

一种互耦条件下多径信号的 2D DOA 估计方法

李会勇 侯碧波 何子述 贾可新
(电子科技大学电子工程学院, 四川成都 611731)

摘要: 在均匀圆阵的阵列结构下, 提出了一种互耦条件下相干多径信号的 2D DOA 估计方法, 该方法基于 RARE 降秩理论, 首先对多径相干源进行去相干处理, 并对与俯仰角相关的互耦矩阵进行补偿, 然后将圆阵导向矢量转换成新的波束空间阵列流型, 同时将俯仰角与方位角变量构造到两个独立的函数中去, 实现在互耦未知的情况下用求根的方法估计出方位角, 再根据俯仰角向量函数与噪声零空间的关系通过 1D 参数搜索得到俯仰角的估计, 最后再与方位角配对, 得到 2D DOA 估计结果。整个估计过程仅需要 1D 参数搜索, 不需要预先知道空间信源个数及相关性, 俯仰角与方位角能正确配对, 克服了 RARE 算法中 2D DOA 伪估计问题, 没有孔径损失, 计算量较 RARE 算法增加不大。仿真结果验证所提方法的有效性。

关键词: RARE; 多径; 互耦; DOA 估计

中图分类号: TN820.15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2011)04-0634-06

A Novel Method for Multipath Signals' 2D DOA Estimation in the Presence of Mutual Coupling

LI Hui-yong HOU Bi-bo HE Zi-shu JIA Ke-xin

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, 611731, China)

Abstract: For compact uniform circular arrays (UCAs), a novel method for multipath signals' 2D DOA estimation in the presence of mutual coupling is presented. Based on the rank reduction theory (RARE), this method decoherents the multipath coherent signals, and compensates the elevation-dependent mutual coupling, then changing uniform manifold into new beam space array manifold and constructing two independent function of elevation angle and azimuth angle, realizes the estimation of azimuth angles in the presence of unknowing mutual coupling based on the relation between elevation angle function and noise vector null space by 1D parameter search. Finally, 2D DOA estimation is obtained through matching estimation results. Without aperture loss and preknowing the numbers of multipath signals, the estimation process only need 1D parameter search, meanwhile, can match the azimuth angles with elevation angles exactly, overcome the problem of fake 2D DOA estimation in RARE theory whose computation cost is as much as the new proposed algorithm. Simulation results validate the availability of the method.

Key words: RARE; multipath; mutual coupling; DOA estimation

1 引言

在阵列信号处理技术中, 均匀圆阵有着优越的结构特点和良好的测向性能, 它可提供 360 度全方位角信息, 由于它的圆对称性, 使得它在各个方位角上有着相同的测向性能[1-3]。为了避免 2D 谱峰搜索, 高效地实现 2D DOA 估计, 通常使用基于波束空间的相位

模式转换算法将圆阵的阵列流型转换成要求的范德蒙德阵, 如 UCA-RB-MUSIC [1], UCA-ESPRIT [1], UCA-RARE [2] 算法等。在实际应用中, 互耦效应在均匀圆阵中是非常明显的, 而且与俯仰角相关。目前, 大部分高分辨率 DOA 估计算法对互耦效应造成的阵列流型误差非常敏感, 文献 [3-5] 中都提到了如何获得并在 1D 高分辨算法中补偿互耦矩阵, 文献 [6-9] 中提到了

在2D DOA估计中补偿互耦矩阵的高效算法。

另外,来波信号的相干性问题在DOA估计中也是一个不能忽略的问题。由于多径传播,信号经过地面山地或建筑的漫反射后,易形成多径信号,它们之间可能存在一定的相关性,而通常高分辨算法要求来波信号为不相关或低相关,所以,如何去除多径效应也是DOA估计领域的重要研究课题。文献[11-12]提到了基于时间平滑的解相干算法,相对空间平滑算法而言,它没有孔径损失。

如何在2D DOA估计中将互耦效应与多径效应联合考虑在近年却没有得到太多的关注,Roald Goossens和Hendrik Rogier在文献[2]中提到这个问题,但是没有解决,文献[12]中也只提到了存在互耦时的1D DOA估计中用空间平滑解相干算法。

