

互耦效应下用单快拍数据实现相干信源完全解相干和解耦合

王凌* 李国林 谢鑫
(海军航空工程学院 烟台 264001)

摘要: 阵元间存在互耦时,会对阵列流型产生扰动,同时当空间来波存在相干信源时,协方差矩阵会产生秩亏,这两类问题都会使子空间类估计算法性能急剧下降甚至失效。针对互耦效应下的解相干问题,该文提出了一种仅利用阵列单快拍即可实现完全解相干和解互耦算法—互耦效应下的修正单次快拍算法(MC-ENDTOP)。该方法将原单快拍算法应用背景推广至任意形式来波信号,利用一次快拍构造等效接收数据协方差矩阵,通过数据分解,将互耦系数从阵列流型矩阵中剥离,从而实现了完全解互耦,并将其归入分解后的等效信号协方差矩阵中,由于等效信号协方差矩阵为对角阵,且对角元素与信号相关性无关,因此进一步实现了完全解相干。仿真验证了该文算法能够抑制互耦影响,估计性能和无互耦时相当,且适用于实时性要求高的场合。

关键词: 阵列信号处理;波达方向;互耦;解相干;参数估计;单快拍

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)10-2532-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00290

Decorrelation and Decoupling of Coherent Signals in the Presence of Mutual Coupling Using Single Snapshot

Wang Ling Li Guo-lin Xie Xin

(Naval Aeronautics and Astronautics University, Yantai 264001, China)

Abstract: The performance of subspace estimation algorithms degrades substantially in the presence of mutual coupling and coherent environments by the perturbation of steering matrix and the rank defect of covariance matrix. In order to settle these issues, a novel modified single snapshot algorithm for decorrelation and decoupling using only single snapshot is proposed. The algorithm utilizes single snapshot to constitute equivalent receiving data covariance matrix, the mutual coupling coefficients can be isolated from steering matrix and be absorbed into equivalent signal covariance matrix by decomposing the equivalent receiving data covariance matrix, so the decoupling is accomplished. Equivalent signal covariance matrix is a diagonal matrix, and its diagonal elements are unrelated to the correlation of signals, so the decorrelation is accomplished. The simulation results show that the proposed algorithm can restrain mutual coupling and be applied to high calculation speed scenarios. The performance of the algorithm is equivalent to the performance of the algorithm without mutual coupling.

Key words: Array signal processing; Direction Of Arrival (DOA); Mutual coupling; Decorrelation; Parameter estimation; Single snapshot

1 引言

近年来,空间谱估计研究领域取得了快速的发展,大量改进算法丰富了子空间类算法^[1-4]。但对算法实用性的要求是理论走向工程的必然,阵列误差一直是高分辨率谱估计技术走向实用化的一个瓶颈。标准的子空间类算法(MUSIC, ESPRIT)都是以知道精确的阵列流型为前提,但在互耦效应的影响下阵列流型会存在扰动。文献[5,6]证明了当阵列流

型受到互耦扰动时,估计性能会急剧恶化。虽然文献[7]中也证明了当已知互耦系数时,用 $\mathbf{Ca}(\theta)$ 作为方向向量进行谱峰搜索,空间谱估计性能不会下降,但大多数情况下,互耦系数无法测得或预估,因此研究能通过算法内部机制抑制互耦因素影响的快速算法显得尤为迫切。部分文献针对互耦补偿和互耦预估做了研究^[8-12],文献[8]针对均匀圆阵提出了一种自校正算法,但该方法不能针对相干源实现到达角估计。文献[9]提出了一种最大似然校准算法去补偿互耦,幅相误差和阵元位置误差。虽然该方法能够补偿各种误差,但它需要已知位置的校准源。文献[10]提出了一种通过迭代过程来补偿互耦的算

2012-03-21 收到, 2012-05-28 改回

国家自然科学基金(60902054), 中国博士后科学基金(201003758, 20090460114)和“泰山学者”建设工程专项经费资助课题

*通信作者: 王凌 wang_ling1@yeah.net

法, 但收敛速率慢, 且多维搜索导致计算量大。文献[11,12]提出了一种利用附加阵元来补偿互耦效应的方法, 但该方法以及上述算法都没有解决相干源存在下的互耦校正。

