

文章编号: 1001 - 2486(2011)04 - 0060 - 05

基于联合对角化的远场相干信号波达方向估计*

胡增辉¹, 朱炬波², 何峰¹, 梁甸农¹

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 国防科技大学 理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:提出一种基于联合对角化的远场相干信号波达方向估计算法。利用阵元接收数据构造高阶累积量矩阵,通过矩阵联合对角化得到阵列广义流形矩阵的估计。利用阵列流形矩阵的矩阵特性及最小多项式的性质,消除联合对角化带来的顺序不确定性,得到波达方向的估计。该方法无需进行角度搜索,且能处理不同相干群内部分波达方向相同的情形。计算机仿真实验验证了算法的有效性。

关键词:联合对角化;相干;波达方向;高阶累积量

中图分类号:TN957 **文献标识码:**A

Direction of Arrival Estimation of Far-field Coherent Signals Using Joint Diagonalization

HU Zeng-hui¹, ZHU Ju-bo², HE Feng¹, LIANG Dian-nong¹

(1. College of Electronic Science and Technology, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A new algorithm for direction of arrival (DOA) of coherent signals using joint diagonalization was proposed. A set of higher-order cumulant matrices were first devised, the generalized array manifold matrix was then estimated using the technology of joint diagonalization. Finally, permutation uncertainty inherent in the estimation of the generalized array manifold matrix was eliminated and DOAs were estimated, based on the matrix structure of the array manifold matrix and properties of minimum polynomial of matrix. The proposed algorithm does not need angle searching, and can be applied to the cases when some DOAs in different coherent group are the same. The effectiveness of the proposed algorithm is verified by computer simulation results.

Key words: joint diagonalization; coherent; direction of arrival; high-order cumulant

波达方向(或称波达角)估计是阵列信号处理的一个重要研究内容,它在雷达、声纳、地震监测等领域中有着广泛的应用。经典的波达方向估计算法,如 MUSIC 和 ESPRIT,能实现不相关信源的高分辨率波达角估计。然而,当信源之间强相关甚至是相干时,此类算法不再有效。

关于相干源的波达角估计问题,近二十多年来,人们提出了许多方法^[1-8]。这些算法可大致分为两类,即二阶统计量方法和高阶统计量方法。目前,绝大多数算法为二阶统计量方法,解决途径主要采用空间平滑或差分技术。这类算法能有效解决相干信源波达角估计问题,但也存在不少缺陷:一是这类算法通常需要进行角度搜索,计算量大,精度受搜索步长影响;二是不同相干群内某些波达角相同时,很多基于二阶统计量的方法将失效。

基于高阶统计量的相干源波达角估计方法为有效解决二阶统计量方法的缺陷提供了新的思路。文献[3-4]提出了两种基于高阶统计量的相干波达角估计方法。这两种方法都是基于源信号的统计独立性,不同相干群波达角单独估计。然而,这两种算法均未对估计的顺序不确定性进行明确消除。此外,这两个文献在估计波达角时,前者需要对大矩阵进行奇异值分解,后者利用类似于空间平滑的方法,需要进行角度搜索。文献[7]通过构造合适的高阶累积量矩阵,首先实现独立信源的波达角估计,然后得到相干源波达角估计。然而,该算法依旧需要进行角度搜索,并且由于多个相干群波达角同时估计,不能有效解决不同相干群内部分波达角相同的问题。

针对上述高阶统计量算法存在的一些问题,本文提出一种基于高阶累积量矩阵联合对角化的

* 收稿日期:2010-09-27

基金项目:国家自然科学基金项目(60902092)

作者简介:胡增辉(1982—),男,博士生。

相干源波达角估计方法。该方法无需进行角度搜索,且能处理不同相干群内存在部分波达角相同的问题。

1 信号模型及假设

考虑 G 个具有相同中心频率 f_c 的远场窄带源信号 $\{u_i(t)\}_{i=1}^G$ 。假设每个源信号 $u_i(t)$ 经过多径传播,产生一组该信号的相干信号 $\{s_{i,1}(t), \dots, s_{i,p_i}(t)\}$ 。这组信号入射到阵元间距为 d , 阵元数为 M 的均匀线阵,波达角记为 $\{\theta_{i,1}, \dots, \theta_{i,p_i}\}$, $d \leq \lambda/2$, 其中 λ 为信号波长。称由同一个源信号 $u_i(t)$ 产生的相干信号为第 i 个群, $P = \sum_{i=1}^G p_i$ 为待估波达角的总数。

