

基于 MUSIC 和 LMS 算法的智能天线设计

刘 祎, 李 莉, 张 静

(上海师范大学 数理信息学院, 上海 200234)

摘要 基于来波方向估计和自适应波束成形的智能天线系统, 用多重信号分类(MUSIC)算法实现来波方向估计, 辨识天线阵列上接收信号的各个方向, 使用最小均方误差(LMS)的自适应算法控制天线的主瓣方向, 实现对期望信号的跟踪, 同时实现对干扰信号的零陷处理。文中使用 Matlab 编程进行计算机仿真, 通过仿真结果, MUSIC 算法可以识别天线接收端的信号的入射方向, LMS 算法可以实现对干扰信号的抑制。

关键词 多重信号分类; 最小均方误差; 波束成形; 智能天线

中图分类号 TN821⁷.91 文献标识码 A 文章编号 1007-7820(2009)01-005-04

Smart Antenna Design Based on MUSIC and LMS Algorithms

Liu Yi, Li Li, Zhang Jing

(College of Mathematics and Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

Abstract A smart antenna system based on estimated direction of arrival (DOA) and adaptive beamforming achieves DOA and identifies the directions of the received signals around the array antenna by the MUSIC algorithm, controls the direction of the main beam by the LMS algorithm and thus tracks the desired source signal, and at the same time generates deep nulls in the direction of interfering signals. Matlab simulation results show that the MUSIC algorithm can identify the direction of the signal received at the antenna and that the LMS can suppress the interference signal.

Keywords MUSIC; LMS; beamforming; smart antenna

作为当今三大主流标准之一的 TD-SCDMA 是由中国自主提出使用时分双工方式的第三代移动通信系统标准。TD-SCDMA 的核心技术之一是智能天线技术。在 TD-SCDMA 系统中使用智能天线技术, 基站可以利用上行信号信息对下行信号进行波束成形, 从而降低对其他移动台的干扰, 同时提高接收灵敏度, 增加覆盖距离和范围, 改善整个通信系统的性能^[1-2]。

传统的切换波束方式只是把空间分成几个固定扇

收稿日期: 2008-09-04

作者简介: 刘 祎(1981-), 男, 硕士研究生。研究方向: 智能天线, 自适应算法。李 莉(1962-), 女, 博士, 教授。研究方向: 自适应信息处理与无线通信, 数字信息处理, 电磁兼容技术, 计算机应用。张 静(1971-), 女, 副教授。研究方向: 协同通信, 自适应信息处理与无线通信。

区, 当移动台进入扇区时, 切换波束系统选择一个收到最强信号的波束用于该用户。由于用户信号并不一定在固定波束的中心处, 当用户信号位于波束边缘, 干扰信号位于波束中央时, 接受效果差, 同时也不能实现自适应干扰置零, 抑制干扰差^[3]。而智能天线通过自适应阵列天线跟踪并提取各用户的空间信息, 利用用户位置的不同, 使在同一信道中发送和接收各用户的信号不发生相互干扰。

智能天线能够根据信号环境情况自动形成最佳阵列波束, 通过在天线中引入自适应信号处理, 实现噪声抵消, 在干扰入射方向上产生零陷以及主波束跟踪有用信号, 从而使天线阵具有智能接收的能力, 以解决切换波束方式的不足。文中正是结合多重信号分类算法和最小均方误差的自适应算法来实现智能天线系统。

1 阵列天线信号模型

在基站天线的远场区域, 可以认为电磁波以球面波的形式向外辐射, 如果接收天线离辐射源足够远, 在接收的局部区域可近似为平面波。图 1 所示为等距线阵, 由 M 个阵元组成, 设阵元间距为 Δx , 入射信号 $s(t)$ 的入射角为 θ , 即 $s(t)$ 的波达方向, 以原点为信号的参考点, 则等距直线阵的方向向量^[4]为

$$\mathbf{a}(\theta) = (1, e^{-j2\pi(\Delta x \cos\theta)/\lambda}, \dots, e^{-j2\pi(M-1)\Delta x \cos\theta/\lambda})^T \quad (1)$$

