

一种通用的高分辨率波达方向估计 预处理新方法*

吴仁彪

(西安电子科技大学电子工程研究所,西安 710071)

摘要 本文提出了一种通用的高分辨率波达方向估计预处理新方法。它适用于任意中心对称阵列(如等距线阵、等距矩形面阵和对称圆阵等)的一维或二维高分辨处理。新方法在无性能损失的前提下将复信号空间映射到实信号空间上来处理。这样就有效地减少了信号子空间类高分辨率测向方法所需的运算量。此外,新方法本身对阵列接收信号还有一定的去相干作用。对于等距线阵和等距矩形面阵这类规则阵列,可将常用的空域平滑预处理方法与新方法相结合以进一步提高去相干能力。仿真结果证明了上述结论的正确性。

关键词 阵列信号处理;测向;谱估计;高分辨技术

1. 引言

近年来,在阵列信号处理领域中,信号子空间类高分辨率波达方向估计^[1]是一个十分热门的研究内容。这类方法可以在不增大阵列实际口径的前提下用信号处理的“软”手段来提高角分辨率。当接收数据协方差矩阵准确已知时,它们可以将任意靠近的信号源分辨开,而且分辨率与信噪比无关。随着 VLSI 技术的飞跃发展,它们在雷达、声纳、地震勘探等领域中有广阔的应用前景。

尽管如此,仍有不少问题亟待解决,如巨大的运算量,相干源的检测等。信号子空间类方法主要由两步组成:一是对接收数据协方差矩阵进行正交分解来估计信号(或噪声)子空间;二是进行谱峰搜索来提取波达方向估值。无论是正交分解还是谱值计算都面临着巨大的运算量。人们已提出的各种旨在减少运算量的分维处理方法,在分维参量接近于兼并时,其分辨性能将明显跌落^[2]。对于相干源的检测,目前较流行的是空域平滑预处理方法^[3],但它仅对等距线阵适用。

本文针对上述问题,提出了一种新的预处理方法。它可以有效地减小运算量,并具有一定的去相干能力,而预处理本身只需极少的运算量。

2. 基本原理

为了方便起见,我们以等距线阵为例来说明新方法的基本原理。由此不难将其推广

1991.12.30 收到,1992.05.08 定稿。

* 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题。

吴仁彪 男,1967年生,博士研究生,主要研究领域为高分辨率波达方向估计、自适应阵列信号处理、时空二维自适应滤波技术及其在机载雷达杂波抑制中的应用等。

至任意中心对称阵列。

设有 p 个窄带信号源入射图 1 所示的等距线阵,其波达角分别为 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$ 。设 d 表示阵元间距, O 为阵列参考点。将阵列分成 U_1 和 $U_{1'}$ 两个子阵, U_1 由阵元 $1, 2, \dots, N$ 组成, $U_{1'}$ 由阵元 $1', 2', \dots, N'$ 组成。

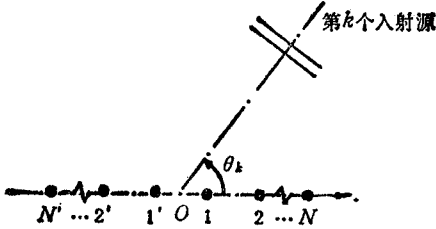


图 1 中心对称等距线阵

对于子阵 U_1 ,其接收数据模型为

$$X_1(t) = A_1 \cdot S(t) + W_1(t) \quad (1)$$

其中 $X_1(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T$ 为接收数据矢量; $S(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_p(t)]^T$ 为信号源矢量; $W_1(t) = [w_1(t), w_2(t), \dots, w_N(t)]^T$ 为接收噪声矢量; $A_1 = [a_1(\theta_1), a_1(\theta_2), \dots, a_1(\theta_p)]$ 为信号方向矩阵, $a_1(\theta_k) = [\exp(j\pi d \cos \theta_k / \lambda), \exp(j3\pi d \cos \theta_k / \lambda), \dots, \exp(j(2N-1)\pi d \cos \theta_k / \lambda)]^T, (1 \leq k \leq p)$; “ T ”表示转置, “ λ ”为入射波波长。

