

基于特征空间的相干干扰抑制技术¹

赵永波 张守宏

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

摘 要 该文把多线性约束和特征空间技术相结合,提出了基于特征空间的多约束最小方差波束形成器 (EMCMVB),该波束形成器可以有效抑制相干干扰。EMCMVB 是利用估计得到的相干干扰方向和阵列信号相关矩阵特征分解来得到修改的信号子空间,再把多约束最小方差波束形成器 (MCMVB) 的权矢量向修改的信号子空间投影来得到新的权矢量,经分析表明,EMCMVB 的性能优于 MCMVB 的性能。最后,给出了计算机仿真结果,证实了 EMCMVB 的优越性。

关键词 自适应波束形成,阵列信号,特征空间,相干干扰

中图分类号 TN911.4

1 引 言

在阵列信号处理中,往往存在有相干干扰,如多径反射、智能干扰等,在这种情况下,常规自适应波束形成器会引起期望信号对消,波束形成的性能急剧下降,因此对相干干扰的抑制技术引起了人们越来越多的注意。文献 [1] 提出了先用空间平滑技术对相干干扰解相干,然后再完成干扰对消,这种方法只能用在等距线阵或含有许多相同子阵的阵列中。为了克服这个问题, Yeh 提出了一种多约束最小方差波束形成器 (MCMVB)^[2],它对任意的阵列结构都可以进行相干干扰抑制, MCMVB 是把事先估计的相干干扰方向作为零点约束方向,再用线性约束最小方差波束形成器 (LCMV) 来得到自适应权矢量。但是, MCMVB 对相干干扰方向的估计误差十分敏感,因此文献 [3, 4] 在 MCMVB 的基础上分别提出了辅助变换最小方差波束形成器 (CTMVB) 和导向矢量复原最小方差波束形成器 (SVRMVB),虽然这两种技术都对相干干扰方向估计误差的敏感性有所降低,但是它们都必须对阵列信号相关矩阵进行适当的对角加载,若加载量不合适,它们的性能都会大大下降。

最近几年来,基于特征空间的波束形成技术^[5,6]是阵列信号处理中的一个研究热点,它利用对阵列信号相关矩阵进行特征分解,形成信号子空间和噪声子空间,信号子空间包含期望信号和干扰信号,其他和信号子空间正交的部分构成噪声子空间,然后把常规自适应波束形成器的权矢量向信号子空间投影得到自适应波束形成的权矢量。经研究表明,基于特征空间的波束形成器 (ESB) 与常规自适应波束形成器相比,具有收敛速度快和对指向误差不敏感的优点。虽然 ESB 有较好的波束形成性能,但在有相干干扰时,由于得不到真实的信号子空间,ESB 也不能有效地工作。

为了得到一种性能较优并能抑制相干干扰的波束形成器,本文把基于特征空间的波束形成技术和多约束最小方差波束形成技术相结合,提出一种基于特征空间的多约束最小方差波束形成器 (EMCMVB),它利用对阵列信号相关矩阵进行特征分解得到的所谓信号子空间和事先估计的相干干扰方向来形成修改的信号子空间,并把 MCMVB 的权矢量向修改的信号子空间投影,从而得到波束形成器的权矢量。经分析和计算机仿真表明,EMCMVB 具有优越的性能。

2 多约束最小方差波束形成器

考虑一 M 个阵元的线阵,有 $N + Q + 1$ 个窄带信号入射,包括一个期望信号、 N 个相干

¹ 2000-04-30 收到, 2000-10-11 定稿

干扰和 Q 个不相干干扰信号, 则阵列接收到的信号可表示为

$$\mathbf{X}(t) = S_d(t)\mathbf{a}_d + \sum_{n=1}^N S_d(t)\rho_n\mathbf{a}_{cn} + \sum_{q=1}^Q S_q(t)\mathbf{a}_q + \mathbf{N}(t) \quad (1)$$

