

## 基于特征空间的线性约束最小方差波束形成器

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:** 该文把线性约束和特征空间技术相结合, 提出了基于特征空间的线性约束最小方差波束形成器(ELCMVB), 该波束形成器是把线性约束最小方差波束形成器(LCMVB)的预定约束方向导向矢量向信号子空间投影, 再结合线性约束用 LCMVB 来得到权矢量。经分析表明, ELCMVB 的性能优于 GEIB 的性能。与 GEIB 相比, ELCMVB 不用计算修改的信号子空间, 避免了因计算修改信号子空间而容易造成的计算不稳定性, 且其波束形成性能基本上不受零点约束位置的影响。最后, 给出了计算机仿真结果, 并证实了 ELCMVB 的优越性。

**关键词:** 自适应波束形成, 阵列信号, 特征空间, 线性约束

中图分类号: TP911.7 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2005)03-0423-04

## Eigenspace-Based Linearly Constrained Minimum Variance Beamformer

Zhao Yong-bo Zhang Shou-hong

(National Key Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract** By combining the Linearly Constrained Minimum Variance Beamformer(LCMVB) with the eigenspace-based beamformer, this paper presents the Eigenspace-based Linearly Constrained Minimum Variance Beamformer(ELCMVB). The ELCMVB first projects the presumed steering vector of the LCMVB onto the signal subspace, then gets the weight vector by using the LCMV and the projected steering vector. The theoretical analysis indicates that the ELCMVB outperforms the Generalized Eigenspace-based Beamformer(GEIB). Compared to the GEIB, the ELCMVB removes the computation of the modified signal subspace and overcomes the numerical instability. Null constraints hardly affect the performance of the ELCMVB. Computer simulation results are also presented and demonstrate the merits of the ELCMVB.

**Key words** Adaptive beamforming, Array signal, Eigenspace, Linear constraint

### 1 引言

最近几年来, 基于特征空间的波束形成技术<sup>[1,2]</sup>引起了人们越来越大的注意, 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, 其他与信号子空间正交的部分构成噪声子空间, 然后把常规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。这样权矢量的范数变小, 输出噪声功率也变小, 而期望信号和干扰信号输出功率不变, 所以输出的信干噪比(SINR)较大。经研究表明, 基于特征空间的波束形成器与常规波束形成器相比, 具有收敛速度快和对指向误差不敏感的优点。

线性约束被用到波束形成中可以达到不同的目的, 如导数约束可以用来减少由指向误差引起的性能下降<sup>[3]</sup>, 零点约束可以用来对付非平稳干扰<sup>[4]</sup>。最近, 人们把线性约束和特

征空间技术结合起来用到波束形成中, 提出了一种广义的基于特征空间波束形成器(GEIB)<sup>[5]</sup>, 该技术把线性约束最小方差波束形成器(LCMVB)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, 这样 GEIB 的性能要优于 LCMVB 的性能。但是 GEIB 需要计算修改的信号子空间, 容易产生计算的不稳定性; 另外, 当零点约束的方向与干扰方向接近时, GEIB 的性能会急剧下降<sup>[6]</sup>。为了克服这个问题, 本文提出一种基于特征空间的线性约束最小方差波束形成器(ELCMVB), 该波束形成器是把 LCMVB 的预定约束方向导向矢量向信号子空间投影, 再结合线性约束用 LCMVB 来得到权矢量, 这样就不需要计算修改的信号子空间, 但仍能得到较好的波束形成性能, 并且当零点约束的方向与干扰方向接近时, 性能不会下降。

由文献[5]知, 一般导数约束不被 GEIB 保留, 而零点约

束被保留,为了研究问题方便,在本文里,我们假设线性约束只为要保留的零点约束。

## 2 广义的基于特征空间波束形成器(GEIB)

考虑一  $M$  元均匀间隔线性阵,有  $P+1$  个互不相关的窄带信号入射,包括一个期望信号和  $P$  个干扰信号,则阵列接收到的信号可表示为

$$X(t) = \sum_{i=0}^P S_i(t) \mathbf{a}(\theta_i) + N(t) \quad (1)$$

其中  $S_i(t)$  为信号的复包络,  $\mathbf{a}(\theta_i)$  为信号的导向矢量,设  $i=0$  时为期望信号,  $i=1, \dots, P$  时为干扰信号,  $N(t)$  为背景噪声,假设它为空间白噪声且与信号不相关。式(1)又可写为

$$X(t) = AS(t) + N(t) \quad (2)$$

式中  $A = [\mathbf{a}(\theta_0), \mathbf{a}(\theta_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_P)]$ ,  $S(t) = [S_0(t), S_1(t), \dots, S_P(t)]^T$  阵列信号相关矩阵为

$$R = E\{X(t)X^H(t)\} = A\Psi A^H + \sigma_n^2 I \quad (3)$$

式中  $\Psi = E\{S(t)S^H(t)\}$ , 是信号复包络的相关矩阵,  $\sigma_n^2$  是噪声功率,  $I$  是单位阵。假设信号源数目  $P+1 < M$ , 对  $R$  进行特征分解可得

$$R = \sum_{i=1}^M \lambda_i \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^H = E_s \Lambda_s E_s^H + E_n \Lambda_n E_n^H \quad (4)$$

