

双基地高频地波雷达系统布站研究

何 缓^{*①②} 柯亨玉^① 万显荣^① 胡林华^② 邓 刚^②

^①(武汉大学电子信息学院 武汉 430079)

^②(空军雷达学院信息对抗系 武汉 430019)

摘 要: 由发射机(T)和接收机(R_m)共站的单基地高频地波雷达增设分置的接收系统(R_b)构成的T/ R_m - R_b 双基地高频地波雷达系统用于海洋环境监测时,既可测得矢量流速度,又可消除风向模糊性,是目前高频地波雷达的发展趋势之一。该文首次从T/ R_m - R_b 系统的探测能力与海流测量误差两方面分析最佳基线长度和最佳双基地角范围,从而确定其布站原则,即:在确定T/ R_m 单基地雷达的位置后,先根据T- R_b 双基地雷达设计指标中的最大探测距离和确定基线长度,然后根据T/ R_m - R_b 系统海流测量误差最小的原则确定最佳双基地角范围,从而确定T- R_b 双基地雷达接收站 R_b 的位置。该布站原则可为双(多)基地高频地波雷达的海洋环境监测应用提供参考和依据。

关键词: 高频地波雷达; T/ R_m - R_b 体制; 雷达探测能力; 海流测量误差; 布站原则

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)02-0333-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00708

Study on the Distribution of Bistatic High-frequency Ground Wave Radar System

He Huan^{①②} Ke Heng-yu^① Wan Xian-rong^① Hu Lin-hua^② Deng Gang^②

^①(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

^②(Department of Information Countermeasures, Air Force Radar Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: If another separated receiver is added to a full monostatic high-frequency ground wave radar, a T/ R_m - R_b system can be got, one receiver R_m operating in the monostatic mode, co-located with transmitter T, and another receiver R_b operating in bistatic mode. The T/ R_m - R_b system for ocean environment remote sensing can not only measure the current vector velocity, but also eliminate the wind direction ambiguity. It is one of the trend in development of high-frequency ground wave radar. In this paper, the distribution principle of T/ R_m - R_b system is determined from the optimal baseline length and optimal range of bistatic angle, which are analyzed from the angle of radar detection ability and current measurement error. That is: if the location of T/ R_m monostatic radar is known, the optimal baseline length can be firstly determined according to the maximum range sum target of T- R_b bistatic radar, then the optimal range of bistatic angle and the location of the bistatic receiver R_b can be determined according to the minimum current measurement error of T/ R_m - R_b system. The distribution principle obtained in this paper will provide useful reference for the application of bistatic (or multi-static) high-frequency ground wave radar to ocean environment remote sensing.

Key words: High-frequency ground wave radar; T/ R_m - R_b system; Radar detection ability; Current measurement error; Distribution principle

1 引言

高频地波雷达是一种可以连续大面积监测海洋环境状态的设备。目前成功用于海态监测的高频地波雷达系统有美国的CODAR^[1],中国的OSMAR^[2],德国的WERA^[3]等。然而,单基地雷达测量矢量流时至少需要两部雷达同时工作,且提取风向信息时

存在模糊。因此,组网探测成为目前高频地波雷达研究的热点问题之一^[4-8]。由发射机(T)和接收机(R_m)共站的单基地高频地波雷达增设分置的接收系统 R_b ,并使它们协同工作,即构成双基地T/ R_m - R_b 体制,既可测得矢量流速度,又可消除风向模糊,因此,本文的研究对象为T/ R_m - R_b 双基地系统。其中,布站研究是双基地系统研究不可缺少的部分。

关于双基地高频地波雷达系统的相关研究工作,已见报道的主要有探测范围分析^[4]和定位精度分析^[6]。然而,仅从探测范围或定位精度出发尚不够确

2011-07-08 收到, 2011-10-09 改回

国家自然科学基金(60971101, 41074116)和武汉大学“中央高校基本科研业务费专项资金”(3101010)资助课题

*通信作者: 何缓 hhwdp@163.com

定双基地系统的布站。因此，本文从雷达探测能力与海流误差分析两方面分析最佳基线长度和最佳双基地角范围，从而确定 T/R_m-R_b 系统的布站原则。

2 最佳基线长度

用于海态监测的双基地高频地波雷达系统工作于掠入射状态，故可将双基地雷达和目标(海元)限定在双基地平面内。如图 1 所示，T_g 为目标，L_B 为基线长度，φ_T 和 φ_R 分别为以发射基地和接收基地为本地坐标原点的方位角，R_T 和 R_R 分别为发射基地和接收基地到目标之间的距离，γ 为双基地角。