其中 $S_d(t)$ 和 \mathbf{a}_d 分别为期望信号的复包络和导向矢量, $S_q(t)$ 和 \mathbf{a}_q 分别为第 q 个不相干干扰信号的复包络和导向矢量, ρ_n 为第 n 个相干干扰信号与期望信号复包络的相对值, \mathbf{a}_{cn} 为第 n 个相干干扰信号的导向矢量, $\mathbf{N}(t)$ 为背景噪声, 假设它为空间白噪声且与信号不相关. (1) 式又可写为

$$\mathbf{X}(t) = S_d(t)\mathbf{a}_{cb} + \mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (2)$$

式中 $\mathbf{a}_{cb} = \mathbf{a}_d + \sum_{n=1}^N \rho_n\mathbf{a}_{cn}$, $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_Q]$, $\mathbf{S}(t) = [S_1(t), \dots, S_Q(t)]^T$. 设 $S_d(t)$ 和 $S_q(t)$ 互不相关, $q = 1, \dots, Q$, 阵列信号相关矩阵为

$$\mathbf{R} = E\{\mathbf{X}(t)\mathbf{X}^H(t)\} = E\{|S_d(t)|^2\}\mathbf{a}_{cb}\mathbf{a}_{cb}^H + \mathbf{A}\boldsymbol{\Psi}\mathbf{A}^H + \sigma_n^2\mathbf{I} \quad (3)$$

式中 $\boldsymbol{\Psi} = E\{\mathbf{S}(t)\mathbf{S}^H(t)\}$, σ_n^2 是噪声功率, \mathbf{I} 是单位阵. 假设期望信号和相干干扰信号的方向已估计得到, 则可以得到相应的估计导向矢量为 $\hat{\mathbf{a}}_d$ 和 $\hat{\mathbf{a}}_{cn}$, $n = 1, \dots, N$, 令 $\mathbf{C} = [\hat{\mathbf{a}}_{c1}, \dots, \hat{\mathbf{a}}_{cN}]$, \mathbf{f} 为 $N \times 1$ 的零矢量, 此时需要求解的最优问题变为

$$\begin{aligned} & \min_W \mathbf{W}^H \mathbf{R} \mathbf{W} \\ & \text{约束 } \mathbf{W}^H [\hat{\mathbf{a}}_d \mathbf{C}] = [1 \mathbf{f}^T] \end{aligned} \quad (4)$$

由 MCMVB 得到 (4) 式的最优解为

$$\mathbf{W}_{\text{MCMVB}} = \mathbf{R}^{-1} [\hat{\mathbf{a}}_d \mathbf{C}] ([\hat{\mathbf{a}}_d \mathbf{C}]^H \mathbf{R}^{-1} [\hat{\mathbf{a}}_d \mathbf{C}])^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{f} \end{bmatrix} \quad (5)$$

MCMVB 利用 (4) 式中的零点约束来抑制相干干扰, 利用阵列输出功率最小来抑制非相干干扰. 当不存在期望信号和相干干扰方向估计误差时, MCMVB 能够很好地抑制掉相干干扰和非相干干扰, 输出信于噪比 (SINR) 较大; 当有方向估计误差时, 零点约束没有完全抑制掉相干干扰, 剩余的相干干扰会引起期望信号相消, MCMVB 的性能会急剧下降.

3 基于特征空间的多约束最小方差波束形成器

3.1 EMCMVB 的提出

假设信号源数目 $Q + N + 1 < M$, 对 \mathbf{R} 进行特征分解可得

$$\mathbf{R} = \sum_{i=1}^M \lambda_i \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^H = \mathbf{E} \boldsymbol{\Lambda}_s \mathbf{E}_s^H + \mathbf{E}_n \boldsymbol{\Lambda}_n \mathbf{E}_n^H \quad (6)$$