式中  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_{p+1} \geq \lambda_{p+2} = \dots = \lambda_M = \sigma_n^2$  是相应的  $M$  个特征值, 其对应的特征矢量分别为  $\mathbf{e}_i, i=1, 2, \dots, M$ ,

$\Lambda_s = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{p+1}\}, \Lambda_n = \text{diag}\{\lambda_{p+2}, \dots, \lambda_M\}, E_s = [\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_{p+1}], E_n = [\mathbf{e}_{p+2}, \dots, \mathbf{e}_M]$ ,  $E_s$  和  $E_n$  的列向量分别张成信号子空间  $S_s$  和噪声子空间  $N_s$ 。

假设 LCMVB 的预定约束方向导向矢量为  $\mathbf{a}_s$ ,  $N$  个零点约束方向导向矢量为  $\mathbf{c}_1, \dots, \mathbf{c}_N$ , 令  $C = [\mathbf{c}_1, \dots, \mathbf{c}_N]$ ,  $\mathbf{f}$  为  $N \times 1$  的零矢量, 则 LCMVB 的权矢量为

$$W_{\text{LCMVB}} = R^{-1}[\mathbf{a}_s \ C]([[\mathbf{a}_s \ C]^H R^{-1}[\mathbf{a}_s \ C]])^{-1} \begin{pmatrix} 1 \\ \mathbf{f} \end{pmatrix} \quad (5)$$

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

$$\hat{E}_s = [\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_{p+1}, \hat{\mathbf{c}}_1, \dots, \hat{\mathbf{c}}_{N'}] \quad (6)$$

式中  $\hat{\mathbf{c}}_i, i=1, \dots, N'$  在噪声子空间中, 若有些  $C$  的列向量在信号子空间中, 则  $N'$  比  $N$  小。  $\hat{E}_s$  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 LCMVB 的权矢量向修改的信号子空间投影, 便可得到 GEIB 的权矢量。

$$W_{\text{GEIB}} = \hat{E}_s \hat{E}_s^H W_{\text{LCMVB}} \quad (7)$$

可以看出, GEIB 的权矢量是摒弃了 LCMVB 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, 而期望信号和干扰信号输出功率不变, 所以输出的信干噪比(SINR)较大, 并且收敛速度较快。但是, GEIB 需要计算修改的信号子空间, 容易造成的计算不稳定性。另外, 由文献[6]可知, 当零点约束的方向与干扰方向接近时,  $\hat{E}_s$  接近于秩亏损, GEIB 输出的噪声功率增大, 性能会急剧下降。

## 3 基于特征空间的线性约束最小方差波束形成器(ELCMVB)

### 3.1 ELCMVB 的提出

通过对 GEIB 分析不难发现, GEIB 的权矢量没有包含修改的噪声子空间的成分, 仅仅是  $\mathbf{a}(\theta_i), i=0, 1, \dots, P$  和  $\mathbf{c}_j, j=1, \dots, N$  的一种线性组合, 在这里, 我们提出  $\mathbf{a}(\theta_i), i=0, 1, \dots, P$  和  $\mathbf{c}_j, j=1, \dots, N$  的另一种线性组合作为波束形成器的权矢量, 这就是本文所说的基于特征空间的线性约束最小方差波束形成器(ELCMVB)。

令 LCMVB 的预定约束方向导向矢量  $\mathbf{a}_s$  向信号子空间投影可得

$$\mathbf{a}_{\text{sp}} = E_s E_s^H \mathbf{a}_s \quad (8)$$

把  $\mathbf{a}_{\text{sp}}$  作为新的预定约束方向导向矢量带入 LCMVB 中, 得到 ELCMVB 的权矢量为

$$W_{\text{ELCMVB}} = R^{-1}[\mathbf{a}_{\text{sp}} \ C]([[\mathbf{a}_{\text{sp}} \ C]^H R^{-1}[\mathbf{a}_{\text{sp}} \ C]])^{-1} \begin{pmatrix} 1 \\ \mathbf{f} \end{pmatrix} \quad (9)$$

由于 ELCMVB 的权矢量也没有包含修改的噪声子空间的成分, 所以它的收敛速度也较快。

### 3.2 性能分析

下面对 ELCMVB 的性能进行分析, 为了分析问题方便, 假设只有一个干扰和一个零点约束, 干扰方向和零点约束方向都在副瓣区域, 并且这两个方向不相同, 式(5), 式(7)和式(9)变为

$$W_{\text{LCMVB}} = R^{-1}[\mathbf{a}_s \ \mathbf{c}_1]([[\mathbf{a}_s \ \mathbf{c}_1]^H R^{-1}[\mathbf{a}_s \ \mathbf{c}_1]])^{-1} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$W_{\text{GEIB}} = \hat{E}_s \hat{E}_s^H R^{-1}[\mathbf{a}_s \ \mathbf{c}_1]([[\mathbf{a}_s \ \mathbf{c}_1]^H R^{-1}[\mathbf{a}_s \ \mathbf{c}_1]])^{-1} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$W_{\text{ELCMVB}} = R^{-1}[\mathbf{a}_{\text{sp}} \ \mathbf{c}_1]([[\mathbf{a}_{\text{sp}} \ \mathbf{c}_1]^H R^{-1}[\mathbf{a}_{\text{sp}} \ \mathbf{c}_1]])^{-1} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

