

多径信道中智能天线波束形成算法的研究

张海社, 张艳艳, 武 腾

(山东科技大学 信息与电气工程学院, 山东 青岛 266510)

摘 要:在多径信道(近似于实际情况)的条件下,分别采用 MMSE 算法与 MV 算法进行智能天线中波束形成的软件模拟与比较分析,设定干扰信号与有用信号存在相同功率的情况下进行仿真测试。由仿真图可以看出,在该环境下波束形成器可以获得最大接近 40 dB 的增益,同时还可以比较出该条件下 MMSE 算法比 MV 算法更优。理论分析与仿真结果相符。

关键词:智能天线; MMSE 算法; MV 算法; 波束形成器; SINR

中图分类号: TN821

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2009)02-0071-04

Research on Beam-forming Algorithm of Smart Antenna in Multi-path Channel

ZHANG Hai-she, ZHANG Yan-yan, WU Teng

(College of Information and Electrical Eng., SUST, Qingdao, Shandong 266510, China)

Abstract: The MMSE and MV algorithms are adopted for the software simulation and the comparative analysis of the beam forming in smart antenna on the condition of the multi-path channels in the paper. It is simulated and tested in the assumption that the noise power is equal to the SOI power. It can be seen from the figures that the beam former can get nearly to 40 dB gains, and also conclude that MMSE will be more superior than MV under the same circumstance. The results of theoretical analysis are in accord with the simulation results.

Key words: smart antenna; MMSE algorithm; MV algorithm; beam-former; SINR

智能天线^[1]系统由天线阵列、幅相加权、合成器和控制器组成,它能根据信号环境的变化,依据优化准则自适应地调整加权矢量,通过实时改变天线的方向图,跟踪信号的变化。它使期望信号的方向具有高增益,而使干扰方向实现近似零陷,以达到抑制和减少干扰的目的,能够显著提高阵列的输出信干噪比,改善系统质量,提高系统可靠性。

算法是智能天线的核心部分,它包括盲算法^[2]和非盲算法。盲算法存在计算量及硬件实现的问题,因此本文选择 MMSE (Minimum Mean Square Error) 和 MV (Minimum Variance) 两种非盲算法进行仿真试验,比较多信道环境下的波束形成。

1 波束形成原理

MMSE 波束形成器采用 MMSE 算法,它是以最小均方误差(最小化 $E[|W^T r(t) - p(t)|^2]$) 为准则^[3],针对白噪声环境设计的一种有效的线性技术。

MV 一般用于有用信号的波达角(Direction of Arrival, DOA) 已知的情况,它要求所生成的最优权向量在波束形成器对有用信号具有固定响应的约束条件下,令输出功率的方差($E[|W^T S(n)|^2]$) 最小^[4]。

首先定义 $r(t)$ 为在采样时间里的接收信号:

收稿日期: 2008-07-02

基金项目: 山东省自然科学基金项目(Y2006F36)

作者简介: 张海社(1984—), 女, 山东聊城人, 硕士研究生, 主要从事智能天线的自适应算法研究。

$$\mathbf{r}(t) = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{i=0}^{L_k-1} \sqrt{P_k} \alpha_{k,i}(t) b_k(t - \tau_{k,i}) a_k(t - \tau_{k,i}) \mathbf{V}(\theta_{k,i}) + \mathbf{n}(t), \quad (1)$$

式中: P_k 是第 k 个用户的信号功率; $\alpha_{k,i}(t)$ 是第 i 个接收路径到第 k 个用户的增益; $b_k(t)$ 为传送的数据; $\tau_{k,i}$ 是延迟时间; $a_k(t)$ 是传输序列; $\mathbf{V}(\theta)$ 是数组响应向量; $\mathbf{n}(t)$ 是白噪声。

1) MMSE 计算最优化加权的基本公式为

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{P}, \quad (2)$$

式中: $\mathbf{R} = E[\mathbf{r}(t) * \mathbf{r}(t)^T]$ 是数据矢量 $\mathbf{r}(t)$ 的自相关矩阵, $\mathbf{P} = E[\mathbf{r}(t) * \mathbf{p}(t)]$ 是数据矢量 $\mathbf{r}(t)$ 的互相关矩阵, $\mathbf{p}(t)$ 是设定的一个参考信号^[5]。

2) MV 计算最优化加权值的基本公式为

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{C}}{\mathbf{C} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{C}^H}, \quad (3)$$

