

# 阵列天线互耦对 DOA 估计的影响\*

邱莉霞 杨峰 聂在平

(电子科技大学 成都 610054)

摘要: 本文基于对阵列天线互耦分析, 推导出阵元间互耦对信号到达角(DOA)估计算法影响的解析表达式, 并用 MUSIC 算法(多信号分类法)进行计算机仿真。仿真结果表明阵元互耦导致系统对信号 DOA 估计的精度降低, 甚至无法估计。

关键词: 互耦、到达角、MUSIC 算法

## 1 引言

随着移动用户数量的迅速增长, 频谱资源不足的问题日益明显, 多址技术是缓解无线通信日益发展与频谱资源不足之间矛盾的关键技术, 其中空分多址(SDMA)在提高通信质量, 以及缓解频谱资源不足等方面有其独特的优点<sup>[1]</sup>。SDMA 的关键技术之一是智能天线, 智能天线技术主要包括源信号 DOA 判断和多波束形成。在移动通信中需要实时处理, 必须采用快速的算法提取目标信号的 DOA。在以往的文献中, 对 DOA 估计时, 注意力大都集中在提高算法本身的速度和精度上。而在接收天线阵列中, 因为阵元间距比较小, 阵元间的互耦是不能忽略的, 但这方面的公开报导并不多。本文主要针对互耦对 MUSIC<sup>[2][3]</sup>算法 DOA 估计的影响, 推导出考虑互耦影响后算法的解析表达式。

## 2 互耦对 DOA 估计的影响

### 2.1 DOA 估计算法—MUSIC 算法

接收天线为 M 元垂直半波振子构成的均匀直线阵, 阵元上电流分布等幅同相; 有 D 个不相干的源信号 ( $D < M$ ), 它们的 DOA 分别为  $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_D)$ , 第 i 个阵元上的接收信号可以表示为:

$$x_i(t) = \sum_{k=1}^D s_k(t) e^{-j(2\pi(i-1)d \sin \theta_k / \lambda)} + n_i(t) \quad i=1, 2, \dots, M \quad (1)$$

其中  $s_k(t)$  表示第 i 个阵元接收到的来自于第 k 个源的信号,  $n_i(t)$  为零均值、方差为  $\sigma^2$  的加性噪声, 源信号和噪声信号不相关。

根据 (1) 式, 可以得到阵列的接收信号矢量表达式:

$$X(t) = AS(t) + N(t) \quad (2)$$

其中  $X(t)$ ,  $N(t)$  都是  $M \times 1$  的矢量,  $S(t)$  为  $D \times 1$  的矢量,  $A$  为  $M \times D$  的矢量, 称为方向矩阵,  $A = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_D)]$ , 其第 i 列:

$$a(\theta_i) = [1 \quad e^{j\phi} \quad \dots \quad e^{j(M-1)\phi}]^T, \quad \phi = (2\pi d / \lambda) \sin \theta_i \quad (3)$$

\*战术通信抗干扰技术国防重点实验室

由 (2) 式求得  $X(t)$  的协方差矩阵:

$$R = E\{X(t)X^H(t)\} = E\{AS(t)S^H(t)A^H\} + E\{N(t)N^H(t)\} = AR_sA^H + \sigma^2 e \quad (4)$$

式中:  $R_s = E\{S(t)S(t)^H\}$ ,  $e$  为单位矩阵,  $H$  表示共轭转置。

假设  $R$  的特征结构已经求得,  $E_N$  为  $M-D$  个小特征值对应的特征向量组成的矩阵, 利用欧氏范数构造空间谱函数:

$$P(\theta_i) = \frac{1}{d^H(\theta_i)E_N E_N^H d(\theta_i)} \quad (5)$$

对谱函数进行谱峰搜索, 所得  $P$  的  $D$  个最大值所对应的  $\theta$  值就是来波信号的到达角。

## 2. 2 互阻抗表征阵元间的互阻抗

根据天线阵理论, 天线阵阵元的阻抗包括自阻抗和互阻抗。阻抗是和阵元表面电流分布相关的, 因此可以用互阻抗来求解阵元间的互耦, 本文采用互矩阵法<sup>[1]</sup>计算互阻抗。对于相距为  $d$ , 高度差为  $H$  的两平行振子  $m$  和  $n$ , 假设振子上电流分布为正弦函数, 阵元  $n$  与  $m$  的互阻抗为  $Z_{mn} = R_{mn} + X_{mn}$ , 电阻和电抗分别为<sup>[4]</sup>:

$$R_{mn} = -15 \cos kH \{ -2C_i(\overline{H}) - 2C_i(-\overline{H}) + C_i(\overline{H-L}) + C_i[-(\overline{H-L})] + C_i(\overline{H+L}) + C_i[-(\overline{H+L})] \} + 15 \sin kH \{ 2S_i(\overline{H}) - 2S_i(-\overline{H}) - S_i(\overline{H-L}) + S_i[-(\overline{H-L})] - S_i(\overline{H+L}) + S_i[-(\overline{H+L})] \} \quad (6)$$

$$X_{mn} = -15 \cos kH \{ 2S_i(\overline{H}) + 2S_i(-\overline{H}) - S_i(\overline{H-L}) - S_i[-(\overline{H-L})] - S_i[-(\overline{H+L})] - S_i[-(\overline{H+L})] \} + 15 \sin kH \{ 2C_i(\overline{H}) - 2C_i(-\overline{H}) - C_i(\overline{H-L}) + C_i[-(\overline{H-L})] - C_i(\overline{H+L}) + C_i[-(\overline{H+L})] \} \quad (7)$$

