

天波超视距雷达一阶海杂波后向散射特性分析

马明权, 盛文, 陈鹏, 李广强

(空军雷达学院, 湖北 武汉 430019)

摘要:为了得到天波超视距雷达一阶海杂波后向散射系数变化范围及总体变化规律,以及雷达频率、海面风速、风波角、海浪有向波高谱关于海面风向的扩展程度等各参数对一阶海杂波后向散射的影响规律,针对天波超视距雷达探测的特点,引入 Barrick 等给出的高频雷达一阶海杂波后向散射系数模型,运用仿真分析的方法得知,无向幅度谱达到饱和时,一阶海杂波后向散射系数大概在 $-39\text{ dB} - -14\text{ dB}$,无向幅度谱未达到饱和时,一阶海杂波后向散射系数范围在 $-460\text{ dB} - -18\text{ dB}$,且频率与风速的相对大小决定了探测环境处于饱和区或非饱和区,又进一步仿真分析雷达频率、海面风速、风波角、海浪有向波高谱关于海面风向的扩展程度等参数对一阶海杂波后向散射的影响,得出各参数对一阶海杂波后向散射影响的规律,这对天波雷达目标探测策略及高频海杂波建模和滤除有指导意义。

关键词:天波超视距雷达;一阶海杂波;后向散射;风波角

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2009.06.008

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2009)06-0032-04

海杂波的影响是天波超视距雷达研究的关键领域之一,海杂波不仅受浪高、风速、风的持续时间、风的行程以及当地气候环境、海浪相对于雷达波束的方向等影响,还取决于雷达自身参数,呈现出明显的非平稳、非高斯性^[1],十分复杂。目前对海杂波的研究多局限于常规微波雷达,对高频雷达海杂波的研究甚少,更没有现成模型^[2]。天波超视距雷达仍没有解决海杂波干扰问题,存在探测能力不稳定和无法探测慢动舰船目标的问题^[3]。

针对天波超视距雷达探测的特点,本文引入 Barrick 等给出的高频雷达一阶海杂波后向散射系数模型进行仿真分析。

1 一阶海浪回波平均后向散射系数模型

定性的说,海面是在大尺度的、近似周期性的波浪上叠加着波纹、泡沫和飞溅浪花。通常把大尺度波浪称为海面的大尺度结构,小尺度的波纹等则称为海面的微细结构^[4]。稳态是指风刮了很长时间,海浪从风中获得的能量与对抗空气阻力所消耗的能量相等,海面已经达到了一种平衡态,这种情况下只考虑海面的大尺度结构,海浪的浪高也仅与风速有关^[5]。

设雷达观察的海面是一个达到均衡海态条件的海,则高频雷达一阶海浪回波的后向散射系数^[6]如下:

$$\sigma^0(\omega) = 2^6 \pi \kappa_0^4 \sum_{m=\pm 1} w(-2m\kappa_0) \delta(\omega - m\omega_B) \quad (1)$$

式中: ω 为多普勒角频率; $m = \pm 1$ 为多普勒角频移的符号; ω_B ($\omega_B = 2\pi f_B$) 称为 Bragg 角频率; κ_0 为雷达电波的波矢,其方向指向散射单元,幅度为 $\kappa_0 = 2\pi/\lambda$; $w(\kappa)$ 表示波矢为 κ 的海浪波列的有向波高谱,此处 $\kappa = -$

* 收稿日期:2008-10-06

基金项目:湖北省自然科学基金资助项目(2008H1027)

作者简介:马明权(1980-),男,河北保定人,博士生,主要从事雷达装备保障及作战应用研究;

E-mail:mamingquan968@126.com

盛文(1966-),男,湖北武汉人,教授,博士生导师,主要从事雷达装备保障及作战应用研究。

$2m\kappa_0$,这是因为产生一阶 Bragg 峰的海浪其波长是雷达波长的一半,所以其波数是雷达波数的 2 倍,又因为 $m=1$ 表示正一阶 Bragg 峰,而此时对应的海浪波矢量方向与雷达波束方向相反。

