

# 自适应阵列天线中 DOA 估计算法研究

高海,田梅,肖少白

(长安大学信息工程学院 陕西西安 710064)

**摘要:**波达方向(DOA)估计是自适应阵列天线系统中的一个关键技术之一,通过对波达方向估计算法中的延迟-相加算法、Capon最小方差算法和多重信号分类算法分别进行讨论,并建立均匀直线阵对这3种算法分别进行仿真,仿真结果证明多重信号分类算法相对于前两种算法有最尖锐的谱峰和最高的分辨率。

**关键词:**阵列天线;DOA;算法;均匀直线阵

中图分类号:TN820.1<sup>1+5</sup>

文献标识码:A

文章编号:1004-373X(2007)07-103-02

## Research of DOA Estimation Algorithm in Adaptive Array Antenna

GAO Hai, TIAN Mei, XIAO Shaobai

(School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an, 710064, China)

**Abstract:** The estimation of the direct of arrival (DOA) is one of the key technologies in adaptive array antenna system. By discussing delay - and - sum algorithm, Capon algorithm and multiple signal classification algorithm of DOA estimation, uniform linear array is established to carry out simulations for this three algorithms, and the simulation results prove that the multiple signal classification algorithm have high peaks and resolution.

**Keywords:** array antenna; DOA; algorithm; uniform linear array

## 1 引言

自适应阵列天线系统应用的一个关键问题就是对用户入射角度进行估计,也就是所谓的波达方向(Directions of Arrival, DOA)估计问题。各个用户的波达方向作为反映用户空间特征的重要参量在自适应阵列天线技术中扮演着非常重要的角色。只有先进行精确的DOA估计,即首先获得各个用户的人射角度(也就是用户的空间特征),才有可能通过自适应的波束形成技术来实现空间滤波,从而充分发挥自适应阵列天线的优势。

为了求得多个用户入射信号到达的方向(波达方向),有多种算法可以实现,下面具体讨论3种波达方向估计算法。

## 2 DOA 估计算法

### 2.1 延迟-相加算法

延迟-相加算法是最简单的DOA估计算法之一,也被成为经典的波束形成方法。他是通过改变扫描方向 $\theta$ ,对不同的 $\theta$ 形成不同的权值 $w = a(\theta)$ ,然后测量阵列输出功率。针对窄带输入信号,阵列输出功率可以表示为:

$$\begin{aligned} P &= E\{|y(t)|^2\} = E\{|w^H u(t)|^2\} \\ &= w^H E\{u(t)u^H(t)\}w = w^H R_w w \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $R_w = E\{u(t)u^H(t)\}$  是阵列输入数据的自相关矩阵,他包含了阵列相应向量和信号本身的有用信息,通过对  $R_w$  的分解可估计信号参数。

假设有一个入射角为 $\theta_0$ 的信号,则波束形成器的输出功率可以表示为:

$$\begin{aligned} P &= E\{|w^H u(t)|^2\} = E\{|w^H(a(\theta_0)s(t) + n(t))|^2\} \\ &= |w^H a(\theta_0)|^2 (\sigma_s^2 + \sigma_n^2) \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $a(\theta_0)$  是方向  $\theta_0$  对应的方向向量,  $n(t)$  是噪声向量,  $\sigma_s^2 = E\{s^2(t)\}$  是信号功率,  $\sigma_n^2 = E\{n^2(t)\}$  是噪声功率。从上式可以看出,当权向量  $w = a(\theta_0)$  时, 输出功率最大<sup>[1]</sup>,这是因为各阵元信号分量经权值移相,产生同相相加。此时:

$$P(\theta) = w^H R_w w = a^H(\theta) R_w a(\theta) \quad (3)$$

### 2.2 Capon 最小方差算法

Capon最小方差算法又被称为最小方差无畸变相应(Minimum Variance Distortionless Response, MVDR)法,他在使输出信号方差(平均功率)最小化的同时使期望来波方向的信号相应不变(单位增益及零相移)。其数学表达式如下<sup>[1]</sup>:

$$\min E\{|y(t)|^2\} = \min w^H R_w w \quad (4)$$

约束条件为  $w^H a(\theta_0) = 1$ 。可以求得上式的解为<sup>[2]</sup>:

$$w = \frac{R_w^{-1} a(\theta)}{a^H(\theta) R_w^{-1} a(\theta)} \quad (5)$$

则阵列输出功率关于波达方向的函数可由空间谱得到:

