

一种改进的卫星空时 DOA 矩阵算法

许培培^{1,2,3}, 龚文斌^{1,2}, 余金培^{1,2}, 刘会杰^{1,2}

(1. 上海微小卫星工程中心, 上海 200050; 2. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050;

3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 提出一种改进的基于信号空时特征结构的高分辨二维波达方向(DOA)估计方法——时空 DOA 矩阵方法。该方法在保持原时空 DOA 矩阵方法无需二维谱峰搜索和参数配对等优点的基础上, 通过构造 X 轴上的平移不变子阵列, 产生 2 个 DOA 矩阵, 利用这 2 个 DOA 矩阵的角度兼并曲线的差异, 解决了原时空 DOA 矩阵方法的角度兼并问题。由于 2 个子阵可以重复利用阵元, 该方法基本无冗余阵元和孔径损失。仿真结果证明了该方法的有效性。

关键词: 阵列天线; 智能天线; 波达方向估计; 空时二维处理

Improved Satellite Space-time DOA Matrix Algorithm

XU Pei-pei^{1,2,3}, GONG Wen-bin^{1,2}, YU Jin-pei^{1,2}, LIU Hui-jie^{1,2}

(1. Shanghai Engineering Center for Micro-satellite, Shanghai 200050, China; 2. Shanghai Institute of Micro-system and Information Technology Chinese Academy of Science, Shanghai 200050, China; 3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

【Abstract】 Based on the space-time eigenstructure of signals, an improved space-time Direction Of Arrival(DOA) estimation matrix method is proposed to estimate the high-resolution 2-D DOA of narrowband signals. The method obtains two DOA matrices through creating another sub array, which is the primary sub array shifted down X axes. Because these two matrices are different in angle ambiguity curves, the method can get accurate DOA; therefore advantages of the traditional space-time DOA matrix method, such as automatic parameter alignment and no need of 2-D search, are still available. Simulation results show that the method is effective.

【Key words】 array antenna; smart antenna; Direction Of Arrival(DOA) estimation; space-time 2-D processing

1 概述

目前, 多数卫星通信系统波束覆盖范围比较大, 抗干扰能力较差, 简单的同频大功率阻塞干扰就有可能使其瘫痪, 因此, 迅速准确地确定干扰源的空间位置即波达方向(Direction Of Arrival, DOA)估计并采用自适应调零等手段来有效抑制干扰, 是卫星通信系统的一项基本电子防护要求。作为自适应调零必备的先验知识——干扰信号到达角的估计, 其准确度和实时性制约着卫星自适应调零的准确性和实时性。因此, 寻找一种快速准确的 DOA 估计算法成为卫星通信系统抗干扰课程的重要问题。

一般的二维 DOA 估计算法, 如二维 MUSIC 类^[1-2]和二维 ESPRIT 类^[3]方法等, 都不可避免地遇到诸如二维谱峰搜索、非线性优化、分维处理及参数配对等难题, 而且与一维问题不同, 二维 DOA 估计必须借助平面阵或立体阵, 阵元数较多, 因此, 计算量大、存储量巨大, 给算法的实用性造成了不小的障碍。

波达方向矩阵法(DOA 矩阵法)^[4]比较有效地克服了上述问题, 该算法在整个估计过程中不需要任何寻根搜索, 计算量小, 参数自动配对, 利用空间平滑技术还能进行相干源的 DOA 估计, 但该算法的缺点是当入射信号存在一定的角度关系时, 会发生角度兼并, 无法估计出发生角度兼并的信号的正确来向。而且该算法需要通过双平行线阵、匹配子阵等特殊的、规则的阵列结构才能实现二维 DOA 估计, 实际上是以冗余子阵为代价换取其他方面的优势, 因此, 阵列孔径损失大, 阵元利用率低, 阵元间互耦加剧, 设备的成本、体积