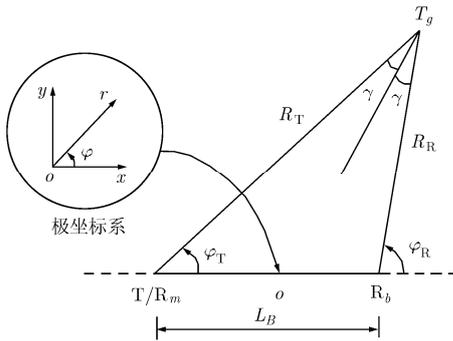


图 1 双基地雷达系统几何关系

用类似于单基地雷达方程的推导方法，可得到双基地雷达方程为^[9]

$$(R_T R_R)_{\max}^2 = \frac{P_T G_T G_R \lambda_i^2 \sigma_B(\gamma) F_T^2 F_R^2}{(4\pi)^3 k_b T_s B_n (S/N)_{\min} L_T L_R} \quad (1)$$

或者为

$$(R_T R_R)_{\max} = \kappa_B \quad (2)$$

其中 P_T 为发射机的输出功率；G_T 和 G_R 分别为发射天线和接收天线的增益；λ_i 为工作波长；σ_B(γ) 为双基地雷达散射截面积；F_T 和 F_R 分别为发射天线至目标、目标至接收天线传播路径的方向图因子；k_b 为玻耳兹曼常数；T_s 为接收系统噪声温度；B_n 为接收机检波器前的噪声带宽；(S/N)_{min} 为正常检测时接收机输入端所需的最小信噪比；L_T 和 L_R 分别为发射系统和接收系统损耗；κ_B 为双基地最大距离积。

在图 1 所示的以基线中心为极点的极坐标系 (r, φ) 中，可得双基地雷达的信噪比等值线为卡西尼卵形线族，其表达式为

$$S/N = K_B / \left[\left(r^2 + L_B^2/4 \right)^2 - r^2 L_B^2 \cos^2 \varphi \right] \quad (3)$$

式(3)中 K_B = $\frac{P_T G_T G_R \lambda_i^2 \sigma_B(\gamma) F_T^2 F_R^2}{(4\pi)^3 k_b T_s B_n L_T L_R}$ 为双基地雷达常数。图 2 举例画出了 K_B = 30L_B⁴ 时的卡西尼卵形线族。在歧点处，r = 0，由式(3)有

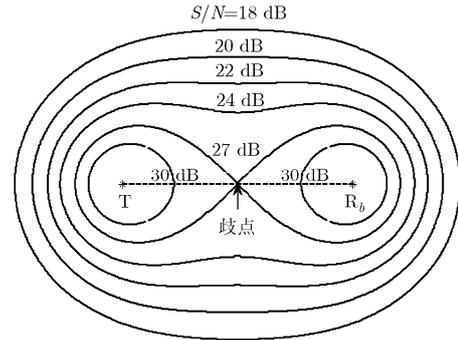


图 2 K_B = 30L_B⁴ 时 T-R_b 双基地雷达的信噪比等值线

$$S/N = 16K_B/L_B^4 \quad (4)$$

假设此双组线的 S/N = (S/N)_{min}，则有 L_B = 2√κ_B。这意味着，最小信噪比等值线在 L_B < 2√κ_B 时为单卵形线；在 L_B = 2√κ_B 时为双纽线；在 L_B > 2√κ_B 时分裂成围绕发射和接收基地的两个小卵形线。