空间相干信源的存在会使协方差矩阵产生秩亏, 造成信号子空间向噪声子空间扩散, 导致子空间类算法失效。查阅相关文献, 现在能同时实现解相干和抑制互耦的算法较少。文献[13]中首次提出了一种只利用一次快拍构造数据矩阵实现波达方向估计的算法(简称为 DTOP 算法), 该算法只使用一次快拍, 且构造的等效协方差矩阵中不用进行相关运算, 因此该算法的实时性很高。但该算法模型推导中需要满足 $s_i = s_i^*$ 的条件, 即模型应用背景必须为初始相位为零的非圆入射信源, 这在实际环境中几乎不可能满足, 且该模型在考虑互耦效应影响后将不再成立, 因此导致该算法在互耦效应影响和信号形式不满足非圆条件下误差偏大甚至失效。

为了将原单次快拍算法进行修正与推广, 本文首先通过重新设计阵列, 提出了可针对任意信号形式的修正单快拍算法(ENDTOP), 然后在此基础上考虑互耦效应的影响, 提出了互耦效应下的修正单快拍算法(MC-ENDTOP), 通过附加阵元和相应数据矩阵的构造, 经过数据矩阵分解, 将互耦系数从阵列流型矩阵中剥离, 从而实现了完全解互耦, 并将其归入分解后的等效信号协方差矩阵中, 由于等效信号协方差矩阵为对角阵, 且对角元素与信号相关性无关, 因此进一步实现了完全解相干。数值仿真结果可知, 在任意信号形式下, ENDTOP 算法都能准确估计 DOA, 而文献[13]中算法已经失效。在考虑互耦效应和相干源入射情形下, MC-ENDTOP 算法能实现完全解相干和解互耦, 估计性能和不考虑互耦时的 ENDTOP 算法相近。

2 问题提出

2.1 阵列和互耦模型建立

考虑空间有 M 个相关性未知的远场窄带信源入射到由 $2N-1$ 个全向阵元组成的均匀线性阵列上。 M 个入射信号 $s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)$ 拥有相同的中心波长 λ , 入射方向分别为 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M$ 。天线阵列相邻阵元间距为 d , 考虑到避免估值模糊和简化分析需要, 取 $d = \lambda/2$ 。阵列接收到的噪声为独立同分布的加性高斯白噪声, 它们具有相同的方差 σ^2 。

对于均匀线性阵列阵元间的互耦, 可以用一个带状的对称 Toeplitz 矩阵来描述。本文互耦模型考虑 L 个阵元间的相互作用, 此时互耦系数矩阵 \mathbf{C} 可表示为

$$\mathbf{C} = \text{toeplitz}(\mathbf{c}) \quad (1)$$

$\text{toeplitz}(\mathbf{c})$ 表示由矢量 \mathbf{c} 形成对称 Toeplitz 矩阵, 其中 \mathbf{c} 为 $2N-1$ 维矢量, 且有

$$\mathbf{c} = [c_0, c_1, \dots, c_{L-1}, 0, \dots, 0],$$

$$1 = c_0 > |c_1| > \dots > |c_{L-1}| > 0 \quad (2)$$

此时, 阵列的接收数据可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(t) &= [x_0(t), x_1(t), \dots, x_{2N-2}(t)]^T \\ &= \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

式中

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_M)] \quad (4)$$

为 $(2N-1) \times M$ 维阵列流型矩阵, $\mathbf{a}(\theta_k)$ 为对应的方向向量, 且有

$$\mathbf{a}(\theta_k) = [1, u(\theta_k), u^2(\theta_k), \dots, u^{(2N-2)}(\theta_k)]^T \quad (5)$$

$$u(\theta_k) = e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d\sin\theta_k} \quad (6)$$

$\mathbf{S}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)]^T$ 为 M 个入射信号矢量, $\mathbf{N}(t) = [n_0(t), n_1(t), \dots, n_{2N-2}(t)]^T$ 为阵列噪声矢量。

