

舰载高频地波雷达(OTHR)平台运动 对回波信号调制机理的研究

许 斌, 李 博, 袁业术

(哈尔滨工业大学电子工程系, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘 要: 本文基于高频地波舰载 OTH(Over The Horizon) 雷达后向散射回波信号的物理模型, 在理论上分析并导出了揭示雷达平台运动、雷达系统参数、目标物理属性以及目标运动特性之间内在联系的舰载高频地波 OTH 雷达回波信号在 Doppler 域里的频谱展宽方程; 深入分析了高频地波舰载 OTH 雷达平台运动对雷达回波信号高频相位的调制机理及平台运动对回波信号 Doppler 频谱结构的影响; 推导了雷达平台运动与不同物理尺寸目标及不同运动状态目标相互作用的动态几何关系; 给出了在雷达平台运动条件下静止面目标、静止点目标及运动面目标和运动点目标的回波信号频谱展宽表达式. 这些基本关系式构成了在高频地波舰载 OTH 雷达系统中对海浪杂波特性和目标特性进行分析和研究及在展宽的一阶 Bragg 海浪谱中实现舰船目标分辨与检测的重要理论基础. 文章最后通过对实测数据的分析与测量, 证明了所得出的数学关系式的正确性.

关键词: 舰载 SWR; 展宽谱; 一阶 Bragg 海浪; 展宽谱中的信号分辨

中图分类号: 959. 72 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372 2112 (2008) 12A-109-05

Analysis of the Modulating Mechanism of Movement of Radar Platform on the Back Scattering Signals in SBSWR

XU Bin, LI Bo, YUAN Ye-shu

(Department of Electronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: Based Upon the physical model of back scattering signals in Ship Borne Surface Wave Radar(SBSWR), the spectrum broadening equation of the echo signals in SBSWR, which reveals the relations among the movement of radar platform, the radar system parameters, the target physical attributes and target moving characteristics, is theoretically formulated in the terms of Doppler frequency. The influence of a moving radar platform on the high frequency phases of the radar echoes and on the Doppler spectrum structures of the echoes are analyzed in detail. The dynamic geometrical relations embedded between the moving radar platform and the targets with different physical dimensions and with different moving states are given. In addition, the expressions of the broadening spectrum of the signals from the static targets and the moving targets are presented respectively. These essential relations lay a theoretical basis for analyzing the characteristics of sea clutter and of targets, and for resolving the targets from the broadened first order Bragg lines in SBSWR as well. Finally, the correctness of the mathematic expressions presented in the article is proved by the data gathered from a preliminary field experiment which is conducted to evaluate and demonstrate several aspects of the SBSWR in September 8 1998.

Key words: ship borne SWR; the spectrum broadening; first order Bragg lines; signal resolving in the broadened spectrum

1 引言

高频地波 OTH(Over The Horizon) 对海探测雷达是个高精度 Doppler 分析与分辨系统^[1-3], 它是靠鉴别目标和背景杂波的不同运动状态来发现和检测目标的. 对于岸基雷达, 一个目标能否在强大的海浪杂波背景下被发现, 主要取决于目标本身的特性以及它与背景杂波在运动状态方面的差别. 高频地波 OTH 对海探测雷达典

型的海浪杂波干扰背景如图 1 所示. 图中, 高频段海浪回波信号的频谱主要由两部分组成^[4]: 一部分是由一组朝向和背离雷达且满足 Bragg 谐振散射条件的海浪产生的两个很强的后向谐振散射谱峰组成; 另一部分是由海浪的二阶及高阶散射引起的一片相对均匀的背景杂波谱. 根据海洋电磁学理论^[5-7], 海面可以等效为相对于海浪空间波长的各态历经的二维付立叶表面. 由于在高频段电磁波与海浪之间存在着特定的选择性谐振散

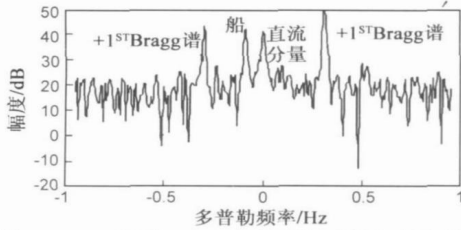


图1 1998.8舰载OTHR岸基联调时的海杂波谱

射机制,因此,对于入射到海面上的任意波长的高频无线电波,总有一组与之相对应的波长的海浪(朝向雷达与背离雷达)与入射无线电波能够产生谐振散射,从而形成一对很强的后向谐振散射峰。在地波 OTH 雷达回波中,尽管来自海面的杂波能量相对于来自人造目标(海面舰船或低空飞机)的回波能量要大得多,但在 Doppler 域里,这些强度极高的海面回波能量却集中地分布在几个有限的雷达系统分辨单元上。只要感兴趣的目标信号 Doppler 频率不与一阶 Bragg 频率相重合,则目标的分辨与检测就不会受一阶 Bragg 海浪的影响。

