

MUSIC 算法在三单元天线阵测向上的应用

陈一凡 任武 和琨 杨仕明

(北京理工大学信息科学技术学院电子工程系)

摘要：本文采用 MUSIC 算法针对近距离三单元天线阵测向进行了研究。在对原理样机进行大量测试的基础上，对 MUSIC 算法中的多值问题进行分析并予以解决，一定程度上提高了 MUSIC 算法在三单元天线阵上的测向精度，测试结果表明可将测向准确度控制在 5 度以内。

关键词：天线阵列，MUSIC 算法，多值模糊

Study of MUSIC algorithm about direction finding of the radio signal

Chen Yi-fan, Ren Wu, He Kun, Yang Shi-Ming

(The Electronic Engineering of Beijing Institute of Technology)

Abstract: To direction finding on antenna array, this paper applied MUSIC algorithm. Then it deduces and solves the blur of multiple values in MUSIC algorithm. Finally it enhances the precision of MUSIC algorithm on antenna array. The result indicates the method control the precision in 5 degree.

Key words: Antenna array, MUSIC algorithm, Blur of multiple value

1 引言

无线电测向【1】是一项较为传统的涉及多学科的综合技术，目前已有多种技术体制，包括各种传统测向体制和空间谱估计与到达时差等新测向体制等。MUSIC 算法是近年来受到人们广泛重视的一种高分辨率算法，可用于空间测向和谱估计等方面。它所具有的对入射波到达方向（DOA, Direction of Arriving）的渐进无偏估计特性和超分辨率特征，完全可以用于高密度信号环境下的无线电测向。

2 MUSIC 算法及在三单元天线阵上的应用

2.1 MUSIC 算法简介

由 R.O.Schmidt 提出的 MUSIC 算法【2】是针对多元天线测向问题提出来的。MUSIC 算法一般采用观测矩阵奇异值分解或者观测量的空间协方差矩阵特征分解的方法。以 MUSIC 算法为代表的空间谱估计，是阵列信号处理技术的重要发展。它提供了超过以往

任何一种测向体制的测向分辨力。此外，MUSIC 算法在均匀阵列测向可以获得良好的测向结果。根据算法的特点，我们在近距离天线阵列上进行测试，并以三单元天线阵列为模型进行分析。

2.2 三单元天线阵列介绍

本次实验所使用的天线阵列属于宽带天线，由 3 根单极子天线组成，频率从 450MHz 到 900MHz，下面是天线的模型图和在 CST 软件上的天线方向图：

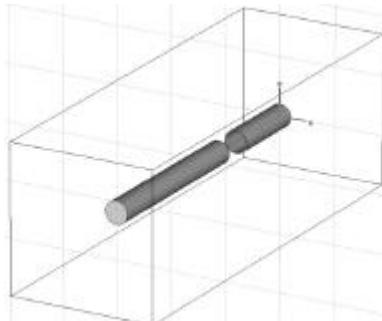


图1 单极子天线结构

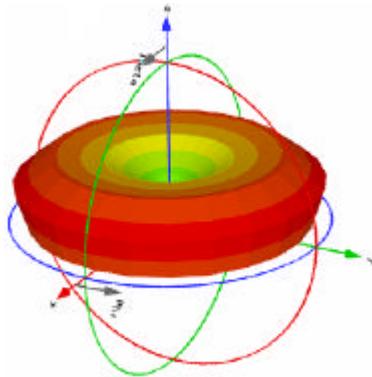


图2 天线驻波比

图1是测试天线的结构图，天线由两段振子组成，通过调节两段振子的长短来微调天线的驻波比和方向图；图2是CST软件【6】仿真的方向图，天线以两段振子所在位置为Z轴，并以此为轴心均匀接受信号。从图中可以看到，天线接收信号的最佳位置在天线的中心以上。



图3 三单元天线模型图

图3是三单元天线的实物模型。在测试中，我们取天线中心间距d为30cm，首先我们将3根天线垂直于地面摆放，经过实验发现，虽然这种天线模型可以避免多值模糊问题，但是天线间的互耦很严重，给测试带来了很大的误差。