令  $\hat{\mathbf{a}}_{\text{sp}} = \hat{E}_s \hat{E}_s^H \mathbf{a}_s$ , 可以证明<sup>[5]</sup>, 式(11)又可表示为

$$W_{\text{GEIB}} = R^{-1}[\hat{\mathbf{a}}_{\text{sp}} \ \mathbf{c}_1]([[\hat{\mathbf{a}}_{\text{sp}} \ \mathbf{c}_1]^H R^{-1}[\hat{\mathbf{a}}_{\text{sp}} \ \mathbf{c}_1]])^{-1} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

式(12)又可变为<sup>[7]</sup>

$$W_{\text{ELCMVB}} = \mu R^{-1}(\mathbf{a}_{\text{sp}} - \mathbf{c}_1^H R^{-1} \mathbf{a}_{\text{sp}} / (\mathbf{c}_1^H R^{-1} \mathbf{c}_1) \mathbf{c}_1) \quad (14)$$

式中  $\mu = \mathbf{c}_1^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{c}_1 / (\mathbf{c}_1^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{c}_1 \mathbf{a}_{sp}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_{sp} - |\mathbf{c}_1^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_{sp}|^2)$ , 为一常数, 设  $\mathbf{W} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{c}_1$  为一自适应波束形成的权矢量, 则  $|\mathbf{c}_1^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{c}_1|$  为该自适应波束形成的主瓣响应值, 假设零点约束位置与干扰位置不同, 则有  $|\mathbf{c}_1^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta_0)|$  和  $|\mathbf{c}_1^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta_1)|$  为零陷响应值, 因为  $\mathbf{a}(\theta_0)$  和  $\mathbf{a}(\theta_1)$  都被看作干扰成分, 波束形成会自适应在这两处形成零陷, 因此  $|\mathbf{c}_1^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta_0)|$  和  $|\mathbf{c}_1^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta_1)|$  都远远小于  $|\mathbf{c}_1^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{c}_1|$ , 而  $\mathbf{a}_{sp}$  为  $\mathbf{a}_s$  在  $\mathbf{a}(\theta_0)$  和  $\mathbf{a}(\theta_1)$  组成的空间中的投影,  $\theta_0$  和  $\theta_1$  又离得较远, 所以有  $|\mathbf{c}_1^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_{sp}|$  远远小于  $|\mathbf{c}_1^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{c}_1|$ , 由式(14)可得

$$\mathbf{W}_{\text{ELCMVB}} \approx \mu \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_{sp} \quad (15)$$

从上式可以看出, ELCMVB 的权矢量基本上和基于特征空间的波束形成器(ESB)<sup>[1,2]</sup> 的权矢量相同, 其性能不受零点约束位置的影响, 但没有考虑零点约束位置与干扰位置相同的情况, 不过由后面的计算机仿真结果可以看出, 当零点约束位置与干扰位置相同时, ELCMVB 的性能与在两者不相同时的性能差别很小。设 ELCMVB 的输出信干噪比为  $\text{SINR}_{\text{ELCMVB}}$ , ESB 的输出信干噪比为  $\text{SINR}_{\text{ESB}}$ , LCMVB 的输出信干噪比为  $\text{SINR}_{\text{LCMVB}}$ , 则  $\text{SINR}_{\text{ELCMVB}} \approx \text{SINR}_{\text{ESB}}$ , 而由以前的研究可得,  $\text{SINR}_{\text{ESB}} \geq \text{SINR}_{\text{LCMVB}}$ , 所以有  $\text{SINR}_{\text{ELCMVB}} \geq \text{SINR}_{\text{LCMVB}}$ , 即 ELCMVB 的性能优于 LCMVB 的性能。

下面分析一下  $\text{SINR}_{\text{ELCMVB}}$  与 GEIB 的输出信干噪比  $\text{SINR}_{\text{GEIB}}$  的关系。

- (1) 当零点约束位置与干扰位置离得较远时  
由前面的分析很容易得出

$$\mathbf{W}_{\text{GEIB}} \approx \mu \mathbf{R}^{-1} \hat{\mathbf{a}}_{sp} \quad (16)$$

