

# 锥面共形阵列天线相干信源盲极化 DOA 估计算法

齐子森, 郭 英, 王布宏, 范海宁

(空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

**摘 要:** 针对共形天线阵列流形的多极化特点, 建立了锥面共形阵列天线导向矢量的数据模型。通过合理的阵元排列结构设计, 推导了锥面共形阵列天线信源解相干的空间平滑算法, 解决了 ESPRIT (estimation of signal parameters via rotational invariance technique) 算法多信源方位估计的参数配对问题, 最终给出了锥面共形阵列天线相干信源盲极化波达方向 (direction of arrival, DOA) 估计算法。该算法利用锥面共形载体的单曲率特性, 结合 ESPRIT 算法参数估计的特点, 在盲极化条件下实现了相干信源的高分辨 DOA 估计。Monte Carlo 仿真实验验证了算法的有效性。

**关键词:** 锥面共形阵列天线; 波达方向估计; 相干信源; ESPRIT; 空间平滑

中图分类号: TN911.7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.06.06

## Blind DOA estimation algorithm of coherent sources for conical conformal array antenna with respect to polarization diversity

QI Zi-sen, GUO Ying, WANG Bu-hong, FAN Hai-ning

(Institute of Telecommunication Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** In view of the polarization diversity of conformal array antennas, the array manifold model for conical conformal array is established. With the help of special element arrangement, the spatial smoothing technology in conical conformal array antenna is developed, and the parameters pairing method of estimation of signal parameters via rotational invariance techniques (ESPRIT) is given when direction of arrival (DOA) of multiple sources are estimated. On this basis, a blind DOA estimation algorithm of coherent sources for conical conformal array antenna with respect to polarization diversity is proposed, and it realizes the high resolution DOA estimation of coherent sources using the singly curved surface of conical conformal carrier and the special requirement of ESPRIT algorithm. Monte-Carlo simulation results are provided to demonstrate the effectiveness and behavior of the proposed method.

**Keywords:** conical conformal array antenna; direction of arrival (DOA) estimation; coherent sources; estimation of signal parameters via rotational invariance technique (ESPRIT); spatial smoothing

## 0 引 言

附着在共形载体上的天线单元构成的共形阵列天线<sup>[1-7]</sup>在未来的星载、机载、舰载和弹载雷达、航天飞行器以及移动通信、声纳等领域都将有重要而广阔的应用前景。实现共形阵列天线的高速、高精度信源方位估计是共形阵列天线应用的重要方面, 对共形阵列天线高分辨波达方向 (direction of arrival, DOA) 估计方法的研究具有重要的现实意义。由于共形天线载体曲率的影响, 天线单元方向图指向不一致, 使得共形阵列天线具有了多极化特性, 为了表述共形阵列天线的多极化特点, 通常在共形天线阵列流形的模型中引入阵列入射信号的极化参数<sup>[8-11]</sup>, 因此要实现共形阵列天线对入射信号的方位估计就必须考虑信号极化参数的影响。所以, 经典阵列天线的 DOA 估计理论不能简单地移植应用到共形阵列天线中, 共形阵列天线的 DOA 估

计较之经典阵列天线更为复杂。

在当代信息社会中, 由于多径传播、电子干扰等因素的影响, 经常遇到相干信源存在的电磁环境, 对相干源的方位估计是空间谱估计理论体系的重要组成部分。当空间存在相干源时, 信源协方差矩阵的秩小于信源个数, 相应的快拍数据协方差矩阵特征值分解所获得的大特征值个数小于信源个数, 信号子空间的维数小于阵列流形矩阵的秩。这就使得阵列流形矩阵张成的信号子空间与特征值分解获得的信号子空间不一致, 从而导致基于特征值分解的高分辨 DOA 估计算法在空间存在相干源时无法准确估计信源方位。相干源条件下 DOA 估计的核心思想是在最大限度保留空间方位信息的前提下恢复信号协方差矩阵的秩, 即使信号协方差矩阵恢复为满秩。通常的解相干 DOA 估计算法是对接收数据协方差矩阵进行预处理, 使信号协方差矩阵的秩恢复到信源数, 然后再应用处理独立信源的方法进

收稿日期: 2010-01-08; 修回日期: 2011-01-12。

基金项目: 国家自然科学基金(60601016); 陕西省基础研究基金(2010JQ8003)资助课题

作者简介: 齐子森(1982-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为高分辨空间谱估计技术。E-mail: qizisen@163.com

行处理。空间平滑算法<sup>[12-13]</sup>是一种常用的解相干预处理算法,有效实现了均匀线阵接收数据的解相干,但其仅适用于均匀线阵的特殊要求限制了空间平滑算法的应用范围。所以,在考虑共形阵列天线相干源 DOA 估计时,由于共形载体曲率的影响,单元方向图的不同指向以及阵元的排列结构很难满足空间平滑算法对阵列的特殊要求。