$$P_{\text{Capon}} = \frac{1}{a^H(\theta) R_{uu}^{-1} a(\theta)} \quad (6)$$

### 2.3 多重信号分类算法

多重信号分类(Multiple Signal Classification, MUSIC)算法是利用输入信号协方差矩阵特征结构的一种具有最高分辨能力的多重信号分类技术。当入射信号数  $K$  小于阵元数  $N$  时,  $N \times N$  的  $R_{uu}$  矩阵有与进入阵列的信号数目相等的非零特征值及  $N-K$  个为零的特征值。

$$V_n = [q_K, q_{K-1}, \dots, q_{N-1}] \quad (7)$$

这里,  $V_n$  是一个包含噪声特征向量的矩阵。

因为相应于信号向量的方向向量与噪声子空间特征向量正交, 即对于在  $\theta$  为多个分量的 DOA 时,  $a^H(\theta)V_n V_n^H a(\theta) = 0$ 。于是多个入射信号的 DOA 可通过确定 MUSIC 空间谱的峰值而做出估计, 这些峰值可以表示为<sup>[1]</sup>:

$$P_{\text{MUSIC}} = \frac{1}{a^H(\theta)V_n V_n^H a(\theta)} \quad (8)$$

或:

$$P_{\text{MUSIC}} = \frac{a^H(\theta)a(\theta)}{a^H(\theta)V_n V_n^H a(\theta)} \quad (9)$$

### 3 仿真实验

本文采用由 4 个阵元组成的均匀直线阵对入射信号数为 1(入射方向为  $\pi/6$ )、2(入射方向分别为  $\pi/9, \pi/3$ ) 和 3(入射方向分别为  $\pi/18, \pi/9, \pi/3$ ) 的入射信号分别采用延迟-相加算法、Capon 最小方差算法和多重信号分类算法进行比较仿真实验, 信噪比为 10 dB。仿真实验结果如图 1 所示。

### 4 结语

(1) 延迟-相加算法的分辨率最差。在只有一个人射

作者简介 高海男, 硕士研究生。主要研究方向为交通信息与通信工程。

(上接第 102 页)

### 参 考 文 献

- [1] ITU-T, Recommendation Q.921, 1997.
- [2] ITU-T, Recommendation Q.931, 1997.
- [3] IETF, RFC3057 - ISDN Q.921 - User Adaptation Layer, 2001.
- [4] IETF, RFC2960 - Stream Control Transmission

作者简介 李春明 男, 1981 年出生, 河南太康县人, 吉林大学计算机学院硕士研究生。主要研究方向为 NGN 网络中 ISDN 业务的实现技术。

秦贵和 男, 1962 年出生, 山东高密人, 吉林大学计算机学院教授, 博士生导师。主要研究方向是嵌入式系统。

信号时, 该算法是可行的。但是当存在不止一个入射信号时, 该算法分辨率低的缺点就显露出来了。

(2) Capon 最小方差算法的分辨能力优于延迟-相加算法。他的缺点是对入射角度相近的信号没有办法很好地分辨, 其次他需要求解逆矩阵, 计算量大。

(3) 多重信号分类算法相对于前两种算法有最尖锐的谱峰和最高的分辨率。他的缺点是当入射信号的个数接近或超过阵元个数时, 该算法的分辨率会急剧下降。另外他需要十分精确的阵列校准。

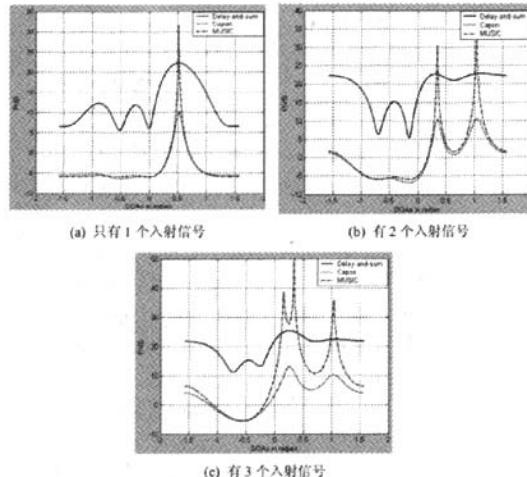


图 1 DOA 估计算法比较

### 参 考 文 献

- [1] 杨维, 陈俊仕, 李世明, 等. 移动通信中的阵列天线技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [2] 张贤达, 保铮. 通信信号处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [5] 童孟军, 姜明. SCTP 的设计与实现 [J]. 计算机应用与软件, 2006, 23(7): 74~77.
- [6] 曾曦. 一号数字用户信令——DSS1 的实现 [J]. 通信技术, 2003(9).
- [7] 刘韵洁, 张智江. 下一代网络 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005.

## 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](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>