对于子阵 $U_{1'}$,其接收数据模型为

$$X_{1'}(t) = A_{1'} \cdot S(t) + W_{1'}(t) \quad (2)$$

(2)式中各个量的含义和(1)式相同。

当子阵 U_1 和 $U_{1'}$ 呈中心对称时,有

$$A_{1'} = (A_1)^* \quad (3)$$

“ $*$ ”表示复共轭。记

$$Y_1(t) = (X_1(t) + X_{1'}(t))/2$$

$$Y_2(t) = (X_1(t) - X_{1'}(t))/(2j)$$

令

$$Y(t) = \begin{bmatrix} Y_1(t) \\ Y_2(t) \end{bmatrix} = A \cdot S(t) + W(t) \quad (4)$$

其中

$$W(t) = \begin{bmatrix} (W_1(t) + W_{1'}(t))/2 \\ (W_1(t) - W_{1'}(t))/(2j) \end{bmatrix}$$

$$A = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_p)]$$

$a(\theta_k) = [\cos(\pi d \cos \theta_k / \lambda), \cos(3\pi d \cos \theta_k / \lambda), \dots, \cos((2N-1)\pi d \cos \theta_k / \lambda), \sin(\pi d \cos \theta_k / \lambda), \sin(3\pi d \cos \theta_k / \lambda), \dots, \sin((2N-1)\pi d \cos \theta_k / \lambda)]^T$
此时方向矢量 $a(\theta_k)$ 已变成了实矢量。令

$$R_Y = E[Y(t) \cdot A \cdot Y^H(t)] = A \cdot R_S \cdot A^T + R_W \quad (5)$$

“ H ”表示复共轭转置, $R_S = E[S(t) \cdot S^H(t)]$, $R_W = E[W(t) \cdot W^H(t)]$ 。对 R_Y 取实部得

$$\text{Re}[R_Y] = A \cdot \text{Re}[R_S] \cdot A^T + \text{Re}[R_W] \quad (6)$$

其中 $\text{Re}[\cdot]$ 表示取实部, $\text{Re}[R_W] = \sigma^2 \cdot I/2$, σ^2 为各阵元接收的白噪声功率, I 为单位矩阵。对 $\text{Re}[R_Y]$ 进行特征分解可得到 $2N$ 个实特征值 $\{\lambda_i, 1 \leq i \leq 2N\}$ 及其对应的实特征矢量 $\{V_i, 1 \leq i \leq 2N\}$ 。若 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_{2N}$, 则当信号源不相干时有以下性

质:

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p > \lambda_{p+1} = \dots = \lambda_{2N} = \sigma^2/2 \quad (7)$$

$$\text{span}\{V_i, 1 \leq i \leq p\} = \text{span}\{a(\theta_i), 1 \leq i \leq p\} \quad (8)$$

相应的实 MUSIC 谱定义为

$$P_r(\theta) = 1 / \sum_{i=p+1}^{2N} |V_i^T \cdot a(\theta)|^2 \quad (9)$$

由上可知, 经过预处理后, 正交分解和谱值计算都可在实空间上完成, 从而大大地减少了运算量(因为 1 次复数乘法等效于 4 次实数乘法和 3 次实数加法)。

利用与上面完全相同的方法, 可将预处理新方法推广应用到任意中心对称阵列上的一维或二维高分辨处理。中心对称的阵列结构并不会带来太多的限制, 常用的等距线阵、对称稀疏线阵(利用阵列非规则结构来减弱信号的空间相关性)、等距矩形面阵和对称圆阵都属于中心对称阵列。

3. 性能分析

在实际情况下, 数据协方差矩阵只能用有限次快拍数据来估计, 这时信号子空间法的分辨性能主要受信号的空间相关性、信噪比和信号的时间相关性的影响。下面我们逐一加以分析。

(1) 信号的空间相关性 定义两信号源 1 和 2 之间的空间相关系数为

$$\beta_{1,2} = b^H(\theta_1) \cdot b(\theta_2) / (\|b(\theta_1)\| \cdot \|b(\theta_2)\|) \quad (10)$$