针对共形阵列天线相干源 DOA 估计的难点,在信源个数先验已知的前提下,本文提出了锥面共形阵列天线相干源的盲极化 DOA 估计算法。首先针对共形阵列载体曲率和天线单元方向图指向变化引起的阵列流形多极化特性,结合锥面共形载体的特点,建立了锥面共形阵列天线快拍数据模型;然后推导了空间平滑算法在锥面共形阵列天线中的应用,并通过特殊的阵元排列方式解决了 ESPRIT<sup>[14-15]</sup> (estimation of signal parameters via rotational invariance technique) 算法多信源方位估计的参数配对问题;在上述问题解决的基础上,借鉴前期工作中提出的锥面共形阵列天线盲极化 DOA 估计算法<sup>[11]</sup>,实现了锥面共形阵列天线相干源盲极化 DOA 估计,并通过 Monte Carlo 仿真实验验证了所提算法的有效性。

### 1 锥面共形阵列天线快拍数据模型

对锥面共形阵列天线,建立如图 1(a) 所示的全局坐标系,图 1(b) 为其俯视图,则其窄带快拍数据模型如式(1)~式(11)所示。

$$\mathbf{a}(\theta, \phi) = \left[ r_1 e^{-j2\pi \frac{P_1 \cdot \mathbf{u}}{\lambda}}, r_2 e^{-j2\pi \frac{P_2 \cdot \mathbf{u}}{\lambda}}, \dots, r_m e^{-j2\pi \frac{P_m \cdot \mathbf{u}}{\lambda}} \right]^T \quad (1)$$

$$r_i = (g_{i\theta}^2 + g_{i\phi}^2)^{1/2} (k_{\theta}^2 + k_{\phi}^2)^{1/2} \cos(\theta_{igk}) =$$

$$|\mathbf{g}_i| |\mathbf{p}_i| \cos(\theta_{igk}) = \mathbf{g}_i \cdot \mathbf{p}_i = g_{i\theta} k_{\theta} + g_{i\phi} k_{\phi} \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \dots, \mathbf{P}_m$  为阵元的位置矢量;  $k_{\theta}, k_{\phi}$  分别为入射信号极化矢量在极化基矢量  $\mathbf{u}_{\theta}, \mathbf{u}_{\phi}$  上的分量,  $\mathbf{u}_{\theta}$  和  $\mathbf{u}_{\phi}$  为正交单位矢量;  $\mathbf{g}_i$  为单元方向图;  $\mathbf{p}_i$  为信号电场方向矢量;  $g_{\theta}, g_{\phi}$  分别为第  $i$  个阵元单元方向图在  $\mathbf{u}_{\theta}, \mathbf{u}_{\phi}$  上的分量;  $\theta_{igk}$  为矢量  $\mathbf{g}_i$  与矢量  $\mathbf{p}_i$  的夹角。当信源个数为  $n$  时,快拍数据模型为

$$\mathbf{X} = \mathbf{AS} + \mathbf{N} = (\mathbf{A}_{\theta} \mathbf{K}_{\theta} + \mathbf{A}_{\phi} \mathbf{K}_{\phi}) \mathbf{S} + \mathbf{N} \quad (3)$$

$$\mathbf{S} = [s_1, s_2, \dots, s_n]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{N} = [n_1, n_2, \dots, n_n]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{A}_{\theta} = [a_{\theta}(\theta_1, \phi_1), a_{\theta}(\theta_2, \phi_2), \dots, a_{\theta}(\theta_n, \phi_n)] \quad (6)$$

$$\mathbf{A}_{\phi} = [a_{\phi}(\theta_1, \phi_1), a_{\phi}(\theta_2, \phi_2), \dots, a_{\phi}(\theta_n, \phi_n)] \quad (7)$$

$$\mathbf{K}_{\theta} = \text{diag}(k_{1\theta}, k_{2\theta}, \dots, k_{i\theta}) \quad (8)$$

$$\mathbf{K}_{\phi} = \text{diag}(k_{1\phi}, k_{2\phi}, \dots, k_{i\phi}) \quad (9)$$

式中,  $\mathbf{A}$  为流形矩阵;  $\mathbf{S}$  为信号矢量;  $\mathbf{N}$  为噪声矢量;  $n$  为信源个数;  $\mathbf{K} = \text{diag}(k_1, k_2, \dots, k_n)$  表示矩阵  $\mathbf{K}$  为以  $k_1, k_2, \dots, k_n$  为主对角线元素构成的对角阵;  $\theta_i, \phi_i$  分别为第  $i$  个入射信号在全局坐标系中的俯仰角、方位角;  $k_{i\theta}, k_{i\phi}$  分别为第  $i$  个入射信号极化矢量在  $\mathbf{u}_{\theta}, \mathbf{u}_{\phi}$  上的分量。

