

高频超视距混合天地波雷达海杂波特点分析

姜 维* 邓维波 杨 强

(哈尔滨工业大学电子工程技术研究所 哈尔滨 150001)

摘 要: 采用天波发射、地波接收混合体制模式的高频超视距雷达, 由于收发站分置, 使得其一阶海杂波谱与单一模式下相比呈现出不同的特点。该文简单介绍了这种混合体制雷达的系统构成和工作原理, 针对这种体制特有的几何结构推导了其定位原理, 结合这种雷达的电磁波传播路径和收发分置的工作模式, 推导了一阶海杂波多普勒频率的理论计算公式, 分析了一阶海杂波随不同方位而变化的现象, 并通过实测数据对理论分析结果进行了验证。

关键词: 高频超视距雷达; 海杂波; 方向性; 双基地角

中图分类号: TN958.93

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)08-1786-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01339

Analyse of Sea Clutter for HF over the Horizon Hybrid Sky-surface Wave Radar

Jiang Wei Deng Wei-bo Yang Qiang

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

Abstract: Compared with the single mode radar, because the transmitter and the receiver are separate, the first-order sea clutter of HF over the horizon hybrid mode radar based on sky wave transmitting and surface wave receiving presents different characteristic. This paper introduces simply elementary composing and operating principle of this hybrid mode radar system, considering the particular geometrical configuration of this system, derives its localization principle, combining electromagnetic wave propagating path and bistatic working mode of this hybrid mode radar, derives the theoretical calculation formula of the Doppler frequency of the first-order sea clutter, analyzes the phenomenon that the first-order sea clutter changes with different orientation, as well as verifies the theoretically analyzed result with practical metrical data.

Key words: HF over the horizon radar; Sea clutter; Directivity; Bistatic angle

1 引言

1992 年, 联合国在海洋公约上规定, 各国领海基线以外 200 n mile 以内的海域属于该国的专属经济区, 每个国家在专属经济区内享有广泛开发权利, 同时, 还要承担打击走私, 海面环境数据的采集和分析, 污染的检测、控制和清除等一定的义务。对专属经济区的实时监测成为临海国家近年来所面临的一个重大问题。由于地球曲率的影响, 大部分地基微波雷达对视距以外的海洋表面目标信号很不敏感。高频超视距雷达是一种能够提供海表面舰船和低飞目标超视距探测的系统。高频超视距(Over The Horizon, OTH)雷达目前采用的传播方式主要有两种模式, 即天波传播模式的天波超视距雷达和地表面波传播模式的地波超视距雷达。

高频天波超视距雷达是利用电离层对短波的折

射, 使电磁波在电离层与地面之间跳跃传播来探测目标的超视距雷达。高频天波超视距雷达能发现低空或超低空来袭目标, 同时也存在一些缺点, 如: 设备庞大复杂、占地面积大、抗干扰能力差、效率比极高、近距盲区大、工作受电离层变化的影响以及无法对舰船目标进行有效的探测等。高频地波超视距雷达又称表面波雷达, 是利用短波能够沿地球表面绕射的特性, 来探测地平线以下的目标。地波超视距雷达利用高频(2-30 MHz)垂直极化电磁波沿海面传播损耗低、距离远的这一特点, 来检测视距外的舰船、飞机甚至巡航导弹等目标, 其探测距离可达到 400 km。地波超视距雷达具有不受电离层波动影响、传播稳定、能监视常规微波雷达的低空盲区和弥补天波超视距雷达照射不到的近程盲区等优点; 但近期研究发现, 电离层杂波直接进入雷达接收机仍会对地波超视距雷达的探测性能产生很大的影响^[1,2]。基于天波发射, 地波接收的高频超视距雷达是一种混合体制雷达, 这种混合体制防御系统是

以现有的天波和地波 OTH 雷达技术为基础, 为克服天波和地波超视距雷达存在的缺陷, 发挥两者的优势, 形成优势互补, 进一步提高对目标的探测性能^[3]。这种新体制雷达由于收发分置, 发射站位于远离海岸的后方, 接收站不辐射能量, 具有良好的抗有源定向干扰和抗反辐射导弹能力, 提高了雷达系统的生存能力; 同时如果工作在较低频段, 其对目标的照射角、反射特性等与常规雷达不同, 因此还具有探测隐身目标的能力。

