

## 基于多级维纳滤波的洋流方位估计

安志娟<sup>①②</sup> 苏洪涛<sup>①</sup> 保铮<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

<sup>②</sup>(西安电子科技大学理学院 西安 710071)

**摘要:** 该文提出基于多级维纳滤波(MSWF)降维技术的海面洋流方位估计方法。针对同一距离元探测到的洋流之间具有一定的相关性,先将观测数据作空间平滑,然后采用递推算法得到信号子空间和噪声子空间。该方法避免了协方差矩阵的估计及其特征分解,能够大大降低计算的复杂度,从而适应实时工作的需要。最后通过对实测数据的分析表明文中的方法可以快速有效地进行洋流方位探测。

**关键词:** 洋流; 相关性; MUSIC; 多级维纳滤波

中图分类号: TN959.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)06-1429-04

## DOA Estimation of Ocean Currents Based on Multi-Stage Wiener Filter

An Zhi-juan<sup>①②</sup> Su Hong-tao<sup>①</sup> Bao Zheng<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

<sup>②</sup>(School of Science, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** In this paper the Multi-Stage Wiener Filter (MSWF) is presented for the DOA estimation of ocean currents. For echoes scattered from ocean waves with the same velocity of flow and in the same range bin are partially correlated, first the spatial smoothing technique is applied to the measured data to remove the correlation of signal, then the signal subspace and noise subspace can be obtained by the recursive algorithm instead of the estimation and eigen-decomposition of covariance matrix, therefore the computation complexity can be reduced remarkably, which is necessary for the real time system. Finally by analyzing the measured data, it is shown that this method can detect the currents efficiently and effectively.

**Key words:** Ocean currents; Correlation; MUSIC; MSWF

### 1 引言

高频地波雷达向海洋表面发射高频无线电波,电磁波与海洋表面发生相互作用形成散射回波,根据高频电磁波与海面相互作用的一阶和二阶理论,从回波Doppler谱信息中可以提取洋流方位信息。武汉大学在国家863计划海洋领域重大课题——“高频地波雷达海洋环境监测技术”的研究中设计开发了OSMAR2000,提出基于MUSIC的海洋表面流超分辨算法,并应用于洋流方位探测<sup>[1,2]</sup>。而应用MUSIC方法进行方位探测首先需要将观测空间分为信号子空间和噪声子空间,传统的子空间分解方法需要估计阵列协方差矩阵并对其作特征分解,需要的运算量为 $O(M^2N) + O(M^3)$ ,其中 $M, N$ 分别为阵元数和时域采样快拍数,若阵元数和快拍数较多时,此方法的计算复杂度是很高的。为了降低计算复杂度,使其更适用于实时处理,很多学者提出了更快捷的信号子空间估计方法,如Xu提出的基于Lanczos算法的快速子空间分解,能够避开协方差矩阵的分解,但仍需对协方差矩阵进行估计,此外还需对一维数较小的矩阵进行特征分解,需要 $O(M^2N + M^2P)$ 次复乘运算,其中 $P$ 为信源个数,当阵

元数较多时此算法的运算量仍然很大。本文利用多级维纳滤波(MSWF)<sup>[3,4]</sup>降维技术,避免了协方差矩阵的估计及其特征分解,只需对观测数据进行前向递推即能估计出信号子空间和噪声子空间,从而可以快速地实现海面洋流方位估计,其特点是运算量小、收敛速度快并且能应用在小样本支撑的信号环境。最后通过对实测数据的分析可以看到该方法能够得到较好的估计效果。

### 高频地波雷达洋流测向原理

1955年, Crombie<sup>[5]</sup>用13.56MHz的高频雷达对“海杂波”进行了初步的试验研究,建立了粗糙海面电磁波后向散射的基本理论,后来随着对海杂波研究的不断深入人们逐步地认识到海洋表面流、浪高谱以及表面风速等海洋表面状态参数与HF雷达海洋回波的Doppler谱间的联系,从而形成了HF电磁波与海洋表面相互作用的一阶理论和二阶理论。