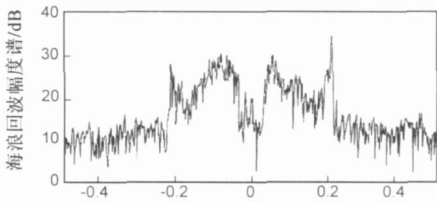


图2 1998.9 海上试验时录取的海浪回波 Doppler 展宽谱(Hz)

然而,在 SBSWR 系统中,由于雷达平台运动,导致一阶 Bragg 海浪杂波能量在 Doppler 域里严重扩散^[8](见图 2),从而极大地影响和限制了舰船目标的分辨与检测。而且雷达平台运动对不同类型的目标(海浪,岛屿,冰山及舰船等)和不同运动状态的目标(相对于雷达处于不同方位、不同运动速度、不同运动方向等)又具有不同的影响,这又进一步加重了 SBSWR 系统目标检测的难度与复杂性。

2 雷达平台静止时的一阶 Bragg 频率

以地波方式沿海面绕射传播的垂直极化高频电磁波会被某些海浪强烈反射。对于充分发展了的海面,各种波长的海浪都达到最大值,当那些相对于雷达做径向运动的海浪的波长满足 $L_w = \lambda/2$ 时(λ 为雷达工作波长),将在雷达方向上产生一个很强的后向散射。由海洋动力学研究结果可知,空间波长为 L_w 的海浪的特征速度为:

$$v_w = \sqrt{g \cdot L_w / (2\pi)} \quad (1)$$

式中: $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 为重力加速度。那么由波长为 L_w 海浪的后向散射信号所产生的 Doppler 频移为:

$$f_B = \pm 2v_w / \lambda = \sqrt{g / (\pi \lambda)} \quad (2)$$

图 1 表示雷达工作在 7.7MHz 时所获得的海浪回波的 Doppler 频谱。

3 载舰运动对回波信号频谱结构的影响

3.1 回波信号频谱展宽的一般表达式

经推导(推导过程略),由载舰运动引起回波信号的 Doppler 频谱展宽可由下式表示^[9]:

$$\Delta f_d = \frac{4v_r}{\lambda} \cos \left[\varphi_0 + \frac{v_r \cdot T_0 \cos \varphi}{2R_a} \pm \frac{v_0 \cdot T_0 |\sin(\varphi - \theta)|}{2R_a} \right] \cdot \sin \left(\frac{l_a + |v_r T_0 \cos \varphi| \pm |v_0 T_0| |\sin(\varphi - \theta)|}{2R_a} \right) \quad (3)$$

其中: Δf_d 代表在一个雷达相干积累周期内,由雷达平台运动引起的回波信号 Doppler 频谱展宽的宽度,单位赫兹(Hz); v_r 表示雷达平台运动速度,单位米/秒(m/s),其正方向规定为载舰的航行方向; λ 代表入射无线电信号波长; φ_0 代表目标与雷达平台之间连线同雷达平台航向法矢量 n_0 之间的初始正向夹角,单位为弧度,逆时针为正方向; φ 代表目标与雷达平台连线和 n_0 的瞬时正向夹角,单位为弧度; R_a 代表目标与雷达平台之间的距离; T_0 表示系统相干积累时间; v_0 表示目标沿自身航向上的速度,单位米/秒; θ 代表目标的航向与 n_0 之间的正向夹角,单位弧度; l_a 代表目标的静态尺寸在与 φ 垂直方向上的投影,单位米。

式(3)给出了载舰运动与目标的物理尺寸、位置、速度以及运动方向之间的相互作用及其对回波信号的影响。式中的 $\cos(\cdot)$ 因子表示载舰与目标之间的瞬时相对位置。在对回波信号频谱展宽的关系上,它是对目标的静态尺寸、动态尺寸的位置加权。 $\cos(\cdot)$ 加权因子中的第二项和第三项分别表示由于载舰运动和载舰运动而引起的载舰与目标二者之间的相对位置变化。