针对上述问题,本文提出了一种在均匀圆阵互耦效应存在条件下,对多径信号的2D DOA估计算法。该算法对文献[9]中所提算法进行了改进,结合了UCA-RARA算法与时间平滑算法,使其能应用于相关和相干信号环境下。首先将圆阵导向矢量转换成波束空间矢量,并对输入数据作时间平滑处理,解相干,同时将俯仰角与方位角变量构造到两个独立的函数中去,并利用求根方法得到方位角,最后根据俯仰角向量函数与噪声零空间的关系通过1D参数搜索得到俯仰角的估计。

2 信号模型

本文采用 M 阵元均匀圆阵的阵列结构形式,如图1所示。

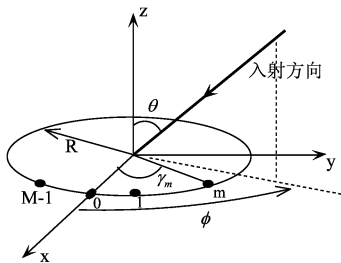


图1 均匀圆阵的阵列结构

Fig.1 The array structure of UCA

设有窄带非高斯信号源 $s(t)$ 经过 $P-1$ 条多径(共 P 个波前)从远场辐射到天线阵列。用 (θ_p, φ_p) 表示第 p 个路径的来波方向,阵列信号经过采样和下变频混到基带后,阵列在第 l 个快拍时刻收到的数据 $\mathbf{X}(l)$ 可以描述为:

$$\mathbf{X}(l) = \mathbf{A}\mathbf{s}(l) + \mathbf{n}(l), l=1, 2, \dots, L \quad (1)$$

其中 L 为快拍数。

\mathbf{A} 是未知的 $M \times P$ 矩阵,其形式为:

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1, \phi_1) \quad \mathbf{a}(\theta_2, \phi_2) \quad \dots \quad \mathbf{a}(\theta_P, \phi_P)] \quad (2)$$

$\mathbf{a}(\theta_p, \varphi_p)$ 是第 p 条多径的方向向量,对均匀圆阵,有:

$$\mathbf{a}(\theta_p, \phi_p) = [e^{-j\phi_0(\theta_p, \phi_p)} \quad e^{-j\phi_1(\theta_p, \phi_p)} \quad \dots \quad e^{-j\phi_{M-1}(\theta_p, \phi_p)}]^T \in \mathbb{C}^{M \times 1} \quad (3)$$

$$\phi_m(\theta_p, \phi_p) = -\frac{2\pi}{\lambda} R \sin(\theta_p) \cos(\phi_p - \frac{2\pi m}{M}),$$

$$m=0, 1, \dots, M-1 \quad (4)$$

其中 R 表示圆阵半径, λ 表示载波波长, M 表示阵元数。

$\mathbf{s}(l)$ 是 $P \times 1$ 维的波前向量, $\mathbf{n}(l)$ 为均匀圆阵上的零均值的高斯白噪声,并且各阵元之间的测量噪声统计独立。

由于 $\mathbf{s}(l)$ 是由 $s(t)$ 经 P 条多径产生,因此 $\mathbf{X}(l)$ 可表示为:

$$\mathbf{X}(l) = \mathbf{A}\mathbf{C}\mathbf{s}(l) + \mathbf{n}(l) \quad (5)$$

矩阵 \mathbf{C} 的形式为:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1(l) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & c_2(l) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & c_p(l) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$c_p(l) = \alpha_p(l) e^{-j\varphi_p(l)}$ 是第 p 个多径的衰落因子(复幅度),当 P 足够大时,一般认为相位 $\varphi_p(l)$ 为均匀分布,幅度 $\alpha_p(l)$ 服从瑞利分布。

在互耦效应条件下,导向矢量可化为[10]:

$$\tilde{\mathbf{a}}(\theta, \phi) = \mathbf{Z}(\theta)\mathbf{a}(\theta, \phi) \quad (7)$$

其中 $N \times N$ 维矩阵 $\mathbf{Z}(\theta)$ 为均匀圆阵的互耦矩阵(MCM),MCM会随着俯仰角的变化而变化,文献[3]中提出了如何准确估计出MCM,对固定的俯仰角,MCM可用一个三带状循环矩阵进行建模。

所以,当存在互耦时,阵列第 l 个快拍数据可以表示为:

$$\tilde{\mathbf{X}}(l) = \tilde{\mathbf{A}}\mathbf{C}\mathbf{s}(l) + \mathbf{n}(l) = \mathbf{Z}(\theta)\mathbf{A}\mathbf{C}\mathbf{s}(l) + \mathbf{n}(l) \quad (8)$$