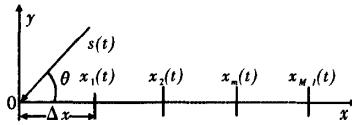


图 1 等距直线天线阵列

其中 λ 为信号波长。

对于来自 d 个方向的信号入射到阵列天线的 M 个阵元上, 则接收信号写成矩阵形式为

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{A}s(k) + \mathbf{n}(k) \quad (2)$$

其中, $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_d)]$ 为阵列的方向向量, $s(k) = (s_1(k), s_2(k), \dots, s_d(k))^T$ 是入射信号矢量, $\mathbf{n}(k) = (n_1(k), n_2(k), \dots, n_d(k))^T$ 是噪声矢量。在阵列信号处理中, 一次采样称为一次快拍, k 表示第 k 次快拍。

2 多重信号分类算法(MUSIC)

DOA (Direction of Arrival) 估计的基本问题就是确定同时处在空间某一区域内多个感兴趣的信号的空间位置(即多个信号到达阵列参考阵元的方向角)。最经典的超分辨 DOA 估计方法是 MUSIC 方法。其算法的基本思想^[5]是将阵列输出数据的协方差矩阵进行特征值分解, 从而得到与信号分量对应的信号子空间和信号分量相正交的噪声子空间, 然后利用这两个子空间的正交性来估计信号参数, 它是建立在如下假设基础上的。

(1) 阵列形式为线性均匀阵, 阵元间距不大于处理最高频率信号波长的二分之一;

(2) 处理器的噪声为加性高斯分布, 不同阵元间距噪声均为平稳随机过程, 且相互独立, 空间

平稳(各阵元噪声方差相等);

(3) 空间信号为零均值平稳随机过程, 它与阵元噪声相互独立;

(4) 信号源数小于阵列元数, 信号取样数大于阵列元数。

如果有 D 个信号入射到 M 元阵列上, 则阵列接收到的输入数据向量可以表示为 D 个人射波形与噪声的线性组合。如式(3)和式(4)所示

$$\mathbf{X}(t) = \sum_{k=1}^D \mathbf{a}(\theta_k) \mathbf{s}_k(t) + \mathbf{N}(t) \quad (3)$$

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{N}(t)$$

其中 $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_D)]$ 为阵列导引向量, $\mathbf{N}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_M(t)]^T$ 是噪声向量。

利用几何描述, 可以把接收向量 \mathbf{X} 和导引向量 $\mathbf{a}(\theta_k)$ 看作 M 维空间的向量。输入协方差矩阵 \mathbf{R}_s 可以表示如式(5)和式(6)所示

$$\mathbf{R}_s = \mathbf{E}[|\mathbf{X}^2|] = \mathbf{E}[\mathbf{X}\mathbf{X}^H] = \mathbf{A}\mathbf{E}[\mathbf{S}\mathbf{S}^H]\mathbf{A}^H + \mathbf{E}[\mathbf{N}\mathbf{N}^H] \quad (5)$$

$$\mathbf{R}_s = \mathbf{A}\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H + \sigma_n^2 \mathbf{I} \quad (6)$$

式中 \mathbf{R}_s 是信号相差矩阵。

设 \mathbf{R}_s 的特征值为 $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M\}$, 如式(7)所示

$$|\mathbf{R}_s - \lambda_i \mathbf{I}| = 0 \quad (7)$$

可以改写如式(8)所示

$$|\mathbf{A}\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H + \sigma_n^2 \mathbf{I} - \lambda_i \mathbf{I}| = |\mathbf{A}\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H - (\lambda_i - \sigma_n^2) \mathbf{I}| = 0 \quad (8)$$

