

## 基于LMS的自适应智能天线研究

杨国强<sup>1</sup>, 聂晓鸿<sup>2</sup>

(1 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003; 2 南京信息工程大学 电子信息与工程学院, 江苏 南京 210044)

**摘要:** 利用智能天线可以有效地减少多径效应所带来的影响, 同时可以对干扰信号起到删除和抑制的作用, 最终达到降低接收端误码率的目的。为达到这一目的提高系统的性能, 文中提出了基于LMS的自适应智能天线, 首先介绍了自适应智能天线的基本原理; 其次, 对最小均方误差算法和自适应滤波器作了详细的分析; 最后, 对文中提出的LMS自适应处理算法进行了仿真。仿真结果表明: 使用基于LMS的自适应智能天线后, 与未使用智能天线相比, 信号在接收端的误码率得到很大的降低, 从而验证了采用此自适应处理方法的智能天线系统的有效性和实用性。

**关键词:** 智能天线; LMS; 自适应

**中图分类号:** TN821 **文献标识码:** A

## Study of adaptive intelligent antenna based on the least mean square

Yang Guoqiang<sup>1</sup>, Nie Xiaohong<sup>2</sup>

(1 College of Communications and information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China; 2 Electronic Information and Project Institute, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** Intelligent antenna can reduce the impact caused by the multipath effectively, it also can eliminate and restrict the interference, and ultimately to reduce the bit error rate at the receiver. To achieve this purpose and improve the system performance, this paper proposes an adaptive intelligent antenna based on the least mean square, and firstly, introduces the basic principles of adaptive intelligent antenna; Secondly, analyses the least mean square algorithm and the adaptive filter; Finally, the proposed adaptive algorithm in this paper is simulated. The simulation results illustrate that: the using of adaptive intelligent antenna has a lower bit error rate than that is not used at the receiver, so we make a conclusion that the adaptive algorithm applied in the intelligent antenna system is effective and practical.

**Keywords:** Intelligent antenna; Least Mean Square; Adaptive

### 0 引言

随着通信业务的迅速发展, 智能天线成为无线通信领域中的一个研究热点, 是解决频率资源匮乏的有效途径, 同时还可以提高系统容量和通信质量。智能阵列天线最初

是应用在军事上雷达和声纳系统中的阵列天线, 用于完成空间滤波和定位。随着现代数字信号处理技术的不断发展, 数字信号处理芯片处理能力的提高和价格的降低, 使智能天线技术可以应用于无线通信系统<sup>[1]</sup>。目前, 国际上已经将智能天线技术作为 3G 以后无线通信技术发展的主要方

向之一,具有良好的应用前景。

## 1 自适应智能天线的基本原理

智能天线主要由天线阵列、模数转换、数字波束形成 DBF 网络和自适应处理器 4 部分组成。智能天线框图见图 1。

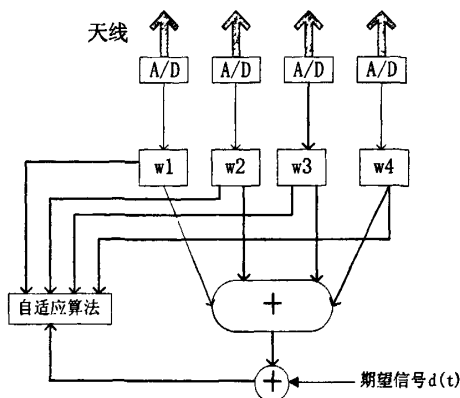


图1 智能天线系统框图

假设天线满足窄带传输条件,入射信号在天线各阵元的响应输出只有相位差,且入射信号为平面波,则这些相位差由载波波长、入射角度、天线位置分布唯一确定。给定一组加权值和一定的入射信号强度,不同入射角度的信号由于在天线间的相位差不同,因此合并后的输出信号强度也会不同<sup>[2]</sup>。

单一天线阵元的方向图波束可以认为是全向的,在复杂的电磁环境下,不能有效地接收有用信号,并屏蔽其他干扰和多径干扰。如果能够针对波达方向形成指向性波束,而对于其他方向形成较低的增益,则将大大提高系统的性能,这种形成指向性波束的过程就称为波束赋形<sup>[3]</sup>。天线各阵元接收的信号通过自适应网络,根据噪声、干扰和多径情况,自适应调整加权值,达到自适应改变天线方向图,跟踪多个目标的目的。

假设  $M$  个阵元均匀分布在一条直线上,阵元为具有各相同性的天线,各阵元间距为  $d$ 。窄带信号  $s(t)$  入射到阵列上的平面的方位角为  $\phi$ ,与水平面的夹角为  $\theta$ ,此  $(\phi, \theta)$  被称为信号的波达方向<sup>[4]</sup>。 $\beta = 2\pi / \lambda$  为相位延迟单元,其中  $\lambda$  表示信号的波长,取幅度为  $A$ 。那么对于入射到阵列上的平面波,在阵元  $m$  上接收到的

