

文章编号:1004-1729(2006)03-0252-04

## 多输入多输出智能天线中的自适应波束形成算法

张 瑞,靳 婷

(河南工业大学 信息科学与工程学院, 河南 郑州 450052)

**摘要:** 基于传统的 LMS 算法, 提出了一种新的 MIMO 智能天线自适应波束形成算法, 即 LMS-MIMO 算法。与传统的 LMS 算法相比, LMS-MIMO 算法在发射端和接收端同时采用了智能天线技术。仿真结果表明, LMS-MIMO 算法性能明显优于 LMS 算法, 并且随着发射和接收天线阵元数目的增加, 其系统性能得到了进一步改善。

**关键词:** 智能天线; 自适应波束形成算法; MIMO

**中图分类号:** TN 821.91    **文献标识码:** A

采用智能天线技术, 可以降低同信道干扰, 增加系统容量。智能天线的关键在于自适应算法的选择。近来, 笔者发现多输入多输出(MIMO)技术能够有效地提高信道的利用率。采用 MIMO 技术的智能天线系统在基站(BS)和移动台(MS)的同时, 也采用自适应多天线阵列, 从而大幅度提高无线通信系统的容量。基于传统的 LMS 算法, 本文提出一种新的 MIMO 智能天线自适应波束形成算法, 即 LMS-MIMO 算法。该算法在发射端和接收端同时采用智能天线技术, 其性能明显优于仅在接收端采用自适应波束形成的传统 LMS 算法。并且, 随着发射和接收天线阵元数目的增加, 其系统性能得到了进一步改善。

### 1 多输入多输出智能天线中的自适应波束形成算法

1.1 LMS 算法<sup>[1-3]</sup> 最常用的下降算法为梯度下降法, 常称最陡下降法。在这类算法里, 更新方向向量作为第  $k$  次迭代的代价函数  $J[W(K)]$  的负梯度, 统一形式为

$$W(K+1) = W(K) - \mu \nabla(K), \quad (1)$$

式中,  $\nabla(K)$  表示代价函数的梯度, 即  $\nabla(K) = \nabla J[W(K)]$ 。

在自适应过程的每次迭代时, 梯度具有如下形式的估值

$$\hat{\nabla}_K = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_K^2}{\partial W_0} \\ \vdots \\ \frac{\partial e_K^2}{\partial W_L} \end{bmatrix} = 2e_K \begin{bmatrix} \frac{\partial e_K}{\partial W_0} \\ \vdots \\ \frac{\partial e_K}{\partial W_L} \end{bmatrix} = -2e_K X_K, \quad (2)$$

采用该简单的梯度估值, 导出一种最陡下降法类型的自适应算法。

将(2)式代入(1)式得

$$W_{K+1} = W_K + 2e_K X_K, \quad (3)$$

收稿日期: 2005-12-26

作者简介: 张瑞(1981-), 女, 河南长垣人, 河南工业大学信息科学与工程学院助教, 硕士。

这就是 LMS 算法. 其中,  $\mu$  为迭代步长, 它控制算法的收敛速度, 其取值必须满足  $0 < \mu < 1/\lambda_{\max}$  才能保证算法收敛,  $\lambda_{\max}$  是  $R_{XX}$  的最大特征值.

**1.2 MIMO 系统及信道分析<sup>[4-5]</sup>** MIMO 系统模型如图 1 所示, 发射和接收天线的阵元数分别是  $M$  和  $N$ . 接收信号可表示为

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{H}\mathbf{W}_T Z(t) + \sum_{i=1}^L \mathbf{H}_i \mathbf{W}_{Ti} Z_i(t) + n(t). \quad (4)$$

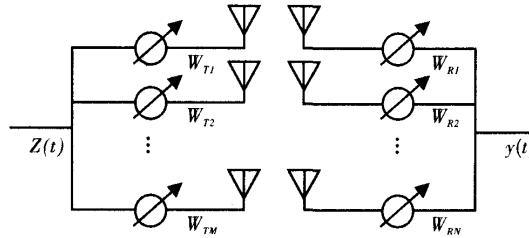


图 1 MIMO 系统模型

接收信号矢量( $\mathbf{x}(t)$ ), 信道矩阵( $\mathbf{H}$ ), 发射阵列权向量( $\mathbf{W}_T$ ) 定义为如下公式.

