

米波段下海面多径模型研究

董 玫,赵永波,张守宏

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室,陕西西安 710071)

摘 要: 目前的海面电磁散射主要是研究微波段下的情况,本文针对米波段研究了海面多径回波模型.首先计算出米波段下的海水介电常数,通过仿真相关反射系数和瑞利判据,得出在米波段下,海情级六级以下,入射余角小于5度时,散射信号中的镜面反射分量占主要部分,并且可以认为此时的海面是光滑的,得到基于镜面反射的多径模型是适用的.

关键词: 舰载雷达;粗糙海面;海情级;回波模型

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 06-1373-05

The Analysis of the Multipath Model Under the VHF Band at Sea

DONG Mei, ZHAO Yong-bo, ZHANG Shou-hong

(National Lab of Radar Signal Processing, Xi'dian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: The seasurface scattering theory was focused on microwave band. The multipath echo model at sea under the VHF band is analyzed. The complex dielectric constant is computed firstly. By simulating the correlative reflection coefficient and Rayleigh criterion, the conclusion is obtained that the specular reflection occupies the main in the scattering signals, the sea surface can be assumed smooth surface, the multipath model based on the specular reflection model is correct under the sea state six and the grazing angle less than five degrees.

Key words: shipboard radar; the coarse sea surface; sea state; echo model

1 引言

雷达是现代战争的“眼睛”,米波段是公认的具有隐身能力的波段^[1],舰载米波雷达担负着远程预警、跟踪等重要任务,因此米波段下的海面电磁反射情况有必要深入研究.海面多径是指被照射到的海表面产生的散射回波,对其进行建模,称为海面多径模型.电磁场方面的专家学者通过边界条件法^[2]、多尺度散射模型^[3]、分形海面模型^[4]等对海面散射做了精确的分析.然而目前有关于海面电磁反射情况多数是研究微波段下的情况,还没有针对米波段下海面电磁反射情况的研究.并且由于海面条件复杂,海上的实际测量费用昂贵,很难得到完整、准确的测试数据.因此,关于米波段下海面电磁反射情况的研究,目前只能从已有文献^[5~14]进行合理推测并验证.文献^[6]利用数值计算,模拟低掠射角(Low-grazing Angle)入射下,对不同频率的平面波入射时,不同海情级情况下,海表面电流及雷达散射截面的变化,得到了如下结论:随着频率的增加,海面的镜面反射特性越弱以及随着海情级增高,前向散射能量受此影响会下降.这为本文提供了理论支持.

由于米波段频率较低,通常作用距离达100km以上,即使目标高度不低,但是目标的仰角也很低,通常目标的仰角在5°以下.雷达接收到的信号来自于低掠射角入射条件下空中目标的回波信号,其中包含目标的直达波信号和海面多径信号.本文通过分析米波段下海面参数情况,进行合理的推测,当海情级在六级以下时,入射余角在一定范围内,米波段下多径散射满足镜面反射条件,可以将海表面看成是服从菲涅耳反射定律的光滑平面.尽管海面的波高会高达6m,但是对于米波段来说,此时的海面仍然是“光滑”的,并通过计算机仿真证明结论.

2 海面参数

2.1 有效波高与均方根波高

海面状态可以用数值级数方式来描述,即海情级(sea state),常用的有WMO(国际气象组织)和Douglas采用的波高划分方式.风速也有一个类似的数字等级,蒲福级数(Beaufort wind scale).它的数字级别比对应的海表面状态数字等级大致高一个等级.这种表示方法在有关海杂波的参考书中很少使用^[12].这里注明一下:海面良好状态时的级别是指海情级三级及以下的海面波浪

高度和海面风力;全世界海洋风速平均 7.5m/s,它对应于有效浪高 Douglas 三级,风力 Beaufort 四级.下表 1 中提供了海情级的划分方式^[9].