当空间存在相干信源时,所谓相干是指信源之间只差一个复常数,即

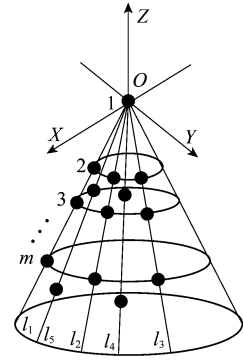
$$s_i = \beta_i s_0 \quad (10)$$

若  $n$  个信源均为相干信源,则信号矢量  $\mathbf{S}$  为

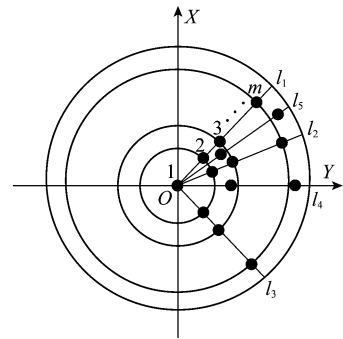
$$\mathbf{S} = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n]^T s_0 \quad (11)$$

与经典阵列不同,共形阵列天线的快拍数据建模需考虑的一个重要问题是由于共形载体曲率引起的单元方向图  $\mathbf{g}_i$  差异,通常单元方向图的定义与设计是以局部坐标系为参考

的,所以共形阵列天线快拍数据建模时必须完成单元方向图在局部坐标系到全局坐标系的旋转变换(详见文献[8-9])。



(a) 锥面共形阵列天线示意图



(b) 锥面共形阵列天线俯视图

图 1 锥面共形阵列天线

### 2 锥面共形阵列天线中的空间平滑算法

空间平滑算法解相干预处理的本质机理是利用均匀线阵的平移不变性,将均匀线阵(各阵元为全向天线单元)划分为相互重叠的  $L$  个子阵,对应的每个子阵阵元个数为  $q$ ,每个子阵都包含了相同的方位信息,分别计算各子阵的自协方差矩阵,然后进行算术平均,从而得到一个等效的  $q$  阶子阵列的协方差矩阵。文献[12]已证明,在均匀线阵中,当子阵阵元个数  $q$  大于信源个数时,经过空间平滑所得的  $q$  阶阵列协方差矩阵对应的信源协方差矩阵的秩恢复为信源数。在共形阵列天线中,阵列的均匀线阵结构一般不被满足,且由于共形载体曲率影响,天线单元方向图指向不一致,此时不可简单假设天线单元为全向单元。因此,在共形阵列天线中应用空间平滑算法面临巨大的困难。

在锥面共形阵列天线中,通过将同一圆锥母线上的阵元划分为一个子阵的原则将阵列分割。前期工作中提出的锥面共形阵列天线盲极化 DOA 估计算法<sup>[11]</sup>可以在克服共形载体遮蔽效应的基础上,完成对多个独立信源的盲极化高分辨 DOA 估计。本节借鉴锥面共形阵列天线盲极化 DOA 估计算法的阵列分割思想,将负责一定角度范围的阵元划分为 5 个子阵(见图 1(a))。图 1(a)中,  $\theta_0 = \pi/4$  表示圆锥顶角,阵元位于 5 条母线  $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5$  上,每条母线均匀放置  $m$  个阵元。对于由同一母线上阵元构成的子阵,结合式(1)与式(3),由此子阵接收的数据为

$$\mathbf{X}_l = \mathbf{A}_l \mathbf{S} + \mathbf{N}_l \quad (12a)$$

$$\mathbf{A}_l = [\mathbf{a}_l(\theta_1, \phi_1), \mathbf{a}_l(\theta_2, \phi_2), \dots, \mathbf{a}_l(\theta_n, \phi_n)] \quad (12b)$$

$$\mathbf{a}_l(\theta, \phi) = \left[ r_{l1} e^{-j2\pi \frac{P_{l1} \cdot \mathbf{u}}{\lambda}}, r_{l2} e^{-j2\pi \frac{P_{l2} \cdot \mathbf{u}}{\lambda}}, \dots, r_{lm} e^{-j2\pi \frac{P_{lm} \cdot \mathbf{u}}{\lambda}} \right]^T \quad (12c)$$

式中,  $\mathbf{P}_{l1}, \mathbf{P}_{l2}, \dots, \mathbf{P}_{lm}$  为第  $l$  个子阵中阵元的位置矢量。由于在圆锥的同一母线上不存在曲率变化, 所以在同一母线上阵元的单元方向图不存在指向不一致问题, 所以有

$$r_{l1} = r_{l2} = \dots = r_{lm} = r_l \quad (13)$$

结合式(12c)与式(13)得

$$\mathbf{a}_l(\theta, \phi) = \left[ r_l e^{-j2\pi \frac{P_{l1} \cdot \mathbf{u}}{\lambda}}, r_l e^{-j2\pi \frac{P_{l2} \cdot \mathbf{u}}{\lambda}}, \dots, r_l e^{-j2\pi \frac{P_{lm} \cdot \mathbf{u}}{\lambda}} \right]^T = r_l \left[ e^{-j2\pi \frac{P_{l1} \cdot \mathbf{u}}{\lambda}}, e^{-j2\pi \frac{P_{l2} \cdot \mathbf{u}}{\lambda}}, \dots, e^{-j2\pi \frac{P_{lm} \cdot \mathbf{u}}{\lambda}} \right]^T = r_l \mathbf{a}_{l0}(\theta, \phi) \quad (14)$$