式中的 $\sin(\cdot)$ 项代表展宽项,其中 $l_a / (2R_a)$ 代表目标的静态展宽因子,它揭示了目标相对于雷达的静态横向物理尺寸对回波信号频谱展宽的影响。

$v_r T_0 |\cos \varphi| / (2R_a)$ 和 $v_0 T_0 |\sin(\varphi - \theta)| / (2R_a)$ 分别代表由于载舰运动和载舰运动而引起的目标动态展宽因子。 $v_r T_0 |\cos \varphi| / (2R_a)$ 代表由雷达载舰在一个雷达积累周期内,以速度 v_r 运动,在相对于雷达距离 R_a 为的目标上所生成的相对动态横向目标尺寸。 $v_0 T_0 |\sin(\varphi - \theta)| / (2R_a)$ 代表目标运动所生成的相对动态横向目标尺寸。

3.2 静止目标回波信号的频谱展宽

SBSWR 中的回波信号频谱展宽与目标类型及其静态、动态特性相关。是由载舰运动与目标运动之间的动态耦合效应引起的回波信号频谱结构改变^[10]。

3.2.1 静止面目标回波信号的频谱展宽

静止面目标指的是其目标尺寸在垂直雷达波束指

向上有一定空间跨度,且这个空间跨度在目标所在距离上与天线波束宽度可以比拟的静止目标,例如位于波束指向上的岛屿,距雷达较近的石油钻井平台等.对于静止目标, $v_0 = 0$, 因此该式变为:

$$\Delta f_{da} = \frac{4v_r}{\lambda} \cos \left[\varphi_0 \mp \frac{v_r \cdot T_0 \cos \varphi}{2R_a} \right] \cdot \sin \left[\frac{l_a + |v_r T_0 \cos \varphi|}{2R_a} \right] \quad (4)$$

对于这类目标,如果雷达平台静止不动,则 $\Delta f_{da} = 0$, 在雷达系统的信号检测平面上,表现为出现在目标所在距离上的零 Doppler 频率分辨单元上的直流分量^[11];而在高频地波舰载 OTH 雷达系统中,由于雷达平台运动,在信号检测平面上,它表现为出现在目标所在距离上且偏开零 Doppler 频率分辨单元的一个展宽谱^[10], 偏移量大小由目标与雷达的相对位置决定, Doppler 频谱的展宽宽度则与目标在垂直雷达波束指向上的横向投影尺寸 l_a 、雷达载舰速度、载舰与目标之间的相对位置(二者之间的相对方位角和距离)及雷达系统参数有关.

3.2.2 静止点目标回波信号的频谱展宽

静止点目标是指那些在垂直雷达波束指向上的尺寸与二者之间的距离之比,远小于雷达波束宽度的静止目标.同样的目标,在有些情况下,它们具有面目标的特性;而在另一些情况下,它们又可以近似为点目标,这取决于它们与雷达之间的相对位置以及雷达波束宽度.对于静止点目标, $l_a = 0$, $v_0 = 0$, 所以它的展宽表达式为:

$$\Delta f_{dp} = \frac{4v_r}{\lambda} \cos \left[\varphi_0 \mp \frac{v_r T_0 \cos \varphi}{2R_a} \right] \cdot \sin \left[\frac{v_r T_0 \cos \varphi}{2R_a} \right] \quad (5)$$

从式(5)可以看出,静止点目标回波信号的频谱展宽是由雷达舰载在雷达系统相干积累时间内的运动积累而导致的相对动态横向目标尺寸 $v_r \cdot T_0 |\cos \varphi| / (2R_a)$ 的变化而引起的.

3.3 一阶海浪回波信号的频谱展宽与速度调制

在 SBSWR 系统中,从回波特性方面考虑,海面是一类很特殊的目标^[11]. 它的特殊性在于:

①相对于雷达天线波束宽度,海面可以看成是一个无穷大的散射表面.对于充分发展了的海面,虽然海浪在运动,但在雷达波束指向的切向上的海浪等效静止不动,所以,在式(3)中,由目标运动所产生的动态展宽因子 $v_0 \cdot T_0 |\sin(\varphi - \theta)| / (2R_a) = 0$.

