

阵列单元取向对DOA估计的影响

舒萌萌, 杨峰, 聂在平

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】针对以往DOA估计算法中智能天线系统的阵列单元模型多采用全向振子的情况,分析了当天线单元存在方向性时对MUSIC算法估计信号到达角的影响,并在进行阵元互耦校正后,讨论了影响MUSIC算法分辨率的一些因素,通过计算机仿真结果比较表明单元取向、阵列方向性、信噪比对到达角分辨率有较大的影响。

关键词 智能天线; 信号到达角; 分辨率; MUSIC算法

中图分类号 TN821+.91 文献标识码 A

Influence of Array Elements Direction on DOA Estimation

Shu Mengmeng, Yang Feng, Nie Zaiping

(School of Electronic Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract Many DOA estimation algorithms, reported in the past literature, are presented and used with the problem that the elements of smart antenna arrays are usually of no direction. The paper analyzes the influence to DOA estimation by MUSIC algorithm when the antenna elements have direction. The effect of mutual coupling is calibrated and some factors that influence the DOA resolution are analyzed. The simulation results are compared and the conclusion is reached that element direction, the direction of array and SNR have great effect on DOA resolution.

Key words smart antenna; direction of arrival; resolution; MUSIC algorithm

智能天线技术已经成为移动通信领域的研究热点,而信号到达角(Direction of Arrival, DOA)是其一个重要参数。近年,以MUSIC法(Multiple Signal Classification, MUSIC)为代表的各种超分辨DOA估计法已发展得比较成熟^[1],但以往的工作侧重算法本身的研究,阵元模型多为全向振子,波束扫描时没有考虑阵元本身的方向性;另外,天线阵列方向性会引起分辨率的变化,本文将对这两个问题进行研究。

1 问题的描述

假设有 M 元天线阵,阵元间距为 d ,接收 N 个非相关的窄波信号, $N < M$,设来波信号和噪声不相关,可得阵列的输出信号矢量^[1]

$$X(t) = AS(t) + N(t) \quad (1)$$

式中 $X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)]^T$, $A = [a(\mathbf{q}_1), a(\mathbf{q}_2), \dots, a(\mathbf{q}_N)]$, $S(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_N(t)]^T$, $N(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_M(t)]^T$, $a(\mathbf{q}_i)$ 为方向矩阵, $n_i(t)$ 为第 i 个阵元中零均值且方差等于 σ^2 的高斯加性白噪声。MUSIC算法的谱函数为

$$P(\mathbf{q}) = 1/a^H(\mathbf{q}_i) E_N E_N^H a(\mathbf{q}_i) \quad (2)$$

收稿日期: 2003-03-28

基金项目: 国防科研基金资助项目

作者简介: 舒萌萌(1979-), 女, 硕士生, 主要从事电磁场与微波技术方面的研究。

考虑互耦影响后, 式(1)、(2)分别变为^[2,3]

$$X(t) = \Delta AS(t) + N(t) = Z^{-1}AS(t) + N(t) \quad (3)$$

$$P(\mathbf{q}) = 1 / \left\| E_N^H Z^{-1} a(\mathbf{q}) \right\|^2 \quad (4)$$

式中 Z 为阵元的互阻抗矩阵。

2 MUSIC算法分析与仿真

2.1 阵元具有方向性

8元均匀直线阵如图1所示, 其中 $d = 0.5\lambda$, 阵元为半波振子, 位于 yOz 面, 信号在 xOy 面入射; q 为天线轴与组阵方向 (y 轴) 的夹角; 采样数 1 000; 信噪比为 20 dB; \mathbf{q} 为信号入射角, 定义为信号与 y 轴的夹角, 5 个入射信号, 其方向矩阵为^[4]

$$a(\mathbf{q}_i) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \mathbf{a}\right)}{\sin \mathbf{a}} [1, e^{j\mathbf{f}_i}, \dots, e^{j(M-1)\mathbf{f}_i}]^T \quad (5)$$

式中 M 为阵元个数, d 为阵元间距, $\mathbf{f}_i = (2\pi d / l) \cos \mathbf{q}_i$, $\cos \mathbf{a} = \cos \mathbf{q}_i \cos q$, \mathbf{a} 为接收信号与天线轴的夹角, \mathbf{q}_i 为信号到达角, $q = 90^\circ$ 时阵元为全向。下面对 $q = 90^\circ$ 和 $q = 45^\circ$ 的分辨情况进行讨论。

图2中, 左图 $q = 90^\circ$, 右图 $q = 45^\circ$, 纵坐标 W 代表信号的功率谱。可以看出, $q = 45^\circ$ 时, 分辨效果较 $q = 90^\circ$ 时更好, 而且当振子以 45° 摆放时, 所占空间较小, 还可接收水平垂直两种极化信号。