则有

$$\mathbf{A}_l = r_l [\mathbf{a}_{l0}(\theta_1, \phi_1), \mathbf{a}_{l0}(\theta_2, \phi_2), \dots, \mathbf{a}_{l0}(\theta_n, \phi_n)] = r_l \mathbf{A}_{l0} \quad (15)$$

此时,  $\mathbf{A}_{l0}$  等效为均匀线阵的流行矩阵。将同一母线上阵元构成的阵列划分为相互重叠的  $L$  个子阵, 每个子阵的阵元个数为  $q$ , 第  $i$  个子阵接收数据的协方差矩阵为

$$\mathbf{R}_i = \mathbf{X}_i \mathbf{X}_i^H / N = \mathbf{A}_i \mathbf{R}_s \mathbf{A}_i^H + \sigma_N^2 \mathbf{I} = r_l \mathbf{A}_{l0i} \mathbf{R}_s \mathbf{A}_{l0i}^H r_l + \sigma_N^2 \mathbf{I} = r_l \mathbf{A}_{l0i} \mathbf{D} \mathbf{R}_s (\mathbf{D}^i)^H \mathbf{A}_{l0i}^H r_l + \sigma_N^2 \mathbf{I} \quad (16a)$$

$$\mathbf{D} = \text{diag} \left( e^{-j2\pi \frac{d_1 \cdot \mathbf{u}_1}{\lambda}}, e^{-j2\pi \frac{d_2 \cdot \mathbf{u}_2}{\lambda}}, \dots, e^{-j2\pi \frac{d_n \cdot \mathbf{u}_n}{\lambda}} \right) \quad (16b)$$

式中,  $\mathbf{A}_{l0i}$  为第  $l$  条母线上的阵元前对  $q$  个阵元构成阵列的流形;  $n$  为信源个数;  $\sigma_N^2 \mathbf{I}$  为噪声协方差矩阵;  $r_l$  为第  $l$  条母线上阵元的方向图;  $d_i$  为第  $l$  条母线上阵元的均匀间隔。

将  $L$  个子阵所得协方差矩阵作算数平均, 即

$$\bar{\mathbf{R}}_l = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \mathbf{R}_i \quad (17)$$

将式(16)代入式(17)得

$$\bar{\mathbf{R}}_l = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L r_l \mathbf{A}_{l0i} \mathbf{R}_s \mathbf{A}_{l0i}^H r_l + \sigma_N^2 \mathbf{I} = \frac{1}{L} r_l \mathbf{A}_{l0i} \left[ \sum_{i=1}^L \mathbf{D}^{i-1} \mathbf{R}_s (\mathbf{D}^{i-1})^H \right] \mathbf{A}_{l0i}^H r_l + \sigma_N^2 \mathbf{I} \quad (18)$$

则有

$$\bar{\mathbf{R}}_l = r_l \mathbf{A}_{l0i} \bar{\mathbf{R}}_s \mathbf{A}_{l0i}^H r_l + \sigma_N^2 \mathbf{I} \quad (19a)$$

$$\bar{\mathbf{R}}_s = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \mathbf{D}^{i-1} \mathbf{R}_s (\mathbf{D}^{i-1})^H \quad (19b)$$

可以证明<sup>[12]</sup>, 当空间存在相干源时, 式(19b)所示的信号协方差矩阵  $\bar{\mathbf{R}}_s$  的秩等于信源数;  $\bar{\mathbf{R}}_l$  即为锥面共形阵列天线中空间平滑解相干后所得的快拍数据协方差矩阵。

### 3 ESPRIT 算法的参数配对方法

利用 ESPRIT 算法进行 DOA 估计的前提条件是构建完全相同的成对子阵, 且子阵对之间相应阵元的距离矢量相同, 而且实现几个参数估计则需要几组成对子阵, 此时参数配对问题亟待解决。前期工作所提到的锥面共形阵列天线盲极化 DOA 估计算法<sup>[11]</sup> 已经将 ESPRIT 算法应用到锥面共形阵列天线中, 很好地解决了多个独立信源方位估计问题。但是, 其解决多方位估计时参数配对问题的前提是所有成对子阵旋转矩阵具有相同的特征矢量。当引入空间平滑算法时, 每个子阵列(在同一母线上的阵元构成)接收