其中 $b(\theta_1), b(\theta_2)$ 为信号方向矢量。容易推得

$$\beta_{1,2} = \beta_{i,2}^c = \left\{ \sum_{n=1}^N \cos[(2n-1)\pi d(\cos\theta_1 - \cos\theta_2)/\lambda] \right\} / N \quad (11)$$

(1 ≤ i, j ≤ p)

其中 $\beta_{i,2}^c$ 和 $\beta_{i,2}$ 分别为预处理前后信号之间的空间相关系数。(11)式表明信号源之间的空间相关性未变。

(2) 信噪比 定义预处理前后阵列数据信噪比的损失为 l

$$l = \text{Tr}[\text{Re}^{-1}(R_w) \cdot A \cdot \text{Re}(R_s) \cdot A^T] / \text{Tr}[\sigma^{-2} \cdot A_c \cdot R_s \cdot A_c^H] \quad (12)$$

其中 A_c 为预处理前的复信号方向矩阵, $\text{Tr}[\cdot]$ 为矩阵的迹。 $A_c = [a_c(\theta_1), a_c(\theta_2), \dots, a_c(\theta_p)]$ 。为简便起见, 假设只有一个信号源, 此时

$$l_1 = 2 \cdot a^T(\theta_1) \cdot a(\theta_1) / [a_c^H(\theta_1) \cdot a_c(\theta_1)] = 1 \quad (13)$$

(13)式说明信噪比无损失, 预处理过程等效于对原阵列数据进行了酉变换。

(3) 信号的时间相关性 定义两信号源 1 和 2 的时间相关系数为

$$\rho_{1,2} = E[s_1(t) \cdot s_2^*(t)] / [\sqrt{E(|s_1(t)|^2)} \cdot \sqrt{E(|s_2(t)|^2)}] \quad (14)$$

从(6)式可知, 经过预处理后, 信号源的功率未变, 但任意两信号源 1 和 2 之间的时间相关系数变为 $\text{Re}[\rho_{1,2}]$ 。显然有

$$|\text{Re}[\rho_{1,2}]| \leq |\rho_{1,2}| \quad (15)$$

这表明信号之间的时间相关性减弱了。(15)式中等号成立的概率几乎为 0, 因此预处理方法具有去相干作用。

综上所述可知,经过预处理后分辨性能不会下降,甚至会有所改善,因为信号的时间相关性减弱了。

对于规则阵列(如等距线阵和等距矩形面阵),可将新的预处理方法和常用的空域平滑预处理方法(一维^[3]或二维^[4])相结合来进一步提高去相干能力,同时又可大大减少正交化处理的运算量。值得注意的是,一维空域平滑法是不能直接推广至二维的,文献[4]对此进行了讨论,并给出了一种解决办法。

