

自适应天线阵及其软件实现的探讨

刘勤让 罗小武

郑州市 1001 信箱 206 分箱 450002

[摘要] 本文详细阐述了自适应天线阵的概念、原理、特征、发展过程及其技术前景，并提出了一种基于软件实现的结构以及接收天线的流程图。

关键词：自适应天线阵、自适应信号处理、自适应算法

1 自适应天线阵的由来与一般介绍

1.1 自适应天线阵的提出及其概念

天线作为发射电磁波和接收电磁波一种接口与能量转换器件，在通信、雷达、广播电视、地震探测中起着非常重要的作用。随着通信质量要求的提高以及信号环境的恶化，对天线提出了愈来愈高的要求，而传统的天线由于其本身存在抗损性差、方向图固定、对衰落防护能力差、不能实时优化其性能等缺陷，迫使人们去研究一种性能更好、更能满足技术需要的新型天线。正是在这种动因的驱使下，1959 年 Van Atta 提出了自适应天线阵的概念。该天线阵能自动适应环境变化，从信号、噪声、干扰的环境中区分出信号与干扰、噪声，并在信号的来波方向产生一个具有较高增益的窄波束，在干扰和噪声的方向产生一个凹陷很深的零点。所以，该天线阵可以自适应地优化其方向图，增强系统有用信号检测能力，并有效跟踪有用信号，同时最大限度地抑制和消除干扰与噪声，从而获得最大的信噪比，使得天线阵具有某种准则下的最佳性能。因此，自适应天线阵的实质是一种能够自动调整方向图的空间滤波器。

1.2 自适应天线阵的原理及基本结构

自适应天线阵的基本原理是对传统天线阵的每一个阵元赋以可调整的权，并且每一阵元的权系数（包括幅度和相位）能够依据自适应算法自适应地做出调整，使得天线阵输出满足某一种准则（最大信噪比准则、最小均方误差准则等）。

按照其基本原理自适应天线阵的结构应由一个个单元天线按一定规律组成的多元天线阵、加权求和网络和对信号进行自适应信号处理的自适应信号处理器组成。如图（1）所示：

1.3 两种典型的自适应阵

在自适应阵中采用的两种典型准则是最小均方误差准则和最大信噪比准则，其对应的两种自适应阵分别为 LMS 阵和阿普尔鲍姆阵。

1.3.1 LMS 自适应天线阵

LMS 自适应天线阵的基本特点是使阵列的实际输出与阵列理想输出之差的均方值最小，因此，该天线阵需要一个与理想输出相关的参考信号。

假设 d_k 是参考信号， y_k 阵列输出信号， ε_k 是误差信号，则有：

$\varepsilon_k = d_k - y_k$ ，调整权使得 $E[\varepsilon_k^2]$ 达到最小。

令权向量 $W = [w_1 w_2 \cdots w_M]^T$ ，输入信号向量 $X_k = [x_1 x_2 \cdots x_M]^T$ ，则阵列输出为：

$$y_k = x_k^T W = W^T X_k$$

其相应的控制收敛方程为：

$$\frac{dw}{dt} = -k \nabla_w E[\varepsilon_k^2] \quad k \text{ 为常数且 } k > 0 \quad (1)$$

由 (1) 式可推得：

$$\frac{dw}{dt} + k R W = k P \quad (2)$$

收敛的最佳权是： $W_{opt} = R^{-1} P$

式中： $R = E[X_k X_k^H]$, $P = E[d_k d_k^H]$, E 表示求统计平均， H 表示共轭转置， $*$ 表示复共轭。

1.3.2 阿普尔鲍姆阵

阿普尔鲍姆阵的特点是使阵列输出端的信号干扰噪声比 (SINR) 最大，适合于预先知道信号到达角度，而信号波形未知的场合（如雷达）。它用“波束调向信号”代替 LMS 算法中的参考信号。

假设信号为 $X_S(t)$, 干扰为 $X_i(t)$, 噪声为 $n(t)$,

$$\text{则：信噪比为 } SINR = \frac{P_S}{P_i + P_n} \quad (3)$$

调整权的大小使得 SINR 最大，式中 $P_S = \frac{1}{2} E[|X_S(t)|^2]$ 为信号功率，
 $P_i = \frac{1}{2} E[|X_i(t)|^2]$ 为干扰功率， $P_n = \frac{1}{2} E[|N(t)|^2]$ 为噪声功率。并假设窄带信号：

$$X_S(t) = A(t) U_S$$

式中 $A(t)$ 表示需要信号的幅度与时间依赖关系的比例因子， U_S 表示需要信号的方向矢量，其中包括阵元相移和阵元方向图。

$$U_S = \begin{bmatrix} f_1(\theta_s) \\ f_2(\theta_s) \exp(-j\phi_{s2}) \\ \vdots \\ f_M(\theta_s) \exp(-j\phi_{sM}) \end{bmatrix}$$