和复杂性增加。此外, 阵元的精确校正往往十分困难, 无法精确保证两子阵列之间的平行度和一致性。文献[5-6]在 DOA 矩阵法的基础上提出了时空 DOA 估计方法, 该方法利用空时二维处理补充空域信息的不足, 降低对阵列结构的约束, 提高算法的抗噪声能力, 该方法不需要双平行线阵, 无冗余阵元和孔径损失, 对阵元误差并不敏感。但是该算法也存在角度兼并问题。

本文在研究 DOA 矩阵法和时空 DOA 矩阵法的基础上, 给出一种新的 DOA 估计算法, 即改进的时空 DOA 矩阵法, 该方法在保持原时空 DOA 矩阵方法无需二维谱峰搜索和参数配对等优点的基础上, 通过构造 X 轴上的平移不变子阵列, 产生 2 个 DOA 矩阵, 利用这 2 个不同的 DOA 矩阵进行 DOA 估计, 解决了原时空 DOA 矩阵方法的角度兼并问题。由于 2 个子阵可以重复利用阵元, 构造 X 轴的平移子阵只需要额外的 2 个阵元, 因此该方法基本无冗余阵元和孔径损失, 而且克服了 DOA 矩阵法角度兼并问题, 仿真结果证明该算法在二维 DOA 估计时的有效性。

2 时空波达方向矩阵法

时空波达方向矩阵法在 DOA 矩阵法的基础上, 采用空时二维处理技术, 除了利用阵列天线携带的空域信息外, 还充分地利用信号本身的时域信息, 在时空域中衍生出大量的

作者简介: 许培培(1984 -), 女, 硕士, 主研方向: 卫星通信, DOA 估计; 龚文斌, 研究员; 余金培、刘会杰, 研究员、博士生导师
收稿日期: 2010-02-20 **E-mail**: xupei309@163.com

虚拟阵元，放松了 DOA 矩阵法对阵列的约束，而且无冗余阵元和孔径损失，大大提高了阵元利用率。

时空 DOA 矩阵法的提出是基于虚拟双平行线阵的，它由位于 X 轴上的阵元间距为 d_x 的 $M-1$ 元均匀线阵和一个位于 Y 轴上的导引阵元 x_M 组成，阵列结构如图 1 所示。

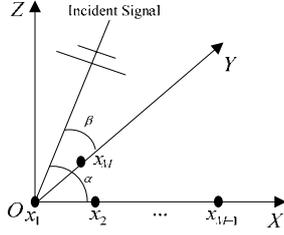


图 1 虚拟双平行线阵结构

x_M 与 X 轴的间距为 d_y 。假设有 D 个波长为 λ 的窄带信号从角度 (α_i, β_i) , $i=1,2,\dots,D$ 入射，则各阵元上的观测信号为：

$$x_m(t) = \sum_{i=1}^D s_i(t) \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda}(m-1)d_x \cos \alpha_i\right] + n_m(t) \quad (1)$$

$m=1,2,\dots,M-1$

$$x_M(t) = \sum_{i=1}^D s_i(t) \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda}d_y \cos \beta_i\right] + n_M(t) \quad (2)$$

假设信号源 $s_k(t)$ 之间互不相关，各阵元间的噪声 $n_i(t)$ 和信号 $s_k(t)$ 之间也互不相关，阵列接收数据可以写成：

$$x(t) = As(t) + n(t) \quad (3)$$

其中：

$$A = [a_1, a_2, \dots, a_D] \quad (4)$$

$$a_i = [a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{iM}(k)]^T, \quad i=1,2,\dots,D \quad (5)$$

$$a_{im} = \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda}(m-1)d_x \cos \alpha_i\right], \quad m=1,2,\dots,M-1 \quad (6)$$

$$a_{iM} = \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda}d_y \cos \beta_i\right] \quad (7)$$

定义 $x_M(t)$ 与各阵元的相关函数为：

$$r_{x_i x_M}(\tau) = E\left\{x_i\left(t+\frac{\tau}{2}\right)x_M^*\left(t-\frac{\tau}{2}\right)\right\}, \quad \tau \neq 0, m=1,2,\dots,M \quad (8)$$

