

基于扩频通信智能天线自适应算法的实现

桑士伟，杨智友

(中国电子科技集团公司第 54 研究所)

摘要 自适应算法是智能天线系统中的关键技术，LMS 算法具有技术成熟方法简单的特点，它是基于最小均方误差准则 (MMSE)，通过迭代的方式寻找最小均方误差，从而得到最佳权值。LMS 算法的关键是如何获得参考信号，它直接影响到算法的准确性和可靠性。在扩频通讯体制中，伪随机序列 PN 码是已知的，利用这一已知条件，对接收的信号进行解扩、滤掉噪声和干扰后，再次进行重扩；重扩后信号和接收到的有用信号具有很大的相关性，可将它作为参考信号。

关键词 LMS 算法；MMSE 准则；梯度；参考信号；PN 码

0 引言

智能天线从自适应天线发展演变而来，最初用于军事领域。由于其抗干扰性，在多目标跟踪抗饱和攻击雷达系统中、电子对抗系统中、抗干扰的空分多址 (SDMA) 和点对多点的通信系统中都具有显著的优势。近年来，随着现在数字信号处理技术的迅速发展，DSP 芯片处理能力的不断提高和芯片价格的不断下降，使得利用数字技术在基带形成天线波束成为可行，促使智能天线技术开始在无线通信中广泛应用。智能天线不仅可以抑制干扰，还可以提高通信系统的容量增加天线系统的灵活性，未来几乎所有的先进移动通信系统都将采用该技术。

智能天线可分为固定多波束天线和自适应天线，由于自适应天线比固定多波束天线性能优越得多，所以智能天线技术主要基于自适应天线阵列原理，天线接收到信号后，通过处理器和权值调整算法组成的反馈控制系统，计算权值，调整天线阵列单元的辐射方向图、频率响应及其它参数，利用天线阵列的波束合成和指向，产生多个独立的波束，自适应地调整其方向图，跟踪信号变化，对干扰方向调零，减弱甚至抵消干扰，增加系统的信干比，提高系统的性能。

智能天线的空域滤波特性依赖于波束形成自适应算法，自适应算法对智能天线的性能起着决定影响，算法的收敛性、快速性和稳定性至关重要。自适应算法通常是根据一定的性能准则获得方向图形成网络的最佳权矢量。主要的性能准则包括最小均方误差 MMSE、最小二乘 LS、最大信干比 MSINR 等；此外根据有无训练序列又可分为非盲算法和盲算法。以上的算法都有一定的优劣，只适用一定的环境；在系统中究竟采用哪种算法，要根据系统的特点和要求，合理取舍，将算法的优点和系统的特点有机地结合起来，系统性能才能达到最佳。

本文在扩频通信体制下，充分利用扩频通信的已知条件——PN 码，通过处理，作为参考信号，从易于实现的角度，采用基于最小均方误差 MMSE 准则的 LMS 的算法。

1 系统组成

我们可以把它看成是由三个部分构成：天线阵列、数字信号处理单元、自适应算法单元。数字信号处理单元(DSP)与自适应算法单元通过一定的算法和处理，自适应调节加权 $w_1, w_2 \dots w_n$ 的值使天线阵列的主瓣指向期望信号，零陷对准干扰和噪声，这三个部分结合在一起就构成了智能天线系统。这里主要阐述自适应算法和与之相关的参考信号的提取。

2 LMS 算法

LMS 算法是基于最小均方误差准则 (MMSE)，由梯度最速下降法发展而来，MMSE 的权值选择是使波束形成器的输出与参考信号之间的均方误差 (MSE) 达到最小。MSE 的定义为：

$$\begin{aligned} E\{|e|^2\} &= E\{ee^H\} = E\{(d - w^H x)(d - w^H x)^H\} = \\ &= E\{d^2 - 2dx^H w + w^H x x^H w\} \end{aligned} \quad (1)$$