式中 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_{Q+1} \geq \lambda_{Q+2} = \dots = \lambda_M = \sigma_n^2$ 是相应的 M 个特征值, 其对应的特征矢量分别为 $\mathbf{e}_i, i = 1, 2, \dots, M$, $\boldsymbol{\Lambda}_s = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{Q+1}\}$, $\boldsymbol{\Lambda}_n = \text{diag}\{\lambda_{Q+2}, \dots, \lambda_M\}$, $\mathbf{E}_s = [\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_{Q+1}]$, $\mathbf{E}_n = [\mathbf{e}_{Q+2}, \dots, \mathbf{e}_M]$, \mathbf{E}_s 和 \mathbf{E}_n 的列向量分别张成信号子空间 \mathbf{S}_s 和噪声子空间 \mathbf{N}_s . 可以证明, $[\mathbf{a}_{cb} \ \mathbf{A}]$ 的列向量也可张成信号子空间 \mathbf{S}_s .

对 E_s 和 C 的列向量进行 Gram-Schmidt 正交化处理, 可以得到

$$\hat{E}_s = [e_1, \dots, e_{Q+1}, \hat{c}_1, \dots, \hat{c}_N] \quad (7)$$

式中 $\hat{c}_i, i = 1, \dots, N$ 在噪声子空间中. \hat{E}_s 的列向量张成修改的信号子空间 \hat{S}_s , 与 \hat{E}_s 列向量正交的向量构成修改的噪声子空间 \hat{N}_s , 把 MCMVB 的权矢量向修改的信号子空间投影, 便可得到 EMCMV B 的权矢量为

$$W_{EMCMVB} = \hat{E}_s \hat{E}_s^H W_{MCMVB} \quad (8)$$

3.2 性能分析

根据文献 [4], 当存在相干干扰时, 阵列输出的信干噪比 (SINR) 定义为

$$\text{SINR} = P_d / (P_i + P_n) \quad (9)$$

式中 P_d 为输出信号功率, $P_d = E\{|S_d(t)|^2\} |W^H a_{cb}|^2$, P_i 为输出干扰功率, $P_i = W^H A \Psi A^H W$, P_n 为输出噪声功率, $P_n = \sigma_n^2 W^H W$.

由 (8) 式可得

$$W_{MCMVB} = W_{EMCMVB} + W_{NE} \quad (10)$$

式中 $W_{NE} = (I - \hat{E}_s \hat{E}_s^H) W_{MCMVB}$, W_{NE} 与 W_{EMCMVB} 正交. 设 MCMVB 的输出信号功率、输出干扰功率和输出噪声功率分别为 P_{dM} , P_{iM} 和 P_{nM} , EMCMV B 的相应量分别为 P_{dE} , P_{iE} 和 P_{nE} , 因为 A 的列向量和 a_{cb} 都在修改的信号子空间 \hat{S}_s 中, 所以有 $P_{iM} = P_{iE}$ 和 $P_{dM} = P_{dE}$, 由此可得 EMCMV B 的输出 SINR:

$$\text{SINR}_{EMCMVB} = \frac{P_{dE}}{P_{iE} + P_{nE}} = \frac{P_{dM}}{P_{iM} + P_{nM} - \sigma_n^2 W_{NE}^H W_{NE}} \quad (11)$$

而 MCMVB 的输出 SINR 为

$$\text{SINR}_{MCMVB} = P_{dE} / (P_{iM} + P_{nM}) \quad (12)$$

由 (11) 式和 (12) 式很容易得出

$$\text{SINR}_{EMCMVB} \geq \text{SINR}_{MCMVB} \quad (13)$$

从上面分析过程可以看出, EMCMV B 的权矢量是摒弃了 MCMVB 权矢量在修改的噪声子空间中的分量而仅保留在修改的信号子空间中的分量, 权矢量的范数更小, 噪声的输出功率更小, 而信号和干扰的输出功率不变, 所以输出 SINR 较大. 当不存在期望信号和相干干扰方向估计误差时, 由 (5) 式可以看出, SINR_{MCMVB} 是 $a_d, a_{c1}, \dots, a_{cN}, a_1, \dots, a_Q$ 的线性组合, 而修改的信号子空间 \hat{S}_s 是 $a_d, a_{c1}, \dots, a_{cN}, a_1, \dots, a_Q$ 所张成的子空间, 所以 W_{MCMVB} 也在 \hat{S}_s 中, $W_{NE} = 0$, 此时 (13) 式中的等号成立.