式中, \mathbf{C} 是数组响应向量 \mathbf{V} 的转置。

2 仿真实现波束形成

2.1 仿真过程分析

由上面原理的论述, 编写仿真程序, 对 MMSE 和 MV 波束形成器在不同情况下进行仿真比较分析: ① 同采样点下, 输入信号均值不为零和不为零; ② 输入信号均值为零时, 选取不同采样点; ③ 接收信号的各个分支有不同延迟; ④ 最后再计算出各种情况下的信干噪比 SINR (Signal to Interference and Noise Ratio) 和天线增益图。

通过仿真比较, 得出二者的性能特征, 从而在不同环境条件下设计智能天线时选择适合的波束形成器^[6]。

2.2 初始化仿真模型

本文针对多径信道干扰下的单用户接收有用信号的仿真, 采用 5 个天线阵列, 阵元间隔取 1/2 波长, 则式(1)变为

$$\mathbf{r}(t) = \alpha_0 \mathbf{x}(t) \mathbf{V}(\theta_0) + \alpha_1 \mathbf{x}(t-1) \mathbf{V}(\theta_1) + \alpha_2 \mathbf{x}(t-2) \mathbf{V}(\theta_2) + \mathbf{n}(t), \quad (4)$$

期望信号的数组响应向量设定为

$$\mathbf{V}(\theta) = (e^{j2\pi \sin \theta}, e^{j\pi \sin \theta}, 1, e^{-j\pi \sin \theta}, e^{-j2\pi \sin \theta})^T. \quad (5)$$

式(4)中: $\mathbf{x}(t) = \mathbf{s}(t) + \mathbf{p}(t)$, $\mathbf{s}(t)$ 是用户信号, $\mathbf{p}(t)$ 是参考信号, 它们功率相同。假设噪声 $\mathbf{n}(t)$ 的功率为小于第一个信道用户信号功率 10 dB 的白噪声干扰, 且定义 $\theta_0 = 30^\circ$, $\theta_1 = -30^\circ$, $\theta_2 = 60^\circ$ (多径入射角度, 视 θ_0 项为有用信号的入射角度, 其他两项视为多径干扰项); 又设 $\alpha_0 = 0.85 - j0.42$, $\alpha_1 = 0.75 + j0.39$, $\alpha_2 = 0.55 + j0.36$ 。

另外, 表征波束形成器的输出效果天线增益的表达式为

$$P(\theta) = |\mathbf{V}(\theta)^T \mathbf{W}|. \quad (6)$$

表征性能的参数 SINR 的表达式有两种:

① 单个采样点信干噪比 SINR 的计算公式为

$$TSINR = \frac{|\mathbf{W}_{\text{opt}} * (\alpha_0 \mathbf{x}(t) \mathbf{V}(\theta_0))|^2}{|\mathbf{W}_{\text{opt}} * (\alpha_1 \mathbf{x}(t-1) \mathbf{V}(\theta_1) + \alpha_2 \mathbf{x}(t-2) \mathbf{V}(\theta_2) + \mathbf{n}(t))|^2}; \quad (7)$$

② 一组采样点的平均 SINR (单位 dB) 为

$$SINR = 10 \lg(E[TSINR]). \quad (8)$$

2.3 仿真分析

由式(4)的初始化条件下的 $\mathbf{r}(t)$ 仿真, 取 400 采样点, 根据式(2)、式(3), 由仿真程序计算最优化加权值 \mathbf{W}_{opt} , 从 -90° 到 90° 调整入射角度 θ 。

2.3.1 输入信号均值为零和不为零两种情况

1) 输入信号均值为零时的情况, 如图 1 所示。

由图 1 可以看出, 两种算法的波束形成器均有比较理想的抑制干扰的特性, 在 30° 度上出现了最高峰值, 即有用信号得到很好地增益, 而在 30° 度以外的其他角度的信号增益被很好地抑制掉了, 出现了比最高峰小很多的峰值, 特别是事先设定的两个干扰信号 (其导向角度为 -30° 和 60°) 附近出现了零陷。与预测的理论