数据独立运算, 就不能保证各旋转矩阵具有相同特征矢量的条件。因此, 以往参数配对方法不再适用。

在经过空间平滑算法解相干预处理的基础上, 借鉴锥面共形阵列天线盲极化 DOA 估计算法的思想, 将 ESPRIT 算法应用到各子阵列(在同一母线上的阵元构成一个子阵, 见图 1(a)), 可得 5 个旋转矩阵  $\boldsymbol{\Psi}_1, \boldsymbol{\Psi}_2, \boldsymbol{\Psi}_3, \boldsymbol{\Psi}_4, \boldsymbol{\Psi}_5$ 。若 5 对子阵之间具有不同的距离矢量, 分别为  $\Delta \mathbf{P}_1, \Delta \mathbf{P}_2, \Delta \mathbf{P}_3, \Delta \mathbf{P}_4, \Delta \mathbf{P}_5$ , 且满足  $\Delta \mathbf{P}_4 = \Delta \mathbf{P}_1 + \Delta \mathbf{P}_3, \Delta \mathbf{P}_5 = \Delta \mathbf{P}_1 + \Delta \mathbf{P}_2$ , 即对于母线  $l_1, l_2, l_3$ , 同一母线上相邻阵元间隔为  $\lambda/2, \lambda$  为入射信号波长; 而在母线  $l_4, l_5$  上, 同一母线上相邻阵元间隔为  $\sqrt{2}\lambda/2$ , 且满足  $\alpha_4 = \alpha_1 + (\alpha_3 - \alpha_1)/2, \alpha_5 = \alpha_1 + (\alpha_2 - \alpha_1)/2$ 。  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$  为母线  $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5$  在全局坐标系 XOY 面上的投影与 X 轴顺时针旋转方向的夹角(见图 1(b)), 则有

$$e^{-j\omega_{5i}} = e^{-j\omega_{1i}} e^{-j\omega_{2i}} \quad (20)$$

$$e^{-j\omega_{4i}} = e^{-j\omega_{1i}} e^{-j\omega_{3i}} \quad (21)$$

$$\omega_{li} = (2\pi/\lambda) \Delta \mathbf{P}_l \cdot \mathbf{u}_i = (2\pi/\lambda) |\Delta \mathbf{P}_l| [\sin(\theta_{\Delta P_l}) \cos(\phi_{\Delta P_l}) \cdot \sin(\theta_i) \cos(\phi_i) + \sin(\theta_{\Delta P_l}) \sin(\phi_{\Delta P_l}) \cdot \sin(\theta_i) \sin(\phi_i) + \cos(\theta_{\Delta P_l}) \cos(\theta_i)] \quad (22)$$

式中,  $\mathbf{u}_i$  为第  $i$  个信号的方向矢量;  $\Delta \mathbf{P}_l$  为第  $l$  子阵对的距离矢量;  $\theta_{\Delta P_l}, \phi_{\Delta P_l}$  分别为  $\Delta \mathbf{P}_l$  的俯仰角、方位角。利用此特殊关系, 设  $\boldsymbol{\Psi}_1, \boldsymbol{\Psi}_2, \boldsymbol{\Psi}_3, \boldsymbol{\Psi}_4, \boldsymbol{\Psi}_5$  特征值分别为  $t_{1i}, t_{2i}, t_{3i}, t_{4i}, t_{5i}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ),  $\boldsymbol{\Psi}_1$  的特征值  $t_{1j}$  与使式(23)值最小的  $\boldsymbol{\Psi}_2$  的特征值  $t_{2k}$  相对应, 即

$$\{ |t_{5i} - t_{1j} t_{2k}|, i, k = 1, 2, \dots, n \} \quad (23)$$

同理,  $\boldsymbol{\Psi}_1$  的特征值  $t_{1j}$  与使式(24)值最小的  $\boldsymbol{\Psi}_3$  的特征值  $t_{3k}$  相对应, 即

$$\{ |t_{4i} - t_{1j} t_{3k}|, i, k = 1, 2, \dots, n \} \quad (24)$$

综上, 完成了  $\boldsymbol{\Psi}_1, \boldsymbol{\Psi}_2, \boldsymbol{\Psi}_3$  的特征值配对。

### 4 锥面共形阵列天线相干源盲极化 DOA 估计

上述各节详细推导了锥面共形阵列天线的空间平滑算法以及 ESPRIT 算法多信源方位估计时的参数配对方法。在此基础上, 若  $\alpha_1 = \pi - \alpha_3, \alpha_2 \in (\alpha_1, \alpha_3)$ , 则锥面共形阵列天线相干源盲极化 DOA 估计算法步骤如下:

**步骤 1** 在如图 1 所示锥面共形阵列天线的基础上获得各母线上阵元的快拍数据;

**步骤 2** 应用空间平滑思想, 对各子阵接收数据解相干得矩阵  $\bar{\mathbf{R}}_l$  ( $l=1, 2, 3, 4, 5$ );

**步骤 3** 对矩阵  $\bar{\mathbf{R}}_l$  进行特征值分解, 并求得各子阵的旋转矩阵  $\boldsymbol{\Psi}_1, \boldsymbol{\Psi}_2, \boldsymbol{\Psi}_3, \boldsymbol{\Psi}_4, \boldsymbol{\Psi}_5$ ;

**步骤 4** 分别对矩阵  $\boldsymbol{\Psi}_1, \boldsymbol{\Psi}_2, \boldsymbol{\Psi}_3, \boldsymbol{\Psi}_4, \boldsymbol{\Psi}_5$  进行特征值分解, 得到特征值  $t_{1i}, t_{2i}, t_{3i}, t_{4i}, t_{5i}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ );

**步骤 5** 应用式(23)与式(24)完成  $\boldsymbol{\Psi}_1, \boldsymbol{\Psi}_2, \boldsymbol{\Psi}_3$  的特征值配对;

**步骤 6** 结合锥面共形阵列天线盲极化 DOA 估计算法, 完成 DOA 估计。

其中, 步骤 3、步骤 6 的详细推导见文献[7]。

### 5 仿真实验

上述各节推导了算法机理, 并给出了算法步骤, 本节在此基础上进行 Monte Carlo 仿真实验以验证算法的有效性。

其中,成功实验的定义为:估计偏差小于  $2^\circ$ ;成功概率的定义为:成功实验次数与实验次数的比值;估计偏差定义为:在成功实验中,估计均值与真值之差的绝对值;估计方差定义为:在成功实验中,估计值与估计均值之差的均方值。在此前提条件下,进行 500 次独立仿真实验。

(1) 仿真条件

阵列结构如图 1 所示,快拍数  $N=50, 100, 200$ ;信噪比 (signal to noise ratio, SNR)  $\in [0, 30]$ ;信源个数  $n=2$ ;  $\theta_1 = \pi/6, \phi_1 = \pi/3; \theta_2 = \theta_1 + \pi/18, \phi_2 = \phi_1; k_{1\theta} = 0.5, k_{1\phi} = 0.5; k_{2\theta} = 0.3, k_{2\phi} = 0.7$ ,在仿真实验中为未知参量;阵列阵元个数为 90,即  $m=18; \alpha_1 = \pi/4, \alpha_2 = \pi/3, \alpha_3 = 3\pi/4$ ;单元方向图取  $g_{i\theta} = \sin(\theta'_j - \phi'_j), g_{i\phi} = \cos(\theta'_j - \phi'_j), \theta'_j$  和  $\phi'_j$  为第  $j$  个人射信号在第  $i$  个阵元局部坐标系中的俯仰角和方位角。