在足够大的一片海域上,一般地,波高谱可以表示成一个无向幅度谱与一个方向因子之积^[7]:

$$w(\kappa) = w(k, \theta) = \Phi(k) G(\theta) \quad (2)$$

式中: $\Phi(k)$ 为无向谱; $G(\theta)$ 为方向因子; θ 为海浪传播方向与雷达波束的夹角。

常用的波高谱有 Philips 谱, Pierson - Moscovitz 无向谱^[8]。Philips 饱和和无向谱为:

$$\Phi(k) = \begin{cases} 0.005/k^4 & k > k_c \\ 0 & k \leq k_c \end{cases} \quad (3)$$

式中 k_c 为截止波数, $k > k_c$ 的引力波为饱和波, $k \leq k_c$ 的为不饱和波。饱和情况下采用 Philips 无向谱; 不饱和的情况下采用 Pierson - Moscovitz 无向谱。Pierson - Moscovitz 无向谱为:

$$\Phi(k) = 0.008 \frac{1}{k^4} e^{-0.74(k_c/k)^2} \quad (4)$$

风速与波高谱的密切关系体现在 k_c 上:

$$k_c = g/u^2 \quad (5)$$

式中: u 为风速; g 为重力加速度,取 $g=9.80665 \text{ m/s}^2$ 。

图 1 为无向幅度谱达到饱和时的频率 - 风速临界曲线,图 2 为频率在 5 MHz - 30 MHz 范围内无向幅度谱达到饱和时的频率 - 风速临界曲线,可见,频率、风速组成的二维数组绝大部分落在饱和波区域。

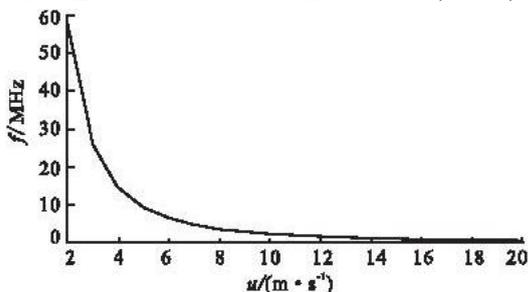


图 1 无向幅度谱达到饱和时的临界曲线

Fig. 1 Critical curve of nondirection amplitude spectrum direction amplitude spectrum approaching

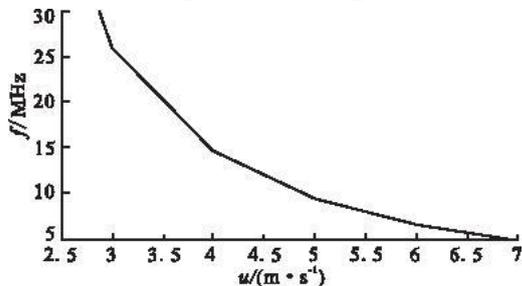


图 2 频率取 5 MHz - 30 MHz 无向幅度谱达到饱和时临界曲线

Fig. 2 Critical curve of nondirection amplitude spectrum saturation with frequency between 5 MHz - 30 MHz

风向对波高谱的影响体现在方向因子 $G(\theta)$ 上, $G(\theta)$ 表示如下^[9]:

$$G(\theta) = \left[\varepsilon + (1 - \varepsilon) \cos^s \left(\frac{\theta - \varphi_{rw}}{2} \right) \right] \left/ \left[\int_{-\pi}^{\pi} \cos^s \left(\frac{\theta - \varphi_{rw}}{2} \right) d\theta g (1 - \varepsilon) + 2\pi\varepsilon \right] \right. \quad (6)$$

式中: φ_{rw} 表示雷达波束指向与海面风向的夹角,以顺时针方向为正; s 表示海浪有向波高谱关于海面风向的扩展程度; ε 是根据实测情况引入的参量,在本文中取 $\varepsilon = 0.003467$ ^[10]。