式中:  $\overline{H} = k(\sqrt{d^2 + H^2} + H)$ ,  $-(\overline{H+L}) = k[\sqrt{d^2 + (H+L)^2} - (H+L)]$ ;  $S_i(x)$  和

$C_i(x)$  分别是余弦和正弦积分;  $L$  为振子长度。

由 (6) (7) 式得到两天线的互阻抗后, 就可以根据:

$$I_{mn} = \frac{Z_{mn}}{Z_{mm}} I_{nn} \quad (8)$$

计算第  $n$  个天线单元上的电流在第  $m$  个天线单元上激励起的电流。

## 2. 3 互耦对阵列输出的影响

(2) 式是在各阵元电流分布等幅同相下得到的阵列输出, 考虑阵元互耦后, 阵元  $i$  的电流分布是本身电流加上 (8) 式中互耦电流的归一化结果  $(1+I_i^*)$ , 因此方向矩阵为和阵列输出, 以及阵列输出的协方差矩阵分别为:

$$A^* = A \cdot \text{diag}(I^*), \quad I^* = [(1+I_1^*), (1+I_2^*), \dots, (1+I_M^*)] \quad (9)$$

$$X^*(t) = A^* S(t) + N(t) \quad (10)$$

$$R^* = A^* R_x A^{*H} + \sigma^2 e = A \text{diag}(I^*) R_x \text{diag}(I^*)^H A^H + \sigma^2 e \quad (11)$$

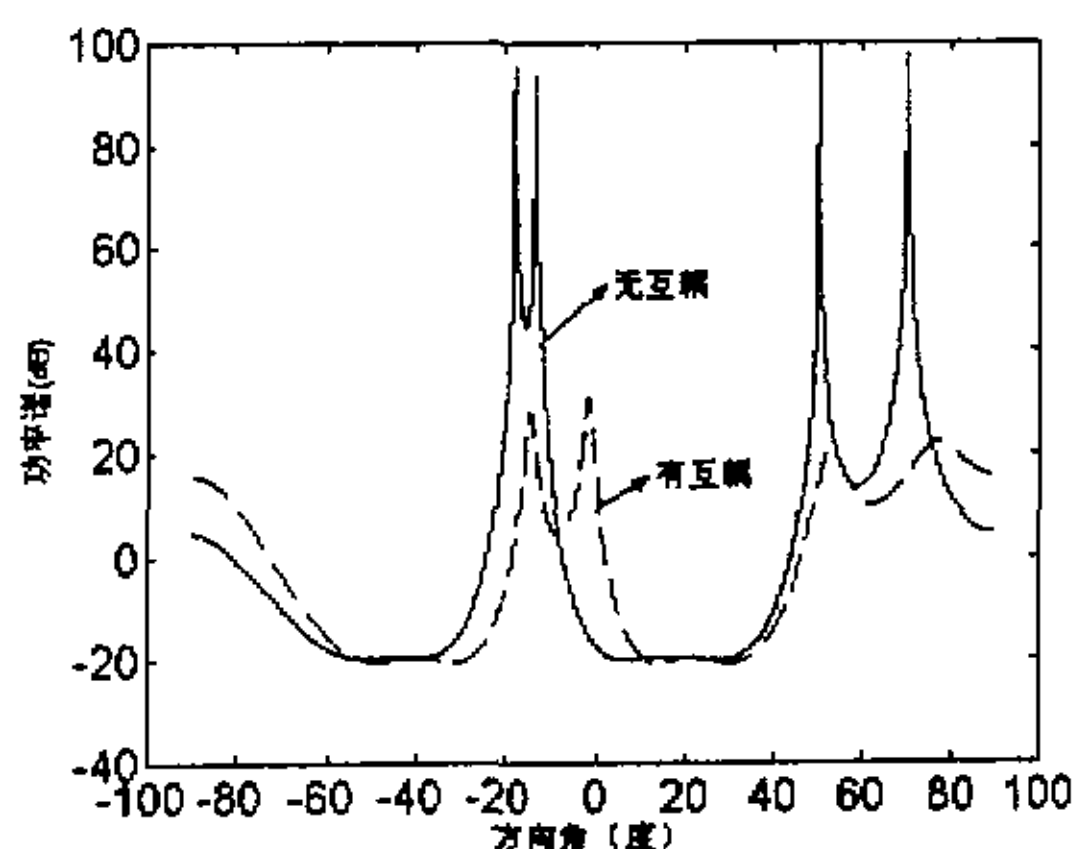
从(11)式可以看出由于互耦的影响,协方差矩阵发生变化,使得R的特征结构发生畸变,如果忽略互耦的影响,必然使得DOA的估计产生偏差,甚至DOA无法估算。

