

## 双基地高频地波雷达系统矢量流速探测精度分析

何 缓<sup>\*①</sup> 柯亨玉<sup>②</sup> 潘谊春<sup>①</sup> 尤 君<sup>②</sup> 程 丰<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(空军预警学院信息对抗系 武汉 430019)

<sup>②</sup>(武汉大学电子信息学院 武汉 430079)

**摘 要:** 随着高频地波雷达海流探测技术的日益成熟, 海流测量精度得到了海洋学者的高度关注。该文旨在分析 T/R<sub>m</sub>-R<sub>b</sub> 双基地雷达系统的矢量流速探测精度, 得到该系统进行矢量流速探测的最佳工作区域。文章首次从矢量流速度的均方误差角度进行分析。首先将 T/R<sub>m</sub> 单基地雷达测得的径向流速度和 T-R<sub>b</sub> 双基地雷达测得的双曲流速度进行组合得到矢量流速度; 然后通过全微分得到矢量流速度的误差, 并分成 I 型误差(测量多普勒速度的有限分辨率引起的误差)和 II 型误差(观察散射角时的误差)来讨论其均方误差; 最后绘制均方误差的水平分布图, 确定矢量流速探测的最佳工作区域, 即: T/R<sub>m</sub>-R<sub>b</sub> 双基地雷达系统在提取矢量流速时, 应尽量避免基线和双基地接收机 R<sub>b</sub> 附近的区域。

**关键词:** 高频地波雷达; T/R<sub>m</sub>-R<sub>b</sub> 体制; 均方误差; 矢量流速探测精度; 最佳工作区域

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)11-2785-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00596

## Analysis of the Vector Current Velocity Detecting Precision of Bistatic High-frequency Ground Wave Radar System

He Huan<sup>①</sup> Ke Heng-yu<sup>②</sup> Pan Yi-chun<sup>①</sup> You Jun<sup>②</sup> Cheng Feng<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(Department of Information Countermeasures, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

<sup>②</sup>(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** With the maturity of current detecting technology based on high-frequency ground wave radar, current detecting precision has gained increasing attention. This paper aims at discussing the vector current velocity detecting precision of T/R<sub>m</sub>-R<sub>b</sub> system from the mean square error, and obtaining the optimal operating region of current velocity detecting. Firstly, the vector current velocity is obtained from the radial current velocity measured by T/R<sub>m</sub> monostatic radar system and the hyperbolic current velocity measured by T/R<sub>b</sub> bistatic radar system. Then the vector current velocity error is calculated from total differential and divided into I type error and II type error to discuss the mean square error. I type error means the error resulted from the limited Doppler velocity resolution and II type error means the error resulted from the scattering angle observing. Finally, the geometrical dilution of position is drawn and the optimal operating region of current velocity detecting is obtained. That is: the region near the baseline and the bistatic receiver R<sub>b</sub> should be avoided for vector current velocity detection of T/R<sub>m</sub>-R<sub>b</sub> system.

**Key words:** High-frequency ground wave radar; T/R<sub>m</sub>-R<sub>b</sub> system; Mean square error; Current velocity detecting precision; Optimal operating region

### 1 引言

高频地波雷达是 20 世纪 80 年代发展起来的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 SeaSonde<sup>[1]</sup>, 中国的 OSMAR<sup>[2]</sup>, 德国的 WERA<sup>[3]</sup> 等。然而, 一方面, 单基地雷达测量矢量流速时至

少需要两部雷达系统同时工作, 提取风向信息时存在模糊性等技术缺陷; 另一方面, 单基地雷达观测海洋的尺度有限, 所获取的海洋动力学参数信息不够丰富。为提高雷达监测能力, 更加全面准确地认知海洋, 基于高频地波雷达非后向散射理论的组网探测成为目前高频地波雷达研究的热点问题<sup>[4-7]</sup>。利用现有的单基地高频地波雷达增设分置的接收系统, 并使它们协同工作, 即构成双基地 T/R<sub>m</sub>-R<sub>b</sub> 体制, 既可测得矢量流速度, 又可消除风向模糊性, 因此, 本文的研究对象为 T/R<sub>m</sub>-R<sub>b</sub> 双基地雷达系统。