设 $\beta = \theta - \varphi_{rw}$, 定义为风波角,近似表示海面风向与海浪传播方向夹角,取其范围为 $0^\circ - 180^\circ$, 则:

$$G(\theta) = \left[\varepsilon + (1 - \varepsilon) \cos^s \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] \left/ \left[\int_{-\pi}^{\pi} \cos^s \left(\frac{\beta}{2} \right) d\theta g (1 - \varepsilon) + 2\pi\varepsilon \right] \right. \quad (7)$$

综合以上各式,正负一阶 Bragg 峰的后向散射系数可以表示为:

$$\sigma^0(\omega) = 2^6 \pi \kappa_0^4 w(k) = 2^6 \pi \kappa_0^4 \Phi(k) G(\theta) = \begin{cases} 2^6 \pi \kappa_0^4 (0.005/k^4) g G(\theta), & k > k_c \\ 2^6 \pi \kappa_0^4 \left(\frac{0.008 \frac{1}{k^4} e^{-0.74(k_c/k)^2}}{k^4} \right) g G(\theta), & k \leq k_c \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\kappa_0 = 2\pi/\lambda$; $k_c = g/u^2$; $\kappa = 2\kappa_0$

2 一阶海浪回波后向散射系数仿真

在实际使用时常用 $10 \lg \sigma^0(\omega)$ 来表示, $\sigma^0(\omega)$ 的分贝数^[12]。取海面状态在弱风到大风间,即风速从 4 节到 40 节 ($u=2 \text{ m/s} - 20 \text{ m/s}$), 取超视距雷达频率 $f=5 \text{ MHz} - 30 \text{ MHz}$, 风波角为 0° 时后向散射系数仿真。

由图3及 Matlab 计算结果可知,在上述给定参数下大多数后向散射系数值为 -17.0 dB,其余从 -17.0 dB 变化到 -455.2 dB,且这部分数据中绝大多数(约 97% 以上)大于 -80 dB。这是由于,在频率取 5 MHz -30 MHz,风速取 2 m/s -20 m/s 的情况下,饱和波区域占了大部分(见图 1、图 2),在饱和波($k > k_c$)区域:

$$\begin{aligned}\sigma^0(\omega) &= 2^6 \pi \kappa_0^4 w(k) = 2^6 \pi \kappa_0^4 \Phi(k) G(\theta) = \\ & 2^6 \pi \kappa_0^4 (0.005/k^4) gG(\theta) = \\ & 2^6 \pi \kappa_0^4 (0.005/(-2m\kappa_0)^4) gG(\theta) = \\ & (0.005 \times 2^6 \pi/16) gG(\theta)\end{aligned}\quad (9)$$

$\sigma^0(\omega)$ 与风速和频率无关,当取定一个 θ 值后,后向散射系数 $\sigma^0(\omega)$ 是定值,在图 3 中为 -17.0 dB。当风速和频率的值不断变化进入非饱和区域后:

$$\sigma^0(\omega) = 2^6 \pi \kappa_0^4 w(k) = 2^6 \pi \kappa_0^4 \Phi(k) G(\theta) = 2^6 \pi \kappa_0^4 \left(0.008 1e^{-0.74 \left(\frac{k_c}{k} \right)^2 k^4} \right) gG(\theta) \quad (10)$$

随着风速或频率的减小,后向散射系数迅速减小,且减小速度越来越快,最小值甚至到 -460 dB,值得一提的是绝大部分值(约 97% 以上)仍然在 -80 dB 以上。

由 Matlab 计算结果可知,在饱和区内后向散射系数大概在 -39 dB -14 dB,非饱和区域内后向散射系数范围在 -460 dB -18 dB,频率与风速的相对大小决定了探测环境处于饱和区或非饱和区。

3 探测环境各参数对后向散射系数的影响

1) 风波角和雷达频率对后向散射系数的影响。不失一般性,取风速 6 m/s, $s=2$ 时作仿真,由图 4 可见,后向散射系数随着风波角变大而变小, 0° 时最大, 180° 时最小, Matlab 计算得出影响幅度约 24 dB。风速一定时,频率变化产生饱和波区域向非饱和波区域的过度(见图 1),在饱和波区域内后向散射系数不随频率变化,只随风波角变化,进入非饱和区域后,频率和风波角同时影响后向散射系数,后向散射系数随频率的减小而减小,随着风波角的增大而减小。