因此又可以看作 $\mathbf{A}\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H$ 的特征值 v_i , 如式(9)所示

$$v_i = \lambda_i - \sigma_n^2 \quad (9)$$

因为 \mathbf{A} 是由线性独立的导引向量构成的, 因此是列满秩的。信号相关矩阵 \mathbf{R}_s 也是非奇异的 (rank(\mathbf{R}_s) = D , 各信号源两两不相关)。

列满秩的 \mathbf{A} 和非奇异的 \mathbf{R}_s 可以保证, 在入射信号数 D 小于阵元数 M 时, $M \times M$ 的矩阵 $\mathbf{A}\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H$ 是半正定的, 且秩为 D 。

由线性代数的基本知识, 这意味着 $\mathbf{A}\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H$ 的特征值 v_i 中, 有 $M - D$ 个为零特征值。从输入协方差矩阵 \mathbf{R}_s 的角度看, \mathbf{R}_s 的特征值中有 $M - D$ 个等于噪声方差 σ_n^2 。然后寻找 \mathbf{R}_s 的特征值, 使 λ_1 是最大特征值, λ_M 是最小特征值, 因此有式(10)

$$\lambda_{D+1}, \dots, \lambda_M = \sigma_n^2 \quad (10)$$

但是实际中是使用有限个数样本估计自相关矩阵 \mathbf{R}_s 的, 所有对应于噪声功率的特征值 ($\lambda_{D+1}, \dots, \lambda_M$) 并不相同, 而是一组差别不大的值。随着用以估计 \mathbf{R}_s 的样本数的增加, 表征它们离散程度的方差逐渐减小, 它们将会转变为一组比较接近的值。最小特征值的重数 K 一旦确定, 利用 $M = D + K$ 的关系, 就可以确定信号的估计个数 D^* 。所以信号的估计个数由式(11)给出

$$D^* = M - K \quad (11)$$

关于特征值 λ_i 的特征向量为 q_i , 满足式(12)

$$\mathbf{R}_s q_i = \lambda_i q_i \quad (12)$$

也可以写成式(13)的形式。

$$(\mathbf{R}_s - \lambda_i \mathbf{I}) q_i = 0 \quad (13)$$

对于与 $M - D$ 个最小特征值相关的特征向量, 有式(14)和式(15)

$$(\mathbf{R}_s - \sigma_n^2 \mathbf{I}) q_i = \mathbf{A} \mathbf{R}_s \mathbf{A}^H q_i + \sigma_n^2 \mathbf{I} q_i - \sigma_n^2 \mathbf{I} q_i = 0 \quad (14)$$

即

$$\mathbf{A} \mathbf{R}_s \mathbf{A}^H q_i = 0 \quad (15)$$

因为 \mathbf{A} 满秩, \mathbf{R}_s 非奇异(均存在可逆矩阵), 故有式(16)和式(17)

$$\mathbf{A}^H q_i = 0 \quad (16)$$

或

$$\mathbf{a}^H(\theta) q_i = 0 \quad (17)$$

这表明与 $M - D$ 个最小特征值相关的特征向量和构成 \mathbf{A} 的 D 个导引向量正交, 如式(18)所示。

$$\{\mathbf{a}^H(\theta_1), \dots, \mathbf{a}^H(\theta_D)\} \perp \{q_{D+1}, \dots, q_M\} \quad (18)$$

通过寻找与 \mathbf{R}_s 中近似等于 σ_n^2 的那些特征值对应的特征向量最接近正交的导引向量, 可以估计与接收信号相关的导引向量。

分析表明, 协方差矩阵的特征向量属于两个正交子空间之一, 称之为特征子空间(信号子空间)和非主特征子空间(噪声子空间)。相应于 DOA 的导引向量位于信号子空间, 因而与噪声子空间正交。通过在所有可能的阵列导引向量中搜寻那些与非主特征向量张成的空间垂直的向量, 就可以确定 DOA。