从 X 轴上的线阵中任选一阵元 $x_l(t)$, ($1 \leq l \leq M-1$)，定义 $x_l(t)$ 与各阵元输出的相关函数：

$$r_{x_l x_m}(\tau) = E\left\{x_l\left(t+\frac{\tau}{2}\right)x_m^*\left(t-\frac{\tau}{2}\right)\right\}, \quad \tau \neq 0, m=1,2,\dots,M \quad (9)$$

令：

$$r_X(\tau) = [r_{x_1 x_M}(\tau), r_{x_2 x_M}(\tau), \dots, r_{x_{M-1} x_M}(\tau)]^T \quad (10)$$

$$r_Y(\tau) = [r_{x_1 x_1}(\tau), r_{x_2 x_2}(\tau), \dots, r_{x_{M-1} x_{M-1}}(\tau)]^T \quad (11)$$

对 $r_X(\tau)$ 、 $r_Y(\tau)$ 进行 L 个伪快拍采样，令 $\tau = T_s, 2T_s, \dots, LT_s$ ，得到伪快拍矩阵：

$$X = [r_X(T_s), r_X(2T_s), \dots, r_X(LT_s)] \quad (12)$$

$$Y = [r_Y(T_s), r_Y(2T_s), \dots, r_Y(LT_s)] \quad (13)$$

定义时空 DOA 矩阵 R_{TS} ，式中 $[\bullet]^\#$ 表示伪逆：

$$R_{TS} = Y \cdot [X]^\# \quad (14)$$

只要 A 满秩， Φ 无相同对角元素，有下式成立：

$$R_{TS} A = A \Phi \quad (15)$$

其中， Φ 为 $D \times D$ 对角矩阵：

$$\Phi = \text{diag} \left\{ \begin{matrix} a_{11}^* & a_{21}^* & \dots & a_{D1}^* \\ a_{1M}^* & a_{2M}^* & \dots & a_{DM}^* \end{matrix} \right\} = \text{diag} \left\{ e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d_x \cos \beta_1 - j\frac{2\pi}{\lambda}(l-1)d_x \cos \alpha_1}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d_x \cos \beta_D - j\frac{2\pi}{\lambda}(l-1)d_x \cos \alpha_D} \right\} \quad (16)$$

因此，通过 R_{TS} 的特征分解可以得到 A 和 Φ ，之后，可以通过第 i 个信号的导向矢量 a_i 的前 $M-1$ 个元素求出 a_i ，然后从同一矢量的第 M 个元素 a_{iM} 或 $\Phi(i,i)$ 中求出对应的 β_i 。

3 时空波达方向矩阵法的角度兼并问题

时空波达方向矩阵法作为 DOA 矩阵法的改进算法，虽然在 2 个信号具有相同的 α 角(即与 X 轴的夹角)时不会使得方向矩阵 A 降秩，但是当入射信号之间存在一定的角度关系时，还是会发生角度兼并问题。虽然文献[5]称时空波达方向矩阵法解决了角度兼并问题，但实际上并不是这样的，下面的分析仿真证明了这一点。

所谓角度兼并问题是指当 Φ 中对角元素存在相同值时，会导致 R 特征值分解的不唯一性，使 Φ 中 2 个相同的对角元素所对应的特征向量不等于方向向量，从而导致信号 DOA 估计错误，这种现象称为角度兼并。

因此，在时空波达方向矩阵算法中，要求 Φ 中对角元素不同，即：

$$e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d_x \cos \beta_m - j\frac{2\pi}{\lambda}(l-1)d_x \cos \alpha_m} \neq e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d_x \cos \beta_n - j\frac{2\pi}{\lambda}(l-1)d_x \cos \alpha_n} \quad (17)$$

$m, n=1,2,\dots,D, m \neq n$

在阵列天线方向向量不发生方向模糊的情况下，又假设 $d_y = d_x$ ，上式即：

$$\cos \beta_m - (l-1) \cos \alpha_m \neq \cos \beta_n - (l-1) \cos \alpha_n \quad (18)$$