在一般指向误差不是很大的情况下, 零点约束位置与干扰位置和期望信号位置离得都较远,  $\mathbf{a}_{sp} \approx \hat{\mathbf{a}}_{sp}$ , 此时 ELCMVB 的权矢量和 GEIB 的权矢量近似相等, 因此有

$$\text{SINR}_{\text{ELCMVB}} \approx \text{SINR}_{\text{GEIB}} \quad (17)$$

- (2) 当零点约束位置与干扰位置离得较近时

由文献[6]知, 当零点约束的方向与干扰方向接近时, GEIB 的性能会下降, 而 ELCMVB 的性能不受零点约束位置的影响, 所以有

$$\text{SINR}_{\text{ELCMVB}} \geq \text{SINR}_{\text{GEIB}} \quad (18)$$

- (3) 当零点约束位置与干扰位置相同时

此时修改的信号子空间与信号子空间相同, 由式(12)和式(13)可以得出

$$\text{SINR}_{\text{ELCMVB}} = \text{SINR}_{\text{GEIB}} \quad (19)$$

另外, 假设快拍数无穷多, 并且没有系统误差, 在指向误差为零时, 即  $\mathbf{a}(\theta_0) = \mathbf{a}_s$ , 由式(10), 式(12)和式(13)可得

$$\mathbf{W}_{\text{LCMVB}} = \mathbf{W}_{\text{GEIB}} = \mathbf{W}_{\text{ELCMVB}} \quad (20)$$

此时 3 个波束形成器的性能相同。

由以上的分析可知, ELCMVB 具有较好的波束形成性能, 并且不用计算修改的信号子空间。另外还应指出, 以上的分析是基于一个干扰和一个零点约束的情况来进行的, 由后面的计算机仿真结果表明, 以上分析的结果也适合于多个干扰和多个零点约束的情况。

#### 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 ELCMVB 的优越性能。在计算机仿真中, 阵列信号相关矩阵  $\mathbf{R}$  是用有限次快拍数据  $\mathbf{X}(t_i)$  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, 每一个仿真结果都由 100 次独立实验结果平均得到, 其中实线、“\*” 线和点划线分别为 ELCMVB, GEIB 和 LCMVB 的结果。假设阵列为 10 个阵元的等距线阵(ULA), 阵元间距为半波长。一个与期望信号不相关的窄带干扰信号来自  $40^\circ$ , 干噪比是 10dB, 期望信号的方向为  $0^\circ$ , 信噪比也是 10dB, 有一个零点约束。

设零点约束方向为  $60^\circ$ , 采样快拍数为 400, 输出信干噪比 (SINR) 随指向误差变化的曲线如图 1 所示。从图中可以看出, ELCMVB 和 GEIB 的性能曲线基本上相同, 它们的性能都优于 LCMVB 的性能。这和前面的分析结果是一致的, 因为这时零点约束位置与干扰位置离得较远, ELCMVB 的输出信干噪比与 GEIB 的输出信干噪比近似相等。

设零点约束方向为  $39^\circ$ , 图 2 为当采样快拍数为 400 时输出信干噪比 (SINR) 随指向误差变化的曲线。当指向误差为  $2^\circ$ , 输出信干噪比 (SINR) 随采样快拍数变化的曲线由图 3 给出。从这两个图中可以看出, ELCMVB 与 GEIB 相比具有较好的性能, 这是因为零点约束位置与干扰位置离得较近, GEIB 的性能下降, 而 ELCMVB 基本不受零点约束位置的影响。当指向误差为  $2^\circ$ , 采样快拍数为 400 时, 图 4 给出了阵列的自适应方向图。由图可见, LCMVB 在期望信号方向上形成有零陷, 这会引入期望信号对消, GEIB 对期望信号增益较小, 副瓣电平较高, 而 ELCMVB 具有较好的波束形状, 因而它也有较好的波束形成性能。

设指向误差为  $2^\circ$ , 采样快拍数为 400, 输出信干噪比 (SINR) 随零点约束方向变化的曲线如图 5 所示。从图中可以看出, 当零点约束位置与干扰位置离得较远时, ELCMVB 性能与 GEIB 近似相同。当零点约束位置与干扰位置离得较近时, ELCMVB 优于 GEIB。当零点约束位置与干扰位置相同时, ELCMVB 性能与 GEIB 性能也相同。另外还可看出, ELCMVB 的性能基本上不受零点约束位置的影响, 这都与本文第 3 节的分析结果相吻合。