表 1 海情级的划分方式

海态级数	WMO	Douglas	
	波高(m)	波高(m)	海面粗糙度描述
0	0	0	平静的
1	0-0.1	<0.3	光滑的(小浪)
2	0.1-0.5	0.9	轻微的(轻浪)
3	0.5-1.2	0.9-1.5	缓和的(中浪)
4	1.2-2.4	1.5-2.4	粗糙的(强浪)
5	2.4-4.0	2.4-3.7	很粗糙(巨浪)
6	4.0-6.1	3.7-6.1	高的(狂浪)
7	6.1-9.1	6.1-12.2	很高的(怒浪)
8	9.1-13.7	12.2以上	陡峭的(滔涛)
9	13.7以上

以波高来划分的海情级是这样定义的:在海浪观测中很难对各种成分波高进行测量,故仅要求测有效浪高和平均浪高.有效浪高定义为波列中最高的三分之一振幅的平均值,这一平均值直观地表示了近似人眼感觉到的浪高的值.在本文中采用著名的 Douglas 级数划分标准.

均方根波高(wave height RMS) h_r 是指海面波高的均方根值,这个参数在计算中经常用到.有效波高与均方根波高的关系: $H_{1/3} = 4 h_r$ (1)

2.2 海面粗糙度

描述海表面起伏程度的一个重要参数是海表面粗糙度 g ,从表达式(2)中可以看出粗糙度与入射波长,入射余角(擦海角),均方根波高有关.据文献[12]可知,粗糙度 $g < 0.3$ 时可以认为海面是光滑的.

$$g = \frac{h \sin^2 \theta}{\lambda} \quad (2)$$

2.3 海水介电常数

海水介电常数通常是电磁波频率、海水的温度和海水的含盐度的复函数.有关米波段的海水介电常数的确切值在现有文献中没有记录,只有文献[13]中有不同波段下的反射系数变化曲线如图 1(a)和图 1(b)所示.本文根据文献[8](公式见附录)计算出米波段下 100MHz 和 300MHz 的海水介电常数,然后仿真这两个频率下对应的反射系数随入射余角的变化曲线如图 1(c)和图 1(d)所示.比较图 1(a),(c)和图 1(b),(d)中的曲线,发现在不同极化方式下两组曲线变化非常接近,因此可以认为计算出的两个频率下的海水介电常数是合理的.

海水介电常数 ϵ_c 是一个复数,因此可以简单的表示为实部和虚部两部分: $\epsilon_c = \epsilon' - j\epsilon''$ (3)

通常取 $\epsilon' = 80$, $\epsilon'' = 4.3$,本文计算出当 $f = 100\text{MHz}$ 时, $\epsilon' = 70.582$, $\epsilon'' = 4.7127$;当 $f = 300\text{MHz}$ 时, $\epsilon' = 70.593$, $\epsilon'' = 4.6991$.海水介电常数在计算相关系数中菲涅耳反射系数时会用到.

