

# 智能天线自适应波束形成技术现状及发展

## Current Research and Development of Adaptive Beamforming for Smart Antennas

中图分类号:

TN828.6

文献标识码:

A

文章编号:

1009-6868 (2003) 03-0042-04

王衍文/WANG Yan-wen

(深圳市中兴通讯股份有限公司 西安研究所, 西安 710065)  
(Xi'an Institute of ZTE Corporation, Xi'an 710065, China)

### 摘要:

文章介绍了智能天线自适应波束形成技术的基本概念及典型自适应波束形成方法, 归纳了自适应波束智能天线的主要结构形式。在此基础上, 分析了自适应波束智能天线实现中面临的几个问题, 探讨了自适应波束形成技术未来的发展趋势。

### 关键词:

智能天线; 自适应波束形成; 算法; 空时处理

### Abstract:

The basic concept of adaptive beamforming technology for the smart antenna is introduced along with the typical methodology of adaptive beamforming. The main architectures of adaptive beamforming smart antennas are presented. Then problems in realizing the adaptive beamforming smart antennas are analyzed and the development trend of the adaptive beamforming technology in the future is discussed.

### Key words:

Smart antenna; Adaptive beamforming; Algorithm; Space-time processing

全球通信业务的迅速发展, 使得作为未来个人通信主要手段的无线通信技术受到极大关注。如何有效地消除同道干扰、多址干扰、码间串扰和多径衰落的影响成为无线通信系统尤其是码分多址无线通信系统中制约系统容量的主要问题。传统的采用均衡的处理方法在信号传输时延较大时难以解决这些问题, 而采用时空联合处理的智能天线技术, 通过信号时间域和空间域的联合处理可以较好地解决这些问题。

智能天线利用数字信号处理技术, 产生空间走向波束, 使天线主波束对准用户信号到达方向, 旁瓣或零陷点对准干扰信号到达方向, 以达到充分高效地利用移动用户的有用信号并抑制或删除干扰信号的目的。应用智能天线的无线通信系统能够降低多址干扰, 提高系统的信噪比。

## 1 波束形成技术

波束形成的目标是根据系统性能指标, 形成对基带信号的最佳组合或者分配。具体地说, 其主要任务是补偿无线传播过程中由空间损耗、多径效应等因素引入的信号衰落与失真, 同时降低同道用户间的干扰。波束形成的基本过程是: 在建立系统模型的基础上, 描述系统中各处的信号, 再根据系统性能要求, 将信号的组合或分配表述为一个数学问题, 寻求其最优解。

### 1.1 传统的波束形成技术

传统的波束形成器所有的加权有相等的幅度, 选择相位使阵列波束指向期望方向 $\theta_0$ 。用 $\mathbf{a}_0$ 表示期望方向的方向向量, 则阵元数是 $M$ 的阵列加权向量 $\mathbf{w}$ 为:

$$\mathbf{w} = \frac{1}{M} \mathbf{a}_0 \quad (1)$$

具有此加权的阵列在期望方向上有单位响应, 即处理器的输出功率等于信源功率。这种波束形成器在只存在不相关噪声和无干扰情况下, 其输出有最大信噪比(SNR)。对于不相关噪声(即 $R_n = \sigma_n^2 \mathbf{I}$ ,  $\sigma_n^2$ 为噪声功率,  $\mathbf{I}$ 为单位阵列), 波束形成器的输出噪声功率为:

$$P_n = \mathbf{w}^H \mathbf{R}_n \mathbf{w} = \frac{\sigma_n^2}{M} \quad (2)$$

式(2)表明, 阵列的输出噪声功率为每一阵元上功率的 $1/M$ , 上角标 $H$ 表示共扼转置。这样, 具有单位增益的波束形成器在信号方向上衰减了不相关噪声, 使输出信噪比等于 $p_s M / \sigma_n^2$ ,  $p_s$ 为期望信号的功率。

### 1.2 自适应波束形成技术

自适应波束形成算法是根据一定的最优准则导出的,

常用的准则有:最小均方误差准则、最小二乘准则、最大信噪比准则和线性约束最小方差准则等。

自适应波束形成算法数目众多,分类方法各不相同。如:根据应用场合的不同,可以分为上行链路波束形成算法和下行链路波束形成算法;根据是否需要波达方向(DOA)估计,可以分为需要DOA估计的算法、不需要DOA估计的算法;根据是否需借助参考信息可以分为盲算法、非盲算法;根据信号域类可以分为时域或空域算法、空时联合处理算法;根据信号时限可以分为基于码片级的算法、基于比特级的算法等。