以第一个阵元为参考点,则 t 时刻阵元接收信号可以表示为

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

式中, $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), \dots, x_M(t)]^T$ 为阵元接收信号矢量, $x_i(t)$ 为 t 时刻第 i 个阵元的接收信号; $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_{1,1}), \dots, \mathbf{a}(\theta_{1,p_1}), \mathbf{a}(\theta_{2,1}), \dots, \mathbf{a}(\theta_{G,p_G})]$ 为阵列流形矩阵,其中 $\mathbf{a}(\theta) = [1, \dots, \exp(-j(M-1)\omega)]^T$, $\omega = 2\pi d \sin(\theta)/\lambda$; $\mathbf{s}(t) = [s_{1,1}(t), \dots, s_{G,p_G}(t)]^T$ 为 $P \times 1$ 维的入射信号矢量; $\mathbf{n}(t) = [n_1(t), \dots, n_M(t)]^T$ 为加性噪声。

第 i 个群内的相干信号 $s_{i,1}(t), \dots, s_{i,p_i}(t)$ 可以用 $u_i(t)$ 表示为

$$\begin{aligned} & [s_{i,1}(t), \dots, s_{i,p_i}(t)]^T \\ &= [\rho_{i,1}, \dots, \rho_{i,p_i}]^T u_i(t) = \rho_i u_i(t) \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $\rho_i = [\rho_{i,1}, \dots, \rho_{i,p_i}]^T$ 为信号 $u_i(t)$ 对应的复散射矢量,它的每个元素均为非零复常数。

记 $\mathbf{B} = \text{diag}\{\boldsymbol{\rho}_1, \dots, \boldsymbol{\rho}_G\}$ 为由 $\boldsymbol{\rho}_1, \dots, \boldsymbol{\rho}_G$ 为对角元素的块对角矩阵, $\mathbf{C} = \mathbf{A}\mathbf{B}$ 称为阵列广义流形矩阵,式(1)可以重新表示为

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{n}(t) = \mathbf{C}\mathbf{u}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (3)$$

式中 $\mathbf{u}(t) = [u_1(t), \dots, u_G(t)]^T$ 为源信号矢量。

考虑矩阵 $\mathbf{C} = \mathbf{A}\mathbf{B}$, 矩阵 \mathbf{B} 每列的非零元素数分别为 p_1, \dots, p_G , 记 \mathbf{C} 的第 i 列为 \mathbf{c}_i , \mathbf{B} 的第 i 列为 \mathbf{b}_i , 则

$$\mathbf{c}_i = \mathbf{A}\mathbf{b}_i = [\mathbf{a}(\theta_{i,1}), \dots, \mathbf{a}(\theta_{i,p_i})] \boldsymbol{\rho}_i \quad (4)$$

由上式可以看到, \mathbf{C} 的每一列只与一个相干群对应的波达角及其对应的复散射矢量有关。本文算法的思想在于首先利用源信号的统计特性,

得到矩阵 \mathbf{C} 的估计,然后对 \mathbf{C} 的每一列,根据矩阵 \mathbf{A} 的结构特征,得到某个相干群对应的波达角的估计。这样,即使某几个相干群内的某个波达角相同,由于波达角是按群分别估计,对估计结果并无任何影响。

本文中,对信号模型作如下假设:

(1)源信号 $\{u_i(t)\}_{i=1}^G$ 是相互统计独立,具有非零峰度的非高斯过程。

(2)加性噪声为复高斯白噪声,噪声与信号是相互统计独立的,噪声间互不相关。

(3)阵元数 M 和源信号数 G , 相干群内元素的最大数目 $p_{\max} = \max(p_1, \dots, p_G)$ 之间满足如下关系: $M \geq \max(G, 2p_{\max})$ 。