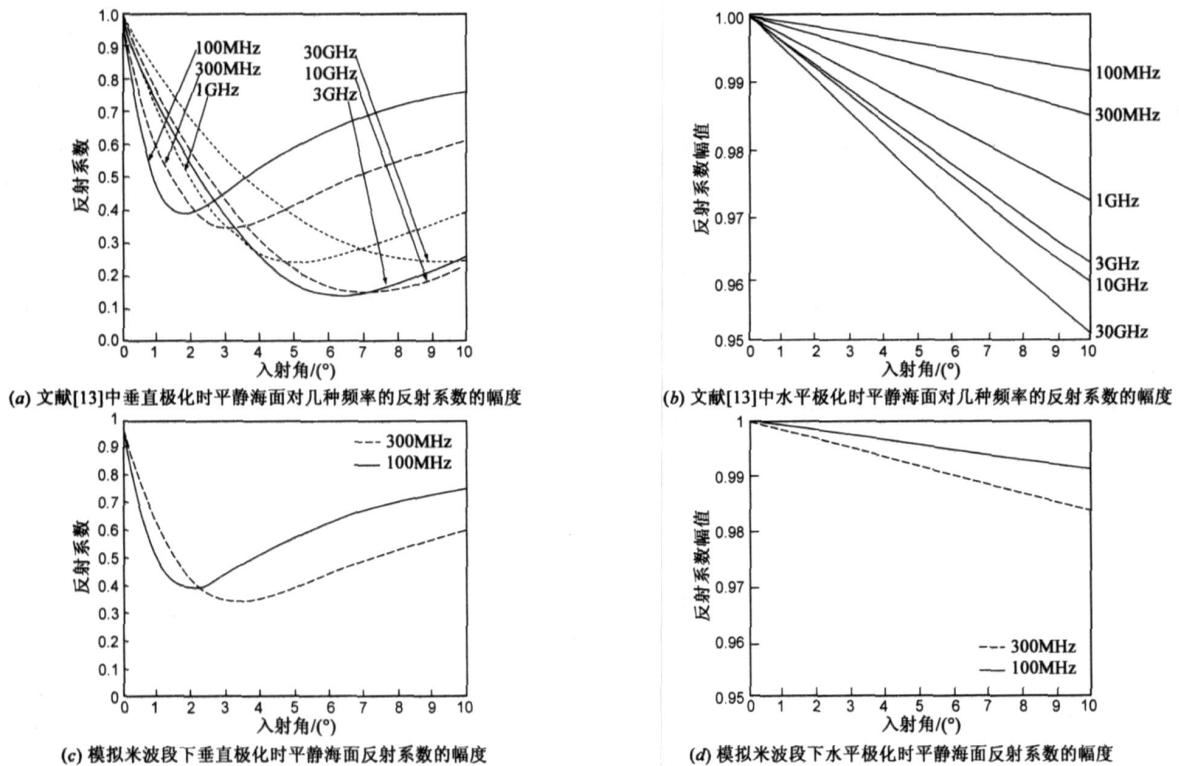


图1 不同极化方式下比较文献[13]与本文模拟的曲线

3 多径散射模型

基于已经介绍的基本参数,下文从两个方面证明:在一定条件下,米波段下的多径散射服从镜面反射规律,可以将海表面看成是“光滑”的。

3.1 相关反射系数

相关反射系数即是镜像成分的反射系数,由两部分组成^[7]:菲涅耳(Fresnel)反射系数和镜面反射系数的修正部分 c_r 。

$$r_{VV} = \frac{r_{FV} - \sqrt{1 - c_r \cos^2 \theta}}{r_{FV} + \sqrt{1 - c_r \cos^2 \theta}} \quad (4)$$

$$r_{HH} = \frac{r_{FH} - \sqrt{1 - c_r \cos^2 \theta}}{r_{FH} + \sqrt{1 - c_r \cos^2 \theta}} \quad (5)$$

$$c_r = \exp(-2 \left(\frac{2 \cdot g}{\lambda} \right)^2), 0 \leq g \leq 0.1 \quad (6)$$

其中 c_r 是与波段有关的海水复电介常数, θ 为入射余角也称擦地角(Grazing Angle),V,H 分别代表垂直极化和水平极化方式。 c_r 的表达形式和粗糙度 g 的变化范围有关,即粗糙度 $0 \leq g \leq 0.1$ 时,可以认为海面是光滑的。因此先要用式(2)计算出 g 值,符合光滑表面要求了再计算 c_r 的值。

我们以 Douglas 三级为起点,仿真出海态级数 3,4,5,6,7 时的粗糙度随入射余角的变化曲线。如图 2(a) 所示,虚线是海情级为 7 时的粗糙度,显然当入射余角大

