Proc.-H, 1984, 131(2): 114-116.
- [4] 饶亲江, 龚中麟, 徐承和. 粗糙海面中的岛屿对雷达波的衍射损耗. 电波科学学报, 1998, 13(3): 236-240.
- [5] Beckmann P, Spizzichino A. The Scattering of EM waves from Rough Surface. New York: Pergamon, 1963.

STUDY OF THE INFLUENCE OF ROUGH SEA SURFACE ON
THE SPACE FIELD OF HF GROUND-WAVE RADAR ON COAST

Rao Qinjiang Gong Zhonglin

(Department of Electronics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract To study the influence of rough sea surface on the space field of HF ground wave radar on coast, a derivation of the reflection is introduced first, which is suitable for rough sea surface with Gaussian distribution of heights, and then the reflection is substituted into the radar equation, finally, the propagation loss over rough sea surface is calculated. The resulting predictions in this paper are more accurate and realistic.

Key words Reflection, Rough sea surface, Gaussian distribution

饶亲江: 男, 1962 年生, 副教授, 博士生, 研究方向: 电波传播.

龚中麟: 男, 1940 年生, 教授, 博士生导师, 研究领域包括: 电磁场理论, 电波传播, 天线及微波技术.