(4) \mathbf{C} 是满秩的(通常只需任意两个相干群内波达方向不完全相同即可),同一个相干群内波达角两两各不相同。

源信号数目 G 及相干群内元素个数 p_1, \dots, p_G 的确定属于信号检测问题,已有详细的讨论,因此本文假设它们是已知的。

2 波达角估计算法

本节利用式(3)的信号模型及假设,首先构造一组高阶累积量矩阵,利用矩阵联合对角化得到矩阵 \mathbf{C} 的估计,再利用矩阵 \mathbf{A} 的 Vandermonde 矩阵特性,消除矩阵 \mathbf{C} 的估计结果中的顺序不确定性问题,最后利用 Vandermonde 矩阵特性及矩阵的最小多项式性质,分别得到每个相干群内波达角的估计。

2.1 高阶累积量矩阵的联合对角化

构造 M 个如下形式的 $M \times M$ 维的四阶累积量矩阵^[4,7]

$$\begin{aligned} F_i(k, m) &= \text{cum}(x_i(t), x_i^*(t), x_k(t), x_m^*(t)) \\ &= E\{x_i(t)x_i^*(t)x_k(t)x_m^*(t)\} \\ &\quad - E\{x_i(t)x_i^*(t)\}E\{x_k(t)x_m^*(t)\} \\ &\quad - E\{x_i(t)x_k(t)\}E\{x_i^*(t)x_m^*(t)\} \\ &\quad - E\{x_i^*(t)x_k(t)\}E\{x_i(t)x_m^*(t)\} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, x^* 表示 x 的共轭,将式(3)代入上式可得:

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{C}\mathbf{D}_i\mathbf{C}^H \quad (6)$$

式中, $\mathbf{D}_i = \text{diag}\{\gamma_{4,s_1} | \mathbf{C}(i,1)|^2, \dots, \gamma_{4,s_G} | \mathbf{C}(i,G)|^2\}$, $\gamma_{4,s_i} = \text{cum}\{s_i(t), s_i^*(t), s_i(t), s_i^*(t)\}$, $\mathbf{C}(j,k)$ 表示矩阵 \mathbf{C} 第 j 行第 k 列对应的元素,上标 H 表示矩阵共轭转置。

式(6)的 M 个累积量矩阵 $\mathbf{F}_1, \dots, \mathbf{F}_M$, 具有相

似的形式,且对角矩阵 D_1, \dots, D_M 不完全相同。因此,可以通过联合对角化技术估计阵列广义流形矩阵 C 。

矩阵联合对角化是指寻找满足一定约束条件(如范数等于某个常数)的非零矩阵 W ,使得如下的代价函数最小:

$$f(W) = \sum_{i=1}^M \text{off}\{W^H F_i W\} \quad (7)$$

式中, $\text{off}\{\cdot\}$ 表示矩阵非对角线元素绝对值平方和, $\text{off}\{A\} = \sum_{i \neq j} |a_{ij}|^2$ 。

本文采用文献[9]所提的 FJAD 算法实现矩阵 C 的估计,记为 \hat{C} 。理论上, \hat{C} 和 C 之间存在如下关系:

$$\hat{C} = CPA \quad (8)$$

其中矩阵 P 表示一个置换矩阵,它是由问题本身的顺序不确定性决定的,式(8)中, $f(\hat{C}P) = f(\hat{C})$ 。 A 为一对角线元素非零的对角矩阵,它与约束条件有关。 A 对波达角估计并无任何影响,不再考虑 A ,即假设

$$\hat{C} = CP \quad (9)$$

由于置换矩阵 P 的存在,即使 p_1, \dots, p_G 均为已知,矩阵 \hat{C} 每列对应的相干群内元素的个数也不能确定。因此,为了从矩阵 \hat{C} 中得到波达角 $\theta_{1,1}, \dots, \theta_{G,p_G}$ 的估计,首先必须确定 \hat{C} 每列与 p_1, \dots, p_G 之间的对应关系。

p_1, \dots, p_G 完全相同时,无需考虑顺序不确定性。因此,下面考虑消除顺序不确定性时,均假设 p_1, \dots, p_G 不完全相同。

2.2 顺序不确定性消除

定义如下的矩阵和矢量函数:

$$Q(k, m, n) = \begin{bmatrix} e^{-j(k-1)\omega_{m,1}} & \dots & e^{-j(k-1)\omega_{m,p_m}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j(k+n-2)\omega_{m,1}} & \dots & e^{-j(k+n-2)\omega_{m,p_m}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\xi(i, k, n) = [c_i(k) \dots c_i(k+n-1)]^T \quad (11)$$