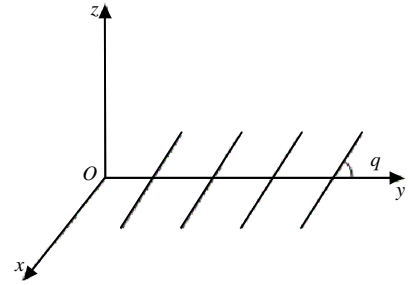


图1 阵元摆放示意图

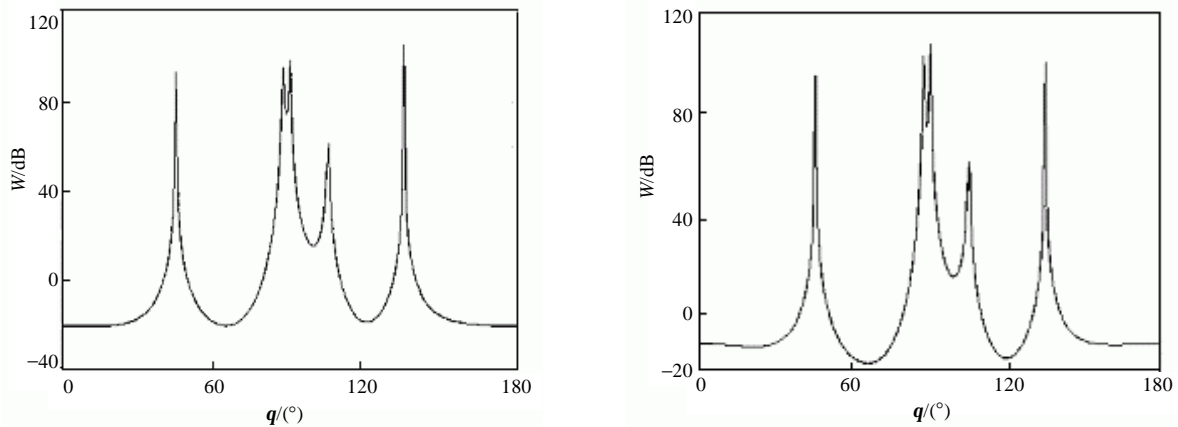


图2 $q = 45^\circ, 90^\circ, 93^\circ, 105^\circ, 135^\circ$ 时的分辨情况

2.2 算法的分辨率

分辨率是衡量算法优劣的一个重要指标。阵元间互耦会影响阵列单元的方向图, 继而影响算法效果^[5], 故用式(4)进行互耦校正, 再讨论影响MUSIC算法分辨率的因素。无特殊说明时, 采用图1所示的直线阵, $q = 90^\circ$, 其他参数不变。对于相距为 d , 高度差为 $H = 0$, 长度为 l 的两平行等长对称振子, 设振子上电流为正弦分布, 其互阻抗矩阵 Z 为^[4]: $R_{mn} = 30[2C_i(\mathbf{m}_0) - C_i(\mathbf{m}_1) - C_i(\mathbf{m}_2)]$; $X_{mn} = 30[-2S_i(\mathbf{m}_0) + S_i(\mathbf{m}_1) + S_i(\mathbf{m}_2)]$; $Z_{mn} = R_{mn} + jX_{mn}$; 上面式中的 $\mathbf{m}_0 = kd$, $\mathbf{m}_1 = k[\sqrt{d^2 + l^2} + l]$, $\mathbf{m}_2 = k[\sqrt{d^2 + l^2} - l]$, $S_i(x)$ 和 $C_i(x)$ 分别为正弦和余弦积分。

2.2.1 讨论不同方向上的分辨率

由仿真结果知, 在阵列法线方向, 当相邻信号的到达角相差 3° 时, 算法可以清晰地分辨出两个谱峰。而图3的结果表明, 当信号到达角只相差 2° 时, 不能从谱峰上分辨出两个信号。在图4和图5中假设其他条件不变, 偏离阵列法线方向 15° 到 20° , 算法的分辨率基本可以保持在 3° 左右, 与法线方向没有太大的差异; 增加偏离的角度, 分辨率下降, 且偏移 40° 附近分辨率的总体情况较 30° 好一些; 随着偏移角度的进一步增加, 分