(2) 仿真结果

仿真结果如图 2~图 4 所示。

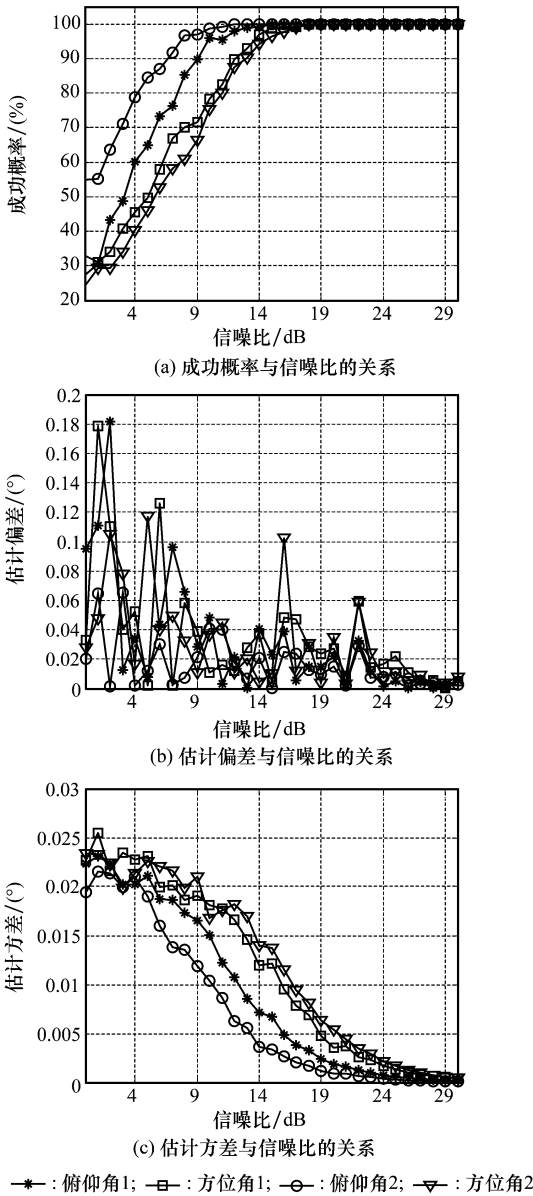


图 2 50 次快拍的相干源盲极化 DOA 估计

(3) 结果分析

由 Monte Carlo 仿真实验结果可知,所提算法的估计效果随着信噪比的增加有明显的好转,成功概率逐渐达到 100%,估计偏差与估计方差逐渐减小,且稳定收敛于一个较小值。阵列数据的快拍数对算法的成功概率、估计偏差以及估计方差均有明显的影响。在相同信噪比条件下,随着快拍数的增加,对俯仰角与方位角的估计效果明显变好。同时,仿真结果表明,新算法对俯仰角的估计效果要优于对方位角的估计效果,这与阵列的结构设计有关,阵列对俯仰角的有效孔径更大,所以获得了更好的估计效果。总之,统计仿真实验表明,所提算法可以解决锥面共形阵列天线相干信源的盲极化方位估计问题,并且获得了较好的估计效果。