2012-05-16 收到, 2012-09-12 改回

国家自然科学基金(41106156, 40406020, 60971101)和中央高校基本科研业务费专项资金资助课题

\*通信作者: 何缓 lyhh1979@126.com

其中,海流探测精度分析是双基地高频地波雷达系统工程应用中不可缺少的部分。

单基地高频地波雷达的海流探测精度可通过分析海上比对验证试验数据得到<sup>[8]</sup>,但目前双基地高频地波雷达仍处于试验阶段,尚无比对验证数据可用,只能从理论角度仿真分析海流探测精度。除本文作者曾分析过基于 T/R<sub>m</sub>-R<sub>b</sub> 系统矢量流速大小和方位的绝对误差外<sup>[6]</sup>,尚无相关报道。因此,本文将从均方误差出发分析 T/R<sub>m</sub>-R<sub>b</sub> 双基地高频地波雷达系统矢量流探测精度,确定 T/R<sub>m</sub>-R<sub>b</sub> 系统矢量流探测的最佳工作区域。

## 2 系统构成

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,即所考虑系统为 2 维双基地系统。如图 1 所示, T 表示发射机, R<sub>m</sub>, R<sub>b</sub> 表示接收机, T 和 R<sub>m</sub> 构成一个单基地雷达系统, T 和 R<sub>b</sub> 构成一个双基地雷达系统。R<sub>T</sub> 和 R<sub>R</sub> 分别为发射机 T 和分置接收机 R<sub>b</sub> 到目标 M 之间的距离, L<sub>B</sub> 为双基地雷达的收发基线距离, γ 为双基地角。

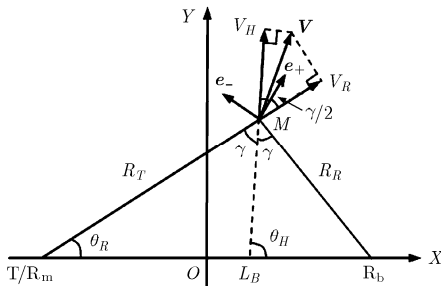


图 1 T/R<sub>m</sub>-R<sub>b</sub> 双基地雷达系统海流测量示意图

根据海洋表面的一阶散射机理, T/R<sub>m</sub> 单基地雷达可根据其一阶峰的频移测量海流径向流速 V<sub>R</sub>, T-R<sub>b</sub> 双基地雷达可根据其一阶峰的频移测量海流双曲流速 V<sub>H</sub><sup>[9]</sup> (V<sub>H</sub> 的延长线是 ∠TMR<sub>b</sub> 的平分线<sup>[10]</sup>), 二者组合可得海流矢量流速 V, 参见图 1。图中, θ<sub>R</sub> 和 θ<sub>H</sub> 分别表示径向流速与双曲流速所在方位(参考方向为图 1 中 X 轴正向)。

令单位矢量 e<sub>+</sub> 沿径向流速 V<sub>R</sub> 与双曲流速 V<sub>H</sub> 的夹角平分线方向, 单位矢量 e<sub>-</sub> 与单位矢量 e<sub>+</sub> 相互正交, 则 e<sub>+</sub> 和 e<sub>-</sub> 可表示为

$$e_+ = \frac{e_H + e_R}{2 \cos(\gamma/2)}, \quad e_- = \frac{e_H - e_R}{2 \sin(\gamma/2)} \quad (1)$$

其中 e<sub>R</sub> 和 e<sub>H</sub> 分别为平行于 T/R<sub>m</sub> 单基地雷达测得的径向流速 V<sub>R</sub> 和 T-R<sub>b</sub> 双基地雷达测得的双曲流速 V<sub>H</sub> 的单位矢量, 由图 1 可见, 有

$$e_R \cdot e_H = \cos \gamma \quad (2)$$

假设矢量流速 V 与 e<sub>+</sub> 之间的夹角为 ϑ, 则有

$$V_R = V \cos(\gamma/2 + \vartheta), \quad V_H = V \cos(\gamma/2 - \vartheta) \quad (3)$$

由式(3)及 V = V cos ϑ e<sub>+</sub> + V sin ϑ e<sub>-</sub>, 可得 T/R<sub>m</sub>-R<sub>b</sub> 双基地雷达系统合成的矢量海流速度为

$$V = \frac{V_H + V_R}{2 \cos(\gamma/2)} e_+ + \frac{V_H - V_R}{2 \sin(\gamma/2)} e_- \quad (4)$$