取 $l=1$ ，分别取 $\beta_m = 10^\circ, 30^\circ, \dots, 170^\circ$ 为初始条件，得到图 2 的仿真结果。取 $l=2$ ，分别取 $(\alpha_m, \beta_m) = (20, 110)$ 、 $(20, 70)$ 、 $(45, 45)$ 、 $(80, 10)$ 、 $(120, 30)$ 为初始条件，得到图 3 的仿真结果。取 $l=3$ ，分别取 $(\alpha_m, \beta_m) = (5, 85)$ 、 $(35, 55)$ 、 $(65, 25)$ 、 $(90, 0)$ 、 $(125, 35)$ 为初始条件，得图 4 的仿真结果。

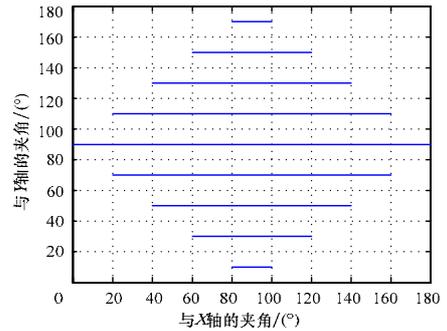


图 2 $l=1$ 时的角度兼并曲线

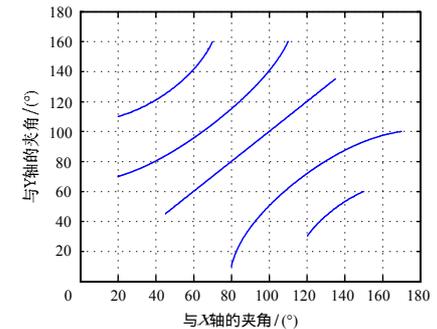


图 3 $l=2$ 时的角度兼并曲线

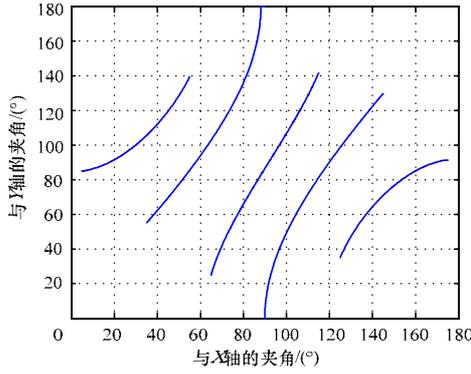


图4 $l=2$ 时的角度兼并曲线

图2~图4中画出了会产生角度兼并的一系列曲线,即任意2个入射源的波达方向不能同时落在同一条曲线上或曲线附近,否则时空DOA算法就无法给出它们的正确估计。图中仅画出了部分角度兼并曲线,实际上这样的曲线充满整个 $\alpha-\beta$ 面,反映在空间就是一系列的曲面。

判断时空DOA矩阵法是否发生角度兼并问题,理论上可以分析 R_{TS} 特征分解之后的 D 个大的特征值有无相同的值,如果没有相同的特征值,则没有发生角度兼并。如果有相同的特征值,则这些特征值对应的特征向量将不等于信号的导引向量,其对应的信号发生了角度兼并。但是,在实际情况下,通过分析特征值的方法并不容易判断,因为噪声的存在,原本相同的特征值可能会存在偏差,而且偏差的大小又不是固定不变的,所以无法根据特征值是否相等来直接判断是否发生了角度兼并。当存在多个接收信号,且信号之间的角度兼并问题十分复杂时,采用时空DOA矩阵法进行DOA估计显然是不可靠的。

4 改进的时空DOA矩阵算法

如图5所示,将阵列划分成2个子阵列,由阵元 $[x_1, x_2, \dots, x_{M-1}, x_M]$ 构成子阵列1,由阵元 $[x_2, x_3, \dots, x_{M-1}, x_{M+1}, x_{M+2}]$ 构成子阵列2。子阵列2可以看成是由子阵列1沿 X 轴平移所得。则阵列接收数据如图5所示。