$Q(k, m, n)$ 为阵列流形矩阵 A 的子矩阵,式(11)中 c_i 表示 C 的第 i 列,由 $Q(k, m, n)$ 的定义有

$$Q(k, m, n) = Q(1, m, n) \Gamma^{k-1}(m) \quad (12)$$

式中, $\Gamma(m) = \text{diag}\{\exp(-j\omega_{m,1}), \dots, \exp(-j\omega_{m,p_m})\}$ 。

假设 c_i 对应的相干群内元素为 p_i ,构造如下的 $p_j \times p_j$ 维矩阵

$$\Phi_i(j) = [\xi(i, 1, p_j) \dots \xi(i, p_j, p_j)] \quad (13)$$

引理 1 $\det(\Phi_i(i)) \neq 0$ 。 $p_j > p_i$ 时,

$\det(\Phi_i(j)) = 0$ 。

证明:首先证明 $\det(\Phi_i(i)) \neq 0$ 。

由式(10)~(13),可知

$$\begin{aligned} & \Phi_i(i) \\ &= [Q(1, i, p_i) \Gamma^0(i) \rho_i \dots Q(1, i, p_i) \Gamma^{p_i-1}(i) \rho_i] \end{aligned} \quad (14)$$

假设 $\det(\Phi_i(i)) = 0$,则存在系数 $\beta(0), \dots,$

$$\begin{aligned} & \beta(p_i - 1), \sum_{k=0}^{p_i-1} |\beta(k)|^2 \neq 0, \text{使得} \\ & Q(1, i, p_i) [\beta(0) + \dots + \beta(p_i - 1) \Gamma^{p_i-1}(i)] \rho_i = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

上式中, $Q(1, i, p_i)$ 为 $p_i \times p_i$ 的可逆 Vandermonde 矩阵, ρ_i 的每个元素均非零,因此,式(15)可以简化为

$$\beta(0) + \dots + \beta(p_i - 1) \Gamma^{p_i-1}(i) = 0 \quad (16)$$

由式(16)可知, $\Gamma(i)$ 的最小多项式阶最多为 $p_i - 1$ 。然而,由 $\Gamma(i)$ 的表达式可知, $\Gamma(i)$ 的最小多项式阶为 p_i ,矛盾。假设 $\det(\Phi_i(i)) = 0$ 不成立,则 $\det(\Phi_i(i)) \neq 0$ 。

同理

$$\begin{aligned} & \Phi_i(j) \\ &= [Q(1, i, p_j) \Gamma^0(i) \rho_i \dots Q(1, i, p_j) \Gamma^{p_j-1}(i) \rho_i] \end{aligned} \quad (17)$$

由于 $\Gamma(i)$ 的最小多项式阶为 p_i ,因此,当 $p_j > p_i$ 时, $\Phi_i(j)$ 的列之间是线性相关的,或者说, $\det(\Phi_i(j)) = 0$ 。

证毕。

定义函数

$$f(i, j) = |\lambda_{\min}(i, j)| \quad (18)$$

式中, $\lambda_{\min}(i, j)$ 表示矩阵 $\Phi_i(j)$ 的绝对值的最小特征值。

定义 $\Omega = [1, \dots, G]$, $m\Omega$ 表示 Ω 内元素的一个排列,例如 $m\Omega = [G, \dots, 1]$,定义