另外, 假设不存在相干干扰时, $a_{cb} = a_d$, 把 \hat{a}_d 看作预定约束方向导向矢量, 把 C 看作要保留的零点约束, EMCMV B 就变成了广义的基于特征空间波束形成器 (GEIB)^[7]. 为了简化计算复杂度, 令 $\hat{\Lambda}_s = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{Q+1}, \lambda_{Q+2}, \dots, \lambda_{Q+N+1}\}$, (8) 式可以变为^[7]

$$W_{EMCMVB} = \hat{E}_s \hat{\Lambda}_s^{-1} \hat{E}_s^H [\hat{a}_d \ C] ([\hat{a}_d \ C]^H \hat{E}_s \hat{\Lambda}_s^{-1} \hat{E}_s^H [\hat{a}_d \ C])^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ f \end{bmatrix} \quad (14)$$

上面的分析是在快拍数为无穷多、并且没有系统误差的情况下进行的。当快拍数有限时,假设没有方向估计误差, $\mathbf{W}_{\text{MCMVB}}$ 在 $\hat{\mathbf{N}}_s$ 中也有分量, 这时 EMCMBV 的性能仍好于 MCMVB 的性能。EMCMBV 的权矢量没有包含 MCMVB 权矢量在 $\hat{\mathbf{N}}_s$ 中的部分, 所以 EMCMBV 的收敛速度也要快于 MCMVB 的收敛速度。由于 EMCMBV 是基于 MCMVB 的一种波束形成技术, 它也需要事先估计相干干扰的方向, 同样它也适用于任意的阵列结构。

4 计算机仿真

下面对几种不同情况作计算机仿真分析和比较, 以验证 EMCMBV 的优越性能。在计算机仿真中, 图 1- 图 3 的阵列信号相关矩阵 \mathbf{R} 是用有限次 (K) 快拍数据 $\mathbf{X}(t_i)$ 来估计得到, 即 $\mathbf{R} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \mathbf{X}(t_i) \mathbf{X}^H(t_i)$, K 为快拍数, 并且每一个仿真结果都由 100 次独立实验结果平均得到, 而图 4 的阵列信号相关矩阵 \mathbf{R} 是假设无穷次快拍得到的。假设阵列为 20 个阵元的不等距线阵, 每个阵元都为无向的单增益阵元, 阵元间距为如下波长数: $\{0.19, 0.19 \times 1.1, 0.19 \times 1.1^2, \dots, 0.19 \times 1.1^{18}\}$ 。这样阵列孔径等于 9.5 波长, 这与间距为半个波长的等距线阵相同。一个与期望信号不相关的干扰信号来自 -45° , 干噪比是 40dB, 期望信号的方向为 0° , 信噪比是 20dB, 还有一方向为 20° 与期望信号相干的干扰, 干噪比是 20dB, ρ_1 为 1。

图 1 给出了采样快拍数为 2000 时输出 SINR 随期望信号和相干干扰方向估计误差变化的三维曲线。从图中可以看出, MCMVB 对期望信号和相干干扰方向估计误差十分敏感, 而 EMCMBV 对方向估计误差具有很强的稳健性。另外还可看出, 即使不存在期望信号和相干干扰方向估计误差, EMCMBV 的性能也比 MCMVB 的性能好, 这是因为有限次快拍的误差也大大影响了 MCMVB 的性能, 而对 EMCMBV 影响较小。

