

## 信号的二维到达角和极化估计<sup>1</sup>

周云钟 陈天麒

(电子科技大学电子工程系 成都 610054)

**摘要** 本文论述了一种基于子空间方法的多信号二维到达角和极化参数的估计算法。该方法采用了交叉偶极子阵元组成的 L 型阵列, 利用子阵输出信号数据矩阵中包含的信号空间的旋转不变性质, 借助于矩阵束方法求解出信号的二维到达角和极化参数的估计值, 并自动进行参数的配对。仿真结果证实了该算法的有效性。

**关键词** 二维到达角估计, 极化估计, 极化敏感阵列, 矩阵束

**中图分类号** TN911.23

### 1 引言

极化是反映雷达信号特征的重要参量之一, 在有源隐身等电子战技术中, 需要进行信号的极化侦察。因此, 利用阵列天线对信号的极化参量(包括信号的其余参量, 如到达角等)进行侦察的问题, 日益得到重视。

Li 和 Compton<sup>[1]</sup> 利用交叉偶极子均匀平面阵列, 采用 ESPRIT 算法估计对二维到达角和极化参量进行估计。但是他们的算法存在以下不足: 首先在配对各维估计参量时, 采用了搜索配对的方法, 搜索过程一方面使计算量增加, 另一方面可能会由于计算精度的原因导致错误的配对; 其次, 所采用的矩形平面阵列的阵列冗余度较大, 使计算量进一步增加。

在本文中我们采用 L 型阵列接收系统进行二维到达角和极化参量的估计, 这样的阵列结构阵列冗余度小, 更重要的是它具有分维特性, 因此可以将已有的基于均匀线阵的一维到达角和极化估计算法<sup>[2]</sup> 推广运用于二维到达角和极化的估计。

### 2 问题的描述

如图 1 所示为 L 型阵列的组成情况。整个阵列放置于  $x-y$  平面上, 由两个相互垂直的等距交叉偶极子均匀线阵组成。假设交点位于坐标系原点处, 并且两线阵分别与其  $+x$  轴和  $+y$  轴重合, 组成偶极子对的两个偶极子也分别沿  $x$  轴方向和  $y$  轴方向放置。 $x$ 、 $y$  轴方向的交叉偶极子对数均为  $M+1$ , 沿  $x$ 、 $y$  轴分别编号为  $0, 1, 2, \dots, M$ , 亦即  $x$  轴的第  $m$  个偶极子对的中心位于  $x-y$  平面上的  $(x_m, 0) = ((m-1)\delta, 0)$  处;  $y$  轴的第  $n$  个偶极子对的中心位于  $(0, y_n) = (0, (n-1)\delta)$  处, 其中  $\delta$  为相邻偶极子对的间距。阵列的相位参考点取在直角坐标系的原点。

设有  $d(d \leq M-1)$  个具有相同中心频率的窄带连续波信号以到达角  $(\theta_k, \psi_k)$  入射到阵列上, 假设每个入射信号都有任意的极化状态。如果阵列中全部使用短偶极子, 则意味着平行于  $x$  轴和  $y$  轴的偶极子的输出电压分别与电场的  $x$  分量和  $y$  分量成正比。若用  $u_{mx}(t)$ 、 $u_{my}(t)$

<sup>1</sup> 1996-12-30 收到, 1997-09-11 定稿

分别表示  $x$  轴上位于  $x_m = (m-1)\delta$  处的  $x$  向和  $y$  向的偶极子的输出信号, 用  $v_{nx}(t)$ 、 $v_{ny}(t)$  分别表示  $y$  轴上位于  $y_n = (n-1)\delta$  处的  $x$  向和  $y$  向的偶极子的输出信号, 可知