$$F(m\Omega) = \prod_{i \in \Omega} f(i, m\Omega(i)) \quad (19)$$

式中, $m\Omega(i)$ 表示 $m\Omega$ 的第 i 个元素。

假设矩阵 C 每列对应的相干群内元素个数为 p_1, \dots, p_G ,假设 Ω 的一个排列为 $m\Omega$ 。如果 $m\Omega \neq [1, \dots, G]$,则至少存在一个整数 j ,使得 $p_{m\Omega(j)} > p_j$ 。此时,由引理 1 的结论可知, $f(j, m\Omega(j)) = |\lambda_{\min}(j, m\Omega(j))| = 0$,此时有 $F(m\Omega) = \prod_{i \in \Omega} f(i, m\Omega(i)) = 0$ 。所以,只有当 $m\Omega = \Omega$ 时, $F(m\Omega)$ 才非零。考虑到噪声的影响,本文通过寻找如下的 $m\Omega_0$ 来消除顺序不确定性:

$$m\Omega_0: F(m\Omega_0) = \max_{m\Omega \subset m(\Omega)} F(m\Omega) \quad (20)$$

式中 $m(\Omega)$ 表示 Ω 的所有排列组成的集合。式(20)中,用 $\hat{\mathbf{C}}$ 代替 \mathbf{C} 。

2.3 波达角估计

上节利用 \mathbf{A} 的 Vandermonde 特性和矩阵最小多项式的性质,消除了矩阵联合对角化估计结果的顺序不确定性。不妨直接假设 $\hat{\mathbf{C}} = \mathbf{C}$, 本节考虑利用 \mathbf{C} 的信息估计波达角。

对 \mathbf{C} 的第 i 列 c_i , 令 $\kappa_0 = M - p_i - 1$, 定义矩阵

$$\mathbf{H} = [\xi(i, 1, \kappa_0 + 1) \cdots \xi(i, p_i, \kappa_0 + 1)] \quad (21)$$

$$\mathbf{h} = \xi(i, p_i + 1, \kappa_0 + 1) \quad (22)$$

将 ξ 的定义代入式(21)和(22)中可得:

$$\mathbf{H} = [\mathbf{Q}(1, i, \kappa_0 + 1)\boldsymbol{\rho}_i \cdots \mathbf{Q}(1, i, \kappa_0 + 1)\boldsymbol{\Gamma}^{p_i-1}(i)\boldsymbol{\rho}_i] \quad (23)$$

$$\mathbf{h} = \mathbf{Q}(1, i, \kappa_0 + 1)\boldsymbol{\Gamma}^{p_i}(i)\boldsymbol{\rho}_i \quad (24)$$

由于 $\boldsymbol{\Gamma}(i)$ 的最小多项式阶为 p_i , 因此, \mathbf{h} 可以用 \mathbf{H} 的列线性表示, 即存在 $\mathbf{u} = [u(0), \cdots, u(p_i - 1)]^T$, $\mathbf{u}^H \mathbf{u} \neq 0$, 使得 $\mathbf{h} = \mathbf{H}\mathbf{u}$ 。将式(21)和(22)代入 $\mathbf{h} = \mathbf{H}\mathbf{u}$ 中可得

$$\mathbf{Q}(1, i, \kappa_0 + 1) \left(\boldsymbol{\Gamma}^{p_i}(i) - \sum_{k=0}^{p_i-1} u(k)\boldsymbol{\Gamma}^k(i) \right) \boldsymbol{\rho}_i = 0 \quad (25)$$

由 $\mathbf{Q}(1, i, \kappa_0 + 1)$ 和 $\boldsymbol{\rho}_i$ 的性质, 式(25)可以化简为

$$\boldsymbol{\Gamma}^{p_i}(i) - \sum_{k=0}^{p_i-1} u(k)\boldsymbol{\Gamma}^k(i) = \mathbf{0} \quad (26)$$

将 $\boldsymbol{\Gamma}(i)$ 代入式(26)中可得, $e^{-j\omega_i, 1}, \cdots, e^{-j\omega_i, p_i}$ 为如下定义的 p_i 阶多项式的根

$$g(x) = x^{p_i} - \sum_{k=0}^{p_i-1} u(k)x^k \quad (27)$$

\mathbf{u} 可以通过将线性最小二乘方法应用到 $\mathbf{h} = \mathbf{H}\mathbf{u}$ 得到。

记 $g(x)$ 的 p_i 个根分别为 $\hat{v}_1, \cdots, \hat{v}_{p_i}$, 则第 i 个相干群对应的波达角 $\theta_{i,1}, \cdots, \theta_{i,p_i}$ 可以通过下式进行估计:

$$\hat{\theta}_{i,k} = -\arcsin\left(\frac{\lambda \arg(\hat{v}_k)}{2\pi d}\right), \quad k = 1, \cdots, p_i \quad (28)$$