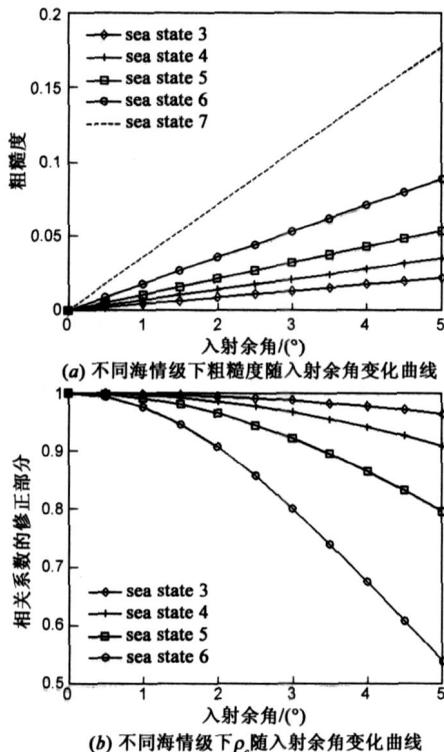


图2 不同海情级下粗糙度和 c_r 随入射余角变化曲线

于 3 后,粗糙度 $g > 0.1$,已经超出了式(6)的取值界限。实线表示的是海情级为 3,4,5,6 时的粗糙度,显然在 $(0^\circ \sim 5^\circ)$ 入射余角范围内,它们的取值都小于 0.1。因此海情级 3,4,5,6 的相关系数修正值可以根据式(6)计算出来。如图 2(b) 所示的曲线数值从大到小依次为海情级 3,4,5,6 的相关系数修正值 c_r ,显然 c_r 均大于 0.5,这也符合镜像模型的特点,与直达波相关的镜像信号占散射能量的主要成分。

有必要注意,上述结论的合理性与入射余角取值范围有关。

3.2 瑞利粗糙度准则

当海面的浪高起伏满足瑞利(Rayleigh)判据,则认为反射面是光滑的^[9]。

瑞利判据

$$h < \frac{\lambda}{8 \sin \theta} \quad (7)$$

其中 λ 为入射波波长, θ 为入射余角(擦海/地角),此时可以把反射近似看成镜面反射。如图 3 所示,虚线代表随入射余角变化的瑞利粗糙度变化曲线,纵坐标表示波浪起伏的均方根值,实线分别代表海情级为 3,4,5,6 级的均方根波高 h 。从图中也可以发现,“光滑”与否与入射余角大小有关。在有效的入射余角 $(0^\circ \sim 5^\circ)$ 范围内时,海情级 3,4,5,6 级的均方根波高值均在虚线下方,随着入射余角增大,海情级 5,6 级的均方根波高值将会高于虚线,这时海面多径散射模型就不能用镜面反射模型来建模了。

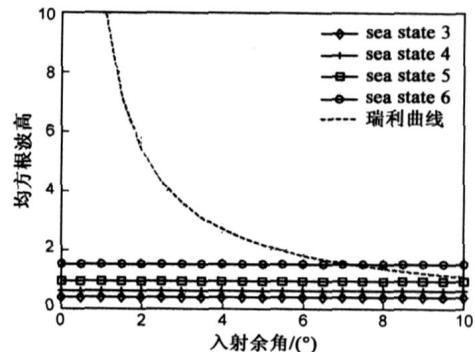


图3 不同海情级下瑞利粗糙度随入射余角的变化曲线

以上从粗糙度和瑞利粗糙判据两个方面证明了,在入射余角 $(0^\circ \sim 5^\circ)$ 范围内,海情级为 3~6 时,海面的多径模型均可以用镜面反射模型来建模,如图 4(a) 所示。

4 接收信号模型

如图 4(b) 所示,用矢量图表示接收信号中各部分间的矢量关系。接收的回波信号 T 中,包含两部分内容:直达波 D(Direct Signal)和散射波 S(Scattering Signal)。其中散射波中包含着相干成分的散射波——镜面

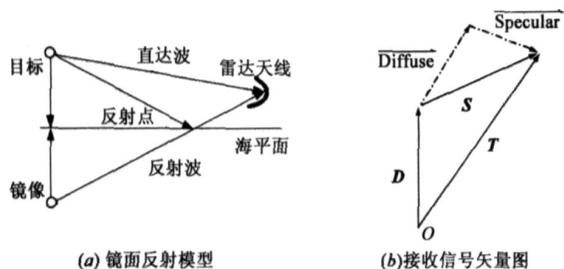


图4 镜面反射模型和接收信号模型

反射信号 (Specular Component) 和非相干成分的散射波——漫反射信号 (Diffuse Component).

$$T = D + S \tag{8}$$

$$S = \text{Diffuse} + \text{Specular}$$

(1) 直达波信号表示为

$$X_d = X \exp(jkR_d) \tag{9}$$

其中 X 表示载波信号, k 为波数, $k = 2\pi/\lambda$, λ 表示雷达工作波长, R_d 为目标距离雷达的斜距.