2.2 单次快拍算法改进与推广

文献[13]中首次提出了利用一次快拍数据构造形式如(7)的数据矩阵, 通过数据分解得到的信号协方差矩阵可以等效为 M 个独立信号源入射, 这样就实现了解相干处理。但文献[13]中算法成立的前提是入射信号满足关系式 $s_k = s_k^*$, 即输入信号全部为初始相位为零的非圆信号时才能成立, 这样严格的要求在现实应用中几乎不可能满足, 非圆信号初始相位不为零或入射信号为复信号时式(7)的推导均不成立, 且如果考虑互耦效应影响, 单次快拍算法已经失效。

$$\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} x_0(t) & x_1^*(t) & \dots & x_{2N-2}^*(t) \\ x_1(t) & x_0(t) & \dots & x_{2N-3}^*(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{2N-2}(t) & x_{2N-3}(t) & \dots & x_0(t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

本节先把单次快拍算法的应用背景推广至可针对任意信号形式, 在下一节再分析考虑互耦效应后如何通过内部机制抑制互耦效应对修正后单次快拍算法的影响。

仍然利用图 1 中所示的阵列系统, 仅把参考阵元设置为原阵列的第 $N-1$ 个阵元处。则新的阵元编号为 $-(N-1), -(N-2), \dots, 0, \dots, N-2, N-1$ 。此时, 利用阵列系统的单快拍数据构造如式(8)所示的数据矩阵 \mathbf{R}_2 , 通过数据分解, 可以得到式(9), 推导过程中对入射信号 $s_i(t)$ 形式不做任何要求, 且保持了原单快拍算法的完全解相干能力。其中 $\mathbf{A}(N:2N$

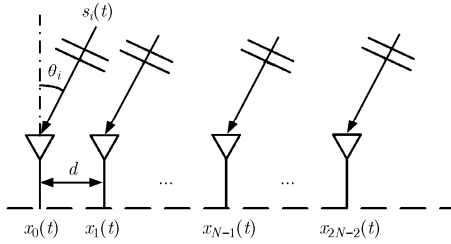


图1 阵列模型

-1) 表示取原阵列流型矩阵 \mathbf{A} 的第 N 到 $2N-1$ 行。

$$\mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} x_0(t) & x_{-1}(t) & \cdots & x_{-(N-1)}(t) \\ x_1(t) & x_0(t) & \cdots & x_{-(N-2)}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N-1}(t) & x_{N-2}(t) & \cdots & x_0(t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{R}_2 = \mathbf{A}(N:2N-1) \begin{bmatrix} s_1(t) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & s_2(t) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & s_M(t) \end{bmatrix} \mathbf{A}(N:2N)$$

$$-1)^H + \begin{bmatrix} n_0(t) & n_{-1}(t) & \cdots & n_{-(N-1)}(t) \\ n_1(t) & n_0(t) & \cdots & n_{-(N-2)}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ n_{N-1}(t) & n_{N-2}(t) & \cdots & n_0(t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\tilde{\mathbf{C}} = \begin{bmatrix} c_{L-1} & \cdots & c_1 & 1 & c_1 & \cdots & c_{L-1} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & c_{L-1} & \cdots & c_1 & 1 & c_1 & \cdots & c_{L-1} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \cdots & \ddots & \ddots & \ddots & \cdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & c_{L-1} & \cdots & c_1 & 1 & c_1 & \cdots & c_{L-1} & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & c_{L-1} & \cdots & c_1 & 1 & c_1 & \cdots & c_{L-1} \end{bmatrix}_{(2N-1) \times (2N+2L-3)} \quad (13)$$