本文根据自适应最优准则,针对移动通信环境及信号特点,将目前常见的自适应波束形成算法进行归纳分析。

#### (1) 样本矩阵求逆算法

样本矩阵求逆算法(SMI)中将相关矩阵 $R$ 用它的估计值替代来计算权向量。对于阵列信号的 $N$ 个取样点 $\mathbf{x}(n), n=0, 1, 2, \dots, N-1$ ,  $R$ 的无偏估计可由简单的平均来得到,即:

$$R(n) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{x}(n) \mathbf{x}^H(n) \quad (3)$$

其中 $R(n)$ 表示 $n$ 时刻的估计,  $\mathbf{x}(n)$ 表示阵列信号取样。

当有新的取样数据时,  $R$ 更新为:

$$R(n+1) = \frac{nR(n) + \mathbf{x}(n+1)\mathbf{x}^H(n+1)}{n+1} \quad (4)$$

利用矩阵逆定理,更新矩阵 $R$ 的逆为 $R^{-1}(n) = R^{-1}(n-1) -$

$$\frac{R^{-1}(n-1)\mathbf{x}(n)\mathbf{x}^H(n)R^{-1}(n-1)}{1 + \mathbf{x}^H(n)R^{-1}(n-1)\mathbf{x}(n)}, \text{ 且 } R^{-1}(0) = \frac{1}{\epsilon_0} I, \epsilon_0 \text{ 为常数。}$$

应注意随着取样数增加,矩阵不断更新并趋近于它的真实值,估计的权向量会趋向于最佳权,即当 $n \rightarrow \infty$ ,  $R(n) \rightarrow R$ , 则 $\mathbf{w}(n) \rightarrow \mathbf{w}$ 或 $\mathbf{w}_{\text{MSE}}$ , MSE表示使均方误差最小。

#### (2) 最小均方算法

最小均方算法(LMS)用来计算阵列加权的应用非常广泛。约束的LMS算法在每步迭代中对加权有约束。无约束的LMS算法则在每步迭代中无约束,由于未知信号方向,其利用一个参考信号更新加权。

在每步迭代中,估计二次曲面的梯度,将加权向负梯度方向移动一个小量以进行更新。决定这一个小量的常数为步长。当步长足够小时,加权会趋向最佳。

对于实时无约束的LMS利用参考信号计算加权向量:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - \mu \mathbf{g}(\mathbf{w}(n)) \quad (5)$$

其中 $\mu$ 是正常数,即步长,控制算法的收敛特性; $\mathbf{g}(\mathbf{w}(n))$ 是梯度的无偏估计。

$$\text{MSE}(\mathbf{w}(n)) = E[|r(n+1)|^2] + \mathbf{w}^H(n)R\mathbf{w}(n) - 2\mathbf{w}^H(n)\mathbf{s} \text{ 第 } n \text{ 步迭}$$

代后,有:

$$\nabla \text{MSE}(\mathbf{w})|_{\mathbf{w}=\mathbf{w}(n)} = 2R\mathbf{w}(n) - 2\mathbf{s} \quad (6)$$

其中 $\mathbf{s} = E[\mathbf{x}(n)r(n)]$ ,  $r(n)$ 是在时刻 $n$ 得到的期望信号的估计,  $E[\cdot]$ 表示相关计算。注意第 $n+1$ 步的阵列输出利用了第 $n$ 步所得的权向量和新的阵列数据 $\mathbf{x}(n+1)$ , 即 $\mathbf{y}(n) = \mathbf{w}^H(n)\mathbf{x}(n+1)$ 。

通常将 $R$ 和 $\mathbf{s}$ 用估计值替代,第 $n+1$ 步迭代的梯度为:

$$\begin{aligned} \mathbf{g}(\mathbf{w}(n)) &= 2\mathbf{x}(n+1)\mathbf{x}^H(n+1)\mathbf{w}(n) - 2\mathbf{x}(n+1)r(n+1) \\ &= 2\mathbf{x}(n+1)\mathbf{e}^*(\mathbf{w}(n)) \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $\mathbf{e}(\mathbf{w}(n))$ 是阵列信号与参考信号间的误差,即 $\mathbf{e}(\mathbf{w}(n)) = \mathbf{w}^H(n)\mathbf{x}(n+1) - r(n+1)$ 。设 $\lambda_{\max}$ 为 $R$ 的最大特征值,当 $\mu < 1/\lambda_{\max}$ 时,算法是稳定的,权的平均估计收敛于最佳权。