2) 风波角和风速对后向散射系数的影响。不失一般性,取频率 15 MHz, $s=2$ 时作仿真,由图 5 可见,频率一定时,风速变化产生饱和波区域向非饱和波区域的过度(见图 1)。在饱和波区域内后向散射系数不随风速变化,只随风波角变化,进入非饱和波区域后,后向散射系数会随风速减小而减小,且减小速度很快,同时随着风波角的增大而减小。在饱和波区域内,后向散射系数主要是由风波角影响,进入非饱和波区域后,风速与风波角双重影响,风速的影响更大。

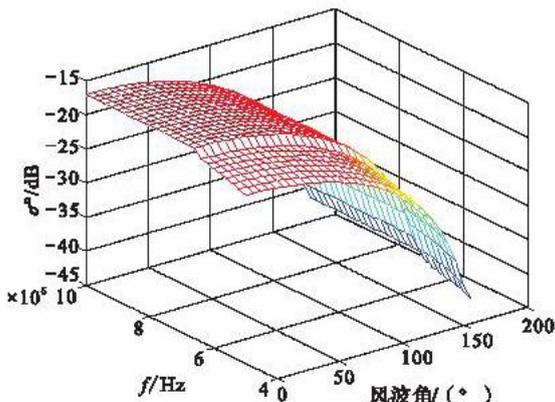


图 4 风波角和雷达频率对后向散射系数的影响
Fig. 4 Angle between directions of ocean wave and wind and radar frequency effecting in backscattering coefficient

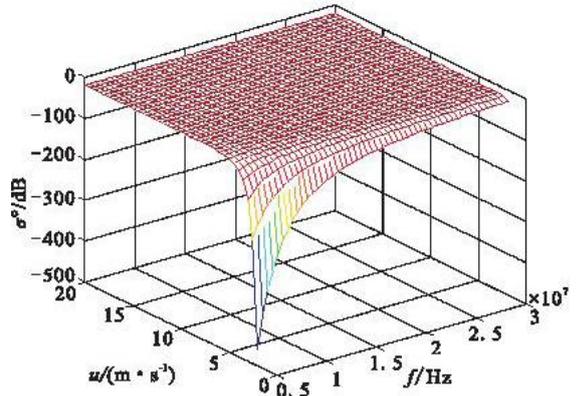


图 3 后向散射系数仿真

Fig. 3 Simulation of backscattering coefficient

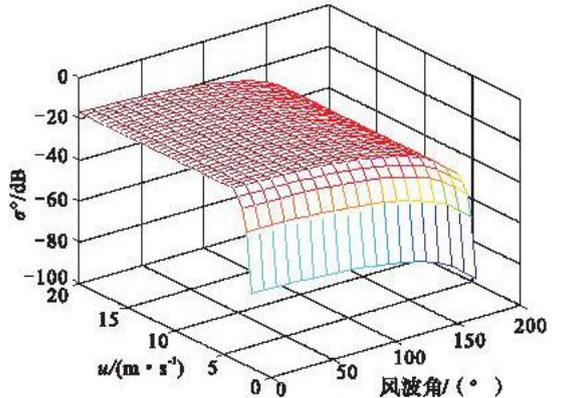


图 5 风波角和风速对后向散射系数的影响
Fig. 5 Angle between directions of ocean wave and wind and wind speed effecting on backscattering coefficient

3) 风波角和 s 对后向散射系数的影响。不失一般性,取频率 15 MHz, 风速 6 m/s 时作仿真,由图 6 可见, s 对后向散射系数的影响相对复杂。由图 6 和 Matlab 计算结果可知,设 s 从 2 到 10,则风波角在 $0^\circ - 37^\circ$ 之间,后向散射系数随 s 增大而增大,在 $37^\circ - 59^\circ$ 之间,后向散射系数随 s 增大而先增后减,在 $59^\circ - 135^\circ$ 之间,后向散射系数随 s 增大而减小,在 $135^\circ - 176^\circ$ 之间,后向散射系数随 s 增大而先减后增,在 $176^\circ - 180^\circ$ 之间,后向散射系数随 s 增大而减小。 s 的变化(2-10)最大可以影响约 14 dB(风波角在 $100^\circ - 135^\circ$ 之间时)。