用 $\tilde{\mathbf{C}}$ 乘以某一信源的方向向量 $\tilde{\mathbf{a}}(\theta_k)$ 可以得到以下关系，式中用 u 代替 $u(\theta_k)$ ：

$$\tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{a}}(\theta_k) = \begin{bmatrix} c_{L-1}u^{-(N+L-2)} + \cdots + c_1u^{-N} + u^{-(N-1)} + c_1u^{-(N-2)} + \cdots + c_{L-1}u^{-(N-L)} \\ c_{L-1}u^{-(N+L-3)} + \cdots + c_1u^{-(N-1)} + u^{-(N-2)} + c_1u^{-(N-3)} + \cdots + c_{L-1}u^{-(N-L-1)} \\ \vdots \\ c_{L-1}u^{N-L-1} + \cdots + c_1u^{N-3} + u^{N-2} + c_1u^{N-1} + \cdots + c_{L-1}u^{N+L-3} \\ c_{L-1}u^{N-L} + \cdots + c_1u^{N-2} + u^{(N-1)} + c_1u^N + \cdots + c_{L-1}u^{N+L-2} \end{bmatrix} \\ = (c_{L-1}u^{1-L} + \cdots + c_1u^{-1} + 1 + c_1u + \cdots + c_{L-1}u^{L-1})\tilde{\mathbf{a}}_1(\theta_k) \quad (14)$$

定义 $c(\theta_k) = c_{L-1}u^{1-L} + \cdots + c_1u^{-1} + 1 + c_1u + \cdots + c_{L-1}u^{L-1}$ ，进一步推导，可得 $c(\theta_k) = 2\sum_{n=1}^{L-1} c_n \cos(2n\pi(\sin\theta_k)d/\lambda) + 1$ ，可以看出当互耦系数确定时， $c(\theta_k)$ 是一个和入射信源来波方向有关的常量。 $\tilde{\mathbf{a}}_1(\theta_k) = [u^{-(N-1)}(\theta_k), \cdots, 1, \cdots, u^{N-1}(\theta_k)]$ 为新阵列中原 $2N-1$ 个阵元的方向向量。此时，将式(10)写成如下形式：

值得注意的问题是，原单次快拍算法(DTOP)和修正后的单次快拍算法(ENDTOP)都是在没考虑互耦模型的基础上进行推导的，但阵元间的互耦效应是不可避免的，当考虑互耦系数矩阵后，以上推导过程均不成立。如果继续使用一次快拍按式(8)进行数据构造，然后使用子空间类算法进行估计，会出现较大误差。

3 单快拍实现完全解相干与解互耦算法

本节在修正后的单次快拍算法基础上，考虑互耦效应，分析修正后的单快拍算法对互耦和信源相关性的抑制能力。在原阵列系统两端各加上 $L-1$ 个附加阵元，则新的阵元编号为 $-(N+L-2), \cdots, -(N-1), \cdots, 0, \cdots, N-1, \cdots, N+L-2$ 。则新阵列中原 $2N-1$ 个阵元的输出可以表示为

$$\mathbf{X}(t) = [x_{-(N-1)}, \cdots, x_0, \cdots, x_{N-1}]^T = \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{A}}\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (10)$$

式中

$$\tilde{\mathbf{A}} = [\tilde{\mathbf{a}}(\theta_1), \tilde{\mathbf{a}}(\theta_2), \cdots, \tilde{\mathbf{a}}(\theta_M)] \quad (11)$$

$$\tilde{\mathbf{a}}(\theta_k) = [u^{-(N+L-2)}(\theta_k), \cdots, u^{-(N-1)}(\theta_k), \cdots, 1, \cdots, u^{N-1}(\theta_k), \cdots, u^{N+L-2}(\theta_k)]^T \quad (12)$$

考虑到附加阵元产生的互耦对原阵列的影响，式(3)中的互耦系数矩阵 \mathbf{C} 应改写为如下形式：

$$\mathbf{X}(t) = \tilde{\mathbf{C}}[\tilde{\mathbf{a}}(\theta_1), \tilde{\mathbf{a}}(\theta_2), \cdots, \tilde{\mathbf{a}}(\theta_M)]\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \\ = [\tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{a}}(\theta_1), \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{a}}(\theta_2), \cdots, \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{a}}(\theta_M)]\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \\ = [c(\theta_1)\tilde{\mathbf{a}}_1(\theta_1), c(\theta_2)\tilde{\mathbf{a}}_1(\theta_2), \cdots, c(\theta_M)\tilde{\mathbf{a}}_1(\theta_M)] \\ \cdot \mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (15)$$