由 T-R<sub>b</sub> 双基地雷达测得的双曲流速可表示为 V<sub>H</sub> = V<sub>B</sub>/cos γ, V<sub>B</sub> 为双基地接收机 R<sub>b</sub> 按传统多普勒速度的处理方式得到的量, 即海流运动速度在接收机 R<sub>b</sub> 与海面散射单元连线上的投影分量。这样, 式(4)可重写为

$$V = V_R \left[ \frac{1}{2 \cos(\gamma/2)} e_+ - \frac{1}{2 \sin(\gamma/2)} e_- \right] + \frac{V_B}{\cos \gamma} \left[ \frac{1}{2 \cos(\gamma/2)} e_+ + \frac{1}{2 \sin(\gamma/2)} e_- \right] \quad (5)$$

## 3 矢量流均方误差

由式(5)可写出矢量海流速度的误差为

$$\begin{aligned} \delta V = & \delta V_R \left[ \frac{1}{2 \cos(\gamma/2)} e_+ - \frac{1}{2 \sin(\gamma/2)} e_- \right] \\ & + \frac{\delta V_B}{\cos \gamma} \left[ \frac{1}{2 \cos(\gamma/2)} e_+ + \frac{1}{2 \sin(\gamma/2)} e_- \right] \\ & + V_R \delta \left[ \frac{1}{2 \cos(\gamma/2)} e_+ - \frac{1}{2 \sin(\gamma/2)} e_- \right] \\ & + V_B \delta \left\{ \frac{1}{\cos \gamma} \left[ \frac{1}{2 \cos(\gamma/2)} e_+ + \frac{1}{2 \sin(\gamma/2)} e_- \right] \right\} \quad (6) \end{aligned}$$

式(6)中前两项代表由两接收机(R<sub>m</sub> 和 R<sub>b</sub>)处所测量多普勒速度的有限分辨率引起的误差, 称为 I 型误差。I 型误差与雷达工作频率和信号处理的相干积累时间有关。式(6)中后两项表示观察散射角(即双基地角 γ)时的误差, 称为 II 型误差。II 型误差通过测量两个距离(基线距离 L<sub>B</sub> 和距离和 S<sub>r</sub> = R<sub>T</sub> + R<sub>R</sub>) 和一个角度(发射波束的方位角 θ<sub>R</sub>) 确定。散射角的测量精度与所测量距离和方位角的精度有关, 其中基线距离 L<sub>B</sub> 的测量可通过 GPS 系统精确到厘米量级, 因此观察散射角时的误差主要由测量距离和 S<sub>r</sub> = R<sub>T</sub> + R<sub>R} 和方位角 θ<sub>R</sub> 的误差确定。距离和 S<sub>r</sub> = R<sub>T</sub> + R<sub>R} 的测量精度主要受脉冲宽度限制, 方位角 θ<sub>R</sub> 的测量精度主要受波束宽度限制。</sub></sub>

由式(6)可计算矢量海流速度的均方误差, 为

$$\overline{(\delta V \cdot \delta V)} = \overline{(\delta V \cdot \delta V)}_1 + \overline{(\delta V \cdot \delta V)}_2 \quad (7)$$

其中  $\overline{(\delta V \cdot \delta V)}_1$  和  $\overline{(\delta V \cdot \delta V)}_2$  分别对应 I 型均方误差和 II 型均方误差。

$$\overline{(\delta\mathbf{V} \cdot \delta\mathbf{V})}_1 = \frac{1}{\sin^2 \gamma} \left[ \overline{(\delta V_R)^2} + \frac{\overline{(\delta V_B)^2}}{\cos^2 \gamma} \right] \quad (8)$$

$$\overline{(\delta\mathbf{V} \cdot \delta\mathbf{V})}_2 = \sum_{j \geq i=1,2} V_i V_j \left[ f_{ij} \cdot \overline{(\delta\theta_r)^2} + g_{ij} \cdot \overline{(\delta S_r^*)^2} \right] \quad (9)$$

其中

$$V_1 = V_R, \quad V_2 = V_H, \quad \delta S_r^* = \delta S_r / L_B, \quad S_r = R_T + R_R$$

$$f_{11} = \frac{(R_T - R_R)^2 (3 \cos^2 \gamma + 1)}{4 R_R^2 \sin^4 \gamma}$$

$$g_{11} = \frac{(3 \cos^2 \gamma + 1) L_B^2}{R_R^2 \sin^2 (2\gamma)}$$

$$f_{22} = \frac{(R_T - R_R)^2 (8 \cos^4 \gamma - 5 \cos^2 \gamma + 1)}{R_R^2 \sin^2 (2\gamma) \sin^2 \gamma}$$

$$g_{22} = \frac{(8 \cos^4 \gamma - 5 \cos^2 \gamma + 1) L_B^2}{R_R^2 \cos^2 \gamma \sin^2 (2\gamma)}$$

$$f_{12} = \frac{(R_T - R_R)^2 (-2 \cos^4 \gamma - 3 \cos^2 \gamma + 1)}{2 R_R^2 \sin^4 \gamma \cos \gamma}$$

$$g_{12} = \frac{(-2 \cos^4 \gamma - 3 \cos^2 \gamma + 1) L_B^2}{2 R_R^2 \cos^3 \gamma \sin^2 \gamma}$$