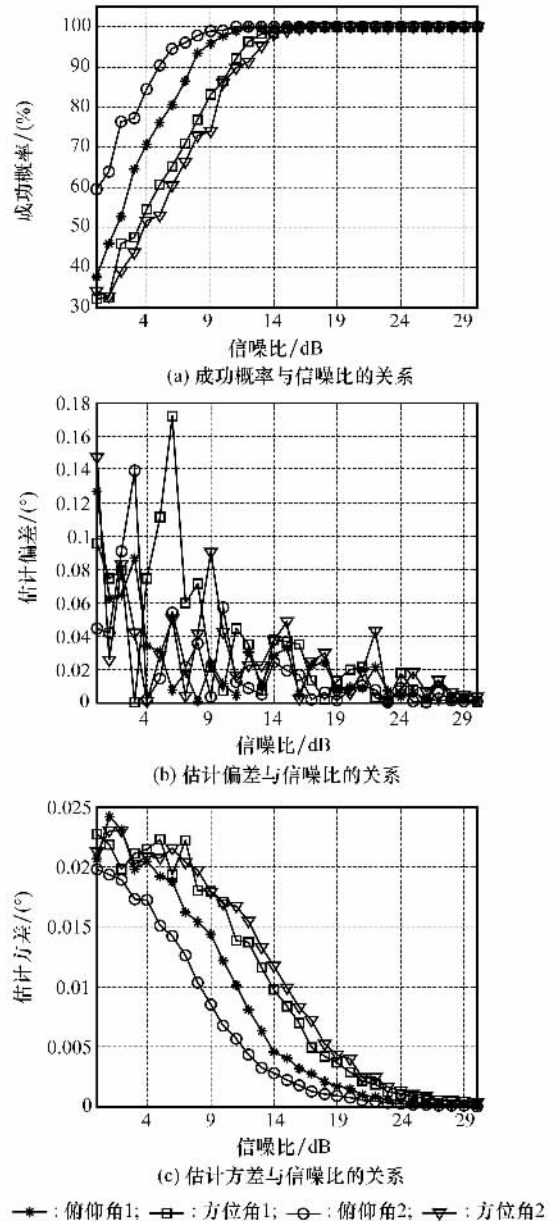


图 3 75 次快拍的相干源盲极化 DOA 估计

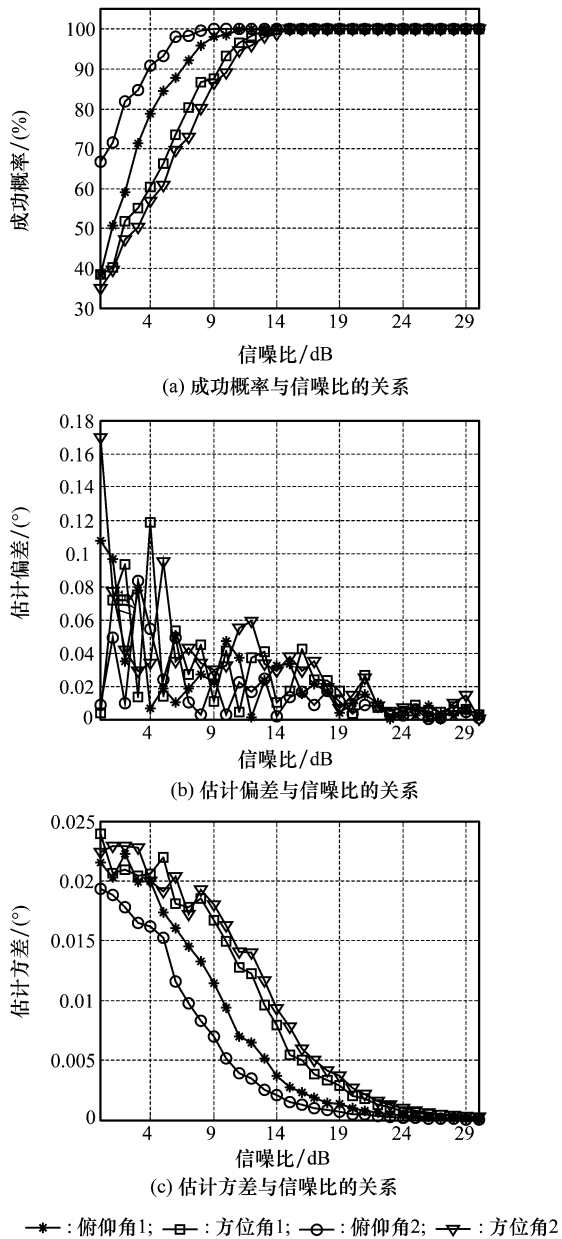


图 4 100 次快拍的相干源盲极化 DOA 估计

### 6 结 论

针对共形天线载体曲率和天线单元方向图指向变化引起的阵列流形多极化特性,结合锥面共形载体的特点,建立了锥面共形阵列天线快拍数据模型;推导了空间平滑算法在锥面共形阵列天线中的应用,并通过特殊的阵元排列方式解决了 ESPRIT 算法多信源方位估计的参数配对问题;在此基础上提出了锥面共形阵列天线盲极化 DOA 估计算法。Monte Carlo 仿真实验表明,在信源极化状态未知条件下所提算法可以很好的解决锥面共形阵列天线相干信源的方位估计问题,从而验证了所提算法的有效性。

### 参 考 文 献:

[1] Josefsson L, Persson P. *Conformal array antenna theory and design*[M]. Canada: Wiley,2006.

[2] Malek G M. Theory and analysis of adaptive cylindrical array antenna for ultrawideband wireless communications[J]. *IEEE Trans. on Wireless Communications*,2005,4(6):3075-3083.

[3] Gerini G, Zappelli L. Multilayer array antennas with integrated frequency selective surfaces conformal to a circular cylindrical surface[J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*,2005,53(6):2020-2030.

[4] Yang P, Yang F, Nie Z P. DOA estimation using MUSIC algorithm on a cylindrical conformal antenna array[C]// *Proc. of the IEEE Antennas and Propagation Symposium*,2007:5299-5302.

[5] Yang P, Yang F, Nie Z P. DOA estimation with sub-array divided technique and interpolated ESPRIT algorithm on a cylindrical conformal array antenna[J]. *Progress in Electromagnetics Research*,2010,103:201-216.

[6] Hwang S, Sarkar T K. Direction of arrival (DOA) estimation using a transformation matrix through singular value decomposition[C]// *Proc. of the IEEE/ACES International Conference on Wireless Communications and Applied Computational Electromagnetic*,2005:353-356.

[7] Kim K, Sarkar T K. DOA estimation utilizing directive elements on a conformal surface[C]// *Proc. of the IEEE Radar Conference*,2003:91-96.

[8] 王布宏,郭英,王永良,等. 共形天线阵列流形的建模方法[J]. *电子学报*,2009,37(3):481-484. (Wang B H, Guo Y, Wang Y L, et al. Array manifold modeling for conformal array antenna[J]. *Acta Electronica Sinica*,2009,37(3):481-484.)

[9] Wang B H, Guo Y. Array manifold modeling for arbitrary 3D conformal array antenna[C]// *Proc. of the IEEE International Workshop on Antenna Technology*,2008:562-565.

[10] 齐子森,郭英,王布宏,等. 共形阵列天线 MUSIC 算法性能分析[J]. *电子与信息学报*,2008,30(11):2674-2677. (Qi Z S, Guo Y, Wang B H, et al. Performance analysis of MUSIC for conformal array [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*,2008,30(11):2674-2677.)

[11] 齐子森,郭英,姬伟峰,等. 锥面共形阵列天线盲极化 DOA 估计算法[J]. *电子学报*,2009,37(9):1919-1925. (Qi Z S, Guo Y, Ji W F, et al. Blind DOA estimation algorithm for conical conformal array antenna with respect to polarization diversity[J]. *Acta Electronica Sinica*,2009,37(9):1919-1925.)

[12] Shan T J, Wax M, Kailath T. On spatial smoothing for estimation of coherent signals [J]. *IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*,1985,33(4):806-811.

[13] Shan T J, Wax M, Kailath T. Adaptive beamforming for coherent signals and interference[J]. *IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*,1985,33(3):527-536.

[14] Roy R, Kailath T. ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques[J]. *IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*,1989,37(7):984-995.

[15] Roy R, Kailath T. ESPRIT-a subspace rotation approach to estimation of parameters of cissoids in noise[J]. *IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*,1986,34(10):1340-1342.