从式(15)可得阵列中每个阵元的接收信号形式如下：

$$\begin{aligned}
x_i(t) &= \sum_{k=1}^M s_k(t) c(\theta_k) u^i(\theta_k) + n_i(t) \\
&= \sum_{k=1}^M s_k(t) c(\theta_k) u^{i+p}(\theta_k) \cdot u^{-p}(\theta_k) + n_i(t), \\
i &= -(N-1), \dots, 0, \dots, N-1
\end{aligned} \quad (16)$$

其中 $p = 0, 1, \dots, N-1$, 此时按照修正后的单快拍算法中的式(8)构造相同形式的数据矩阵 \mathbf{R} , 利用式(16)中得到每个阵元接收信号形式, 对构造的数据矩阵 \mathbf{R} 进行分解, 得到

$$\begin{aligned}
\mathbf{R} &= \tilde{\mathbf{A}}_1 \begin{bmatrix} c(\theta_1)s_1(t) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & c(\theta_2)s_2(t) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & c(\theta_M)s_M(t) \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{A}}_1^H \\
&+ \begin{bmatrix} n_0(t) & n_{-1}(t) & \cdots & n_{-(N-1)}(t) \\ n_1(t) & n_0(t) & \cdots & n_{-(N-2)}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ n_{N-1}(t) & n_{N-2}(t) & \cdots & n_0(t) \end{bmatrix} \quad (17)
\end{aligned}$$

$$\tilde{\mathbf{A}}_1 = [\tilde{\mathbf{a}}_1(\theta_1), \tilde{\mathbf{a}}_1(\theta_2), \dots, \tilde{\mathbf{a}}_1(\theta_M)] \quad (18)$$

式(18)中 $\tilde{\mathbf{a}}_1(\theta_k)$ 为 $\mathbf{a}_1(\theta_k)$ 的第 N 到 $2N-1$ 行。从式(17)和式(18)的表达式中, 可以明显看出, 此时等效阵列流型矩阵 $\tilde{\mathbf{A}}_1$ 不会受到互耦扰动, 且已经完全隔离了互耦的影响, 互耦系数归入了等效的信号协方差矩阵中, 这样在使用子空间类算法进行到达角估计时就完全避免了互耦影响, 实现了完全解互耦。等效信号协方差矩阵为对角阵, 相当于等效入射信源为 M 个独立信号情形, 这样就实现了空间信源之间的完全解相干。

对等效接收数据协方差矩阵 \mathbf{R} 进行特征值分解, 得到噪声子空间 \mathbf{U}_N , 则可以根据标准子空间类算法进行到达角估计。MUSIC空间谱表达式为式(19), 从式(19)中可以看出, 提出的算法已经完全不受互耦因素影响。

$$P_{\text{MUSIC}}(\theta) = \frac{1}{\tilde{\mathbf{a}}_1(\theta) \mathbf{U}_N \mathbf{U}_N^H \tilde{\mathbf{a}}_1^H(\theta)} \quad (19)$$

4 数值仿真

首先是验证本文提出的修正单快拍算法能够将原单快拍算法的运用背景推广到针对任意形式的信号, 且进一步分析互耦效应对修正单快拍算法的影响, 其次验证互耦效应下的单快拍算法对互耦的抑制能力。最后将对算法的估计精度进行分析。仿真中, 设定阵列参数 $N = 8$, $L = 3$, 即在原阵列两端各加上2个附加阵元。

仿真 1 3个等功率相干信号源的到达角分别为 $-40^\circ, 30^\circ, 60^\circ$, 注意到此时信号形式不再满足非

圆背景, 为了减少噪声对算法的对比性产生影响, 固定信噪比为100 dB的情况下, 对本文提出的修正的单次快拍算法和原单次快拍算法进行比较, 图2所示为结合MUSIC算法进行DOA估计得到的空间谱。从结果可明显看出, 在信号形式不满足非圆情形时, 原单快拍算法已经失效, 而修正算法能准确的估计出到达角。