### 3 计算机模拟结果

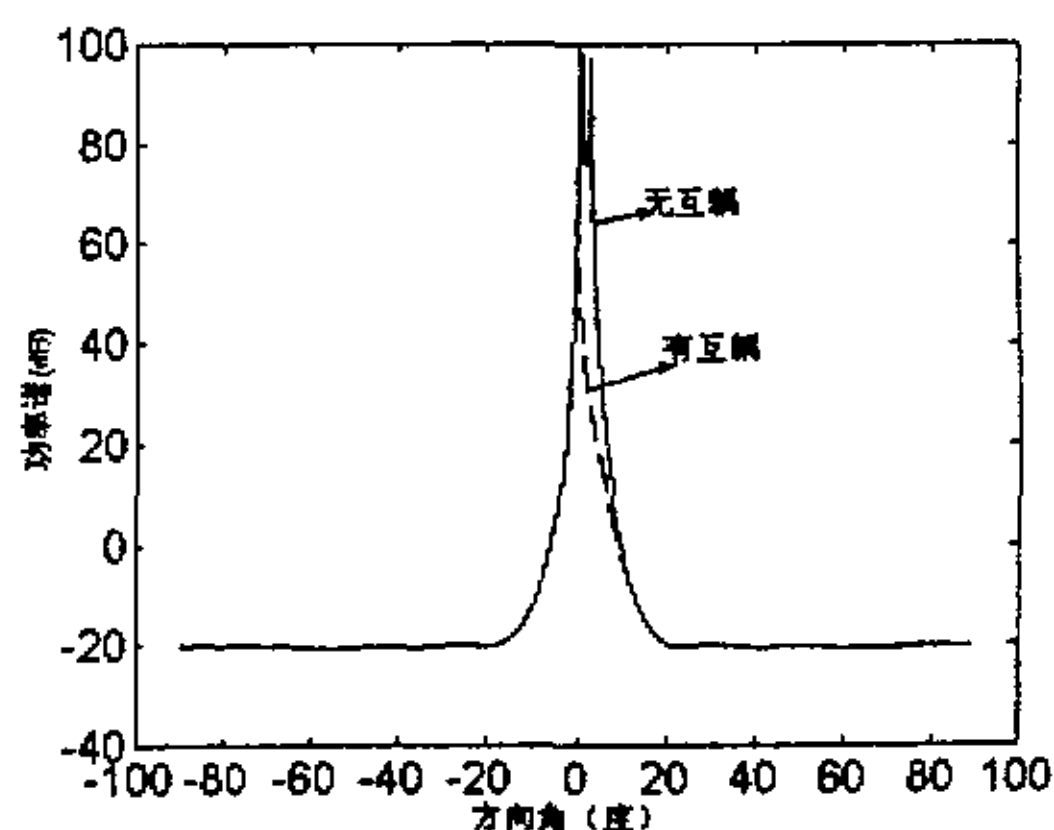
基于上述理论分析,本节给出计算机仿真结果,测试系统为八元均匀直线阵,阵元为垂直半波振子,阵元间距为半波长。

设有4个源信号,到达角度数分别为-18、-13、50、70,信噪比(SNR)20dB,采样数为200,图(1)是没有互耦与存在互耦的比较结果。从图中可以看出,考虑互耦时谱峰不明显,而且DOA估计的角度发生了偏移。

当两个目标信号DOA很接近时,要分离它们的DOA是比较困难的,其它条件不变时,设两个源信号到达角度分别为1和3,从图(2)可以看到,理想条件下的MUSIC算法虽然两个谱峰很靠近,但仍然可以估计出DOA,而在考虑互耦的情况下,两个目标信号只有一个谱峰值,结果恶化无法判断两个信号的DOA。



图(1) 4个源信号时  
有无互耦的DOA估计比较



图(2) 2个源信号到达角  
比较近时有无互耦的DOA估计比较

### 4 结论

由理论分析和计算机模拟结果可以看出,由于互耦的存在,使得MUSIC的估计精度大大降低,甚至可能导致DOA无法估计。如何降低天线阵的互耦对DOA估计的影响是我们要进一步深入研究的问题。

### 参考文献

1. 葛利嘉 路鸣 “蜂窝通信的空分多址:概念、算法和性能” 通信学报 Vol.20, P: 52-62, No.8, 1999
2. R.O.Schmit, “Multiple emitter location and signal parameter estimation”, IEEE Trans-AP, 1986,34(3):276-280
3. Peter Stoica & Arye Nehorai, “MUSIC, Maximum Likelihood, and Cramer-Rao Bound”, IEEE Trans. On Acoushcs Speech and Signal Proccession. Vol.37, No. 5, May 1989, 720-741
4. 《天线原理》 刘克成 宋学成 编

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>