混合体制高频超视距雷达系统采用天波发射-地波接收的工作模式, 由于工作在高频波段, 影响系统信噪比的主要噪声源是外部环境噪声, 主要包括大气噪声、人为噪声等。而影响海表面舰船和低空飞行目标检测的主要因素则是一阶及二阶的海洋杂波背景和电离层的波动。国内外众多学者深入研究了高频波段的海杂波特性, 但根据应用背景的不同, 其研究的主要是岸基或舰载的单基地系统^[4-7], 或者是高频地波双基地雷达系统^[8-10]。针对基于天波发射, 地波接收的这种混合体制高频超视距雷达系统, 尚没有发现研究其海杂波特性的相关文献。本文首先简单介绍了这种混合体制高频超视距雷达系统, 对系统的基本构成和工作原理等进行了基本说明, 然后根据实验雷达系统实测数据的处理结果, 给出了这种混合体制下观察到的海杂波表现出来的一些特点, 最后对每种特点的产生机理进行了详细分析和解释, 并结合实际数据对这些原理进行验证, 为研究海杂波抑制及目标检测方法提供理论支持。

2 混合体制雷达系统概述

2.1 系统的基本构成和雷达的工作原理

该系统主要包括发射系统、接收系统、信号处理系统、电离层探测系统等。布局示意图如图 1 所示。

雷达的工作原理: 利用海岸后方的雷达站作为发射站, 发射站辐射的电波能量经电离层反射到监测海域, 被天波能量照射的这一海域的低飞和海面目标所散射能量, 以地波绕射波方式沿海面到达雷

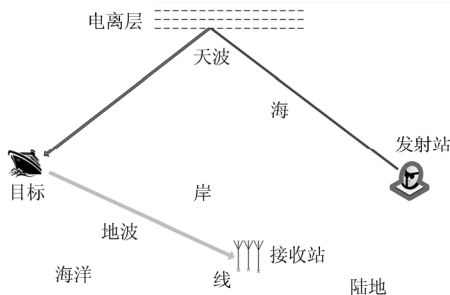


图 1 天波发射、地波接收的高频超视距雷达的布局示意图

达接收站, 从而实现利用天波发射-地波接收模式对海上舰船和飞机目标的检测。

此外, 相应位置还应设置有电离层(垂直、斜投射、返回散射)探测站, 监视电离层的变化, 提供选频的信息服务; 给出电离层剖面、计算电离层倾斜, 天波信道延长参数的原始数据, 保证系统检测目标、目标定位、抗干扰等方面的需要。

2.2 定位原理

为了方便分析, 计算中忽略了地球曲率的影响, 将目标与雷达系统位置关系简化为平面几何关系, 如图 2 所示。另外这里认为电离层没有倾斜, 所以有 $R_1 = R_2$ 。

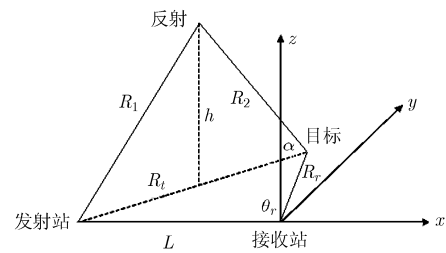


图 2 分址雷达简化平面示意图

结合图 2, 利用三角函数公式, 收发分址雷达系统定位方法经理论和数学推导可以得到

$$R_r = \frac{R^2 - 4h^2 - L^2}{2(R - L \cos \theta_r)} \quad (1)$$

式中 L 为发射站和接收站之间的基线距离; θ_r 为目标与基线之间的夹角, $R = R_1 + R_2 + R_r$ 为利用时延得到的距离; R_r 为目标与接收站之间的距离, h 为电离层的高度。

3 海杂波随方位变化的特点及分析

利用基于天波发射, 地波接收的某实验高频超视距雷达系统, 系统天线阵列采用 8 个阵元的等间距直线阵列, 工作频率 3-15 MHz, 基线距离是 800 km。对该系统测得数据进行常规的距离处理和多普勒处理之后, 再进行数字波束形成(Digital Beam Formation, DBF), 某批数据的处理结果如图 3 所示, 由图中可以清楚看到两个 Bragg 峰(也就是海杂波)、电离层杂波和直达波。图中“DBF 30”表示 DBF 后 30° 方向的处理结果, 其他类似。

通常高频超视距雷达系统, 不管是天波雷达系统, 还是地波雷达系统, 经过上述同样的传统雷达信号处理流程之后, 海杂波在不同方位的结果不会出现明显不同。这是因为海杂波通常是没有方向性的, 这也是区别海杂波和目标的一个依据。然而利用混合体制雷达系统测得的数据, 处理结果却表明海杂波随着方位的变化而变化。