当波长为 $\lambda$ 的雷达波掠入射到海面时,只有波长 $L = \lambda/2$ ,且传播方向恰为朝向和背离雷达的两类海浪波列会产生最强的后向散射,回波信号Doppler谱中对应有两个尖峰,它可高出背景约20dB~40dB以上。这种谐振效应类似光栅中的Bragg散射,因此把海浪对HF雷达波的这种散射机制称为Bragg散射或一阶散射,回波信号Doppler谱中两个尖

峰称为Bragg峰或一阶峰。

1972年, Barrick<sup>[6]</sup>利用边界微扰法导出深水条件下无洋流时的窄波束雷达一阶海洋回波的雷达散射截面方程, 利用此方程能够解释一阶散射回波的形成机理:

$$\sigma^{(1)}(\omega, \varphi) = 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m'=\pm 1} S(-2m' \mathbf{k}_0) \cdot \delta(\omega - m' \omega_B) \quad (1)$$

其中  $\varphi$  为窄波束雷达的波束指向,  $\mathbf{k}_0$  为雷达发射电磁波的波矢量,  $S(-2m' \mathbf{k}_0)$  代表波矢为  $\mathbf{k}_0$  的有向浪高谱,  $\omega_B$  为Bragg圆频率。海洋表面不停地作随机起伏运动, 这种运动可以表示成不同振幅、初相、频率和传播方向的重力波的迭加, 重力波满足色散关系, 因此海面波动的相速度  $V_p$  与海浪波长  $L$  的关系满足  $V_p = \sqrt{gL/(2\pi)}$ , 其中  $g$  为重力加速度, 回波 Doppler 频移与形成一阶散射的海浪的相速度  $V_p$  之间的关系为  $\omega_B = 2\pi \cdot (2V_p/\lambda) = \sqrt{2gk_0}$ 。  $f_B = \omega_B/(2\pi) = \sqrt{2gk_0}/(2\pi)$  称为Bragg频率, 只取决于雷达工作频率。式(1)说明无洋流时, 窄波束雷达海洋回波 Doppler 谱的一阶谱应为位于  $f = \pm f_B$  的两个尖峰。当有洋流时, 令  $V_{cr}(\varphi)$  为洋流相对于雷达接收机的径向流速, 则一阶回波 Doppler 频移为  $f = 2(V_{cr}(\varphi) \pm V_p)/\lambda = 2V_{cr}(\varphi)/\lambda \pm f_B$ , 此时回波 Doppler 谱中两个尖峰会向同一方向偏移, 其 Doppler 频率偏移量为

$$\Delta\omega = 2\pi \cdot 2V_{cr}(\varphi)/\lambda = 2k_0 V_{cr}(\varphi) \quad (2)$$

有洋流时一阶海洋回波的雷达散射截面方程变为

$$\sigma^{(1)}(\omega, \varphi) = 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m'=\pm 1} S(-2m' \mathbf{k}_0) \cdot \delta(\omega - m' \omega_B - 2k_0 V_{cr}(\varphi)) \quad (3)$$

对于宽波束雷达, 雷达接收的是波束内所有方位的回波, 且不同方位的径向流速一般不同, Doppler 谱的一阶谱由许多个尖峰组成, 它们彼此分离, 形成展宽的一阶谱区。因此提取径向流速时, 首先需要分离出一阶谱区, 根据一阶谱区内相对于  $f = \pm f_B$  的每一个 Doppler 频偏利用式(2)可得到洋流径向流速  $V_c$ , 将这一流速对应的 Doppler 频偏的数据提取出来再利用超分辨的方法就可确定其方位。按照上述处理过程将雷达探测距离内所有距离单元的回波数据进行处理后, 就得到了洋流的径向分布流图。若有多部雷达在不同的地点同时对一片海洋区域进行观测, 就能得到海洋表面矢量流图。

### 3 基于 MSWF 降维技术的洋流方位估计

#### 3.1 阵列输出预处理

通过对阵列接收到的信号作预处理分离出一阶谱区, 然后选定某一谱点(Doppler 频率点)进行洋流方位估计, 考虑  $M$  个接收机构成的等间隔分布的线形阵列, 第  $i$  个接收天线接收的  $N$  次快拍矢量可表示为

$$\mathbf{y}_i = [y_i(1), y_i(2), \dots, y_i(N)] \quad (4)$$

以长度  $L$  作滑窗, 每隔  $P$  个值滑动一次, 窗长  $L$  和间隔  $P$  的选择根据实测数据预处理时的 Doppler 分辨率以及阵列协方差矩阵估计所需的快拍数等来确定, 滑窗后将式(4)