(2) 相关的镜面反射信号表示为

$$X_c = X \cdot \epsilon_c \exp(jkR_r) \tag{10}$$

其中 ϵ_c 表示菲涅耳 (Fresnel) 反射系数, ϵ_r 表示镜面反射系数的修正部分, R_r 为等效的镜像目标距离雷达的斜距.

(3) 非相关的漫反射信号表示为

$$X_i = X \cdot \sqrt{2} \epsilon_i (I_1 + jI_2) \exp(jkR_r) \tag{11}$$

$$\epsilon_i = 3.75g, \quad 0 \leq g \leq 0.1$$

其中 ϵ_i 为粗糙面漫散射的修正系数, 同样它的表达式与 g 的取值范围有关^[7]. I_1 和 I_2 是正交的, 标准正态过程. 因为在镜面反射假设中, 漫散射的矢量原点就是镜面反射点, 所以非相关的漫反射信号也等效为镜像目标辐射的信号, 因此漫反射信号的时延是由距离 R_r 产生的.

综上所述, 根据接收信号的矢量模型, 我们可以得到在镜面反射模型下的接收信号表达式

$$X_r(t) = X_d(t) + X_c(t) + X_i(t) \tag{12}$$

5 结论

在已有文献关于海面散射的基础上, 本文以米波段下的海面散射为背景, 研究米波段下海面多径模型. 首先通过计算机模拟出米波段下的海水介电常数, 然后从粗糙度和瑞利粗糙准则两方面证明了, 在入射余角为 $(0 \sim 5^\circ)$ 范围内, 海情级 3, 4, 5, 6 时的海面, 可以认为是“光滑”的镜面反射, 回波信号由直达波, 反射波和散射波三部分组成. 目前还没有米波段下的海面散射实测数据, 这些结论只供参考, 但是有一点是可以肯定的, 米波段下的海面散射是以镜面反射为主的. 这对舰载米波雷达的设计和具有一定的指导意义.

附录

海水介电常数的具体表达式

$$r = s_{sw} - i_{sw}$$

式中

$$s_{sw} = s_{sw}^0 + \frac{s_{sw}^0 - s_{sw}^0}{1 + \left(\frac{2f}{f_{sw}^0} \right)^2}$$

$$i_{sw} = \frac{2f_{sw}^0 \left(\frac{s_{sw}^0 - s_{sw}^0}{2f_{sw}^0} \right)}{1 + \left(\frac{2f}{f_{sw}^0} \right)^2} + \frac{i_{sw}^0}{2} \frac{f}{f_{sw}^0}$$

式中, f 为高频段 (0.1 GHz ~ 20 GHz) 频率, $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m 为自由空间电容率, $s_{sw}^0 = 4.9$, $s_{sw}^0(f=0)$ 为静介电常数

$$s_{sw}^0 = \epsilon_0 \cdot a$$

$$i_{sw}^0 = 87.134 - 1.949 \times 10^{-1} T - 1.276 \times 10^{-2} T^2 + 2.491 \times 10^{-4} T^3$$

$$a = 1.0 + 1.613 \times 10^{-5} T s_{sw} - 3.656 \times 10^{-3} S_{sw} + 3.21 \times 10^{-5} S_{sw}^2 - 4.232 \times 10^{-7} S_{sw}^3$$

$$b = \epsilon_0 \cdot b$$

$$i_{sw}^0 = (2)^{-1} (1.1109 \times 10^{-10} - 3.824 \times 10^{-12} T + 6.938 \times 10^{-14} T^2 - 5.096 \times 10^{-16} T^3)$$

$$b = 1.0 + 2.282 \times 10^{-5} T s_{sw} - 7.638 \times 10^{-4} S_{sw} - 7.760 \times 10^{-6} S_{sw}^2 + 1.105 \times 10^{-8} S_{sw}^3$$

$$i = (25, S_{sw}) e^{-\phi}$$

$$(25, S_{sw}) = S_{sw} (0.18252 - 1.4619 \times 10^{-3} S_{sw} + 2.093 \times 10^{-5} S_{sw}^2 - 1.282 \times 10^{-7} S_{sw}^3)$$

$$= 25 - T$$

$$\phi = 2.033 \times 10^{-2} + 1.266 \times 10^{-4} T + 2.464 \times 10^{-6} T^2 - S_{sw} (1.849 \times 10^{-5} - 2.551 \times 10^{-7} T + 2.551 \times 10^{-8} T^2)$$