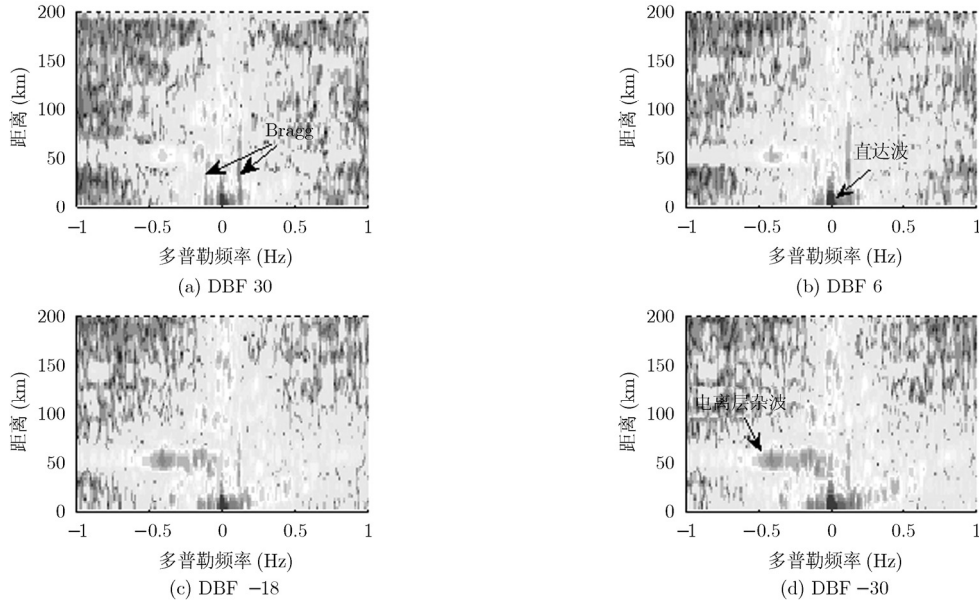


图 3 工作频率 8.8 MHz 数据的 DBF 处理结果

3.1 海杂波出现的距离随不同方位的变化

如图 3 所示, 经观察发现随着波束方位角度的减小, 可观测到海杂波的距离也不断变小。即海杂波表现出一定的“方向性”, 这与海杂波是没有方向性的结论相悖。

下面分析其原因。我们采用传统的经典方法(距离处理、多普勒处理, 数字波束形成)得到的处理结果中的距离实际上是一种等效, 即认为

$$R_r' = (R - R_0) / 2 \tag{2}$$

式中 R_r' 是测量值; R_0 是直达波所走过路程的距离, 即电磁波从发射站到电离层然后直接反射回接收站所走过的距离。这里需要说明的是 R_0 并不一定等于 $R_1 + R_2$, 式(2)只是工程上的近似结果。目标的真实距离 R_r 则需要利用式(1)修正得到, 其中 $R = R_0 + 2R_r'$ 。因此真实的距离和测量值之间就存在一个误差, L 是定值, 假定 h 可以精确测量, 那么这个误差主要由 R 和 θ_r 决定, 本文用 R_r / R_r' 这个比值来衡量这个误差的大小。例如利用某批数据的 R_0 , 可以做出 R_r / R_r' 随 R 和 θ_r 的变化曲线, 如图 4 所示。由图可以看出 R_r / R_r' 随着 R 的增大而减小, 随 θ_r 的增大而减小, 即误差随 R 和 θ_r 的增大而减小。图 4 中的尖峰, 即最大值在 $R = 0$ 和 $\theta_r = 0$ 取得, 也就是零度方向零距离时误差达到最大。

由于衰减的原因, 可以观察到海杂波的实际距离其实是有限的。不同方位的 DBF 处理结果中, 海杂波可以看成是沿距离远近分布的一个个散射单元, 每个散射单元可以看成是一个目标, 而目标的方