分成一系列短向量, 构成如下矩阵:

$$\mathbf{Y}_i = \begin{bmatrix} y_i(1) & y_i(P+1) & \cdots & y_i((K-1)P+1) \\ y_i(2) & y_i(P+2) & \cdots & y_i((K-1)P+2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_i(L) & y_i(P+L) & \cdots & y_i((K-1)P+L) \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中  $K$  为滑动窗的个数。对式(5)每一列进行谱分析(一般利用快速傅里叶变换 FFT 实现)得到频域表示:

$$\mathbf{Y}_i(\omega) = \begin{bmatrix} y_i(\omega_1, 1) & y_i(\omega_1, 2) & \cdots & y_i(\omega_1, K) \\ y_i(\omega_2, 1) & y_i(\omega_2, 2) & \cdots & y_i(\omega_2, K) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_i(\omega_L, 1) & y_i(\omega_L, 2) & \cdots & y_i(\omega_L, K) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)中, 每一列表示对长度为  $L$  的序列进行谱分析的结果, 每一行表示同一个频率点不同时刻(滑窗处理时, 滑窗的次数)谱分析的结果。式(6)所表示的为对第  $i$  个接收天线的处理结果, 则对整个接收阵列, 共有  $M$  个式(6)所示的数据矩阵。选定某一频率(对应式(6)中的一行)将此频率数据输出, 则  $M$  个接收天线共输出  $M$  行, 得到一个  $M \times K$  的矩阵  $\mathbf{X}$ ,

$$\mathbf{X}(\omega_j) = \begin{bmatrix} y_1(\omega_j, 1) & y_1(\omega_j, 2) & \cdots & y_1(\omega_j, K) \\ y_2(\omega_j, 1) & y_2(\omega_j, 2) & \cdots & y_2(\omega_j, K) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_M(\omega_j, 1) & y_M(\omega_j, 2) & \cdots & y_M(\omega_j, K) \end{bmatrix} \quad (7)$$

以下的 DOA 估计都是针对矩阵  $\mathbf{X}$  作进一步的处理。

#### 3.2 基于 MSWF 的降维技术

常规高分辨算法所需的运算量很大, 从而限制了其在实时系统中的应用。为了降低算法的复杂度, 人们提出了很多性能卓越的低复杂度的降维自适应滤波算法, 其中最具代表性的是 Goldstein 等提出的多级维纳滤波器方法<sup>[3,4]</sup>。此方法在最小均方误差的意义下得到 Wiener-Hopf 方程  $\mathbf{R}_x \mathbf{w}_{wf} = \mathbf{r}_{xd}$  的渐近最优解  $\mathbf{w}_{opt} = \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{r}_{xd}$ , 其特点是不需要阵列协方差矩阵的特征分解, 只是利用观测数据的前后向递推, 与传统子空间方法相比在最小均方性能方面有所提高, 并且计算复杂度大大降低了。本文利用基于相关相减算法的多级维纳滤波器(CSA-MSWF)<sup>[7]</sup>, 此算法同样是基于观测数据的递推, 但相对于原始的内嵌式的 MSWF 无需计算阻塞矩阵, 计算复杂度又得到有效的降低。若阵元数为  $M$ , 将观测数据完全分解需  $M$  级递推, 如果只进行  $D(D < M)$  级递推, 而去掉后  $M - D$  级递推, 即得到降维的 MSWF。由多级维纳滤波器的前向递推可以实现信号子空间和噪声子空间的快速估计<sup>[8]</sup>。

#### 3.3 基于 MSWF 降维的洋流方位估计

虽然高频地波雷达各个接收天线接收到的信号来自各个方向、各种流速的海浪回波, 但在频域中对应于每个 Doppler 谱点也就是对应于某一流速的洋流的方位一般最多只有两三个<sup>[9]</sup>。为了实现海面洋流方位估计, 首先通过阵列