信号为:  $u_m(t) = As(t)e^{-j\beta md \cos\phi \sin\theta}$ , 这样直线阵总的输出为:

$$v(t) = \sum_{m=1}^M w_m^* u_m(t) \quad (1)$$

自适应阵列中就是通过调整权矢量  $\{w_m\}$ , 使输出信号质量最优。

## 2 LMS自适应波束形成的原理

### 2.1 LMS算法

为了成功使用下面给出的自适应滤波器算法并保证算法的收敛和稳定性,有必要对输入信号的本质从概率的角度上做一些基本假设,输入信号可以看作是随机变量的一个向量<sup>[5]</sup>。首先,输入信号应该具有普遍性,用单一输入信号计算的统计属性,如均值:  $\eta = E\{x\} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n]$  或方差:  $\delta^2 = E\{x^2\} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x[n] - \eta)^2$ , 应该显示一组这样的随机变量平均值的统计属性相同的统计属性<sup>[6]</sup>;

其次,信号应该是广义稳态的,即在一组平均值或方差的统计测量不是时间的函数,并且自相关函数:

$$r[\tau] = E\{x[t_1]x[t_2]\} = E\{x[t+\tau]x[t]\} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n]x[n+\tau] \quad (2)$$

只依赖于  $\tau = t_1 - t_2$ 。

此时,  $r[0] = E\{x[t]x[t]\} = E\{x(t)^2\}$  用于计算广义稳态过程的平均功率。系统方框图见图2。

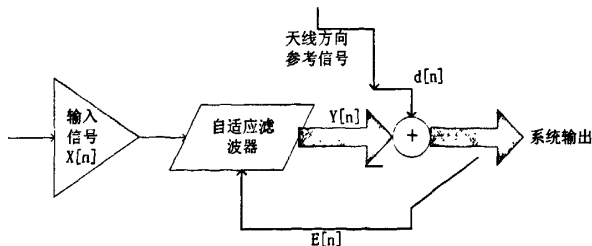


图2 LMS算法一种系统框图

### 2.2 成本函数的定义

适用于评估器输出的成本函数的定义是所有自适应滤波器算法中关键参数。我们需要以某种方式“加权”估算

误差:

$$e[n] = d[n] - y[n] \quad (3)$$

其中  $d[n]$  是要估算的随机变量,  $y[n]$  是通过自适应滤波器计算的估计值<sup>[9]</sup>。最常用的成本函数是下面的最小二乘法函数:

$$J = E\{e[n]^2\} = \overline{(d[n] - y[n])^2} \quad (4)$$

这并不是可以使用的惟一的成本函数。使用它是因为这样可以降低自适应算法的计算负担。

自适应滤波器的输出是通过卷积和  $y[n] = \sum_{k=0}^{L-1} f_k x[n-k]$  计算的。其中滤波器的系数  $f_k$  要以定义的成本函数  $J$  为最小值的方式调整。通常根据:

$$y[n] = x^T[n]f = f^T x[n] \quad (5)$$

用向量记法改写卷积更为方便。其中

$f = [f_0 f_1 \dots f_{L-1}]^T$ ,  $x[n] = [x_0 x_1 \dots x_{L-1}]^T$  是  $(L \times 1)$  阶向量,  $T$  表示矩阵的转置或复杂数据的厄密共轭转置。可以得到:

$$e[n] = d[n] - y[n] = d[n] - f^T x[n] \quad (6)$$

所以, 均方误差函数变成:

$$\begin{aligned} J &= E\{e^2[n]\} = E\{d[n] - y[n]\}^2 = E\{d[n] - f^T x[n]\}^2 \\ &= E\{(d[n] - f^T x[n])(d[n] - x^T[n]f)\} = \\ &= E\{d[n] - 2d[n]f^T x[n] + f^T x[n]x^T[n]f\} \end{aligned} \quad (7)$$

将上式对  $f$  求微分, 成本函数就是最小值, 令这一梯度等于 0, 也就是:

$$\nabla = \frac{\partial J}{\partial f^T} = E\{-2d[n]x[n] + 2x^T[n]x[n]f_{opt}\} = 0 \quad (8)$$

可以得到:

$$f_{opt} = E\{x[n]x^T[n]\}^{-1} E\{d[n]x[n]\} = R_{xx}^{-1} R_{dx} \quad (9)$$

如此计算得到最优滤波器系数向量  $f_{opt}$ 。

我们要避免计算 Wiener 估计公式<sup>[9]</sup>, 理由如下: 首先, 自相关矩阵  $R_{xx}$  的生成需要密集的计算量; 其次, 需要计算自相关的逆矩阵  $R_{xx}^{-1}$ , 如果滤波器的阶数增加很多的话, 这是很耗时间和运算资源的。