上面的仿真已经验证了ENDTOP算法的优越性, 但实际环境中互耦效应是不得不考虑的因素。下面通过仿真分析互耦对算法的影响。取互耦系数为 $[1, 0.9791 + 0.9303i, 0.5566 + 0.5653i]$, 设定信噪比为3 dB, 信源达角分别为 $-40^\circ, 20^\circ, 60^\circ$ 。仿真中对比了没有互耦时的ENDTOP算法、互耦影响下的ENDTOP算法以及本文提出的MC-ENDTOP算法。从图3所示的仿真结果可知, 互耦对ENDTOP算法的影响是显著的, 造成了估计误差的增大甚至会丢失信号, 而互耦效应下的修正单快拍算法(MC-ENDTOP)能够保持和没有互耦效应影响的ENDTOP算法相近的估计性能。

仿真 2 前文定性地分析了本文提出的ENDTOP和MC-ENDTOP算法的性能, 现在对算法的估计精度进行考察。阵列和信号模型与仿真1相同, 改变信噪比从0 dB到20 dB, 在每一个信噪比值处进行200次的Monte-Carlo试验。信源DOA估计精度用均方根误差(RMSE)来表示, 定义为 $\sqrt{\sum_{j=1}^P \sum_{i=1}^M (\hat{\theta}_{ij} - \theta_i)^2} / (MP)$, 式中 P 为Monte-Carlo试验次数, $\hat{\theta}_{ij}$ 表示第 j 次试验的第 i 个信号的估计值, M 为信源数。图4所示为DOA估计性能与信噪比变化曲线, 图中加点线表示阵元数为15的受互耦影响修正单快拍算法估计精度曲线, 十字线表示阵元数为19的受互耦影响修正单快拍算法估计精度曲线, 三角线表示互耦效应下的修正单快拍算法估计精度曲线, 该算法只使用了中间15个阵元, 无修饰线表示阵元数为15的不考虑互耦条件下的修正单快拍算法估计性能。从仿真结果可以看出, 在互耦干扰下, 本文提出的MC-ENDTOP算法能够抑制互耦效应影响, 估计性能和不考虑互耦时的ENDTOP算法相差不大, 明显优于直接受互耦影响的修正单快拍算法。

5 结论

单次快拍类算法由于只利用一次采样数据进行空间谱估计, 且在估计协方差矩阵时不用进行相关运算, 因此适用于对实时性要求较高的场合。针对原单次快拍算法存在只能适用于初始相位为零的非圆信号背景以及在互耦效应下估计误差偏大甚至失

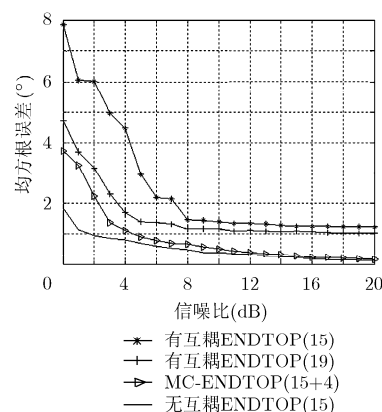
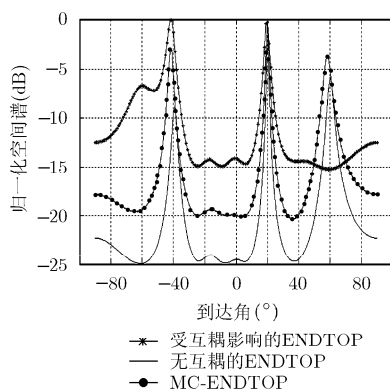
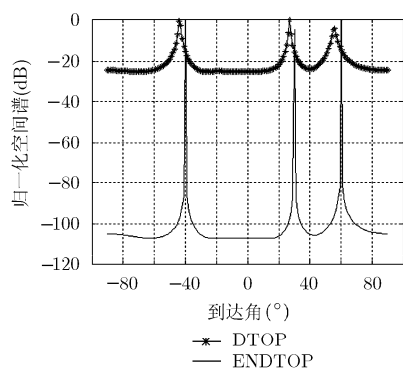