我们考虑到天线的特性和MUSIC算法的特点：

- (1) 天线是全向天线，间距过近互耦严重
- (2) 算法中的多值模糊问题可以靠数学分析的方法加以解决

最终我们将天线倾斜，成等边三角形摆放，利用数学分析和软件仿真的方法来消除多值模糊问题。

3 多值模糊问题分析

多值模糊【3】是指对同一方向角进行测向，而结果出现了2个或2个以上的角度。在套筒天线应用

MUSIC算法的一个条件就是天线中心间距 $d \leq \frac{1}{2}$ 。

对于宽带系统来说，如果在频率高端时满足 $d \leq \frac{1}{2}$

的条件，则在频率低端时 $d \leq \frac{1}{2}$ 会使测向准确性和精度大为下降和严重影响角度分辨力；在频率低端时满足 $d < \frac{1}{2}$ 的条件，则在频率高端时不能满足

$d \leq \frac{1}{2}$ 的条件。如果不满足此条件，将出现测向模糊，即对一个方向来的信号可能出现多个谱峰。

MUSIC算法主要的信息来源仍是两天线所接收信号相位差，这与传统的干涉仪测向法是一致的，因此我们进行如下分析：

$$\text{由式: } t_k = \frac{2pd}{l} \sin q_k \quad (1)$$

进行改写后，如果方向角 $q \in (0, 2p)$ ，则有

$$\sin(2p - q) = \sin(2p - q) = f \cdot \frac{l}{2pd} \quad (2)$$

那么 $(p - q)$ 和 $(2p - q)$ 则为镜像模糊【5】，由于镜像模糊的存在，使测向的范围和精度受到限制，在实际试验中，我们考虑在 $(0, p)$ 范围内进行空间目标测向，由公式(2)可得

$$q = \arcsin\left(f \cdot \frac{l}{2pd}\right) \quad (3)$$

$$\text{取 } a = \frac{2d}{l} \quad (4)$$

$$\text{有 } q = \arcsin\left(\frac{f}{p} \cdot \frac{1}{a}\right), \left(\frac{f}{p} \cdot \frac{1}{a}\right) \in (-1, 1) \quad (5)$$

考虑到指数函数 e^{-jt} 的周期性，公式(5)可写为：

$$q = \arcsin\left(\frac{f + 2kp}{p} \cdot \frac{1}{a}\right), k \text{ 为整数} \quad (6)$$

$$\text{经整理: } \mathbf{q} = \arcsin\left(\sin \mathbf{q} + \frac{2k}{a}\right),$$

$$\left(\sin \mathbf{q} + \frac{2k}{a}\right) \in (-1, 1) \quad (7)$$

从公式(7)可以看出当 $a \leq 1$ 时 , 也就是 $d \leq \frac{l}{2}$

时 , k 值只能为 0 , \mathbf{q} 有唯一解。而当 $a > 1$ 时 , k 值不唯一 , 则 \mathbf{q} 可能有多组解。

这就是产生多值问题的原因 , 并且真值和伪值之间存在着一定关系 , 有

$$\sin J - \sin q = \frac{2k}{a} \quad (8)$$

式中 : J —— \mathbf{q} 的估值

由公式 (7) 中 $\left(\sin \mathbf{q} + \frac{2k}{a}\right) \in (-1, 1)$ 的条件可

知 k 的取值不仅与 a 有关 , 还与信号源来波方向 \mathbf{q} 有关。

在测向的范围和距离一定时 , 可以放宽 a 的取值 , 增大天线间的距离。

4 测试及分析

为了验证 MUSIC 算法能否准确应用在三单元天线阵中 , 我们进行实际测试。信号源选定 750MHz 的正弦波 , 波长 $l = 0.4m$, 发射功率 15dBm, \mathbf{q} 为测试方向角方向角 , 测试范围从 0 到 180 度 , 天线中心间距 d 为 30cm :