3 基本的UCA-RARE

由于互耦矩阵 $\mathbf{Z}(\theta)$ 的循环特性,互耦条件下的导向矢量可由圆阵导向矢量与 $\mathbf{Z}(\theta)$ 的第一行联合表示[3]:

$$\tilde{\mathbf{a}}(\theta, \phi) = \mathbf{Z}(\theta)\mathbf{a}(\theta, \phi) = \mathbf{a}(\theta, \phi) \otimes \mathbf{z}(\theta) \quad (9)$$

其中“ \otimes ”表示离散序列的周期卷积。

对于UCA阵列,对导向矢量作DFT,可以将阵元空间变换到波束空间,在波束空间条件下,新的导向矢量可以将关于 (θ, ϕ) 的函数独立表示:

$$\mathbf{b}(\theta, \phi) = \mathbf{W}\mathbf{a}(\theta, \phi) \approx \mathbf{T}(\phi)\mathbf{g}(\theta) \quad (10)$$

其中

$$\mathbf{W} = [\mathbf{w}_{-M_0}, \mathbf{w}_{-M_0+1}, \dots, \mathbf{w}_{-1}, \mathbf{w}_0, \mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_{M_0-1}, \mathbf{w}_{M_0}] \quad (11)$$

$$\mathbf{w}_{m_0} = \frac{1}{N} [1, e^{j\frac{2\pi}{N}}, e^{j\frac{4\pi}{N}}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{N}(N-1)}] \quad (12)$$

$$[\mathbf{g}(\theta)]_k = j^{M_0-k+1} J_{M_0-k+1}(\beta \sin \theta), k=1, 2, \dots, M_0+1 \quad (13)$$

$$\mathbf{T}(\phi) = \begin{bmatrix} Q(z) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 1 \\ \prod Q(1/z) & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$Q(z) = \text{diag}\{z^{-M_0}, z^{-M_0+1}, \dots, z^{-2}, z^{-1}\} \quad (15)$$

$$z = e^{j\phi} \quad (16)$$

公式(11)中, M_0 表示相位模式数, 即 $M_0 \approx 2\pi r/\lambda$, 为避免延拓分量影响, 一般要满足 $M > 2M_0$

公式(13)中, $J_{M_0-k+1}(\beta \sin \theta)$ 表示第一类 M_0-k+1 阶贝塞尔函数, $\beta = 2\pi r/\lambda$

公式(14)中, \prod 表示 $M_0 \times M_0$ 阶反对角单位矩阵

在互耦条件下, 式(10)可以改写为[9]:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{b}}(\theta, \phi) &= \mathbf{T}(\phi)\mathbf{g}'(\theta) \\ &= \mathbf{T}(\phi) (\text{DFT}_{(m+1:-1:1)}[\mathbf{z}(\theta)]) \bullet \mathbf{g}(\theta) \\ &= \mathbf{T}(\phi) (\mathbf{m}(\theta) \bullet \mathbf{g}(\theta)) \end{aligned} \quad (17)$$

其中: “ \bullet ” 表示 Hadamard 乘积, 即矩阵元素的点乘。

基于 RARE 的基本理论[9], 并利用信号子空间与噪声子空间的正交性, 有:

$$[\mathbf{g}'(\theta)]^H \mathbf{T}(\phi) \mathbf{E}_N \mathbf{E}_N^H \mathbf{T}(\phi) \mathbf{g}'(\theta) = 0 \quad (18)$$

$$f(\phi) = \arg \min_{\phi} \det[\mathbf{T}(\phi) \mathbf{E}_N \mathbf{E}_N^H \mathbf{T}(\phi)] \quad (19)$$

根据式(18)、(19), 可以在俯仰角与互耦矩阵未知的情况下估计出方位角。尽管此时求出来的方位角中会存在伪方位角 $(\phi_i + \phi_j)/2$ (ϕ_i, ϕ_j 表示估计出的真实方位角), 但是在俯仰角求解过程中会自动将伪方位角去除掉。

在求解得到方位角后, 计算矩阵 $\boldsymbol{\Psi}(\phi) = \mathbf{T}(\phi) \mathbf{E}_N \mathbf{E}_N^H \mathbf{T}(\phi)$, 分别对 $\boldsymbol{\Psi}(\phi)$ 作特征值分解, 可以得到 $\boldsymbol{\Psi}(\phi)$ 对应的零空间 $\Gamma(\phi)$, 即特征分解过程中, 特征值接近于零时对应的特征向量张成的空间。