4. 仿真实验

为了说明预处理新方法的性能,我们结合信号子空间法进行了仿真实验,结果如图 2

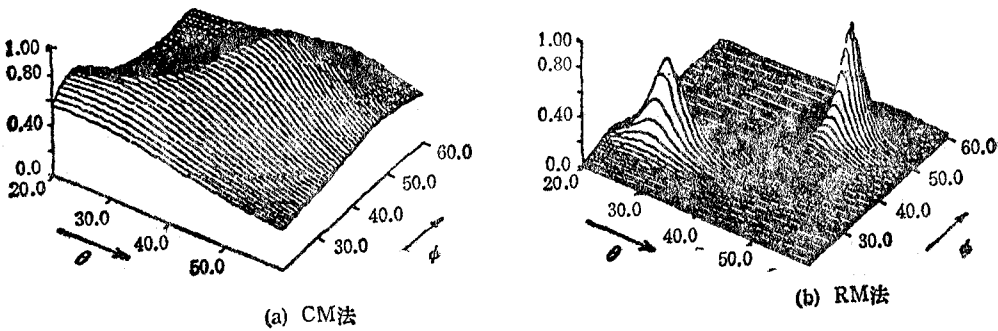


图 2 2 个相干源入射 1 个由 10 阵元组成的对称圆阵

和图 3 所示。为了方便起见,我们用 CM 表示通用的复信号子空间法,用 RM 表示经预处理后的实信号子空间法。

实验 1 RM 与 CM 的性能比较

在实验 1 中,有 2 个相干信号源入射一个半径 $r=2$ 的对称圆阵,阵元数为 10($N=5$)。信号源的波达角分别为 $(30^\circ, 30^\circ)$ 和 $(50^\circ, 50^\circ)$,信噪比 $\text{SNR}=10\text{dB}$,快拍数 $N_s=50$ 。实验结果如图 2 所示。图 2(a)用 CM 法,图 2(b)用 RM 法。由图 2(a)与图 2(b)的比较可知,

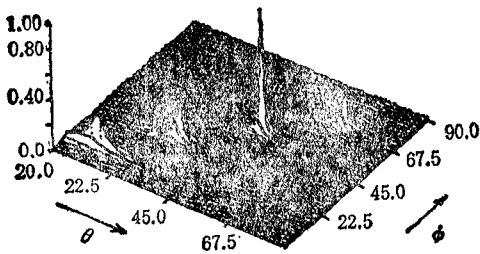


图 3 4 个相干信号源入射 1 个 8×8 的等距矩形面阵,用预处理新方法和二维空域平滑法相结合来去相干

知,预处理新方法本身具有一定的去相干能力。

实验 2 去相干能力的提高

在实验 2 中,4 个相干信号源入射 1 个 8×8 的等距矩形面阵,阵元间距 $dx = dy = \lambda/2$ 。信号源的波达方向角分别为 $(10^\circ, 10^\circ)$, $(30^\circ, 30^\circ)$, $(50^\circ, 50^\circ)$ 和 $(70^\circ, 70^\circ)$, $\text{SNR}=10\text{dB}$, $N_s=50$,将预处理新方法与二维空域平滑法相结合,子阵孔径为 5×5 。实验结果如图 3 所示。

5. 结束语

本文提出了一种高分辨率波达方向估计预处理新方法,它既可以有效地减少运算量,又具有一定的去相干能力,而且适用范围较广。理论分析和仿真实验证明了新方法的正确性和有效性。

本文是在保铮教授悉心指导下完成的,高世伟博士、张玉洪博士给予了帮助,在此作者深表感谢。

参 考 文 献

- [1] R. O. Schmidt, *IEEE Trans. on AP*, **AP-34** (1986) 3, 276—280.
- [2] 吴仁彪,保铮,两种新的二维高分辨率波达方向估计并行算法,西安电子科技大学学报,20(1993)1,18—24.
- [3] Tie-Jun Shan et al., *IEEE Trans. on ASSP*, **ASSP-33** (1985) 4, 806—810.
- [4] 吴仁彪,二维高分辨率阵列信号处理方法研究,西北工业大学硕士论文,西安,1990年12月.
- [5] 吴仁彪,林崇平,一种基于任意中心对称阵列的二维高分辨率波达方向估计预处理新方法,西北工业大学(电子工程研究所)科技资料,西安,1990年9月.

A NOVEL UNIVERSAL PREPROCESSING APPROACH FOR HIGH-RESOLUTION DIRECTION-OF-ARRIVAL ESTIMATION

Wu Renbiao

(Xidian University, Xi'an 710071)

Abstract A new universal preprocessing method is proposed to estimate angles of arrival with high resolution, which is applicable to one- or two-dimensional high resolution processing based on arbitrary center-symmetric arrays (such as uniform linear arrays, equal-spaced rectangular planar arrays and symmetric circular arrays). By mapping the complex signal space into the real one, the new method can effectively off load computational amount needed in the signal subspace high resolution direction finding techniques without any performance degradation. In addition the new preprocessing scheme itself can decorrelate the coherent signals received by the array. For regular array geometry such as uniform linear arrays and equal-spaced rectangular planar arrays, the popular spatial smoothing preprocessing technique can be combined with the novel approach to improve the decorrelating ability. Simulation results confirm the above conclusion.

Key words Array signal processing; Direction finding; Spectrum estimation; High resolution techniques