$$\begin{aligned} u_{mx}(t) &= \sum_{k=1}^d a_{xk} s_k(t) p_k^{m-1} + n_{mx}(t), & u_{my}(t) &= \sum_{k=1}^d a_{yk} s_k(t) p_k^{m-1} + n_{my}(t), \\ v_{nx}(t) &= \sum_{k=1}^d a_{xk} s_k(t) q_k^{n-1} + n_{nx}(t), & v_{ny}(t) &= \sum_{k=1}^d a_{yk} s_k(t) q_k^{n-1} + n_{ny}(t), \end{aligned} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} a_{xk} &= \sin \gamma_k \cos \theta_k \cos \phi_k \exp(j\eta_k) - \cos \gamma_k \sin \phi_k, \\ a_{yk} &= \sin \gamma_k \cos \theta_k \sin \phi_k \exp(j\eta_k) + \cos \gamma_k \cos \phi_k, \\ p_k &= \exp(j2\pi\delta \sin \theta_k \cos \phi_k / \lambda), \\ q_k &= \exp(j2\pi\delta \sin \theta_k \sin \phi_k / \lambda), \end{aligned}$$

$\gamma_k$ 、 $\eta_k$  ( $0 \leq \gamma_k \leq \frac{\pi}{2}$ ,  $-\pi \leq \eta_k \leq \pi$ ) 是描述信号极化状态的两个角参量;  $s_k(t) = E_k \exp[j(\omega_k t + \varphi_k)]$ ,  $E_k$  为信号幅度,  $\omega_k$  为信号中心角频率,  $\varphi_k$  为载波相角;  $n_{mx}(t)$ 、 $n_{my}(t)$ 、 $n_{nx}(t)$  和  $n_{ny}(t)$  均为阵元噪声, 设其为均值为 0, 方差为  $\sigma^2$  的高斯白噪声。

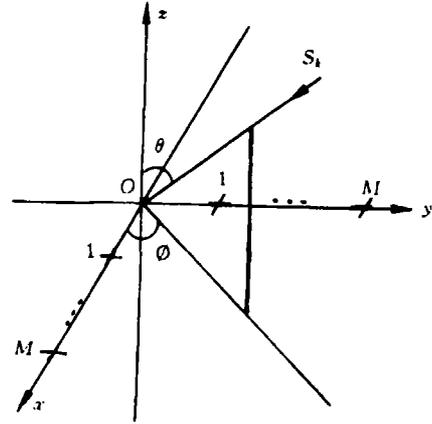


图 1 L 型阵列结构与信号到达角

将阵列划分为如下的子阵: 子阵 0 包含  $x$  轴上编号 0 至  $M-1$  的  $M$  个  $x$  向偶极子, 子阵 1 包含  $x$  轴上编号 1 至  $M$  的  $M$  个  $x$  向偶极子, 子阵 2 包含  $x$  轴上编号 0 至  $M-1$  的  $M$  个  $y$  向偶极子, 子阵 3 包含  $y$  轴上编号 1 至  $M$  的  $M$  个  $x$  向偶极子, 子阵 4 包含  $y$  轴上编号 1 至  $M$  的  $M$  个  $x$  向偶极子, 子阵 5 包含  $y$  轴上编号 0 至  $M-1$  的  $M$  个  $y$  向偶极子。各子阵的输出用  $M \times 1$  的列矢量  $\mathbf{z}_i(t)$  ( $i = 0, 1, \dots, 5$ ) 分别表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_0(t) &= [u_{0,x}(t) \ u_{1,x}(t) \ \cdots \ u_{M-1,x}(t)]^T = A_u \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}_0(t), \\ \mathbf{z}_1(t) &= [u_{1,x}(t) \ u_{2,x}(t) \ \cdots \ u_{M,x}(t)]^T = A_u F_1 \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}_1(t), \\ \mathbf{z}_2(t) &= [u_{0,y}(t) \ u_{1,y}(t) \ \cdots \ u_{M-1,y}(t)]^T = A_u G_1 \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}_2(t), \\ \mathbf{z}_3(t) &= [v_{0,x}(t) \ v_{1,x}(t) \ \cdots \ v_{M-1,x}(t)]^T = A_v \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}_3(t), \\ \mathbf{z}_4(t) &= [v_{1,x}(t) \ v_{2,x}(t) \ \cdots \ v_{M,x}(t)]^T = A_v F_2 \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}_4(t), \\ \mathbf{z}_5(t) &= [v_{0,y}(t) \ v_{1,y}(t) \ \cdots \ v_{M,y}(t)]^T = A_v G_2 \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}_5(t), \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $\mathbf{s}(t)$  为  $d \times 1$  的矢量:  $\mathbf{s}(t) = [s_1(t) s_2(t) \cdots s_d(t)]^T$ ,  $\mathbf{n}_i(t)$  ( $i = 0, 1, \dots, 5$ ) 为  $M \times 1$  维的噪声矢量; 而  $A_u$ 、 $A_v$  为  $M \times d$  的“到达角-极化矩阵”:

$$A_u = [a_{u1} \ a_{u2} \ \cdots \ a_{ud}], \quad A_v = [a_{v1} \ a_{v2} \ \cdots \ a_{vd}],$$

这里的  $M \times 1$  维矢量

$$\mathbf{a}_{uk} = [a_{xk} \ a_{xk} p_k \ \cdots \ a_{xk} p_k^{M-1}]^T, \quad \mathbf{a}_{vk} = [a_{yk} \ a_{yk} q_k \ \cdots \ a_{yk} q_k^{M-1}]^T.$$

$F_1, F_2, G_1, G_2$  分别为  $d \times d$  的对角阵:

$$\begin{aligned} F_1 &= \text{diag}(f_{11}, f_{12}, \dots, f_{1d}), f_{1k} = p_k; & F_2 &= \text{diag}(f_{21}, f_{22}, \dots, f_{2d}), f_{2k} = q_k; \\ G_1 = G_2 &= \text{diag}(g_1, g_2, \dots, g_d), & g_k &= \frac{a_{yk}}{a_{xk}} = \frac{\sin \gamma_k \cos \theta_k \sin \phi_k \exp(j\eta_k) + \cos \gamma_k \cos \phi_k}{\sin \gamma_k \cos \theta_k \cos \phi_k \exp(j\eta_k) - \cos \gamma_k \sin \phi_k}, \\ & & & k = 1, 2, \dots, d. \end{aligned} \quad (3)$$

假设在  $N$  个不同的时刻  $t_n (n = 1, 2, \dots, N)$  对所有阵元输出信号进行采样, 将这些时刻的采样值组成采样数据矩阵:

$$\begin{aligned} z_0 &= [z_0(t_1) \ z_0(t_2) \ \dots \ z_0(t_N)] = A_u S + N_0, \\ z_1 &= [z_1(t_1) \ z_1(t_2) \ \dots \ z_1(t_N)] = A_u F_1 S + N_1, \\ z_2 &= [z_2(t_1) \ z_2(t_2) \ \dots \ z_2(t_N)] = A_u G_1 S + N_2, \\ z_3 &= [z_3(t_1) \ z_3(t_2) \ \dots \ z_3(t_N)] = A_v S + N_3, \\ z_4 &= [z_4(t_1) \ z_4(t_2) \ \dots \ z_4(t_N)] = A_v F_2 S + N_4, \\ z_5 &= [z_5(t_1) \ z_5(t_2) \ \dots \ z_5(t_N)] = A_v G_2 S + N_5. \end{aligned}$$

这里的  $S$  为  $d \times N$  的数据矩阵:  $S(k, j) = [s_k(t_j)]$ ,  $N_k (k = 0, 1, \dots, 5)$  均为  $M \times N$  的噪声数据矩阵。

### 3 矩阵束方法求解到达角与极化参量联合估计问题

我们的问题可以表述为: 由采样数据矩阵  $Z_i$ , 计算矩阵  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $G_1$  和  $G_2$  的对角元素的值。为说明问题, 我们先讨论无噪声时的理想情况。