求 $E\{|e|^2\}$ 相对于 w 的梯度并令其等于零,

$$\nabla_w = E\left\{\frac{\partial}{\partial w} |e|^2\right\} = E\left\{2dx^H w + 2x x^H w\right\} = 0 \quad (2)$$

$$w_{opt} = R_{xx}^{-1} r_{xd} \quad (3)$$

也可以通过搜索迭代的方式求解二次函数的最小值, 最简单的方法是最速下降法, 它是按照一个与误差负梯度成一定比例的量来改变估计值。

$$w_{n+1} = w_n - \mu \nabla_w \cdot E\left\{|e|^2\right\} \quad (4)$$

$$\nabla_w \cdot E\left\{|e|^2\right\} = 2E\{e \cdot \nabla_w \cdot e\} = -2E\{e \cdot x\} \quad (5)$$

最速下降法在迭代过程的每一步需要得到梯度的准确值, 这是很难做到的, 因为这需要知道输入信号的先验统计特征值。在实际应用中, 梯度矢量需要在迭代的每一步进行估计。LMS 算法是以误差信号每一次迭代的瞬时平方值代替其均方值, 以此来估计梯度, 即

$$\hat{\nabla} = -2(e \cdot x) \quad (6)$$

$$w_{n+1} = w_n + \mu e \cdot x \quad (7)$$

3 参考信号的提取

在 LMS 算法天线阵列中, 每一个阵元输入信号乘以一个权值, 然后把它们相加作为阵列输出 $s(t)$ 。权值由一个使误差信号 $e(t)$ 的均方值最小化的反馈系统来控制, 见图 1 所示。

$$e(t) = r(t) - s(t) \quad (8)$$

天线的性能直接和参考信号有关。假设接收的信号 $s(t)$ 包括有用信号 $sd(t)$ 、干扰信号 $si(t)$ 和噪声 $sn(t)$, 如果参考信号就是有用信号 $sd(t)$, 那么误差信号 $e(t)$ 就是干扰信号 $si(t)$ 和噪声 $sn(t)$, 我们可以通过调整权值, 使误差信号 $e(t)$ 最小, 从而减小干扰和噪声。事实上无法事先知道有用信号 $sd(t)$, 在实际应用中参考信号和有用信号 $sd(t)$ 完全一样也没有必要。只要参考信号 $r(t)$ 和 $sd(t)$ 高度相关, 与干扰信号 $si(t)$ 、噪声 $sn(t)$ 不相关, 就可以获得最佳权值, 实现自适应功能。一些特定的通信体制中, 可以利用它自身的特点获得这样的参考信号 $r(t)$ 。

下面介绍在扩频通信中, 如何利用 PN 码产生参考信号, 如图 2 所示。

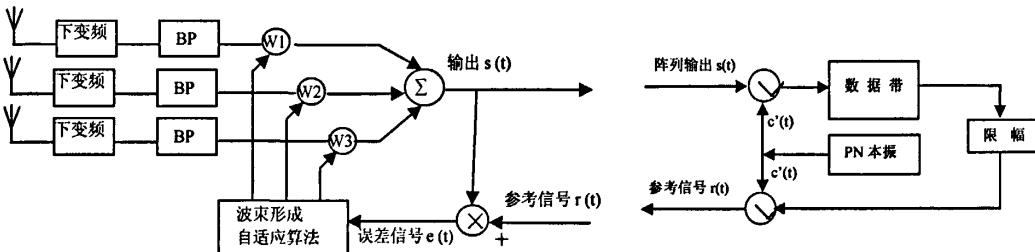


图 1 智能天线系统原理

图 2 参考信号产生图

假设发射信号采用的是 BPSK 调制,

$$sd(t) = a(t)c(t)\cos(\omega_d t) \quad (9)$$

式中, $a(t)$ 为信息源, $c(t)$ 为伪随机序列, $\cos(\omega_d t)$ 为载波, $c(t)$ 的码速率远远大于 $a(t)$ 。阵列输出 $s(t)$ 和本地 PN 码 $c'(t)$ 模 2 加后, 有用信号变为:

$$sd(t) = a(t)c(t)c'(t)\cos(\omega_0 t) \quad (10)$$

当本地的 PN 码 $c'(t)$ 与发射的 PN 码 $c(t)$ 同步时, $c(t)=c'(t)$, 则 $c(t)c'(t)=1$ 。有用信号变为:

$$sd(t) = a(t)\cos(\omega_0 t) \quad (11)$$

对干扰信号和噪声信号来说, 由于与伪随机序列不相关, 在相关解扩器的作用下, 相当于进行了一次扩频, 干扰信号和噪声信号频谱被扩展后, 功率谱密度降低, 这就大大降低了有用信号频带内的干扰功率, 提高了信干噪比。后面接滤波器的频带正好让有用信号 $sd(t)$ 同过, 滤掉带外的干扰和噪声。随后在与本地的 PN 码模 2 加, 就产生了参考信号 $r(t)$:

$$r(t) = a(t)c(t)\cos(\omega_0 t) \quad (12)$$

上式中的参考信号不等于有用信号 $sd(t)$, 实际上它还包括噪声和干扰, 我们这里将其忽略掉, 由于参考信号的产生是通过一个反馈环, 每经过一次循环干扰和噪声就被降低一次, 经过多次循环后, 干扰和噪声, 尤其是干扰会大大降低, 所以将其忽略掉。图中的限幅器是为了防止参考信号的幅值不断增加下去。

4 系统仿真

有用信号为 $[\cos(2\pi f_* t) \quad \cos(2\pi f_* t - \pi/6) \quad \cos(2\pi f_* t - \pi/3)]$, 干扰信号为 $[\sin(2\pi f_* t - \pi/8) \quad \sin(2\pi f_* t - \pi/4) \quad \sin(2\pi f_* t - \pi/2)]$, 噪声为高斯白噪声, 天线阵列阵元数为三。取阵列第一路信号 $\cos(2\pi f_* t)$ 为参考信号, 仿真结果如图 3 所示。

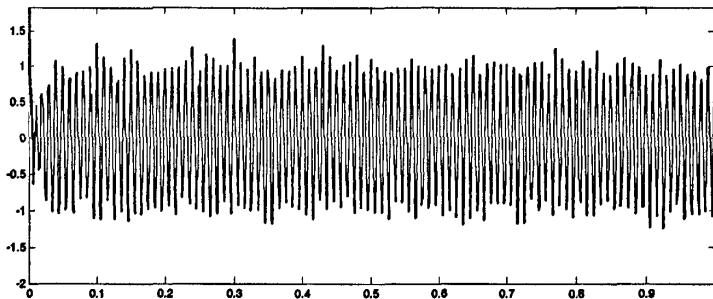


图 3 仿真结果

5 结束语

扩频通信体制下的智能天线系统, 采用 LMS 自适应算法, 并根据 PN 码提取参考信号, 此方案合理可行。由仿真结果可以看出它对干扰的抑制作用非常强。

参考文献

- [1] Lu Jun, Zhang Xiaowen, Li Chengshu. A Method of Reference-Signal Generation for Smart Antenna Arrays in CDMA Systems. in ICPMSC' 98, June 22~24, Shanghai, China.
- [2] 付卫东. 智能天线设计概述. 通信导航与指挥自动化, 2005 年(4).
- [3] 梁宏军, 郑好望. 智能天线中基于解扩重扩算法的 LMS-DRMTA 算法. 火控雷达技术, 2005(12).
- [4] R. T. Compton, Jr. Adaptive Antennas, Prentice Hall, Inc. 1988.
- [5] 邱天爽. 通信中的自适应信号处理. 电子工业出版社, 2005.
- [6] Lal Chand Godara, Smart Antenna, CRC Press LLC, 2004.

作者简介

桑士伟 男, 工程师, 电路与系统专业, 主要研究方向为智能天线。

杨智友 男, 研究员, 微波技术专业, 主要研究方向为电磁场理论和智能天线。

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>