

超分辨测向天线阵性能的计算机仿真研究

刁鸣 熊良芳 司锡才

(哈尔滨工程大学电子工程系 哈尔滨 150001)

摘要：本文在 music 算法的基础上首先对其进行分析、完善，并给出了任意形状天线阵列超分辨测向的通用算法，简要地概括出了算法实现的具体步骤，同时对该通用算法做出了改进，提出了插值后的 music 算法，该算法能扩展测向的频率范围，提高了测向的精度。然后利用 music 算法对均匀直线阵、均匀正方形阵、均匀圆形阵用 matlab 语言进行了计算机仿真实验研究，并给出了一些具体的实验结果。

关键词：超分辨测向；music 算法；任意形状天线阵；谱估计

中图分类号：TN971.3 文献标识码：A 文章编号：0372-2112(2001)05-0715-03

The Study of Performance about Antenna Array on Super-Resolution Direction Estimation

DIAO Ming XIONG Liang-fang SI Xi-cai

(Electronic Engineering Department, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract：This paper has perfected the classic music algorithmic, analyzed and presented the common arithmetic which can be used for the arbitrary antenna array in super-resolution direction estimation. This paper also summed up the steps to realize the algorithmic briefly, which also improved on the classic music algorithmic through inserting the coordination of the virtual antenna when needed. The algorithmic can spread out the range of the signal to be measured. And more the algorithmic can increase the precision of the measured signal. Then the line array, the circular array and the square array which distributed evenly have been put into emulation. The outcomes in the paper has been presented through the emulation experiment.

Key words：super-resolution direction estimation, MUSIC arithmetic, arbitrary antenna array, spectrum estimation

1 引言

利用空间谱估计理论，对外来目标信号进行超分辨测向将会成为近代电子战中必不可少的技术手段之一。随着微处理器技术的发展，DSP 芯片的运算速度在不断提高，超分辨测向的实时性将会成为现实，各种谱估计算法的提出对超分辨测向技术的发展也起了极大的促进作用，特别是 MUSIC 算法的实时实现更是对这一领域的发展有着重要的现实意义。

由于实际环境及条件的限制，往往对测向天线阵的布阵形状要求较严，形状选择的合理与否，将直接影响测向精度、测向带宽及测向频谱的范围。本文试图对几种常用超分辨测向天线阵的性能做进一步研究，以便为今后超分辨测向天线的布阵提供一点技术参考。此次研究的内容是基于下面给出的任意形状天线阵列超分辨测向通用算法来进行的。

2 超分辨测向的理论依据及通用算法

设空间存在 D 个互不相关的被测信号，它们分别以不同的方位角 θ_k ($K = 1, 2, \dots, D$) 入射到一个具有 N 个单元的任意形状天线阵列，现以正东为 0° 方向，各阵元的坐标记为 (x_i, y_i) ， $i = 1, 2, \dots, N$ ，坐标原点记为 (x_0, y_0) ，同时假设各阵元输出噪声为白噪声 $n_i(t)$ ， $i = 1, 2, \dots, N$ ，方差记为 σ^2 ，噪声与信号互不相关。根据假设条件，测向阵列输出可写成：

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

其中： $X(t)$ ——阵列输出矢量， $S(t)$ ——信号矢量， $N(t)$ ——噪声矢量， A ——阵列方向矩阵

$$X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T \quad (2)$$

$$S(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_N(t)]^T \quad (3)$$

$$N(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_N(t)]^T \quad (4)$$

$$A = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_N)]^T \quad (5)$$

其中上标“ T ”表示矩阵转置

$a(\theta_k)$ 为 $N \times 1$ 维的方向向量 $K = 1, 2, \dots, N$ 。

$$a(\theta_k) = [\exp[j2\pi(x_0 \cos \theta_k + y_0 \sin \theta_k) / \lambda], \exp[j2\pi(x_1 \cos \theta_k + y_1 \sin \theta_k) / \lambda], \dots, \exp[j2\pi(x_{N-1} \cos \theta_k + y_{N-1} \sin \theta_k) / \lambda]] \quad (6)$$

其中 λ 是入射信号的波长值。阵列输出矢量 $X(t)$ 的自相关矩阵 R_X ：

$$R_X = E[X(t)X^H(t)] \quad (7)$$

其中上标“ H ”表示复共轭转置运算, $E[\cdot]$ 为数学期望运算. 对 R_X 进行特征值分解, 将其特征值按降序排列并相应地调整特征向量后应有:

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_D > \lambda_{D+1} = \lambda_{D+2} = \dots = \lambda_N \quad (8)$$

$$v_1, v_2, \dots, v_{D+1}, v_{D+2}, \dots, v_N \quad (9)$$

以各个最小特征值所对应的特征向量 $v_{D+1}, v_{D+2}, \dots, v_N$ 为列构造一个 $N \times (N - D)$ 维的噪声子空间矩阵:

$$E_N = [v_{D+1} \ v_{D+2} \ \dots \ v_N] \quad (10)$$

根据 music 算法构造空间谱函数如下:

$$P_M(\theta) = 1 / \|E_N^H \cdot \alpha(\theta)\|_2^2 \quad (11)$$

对 $P_M(\theta)$ 进行谱峰搜索, 求得 D 个最大值所对应的 θ 值就是 D 个被测信号源的方位角.

根据以上理论分析, 可对任意形状天线阵列超分辨测向算法按以下步骤实现:

(1) 根据阵源的位置参数, 算出阵源间的距离 d , 在可能产生多值的两阵源间虚拟一个点, 由实际阵源和虚拟阵源及假设的信号入射角并根据式(6)形成方向矩阵.

(2) 利用式(7)算出阵列输出矢量 $X(t)$ 的自相关矩阵, 并进行特征值分解, 求出特征值和特征向量, 根据 MDL 准则确定被测信号源的个数, 同时形成噪声子空间 E_N .

(3) 根据式(11)对空间谱函数进行谱峰搜索, 各峰值所对应的 θ 值即为被测信号源的方位角.

为了提高测向精度和展宽测向的频谱范围, 我们对原 music 算法又进行了改进, 采用了插值后的 music 算法进行了仿真计算. 插值后的 music 算法能够在两阵元间距 D 与被测信源波长 λ 之比大于 $1/2$ 时, 自动地插入一个虚拟的天线, 从而减小两阵元的间距. 因而在相同的条件下, 插值后的 MUSIC 算法能展宽测向的频谱范围. 插值后的 MUSIC 算法的谱函数曲线具有尖锐谱峰, 能更加精确地显示被测信号的方向, 提高测向的精度.

3 对几种常用天线阵的仿真结果

模拟实验 1 均匀直线阵 阵元数选为 $N = 8$, 被测信号源数选为 $D = 7$, 信噪比 $SNR = 10$, 入射角 θ_k 分别为 $30^\circ, 80^\circ, 130^\circ, 180^\circ, 230^\circ, 280^\circ, 330^\circ$. 直线阵均匀地分布在长度为 8 米的直线上, 两个特殊频点(最高、最低)的仿真结果如图 1、图 2 所示.

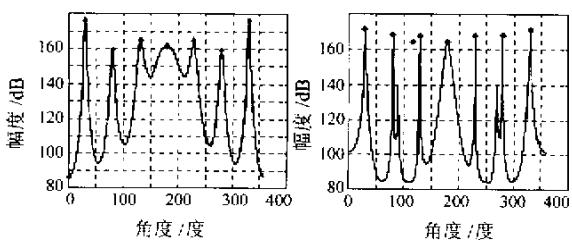


图 1 $f = 30\text{MHz}$ 时均匀直线

阵的谱函数曲线

对中心频率点 $f = 100\text{MHz}$ 的测向结果如表 1 所示:

表 1 均匀直线阵中心频点处的测向结果

信号入射角	实测入射角	相对误差%	最大误差%
30°	30.1832°	0.6107	0.6107
80°	80.1555°	0.1944	
130°	130.1277°	0.0982	
180°	180.0999°	0.0555	平均误差%
230°	230.0722°	0.0314	
280°	280.0444°	0.0317	
330°	330.0167°	0.0051	0.1467

模拟实验 2 均匀正方形

阵的布阵情况如图 3 所示, 其它条件与实验 1 相同, 对两个特殊频点(最高、最低)的仿真结果如图 4、图 5 所示:

对中心频点 $f = 40\text{MHz}$ 的测向结果如表 2 所示:

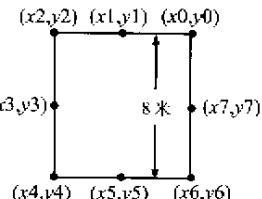


图 3 均匀正方形阵布阵示意图

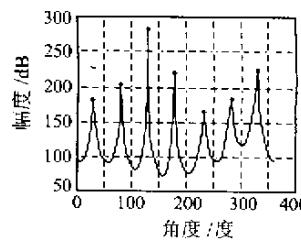


图 4 $f = 14\text{MHz}$ 时均匀正方

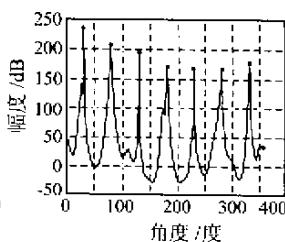


图 5 $f = 70\text{MHz}$ 时均匀正方

形阵的谱函数曲线

表 2 均匀正方形阵中心频点处的测向结果

信号入射角	实测入射角	相对误差%	最大误差%
30°	30.3831°	1.2770	1.2770
80°	80.7551°	0.9439	
130°	129.9278°	0.0555	
180°	180.0999°	0.0555	平均误差%
230°	229.8723°	0.0555	
280°	280.4442°	0.1586	
330°	330.0167°	0.0051	0.3644

模拟实验 3 均匀圆

形阵几何位置如图 6 所示, 其它条件同前, 对两个特殊频点的仿真结果如图 7、图 8 所示: 对中心频点 $f = 50\text{MHz}$ 的测向结果如表 3 所示:

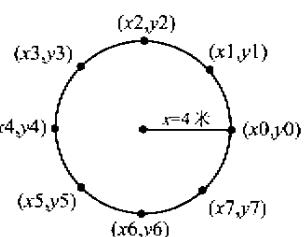


图 6 均匀圆形阵布阵示意图

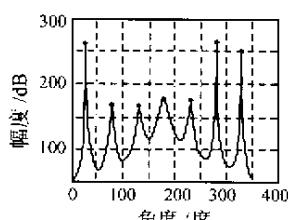


图 7 $f = 20\text{MHz}$ 时均匀圆阵

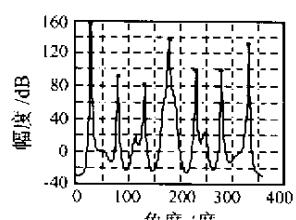


图 8 $f = 82\text{MHz}$ 时均匀圆阵

的谱函数曲线

表 3 均匀圆阵中心频点处的测向结果

信源入射角	实测入射角	相对误差%	最大误差%
30°	30.1832°	0.6107	0.6107
80°	80.3554°	0.4443	
130°	130.1277°	0.0982	
180°	179.9001°	0.0556	平均误差%
230°	230.0722°	0.0314	0.1990
280°	280.2443°	0.0873	
330°	330.2165°	0.0656	

4 结论

根据以上仿真实验表明,均匀直线阵的测向频率范围最宽(36~160MHz),其次是均匀圆形阵(20~82MHz),均匀正方形阵(14~71MHz);从测向精度上看,均匀直线阵的平均误差最小(0.1467%),其次是均匀圆形阵(0.1990%)与正方形阵(0.3644%)。由仿真实验结果可看出,无论是从测向的频谱范围还是从测向的精度上看,均匀直线阵的性能均优于其它两种形状的阵列。但圆形阵与正方形阵更适合于低频范围(14~80MHz)的测向。

参考文献:

[1] 肖先赐.现代谱估计——原理与应用[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1991:103~112.

- [2] 王曙光,何振亚.一种快速特征分解方法及其在高分辨谱估计中的应用[J].电子学报,1991,19(5):118~121.
- [3] S. M. 凯依.现代谱估计原理及应用[M].北京:科学出版社,1994:80~148.
- [4] W. Li, W. C. Siu, and J. C. H. Poon. A New Algorithm on Multiple Unknown Source Signals Estimation and Separation in a Reverberant Space [J]. IEEE Trans 1998(5):938~959.

作者简介:

刁 鸣 副教授 1987年获哈尔滨工程大学通信与电子系统硕士学位,主要从事宽带信号检测、处理与识别及空间谱估计理论的研究与应用工作。

熊良芳 1999年毕业于哈尔滨工程大学电子工程系,现为哈尔滨工程大学电子工程系硕士研究生,从事空间谱估计理论的研究与应用工作。

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)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)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、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),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>