输出预处理, 在频域中对海浪回波信号进行分离, 即提取出展宽的一阶谱区, 然后针对一阶谱区中的每个谱点(对应于不同的流速)再进行洋流方位估计。高频地波雷达洋流方位估计系统实现的整体框图如图 1 所示。

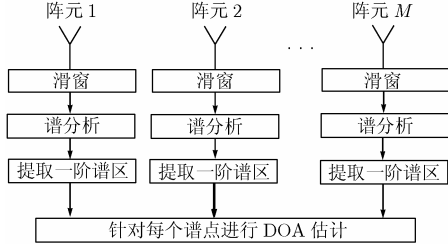


图 1 高频地波雷达洋流方位估计系统实现框图

海浪在不断地运动, 而且海洋不同的区域具有一定的相似性, 同一距离单元的雷达回波为同一时刻来自同一个辐射源, 因此同一距离单元探测到的洋流在具有相同流速的情况下, 具有一定的相关性<sup>[10]</sup>。此时信号协方差矩阵  $\mathbf{R}_s = E[\mathbf{s}(n)\mathbf{s}^H(n)]$  是秩亏损的, 部分信号矢量会落在噪声子空间, 造成子空间估计不准确, 从而使得方位估计出现误差, 因此需对观测数据采用空间平滑技术<sup>[11]</sup>作去相关处理, 然后对空间平滑后的数据利用 MSWF 降维技术得到信号子空间和噪声子空间, 最后利用 MUSIC 算法实现海面洋流方位角的估计。本文提出的基于 MSWF 降维技术的面海洋流方位角估计算法如下:

(1) 基于空间平滑的去相关处理 定义选择矩阵:

$$\mathbf{J}_l = [\mathbf{O}_{M_L \times (l-1)} \cdots \mathbf{I}_{M_L \times M_L} \cdots \mathbf{O}_{M_L \times (M-l-M_L+1)}] \in \mathbf{C}_{M_L \times M} \quad (8)$$

其中  $M_L$  是子阵阵元数,  $L = M - M_L + 1$  为子阵个数,  $l = 1, 2, \dots, L$  对应于第  $l$  个子阵。

平滑后观测数据矩阵为

$$\bar{\mathbf{X}}_0 = [\mathbf{J}_1 \mathbf{X} \quad \mathbf{J}_2 \mathbf{X} \quad \cdots \quad \mathbf{J}_L \mathbf{X}] \quad (9)$$

令  $\mathbf{d}_0(n) = \mathbf{s}_1(n)$ , 其中  $\mathbf{s}_1(n)$  为某时刻期望信号的训练信号, 则空间平滑的训练信号矢量相应可表示为

$$\bar{\mathbf{d}}_0 = \underbrace{[\mathbf{d}_0^T \quad \mathbf{d}_0^T \quad \cdots \quad \mathbf{d}_0^T]^T}_L \quad (10)$$

(2) 基于 MSWF 降维技术的子空间估计 由如下递推算法可得到多级维纳滤波器前向递推的匹配滤波器, 对  $i = 1, 2, \dots, D$

$$\left. \begin{aligned} \bar{\mathbf{h}}_i &= \bar{\mathbf{X}}_{i-1} \mathbf{d}_{i-1}^* / \|\bar{\mathbf{X}}_{i-1} \mathbf{d}_{i-1}^*\|_F \\ \bar{\mathbf{d}}_i &= \bar{\mathbf{h}}_i^H \bar{\mathbf{X}}_{i-1} \\ \bar{\mathbf{X}}_i &= \bar{\mathbf{X}}_{i-1} - \bar{\mathbf{h}}_i \bar{\mathbf{d}}_i \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

其中前  $P$  个匹配滤波器张成信号子空间  $\Phi_S = \text{span}\{\bar{\mathbf{h}}_1, \bar{\mathbf{h}}_2, \dots, \bar{\mathbf{h}}_P\}$ , 后  $D - P$  个匹配滤波器张成噪声子空间  $\Phi_N = \text{span}\{\bar{\mathbf{h}}_{P+1}, \bar{\mathbf{h}}_{P+2}, \dots, \bar{\mathbf{h}}_D\}$ 。