图2 任意信号形式下修正算法和原算法对比

图3 算法在互耦效应影响下的对比图

图4 估计误差随信噪比变化曲线

效的问题。本文首先提出了修正的单次快拍算法(ENDTOP),把单次快拍算法推广到了适用于任意信号形式,从仿真结果可知,当信号形式不满足原条件时,ENDTOP算法仍能准确估计信号,而原算法已经失效。实际环境中都存在互耦效应,当ENDTOP算法模型考虑互耦时将不再成立,为了使单快拍算法适用于实际环境,通过增加附加阵元,构造等效接收数据协方差矩阵,经过数据分解,实现了相干信源的完全解相干和完全解互耦。此时互耦系数归入了等效信号协方差矩阵中,等效阵列流型矩阵不会受到互耦影响,仿真验证了互耦效应下的单快拍算法(MC-ENDTOP)估计性能和不考虑互耦的ENDTOP算法相近,且能够实现解相干。

参考文献

- [1] 王鼎, 吴瑛. 多子阵互耦影响下的鲁棒自校正算法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(6): 1204-1211.
Wang Ding and Wu Ying. Robust self-calibration algorithm for multiple subarrays in presence of mutual coupling[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(6): 1204-1211.
- [2] 胡增辉, 朱炬波, 何峰, 等. 互耦条件下均匀线阵 DOA 盲估计[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(2): 382-387.
Hu Zeng-hui, Zhu Ju-bo, He Feng, et al. Blind DOA estimation in the presence of mutual coupling using uniform linear array[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(2): 382-387.
- [3] 刘俊, 刘峥, 谢荣, 等. 互耦条件下米波雷达角度估计的自校正算法[J]. 电波科学学报, 2011, 26(6): 1046-1051.
Liu Jun, Liu Zheng, Xie Rong, et al. Auto-calibration angle estimation algorithm for VHF radar in the presence of mutual coupling[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2011, 26(6): 1046-1051.
- [4] 郭艺夺, 张永顺, 张林让, 等. 双基地 MIMO 雷达收发阵列互耦条件下目标定位方法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2011, 38(6): 94-101.
Guo Yi-duo, Zhang Yong-shun, Zhang Lin-rang, et al. Target localization method for bistatic MIMO radar in the presence

of mutual coupling of receiver and transmitter arrays[J]. *Journal of Xidian University*, 2011, 38(6): 94-101.

- [5] Svantesson T. The effects of mutual coupling using a linear array of thin dipoles of finite length[C]. Proceedings of 8th IEEE Signal Processing Workshop on Statistical Signal and Array Processing, Portland, USA, Sept. 1998: 232-235.
- [6] Weiss A J and Friedlander B. Mutual coupling effects on phase-only direction finding[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1992, 40(5): 535-541.
- [7] Yeh C C, Leou M L, and Ucci D R. Bearing estimations with mutual coupling present[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1989, 37(10): 1332-1335.
- [8] Sellone F and Serra A. A novel mutual coupling compensation algorithm for uniform and linear arrays[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(2): 560-573.
- [9] See C. Sensor array calibration using a maximum-likelihood approach[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1996, 44(6): 827-835.
- [10] Friedlander B and Weiss A J. Direction finding in the presence of mutual coupling[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1991, 39(3): 273-284.
- [11] Ye Z and Liu C. On the resiliency of MUSIC direction finding against antenna sensor coupling[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, 56(2): 371-380.
- [12] Ye Z and Liu C. 2-D DOA estimation in the presence of mutual coupling[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, 56(10): 3150-3158.
- [13] 谢鑫, 李国林, 刘华文. 采用单次快拍数据实现相干信号 DOA 估计[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(3): 604-608.
Xie Xin, Li Guo-lin, and Liu Hua-wen. DOA estimation of coherent signals using one snapshot[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(3): 604-608.

王 凌: 男, 1985 年生, 博士生, 研究方向为无线电引信探测、阵列信号处理。

李国林: 男, 1955 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为军用近程目标探测、识别与信息处理。

谢 鑫: 男, 1981 年生, 博士, 讲师, 研究方向为无线电引信探测。