由上分析, 将本文所提基于联合对角化的远场相干源波达角估计算法流程总结如下:

(1) 由阵元接收数据构造一组高阶累积量矩阵, 通过矩阵联合对角化技术得到阵列广义流形矩阵 \mathbf{C} 的估计 $\hat{\mathbf{C}}$ 。

(2) 根据阵列流形矩阵 \mathbf{A} 的结构特征及最小

多项式性质, 由式(20), 消除步骤 1 估计中存在的顺序不确定性。

(3) 对消除了顺序不确定性的估计矩阵 $\hat{\mathbf{C}}$ 的每列, 由式(27)和(28)得到一个相干群内波达角的估计。

由上述分析可以看到, 本文所提算法无需进行角度搜索, 而是通过多项式求根得到波达角的估计。另外, 由于波达角是按不同的相干群单独进行估计的, 因此, 即使某几个相干群内存在某个或多个波达角相同, 只要矩阵 \mathbf{C} 是满秩的, 本文算法仍然有效。对本文算法而言, M 个阵元最多可估计 $M \times \lceil M/2 \rceil$ 个波达角, $\lceil M/2 \rceil$ 表示小于或等于 $M/2$ 的数中最大的整数。

3 仿真实验及结果分析

为验证本文所提算法的有效性, 将本文算法与文献[3]的 SV-DOA 算法进行比较。这两种算法均为高阶累积量算法, 高阶累积量算法对高斯噪声有抑制作用^[10], 因此, 不将本文算法与二阶算法进行比较。仿真实验中, 均匀线阵的阵元间距为半个波长。实验结果为 1000 次 Monte-Carlo 实验的平均数据, 采用均方根误差 (RMSE) 作为精度指标:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{r=1}^{1000} \sum_{i=1}^G \sum_{j=1}^{p_i} (\hat{\theta}_{ij}(r) - \theta_{ij})^2}{1000P}} \quad (29)$$

上式中, $\hat{\theta}_{ij}(r)$ 表示第 r 次 Monte-Carlo 仿真时 θ_{ij} 的估计结果。

实验 1 假设阵列由 10 个阵元组成, 源信号为两个等功率统计独立的随机相位信号, 其对应的相干群波达角分别为 $(10^\circ, 20^\circ, 50^\circ)$ 和 $(25^\circ, 40^\circ, 70^\circ)$, 每个人射信号对应的散射系数随机生成, 快拍数为 1024。图 1 给出了信噪比

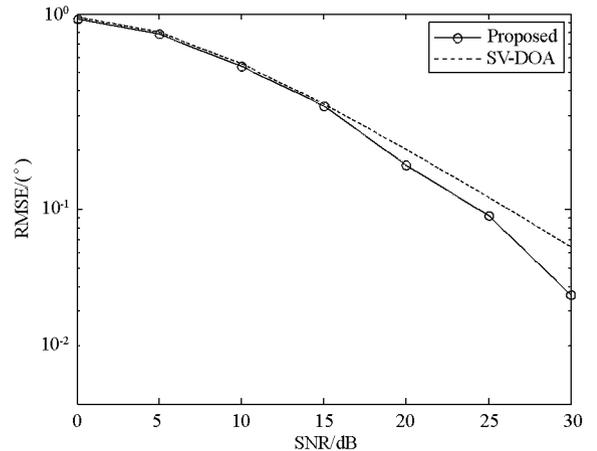


图 1 波达角估计 RMSE 随 SNR 变化曲线
Fig.1 RMSE of DOA estimation versus SNR

(SNR)从 0 dB 变化到 30 dB 时,两种算法的 RMSE 曲线。由图 1 可以看出,低 SNR 时,本文算法和 SV-DOA 算法性能非常近似。而当 SNR 较高(15 dB 以上)时,本文算法性能比 SV-DOA 好。