(3) 基于 MUSIC 的洋流方位估计 根据前面估计得到的信号子空间, 由下式可得到同一流速的洋流方位的空间谱为:

$$P(\theta) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta)(\mathbf{I} - \Phi_S \Phi_S^H) \mathbf{a}(\theta)} \quad (12)$$

式中  $\mathbf{a}(\theta)$  表示导向矢量, 洋流方位可以通过空间谱的谱峰搜索得到。

### 3.4 复杂度及性能分析

本文利用基于相关相减结构的多级维纳滤波器避开了阻塞矩阵的计算, 只需进行前向递推即可得到多级维纳滤波器系数, 每一级递推需要的运算量为  $O(MN)$ , 若信源个数为  $P$ , 则进行  $P$  级递推即可得到信号子空间, 其总的运算量为  $O(PMN)$ , 而由传统的方法得到信号子空间需要从观测数据估计出阵列的协方差矩阵, 然后对其作特征分解, 需要的运算量为  $O(M^2N) + O(M^3)$ 。通常波达方向估计问题中讨论的信源个数  $P$  小于阵元数  $M$ , 显然通过本文的方法能够有效地降低运算量, 尤其对于阵元数  $M$  较多的情况, 效果更为明显。另外由于此方法是在最小均方误差的意义下得到 Wiener-Hopf 方程  $\mathbf{R}_x \mathbf{w}_{\text{opt}} = \mathbf{r}_{\text{sd}}$  的渐近最优解  $\mathbf{w}_{\text{opt}} = \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{r}_{\text{sd}}$ , 因此与传统子空间分解方法相比在最小均方性能方面有所提高, 并且由于它避开了协方差矩阵的估计, 从而具有能应用在小块怕数信号环境的优点, 相对于传统的子空间分解方法应用范围更广泛。

## 4 实测数据处理与分析

利用高频地波雷达 OSMAR2000 的实测数据进行洋流方位估计。首先从海洋回波 Doppler 功率谱中分离出包含海流信息的一阶谱区, 再针对其中可用谱点上的信号估计径向海流的方位。不失一般性, 文中仅给出了几个距离单元上部谱点的估计结果, 如图 2 至图 5 所示, 同时图中还给出了前后向平滑方法估计结果以作比较, 总阵元数为 8, 前后向平滑的子阵阵元数为 5。图 2 为单个径向洋流方位存在的情况, 从图中可以看到 3 种方法都能估计出其方位, 但 MUSIC 方法的空间谱的幅度较小且伪峰较多。图 3 为两个径向洋流方位存在的情况且两者之间相关性较小, 从图中可以看到 3 种方法都能正确估计出径向洋流方位, 但 MUSIC 方法的空间谱的幅度较小且  $-60^\circ$  附近的伪峰很强已经将主峰淹没。由图 4、图 5 可以看出不同方位的径向洋流之间相关性较强时, 利用 MUSIC 方法不能正确估计出径向洋流存在的方位, 而 MSWF 方法能够给出与前后向平滑方法一致的估计结果

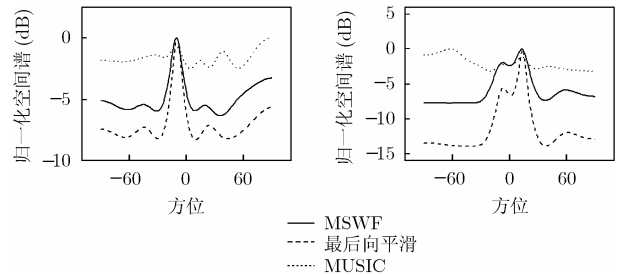


图 2 径向洋流方位估计 (距离元 12, 谱点 364)

图 3 径向洋流方位估计 (距离元 12, 谱点 375)

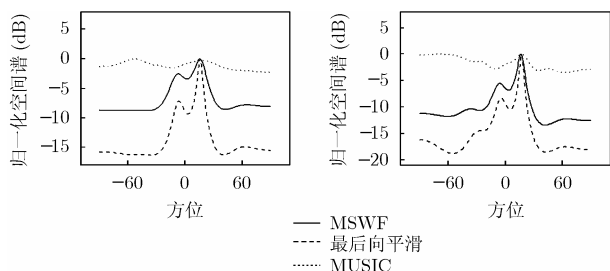


图 4 径向洋流方位估计

(距离元 10, 谱点 376)