值相近,说明 MMSE 波束形成器和 MV 波束形成器在输入信号均值为零时消除多径干扰的效果比较理想。

2)输入信号均值不为零时,如图 2 所示。

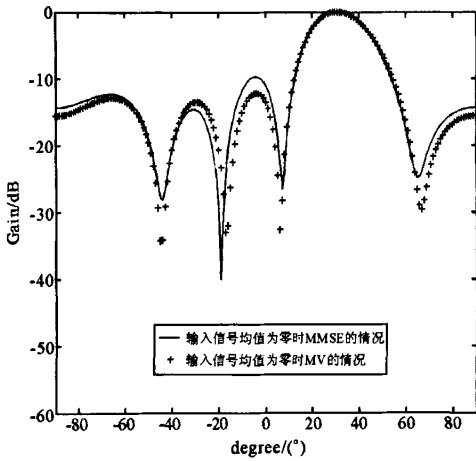


图 1 输入信号均值为零时的 MMSE 和 MV 的仿真图

Fig. 1 The simulation figure of MMSE and MV with zero mean

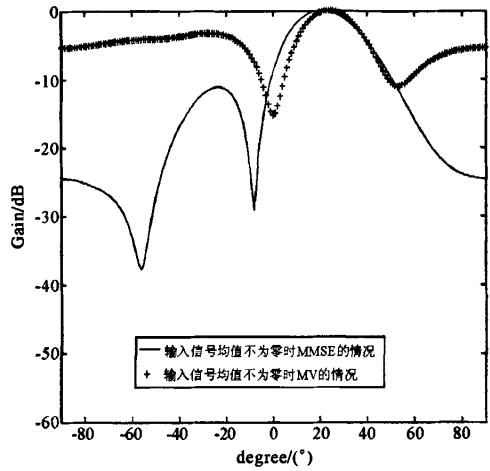


图 2 输入信号均值不为零是 MMSE 和 MV 的仿真图

Fig. 2 The simulation figure of MMSE and MV without zero mean

由图 2 可以看出,MMSE 波束形成器仍然很好地保持了抑制干扰的特性,在 30° 有用信号方向的最高峰比其他角度上的峰值有绝对的优势;而 MV 波束形成器虽然在 30° 上也可以取到峰值最大,在其他角度上增益受抑制,但相对 MMSE 来说,其干扰旁瓣仍然有比较高的峰值,在 30° 的波峰上没有绝对的优势,抑制干扰的效果不如 MMSE。

3)两种输入信号下的 $SINR$ 对比

当输入信号均值为零时,仿真结果显示 MMSE 和 MV 波束形成的 $SINR$ 大体保持在 $10\sim 20$ dB,差别不大;当输入信号均值不为零时,MMSE 的 $SINR$ 基本不变,在 $10\sim 20$ dB 之间,但 MV 的 $SINR$ 却下降到 $0\sim 5$ dB,说明 MMSE 在消除多径干扰方面优于 MV。