$f_i(\theta_s)$ 表示第 i 个阵元的方向图， ϕ_{si} 表示阵元 1 和阵元 i 的相移。

由 (3) 可推得其控制收敛方程为：

$$\frac{dW}{dt} + kRW = k\mu U_s^* \quad (4)$$

收敛的最佳权为：

$$W_{opt} = \mu R^{-1} U_s^*$$

1.3.3 两种自适应阵的比较及其特征

从上述推导可以看出，若 $\mu U_s^* = P$ 则两阵的性能完全一致。且二者所具有的共同特征为：

LMS 阵和阿普尔鲍姆阵在各自最佳准则下，根据外部信号环境的变化自动调整天线阵中个阵元的加权，使得干扰功率输出最小，即在干扰方向形成很深的零陷，使需要信号输出最大。

自适应天线抑制干扰的程度与干扰功率成正比，因此，方向图中零点深度取决于干扰功率。

对 M 个阵元的自适应天线，有 M-1 个自由度，因此，可以同时抑制的干扰数和跟踪的信号数之和是 M-1。

2 自适应天线阵软件实现的探讨

随着软件无线电的提出及其发展，软件无线电已被认为是二十一世纪的关键技术，甚至被称为是“无线电世界的个人计算机”。而软件无线电是一种基于软件实现的技术，其核心思想是在通用的硬件平台上，最大可能地定义无线功能的统一平台，并可以实现技术上的不断升级。所以，它只需改变内部软件的设置，即可实现不同频段、不同模式的通信终端。而自适应天线阵作为通信中接收和发射电磁波的空间信号处理器件，客观上要求它必须与软件无线电的发展进行技术上的兼容。

因此，本文提出了一种基于软件实现自适应天线阵的思想，使得天线通过软件设置的改变即可实现不同自适应算法的改变、不同判决准则的切换等，以适应不同信号形式、不同频段通信环境的需要。从而实现与软件无线电的技术兼容。

2.1 自适应天线阵的实现框图

对于一种典型的自适应天线阵，其实现框图可以按各功能部分表示为图（2）所示的形式。

2.2 软件实现的整体结构框图

该软件系统在实现中将天线阵的功能单元分为模块结构，各模块间通过标准的接口进行消息的传递，而不必知道其内部是如何实现的，所以，每个模块都可以独立地进行开发，而不影响其它模块的功能，从而实现自适应天线阵的开放式结构，保证该天线阵在技术上的不断升级。

所以，其软件实现的整体结构框图可以表示为图（3）的形式。

2.3 接收天线阵的流程图

按照这种设计思想文本给出了接收天线阵的流程图，如图（4）所示

2.4 软件实现中的几点说明

依据现实经验以及理论结果，将不同信号形式、通信环境对应的最佳算法组成算法库，并且该算法库可以动态刷新，在算法库将不同信号形式对应的高分辨率估计方法及自适应波束形成、自适应调零算法建立一种表对应关系。并在系统中预设一种信号参数估计算法，由该算法估计信号参数的初步结果，由该结果查表寻找最佳的波束形成、调零算法及信号估计算法。若在算法库中没有对应的算法，则按照某种原则依次试用各算法，并根据天线输出的性能指标测试结果找出最佳算法，同时刷新算法数据库，使得该天线阵具有学习功能。

信号参数高分辨率估计模块接收从 A/D 变换器送来的输入，并启动内部的运算单元，获得信号参数的高分辨率估计，其中包括：信号个数、信号到达角（DOA）、信号到达时间（TOA）、极化形式、功率、带宽等参数。实现方法可分为两大类：空间谱估计方法和基于参数估计准则的方法。两种算法的典型代表分别为：MUSIC 算法和最大似然法。同时还有近几年发展起来的基于高阶累积量的估计以及基于盲均衡算法（CMA）的估计。

自适应波束形成及调零单元利用高分辨率信号参数估计求得的信号参数，通过自适应算法的调整，使天线在信号的到达方向产生高增益的窄波束，在干扰到达的方向产生凹陷很深的零点。其中的算法包括 LMS 算法、RLS 算法、DMI 算法以及近来发展迅速的数字波束形成法（DBF Digital Beam Forming）等。

若天线未工作在算法库表中对应的最佳算法，则性能指标检测模块动态检测天线阵的性能指标，若性能指标在预设的时间段内都不能达到满意结果，则该模块发出转换算法的消息，重新选择算法，直到天线阵工作在最佳状态。

对于系统程序可以用 C 语言编写，以增强可读性和减少编写的难度。对于各种算法的实现，则可以利用各种 DSP 芯片的汇编语言进行编写，这样可以利用 DSP 芯片在运算上的优势，以更好地满足实时性的要求。

3 自适应天线阵的发展及前景

自适应天线虽说在 1959 年提出，但以 LMS 阵和阿普尔鲍姆阵为代表的论文直到六十年代末、七十年代初才得以发表，总体来说，自适应天线经历了三个阶段的发展。

第一个十年主要集中在自适应波束控制上，其中包括返向波束天线、自适应相控天线、自知应波束操纵天线。

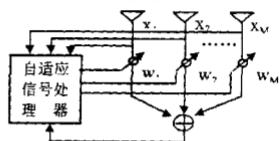
第二个十年主要集中在自适应零点控制上，其中包括自适应滤波、自适应调零、自适应旁瓣对消、自适应杂波抑制。