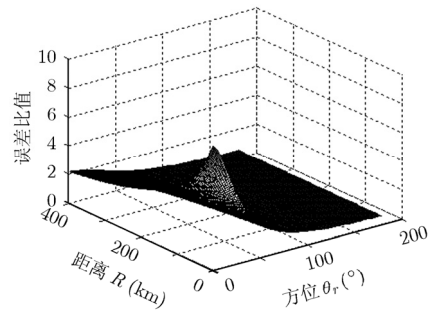


图 4 R_r / R_r' 随 R 和 θ_r 的变化曲线

位则可以认为就是 DBF 处理结果对应的不同方位。由前面分析已经知道目标的真实距离和测量值之间存在误差, 并且误差受目标的方位影响, 因而位于相同(真实)距离不同方位的目标(这里对应海杂波)对应的等效测量距离(处理结果中观测到的)也是不同的。这就出现图 3 中的情况, 也就解释了混合体制雷达系统处理结果中海杂波在距离维的出现范围随方位变化的现象。图 5 给出了对应图 3 中距离 20 km 处的剖面图, 由图中标出的左侧海杂波的幅度随方位的变化情况, 也从另一个角度验证了前面的结论。这里图中“DBF 30”的含义同前。

3.2 海杂波的展宽随不同方位的变化

由于这种混合体制雷达实际上也是一种收发分置的双基地雷达系统, 与通常的单基高频超视距雷达系统的处理结果相比, 不管是天波雷达系统, 还是地波雷达系统, 混合体制雷达系统中的海杂波都是会展宽的。如图 6 所示, 其中 T 表示发射站, R 表示接收站, E 为散射单元, β 是双基地角, 利用

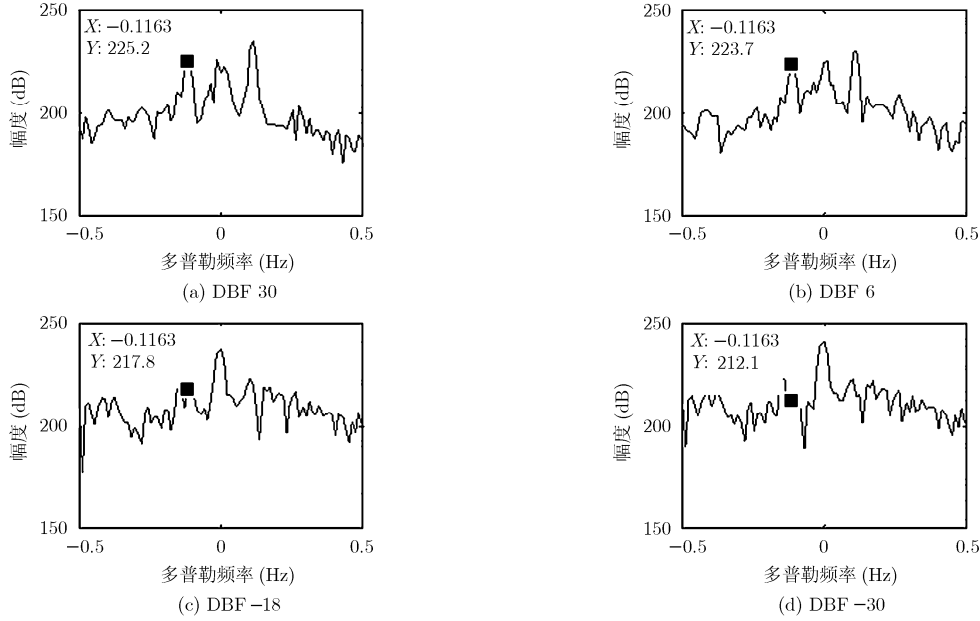


图 5 图 3 中距离 20 km 处对应的剖面图

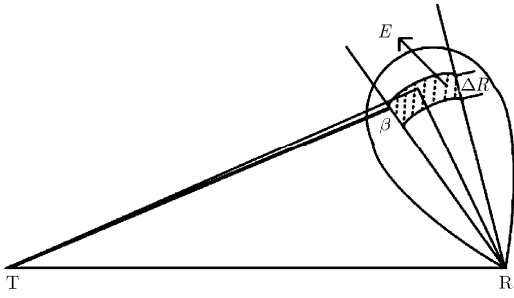


图 6 双基地角说明示意图

文献[6]推导的结果可知, 其对应的一阶海杂波多普勒频率可利用式(3)计算

$$f_b = \pm \sqrt{\frac{gf}{\pi c}} \sqrt{\cos(\beta/2)} \quad (3)$$

式中 g 是重力加速度, 这里取 9.8 m/s^2 ; f 是工作频率; c 是光速, 这里取 $3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$; 正负号分别对应朝向和背离雷达运动的海浪。实际上, 双基地布局下的海浪 Bragg 谐振散射条件是

$$L(\cos \Delta_i + \cos \Delta_s) \cos(\beta/2) = m\lambda, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