设零点约束方向为  $39^\circ$ , 当无指向误差时, 输出信干噪

比 (SINR) 随采样快拍数变化的曲线如图 6 所示。可以看出 ELCMVB 与 GEIB 有相同的收敛特性, 其收敛速度都快于 LCMVB。

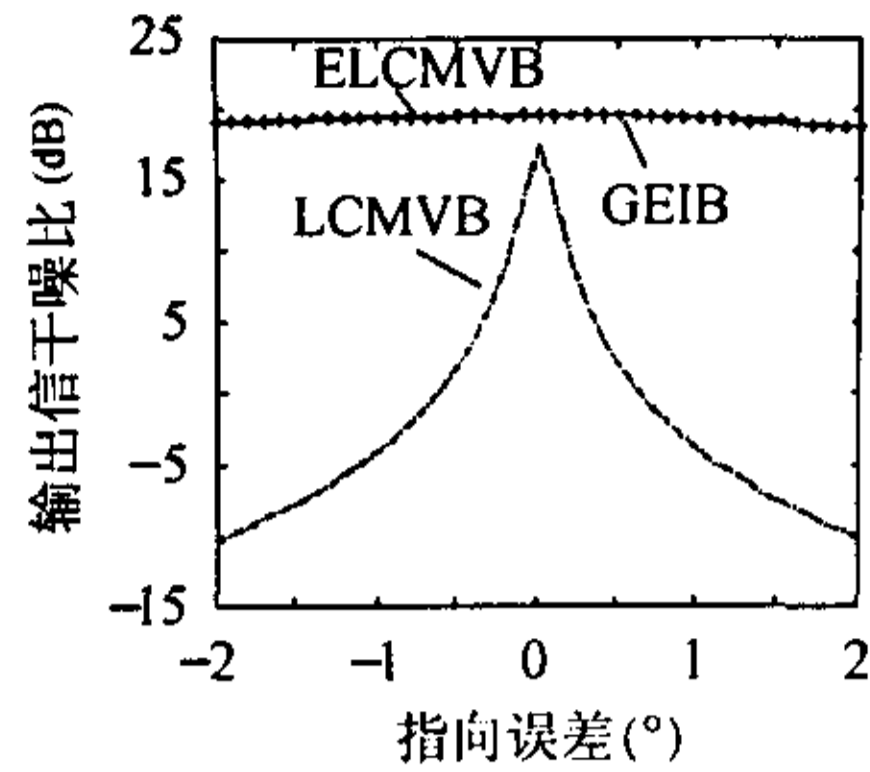


图 1 输出信干噪比随指向误差变化曲线

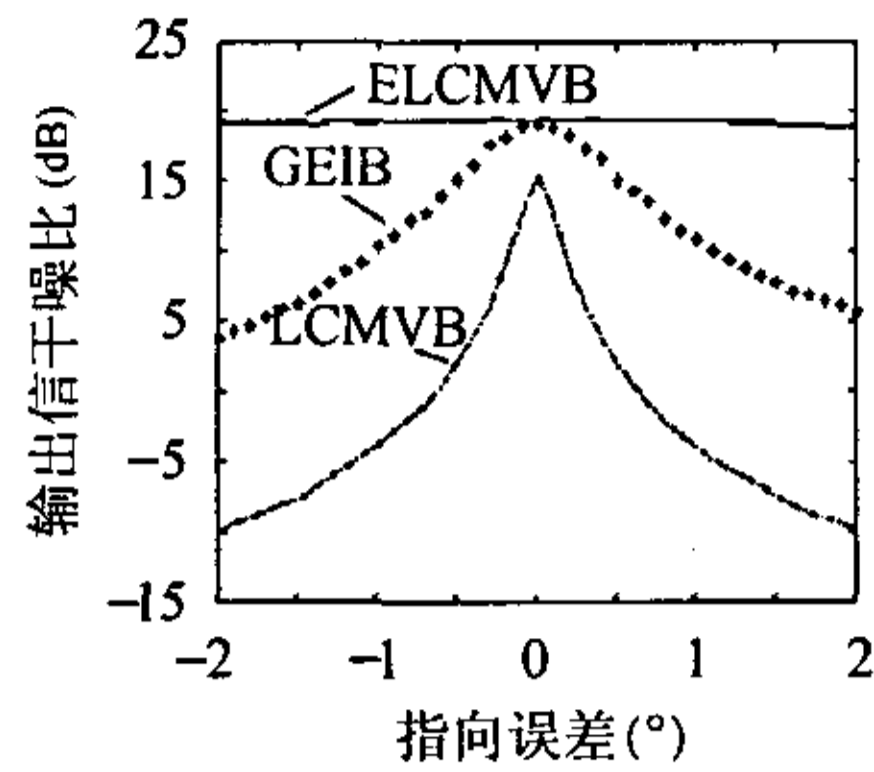


图 2 输出信干噪比随指向误差变化曲线

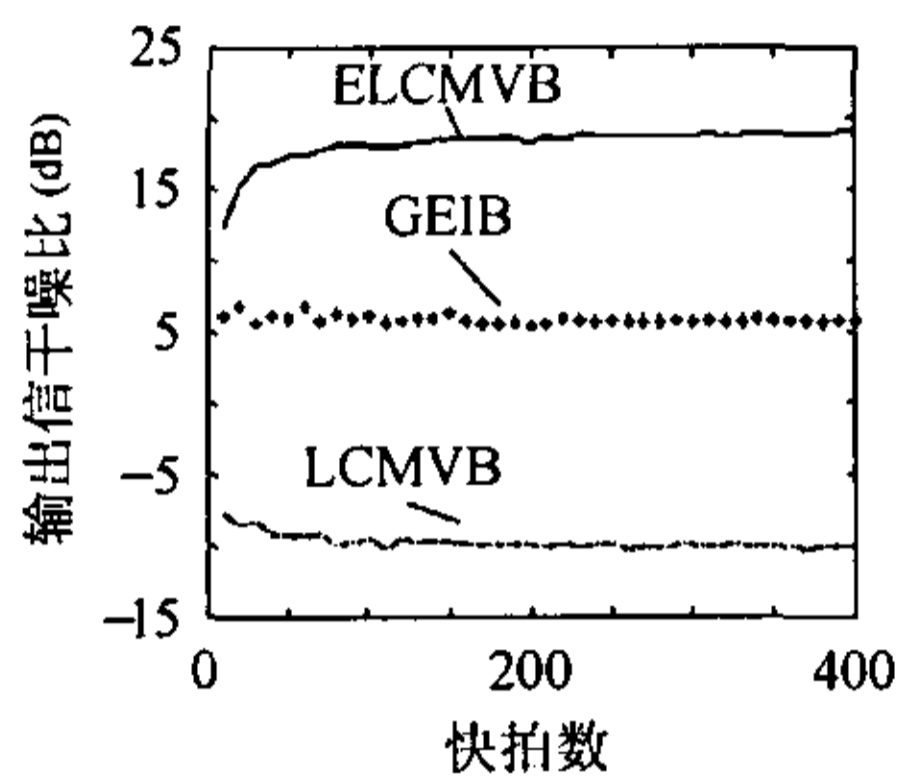


图 3 输出信干噪比随快拍数变化曲线