根据上面的公式, 设水温 T 为 28, 采用较为通用的全球平均盐度值 32.54‰^[14], 选取 $f = 100$ MHz 和 $f = 300$ MHz 计算 r .

参考文献:

[1] 陶弗毓. 现代米波雷达介绍[J]. 地面防空武器, 2002, (4): 34 - 38.

[2] 郭立新, 金彩英, 吴振森. 一维粗糙介质分形海面电磁散射的扩展边界条件法[J]. 电子学报, 2004, 32(1): 139 - 142.

Guo Li-xin, KIM Che-young, WU Zhen-sen. Extended boundary condition method of electromagnetic scattering from one-dimensional rough dielectric fractal sea surface[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(1): 139 - 142. (in Chinese)

[3] 余颖, 王小青, 朱敏惠. 基于二阶散射的海面三尺度雷达后向散射模型[J]. 电子学报, 2008, 36(9): 1772 - 1775.

Yu Ying, Wang Xiao-qing, Zhu Min-hui. Three-scale radar backscattering model of the ocean surface based on second-order scattering[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(9): 1772 -

1775. (in Chinese)
- [4] 王运华,郭立新,吴振森,改进的一维分形模型在海面电磁散射中的应用[J]. 电子学报,2007,35(3):479-483.
Wang Yun-hua, Guo Li-xin, Wu Zhen-sen. The application of an improved 1D fractal model for EM scattering from sea surface[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3):479-483. (in Chinese)
- [5] 姚纪欢. 粗糙海面的电磁散射研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2001.
- [6] 徐乐,谢拥军. 海上舰船在平面波照射下的半空间散射研究[J]. 电子学报,2006,34(12):2322-2325.
Xu Le, Xie Yong-jun. The scattering from ships on ocean-like rough surface excited by a plane wave in half-space model[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(12):2322-2325. (in Chinese)
- [7] Bucco D, Chisholm J D. Comparison of scattering models for predicting radar multipath effects over the sea [R]. CA, USA: American institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 1997. 161-170.
- [8] Daout F, Khenchaf A, Saillard J. The effect of salinity and temperature on the electromagnetic field scattered by sea water [C]. Brest: Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation, Sept. 1994. 110-115.
- [9] 雷前召. 天波超视距雷达海面回波谱及海上航船目标检测[D]. 西安:西安电子科技大学,2005.
- [10] Barton D K. Low-angle radar tracking[J]. Proceedings of the IEEE, 1974, 62(6):687-704.
- [11] Smith Jr J R, Russell S J, et al, Electromagnetic forward scattering measurements over a known, controlled sea surface at grazing[J]. IEEE Trans on GRS, 2004, 42(6):1197-1206.
- [12] Smith Jr J R, Mirotznik M S, Rough surface scattering models [A]. Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]. Anchorage, AK: IEEE, Sept 2004. vol. 5. 3107-3110.
- [13] Skolnik M I. Introduction to Radar Systems [M]. NK: McGraw-Hill Companies, 2001. Chapter 2, 12, 13.
- [14] 董庆,郭华东. 合成孔径雷达海洋遥感[M]. 北京:科学出版社,2005. 45-47.

作者简介:



董玫女,1980年11月生于陕西省宝鸡市,讲师,在职读博,西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室.研究方向:米波测高,阵列信号处理.

Email: dmei2006@sohu.com



赵永波男,1972年10月生于河南省新乡市,博士,教授,西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室.研究方向:阵列信号处理,雷达信号处理,雷达系统等.

Email: ybzhao@xidian.edu.cn



张守宏男,1938年6月生于安徽省六安市,教授,博士生导师,西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室.中国电子学会会士,研究方向:雷达系统与检测等.