在图 1 所示的以基线中心为原点的直角坐标系 xoy 中，可得双基地雷达的距离和等值线为焦点在 T, R_b 处的椭圆，其表达式为

$$x^2/l_c^2 + y^2/l_d^2 = 1 \quad (5)$$

式(5)中，l_c 为椭圆的半长轴，距离和 R_T + R_R = 2l_c，l_d = √(l_c² - L_B²/4) 为椭圆的半短轴。可见，信噪比等值线与距离和等值线不共线，因此与信噪比等值线有关的距离和等值线很多，随目标在信噪比等值线上的位置而变化，如图 3 所示。

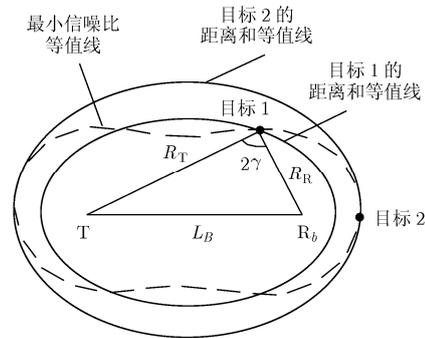


图 3 与信噪比等值线有关的距离和等值线

由三角形的余弦定理，有

$$L_B^2 = R_T^2 + R_R^2 - 2R_T R_R \cos 2\gamma \quad (6)$$

解 R_T + R_R，得

$$R_T + R_R = \left[L_B^2 + 2R_T R_R (1 + \cos 2\gamma) \right]^{1/2} \quad (7)$$

当 R_TR_R 取最大值 κ_B 时，不同 γ 值可相应确定一个等距离椭圆

$$(R_T + R_R)_{\max} = \left[L_B^2 + 2\kappa_B (1 + \cos 2\gamma) \right]^{1/2} \quad (8)$$

给定 κ_B，对于 L_B 和 γ 的特定组合，式(8)给出了 T-R_b

雷达的许多工作方式：单基地方式 ($L_B = 0$, $\gamma = 0^\circ$)、前向散射方式 ($L_B > 0$, $\gamma \approx 90^\circ$)、双基地方式 ($0 < L_B < 2\sqrt{\kappa_B}$, γ_{\max} 有限制) 等等。实际工作中, 应保证雷达工作于双基地方式。这时, γ 限定于 $[0, \gamma_{\max}]$ 。当 $R_T = R_R = \sqrt{\kappa_B}$ 时, γ 取得最大值

$$\gamma_{\max} = \sin^{-1} \left(\frac{L_B}{2\sqrt{\kappa_B}} \right) \quad (9)$$

根据 OSMAR2000 的指标设定双基地雷达方程中各参量可计算出双基地雷达常数 K_B , 雷达的探测

能力即最大探测距离和 $(R_T + R_R)_{\max}$ 由 $(S/N)_{\min}$ 确定。指定 $(S/N)_{\min}$ (按照雷达工程师的习惯, $(S/N)_{\min} = 1$ 时对应雷达的最大探测距离), 则 κ_B 也为一个常数。设定 $0 < L_B < 2\sqrt{\kappa_B}$, γ 限定于 $[0, \gamma_{\max}]$, 由式 (8) 可绘出 $(R_T + R_R)_{\max}$ 随 L_B 和 γ 变化关系图, 如图 4 所示。可见, 当 T-R_b 雷达工作于双基地方式时, 基线长度越长, 双基地角越小, 雷达的探测能力越强 (即探测距离和越大)。反过来, 可根据雷达设计指标中的最大探测距离和确定基线长度 L_B 。