LMS 算法也是最速下降法的一种实现, 下一个滤波器系数向量  $f[n+1]$  等于前面一个滤波器系数向量  $f[n]$  加上改变比例的负梯度:  $f[n+1] = f[n] - \frac{\mu}{2} \nabla[n]$ , 参数

$\mu$  是学习因子, 是控制稳定性以及算法收敛速率的步长。代

入  $\nabla[n] = -2e[n]x[n]$ , 可以得到:

$$f[n+1] = f[n] + \mu e[n]x[n]。$$

### 3 自适应智能天线系统的仿真

$M$  路基带信号和加权矢量相乘后得到新的数字波束合成信号, 然后与天线方向参考信号进行减法运算得到误差, 再由误差信号和步长因子来得到新的加权矢量, 如此循环, 最后得到最优加权矢量, 从而得到最佳信号<sup>[10]</sup>。阵列数为 4, 信号的波达方向为  $(\pi/6, \pi/3)$ 。仿真结果显示统计数据的误码率, 为了进行对比, 同时也显示不利用智能天线系统而是直接接收时的误码率<sup>[9]</sup>。仿真流程图见图 3。

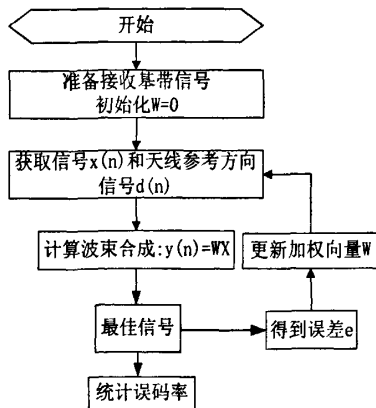


图3 智能天线系统算法仿真流程图

仿真结果统计的误码率如图 4。

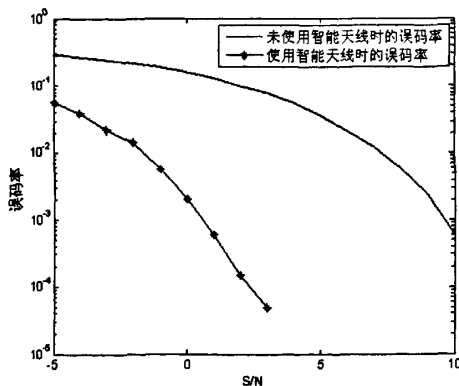


图4 利用智能天线时和未利用智能天线时的误码率图

从图4中我们可以看出,星号线代表的利用了智能天线时的误码率低于未利用智能天线时的误码率,智能天线技术能够大大降低接收端的误码率,得到更优的通信信号数据。

## 4 结束语

采用智能天线可以带来很多优点,比如智能天线对信号多径具有抑制作用,增加覆盖范围以改善信号的接收质量,还可以改善链路质量,增加可靠性,以及增加频谱效率<sup>[10]</sup>。另外,智能天线可支持高的数据速率,有利于消除“远近效应”,降低了同信道干扰、邻近信道干扰和多址干扰。本文中,智能天线系统核心是LMS自适应算法,虽然收敛速度比不上RLS算法,但LMS的结构简单易于编程,易于工程上的硬件实现。

## 参考文献

- [1] DAVID TSE, PRAMOD VISWANATH. 无线通信基础[M]. 周进译. 北京:人民邮电出版社,2007.
- [2] 吴伟陵,牛凯. 移动通信原理[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- [3] 杨小牛,楼才义,徐建良. 软件无线电原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2001.
- [4] 王旭,何佩琨,毛二可. 实现频率步进相控阵雷

达宽带宽角扫描的一种方法[J]. 雷达科学与技术,2007,5(3): 167-170.

- [5] 刘鸣,袁超伟. 智能天线技术与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [6] 张光义,赵玉洁. 相控阵雷达技术[M]. 北京:电子工业出版社,2007.
- [7] JOSEPH G.PROAKIS 著. 无线通信[M]. 张力军译. 北京:人民邮电出版社,2003.
- [8] 王涛,雷宏. 相控阵雷达数字波束形成的实现[J]. DSP技术应用,2005,21(11): 93-95.
- [9] JOSEPH C.LIBERTI,TEHODORE S.RAPPAPORT. 无线通信中的智能天线:IS-95 和第3代CDMA应用[M]. 马凉译. 北京:机械工业出版社,2002.
- [10] Simon Haykin. 自适应滤波器原理[M]. 郑宝玉译. 北京:电子工业出版社,2006.

## 作者简介:

杨国强,南京邮电大学通信与信息工程学院硕士研究生,研究方向为现代通信中的智能信号处理技术。

E-mail: lucky\_dcr@163.com

聂晓鸿,南京邮电大学通信与信息工程学院硕士研究生,研究方向为自适应阵列信号处理。

E-mail: nxh85@yahoo.cn

## 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](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>