在式(8)和式(9)的推导过程中, 忽略了  $\delta V_R, \delta V_B, \delta\theta_r, \delta S_r^*$  两两之间的相关性。因篇幅有限, 略去  $f_{ij}, g_{ij}$  的详细推导过程。

### 3.1 I 型均方误差的分析

此处, 暂时忽略 II 型均方误差, 仅分析 I 型均方误差。

假设两接收机 ( $R_m$  和  $R_b$ ) 采用相同的信号处理器, 则有

$$\overline{(\delta V_R)^2} = \overline{(\delta V_B)^2} = \overline{(\delta V)^2} \quad (10)$$

将式(10)代入式(8), 则有

$$\begin{aligned} \overline{(\delta\mathbf{V} \cdot \delta\mathbf{V})}_1 &= \frac{1}{\sin^2 \gamma} \left( 1 + \frac{1}{\cos^2 \gamma} \right) \overline{(\delta V)^2} \\ &= 2 \frac{\cos(2\gamma) + 3}{\sin^2(2\gamma)} \overline{(\delta V)^2} \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)定义了一个与 T/ $R_m$ - $R_b$  双基地雷达系统硬件无关的几何因子。

$$\frac{\overline{(\delta\mathbf{V} \cdot \delta\mathbf{V})}_1}{\overline{(\delta V)^2}} = 2 \frac{\cos(2\gamma) + 3}{\sin^2(2\gamma)} \quad (12)$$

图 2 绘出了式(12)给出的几何因子随双基地角  $\gamma$  变化的情况, 当  $\gamma = 50^\circ$  时取得最小值 5.8285; 该最小值也可由式(12)通过解析法求得, 为  $3 + 2\sqrt{2}$ , 二者是一致的。图 3 绘出了 I 型均方误差相对于其

最小值归一化后 (即  $\frac{\overline{(\delta\mathbf{V} \cdot \delta\mathbf{V})}_1}{\overline{(\delta\mathbf{V} \cdot \delta\mathbf{V})}_{1\min}}$ ) 的水平分布图; 图中, 横坐标和纵坐标相对于基线距离  $L_B$  进行了归一

化, T/ $R_m$  位于  $(-0.5, 0)$ ,  $R_b$  位于  $(0.5, 0)$ , 月牙形阴影区域为  $\frac{\overline{(\delta\mathbf{V} \cdot \delta\mathbf{V})}_1}{\overline{(\delta\mathbf{V} \cdot \delta\mathbf{V})}_{1\min}} < 2$  给出的区域, 由双基地角

$\gamma$  分别取  $26^\circ$  和  $71^\circ$  时的弧线围成。

### 3.2 I 型均方误差与 II 型均方误差的比较

尽管 I 型均方误差与多普勒速度  $V_R$  和  $V_H$  无关, 但由式(6)和式(9)可见, II 型均方误差与  $V_R$  和  $V_H$  有关。因此, 若想比较 I 型均方误差 ( $\overline{(\delta\mathbf{V} \cdot \delta\mathbf{V})}_1$ ) 与 II 型均方误差 ( $\overline{(\delta\mathbf{V} \cdot \delta\mathbf{V})}_2$ ) 的大小, 必须用到确定点的海流数据。然而, 采用某指定点的海流数据计算 II 型均方误差将失去一般意义。本文通过下列步骤<sup>[1]</sup>来计算 II 型均方误差, 使得每点具有均等的意义:

(1) 假设在某点海流速度为常数, 文中设为 1 m/s;

(2) 在该点从  $0^\circ$  至  $180^\circ$  (参考方向为图 1 中正 X 轴方向) 改变海流方向, 得到  $\overline{(\delta\mathbf{V} \cdot \delta\mathbf{V})}_2$  的最大值;

(3) 将  $\overline{(\delta\mathbf{V} \cdot \delta\mathbf{V})}_2$  的最大值作为该点  $\overline{(\delta\mathbf{V} \cdot \delta\mathbf{V})}_2$  的值。