根据文献[9]中的理论, 当对俯仰角从 0° 到 90° 搜索时, 当且仅当俯仰角与方位角都为真实估计值时, $\mathbf{g}'(\theta)$ 属于 $\Gamma(\phi)$ 的子空间, 由此, 不仅伪方位角被去除掉, 还能实现方位角与俯仰角的自动配对。

4 改进的UCA-RARE

为了将UCA-RARE算法应用到多径环境中去, 必须根据算法的特点, 对数据作去相干处理, 由多径信号模型, 可以得到 $\mathbf{X}(l)$ 的数据协方差矩阵:

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= E[\tilde{\mathbf{X}}(l)\tilde{\mathbf{X}}(l)^H] = \mathbf{Z}(\theta)\mathbf{A}\mathbf{C}_s(l)s(l)^H\mathbf{C}^H\mathbf{A}^H\mathbf{Z}^H(\theta) \\ &= \tilde{\mathbf{A}}\mathbf{Q}\tilde{\mathbf{A}}^H + \sigma^2\mathbf{I} \end{aligned} \quad (20)$$

其中:

$$\mathbf{Q} = E\left[\begin{bmatrix} \|s(l)\|^2 & & \\ & \ddots & \\ & & \|s(l)\|^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E\left[\|c_1(l)\|^2\right] & \dots & E\left[c_1(l)c_p(l)^*\right] \\ \dots & \ddots & \dots \\ E\left[c_p(l)c_1(l)^*\right] & \dots & E\left[\|c_p(l)\|^2\right] \end{bmatrix}\right] \quad (21)$$

当所有信号都相关时, 上面矩阵 \mathbf{Q} 的秩为 1, 但是在使用UCA-RARE算法时, 必须保证 \mathbf{Q} 为满秩, 即噪声子空间 \mathbf{E}_N 与信号子空间 \mathbf{E}_s 完全正交, 才能将所有 P 个信号的来波方向估计出来, 所以要采取措施使得矩阵 \mathbf{Q} 为满秩。

在瑞利衰落信道中, 信道衰落速度通常用相关时间 $T_{coh} = c/(v f_c)$ 来表征, c 表示光速, v 表示目标相对于阵列的多普勒频移, f_c 表示载波频率, 在相关时间 T_{coh} (几秒钟) 以内, 一般认为多径的DOA是慢变化的, 但是衰落因子 $c_p(l)$ 是快变化的, 其相位 $\varphi_p(l)$ 服从 $(-\pi, \pi)$ 的均匀分布, 幅度 $\alpha_p(l)$ 服从瑞利分布[10]。

如果相位 $\varphi_p(l)$ 与幅度 $\alpha_p(l)$ 之间统计独立, 而且不同路径的 $\varphi_p(l), \alpha_p(l)$ 之间也能相互独立, 那么矩阵 \mathbf{Q} 变成对角矩阵:

$$\mathbf{Q} = E\left[\begin{bmatrix} \|s(l)\|^2 & & \\ & \ddots & \\ & & \|s(l)\|^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E\left[\|c_1(l)\|^2\right] & \dots & 0 \\ \dots & \ddots & \dots \\ 0 & \dots & E\left[\|c_p(l)\|^2\right] \end{bmatrix}\right] \quad (22)$$

此时得到的结果完全满足UCA-RARE算法进行DOA估计的需求。

所以, 将时间平滑应用到UCA-RARE算法中去就是要保证各路径的衰落因子 $c_p(l)$ 相互独立, 在对信号采样的过程中, 每个数据块样本的获取时间要远小于 T_{coh} 。观察式(22)中的对角矩阵 \mathbf{Q} , 可以得到数据协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_{TS} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N'} \sum_{n=1}^{N'} y_n(n) y_n^H(n)$ (K 表示数据块个

数, N' 表示每个数据块长度), 其可分为信号子空间 \mathbf{E}_s 和噪声子空间 \mathbf{E}_N , 对应的特征值为:

$$\lambda_i = \begin{cases} p_{ii} + \sigma^2, & i=1, 2, \dots, P \\ \sigma^2, & i=P+1, \dots, M \end{cases} \quad (23)$$

因为 UCA-RARE 算法至少需要一个噪声特征值, 以使得 P 个信号能被投影到噪声子空间去, 所以估计 P 个信号, 最多需要 $P+1$ 个天线阵元, 没有任何孔径损失。