#### (3) 递归最小二乘算法

LMS算法的收敛依赖于 $R$ 的特征值。在 $R$ 的特征值扩展较大时,算法收敛很慢。这个问题在递归最小二乘算法(RLS)中可得到解决。

在LMS算法中,将第 $n$ 步迭代时的步长 $\mu$ 用一个增益矩阵 $R^{-1}(n)$ 取代,得到加权的更新式为:

$$\mathbf{w}(n) = \mathbf{w}(n-1) - R^{-1}(n)\mathbf{x}(n)\mathbf{e}^*(\mathbf{w}(n-1)) \quad (8)$$

其中,  $R(n) = \delta_0 R(n-1) + \mathbf{x}(n)\mathbf{x}^H(n) = \sum_{k=0}^n \delta_0^{n-k} \mathbf{x}(k)\mathbf{x}^H(k)$ ,  $\delta_0$ 是比1小但接近于1的实数(常称为遗忘因子),用于对过去数据指数加权,使迭代趋向于降低过去取样数据的重要性。

RLS、LMS和SMI算法在移动通信环境下的计算机模拟表明,RLS比后两种算法在平坦衰落信道的性能要好。

#### (4) 恒模算法

恒模算法利用调制信号本身固有的、与具体承载的信息比特无关的恒模特性。它无需发送已知符号,可节省频谱资源,但是收敛速度较慢,且存在相位模糊问题。

#### (5) 共轭梯度算法

对于阵列处理问题,  $\mathbf{w}$ 为阵列权向量,  $X$ 为连续的阵列采样数据矩阵,  $\mathbf{b}$ 是包含期望信号连续取样的向量,残余向量 $\mathbf{r} = \mathbf{b} - X\mathbf{w}$ 。在该算法中,方向向量指向误差曲面 $\mathbf{r}^H(n)\mathbf{r}(n)$ 的梯度方向,并使之最小化。在 $M$ 元阵列中,大约 $M$ 步迭代后算法收敛于误差曲面的最小值,因此在所有迭代算法中收敛最快。

#### (6) 最小二乘解扩重扩多波束算法

在最小二乘解扩重扩多波束算法(LS-DRMTA)中,如果用户码元没估计正确,将导致加权因子的 $\pi$ 相移,但不会影响波束形成,波束在期望用户来波方向上仍有较高的增益,对来自其他方向的干扰信号有所抑制。

LS-DRMTA充分利用了用户的前导序列,具有很多优

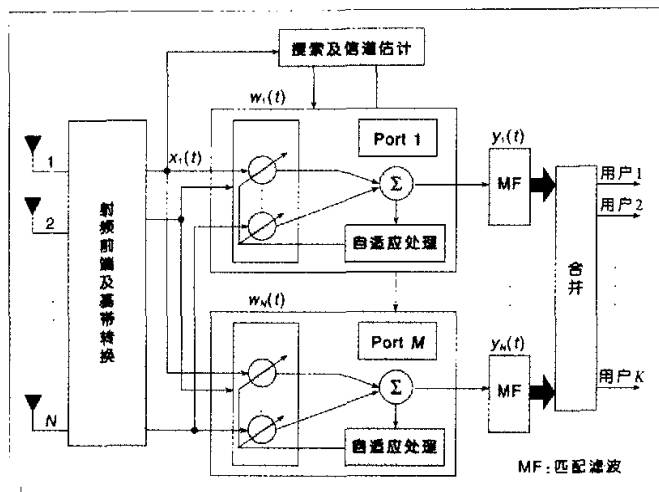


图1 基于码片级的自适应结构

点;在LS-DRMTA中,不同用户的加权因子估计是以波束形成器端口输出信号与期望用户信号之间误差最小为准则,不会出现不同加权因子收敛于相同的值,因此不需要Gram-Schmidt正交化过程;不需要分类过程;波束形成器输出端口数不受天线阵元数的限制,当系统扩展时,更多的输出端口可以非常容易地添加到波束形成器上,添加的端口使用原有的射频和基带信号变换装置,大大降低系统代价;每次迭代过程的计算简单;通过解扩重扩减少了干扰,可以在更低的信噪比下使用。