②对于充分发展了的开阔海面,高频段的海面回波特性是均匀的、稳定的,即高频段一阶 Bragg 海浪的特征速度和雷达散射面积不因雷达天线波束的照射位置不同而改变.开阔海面的条件是雷达所处的海面必须足够大,海水也必须足够深,以至于海面在表面风力作用下,在从平静到稳定状态的发展过程中,不受海

岸、岛屿以及海底等强制性边界条件的限制,即海浪的形成和发展过程完全处于风力和重力作用下的自由状态.所以对于充分发展了的开阔海面,对于入射到海面高频无线电波,海面的散射状态处处是均匀的、稳定的.虽然雷达天线波束随着雷达平台运动而照射在不同海面上,但根据上面的分析,其回波特性不会因波束照射的位置不同而改变.这样雷达平台的运动也不会使海浪产生动态展宽,即式(3)中由雷达运动而产生的动态展宽因子.最后得到由于雷达平台运动而引起的一阶 Bragg 海浪等效静态展宽的 Doppler 带宽为:

$$\Delta f_B = \frac{4v_r}{\lambda} \cos \varphi_0 \sin(\beta/2) \quad (6)$$

其中: l_a 为波束覆盖下海面的横向尺寸.设 l_a 为波束半功率点间的宽度,则有 $l_a/R_a = \beta$, 其中 β 为天线波束半功率点之间的角度,从而有:

$$\Delta f_B = \frac{4v_r}{\lambda} \cos \varphi_0 \sin(\beta/2) \quad (7)$$

式(7)是在充分发展的开阔海面条件下从式(3)简化得到的,它也可以在这个条件下从雷达平台与海浪相互作用的动态几何关系中直接导出(具体过程略).式(7)表明由雷达平台运动引起的一阶 Bragg 海浪回波信号 Doppler 频率的展宽宽度与海浪的运动无关,只取决于雷达平台的速度、雷达天线的波束宽度、天线指向及雷达工作频率.天线波束指向不同,相当于雷达系统选择了不同方位上的海浪,这将导致雷达平台运动速度投影及最大速度投影和最小速度投影的差值变化,从而导致同样波束覆盖面积下的海浪,当处于相对于雷达平台不同方位时,具有不同的 Doppler 频率展宽.

4 一阶 Bragg 海浪展宽谱的测量

4.1 数据录取试验

哈尔滨工业大学电子工程技术研究所于 1998 年 9 月 4 日至 1998 年 9 月 11 日,利用自行研制的高频地波舰载 OTH 雷达,在我国渤海和黄海海域进行了一次海浪和舰船目标海上实时观测与数据采集试验.试验系统是由一部最小配置的高频地波舰载 OTH 雷达和一个运动平台组成.雷达安装在一艘排水量为 10000 吨的商船上,船甲板长 100 米,宽 27 米.接收天线阵是由 7 根 4 米高的鞭状天线沿甲板左侧排成的 84 米长的等间隔直线阵.整个实验在海上持续了七天,本文所用的海杂波数据就是在这次试验中录取的.

4.2 展宽公式及与测量有关的计算

一阶 Bragg 海浪回波信号谱的展宽由 $\Delta f_B = \left(2v_r/\lambda \right) \cos \varphi_0 \sin(\beta/2)$ 给出,式中各参数的意义如 3.3 所述.

①雷达天线波束指向正侧方($\varphi_0 = 0$)

当 $\varphi_0 = 0^\circ$ 时, 一阶 Bragg 海浪展宽谱公式变为 $\Delta f_B = 4 v_r \sin(\beta/2) / \lambda$ 在二维数字谱图上, 一阶谱的展宽对称点为(图 3):

$$\pm N_B = \pm \sqrt{\frac{g}{\pi \lambda}} \cdot T_D \quad (8)$$

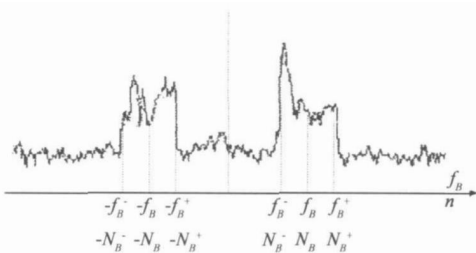


图3 一阶谱展宽宽度、对称点及对应的速度门序号

正一阶谱展宽区的左右边界频率分别为 $\Delta f_B^- = f_B - \Delta f_B/2$ 和 $\Delta f_B^+ = f_B + \Delta f_B/2$; 对应的速度门序号分别为 $N_B^-, N_B^+ = N_B - \Delta N_B/2$ 和 $N_B = N_B + \Delta N_B/2$ 其中: $\Delta N_B = \Delta f_B \cdot T_D$ 是正展宽区所覆盖的速度分辨单元总数。