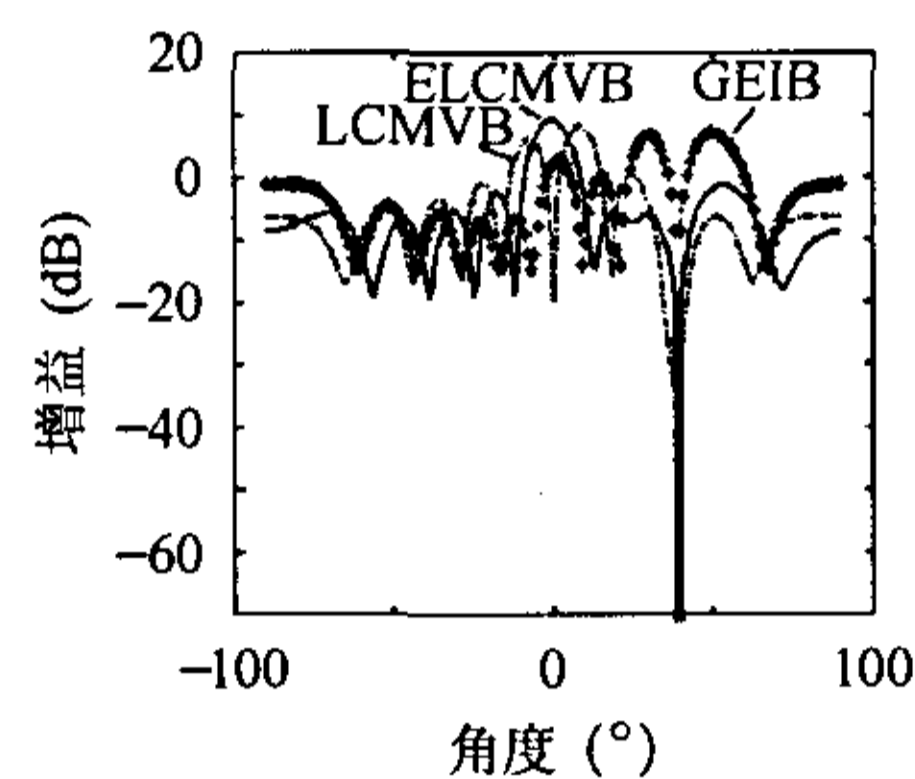


图 4 自适应方向图

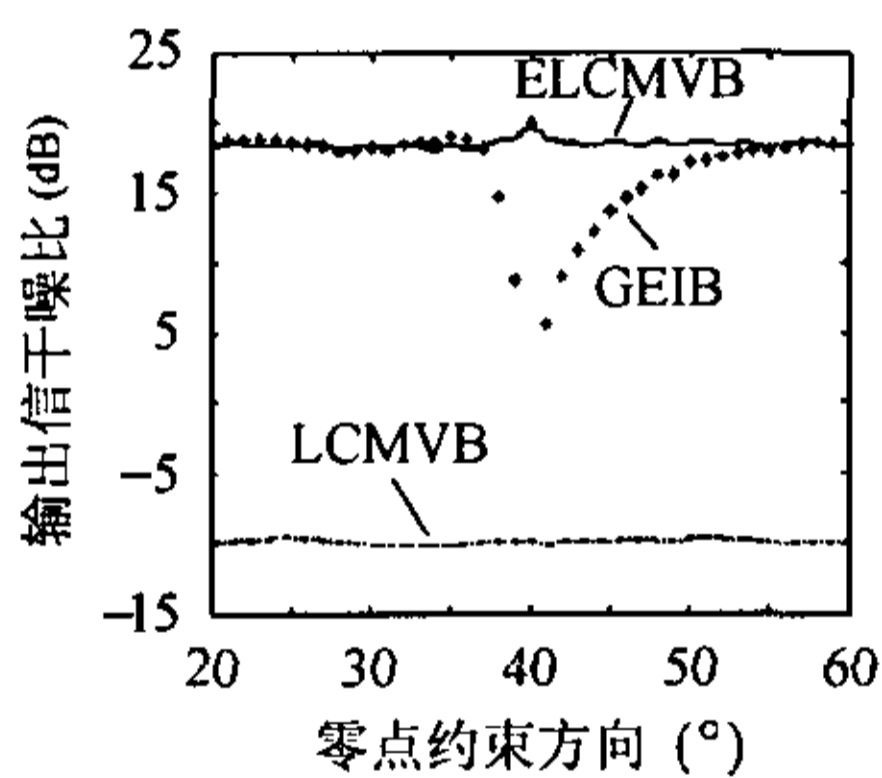


图 5 输出信干噪比随零点约束方向变化曲线

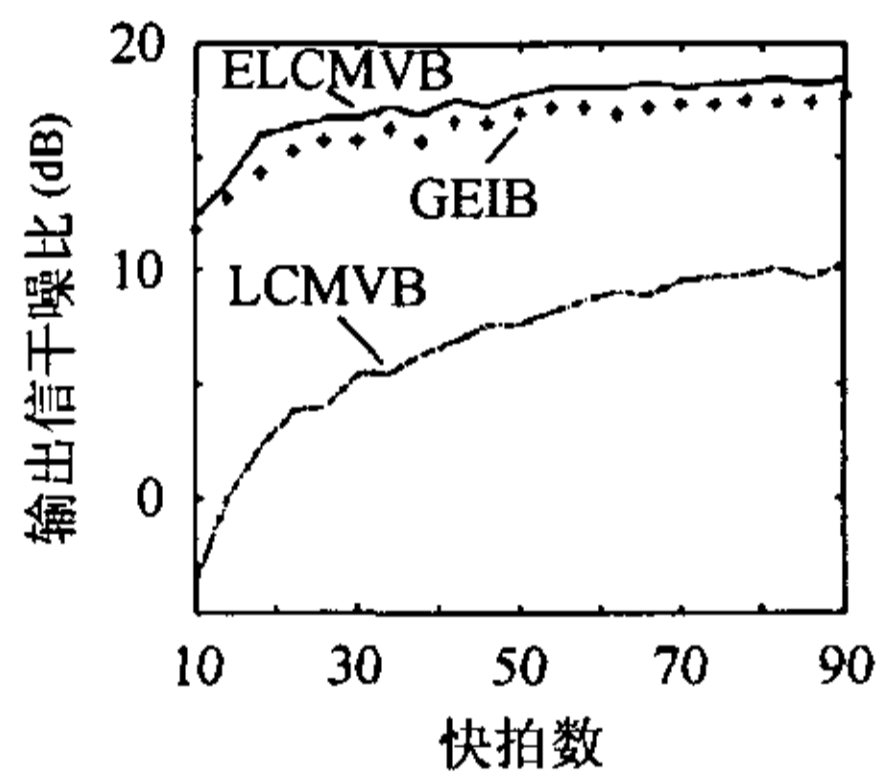


图 6 输出信干噪比随快拍数变化曲线

以上的仿真都是针对一个零点约束的情况来进行的, 下面来仿真一下多个零点约束的情况。假设有两个零点约束, 其方向分别为  $60^\circ$  和  $41^\circ$ , 图 7 给出了当采样快拍数为 400 时输出信干噪比 (SINR) 随指向误差变化的曲线。由曲线可以看出, 虽然 ELCMVB 和 GEIB 都优于 LCMVB, 但是 ELCMVB 具有比 GEIB 更好的性能。这显然是方向为  $41^\circ$  的零点约束与干扰方向离得较近的缘故, 与前面的分析结果相一致。

通过上面的计算机仿真结果可知, ELCMVB 具有很好的波束形成性能, 与 GEIB 相比, ELCMVB 不用计算修改的信号子空间, 避免了计算的不稳定性, 其波束形成性能基本上不受零点约束位置的影响, 不会因零点约束位置与干扰位置接近而出现性能下降。同时, 计算机仿真结果也验证了理论分析的正确性。