将矢量海流速度  $\mathbf{V}$  用其方向  $\mathbf{e}_v$  和大小  $V$  表示为  $\mathbf{V} = \mathbf{e}_v V$ , 这样, 多普勒速度  $V_R$  和  $V_H$  可表示为

$$V_R = (\mathbf{e}_R \cdot \mathbf{e}_v) V, \quad V_H = (\mathbf{e}_H \cdot \mathbf{e}_v) V \quad (13)$$

I 型均方误差与 II 型均方误差的比值可表示为

$$\begin{aligned} r_0 &= \frac{\overline{(\delta\mathbf{V} \cdot \delta\mathbf{V})}_1}{\overline{(\delta\mathbf{V} \cdot \delta\mathbf{V})}_2} = \frac{\overline{(\delta V)^2}}{V^2} \\ &\quad \cdot \frac{2[\cos(2\gamma) + 3]}{\sin^2(2\gamma) \sum_{j \geq i=1,2} (\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_v)(\mathbf{e}_j \cdot \mathbf{e}_v) \left[ f_{ij} (\delta\theta_r)^2 + g_{ij} (\delta S_r^*)^2 \right]} \end{aligned} \quad (14)$$

图 4 绘出了  $\overline{(\delta V)^2} = (0.0134 \text{ m/s})^2$  (由  $df_R = 0.00134 \text{ Hz}$ , 工作频率 15 MHz 计算得到),  $V = 1 \text{ m/s}$ ,

$\delta\theta_r = 2^\circ$ ,  $\overline{(\delta S_r^*)^2} = \left( \frac{1500}{48000} \right)^2$  (由距离分辨率 3 km, 基

线距离 48 km 计算得到) 时, I 型与 II 型均方误差之比  $r_0$  的水平分布图; 图中, 横坐标和纵坐标相对于基线距离  $L_B$  进行了归一化。由图 4 可见, 在基线附近, 特别是双基地接收机  $R_b$  附近, II 型均方误差明显大于 I 型均方误差。图 5 绘出了 T/ $R_m$ - $R_b$  双基地雷达系统海流测量的最佳区域, 用图中的阴影区域表示, 由图 3 中的月牙形阴影区域去掉  $r_0 < 0.05$  的部分而得到。图 4 和图 5 说明, T/ $R_m$ - $R_b$  双基地雷达系统在提取矢量海流速度时, 应尽量避免基线和双基地接收机  $R_b$  附近的区域。

## 4 结束语

随着高频地波雷达海洋环境监测技术的不断发

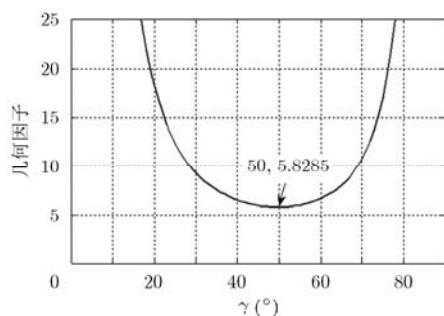
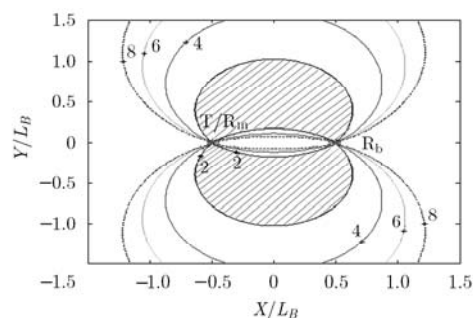
图2 几何因子随双基地角  $\gamma$  的变化

图3 归一化 I 型均方误差的水平分布图

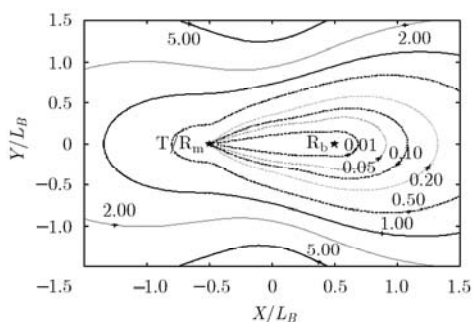
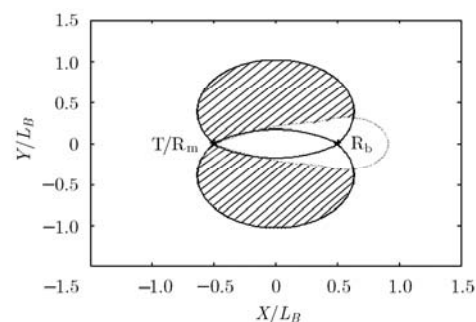