负一阶谱展宽区的左右边界频率为 $-\Delta f_B^- = -f_B - \Delta f_B/2$ 和 $-\Delta f_B^+ = -f_B + \Delta f_B/2$; 对应的速度门序号分别为 $-N_B^+ = -N_B + \Delta N_B/2$ 和 $-N_B^- = -N_B - \Delta N_B/2$ 其中: $-\Delta N_B = -\Delta f_B \cdot T_D$ 是负展宽区所覆盖的速度分辨单元总数。

②雷达天线波束不指向正侧方($\varphi_0 \neq 0$)

此时, 一阶 Bragg 海浪回波信号谱既有展宽又有平移, 对于这种情况, 在二维数字谱图上, 一阶谱展宽区的对称点分辨单元位置为:

$$\pm N_B = \left\{ \pm \sqrt{\frac{g}{\pi \lambda}} + \Delta f_s \right\} \cdot T_D \quad \varphi_0 > 0 \quad (9a)$$

$$\pm N_B = \left\{ \pm \sqrt{\frac{g}{\pi \lambda}} - \Delta f_s \right\} \cdot T_D \quad \varphi_0 < 0 \quad (9b)$$

其中: $\Delta f_s = \left(2 v_r / \lambda \right) | \sin \varphi_0 |$ 表示由于 $\varphi_0 \neq 0$ 而引起展宽区在频率轴上的平移。

4.3 一阶 Bragg 海浪展宽的测试

①测试所使用的数据

测试所使用的数据是在 1998 年 9 月 8 日 13 点 46 分到 17 点 30 分期间所采集的数据; 当时的雷达系统参数为: 发射峰值功率 800 瓦, 雷达工作频率 5.283 MHz, 波束指向零度, 波束宽度 180° (通道数据), 系统积累时

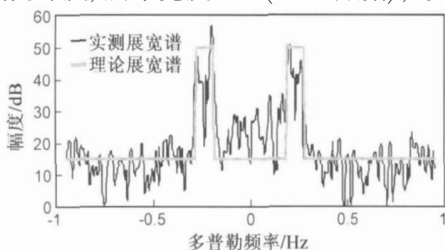


图4 第1阵元16距离单元Doppler谱($v_p \approx 1.25\text{m/s}$)

间 $T_D = 134\text{s}$; 雷达平台分别以 1.25m/s(图 4)、3.26m/s(图 5)和 5m/s(图 6)的速度匀速航行。

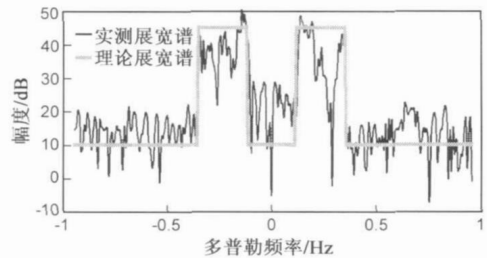


图5 第1阵元16距离单元Doppler谱($v_p \approx 3.26\text{m/s}$)

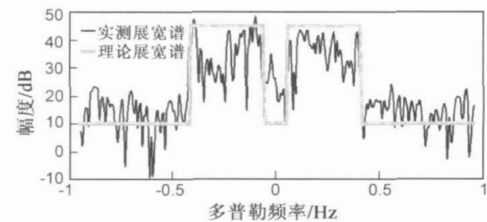


图6 第1阵元16距离单元Doppler谱($v_p \approx 5.0\text{m/s}$)

②理论计算和实际测试结果

对于给定的雷达系统参数和雷达平台运动状态, 利用前面推导的一阶 Bragg 海浪谱展宽公式, 计算得到的展宽一阶 Bragg 谱线位置和利用实测数据处理得到的展宽一阶 Bragg 谱线位置分别如图 4、图 5 和图 6 所示具体的理论计算值和实际测试值见表 1 和表 2。

表 1 展宽的一阶 Bragg 谱线位置表 理论计算
($f_0 = 5.283\text{MHz}$, $\varphi_0 = 0^\circ$, $T_D = 134\text{s}$)

v_r (m/s)	f_0 (Hz)	Δf_B^+	Δf_B^-	$- \Delta f_B^+$	$- \Delta f_B^-$
1.25	0.2344	0.2784	0.1904	- 0.1904	- 0.2784
3.26	0.2344	0.3492	0.1196	- 0.1196	- 0.3492
5.0	0.2344	0.4105	0.0583	- 0.0583	- 0.4105
v_r (m/s)	N_B	N_B^+	N_B^-	$- N_B^+$	$- N_B^-$
1.25	32	38	26	- 26	- 38
3.26	32	47	17	- 17	- 47
5.0	32	56	8	- 8	- 56