图 5 径向洋流方位估计

(距离元 12, 谱点 381)

且主峰不会被伪峰淹没, 并且相对于前后向平滑方法而言它由于避免了协方差矩阵的估计及特征分解在计算复杂度上存在显著的优势。

## 5 结束语

本文首先采用空间平滑技术对接收信号进行去相关处理, 利用 MSWF 方法快速实现信号子空间和噪声子空间的分解, 从而进行洋流方位估计。通过对实测数据的分析表明该方法可以快速有效地进行洋流方位探测, 由于这种方法避开了协方差矩阵的估计及其特征分解, 能够大大降低计算的复杂度, 更好地适应实时工作的需要。

**致谢** 文中所用数据由武汉大学高频地波雷达海洋环境监测技术研究小组提供, 特此表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Trans. on Antennas Propagation*, 1986, 34(3): 276-280.
- [2] 杨绍麟, 柯亨玉, 侯杰昌. OSMAR2000 基于 MUSIC 的超分辨率海洋表面流算法. *武汉大学学报(理学版)*, 2001, 47(5): 601-608.  
Yang Shao-li, Ke Heng-yu, and Hou Jie-chang. Super resolution ocean surface current algorithm based on MUSIC for OSMAR2000. *J. Wuhan Univ. (Nat. Sci. Ed.)*, 2001, 47(5): 601-608.
- [3] Goldstein J S, Reed I S, and Scharf L L. A multistage representation of the Wiener filter based on orthogonal projections. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 1998, 44(7): 2943-2959.
- [4] Honig M L, Goldstein J S, and Reed I S. Adaptive reduced-rank interference suppression based on the multistage Wiener filter. *IEEE Trans. on Communications*, 2002, 50(6): 986-994.
- [5] Crombie D D. Doppler spectrum of sea echo at 13.56 Mc/s. *Nature*, 1955, 175: 681-682.
- [6] Barrick D E. First-order theory and analysis of MF/HF/VHF scatter from the sea. *IEEE Trans. on Antennas Propagation*, 1972, 20(1): 2-10.
- [7] Ricks D Cand Goldstein J S. Efficient architectures for implementing adaptive algorithms. Proceedings of the 2000 Antenna Applications Symposium, Allerton Park, Monticello, Illinois, 2000: 29-41.
- [8] 黄磊, 吴顺君, 张林让等. 快速子空间分解方法及其维数的快速估计. *电子学报*, 2005, 33(6): 977-981.  
Huang Lei, Wu Shun-jun, and Zhang Lin-rang, et al. A fast method for subspace decomposition and its dimension estimation. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(6): 977-981.
- [9] 杨绍麟, 柯亨玉, 侯杰昌等. OSMAR2000 超分辨率海流算法中空间信号源数的确定. *武汉大学学报(理学版)*, 2001, 47(5): 609-613.  
Yang Shao-lin, Ke Heng-yu, Hou Jie-chang, et al. Determination of signal number in super-resolution ocean surface current algorithm of OSMAR2000. *J. Wuhan Univ. (Nat. Sci. Ed.)*, 2001, 47(5): 609-613.
- [10] 强勇, 焦李成, 保铮. 高频地波雷达海洋表面流方位的超分辨率估计. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 32(1): 75-79.  
Qiang Yong, Jiao Li-cheng, and Bao Zheng. Super-resolution estimation of the ocean surface current for the HF ground wave radar. *J. Xidian Univ. (Nat. Sci. Ed.)*, 2005, 32(1): 75-79.
- [11] Shan T J, Wax M, and Kailath T. On spatial smoothing for direction of arrival estimation of coherent signals. *IEEE Trans. on Acoust., Speech, Signal Processing*, 1985, 33(4): 806-811.

安志娟: 女, 1975年生, 博士生, 讲师, 研究方向为天波及地波超视距雷达信号处理。

苏洪涛: 男, 1974年生, 博士, 副教授, 研究方向为自适应信号处理、天波及地波超视距雷达信号处理。

保 铮: 男, 1927年生, 教授, 博士生导师, 中国科学院院士, 研究领域为雷达信号处理及现代信号处理。