第三个十年主要集中在空间谱估计上，其中包括最大似然谱估计、最大熵谱估计、特征空间正交谱估计。目前已经进入实用研究阶段。

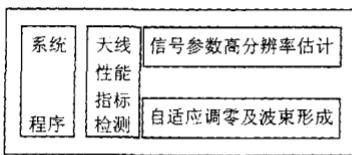
随着移动通信特别是个通信的发展，频谱资源不足的问题已十分突出，蜂窝移动通信系统以蜂窝小区的方式实现频率的空间复用，很大程度上提高了频谱的利用率，缓解了频谱资源相对紧张的问题。而自适应天线的理想应用前景是空分多址(SDMA Spatial Division Multiple Access)，并且可以和当前正在应用的频分多址(FDMA Frequency Division Multiple Access)、时分多址(TDMA Time Division Multiple Access)和码分多址(CDMA Code Division Multiple Access)完全兼容，实现组合的多址方式，从而实现信道的倍增。同时再加上其本身具有抑制干扰源增强期望信号的能力，这样可以减少通信设备间的电磁干扰，更加有利于通信的组网，所以，自适应天线作为一种更有效利用频率资源以及更加有利于通信组网中电磁兼容的技术，必将有着广阔的应用前景。

4 结束语

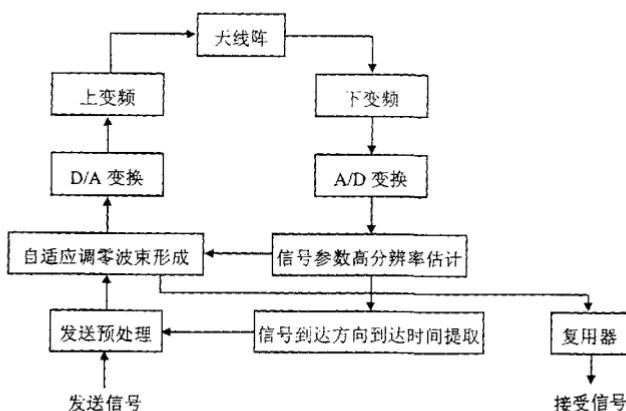
自适应天线阵使得天线由传统的传感器件转化为现代的空域信号处理器件，使得天线与信号处理、自动控制、计算机、信息论以及微电子技术相结合，走出了一条新的发展道路，成为天线发展的新方向。



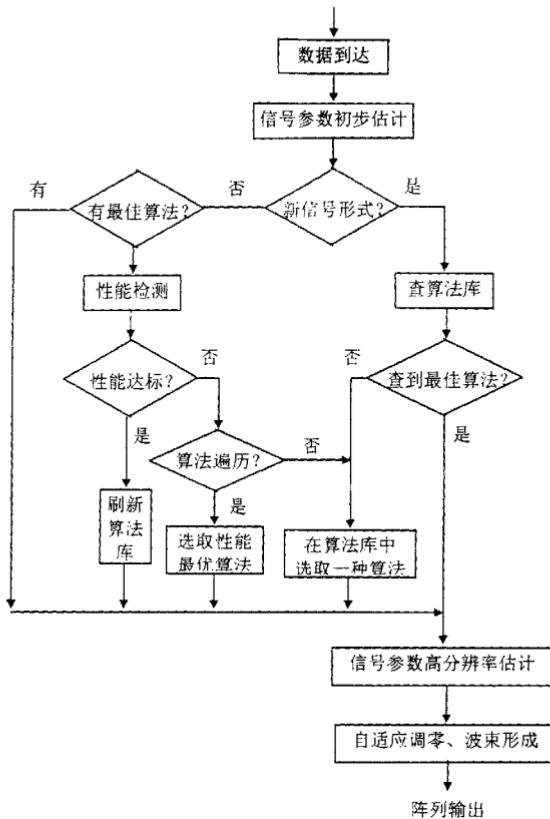
图(1) 自适应天线阵结构图



图(3) 软件实现的整体结构图



图(2) 自适应天线阵的功能框图



图(4) 接收天线阵流程图

参考文献

- [1] 自适应信号处理 四川大学出版社 B.维德罗等著
- [2] 自适应天线原理 国防工业出版社 石镇 著
- [3] 近代天线设计 人民邮电出版社 林昌禄 等著
- [4] Don J.Hinshilwood *The Simulation of Adaptive Antennas*
1996 IEEE Military Communications Conference Vo1.3

[5] 葛利嘉 智能天线在军用软件无线电中的应用 军事通信技术 1997.6 PP1~14

Abstract: In this paper , the conception , principal , characteristic, devolepings procedure and technique prospects of adaptive antenna array are described in detail. Meanwhile a structure based on software accomplishing and a flowchart of receive antenna array are provided.

Keyword: adaptive antenna array adaptive signal processing adaptive algorithm

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>