改进算法的实现步骤为:

步骤 1 通过分析接收互耦阻抗的方法计算出循环带状矩阵 $\mathbf{Z}(\theta)$ [3], 求得一个关于 θ 的查找表 $\mathbf{g}'(\theta)$: $\mathbf{g}'(\theta) = (\text{DFT}_{(m+1:-1:1)}[\mathbf{z}(\theta)]) \bullet \mathbf{g}(\theta) = \mathbf{m}(\theta) \bullet \mathbf{g}(\theta)$;

步骤 2 针对输入信号的快变化特性, 获得不同时间段的数据块, 求得平均协方差矩阵 \mathbf{R}_{TS} , 并作特征分解, 求得 \mathbf{E}_N ;

步骤 3 通过对 $f(\phi) = \arg \min_{\phi} \det[\mathbf{T}(\phi) \mathbf{E}_N \mathbf{E}_N^H \mathbf{T}(\phi)]$ 求根, 可以得到方位角估计, 估计的值中会有伪方位角 $(\phi_i + \phi_j)/2$, 但是在接下来的步骤中可以被去掉。

步骤 4 对每个方位角计算 $\boldsymbol{\psi}(\phi_i) = \mathbf{T}(\phi_i) \mathbf{E}_N \mathbf{E}_N^H \mathbf{T}(\phi_i)$, 并求出其对应的零空间 $\boldsymbol{\Gamma}(\phi_i)$;

步骤 5 使用 1D 搜索对 θ 从 $0^\circ \leq \theta_j \leq 90^\circ$ 范围内扫描, 当 $\mathbf{g}'(\theta_j)$ 属于 $\boldsymbol{\Gamma}(\phi_i)$ 的子空间时, 此 (θ_j, ϕ_i) 就是一对正确的 DOA 估计值。

由上述实现步骤可知, 改进算法在步骤 3 和步骤 5 需要两次 1D 搜索, 计算量相比较与普通的 2D 搜索有很大的改善。时间平滑的引入并没有给改进算法带来更大的计算量上的负担, 也没有孔径上的损失。

5 仿真及结果分析

为了验证所提出算法的正确性和性能, 本文进行了大量仿真, 包括非相干和相干环境, 并对改进算法的估计精度、分辨率性能进行了分析。

基本的仿真条件为: 一个全向阵元组成的均匀圆阵 (UCA), 阵元数 $M=9$ (其中阵元半径为 0.73 倍波长), 数据块长度为 1000, 个数为 5, 噪声为零均值的高斯过程, 采用 Monte Carlo 实验, 实验次数为 $N=200$ 次。

估计标准差定义为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{PN} \sum_p \sum_{n=1}^N (\hat{\theta}_p - \theta_p)^2} \quad \text{或}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{PN} \sum_p \sum_{n=1}^N (\hat{\phi}_p - \phi_p)^2}$$

成功概率定义为:

$$F = \frac{N_1}{N}$$

式中 $\hat{\theta}, \hat{\phi}$ 为俯仰角和方位角估计结果, θ, ϕ 为真实值, N_1 表示 N 次试验中 $\sqrt{(\hat{\theta} - \theta)^2 + (\hat{\phi} - \phi)^2} < 0.5$ 的次数。

5.1 估计精度的仿真环境

图 2 表示的是两个信号入射到阵列上, 信号入射角度分别为 $[10^\circ, 20^\circ]$ 、 $[30^\circ, 60^\circ]$, 当信号相关系数为 0.3 时, 用本文提出的改进算法和文献 [9] 中基本算法对俯仰角与方位角做 DOA 估计。图中六条曲线分别表示相关系数为 0.3 的改进算法方位角和俯仰角估计精度、基本算法方位角和俯仰角估计精度, 以及相干信号的改进算法方位角和俯仰角估计精度随信噪比 SNR 增大时的变化情况。由于在相干信号情况下, 基本的 RARE 算法无法进行 DOA 估计, 所以图中未能给出对应的性能曲线。图 2 中: Line1 表示相关系数为 0.3 的改进算法的方位角估计, Line2 表示相关系数为 0.3 的改进算法的俯仰角估计, Line3 表示相关系数为 0.3 的原始算法的方位角估计, Line4 表示相关系数为 0.3 的原始算法的俯仰角估计, Line5 表示相关系数为 1 的改进算法的方位角估计, Line6 表示相关系数为 1 的改进算法的俯仰角估计, Line7 表示方位角的开均方的克拉-美罗界, Line8 表示俯仰角的开均方的克拉-美罗界。