当不存在期望信号和相干干扰方向估计误差时, 输出 SINR 随采样快拍数变化的曲线如图 2 所示, 由图可知, EMCMBV 的收敛速度要快于 MCMVB 的收敛速度, 并且其性能也要好于 MCMVB。当期望信号和相干干扰方向估计误差均为 2° , 采样快拍数为 2000 时, 图 3 给出了阵列的自适应方向图, 由图可见, MCMVB 在期望信号方向有零陷, 会引起期望信号对消, 而 EMCMBV 具有较好的波束形状, 因而它也有较好的波束形成性能。

假设采样快拍数为无穷多次, 阵列信号相关矩阵 \mathbf{R} 由 (3) 式得到, 输出 SINR 随期望信号和相干干扰方向估计误差变化的三维曲线由图 4 给出, 可以看出, 在有期望信号和相干干扰方向估计误差时, EMCMBV 优于 MCMVB, 当无方向估计误差时, 两者性能相同, 这与前面的分析相一致。

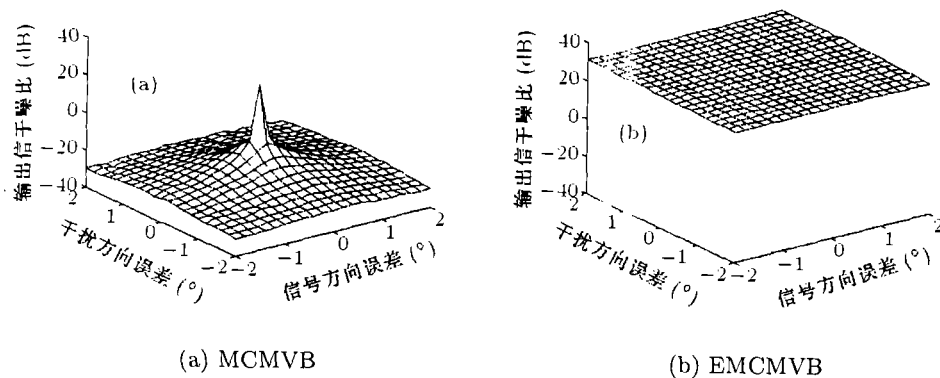


图 1 输出信干噪比随期望信号和相干干扰方向估计误差变化三维曲线
(采样快拍数为 2000)

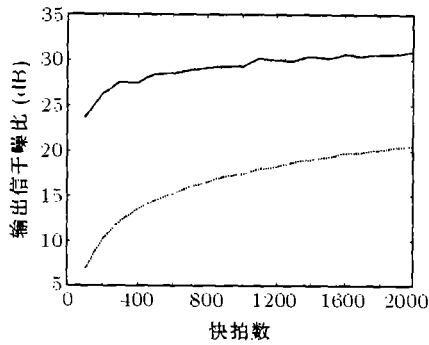


图2 输出信噪比随快拍数变化曲线(无方向估计误差, 实线为 EMCMB, 虚线为 MCMVB)

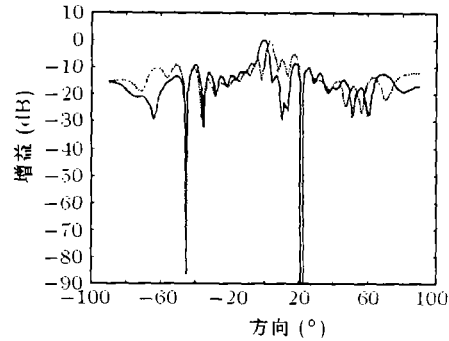


图3 自适应方向图(采样快拍数为 2000, 实线为 EMCMB, 虚线为 MCMVB)