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T, \quad (5)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1M} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_{N1} & h_{N2} & \cdots & h_{NM} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\mathbf{W}_T = [\mathbf{W}_{T1}, \mathbf{W}_{T2}, \dots, \mathbf{W}_{TM}]^T, \quad (7)$$

这里,  $h_{nm}$  是第  $m$  个发射阵元到第  $n$  个接收阵元之间的信息传递函数;  $Z(t)$  是源信号;  $n(t)$  是加性高斯白噪声;  $L$  是干扰信号的个数;  $\mathbf{H}_i$  是第  $i$  个干扰信号的信道矩阵, 表达式类似公式(6);  $\mathbf{W}_{Ti}$  是第  $i$  个干扰信号发射阵列权向量, 表达式如公式(7); 上标 T 代表转置算子.

### 1.3 LMS-MIMO 算法<sup>[6]</sup>

**1.3.1 接收阵列权向量** 本质上, LMS-MIMO 算法是基于传统的 LMS 算法. 图 1 所示的 MIMO 智能天线简化模型, 其接收信号公式为

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{H}\mathbf{W}_T Z(t) + n(t), \quad (8)$$

对于接收自适应波束形成器, 输出信号

$$y(t) = \mathbf{W}_R^H \mathbf{H}\mathbf{W}_T Z(t), \quad (9)$$

其中, 上标 H 代表共轭转置算子.

在忽略噪声信号的情况下, 第  $k$  个样本的误差信号表示为

$$\mathbf{e}_k = d_k - y(k) = d_k - \mathbf{W}_R^H \mathbf{H}\mathbf{W}_T(k) Z(k). \quad (10)$$

把与  $y(k)$  最接近的样本作为参考信号, 即  $d_k = pr[y(k)]$ , 通过瞬时平方误差对接收阵列权向量微分可以得到梯度向量

$$\frac{d\mathbf{e}_k^2}{d\mathbf{W}_R^*(k)} = -2\mathbf{e}_k \mathbf{x}(k). \quad (11)$$

由最陡下降法的定义式  $\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k + \mu(-\nabla_k)$ , 可得接收阵列权向量的迭代搜索表达式

$$\mathbf{W}_{k+1}(k+1) = \mathbf{W}_k(k) + 2\mu\mathbf{e}_k \mathbf{x}(k). \quad (12)$$

### 1.3.2 发射阵列权向量

通过瞬时平方误差对发射阵列权向量微分,可得到梯度向量

$$\frac{d\mathbf{e}_k^2}{d\mathbf{W}_T(k)} = -2\mathbf{e}_k \frac{d\mathbf{e}_k}{d\mathbf{W}_T(k)}, \quad (13)$$

式中,  $\mathbf{e}_k = d_k - \mathbf{W}_R^H(k) \mathbf{H} \mathbf{W}_T(k) \mathbf{Z}(k)$ . 对瞬时误差信号微分, 得

$$\frac{d\mathbf{e}_k}{d\mathbf{W}_T(k)} = -\mathbf{Z}(k) \mathbf{H}^T \mathbf{W}_R^*(k). \quad (14)$$

因此, 发射权向量为

$$\mathbf{W}_T(k+1) = \mathbf{W}_T(k) + 2\mu \mathbf{e}_k \mathbf{Z}(k) \mathbf{H}^T \mathbf{W}_R^*(k), \quad (15)$$

两边同时乘以发射阵列权向量, 可得

$$\mathbf{x}(t) \mathbf{W}_T^H(k) = \mathbf{H} \mathbf{Z}(k) \mathbf{W}_T(k) \mathbf{W}_T^H(k), \quad (16)$$

即

$$\mathbf{H} \mathbf{Z}(k) = \mathbf{x}(k) \mathbf{W}_T^H(k), \quad (17)$$

两边转置, 得

$$\mathbf{Z}(k) \mathbf{H}^T = \mathbf{W}_T^*(k) \mathbf{x}(t)^T, \quad (18)$$

两边乘以接收阵列权向量, 得

$$\mathbf{Z}(k) \mathbf{H}^T \mathbf{W}_R^*(k) = \mathbf{W}_T^*(k) \mathbf{x}(t)^T \mathbf{W}_R^*(k) = \mathbf{W}_T^*(k) \mathbf{y}(t) = \mathbf{y}(t) \mathbf{W}_T^*(k). \quad (19)$$

将(19)式带入(18)式, 可得发射阵列权向量的迭代搜索表达式

$$\mathbf{W}_T(k+1) = \mathbf{W}_T(k) + 2\mu \mathbf{e}_k \mathbf{y}(t) \mathbf{W}_T^*(k).$$