#### (7)基于拉格朗日描述的波束形成算法

这种方法利用了CDMA传输信号中比较大的扩频增益,递归寻求相关矩阵的最大特征值,估计最佳权重向量。它有着很好的优越性,即不但能在比较低的信噪比下形成优良波束,并且突破了波束数受天线数限制的传统约束,能够形成大大超过天线数的波束(几乎只取决于扩频增益)。此算法每一步迭代的计算量大约只是3M,比RLS算法还少一个数量级,并且能较快地收敛。

## 2 自适应波束智能天线的结构

### 2.1 基于码片级的自适应结构

#### (1)多个波束解扩-RAKE合并

多个波束解扩-RAKE合并时基于码片级的自适应结构如图1所示,即先进行空域处理,在波束形成中,N个输出形成不重复的N个波束,

一个波束图可能包含多个用户。经过匹配滤波(MF)后,进入RAKE合并实现空时处理。从结构上看,这种方法硬件结构较为简洁,但由于是基于码片级的计算,无论自适应算法采用何种自适应权值方法,计算量均较大,算法的优化在该方法中尤为重要。

#### (2)单个波束解扩-RAKE合并

在单个波束解扩-RAKE合并时基于码片级的自适应结构中,先对各阵元进行波束形成加权处理,然后对几个不相关多径分量进行分别解扩。该结构只进行一次数字波束形成处理,因而系统的复杂度相对于多个波束解扩-RAKE合并方案而言大大降低。

### 2.2 基于符号级的自适应结构

基于符号级的自适应结构如图2所示,这种结构是先进行匹配滤波,即先进行用户分离,然后波束合成形成针对该用户的波束,实现二维RAKE接收。从结构上分析,基于符号的波束形成方法需要设计数量众多的相关器,硬件结构较为复杂,但该方法是基于符号级的计算,自适应算法的计算量相对较小。

### 2.3 基于群的自适应结构

基于群的波束形成方法利用已有的基带专用集成电路芯片(ASIC)构建智能天线处理器,实现对扇区的自适应划分。基带ASIC可以采用Qualcomm公司的常规基站调制解调器CSM5200。如图3所示。

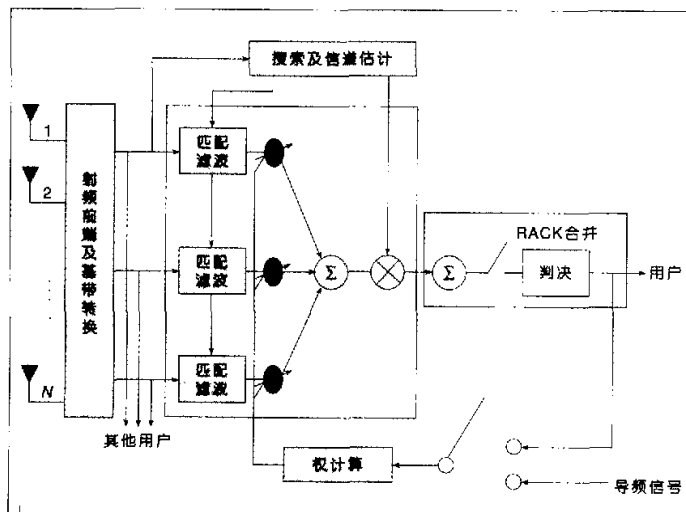


图2 基于符号级的自适应结构

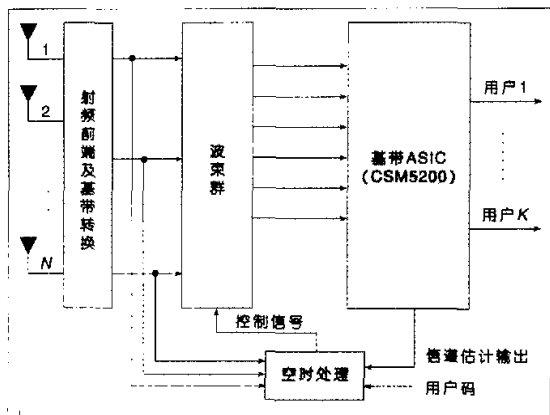


图3 基于群的自适应结构

基于群的波束形成方法采用基带ASIC(如CSM5200)完成除波束形成之外的大部分工作,需要考虑如何充分利用CSM5200的资源,以及与围绕CSM5200的软硬件功能在实现上的难易程度。显然,该结构受限于所采用CSM5200这类芯片在处理用户容量、处理速度、可靠性、芯片体积等方面的性能。