为寻找噪声子空间, 构造一个包含噪声特征向量的矩阵, 如式(19)所示

$$\mathbf{V}_n = [q_{D+1}, \dots, q_M] \quad (19)$$

因为相应于信号分量的导引向量引噪声子空间特征向量正交, 即对于 θ 为多径分量的 DOA 时, $\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{V}_n \mathbf{V}_n^H \mathbf{a}(\theta) = 0$ 。于是多个入射信号 DOA 可以通过确定 MUSIC 空间谱的峰值作出估计, 这些峰值由式(20)给出

$$P_{\text{MUSIC}}(\theta) = 1 / [\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{V}_n \mathbf{V}_n^H \mathbf{a}(\theta)] \quad (20)$$

$\mathbf{a}(\theta)$ 和 \mathbf{V}_n 的正交性将使分母达到最小, 从而得到定义的 MUSIC 谱的峰值。MUSIC 谱中个最大峰值对应于入射到阵列上的信号的 DOA。

3 MUSIC 算法的实现

MUSIC 算法的实现步骤可以总结如下

(1) 收集输入样本 $\mathbf{X}(i)$, $i = 1, \dots, N$, 估计输入协方差矩阵, 如式(21)所示

$$\mathbf{R}_s^* = [\sum_{i=1}^N \mathbf{X}(i) \mathbf{X}^H(i)] / N \quad (21)$$

(2) 对上面得到的协方差矩阵 \mathbf{R}_s^* 进行特征分解, 如式(22)所示

$$\mathbf{R}_s^* \mathbf{V} = \mathbf{V} \Lambda \quad (22)$$

式中 $\Lambda = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M\}$, $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_M$ 为特征值, $\mathbf{V} = [q_1, q_2, \dots, q_M]$ 是 \mathbf{R}_s^* 相应的特征向量。

(3) 利用最小特征值 λ_{\min} 的重数 K 估计信号数 D^* , 如式(23)所示

$$D^* = M - K \quad (23)$$

按特征值的大小顺序, 把与信号个数 D^* 相等的特征值和对应的特征向量看作信号子空间, 把剩下的 $M - D^*$ 个特征值和对应的特征向量看作噪声子空间, 得到噪声矩阵, 如式(24)所示

$$\mathbf{V}_n = [q_{D+1}, \dots, q_M] \quad (24)$$

(4) 计算 MUSIC 谱, 如式(25)所示

$$P_{\text{MUSIC}}(\theta) = 1 / [\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{V}_n \mathbf{V}_n^H \mathbf{a}(\theta)] \quad (25)$$

(5) 使 θ 变化, 找出 $P_{\text{MUSIC}}(\theta)$ 的 D^* 个最大峰值, 得到 DOA 的估计值。

4 基于 LMS 算法的自适应波束算法

LMS 算法是一种自适应波束赋形算法, 通过迭代来求解最小均方误差(MMSE)准则下的最优权重。自适应算法包括两个步骤, 具体过程是^[6]:

第一步: 假设阵列天线所接收到的信号可以表示为 $\mathbf{x}(k) = [x_0(k), x_1(k), \dots, x_{M-1}(k)]^H$,

对当前第 k 次快拍接收信号的加权系数为 $w = [w_0, w_1, \dots, w_{M-1}]^H$, 波束赋形器的输出可以写为 $y(k) = w^H(k)x(k)$, 输出信号 $y(k)$ 与期望信号 $s(k)$ 的误差信号为 $e(k) = s(k) - y(k)$;

第二步: 根据公式 $w(k+1) = w(k) + 2\mu x(k)$, 求取对 $k+1$ 次快拍的加权向量值, 其中 μ 为固定步长因子, $0 < \mu < 1/\lambda_{\max}$, λ_{\max} 为 R_{xx} 最大特征值。

5 仿真实验和性能评估

智能天线系统实现先根据 MUSIC 算法得到天线阵列接收端的信号方向, 然后选择期望信号, 使用 LMS 算法实现自适应波束成形, 使得发射信号方向指向所选择信号的入射方向。