实验 2 考虑存在部分波达角相同的情形。两个独立源信号对应的波达角分别为 $(10^\circ, 20^\circ, 50^\circ)$ 和 $(10^\circ, 20^\circ, 70^\circ)$,其他仿真条件同实验 1。图 2 给出了 SNR 从 0 dB 变化到 30 dB 时,本文所提算法和 SV-DOA 随 SNR 的变化曲线。由图 2 可以看出,本文所提算法估计精度高于 SV-DOA 算法。

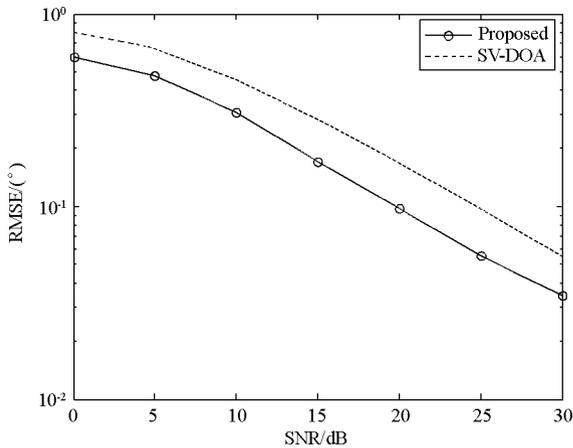


图 2 部分波达角相同时,波达角估计 RMSE 随 SNR 变化曲线

Fig.2 RMSE of DOA estimation versus SNR when some DOAs are the same

4 结论

研究利用线性均匀阵列进行相干源波达角估计。基于源信号的统计独立性,首先通过阵元接收数据构造一组高阶累积量矩阵,由矩阵的联合对角化技术得到阵列广义流形矩阵的估计。然后利用阵列流形矩阵及矩阵最小多项式的性质,消除广义流形矩阵估计的顺序不确定性,最后利用

均匀线阵的旋转不变性,由多项式求根获得波达角的估计。在不同群内信号相互统计独立的假设前提下,本文算法阵元利用效率较高,并能处理多个相干群内存在某些波达角相同的情形。然而,上述算法的优良性能是以计算量一定程度的增加为代价的。

参考文献:

- [1] Shan T J, Wax M, Kailath T. On Spatial Smoothing for Direction-of-arrival Estimation of Coherent Signals [J]. IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process, 1985, ASSP-33(4): 806-811.
- [2] Pillai S U, Kwon B H. Forward/backward Spatial Smoothing Techniques for Coherent Signal Identification [J]. IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process, 1989, 37(1): 8-15.
- [3] Yuen N, Friedlander B. DOA Estimation in Multipath: An Approach Using Fourth-order Cumulants [J]. IEEE Trans. Signal Process, 1997, 45(5): 1253-1265.
- [4] Gonen E, Mendel J M, Dogan J M. Applications of Cumulants to Array Processing, Part IV: Direction Finding in Coherent Signal Case [J]. IEEE Trans. Signal Process, 1997, 45(9): 2265-2276.
- [5] Han F M, Zhang X D. An ESPRIT-like Algorithm for Coherent DOA Estimation [J]. IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., 2005, 4(1): 443-446.
- [6] Qi C Y, Wang Y L, Han Y. Spatial Difference Smoothing for DOA Estimation of Coherent Signals [J]. IEEE Signal Process. Lett., 2005, 12(11): 800-802.
- [7] Ye Z F, Zhang Y F. DOA Estimation for Non-Gaussian Signals Using Fourth-order Cumulants [J]. IET Microw. Antennas Propag., 2009, 3(7): 1069-1078.
- [8] Zhang Y F, et al. An Efficient DOA Estimation Method in Multipath Environment [J]. Signal Processing, 2010, 90: 707-713.
- [9] Li X L, Zhang X D. Nonorthogonal Joint Diagonalization Free of Degenerate Solution [J]. IEEE Trans. Signal Process., 2007, 55(5): 1803-1814.
- [10] 刘全. 改进的累量域波达方向矩阵法 [J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(5): 89-92.