图4 I型与II型均方误差之比的水平分布图

图5  $T/R_m-R_b$  双基地雷达系统的海流测量最佳区域

展,尤其是表层海流探测技术的日益成熟,高频地波雷达的应用潜力及测量精度得到了海洋学者的高度关注。本文从均方误差出发分析了  $T/R_m-R_b$  双基地高频地波雷达系统矢量流速探测精度,确定了  $T/R_m-R_b$  系统进行矢量流速探测的最佳工作区域。即,  $T/R_m-R_b$  双基地雷达系统在提取矢量海流速度时,应尽量避免基线和双基地接收机  $R_b$  附近的区域。

### 参考文献

- [1] Garfield N, Hubbard M, and Pettigrew J. Providing SeaSonde high-resolution surface currents for the America's cup[C]. Proceedings of the IEEE/OES/CMTC Tenth Working Conference on Current Measurement Technology, Monterey, CA, 2011: 47-49.
- [2] 陈泽宗. 变频多功能新型高频地波雷达[J]. 中国科技成果, 2011, 12(7): 12.  
Chen Ze-zong. New frequency conversion multi-function high frequency ground wave radar[J]. *China Science and Technology Achievements*, 2011, 12(7): 12.
- [3] Savidge D, Amft J, Gargett A, et al. Assessment of WERA long-range HF-radar performance from the user's perspective [C]. Proceedings of the IEEE/OES/CMTC Tenth Working Conference on Current Measurement Technology, Monterey, CA, 2011: 31-38.
- [4] 毛滔, 公绪华, 孟华东, 等. 岸/舰双基地地波超视距雷达抗电离层干扰研究[J]. 海军工程大学学报, 2011, 23(4): 95-99.
- [5] Mao Tao, Gong Xu-hua, Meng Hua-dong, et al. On anti-ionospheric interference based on bistatic OTH radar[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2011, 23(4): 95-99.
- [6] 何缓, 柯亨玉, 万显荣, 等. 基于双基地海洋回波谱仿真数据的海浪波数谱反演[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(10): 2477-2482.  
He Huan, Ke Heng-yu, Wan Xian-rong, et al. Inversion of wave-number spectrum from simulated bistatic high-frequency radar data[J]. *Journal of Electronic & Information Technology*, 2011, 33(10): 2477-2482.
- [7] 何缓, 柯亨玉, 万显荣, 等. 双基地高频地波雷达系统布站研究[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(2): 333-337.  
He Huan, Ke Heng-yu, Wan Xian-rong, et al. Study on the distribution of bistatic high-frequency ground wave radar system[J]. *Journal of Electronic & Information Technology*, 2012, 34(2): 333-337.
- [8] 仇永斌, 张宁, 李杨. 双基地高频雷达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.
- [9] 龚子平, 柯亨玉, 侯杰昌, 等. 高频地波雷达海洋表面流测量误差分析[J]. 武汉大学学报(理学版), 2007, 53(3): 356-360.  
Gong Zi-ping, Ke Heng-yu, Hou Jie-chang, et al. Error analyze of current measurements by HF surface wave radar

- [J]. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 2007, 53(3): 356-360.
- [9] Barrick D E, Lilleboe P M, Lipa B J, et al. Ocean surface current mapping with bistatic HF radar[P]. United States Patent, 2004, No. 2004/0090363 A1.
- [10] Nicholas J W. Bistatic Radar [M]. New York City: SciTech Publishing Inc., 2005: 311-314.
- [11] Yoshimasa T and Masahisa N. Error estimation of the synthesized two-dimensional horizontal velocity in a bistatic Doppler radar system[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19(1): 74-79.
- 何 缓: 女, 1979 年生, 讲师, 研究方向为随机粗糙面的电磁散射与超视距雷达技术.
- 柯亨玉: 男, 1957 年生, 教授, 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.

---

### 作者更正声明

由于作者疏忽, 在 2011 年第 33 卷第 11 期第 2658 页《多视角下结合形状和运动信息的三维人体姿态估计》一文中遗漏引用 1 篇文献, 句子“……至今仍是一个艰难的技术挑战”的后面需增加下述文献:

张晓. 基于单目视觉的人体运动分析研究[D]. [硕士学位论文], 武汉理工大学, 2006.

特此更正!

沈建锋, 15867203626, 0574-87669137, shenj07@gmail.com