当 $m = 1$ 时, 即对应一阶海杂波。式(4)中, λ 为无线电波波长, Δ_i 和 Δ_s 分别对应无线电波入射和反射的擦地角, L 为波浪长度。考虑图 1 中本系统对应的几何关系和配置, 我们有 $\Delta_i = \alpha$ 和 $\Delta_s = 0$, 其中 α 是电离层到目标的连线 R_2 与目标到发射站的连线 R_t 之间的夹角, 体现发射过程中的天波传播路径。那么可以得到本系统配置下一阶海杂波谐振的条件是

$$L = \frac{\lambda}{\cos(\beta/2)(\cos \alpha + 1)} \quad (5)$$

其它波长的海浪不会产生相干散射, 其回波可以忽略。在频谱中, 由于运动速度引起的多普勒频移则为

$$f_b = \pm v_p \cos(\beta/2)(\cos \alpha + 1) / \lambda \quad (6)$$

其中 v_p 为海波相位传播速度。从水力学深水散射公式可知, 对于重力波浪, 其 v_p 与其波长有下列关系:

$$v_p = \sqrt{gL/2\pi} \quad (7)$$

这样, 本系统对应的一阶海杂波多普勒频率的计算公式可以推导得到

$$f_b = \pm \sqrt{\frac{gf}{\pi c}} \sqrt{\cos(\beta/2)} \sqrt{\frac{\cos \alpha + 1}{2}} \quad (8)$$

然而由于这里系统采用的天线阵列规模相对较小, 导致接收波束具有较宽的波束宽度, 所以某距离门单元对应的散射单元 E 不能等效为一个点, 而是一小片区域。进而导致对应的双基地角并非是一个单一的值, 而是一个范围, 所以计算出一阶海杂波的多普勒频率也不是一个单一的定值, 而是一个范围, 表现在多普勒谱上则是一阶海杂波发生了展宽。由于散射单元对应的区域大小由波束宽度决定, 所以也把这种影响称为宽波束和双基地角共同造成的结果。需要说明的是, 由于现在对于 Bragg 峰宽度的定义和测量尚没有统一标准, 所以这里主要是通过比较 Bragg 峰从峰值下降到噪声所覆盖的范围来观察海杂波的展宽情况。

由前面的分析可知, 一阶海杂波的展宽程度跟双基地角的范围有关, 而由图 6 的几何关系可知双基地角的范围则由散射单元离接收站的距离和方位决定, 因此在距离一定的情况下, 一阶海杂波的展

宽程度也随不同方位发生变化。同样以距离接收站 50 km 的散射单元为例, 计算出其对应海杂波在不同方位的展宽结果如表 1 所示, 其中第 1 列夹角是指天线阵列形成波束与天线阵列法线方向的夹角, 表中涉及角度的单位均为($^{\circ}$)。由表 1 最后 1 列的结果可以看出, 一阶海杂波的展宽程度随不同方位变化, 且在表中所示范围内, 当天线阵列形成波束与

天线阵列法线方向呈 -30° 时, 海杂波展宽程度最大, 而天线阵列形成波束与天线阵列法线方向呈 30° 时, 海杂波展宽程度最小。同样可以看出不同方位的展宽程度最大相差才 0.03 Hz, 比一般的观测尺度小一到两个数量级, 所以在图 3 和图 5 中都只是稍有体现, 即海杂波在不同方位的展宽差别并不明显。

表 1 距离接收站 50 km 处的海杂波在不同方位的展宽程度计算结果

| 夹角($^{\circ}$) | 波束主瓣宽度($^{\circ}$) | 双基地角的范围($^{\circ}$) | 范围大小($^{\circ}$) | 多普勒频率范围(Hz) | 展宽程度(Hz) |
|------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|---------------|----------|
| -30 | 21.064 | 159.333-136.830 | 22.503 | 0.1241-0.1777 | 0.0537 |
| -24 | 19.901 | 152.375-131.073 | 21.302 | 0.1432-0.1886 | 0.0455 |
| -18 | 19.079 | 145.621-125.316 | 20.305 | 0.1593-0.1987 | 0.0394 |
| -12 | 18.529 | 139.037-119.320 | 19.717 | 0.1734-0.2085 | 0.0351 |
| -6 | 18.213 | 132.605-113.277 | 19.328 | 0.1859-0.2176 | 0.0317 |
| 0 | 18.110 | 126.316-107.180 | 19.136 | 0.1971-0.2261 | 0.0290 |
| 6 | 18.213 | 120.168-101.028 | 19.140 | 0.2072-0.2341 | 0.0270 |
| 12 | 18.529 | 114.163-94.827 | 19.336 | 0.2163-0.2416 | 0.0253 |
| 18 | 19.079 | 108.312-88.589 | 19.723 | 0.2246-0.2486 | 0.0240 |
| 24 | 19.901 | 102.634-82.136 | 20.497 | 0.2321-0.2552 | 0.0231 |
| 30 | 21.064 | 97.159-75.703 | 21.456 | 0.2389-0.2613 | 0.0224 |