### 3 自适应波束智能天线实现时面临的问题

#### (1)精确地获得信道参数

信道参数估计是进行空时RAKE接收处理的基础,没有准确的时延参数,自适应波束形成将无从做起。通常时延的估计是在波束形成之前,也就是说时延搜索时无法利用波束抑制波束外的非期望用户,所有激活用户(某扇区内)的信号都将被接收并相互干扰。在无智能天线的基站,所能容纳的同时激活的最多用户数目是确定的,超过该数目,时延搜索将出现困难。配备有智能天线的基站,在未形成波束前,如果不采取其他措施,时延搜索与常规基站没有什么差别,也就是说,所能容纳的最多用户数目与常规基站的相同,显然没有发挥智能天线可以扩大基站容量的作用。因此,在时延搜索上必须采取另外的措施,使得在激活的用户数目超过常规基站时,时延搜索仍能正常进行。

#### (2)上下行波束形成的统一规划

对于下行链路而言,不同的复用方式可采用不同的解决方法;对于时分双工(TDD)方式,由于上下行链路采用相同的频率,在信道参数在相邻的上下行数据帧中几乎没有变化的情况下,可以直接利用上行估计得到的信道参数,但这只适用于慢速移动的系统;对于频率复用分割(FDD)方式,由于上下行链路的频率间隔一般都大于相关带宽,

因此上下行的瞬时信道几乎是不相关的,此时采用反馈信道是最好的方法。显然,上行链路参数估计的好坏,对上下行信道的波束形成都有很大的影响。此外,在上行信道的波束形成时,就要考虑到下行信道波束形成如何进行,以实现上下行信道波束形成的统一优化,使智能天线系统的作用得到最大程度的发挥。

#### (3)波束形成算法

良好的自适应波束形成算法通常需要很大的运算量以及复杂的结构,目前的硬件性能尚难以达到这样的指标。因此,寻求用较少的运算和简洁的结构实现自适应波束,始终是科技人员努力的目标之一。此外,实现算法中具体参数(初始权值、收敛门限、步长等)的优化也对算法最终结果起着至关重要的作用。

### 4 结束语

对于智能天线来说,在研究自适应波束形成新技术同时,还应关注技术的有效性、稳健性以及实用性等内容。从可实现的角度来看,智能天线自适应波束形成今后的研究可能趋向于以下几个方面:

- 探索有效的数字波束形成技术,着重于突破阵列物理限制的数字多波束形成技术。
- 研究计算有效、稳健的用户多径参数估计技术,重点在基于辅助导频信号的非盲技术。
- 根据业务和信道环境的不同,确定不同的自适应算法实现结构以及参数的选取准则。

此外,相对于上行自适应波束形成技术的广泛深入研究,下行链路性能成为提高系统性能的“瓶颈”,因此迫切需要有有效的下行自适应波束形成方法。□

参考文献:

- [1] Liberti J C, Rapoport T S. Smart antenna for wireless communication: IS-95 and third generation CDMA application [R]. Prentice Hall PTR, 1999.
- [2] Tsoulos G, Beach M, McGehean J. Wireless personal communications for the 21st century: European technological advances in adaptive antennas [J]. IEEE Communications Magazine, 35 (9), 1997.
- [3] Kwark J, Lu I T. Blind adaptive space-time receiving and transmitting diversities for multiuser DS-CDMA systems [R]. IEEE MILCOM '99, 1999.
- [4] Guo Y J. Advanced base station technologies for UTRAN [J]. Electronics & Communication Eng Journal, 12(3), 2000.
- [5] Seungwon Choi. A novel adaptive beamforming algorithm for a smart antenna system in a CDMA mobile communication environment [J]. IEEE Trans. VT, 49(2), 2000.

收稿日期:2003-03-12

作者简介:

三韵文,西安交通大学毕业,博士。深圳市中兴通讯股份有限公司西安研究所主任工程师,目前从事智能天线方面的系统设计工作。

## 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>