2.3.2 改变采样的点数

取样值调整为 20,150,1 000,2 000,分别进行仿真分析。仿真图形如图 3、图 4 所示。

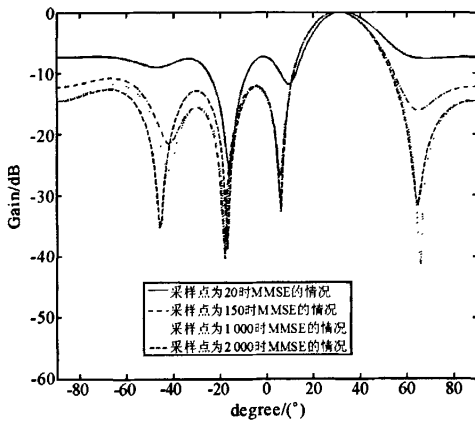


图 3 选取不同采样点时 MMSE 的仿真图

Fig. 3 The simulation figure of MMSE with different sampling points

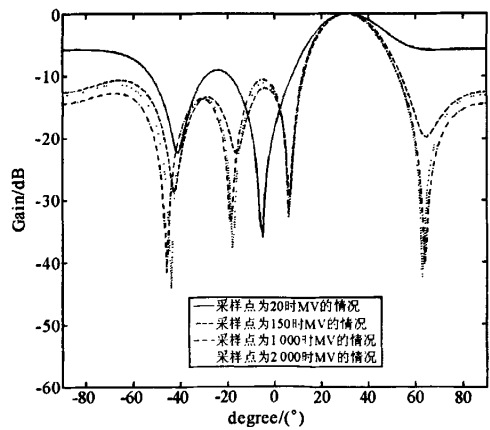


图 4 选取不同采样点时 MV 的仿真图

Fig. 4 The simulation figure of MV with different sampling points

从图3、图4看出,当采样点为20时,MMSE和MV的图形均杂乱无章,无规律可循;增加采样点到150时,图形可以显示出规律, $SINR$ 也初步稳定下来;400个采样点时,图形和 $SINR$ 更加稳定,已经可以显示出一定的规律;1000个采样点时,图形较400点时进一步稳定;2000个采样点时较1000点已基本看不出区别。由此得出结论:改变采样点将改变MMSE和MV波束形成器的性能,采样点数越多,消除干扰的能力也就越好;但采样点到一定数目时图形和 $SINR$ 将稳定下来,这时再增加采样点也无意义。另外增加采样点还会减缓波束形成器的处理速度。所以就需要根据需求和具体情况,选取合适的采样点使波束形成器达到最好工作效率。

2.3.3 改变MMSE接收信号延迟

从图5中可以看出,在三条曲线中,曲线(1)和曲线(3)对应的两个图形大体相似,在主波束(即 30° 位置上)附近有较大增益,而在干扰方向上实现零陷;曲线(2)对应的图形有较明显的不同,在规定的干扰方向(-30°)附近出现了和主波束方向上相差无几的增益。这说明MMSE接收信号的各分支项中均存在时延的抗干扰效果显著优于不全存在时延的情况。

3 总结

从仿真结果可以得出:输入信号均值为零时,MMSE和MV都有很好的抗干扰能力,但若信号均值不为零,MV的性能远远不如MMSE波束形成器;选取不同的采样点对波束形成器的处理能力有影响,采样点太少,消除干扰的效果不明显,采样点过多则会减慢波束形成器的运行速度,所以应该根据实际情况选取合适的采样点;MMSE在改变其接收信号干扰部分的延迟时会影响其性能。

参考文献:

- [1]王畅,王元钊.智能天线中MMSE和MV波束形成器的仿真分析[J].韩山师范学院学报,2005,26(3):30-35.
WANG Chang, WANG Yuan-zhao. The simulation and analysis of MMSE and MV beamforming in smart antenna[J]. Journal of Hanshan Teachers College, 2005, 26(3): 30-35.
- [2]孙绪宝,钟顺时.基于神经网络的盲波束形成[J].电波科学学报,2004,19(2):238-239.
SUN Xu-bao, ZHONG Shun-shi. Blind beamforming using neural network[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2004, 19(2): 238-239.
- [3]康锐坚.用于智能天线技术中的MMSE波束形成器[J].现代电子技术,2006,11:46-52.
KANG Rui-jian. MMSE adaptive beamformer for smart antenna skill[J]. Modern Electronics Technique, 2006, 11: 46-52.
- [4]刘胜杰,李媛.最小均方差算法在智能天线非盲波束形成中的应用[J].电子测量技术,2007,30(1):181-184.
LIU Sheng-jie, LI Yuan. Application of LMS algorithm in non-blind beamforming of smart antenna[J]. Electronic Measurement Technology, 2007, 30(1): 181-184.
- [5]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,2005:36-39.
- [6]章坚武.移动通信[M].西安:西安电子科技大学出版社,2007:46-50.
- [7]金荣洪,耿军平,范瑜.无线通信中的智能天线[M].北京:北京邮电大学出版社,2006:10,123,150-169.
- [8]刘敏. MATLAB通信仿真与应用[M].北京:国防工业出版社,2001.

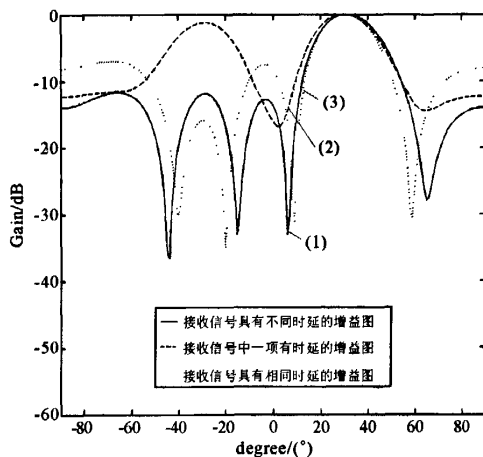


图5 MMSE接收信号中各分支有不同延迟的情况图

Fig. 5 The different delays in every branch of the MMSE receiving signal

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),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>