#### 3.1 无噪声的理想情况

这时,  $N_k = 0$ 。不妨假设  $M = N$ , 构成如下矩阵束:

$$\begin{aligned} Z_1 - \lambda Z_0 &= A_u (F_1 - \lambda I) S, & Z_2 - \mu Z_0 &= A_u (G_1 - \mu I) S, \\ Z_4 - \alpha Z_3 &= A_v (F_2 - \alpha I) S, & Z_5 - \beta Z_3 &= A_v (G_2 - \beta I) S. \end{aligned} \quad (4)$$

可见,  $\lambda = \lambda_i$  和  $\mu = \mu_j, i, j = 1, 2, \dots, d$  分别等于  $f_{1i}$  和  $g_{1j}$  时, 矩阵束  $Z_1 - \lambda Z_0$  和  $Z_2 - \mu Z_0$  的秩将分别降低一阶, 而  $\alpha = \alpha_i$  和  $\beta = \beta_j, i, j = 1, 2, \dots, d$  分别等于  $f_{2i}$  和  $g_{2j}$  时, 矩阵束  $Z_4 - \alpha Z_3$  和  $Z_5 - \beta Z_3$  的秩也将降低一阶。

首先进行以下形式的奇异值分解:

$$[Z_0 \ Z_1 \ Z_2] = U_1 \Sigma_1 V_1^H, \quad \begin{bmatrix} Z_0 \\ Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix} = U_2 \Sigma_2 V_2^H, \quad [Z_3 \ Z_4 \ Z_5] = U_3 \Sigma_3 V_3^H, \quad \begin{bmatrix} Z_3 \\ Z_4 \\ Z_5 \end{bmatrix} = U_4 \Sigma_4 V_4^H. \quad (5)$$

分别利用  $U_1$  和  $V_2$  中对应于  $d$  个较大奇异值的列矢量构成  $\hat{U}_1$  和  $\hat{V}_2$ , 从而得到  $d \times d$  的数据矩阵  $\hat{Z}_0$ 、 $\hat{Z}_1$  和  $\hat{Z}_2$  如下:

$$\left. \begin{aligned} \hat{Z}_0 &= (\hat{U}_1 \hat{U}_1^H) Z_0 (\hat{V}_2 \hat{V}_2^H) = \hat{U}_1 E_0 \hat{V}_2^H, & E_0 &= \hat{U}_1^H Z_0 \hat{V}_2; \\ \hat{Z}_1 &= (\hat{U}_1 \hat{U}_1^H) Z_1 (\hat{V}_2 \hat{V}_2^H) = \hat{U}_1 E_1 \hat{V}_2^H, & E_1 &= \hat{U}_1^H Z_1 \hat{V}_2; \\ \hat{Z}_2 &= (\hat{U}_1 \hat{U}_1^H) Z_2 (\hat{V}_2 \hat{V}_2^H) = \hat{U}_1 E_2 \hat{V}_2^H, & E_2 &= \hat{U}_1^H Z_2 \hat{V}_2; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

分别利用  $U_3$  和  $V_4$  中对应于  $d$  个较大奇异值的列矢量构成  $\hat{U}_3$  和  $\hat{V}_4$ , 从而得到  $d \times d$  的数据矩阵  $\hat{Z}_3$ 、 $\hat{Z}_4$  和  $\hat{Z}_5$  如下:

$$\left. \begin{aligned} \hat{Z}_3 &= (\hat{U}_3 \hat{U}_3^H) Z_3 (\hat{V}_4 \hat{V}_4^H) = \hat{U}_3 E_4 \hat{V}_4^H, & E_3 &= \hat{U}_3^H Z_3 \hat{V}_4; \\ \hat{Z}_4 &= (\hat{U}_3 \hat{U}_3^H) Z_4 (\hat{V}_4 \hat{V}_4^H) = \hat{U}_3 E_4 \hat{V}_4^H, & E_4 &= \hat{U}_3^H Z_4 \hat{V}_4; \\ \hat{Z}_5 &= (\hat{U}_3 \hat{U}_3^H) Z_5 (\hat{V}_4 \hat{V}_4^H) = \hat{U}_3 E_5 \hat{V}_4^H, & E_5 &= \hat{U}_3^H Z_5 \hat{V}_4; \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