分辨率继续下降,说明不同方向的分辨率存在一定差异。需要说明的是,随着偏移角度的增加,结果的稳定性也在下降,以上图例都是多次仿真后的典型情况。

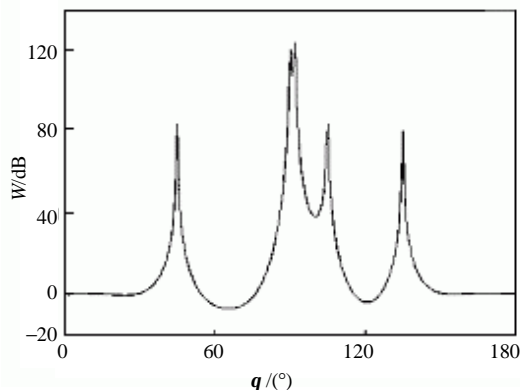


图3 $q=45^\circ、90^\circ、92^\circ、105^\circ、135^\circ$ 时的分辨情况

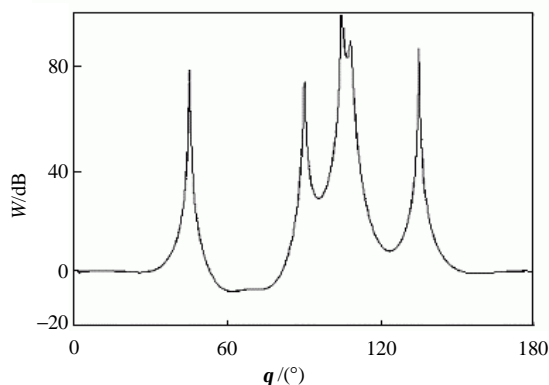


图4 $q=45^\circ、90^\circ、105^\circ、108^\circ、135^\circ$ 时的分辨情况

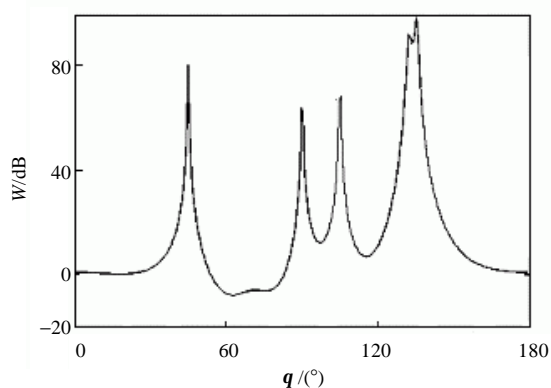


图5 $q=45^\circ、90^\circ、105^\circ、132^\circ、135^\circ$ 时的分辨情况

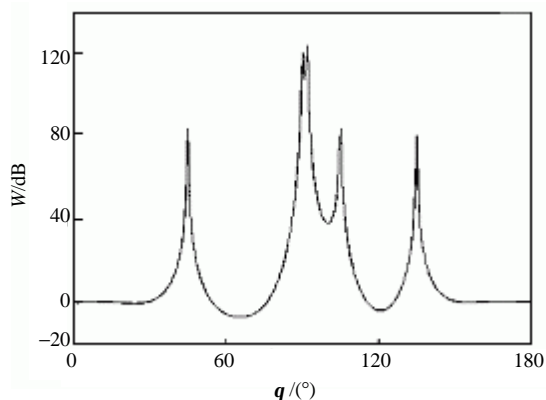


图6 $q=45^\circ、90^\circ、92^\circ、105^\circ、135^\circ$ 时的信噪比为30 dB的分辨情况

2.2.2 信噪比对分辨率的影响

图6说明了信噪比对分辨率的影响:信噪比越高,算法的分辨率就越好。 $SNR=30$ dB时,法线方向分辨率可以达到 2° ,而 $SNR=15$ dB时,根据仿真的结果,算法只能勉强分辨相邻 3° 的信号。

3 结论

关于智能天线的DOA估计,以前主要侧重于算法的研究,阵元一般为简单的全向振子,对阵列本身特性关注较少。本文考察了不同阵元取向形式下算法性能的差异,结果表明,天线阵列结构对MUSIC法估计信号DOA是有影响的,某些具有方向性的阵元会对DOA估计产生积极作用,因此除了改进算法,还应关注天线阵列的性能,研究更适合智能天线系统的阵列形式。另外,本文讨论了算法分辨率,仿真结果说明算法在不同方向的分辨率并不相同,比如在信噪比为20 dB,采样数为1 000的情况下,算法在阵列法线方向的分辨率约为 3° ,如果偏离法线方向的角度超过了 20° ,分辨率则明显下降。

参考文献

- [1] Schmit R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. IEEE Trans-AP, 1986, 34(3): 276-280
- [2] 林敏, 龚铮权. 基于子空间的阵元间互耦校正方法[J]. 电子学报, 2001, 29(9): 1 176-1 178
- [3] Segovia V D, Martin C R, Sierra P M. Mutual coupling effects correction in microstrip arrays for direction-of-arrival (DOA) estimation[J]. Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings, 2002, 149(2): 113-118
- [4] 刘克成, 宋学成. 天线原理[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1989
- [5] Dandekar K R, Ling H, Xu G. Effect of mutual coupling on direction finding in smart antenna applications[J]. Electronics Letters, 2000, 36(22): 1 889-1 891

编辑 徐安玉