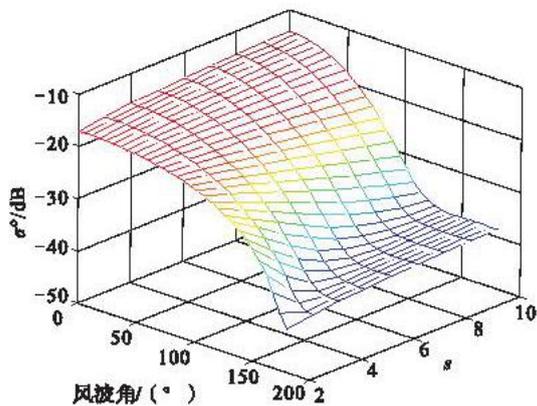


图6 风波角和 s 对后向散射系数的影响

Fig. 6 Angle between directions of ocean wave and wind and effecting in backscattering coefficient

4 结论

经过仿真分析可知,天波超视距雷达一阶海杂波后向散射较强,一般比海面探测目标要高 30 dB - 60 dB,且雷达频率、海面风速、风波角、海浪有向波高谱关于海面风向的扩展程度等各参数对其影响规律各不相同。下一步通过实测数据进一步验证所引入模型的适合度,加以修正得到适合的天波超视距雷达后向散射系数模型,并逐步建立高频雷达海杂波模型。

参考文献:

- [1] 方有培. 海杂波特性研究[J]. 上海航天,2005,21,(5):31-32.
FANG Youpei. The Research to the Sea Clutter Characteristic[J]. Shanghai Aerospace,2005,21(5):31-32. (in Chinese)
- [2] 赵巨波,符燕,耿文东. 海杂波统计特性分析[J]. 现代雷达,2005,27(11):4-6.
ZHAO Jubo, FU Yan, GENG Wendong. Analysis of Sea Clutter Statistical Characteristics[J]. Modern Radar, 2005,27(11):4-6. (in Chinese)
- [3] 李广强,盛文. 海杂波特性分析及对天波超视距雷达影响研究[D]. 武汉:空军雷达学院,2007.
LI Guangqiang, SHENG Wen. Analysis of Sea Clutter Characteristics and Research of the Influence on OTHR[D]. Wuhan: Airforce Radar Academy,2007. (in Chinese)
- [4] Barrick D E, Bsnider J. The Statistics of HF Sea - echo Doppler Spectra[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation,1997,33(1):19-28.
- [5] Billingsley J B. Statistical Analysis of Measured Radar ground Clutter Data[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(2):45.
- [6] Barrick D E, Shider J B. Analysis of Sea Clutter Backscattering[J]. IEEE Trans on Antennas and Prop, 1977,25(1):19-20.
- [7] 冀振元,孟宪德,周和秘. 高频地波舰载超视距雷达海杂波特性研究[J]. 高技术通讯,2001,8(2):41-42.
JI Zhenyuan, MENG Xiande, ZHOU Hemi. Research of Sea Clutter in HF Ground Wave Ship - mounted over - the - horizon Radar[J]. High Tech Communication,2001,8(2):41-42. (in Chinese)
- [8] Long A E, Ttizna D B. Searching on High Frequency Radar Sea Clutter[J]. IEEE Trans on Antennas Propagat,1973,33(21):680-681.
- [9] Billingsley J B. Statistical Analyses of Measured Radar Ground Clutter Data[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems,1999,35(2):45-64.
- [10] Merrill I, Skolni K. 雷达手册[M]. 王军,林强,译. 北京:电子工业出版社,2003.
Merrill I, Skolni K. Radar Handbook [M]. WANG Jun, LIN Qiang Translated. Beijing: Electronic Industry Press,2003. (in Chinese)

(编辑:田新华)

(下转第78页)