这时, 矩阵束  $E_1 - \lambda E_0$  的广义特征值与矩阵束  $\hat{Z}_1 - \lambda \hat{Z}_0$  的广义特征值是一致的, 应等于  $f_{1i}$ ; 矩阵束  $E_2 - \mu E_0$  的广义特征值与矩阵束  $Z_2 - \mu Z_0$  的广义特征值是一致的, 应等于  $g_{1j}$ 。如果定义:

$$E_a = E_0^{-1} E_1, \quad E_b = E_0^{-1} E_2, \quad (8)$$

这时计算  $E_a$ 、 $E_b$  的特征值即可得到  $F_1$  和  $G_1$  对角元素的值。在无噪声的假设条件下,  $E_a$ 、 $E_b$  的特征向量是一样的, 这就意味着可以用同一个酉矩阵  $Q_2$  分别将它们三角化:

$$Q_2^H E_a Q_2 = R_1, \quad Q_2^H E_b Q_2 = R_2. \quad (9)$$

三角矩阵  $R_1$ 、 $R_2$  的主对角元素分别等于  $F_1$ 、 $G_1$  的对角元素。

同样, 矩阵束  $E_4 - \alpha E_3$  的广义特征值与矩阵束  $\hat{Z}_4 - \alpha \hat{Z}_3$  的广义特征值是一致的, 应等于  $f_{2i}$ ; 矩阵束  $E_5 - \beta E_3$  的广义特征值与矩阵束  $\hat{Z}_5 - \beta \hat{Z}_3$  的广义特征值是一致的, 应等于  $g_{2j}$ 。定义:

$$E_c = E_3^{-1} E_4, \quad E_d = E_3^{-1} E_5. \quad (10)$$

这时计算  $E_c$ 、 $E_d$  的特征值即可得到  $F_2$  和  $G_2$  对角元素的值。由于  $E_a$ 、 $E_b$  的特征向量是一样的, 也同样可以用一个酉矩阵  $Q_4$  分别将它们三角化:

$$Q_4^H E_c Q_4 = R_3, \quad Q_4^H E_d Q_4 = R_4. \quad (11)$$

三角矩阵  $R_3$ 、 $R_4$  的主对角元素分别等于  $F_2$ 、 $G_2$  的对角元素。

由上述步骤可知,  $R_1$ 、 $R_2$  对角线上处于同一位置的元素  $f_{1i}$ 、 $g_{1i}$  是一一对应的, 而  $R_3$ 、 $R_4$  对角线上处于同一位置的元素  $f_{2i}$ 、 $g_{2i}$  也是一一对应的。

### 3.2 有噪声的情况

在实际工程条件下, 噪声是不可避免的, 这样, 一方面为提高精度, 必须采样较多的数据, 即  $N > M$ , 故将不再为方阵; 另一方面, 需要消除噪声的影响。为此, 采用文献 [4] 中的方法做以下处理:

同样进行形如 (5) 式的奇异值分解, 分别利用  $U_1$ 、 $U_3$ 、 $V_2$  和  $V_4$  中对应于  $d$  个较大奇异值的列矢量构成  $\hat{U}_1$ 、 $\hat{U}_3$ 、 $\hat{V}_2$  和  $\hat{V}_4$ , 从而得到在总体最小二乘 (TLS) 意义上最优的近似数据阵  $\hat{Z}_i$ :