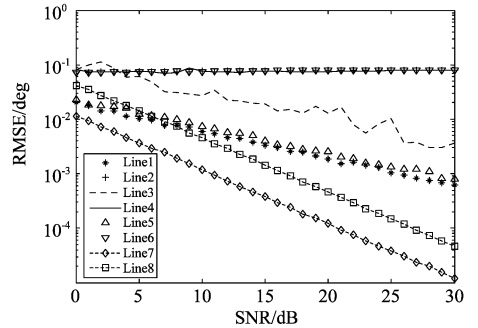


图 2 不同信噪比条件下的估计标准差

Fig. 2 RMSEs versus SNR level

由图 2 可知, 当信号相关时, 随着信噪比的变化, 本文提出改进算法与基本算法都能对信号作出准确估计, RMSE 都在 0.25 度以下。当信号相干时, 基本算法已无法估计出信号, 本文算法仍然具有优良的估计性能。

图 3 中六条曲线分别表示当相关系数为 0.3 时, 改进算法和基本算法的方位角和俯仰角估计精度, 以及相干信号源情况下的 DOA 估计精度, 信噪比为 30dB。图 3 中: Line1 表示相关系数为 0.3 的改进算法的方位角估计, Line2 表示相关系数为 0.3 的改进算法的俯仰

角估计,Line3表示相关系数为0.3的原始算法的方位角估计,Line4表示相关系数为0.3的原始算法的俯仰角估计,Line5表示相关系数为1的改进算法的方位角估计,Line6表示相关系数为1的改进算法的俯仰角估计,Line7表示方位角的开均方的克拉-美罗界,Line8表示俯仰角的开均方的克拉-美罗界。

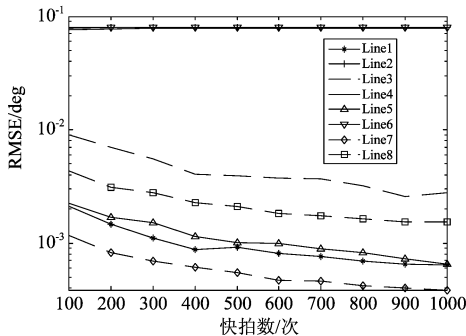


图3 不同快拍数条件下的估计标准差

Fig.3 RMSEs versus Snapshot level

由图3中可知,在相关信号入射情况下,基本算法对俯仰角的估计性能要优于本文提出的改进算法,但对方位角的估计性能稍差于本文提出的改进算法,在相干信号下改进算法的性能与相关信号条件下的性能相当,同样能准确估计出信号入射角。

5.2 分辨率的仿真环境

图4表示的是空间中两个信号入射到阵列上,入射角度间隔变化时成功概率的变化情况。为了更好地观察角度间隔变化下的成功概率,两个信号俯仰角都为 10° ,其中一个信号的方位角为 20° ,另一个的方位角变化范围为 $20^\circ \sim 40^\circ$,信噪比为30dB,快拍数为1000。图中三条曲线分别表示相关系数为0.3的改进算法的成功概率、相干信号的改进算法的成功概率以及相关系数为0.3的基本算法的成功概率随角度增大时的变化情况,横坐标是角度间隔,纵坐标是成功概率。

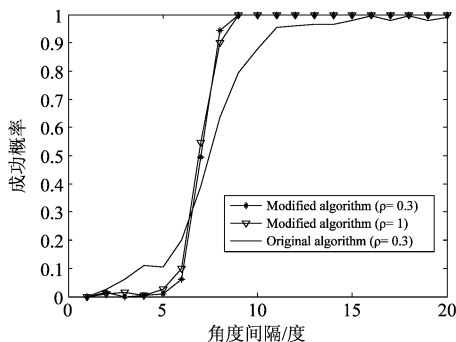


图4 不同角度间隔下的成功概率

Fig.4 Success Probability versus Angle-Interval

由上图可知,改进算法在角度间隔为 9° 时,对相关或相干信号都能以全概率估计,而基本算法对相关信号始终不能做到全概率成功估计,对相干信号几乎不能估计,所以在分辨率方面改进算法要优于基本算法。