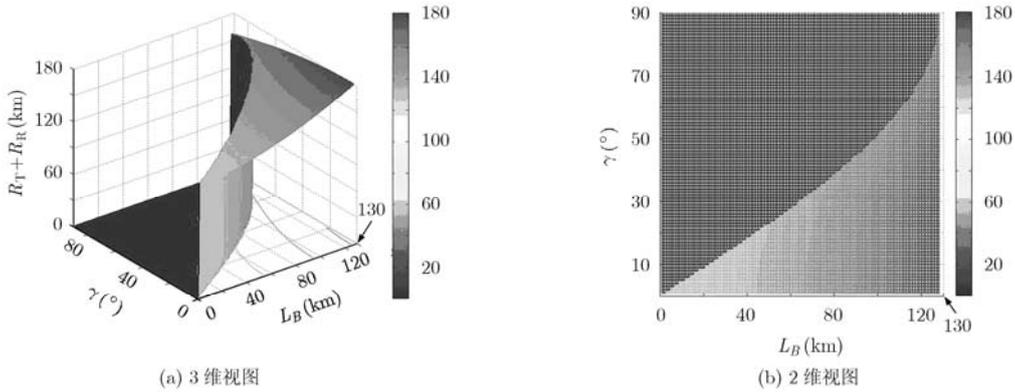


图 4 距离和 $(R_T + R_R)_{\max}$ 随基线长度 L_B 和双基地角 γ 变化关系图

3 最佳双基地角范围

最佳双基地角范围由雷达探测范围内最小海流误差确定。当 $0 < L_B < 2\sqrt{\kappa_B}$ 时, T/R_m-R_b 系统的探测范围为 T/R_m 与 T-R_b 雷达的探测范围之和减去阴影区面积, 参见图 5, 其表达式为

$$A_{tc} = A_M + A_B - A_Y \approx \pi\kappa_B + \frac{\pi\kappa_B}{2} \left[1 - \left(\frac{1}{64} \right) \left(\frac{L_B^4}{\kappa_B^2} \right) - \left(\frac{3}{16384} \right) \left(\frac{L_B^8}{\kappa_B^4} \right) \right] + \frac{L_B}{2} \sqrt{\kappa_B - \frac{L_B^2}{4}} - \kappa_B \cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{L_B^2}{4\kappa_B}} \right) \quad (10)$$

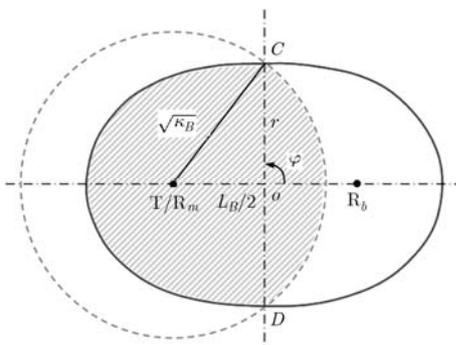


图 5 单、双基地雷达的信噪比等值线

根据海洋表面的一阶散射机理, T/R_m 与 T-R_b 雷达可分别根据其一阶峰的频移测量海流径向流速 v_{cr} 和海流双曲流速 v_{ch} [10], 二者组合可得海流矢量流速, 参见图 6。矢量流速的大小和方向分别为

$$v_c = \sqrt{\frac{v_{cr}^2 + v_{ch}^2 - 2v_{cr}v_{ch} \cos(\theta_h - \theta_r)}{\sin^2(\theta_h - \theta_r)}} \quad (11)$$

$$\theta_c = \tan^{-1} \left(\frac{v_{cr} \cos \theta_h - v_{ch} \cos \theta_r}{v_{cr} \sin \theta_h - v_{ch} \sin \theta_r} \right) \quad (12)$$

在 T/R_m-R_b 系统的探测范围内, 假设雷达数据质量高, 在某距离元内海流无空间变动, 则 T/R_m 与 T-R_b 雷达的多普勒分辨率 df_r 和 df_h 可分别用于表征径向流与双曲流的测量误差 dv_{cr} 和 dv_{ch} [11], 即有

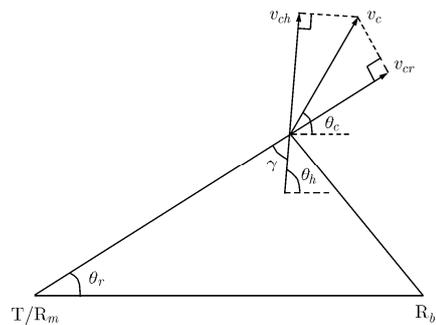


图 6 径向流速、双曲流速及矢量流速的关系

$$dv_{cr} = \lambda_i df_r / 2 \quad (13)$$

$$dv_{ch} = \lambda_i df_h / (2 \cos \gamma) \quad (14)$$

径向流 v_{cr} 和双曲流 v_{ch} 组合得到矢量流时, 误差将会传递和累加。由高等数学与误差分析理论可知, 对于多元函数, 其增量可用函数的全微分表示, 将式(11)做全微分得到矢量流速大小的误差:

$$\begin{aligned} dv_c = & \frac{1}{v_c} \left[\frac{v_{cr} - v_{ch} \cos(\theta_h - \theta_r)}{\sin^2(\theta_h - \theta_r)} \right] dv_{cr} \\ & + \frac{1}{v_c} \left[\frac{v_{ch} - v_{cr} \cos(\theta_h - \theta_r)}{\sin^2(\theta_h - \theta_r)} \right] dv_{ch} \\ & + \frac{1}{v_c} \left[\frac{-v_{cr} v_{ch}}{\sin(\theta_h - \theta_r)} \right. \\ & \left. + \frac{v_{cr}^2 + v_{ch}^2 - 2v_{cr} v_{ch} \cos(\theta_h - \theta_r)}{\sin^3(\theta_h - \theta_r)} \cos(\theta_h - \theta_r) \right] d\theta_r \\ & + \frac{1}{v_c} \left[\frac{v_{cr} v_{ch}}{\sin(\theta_h - \theta_r)} \right. \\ & \left. - \frac{v_{cr}^2 + v_{ch}^2 - 2v_{cr} v_{ch} \cos(\theta_h - \theta_r)}{\sin^3(\theta_h - \theta_r)} \cos(\theta_h - \theta_r) \right] d\theta_h \end{aligned} \quad (15)$$

式(15)中 $d\theta_r$ 和 $d\theta_h$ 分别表示径向流和双曲流所在方位的方位角误差, 由对应天线的方位角分辨率给定。类似地, 由式(12)可得矢量流速方位的误差:

$$\begin{aligned} d\theta_c = & \frac{1}{v_{cr}^2 + v_{ch}^2 - 2v_{cr} v_{ch} \cos(\theta_h - \theta_r)} \\ & \cdot \left\{ v_{cr} \sin(\theta_h - \theta_r) dv_{ch} - v_{ch} \sin(\theta_h - \theta_r) dv_{cr} \right. \\ & + \left[v_{ch}^2 - v_{cr} v_{ch} \cos(\theta_h - \theta_r) \right] d\theta_r \\ & \left. + \left[v_{cr}^2 - v_{cr} v_{ch} \cos(\theta_h - \theta_r) \right] d\theta_h \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

由式(15)和式(16)可见, 矢量流速大小和方向的误差是 $v_{cr}, v_{ch}, \theta_{hr} = \theta_h - \theta_r, dv_{cr}, dv_{ch}, d\theta_r, d\theta_h$ 的七元函数; 且由海洋表面的一阶散射机理可知, 应分

$\theta_{hr} = \theta_h - \theta_r$ 为锐角和钝角两种情况分别讨论 dv_c 和 $d\theta_c$ 。为分析 dv_c 和 $d\theta_c$ 随 γ (或夹角 θ_{hr}) 的变化, 需指定 $v_{cr}, v_{ch}, dv_{cr}, dv_{ch}, d\theta_r, d\theta_h$ 。根据 OSMAR2000 的指标设定 $df_r = df_h = 0.00134$ Hz, 给定工作频率时由式(13)和式(14)可得 dv_{cr} 和 dv_{ch} ; 设定 $d\theta_r = 5^\circ, d\theta_h = 6^\circ$; γ 的取值范围设为 $[1^\circ, 90^\circ]$ 。因一般表层海流的流速为几 cm/s 到 300 cm/s, 故在指定 v_{cr} 和 v_{ch} 时选取 3 组较典型的值: 0.1 m/s 和 0.12 m/s; 0.6 m/s 和 0.65 m/s; 2 m/s 和 2.2 m/s。