$$\begin{aligned} \hat{Z}_0 &= (\hat{U}_1 \hat{U}_1^H) Z_0 (\hat{V}_2 \hat{V}_2^H) = \hat{U}_1 E_0 \hat{V}_2^H, & \hat{Z}_1 &= (\hat{U}_1 \hat{U}_1^H) Z_1 (\hat{V}_2 \hat{V}_2^H) = \hat{U}_1 E_1 \hat{V}_2^H, \\ \hat{Z}_2 &= (\hat{U}_1 \hat{U}_1^H) Z_2 (\hat{V}_2 \hat{V}_2^H) = \hat{U}_1 E_0 \hat{V}_2^H, & \hat{Z}_3 &= (\hat{U}_3 \hat{U}_3^H) Z_3 (\hat{V}_4 \hat{V}_4^H) = \hat{U}_3 E_4 \hat{V}_4^H, \\ \hat{Z}_4 &= (\hat{U}_3 \hat{U}_3^H) Z_4 (\hat{V}_4 \hat{V}_4^H) = \hat{U}_3 E_4 \hat{V}_4^H, & \hat{Z}_5 &= (\hat{U}_3 \hat{U}_3^H) Z_5 (\hat{V}_4 \hat{V}_4^H) = \hat{U}_3 E_5 \hat{V}_4^H. \end{aligned}$$

值得注意的是, 这里的  $\hat{Z}_i$  均为方阵, 且噪声的影响被认为已基本得以消除。根据上述, (8)、(10) 式定义  $E_a$ 、 $E_b$ 、 $E_c$  和  $E_d$  后, 通过计算它们的特征值, 即可得出到达角与极化参数的近似估计值。

首先, 确定平面旋转阵  $Q_2$ 、 $Q_4$ , 使  $E_b$  和  $E_d$  分别三角化, 同时分别对  $E_a$  和  $E_c$  施以同样的变换:

$$\begin{aligned} Q_2^H E_b Q_2 &= R_2, & Q_2^H E_a Q_2 &= R'_1, \\ Q_4^H E_d Q_4 &= R_4, & Q_4^H E_c Q_4 &= R'_3. \end{aligned}$$

这里的  $R'_1$ 、 $R'_3$  是“近似的”上三角矩阵。

进一步确定平面旋转阵  $Q_{10}$  和  $Q_{30}$ , 分别使  $R'_1$ 、 $R'_3$  三角化:

$$Q_{10}^H R'_1 Q_{10} = R_1, \quad Q_{30}^H R'_3 Q_{30} = R_3.$$

$Q_{10}$  和  $Q_{30}$  的旋转应是“较小”的, 这样  $Q_1 = Q_2 Q_{10}$  和  $Q_3 = Q_4 Q_{30}$  分别使  $E_a$  和  $E_c$  三角化, 同时保持  $R_1$  和  $R_2$ ,  $R_3$  和  $R_4$  主对角线上同一位置的值仍然是配对的, 亦即给出了  $E_a$  和  $E_b$ 、 $E_c$  和  $E_d$  的配对特征值, 由此可以得出配对的参数估计值。

#### 4 算法模拟

为了验证所提估计方法的有效性, 我们进行了计算机仿真。阵列情况如图 1 所示, 交叉偶极子对数取为  $M = 5$ , 相邻交叉偶极子对的间距取为  $\lambda/2$ 。为方便计算, 所有入射信号的幅值均假设为 1, 信噪比  $\text{SNR}=20$ , 快拍数取为  $N=30$ 。

在仿真试验中, 我们仿真了以下两种情况: (1) 两个信号源的极化和方位角固定, 而俯仰角相对变化, 即  $\phi_1 = \phi_2 = 0^\circ$ ,  $\gamma_1 = \gamma_2 = 45^\circ$ ,  $\eta_1 = \eta_2 = 0^\circ$ , 而  $\theta_1 = 5^\circ$ ,  $\theta_2 = \theta_1 + \Delta\theta$ , 此时到达角与极化估计的方差随  $\Delta\theta_1$  变化的曲线如图 2(a) 所示; (2) 两个信号源的到达角固定, 而极化参量相对变化, 即  $\phi_1 = \phi_2 = 0^\circ$ ,  $\theta_1 = 5^\circ$ ,  $\theta_2 = 10^\circ$ ,  $\gamma_1 = 45^\circ$ ,  $\gamma_2 = 45^\circ - \Delta\gamma$ ,  $\eta_1 = \eta_2 = 0^\circ$ 。此时到达角与极化估计的方差随  $\Delta\gamma$  变化的曲线如图 2(b) 所示。这里采用了文献 [5] 中估计误差的定义。