6 结语

本文提出了一种在均匀圆阵互耦效应存在情况下,对多径信号的2D DOA估计方法。它在RARE算法基础上,高效补偿了俯仰角相关的互耦效应,对相干信号解相干,无孔径损失,不需要预先知道空间信号源个数及相干性,克服了原始的RARE算法中2D DOA伪估计问题,并能使俯仰角与方位角正确配对,而且在计算量上,只比文献[9]中提出的算法多了 K 个数据块的自相关函数的加法运算,基本上可以忽略不计,所以本文所提的算法是一种稳健、实用的2D均匀圆阵DOA估计方法。

参考文献

- [1] Mathews C P, Zoltowski M D, Eigenstructure techniques for 2-D angle estimation with uniform circular arrays, *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 1994, vol. 42, nn. 9, pp. 2395-2407.
- [2] Goossens R, Rogier H, A Hybrid UCA-RARE Root-MUSIC Approach for 2-D Direction of Arrival Estimation in Uniform Circular Arrays in the Presence of Mutual Coupling, *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 2007, vol. 55, nn. 3, pp. 841-849.
- [3] H T Hui, Improved compensation for the mutual coupling effect in a dipole array for direction finding, *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 2003, vol. 51, pp. 2498-2503.
- [4] Liao B, Zhang Z G, Chan S C, A subspace-based method for DOA estimation of uniform linear array in the presence of mutual coupling[J], *Circuits and Systems (ISCAS), Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on*, 2010, pp. 1879-1882.
- [5] Zhongfu Ye, Jisheng Dai, Xu Xu, Xiao pei Wu, DOA Estimation for Uniform Linear Array with Mutual Coupling, *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, 2009, vol. 45, nn. 1, pp. 280-288.
- [6] Zhifeng Zeng, Huashan Ma, Subspace-Based Self-Calibration of Mutual Coupling in Uniform and Circular Array[J], *Image and Signal Processing, 2009. CISP'09. 2nd International Congress on*, 2009, pp. 1-5.
- [7] T T Zhang; Lu Y L; Hui H T, Simultaneous estimation of mutual coupling matrix and DOAs for UCA and ULA, *Electromagnetic Compatibility, 2006. EMC-Zurich 2006*.

17th International Zurich Symposium on., 2006, pp. 265-268.

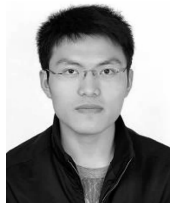
- [8] Goossens R., Rogier H., 2-D direction-of-arrival estimation in the presence of mutual coupling by exploiting the symmetry in a uniform circular array, Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007 IEEE., 2007, pp. 5283-5286.
- [9] Bu Hong Wang, H T Hui, Mook Seng Leong, Decoupled 2D Direction of Arrival Estimation Using Compact Uniform Circular Arrays in the Presence of Elevation-Dependent Mutual Coupling, Antennas and Propagation, IEEE Transactions on., 2010, vol. 58, pp. 747-755.
- [10] Zhenghui Gu, Gunawan E, A performance analysis of multipath direction finding with temporal smoothing, Signal Processing Letters, IEEE., 2003, vol. 10, nn. 7, pp. 200-203.
- [11] Hong Jiang, Shu xun Wang, Azimuth and elevation estimation for multipath signals exploiting cyclostationarity and temporal smoothing technology, Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, 2005. MAPE 2005. IEEE International Symposium on., vol. 2, pp. 1066-1070.
- [12] Xu Xu, Zhongfu Ye, Yufeng Zhang, DOA Estimation for Mixed Signals in the Presence of Mutual Coupling, Signal Processing, IEEE Transactions on., 2009, vol. 57, nn. 9, pp. 3523-3532.

作者简介



李会勇(1975-),男,湖北,汉,电子科技大学电子工程学院副教授,研究方向为DBF及阵列信号处理等。

E-mail:hyli@uestc.edu.cn



侯碧波(1986-),男,湖南,汉,电子科技大学电子工程学院硕士,研究方向为阵列信号处理。

E-mail:houbibo@126.com



何子述(1962-),男,四川,汉,博导,电子科技大学电子工程学院教授,研究方向为相控阵雷达、阵列信号处理。

E-mail:zshe@uestc.edu.cn



贾可新(1982-),男,河南,汉,电子科技大学电子工程学院博士,研究方向为阵列信号处理。

E-mail:jiakexin@uestc.edu.cn