仿真实验一: 模拟 4 个窄带信号分别以 $20^\circ, 40^\circ, 60^\circ, 80^\circ$ 方向的信号入射到均匀线阵上, 阵元间距为入射信号波长的 $1/2$, 信号间互不相关, 与噪声相互独立, 噪声为理想高斯白噪声, 天线个数为 8, 采样快拍次数为 1 280。仿真结果, 如图 2 所示, 采用 MUSIC 算法可以很好的估计出入射信号个数和方向。

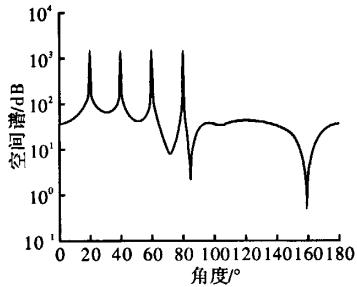


图 2 MUSIC 算法实现来波方向估计

仿真实验二: 由仿真实验一, MUSIC 算法可以识别天线接收端的信号的入射方向, 而自适应波束成形通过最小二乘算法 (LMS) 来实现。选择 40° 的波达方向信号进行波束赋形和对其他方向信号进行干扰抑制的仿真。

仿真条件: 天线阵列的个数是 8, 阵元间距为入射信号波长的 $1/2$, 噪声为理想高斯白噪声, 信噪比 10 dB , 采样快拍次数为 1 280 次, μ 取值为 0.001, 仿真结果, 如图 3 显示, 在 40° 主瓣方向上的幅度响应比其他方向至少大 10 dB , 对 20° 和 60° 方向的干扰信号实现了很好的干扰抑制。

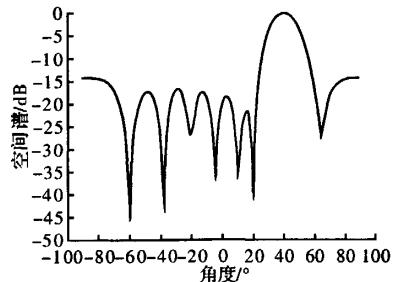


图 3 LMS 算法实现自适应波束成形

6 结束语

文中采用 MUSIC 和 LMS 算法实现智能天线系统。由仿真结果可以看出 MUSIC 算法能够识别出等距线形天线阵列上入射信号的方向, 采用 LMS 算法能够实现自适应波束赋形, 对干扰信号进行有效抑制。但是对于 MUSIC 算法, 如果入射信号相关时, 相关信号会导致阵列接收数据的协方差矩阵阵秩的亏缺, 从而使得信号特征向量发散到噪声子空间去, 导致某些相关源的方向矢量与噪声子空间不完全正交, 无法正确估计信号源方向, 此时 MUSIC 算法就会失效, 所以这个时候应该考虑先解除信号的相关性。而对于固定步长的 LMS 算法, 虽然算法简单, μ 值应为一个保持不变的估计值, 且事先须取得输入信号的统计特性。但随着向最优解方向的前进, 权值的调整由粗到细, μ 值也应该由大到小改变, 使收敛迅速趋近最优解, 所以未来将采用变步长的 LMS 算法。但本实现方案对于其它阵列结构, 如圆形天线阵列自适应波束成形的有效性和复杂度则有待进一步研究。

参考文献

- [1] 卫健, 束成荣. TD-SCDMA 和智能天线 [J]. 现代雷达, 2007, 29(9): 66-69.
- [2] 沈战峰, 任修坤, 王映民. 智能天线技术及其对 TD-SCDMA 系统网络规划的影响 [J]. 通信技术, 2007, 40(12): 304-306.
- [3] 龚耀寰. 自适应滤波 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [4] 张贤达. 现代信号处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [5] 刘鸣, 袁超伟, 贾宁, 等. 智能天线技术与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [6] 刘铁铮, 漆兰芬. 智能天线 LMS 算法的分析及实现方案 [J]. 科学技术与工程, 2006, 6(9): 1205-1209.

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>