图 7(a)和 7(b)给出了工作频率为 7 MHz, v_{cr} 和 v_{ch} 为上述 3 组典型值, θ_{hr} 分别为锐角和钝角时, 矢量流速大小和方位的绝对误差随 γ 变化的情况。图 8(a)和 8(b)给出了 v_{cr} 为 0.6 m/s, v_{ch} 为 0.65 m/s, 工作频率为 7 MHz, 15 MHz, 25 MHz, θ_{hr} 分别为锐角和钝角时, 矢量流速大小和方位的绝对误差随 γ 变化的情况。由图 7 和图 8 可见, 当 $25^\circ \leq \gamma \leq 55^\circ$ 时, 矢量流速大小和方位的绝对误差均较小, 即 T/R_m-R_b 系统的最佳双基地角范围为 $[25^\circ, 55^\circ]$ 。

4 结束语

布站研究是双基地高频地波雷达系统实现研究不可缺少的部分。本文以 OSMAR2000 的指标为例, 从 T-R_b 双基地雷达最大探测距离和的角度分析了最佳基线长度, 从 T/R_m-R_b 双基地雷达系统矢量流测量误差的角度分析了最佳双基地角范围。分析表明, T/R_m-R_b 系统的布站原则为: 确定 T/R_m 单基地雷达的位置后, 首先根据 T-R_b 雷达设计指标中的最大探测距离和确定基线长度 L_B , 然后根据 T/R_m-R_b 系统海流测量误差最小的原则确定最佳双基地角范围, 将待探测海域置于该范围内即可确定 T-R_b 双基地雷达接收站 R_b 的位置。该布站原则可为双(多)基地高频地波雷达的海洋环境监测应用提供参考和依据。

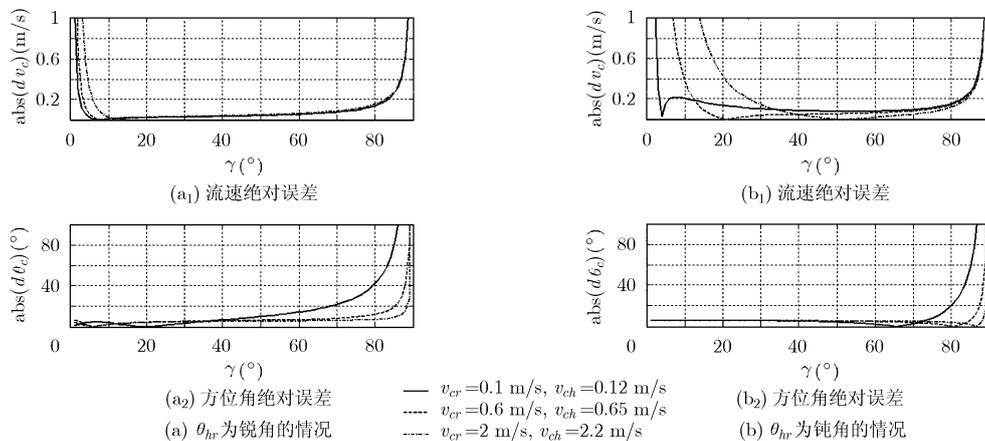
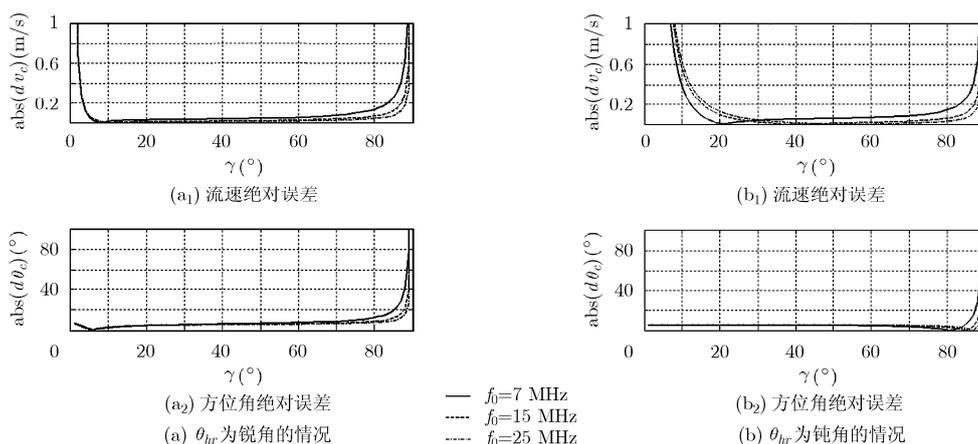