表 2 展宽的一阶 Bragg 谱线位置表 实际测量
($f_0 = 5.283\text{MHz}$, $\varphi_0 = 0^\circ$, $T_D = 134\text{s}$)

v_r (m/s)	f_0 (Hz)	Δf_B^+	Δf_B^-	$- \Delta f_B^+$	$- \Delta f_B^-$
1.25	0.234	0.278	0.19	- 0.19	- 0.278
3.26	0.234	0.349	0.119	- 0.119	- 0.349
5.0	0.234	0.41	0.058	- 0.058	- 0.41
v_r (m/s)	N_B	N_B^+	N_B^-	$- N_B^+$	$- N_B^-$
1.25	31	37	25	- 25	- 38
3.26	31	47	16	- 15	- 47
5.0	31	55	8	- 9	- 57

5 结论

基于运动叠加原理, 推导出了目标回波信号在

Doppler 域里的通用展宽表达式, 该表达式在理论上揭示了雷达系统参数、雷达平台运动和目标的物理属性以及目标动态特性之间的内在联系; 作为一种应用, 文中给出了静态面目标、静态点目标、运动面目标和运动点目标的谱展宽数学表达式; 特别的, 文中给出并详细讨论了一阶 Bragg 海浪谱展宽的数学模型, 从而为高频地波舰载 OTH 雷达的舰船目标检测奠定了重要的理论基础. 文章最后利用实际录取的海杂波数据验证了所得结论的正确性.

参考文献:

- [1] L R Wyatt. The measurement of the ocean wave directional spectrum from HF radar Doppler spectra [J]. Radio Science, 1986, 21(1) : 473- 485.
- [2] B J Lipa, D E Barrick. Extraction of sea state from HF radar sea echo: mathematical theory and modeling [J]. Radio Science, 1986, 21(1) : 81- 100.
- [3] R Khan, et al. Target detection and tracking with a high frequency ground wave radar [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1994, 19(4) : 540- 548.
- [4] D D Crombie. Doppler spectrum of sea echo at 13.56 Mc/s [J]. Nature, 1955, 175: 681- 682.
- [5] D E Barrick. The theory of ground wave propagation across a rough sea at decimeter wavelengths [R]. Res Rep AD 865 840, 134pp, Battelle Memorial Institute, Columbus, Ohio, 1970.
- [6] D E Barrick. The interaction of HF/VHF radio waves with the sea surface and its implications [A]. In Proc Electromagnetic of the Sea, AGARD' 77 [C]. Paris, France, 1970. 18. 1- 18. 25.
- [7] E C Ha. Remote sensing of ocean surface current and current shear by HF backscatter radar [R]. Tech Rep D415 1(SEL- 79- 022), Radio Sci Lab, Stanford Electron Lab, Stanford Calif, August 1979.
- [8] L R Wyatt. Progress in the interpretation of HF sea echo: HF radar used as a remote sensing tool [J]. Proc Inst Elect Eng, Part F, 1990, 137(2) : 139- 147.
- [9] 袁业术, 段凤增, 等. 雷达平台运动引起 Bragg 海浪谱的展宽及其压缩方法 [J]. 现代雷达, 1998, 20(5) : 8- 14.
- [10] G L Tyler, et al. Wave directional spectra from synthetic aperture observations of radio scatter [J]. Deep Sea Research, 1974, 21: 989- 1016.
- [11] Junhao Xie, Yeshu Yuan, Yongtan Liu. Suppression of sea clutter with orthogonal weighting for target detection in ship borne HFSWR [J]. IEE Proc.-Radar Sonar&Navigation, 2002, 149(1) : 39- 44.

作者简介:



许 斌 男, 1973 年 5 月出生, 军事学硕士, 现为哈尔滨工业大学电子与信息技术研究院博士研究生, 研究方向为信息与通信.



袁业术 男, 1951 年出生于黑龙江省绥化县, 教授, 博士生导师, 英国 LEEDS 大学访问学者. 主要从事地波 OTH 雷达总体技术、阵列信号处理理论与技术及现代雷达信号检测等相关技术研究.

E mail: yyes@ hit. edu. cn