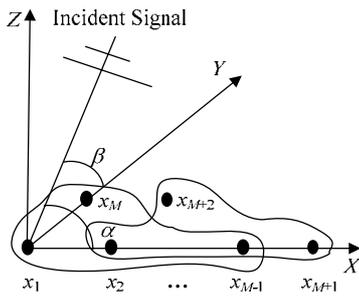


图5 双虚拟双平行线阵结构

$$x_m(t) = \sum_{i=1}^D s_i(t) \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} (m-1) d_x \cos \alpha_i \right] + n_m(t), \quad m=1, 2, \dots, M-1 \quad (19)$$

$$x_M(t) = \sum_{i=1}^D s_i(t) \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} d_y \cos \beta_i \right] + n_M(t) \quad (20)$$

$$x_{M+1}(t) = \sum_{i=1}^D s_i(t) \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} d_x M \cos \alpha_i \right] + n_{M+1}(t) \quad (21)$$

$$x_{M+2}(t) = \sum_{i=1}^D s_i(t) \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} d_x \cos \alpha_i \right] \cdot \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} d_y \cos \beta_i \right] + n_{M+2}(t) \quad (22)$$

子阵列1上阵元接收到的数据记为 $x_1(t)$,子阵列2上接收到的数据记为 $x_2(t)$ 。

$$x_1(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_{M-1}(t), x_M(t)]^T \quad (23)$$

$$x_2(t) = [x_2(t), \dots, x_{M-1}(t), x_{M+1}(t), x_{M+2}(t)]^T \quad (24)$$

如前面所述,假设信号源 $s_k(t)$ 之间互不相关,各阵元间的噪声 $n_i(t)$ 和信号 $s_k(t)$ 之间互不相关,即:

$$r_{n_i n_j}(\tau) = E \left\{ n_i \left(t + \frac{\tau}{2} \right) n_j^* \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \right\} = \sigma^2 \delta(\tau) \delta(i-j) \quad (25)$$

$$r_{n_i s_k}(\tau) = E \left\{ n_i \left(t + \frac{\tau}{2} \right) s_k^* \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \right\} = 0 \quad (26)$$

$$r_{s_k s_l}(\tau) = E \left\{ s_k \left(t + \frac{\tau}{2} \right) s_l^* \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \right\} = r_{s_k s_k}(\tau) \delta(k-l) \quad (27)$$

其中, $(\bullet)^*$ 表示共轭。这时,阵列接收数据可以写成:

$$x_1(t) = A s(t) + N_1(t) \quad (28)$$

$$x_2(t) = A \Phi s(t) + N_2(t) \quad (29)$$

其中:

$$A = [a_1, a_2, \dots, a_D] \quad (30)$$

$$a_i = [a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{iM}(k)]^T, \quad i=1, 2, \dots, D \quad (31)$$

$$a_{im} = \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} (m-1) d_x \cos \alpha_i \right], \quad m=1, 2, \dots, M-1 \quad (32)$$

$$a_{iM} = \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} d_y \cos \beta_i \right] \quad (33)$$

$$s(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_D(t)]^T \quad (34)$$

$$N_1(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_{M-1}(t), n_M(t)]^T \quad (35)$$

$$N_2(t) = [n_2(t), n_3(t), \dots, n_{M-1}(t), n_{M+1}(t), n_{M+2}(t)]^T \quad (36)$$

$$\Phi = \text{diag} \left\{ \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} d_x \cos \alpha_1 \right), \dots, \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} d_x \cos \alpha_D \right) \right\} \quad (37)$$

对于子阵列1采用时空波达方向矩阵法进行DOA估计,具体推导过程如上节所述,可得到时空波达方向矩阵:

$$R_{TS} = Y \cdot [X]^\# \quad (38)$$

其中:

$$X = AS \quad (39)$$

$$Y = A \Phi S \quad (40)$$

$$S = [r_s(T_s), r_s(2T_s), \dots, r_s(LT_s)] \quad (41)$$

$$\Phi = \text{diag} \left\{ \frac{a_{11}^*}{a_{1M}^*}, \frac{a_{21}^*}{a_{2M}^*}, \dots, \frac{a_{D1}^*}{a_{DM}^*} \right\} =$$

$$\text{diag} \left\{ e^{j \frac{2\pi}{\lambda} d_x \cos \beta_1 - j \frac{2\pi}{\lambda} (l-1) d_x \cos \alpha_1}, \dots, e^{j \frac{2\pi}{\lambda} d_y \cos \beta_D - j \frac{2\pi}{\lambda} (l-1) d_x \cos \alpha_D} \right\} \quad (42)$$