表1 实际测试结果

| 角度 | 测向结果 A1 | | 测向结果 A2 | | 测向结果 B1 | | 测向结果 B2 | | 测向结果 C1 | | 测向结果 C2 | |
|-----|----------|----------|---------|----------|----------|------|----------|----------|---------|------|---------|------|
| | 角度 | 测向结果 | 角度 | 测向结果 | 角度 | 测向结果 | 角度 | 测向结果 | 角度 | 测向结果 | 角度 | 测向结果 |
| 0 | 231.4749 | 1.6575 | 15 | 116.3104 | 18.6896 | 30 | 109.4349 | 30.5651 | | | | |
| 45 | 308.8243 | 43.9932 | 60 | 52.9932 | 50.9932 | 90 | 111.7268 | 91.7268 | | | | |
| 105 | 122.613 | 102.613 | 120 | 138.0828 | 118.0828 | 135 | 149.542 | 129.542 | | | | |
| 150 | 5.1566 | 145.1566 | 165 | 27.502 | 167.502 | 180 | 42.3989 | 182.3989 | | | | |

测试结果用 A1、A2、B1、B2、C1、C2 标记 , 从表 1 中我们可以看到 , 由于 $d=30cm$ 大于半波长 , 因此在各个测向角度都出现了多值。

图 5 是对采集下来的数据在 MATLAB [7] 上进行的仿真图 , 图中的横坐标为测向角范围 0— $2p$, 纵坐标为接收信号的能量值 dBm。我们可以看到在 0

— p 范围内也出现了一高一低两个波峰点。

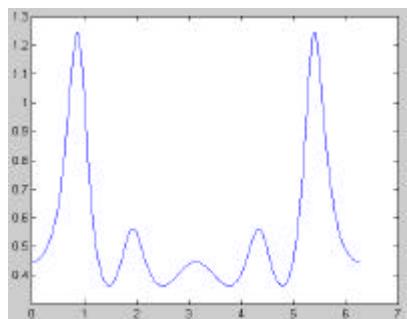


图4 $d=30cm$ 时的目标测向图

根据多值模糊 [3] 的分析结论 :

(1) 真值的谱峰往往高于伪值的谱峰 ;

$$(2) + \sin J - \sin q = \frac{2k}{a}, a = \frac{2d}{l}$$

我们就可以排除上面表中的伪值 , 找出真值。测向结果 A1、B1、C1 都是伪值 , 而测向结果 A2、B2、C2 都是真值。

5 结论

通过在三单元阵列下使用 MUSIC 算法 , 并且解决多值问题后 , 在 0、30、45、90、120 度时 , 误差小于 2 度 , 在其他角度上 , 误差也控制在 5 度以内 , 达到了设计要求。这说明在三单元天线阵应用 MUSIC 算法是可以获得良好结果的。

另外 , 天线互耦和幅度相位一致性问题也是影响测向精度的 2 个原因 , 但限于篇幅及本文的重点 , 这里没有对此问题进行展开。在今后的测向研究中 , 我们将对影响测向的各种因素做详细的分析 , 相信 MUSIC 算法在测向中能发挥更大的作用。

参考文献

- [1] 陈昊空间谱估计算法的高速实现 : [硕士学位论文]电子科技大学通信与信息系统 2003
- [2] 刘灿新 李景春 空间谱估计测向及其应用 : 中国无线电管理 2001.4 (第 4 期)
- [3] 司伟建 MUSIC 算法多值模糊问题研究 : 航天科工集团三院三十五所
- [4] 王永良 空间谱估计理论与算法 : 清华大学出版社 2004
- [5] 刘德树 罗景青 张剑云 空间谱估计及其应用 : 中国科学技术大学出版社 1997
- [6] 张敏 CST 微波工作室用户全书 : 电子科技大学出版社 2004
- [7] 张德丰 MATLAB 数值分析与应用 : 国防工业出版社 2007

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>