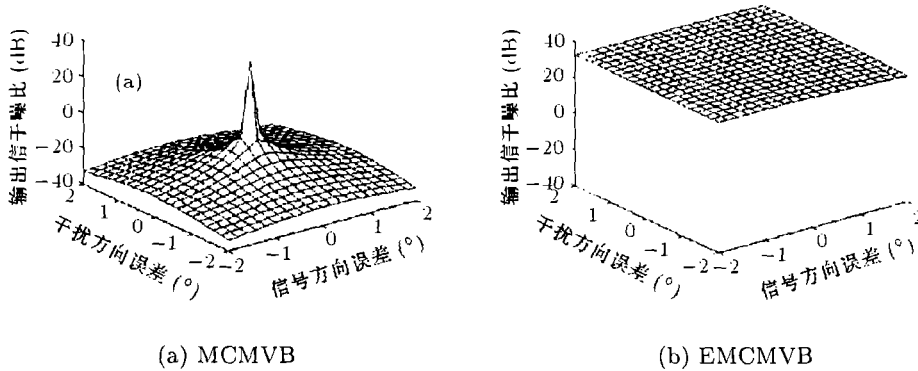


图4 输出信噪比随期望信号和相干干扰方向估计误差变化三维曲线(采样快拍数为无穷多次)

5 结 论

本文提出了基于特征空间的多约束最小方差波束形成器(EMCMVB),它是一种有效的相干干扰抑制技术。该技术把估计得到的相干干扰方向和由阵列信号相关矩阵特征分解得到的信号子空间相结合,求出修改的信号子空间,再把多约束最小方差波束形成器(MCMVB)的权矢量向修改的信号子空间投影来得到新的权矢量。由于EMCMVB权矢量的范数更小,噪声的输出功率更小,而信号和干扰的输出功率不变,所以EMCMVB输出的信噪比(SINR)较大。计算机仿真结果验证了EMCMVB的优越性能。

参 考 文 献

- [1] T. J. Shan, T. Kailath, Adaptive beamforming for coherent signals and interference, *IEEE Trans. on Acoust., Speech, Signal Processing*, 1985, 33(3), 527-536.
- [2] C. C. Yeh, W. D. Wang, Coherent interference suppression by an antenna array of arbitrary geometry, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1989, 37(10), 1317-1322.
- [3] T. S. Lee, T. T. Lin, Coherent interference suppression with complementally transformed adaptive beamformer, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1998, 46(5), 609-617.
- [4] T. S. Lee, T. T. Lin, Reception of coherent signals with steering vector restoral beamformer, *Signal Processing*, 1999, 72(3), 141-145.

- [5] D. D. Feldman, L. J. Griffiths, A constrain projection approach for robust adaptive beamforming, in Proc. IEEE ICASSP. Mississauga: Imperial Press Limited, 1991, 1381-1384.
- [6] L. Chang, C. C. Yeh, Performance of DMI and eigenspace-based beamformers, IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 1992, 40(11), 1336-1347.
- [7] J. L. Yu, C. C. Yeh, Generalized eigenspace-based beamformers, IEEE Trans. on Signal Processing, 1995, 43(11), 2453-2461.

COHERENT INTERFERENCE SUPPRESSION WITH EIGENSPACE-BASED BEAMFORMER

Zhao Yongbo Zhang Shouhong

(Key Lab. for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract The eigenspace-based multiple constrained minimum variance beamformer (EMCMVB) is presented here, which combines the multiple constrained minimum variance beamformer (MCMVB) with the eigenspace-based beamformer. Coherent interference can be suppressed by the EMCMVB efficiently. The EMCMVB first gets the modified signal subspace by using the estimated arrival angles of coherent interferers and the eigenstructure of the correlation matrix, and then projects the MCMVB weight vector onto the modified signal subspace. The theoretical analysis indicates that the EMCMVB outperforms the MCMVB. Computer simulation results are also presented and demonstrate the merits of the EMCMVB.

Key words Adaptive beamforming, Array signal, Eigenspace, Coherent interference

赵永波: 男, 1972年生, 副教授, 博士, 主要研究方向为阵列信号处理、雷达信号处理、综合脉冲与孔径雷达等。

张守宏: 男, 1938年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, 主要研究方向为信号处理、雷达系统等。