对 R_{TS} 进行特征分解得到 R_{TS} 的特征值 Φ^* 和特征向量 A_1 ,通过上节分析知道,如果不发生角度兼并问题,通过 Φ^* 的 D 个较大的特征值和它们对应的 A_1 中的特征向量,可以得出正确的DOA估计。但是如果发生角度兼并问题, Φ^* 中相同的特征值对应的 A_1 特征向量将不等于导引向量 A 。

观察式(33)和式(34),对这两式构造波达方向矩阵 R ,即

$$R = R_{x_2 x_1} \cdot R_{x_1 x_1}^\# \quad (43)$$

其中:

$$R_{x_2 x_1} = E [x_2(t) x_1^H(t)] = A \Phi R_s A^H \quad (44)$$

$$R_{x_1 x_1} = E [x_1(t) x_1^H(t)] = A R_s A^H + \delta^2 I = R_{x_1 x_1 0} + \delta^2 I \quad (45)$$

其中, R_s 为信号源的自相关矩阵:

$$R_s = E[s(t)s^H(t)] \quad (46)$$

对 R 进行特征分解, R 的 D 个较大的特征值对应着 Φ 的对角元素, 如式(42)所示, 如上节角度兼并问题的分析, 当 Φ 中不存在相同的对角元素, 即:

$$\exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}d_x \cos \alpha_m\right) \neq \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}d_x \cos \alpha_n\right) \quad (m \neq n) \quad (47)$$

利用 R 进行 DOA 估计时, 就不会发生角度兼并问题。因此, 当 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_D$ 没有相同的角度时, 不会发生角度兼并问题, 通过对 R 分解得到的特征值, 可以得出 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_D$, 再通过导引矢量 A 的第 M 个元素 $a_{iM} = e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d_x \cos \beta_i}$ 即可得到对应的 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_D$ 。

如果 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_D$ 中存在相同的角度, 除了相同的角度外, 其余的角度估计都是正确的。再对 R_{TS} 进行特征分解, 取 $l=1$ 得到时空 DOA 估计的结果。从时空 DOA 矩阵算法的角度兼并问题的仿真结果由图 2 可知, 没有任何一条兼并曲线是垂直 α 轴的, 所以, 当 2 个信号与 X 轴夹角相同时, 这 2 个信号肯定不在时空 DOA 估计时发生角度兼并。换句话说, 就是任何 2 个信号不可能同时在时空 DOA 矩阵估计和式(48)所示的 DOA 矩阵估计中同时发生角度兼并。并且时空 DOA 估计的信号与 Y 轴的夹角一定是正确的, 式(48)所示的 DOA 估计的信号与 X 轴的夹角一定是正确的。因此, 通过对比 2 次得到的 DOA 估计结果, 就可以很容易得到正确的信号到达角。

最后, 将改进的时空 DOA 矩阵法总结如下:

(1)构造 DOA 矩阵 R 对 R 进行特征分解 得到一组 DOA 估计结果, 如果这组结果中不存在任何 2 个信号与 X 轴的夹角相同, 则这组结果就是正确的信号到达角。

(2)如果在上个步骤中存在信号与 X 轴的夹角相同, 则这些信号与 Y 轴的夹角存在错误。这时构造时空 DOA 矩阵 R_{TS} , 取 $l=1$ 对 R_{TS} 进行特征分解, 得到另外一组 DOA 估计结果。

(3)在第 1 组中去掉与 X 轴夹角相同的信号的 β 角, 对比时空 DOA 估计的结果, 找出这些相同的 α 角所对应的 β 角, 形成最后的正确的信号到达角估计结果。