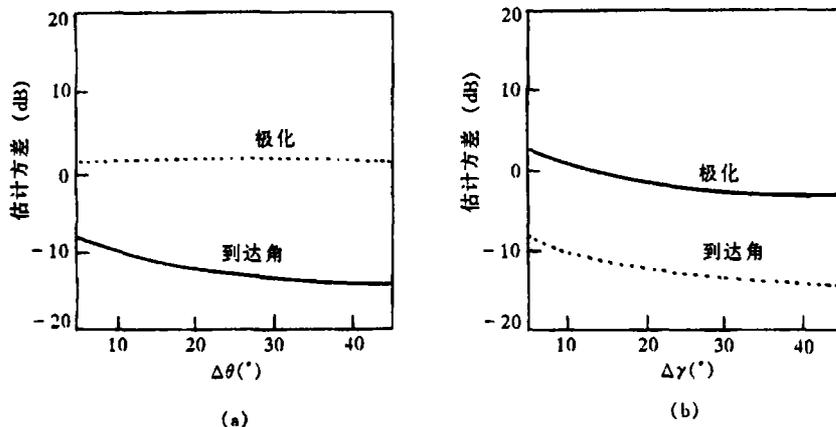


图 2 估计方差变化曲线

由以上的仿真结果可知, 此方法是可行的, 与文献 [1] 的方法比较, 估计效果相差不大, 而阵列结构得到简化, 计算量减少。

### 参 考 文 献

- [1] Li J, Compton R T. Two-dimensional angle and polarization estimation using ESPRIT algorithm, IEEE Trans. on AP, 1993, 39(9): 1376-1383.
- [2] 周云钟, 陈天麒. 多信号极化与到达角估计. 电子科技大学学报, 1996, 25(6): 574-578.
- [3] Compton R T. Adaptive Antennas. New Jersey: Prentice Hall, 1988, Chap. 3.
- [4] Van der Veen A J, Deprettere E F. Parallel VLSI matrix pencil algorithm for high resolution direction finding. IEEE Trans. on ASSP, 1991, 39(2): 383-394.
- [5] Li J, Compton R T. Angle and polarization estimation using ESPRIT with a polarization sensitive array. IEEE Trans.on AP, 1991, 39(9): 1376-1383.
- [6] Roy R, Kailath T. ESPRIT-estimation of signal paramaters via rotational invariance techniques. IEEE Trans on ASSP, 1989, 37(7): 984-995.

## 2D ANGLE AND POLARIZATION ESTIMATION

Zhou Yunzhong      Chen Tianqi

(*University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054*)

**Abstract** An algorithm for simultaneous estimation of two dimentional angle and polarization of multiple signals is proposed in this paper. Using an L-shaped array consisting of crossed dipoles, the algorithm exploits rotational invariance properties involved in array structure, so that both angle and polarization estimates may be computed via matrix pencil method, and these estimates are automatically paired. Simulation results are presented to verify the efficacy of the proposed algorithm.

**Key words** Two-dimentional(2D) angle estimation, Polarization estimation, Polarization sensitive array, Matrix pencil

周云钟: 男, 1967年生, 博士生, 目前研究兴趣为谱估计、阵列信号处理算法研究和实现、多维信号参数估计. 发表学术论文 10 余篇.

陈天麒: 男, 1938年生, 教授, 博士生导师, 长期从事电子对抗方面的研究工作. 发表学术论文 60 余篇.