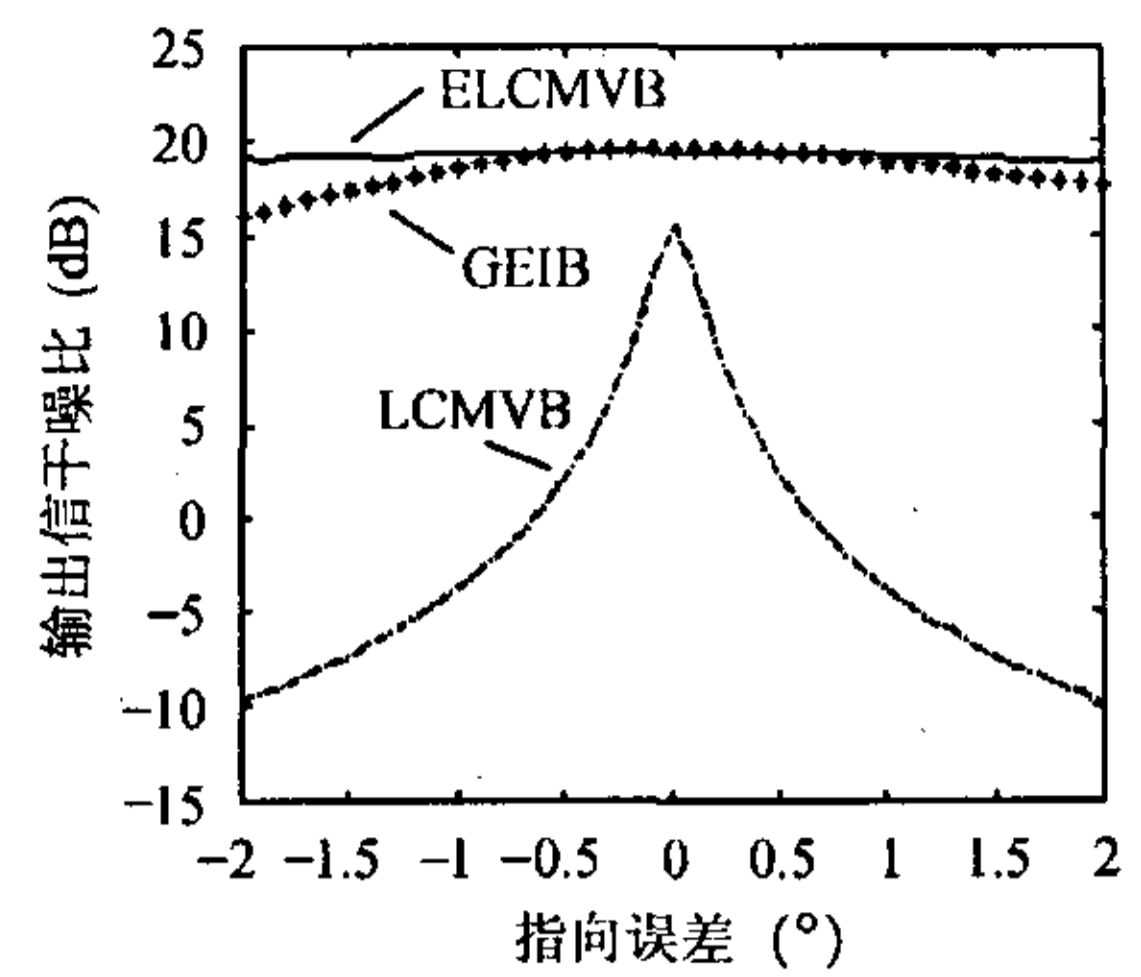


图 7 输出信干噪比随指向误差变化曲线

## 5 结论

本文提出了基于特征空间的线性约束最小方差波束形成器 (ELCMVB), 该波束形成器是把 LCMVB 的预定约束方向导向矢量向信号子空间投影, 再结合线性约束用 LCMVB 来得到权矢量。经分析表明, ELCMVB 具有优于 GEIB 和 LCMVB 的波束形成性能, 与 GEIB 相比, ELCMVB 不用计算修改的信号子空间, 避免了计算的不稳定性, 并且其波束形成性能不会因零点约束位置与干扰位置接近而下降。计算机仿真结果验证了 ELCMVB 的优越性能和理论分析的正确性。

## 参考文献

- [1] Feldman D D, Griffiths L J. A constrain projection approach for robust adaptive beamforming. in Proc. IEEE ICASSP, Mississauga, Imperial Press Limited, 1991: 1381 - 1384.
- [2] Chang L, Yeh C C. Performance of DMI and eigenspace-based beamformers. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1992, 40(11): 1336 - 1347.
- [3] Buckley K M, Griffiths L J. An adaptive generalized sidelobe canceller with derivative constraints. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1986, 34(3): 311 - 319.
- [4] Er M H. Linear antenna array pattern synthesis with prescribed broad null. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1990, 38(9): 1496 - 1498.
- [5] Yu J L, Yeh C C. Generalized eigenspace-based beamformers. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1995, 43(11): 2453 - 2461.
- [6] Yu J L, Leou M L. Transformation-based adaptive beamforming. *Signal Processing*, 2000, 80(2): 231 - 241.
- [7] Yeh C C, Wang W D. Coherent interference suppression by an antenna array of arbitrary geometry. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1989, 37(10): 1317 - 1322.

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、自适应信号处理等。

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。