采用这种改进的时空 DOA 矩阵法进行信号的 DOA 估计, 当选取 $l > 1$ 时, 也可以得到正确的估计结果, 只不过信号之间的角度兼并问题比较复杂时, 还要结合 Φ 才能得到正确的结果。

5 仿真结果

假设有 3 个不相干的信号源分别从 (40,100)、(100,100)、(60,60) 3 个方向入射, 所有信号的信噪比为 -5 dB, 伪快拍数为 100。采用时空 DOA 矩阵法, 阵列结构见图 1 所示, $M=4$, l 分别为 1、2、3 时估计结果如图 6~图 8 所示。

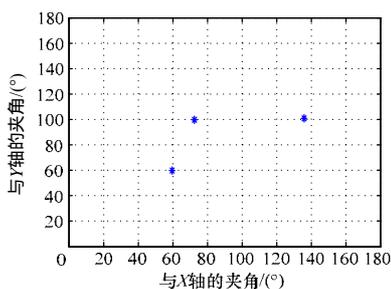


图 6 $l=1$ 时的时空 DOA 矩阵法估计结果

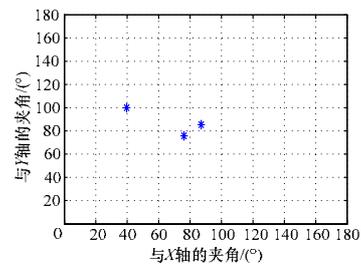


图 7 $l=2$ 时的时空 DOA 矩阵法估计结果

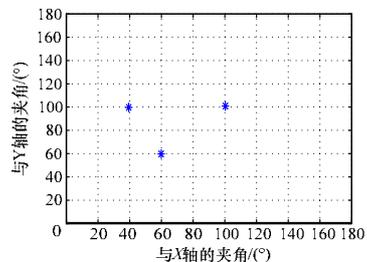


图 8 $l=3$ 时的时空 DOA 矩阵法估计结果

从仿真结果可以看出, 采用时空 DOA 矩阵法, 3 次的估计结果各不相同, 不容易判断哪次的估计结果才是没有发生角度兼并的正确结果。实际上, 当 $l=1$ 时, s_1 和 s_2 发生了角度兼并, 当 $l=2$ 时, s_2 和 s_3 发生了角度兼并, 当 $l=3$ 时, 3 个信号的来波方向才估计正确。

采用改进时空 DOA 估计算法, 信号来向和仿真条件如前所示, 因为 3 个信号来波方向与 X 轴的夹角彼此不同, 所以采用改进算法的第 1 步就可以得到正确的估计结果。

假设有 3 个不相干的信号源分别从 (60,100)、(100,100)、(60,60) 3 个方向入射, 其他仿真条件不变。

当采用改进的时空 DOA 矩阵法进行分析时, 理论上, 当进行完第 1 步矩阵 DOA 估计是: s_1 和 s_3 会发生角度兼并, 再采用时空 DOA 估计时, s_1 和 s_2 会发生角度兼并, 将 2 次得到的结果进行对比, 取第 1 种结果对信号与 X 轴的夹角的估计, 取第 2 种结果对信号与 Y 轴的夹角的估计。仿真结果如图 9、图 10 所示。

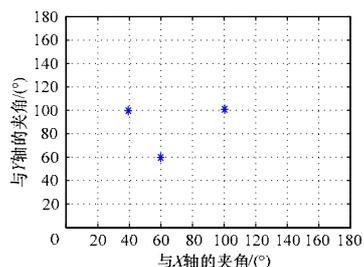


图 9 $l=3$ 时改进的时空 DOA 矩阵法估计结果

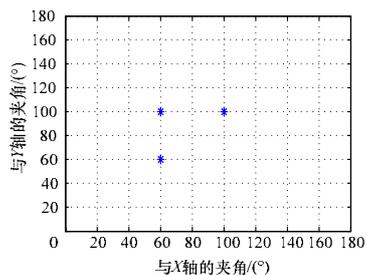


图 10 $l=1$ 时改进的时空 DOA 矩阵法估计结果

(下转第 274 页)