图 7 改变径向流和双曲流大小时, 矢量流速大小和方位的绝对误差随双基地角 γ 的变化

图8 改变工作频率时, 矢量流速大小和方位的绝对误差随双基地角 γ 的变化

参 考 文 献

- [1] Barrick D E. 30 years of CMTIC and CODAR [C]. Proceedings of the IEEE/OES/CMTIC Ninth Working Conference on Current Measurement Technology, Charleston, SC, USA, 2008: 131-136.
- [2] 文必洋, 李自立, 周浩, 等. 便携式高频地波雷达东海洋山海域探测深度试验[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(4): 998-1002. Wen Bi-yang, Li Zi-li, Zhou Hao, *et al.* Test for the detection depth with HF portable ground wave radar at Yangshan Area of Eastern China Sea [J]. *Journal of Electronic & Information Technology*, 2010, 32(4): 998-1002.
- [3] Helzel T, Petersen L, Mariette V, *et al.* Accuracy and reliability of ocean current and wave monitoring with the coastal radar "WEAR" [C]. IEEE Oceans Conference, Bremen, Germany, 2009: 1-5.
- [4] 程敬, 杨强, 张宁. 双基地高频地波超视距雷达探测范围的分析[C]. 第九届全国雷达学术年会论文集, 烟台, 2004: 58-61. Cheng Jing, Yang Qiang, and Zhang Ning. The analysis of the detect range of the bistatic OTHR[C]. The Ninth Conference on Radar, Yantai, China, 2004: 58-61.
- [5] 仇永斌, 张宁, 李杨. 双基地高频雷达成一阶海杂波多普勒频移展宽效应[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(11): 2336-2340. Chou Yong-bin, Zhang Ning, and Li Yang. Broadening effect of first-order ocean clutter Doppler shift of bistatic high-frequency ground wave radar [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(11): 2336-2340.
- [6] 宗华, 权太范, 宗成阁, 等. 单双基地复合高频地波雷达网定位精度分析[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(5): 1108-1112. Zong Hua, Quan Tai-fan, Zong Cheng-ge, *et al.* Positioning accuracy in monostatic-bistatic composite high frequency surface wave radar network [J]. *Journal of Electronic & Information Technology*, 2009, 31(5): 1108-1112.
- [7] Chou Yong-bin, Zhang Ning, and Xie Jun-hao. Broad beam high-frequency bistatic cross sections of the ocean surface [C]. 2010 3rd International Symposium on Systems and Control in Aeronautics and Astronautics, Harbin China, 2010: 1407-1410.
- [8] 刘春波, 陈伯孝, 陈多芳, 等. 双基地高频地波SIAR通道幅相误差的自校准方法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(3): 614-618. Liu Chun-bo, Chen Bai-xiao, Chen Duo-fang, *et al.* Self-calibration of channel errors for bistatic HF surface wave SIAR [J]. *Journal of Electronic & Information Technology*, 2009, 31(3): 614-618.
- [9] Nicholas J W. Bistatic Radar[M]. USA, SciTech Publishing Inc., 2005: 68.
- [10] Barrick D E, Lilleboe P M, Lipa B J, *et al.* Ocean surface current mapping with bistatic HF radar. United States Patent, 2004, No. 2004/0090363 A1.
- [11] Qiu Jin. An algorithm for the extraction of ocean surface current velocity from bistatic HF groundwave radar data - a simulation[D]. [Master dissertation], Memorial University of Newfoundland, Canada, 2007.
- 何 缓: 女, 1979年生, 讲师, 博士生, 研究方向为随机粗糙面的电磁散射与超视距雷达技术的研究.
- 柯亨玉: 男, 1957年生, 教授, 博士生导师, 主要从事电磁场理论、高频雷达海洋遥感技术、电波传播与天线理论等的研究.
- 万显荣: 男, 1975年生, 教授, 博士生导师, 主要从事新体制超视距雷达系统设计、阵列信号处理、干扰及杂波抑制技术等研究.