## 2 仿真

LMS-MIMO 以传统的 LMS 算法为基础, 在这个算法中, 把基站(BS) 和移动台(MS) 分别作为收信者和发信者, 并对含有加性高斯噪声的多径瑞利衰落信道进行了仿真. 移动台(MS) 为发射端, 基站(BS) 为接收端. 调制方式为 BPSK(Binary Phase Shift Keying), 数据样本数为 10 000 bits, 接收天线阵元的个数为 10. 仿真过程表明, 在含有加性高斯噪声的多径瑞利衰落信道中, 接收阵元数目不变、发射阵元数目变化的情况下, 采用 LMS-MIMO 算法优于传统的 LMS 自适应波束形成算法(见图 2), 因为在 LMS 算法中, 自适应波束形成算法只用在接收端. 仿真结果表明, 随着发射天线阵元数目的增加, 其系统性能得到了进一步改善.

图 3 为发射天线阵元数目(阵元数目为 4) 不变, 接收天线阵元数目变化的情况下, 信噪比(SNR) 与误码率(BER) 的性能关系曲线.

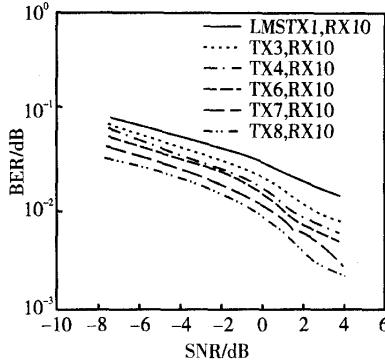


图 2 接收阵元数目不变, 发射阵元数目变化的 BER-BNR 曲线

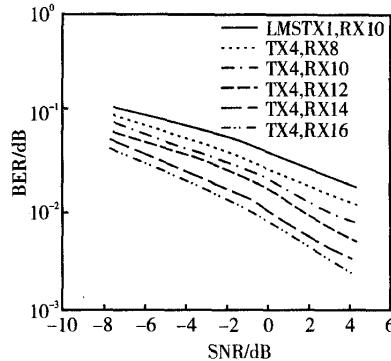


图 3 发射阵元数目不变, 接收阵元数目变化的 BER-BNR 曲线

仿真结果表明,LMS-MIMO 算法比传统的 LMS 算法(仅在接收端采用智能天线)性能更好,并且,随着接收天线阵元数目的增加,其系统性能得到了进一步改善.

### 3 结 论

在智能天线中,波束形成技术处于核心地位.而在实际系统中,智能天线算法的复杂性和实时实现的可能性之间必须进行折中.如果实用的智能天线算法还不能解决时延超过一个码片宽度的多径干扰,也无法克服高速移动多普勒效应造成的信道恶化时,在多径衰落严重的高速移动环境下,必须将智能天线和其他抗干扰的数字信号处理技术结合使用,这样才可能达到最佳的效果.这些数字信号处理技术包括联合监测、干扰对消以及 Rake 接收等.

### 参考文献:

- [1] LIBERTI Joseph C,RAPPAPORT Theodore S. Smart antennas for wireless communications IS-95 and third generation CDMA application [ M ]. New Jersey: Prentice hall ,1999.
- [2] WIDROW B,STEARN S D. 自适应信号处理 [ M ]. 王永德,龙宪惠,译.成都:四川大学出版社,1989.
- [3] 张贤达,保铮. 通信信号处理 [ M ]. 北京:国防工业出版社,2000.
- [4] WONG K K,MURCH R D,LETAIEF K B. Optimizing time and space MIMO antenna system for frequency selective fading channels [ J ]. IEEE Journal on selected areas in communications,2001,19(7):1395 - 1407.
- [5] SHAFI Mansoor,SHIU Da-shan,SMITH P J, et al. From theory to practice:an overview of MIMO space-time coded wireless system [ J ]. IEEE Journal on selected areas in Communications,2003,21(3):281 - 302.
- [6] 陈永红. 多输入多输出智能天线中的自适应波束形成算法研究 [ D ]. 汕头:汕头大学,2000.

## Adaptive Beam-forming Algorithm in TD-SCDMA

ZHANG Rui ,JIN Ting

(School of Information Sciences and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** A novel MIMO algorithm, namely LMS-MIMO algorithm, was presented based on a conventional LMS algorithm in this paper. Compared with conventional LMS algorithm, the LMS-MIMO algorithm not only adopts smart antennas at receiver part but also at transmitter part. Results of simulation analyses reveal that the performance of LMS-MIMO algorithm is much better than the conventional LMS algorithm that only adopts smart antenna at the receiver part. The performance of this system also is been improved with the increasing the number of the array antennas at transmitter and receiver part.

**Key words:** smart antennas; adaptive beam-forming algorithm; MIMO system

## 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>