4 结论

在基于天波发射, 地波接收的高频超视距混合天地波雷达系统中, 天线阵列接收数据的处理结果表明, 混合体制雷达系统的一阶海杂波呈现出随不同方位而变化的特点。DBF 的结果中海杂波可观测距离随不同方位变化, 是由这种混合体制雷达特有的几何结构推导而出的定位原理和采用传统的雷达信号处理方法共同决定的; 海杂波的展宽程度随不同方位而变化, 则是受双基地角影响的结果, 但变化不大。由混合体制雷达系统的定位原理决定了测量结果中的距离并不反映目标距接收站的真实距离, 针对混合体制雷达的电波传播途径和双站工作模式提出相应的新的雷达信号处理方法, 则是高频超视距混合天地波雷达系统需要进一步研究的关键问题。

参考文献

- [1] Jiang Wei and Deng Wei-bo. Characteristic research of ionospheric clutter in over the horizon HFSWR[C]. IET International Radar Conference 2009, Guilin, China, April 20-22, 2009: 1-8.
- [2] Jiang Wei, Deng Wei-bo, and Shi Jia-lin. Characteristic study of ionospheric clutter in high-frequency over the horizon surface wave radar[C]. IEEE China Youth Conference on Information and Communications Technology, Beijing, China, Sept. 20-21, 2009: 154-157.
- [3] Riddolls R J. Limits on the detection of low-Doppler targets by a high frequency hybrid sky-surface wave radar system[C]. IEEE Radar Conference 2008, Rome, Italy, May 26-30, 2008: 1-4.
- [4] Xie J, Yuan Y, and Liu Y. Experimental analysis of sea clutter in shipborne HFSWR [J]. *IEE Proceedings of Radar, Sonar & Navigation*, 2001, 148(2): 67-71.
- [5] 冀振元, 孟宪德, 周和铤. 高频地波超视距雷达海杂波信号分析[J]. *系统工程与电子技术*, 2000, 22(5): 12-15.
Ji Zhen-yuan, Meng Xian-de, and Zhou He-mi. Analyses of sea clutters in HF ground wave over-the-horizon radar[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2000, 22(5): 12-15.
- [6] 刘蕾, 吴雄斌, 程丰. 单站高频地波雷达矢量海流生成算法研究[J]. *电波科学学报*, 2004, 19(增刊): 139-141.
Liu Lei, Wu Xiong-bin, and Cheng Feng. Algorithm research for vector current measurements based on mono-static HF surface wave radar[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2004, 19(Suppl.): 139-141.
- [7] 孟泽, 孙合敏. 天波超视距雷达海洋回波谱特性研究[J]. *舰船电子对抗*, 2009, 32(6): 66-70.
Meng Ze and Sun He-min. Study of sea echo spectrum characteristics for sky-wave over-the-horizon radar[J].

- Shipboard Electronic Countermeasure*, 2009, 32(6): 66-70.
- [8] Trizna D and Gordon J. Results of a bistatic HF radar surface wave sea scatter experiment [C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2002, Piscataway, NJ, USA, June 24-28, 2002, 3: 1902-1904.
- [9] Wang Jian, Dizaji R, and Ponsford A M. Analysis of clutter distribution in bistatic high frequency surface wave radar [C]. IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering 2004, Ontario, Canada, May 2-5, 2004, 3: 1301-1304.
- [10] 刘春波, 陈伯孝, 陈多芳, 等. 岸-舰双基地高频地波雷达一阶海杂波特性分析[J]. 电波科学学报, 2007, 22(4): 599-603.
- Liu Chun-bo, Chen Bai-xiao, Chen Duo-fang, *et al.*. Characteristic of first-order sea clutter for coast-ship bistatic HF-SWR[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2007, 22(4): 599-603.
- 姜 维: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为高频超视距雷达的信号处理、抗电离层干扰、电磁场散射特性等.
- 邓维波: 男, 1961 年生, 教授, 博士生导师, 从事天线、电磁场及电波传播等方面的研究.
- 杨 强: 男, 1970 年生, 副教授, 硕士生导师, 从事雷达信号处理、弱目标检测等方面的研究.