

TD-SCDMA 系统中智能天线波束形成的研究

赵于¹, 原思聪¹, 王衍文²

(1. 西安建筑科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 中兴通讯股份有限公司 西安分公司, 陕西 西安 710065)

摘要 波束形成算法是智能天线的核心和理论基础, TD-SCDMA 系统中应用的智能天线技术与传统的切换波束技术相比, 最大的优点在于可以自适应的根据用户的方位调整波束方向, 将主波束对准来波方向(DOA), 而将旁瓣和零陷对准干扰。文中先阐述了智能天线的基本原理, 介绍了 Capon 算法和 MUSIC 算法以及它们在智能天线波束形成中的应用, 进而用 Matlab 进行了数值仿真, 并且讨论了相关参数设置对于算法性能的分析。文章为以后的理论研究提供了平台, 对于今后的理论研究有一定的指导意义和参考价值。

关键词 TD-SCDMA; 智能天线; 波束下倾; Capon 算法; MUSIC 算法

中图分类号 TN821.91 **文献标识码** A **文章编号** 1007-7820(2008)11-005-04

Research on Beam Forming of Smart Antennas in the TD-SCDMA System

Zhao Yu¹, Yuan Sicong¹, Wang Yanwen²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;

2. Department fo Xi'an ZTE Corporation, Xi'an 710065, China)

Abstract The beam-forming algorithm is the core and theoretical foundation of smart antennas. The beam forming technology of smart antennas has the advantage over the traditional switching beam forming technology in TD-SCDMA system that it can adjust the direction of the beam adaptively according to users' position, aim the main beam at the direction of arrival and sidelobe and zero subsidence at the interference. This paper expounds the basic tenets of smart antennas, introduces the capon algorithm and MUSIC algorithm as well as their applications in smart antenna beam-forming, which are carried out using Matlab simulation. It also covers the parameters set for the algorithm performance analysis. This paper provides a platform for future studies and is of referential value.

Keywords TD-SCDMA; smart antennas; forming; Capon algorithm; MUSIC algorithm

当今世界, 社会信息量逐年增加, 全球的通信业务飞速发展, PC(个人移动通讯)迅速普及, 移动用户数目迅速增加, 移动通信业务量的增长和有限的频谱资源的矛盾日益突出。解决上述矛盾的一种途径是提高频谱的有效利用率, 90 年代以来, 阵列处理技术引入移动通信领域, 很快形

成了一个新的研究热点~智能天线(Smart Antennas)。

最初的智能天线技术是在自适应滤波和阵列信号处理技术的基础上发展起来的, 主要应用于雷达、声纳、军事抗干扰通信, 用来完成空间滤波和定位等。其利用信号传输的空间特性和数字信号处理技术, 通过先进的算法处理, 实现波束形成和赋形, 从而达到降低干扰、增加容量、扩大覆盖、改善通话质量、降低发射功率和提高无线数据传输速率的目的。在第三代移动通讯系统中, TD-SCDMA 采用 TDD 方式, 使上、下行信道对称, 从而可以利用上行链路得到的信道估计的

收稿日期: 2008-02-28

作者简介: 赵于(1982-), 男, 硕士研究生。研究方向: 计算机辅助设计。原思聪(1955-), 男, 教授, 博士生导师。研究方向: 机械仿真设计。王衍文(1963-), 男, 博士, 主任工程师。研究方向: TD-SCDMA 预研仿真。

结果实现下行波束形成，并较好地解决了抗多径干扰和抗多址干扰等问题。

1 智能天线基本概念

智能天线也叫自适应天线，由多个天线单元组成，每一个天线后接一个复数加权器，最后用相加器进行合并输出。这种结构的智能天线只能完成空域处理，同时具有空域、时域处理能力的智能天线在结构上相对复杂些，每个天线后接的是一个延时抽头加权网络（结构上与时域 FIR 均衡器相同）。自适应或智能的主要含义是指这些加权系数可以根据一定的自适应算法进行自适应更新调整。

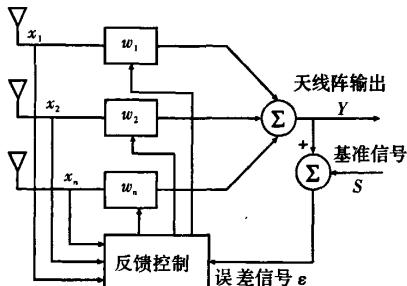


图 1 智能天线原理图

图 1 所示是智能天线的原理框图。天线接收的无线电信号中，最关心的是 S 信号。天线阵列各个阵元接受的电磁波信号因为阵元排列位置的不同带来相位差，经过特定参数的加权控制器 w 处理后，进一步改变了各个阵元输出信号的相位和幅度。处理的目标使得阵元输出的信号和 Y 中的 S 成分具有最大输出。用 S 信号作为基准信号，反馈控制单元的功能就是将输出信号 Y 与基准信号 S 的差值（即误差信号 ϵ ），作为调节控制加权控制器参数的依据。反馈控制的结果是使 ϵ 减小， Y 中的 S 成分加大，也就是说，天线阵列接收方向图指向了 S 信号的方向。

2 智能天线在 TD - SCDMA 系统中的应用

智能天线的布阵方式一般有直线阵、圆阵和平面阵，阵元间距为 $1/2$ 波长（若阵元间距过大会使接收信号彼此相关程度降低，太小则会在方向图形成不必要的瓣瓣，故一般取半波长）。智能天

线采用数字信号处理技术判断用户信号到达方向（即 DOA 估计），并在此方向形成天线主波束，它根据用户信号的不同空间传输方向提供不同的信道，等同于有线传输时的线缆，从而可以有效的抑制干扰。它通常是一种安装在基站现场的双向天线，通过一组带有可编程电子相位关系的固定天线单元获取方向性，并可以同时获取基站和移动台之间各个链路的方向特性。TD - SCDMA 智能天线的高效率是基于上行链路和下行链路的无线路径的对称性（无线环境和传输条件相同）而获得的。此外，智能天线可减少小区间干扰也可减少小区内干扰。智能天线的这些特性可显著提高移动通信系统的频谱效率。

3 智能天线波束下倾的基本原理及仿真实现

3.1 波束下倾的基本原理

图 2 所示是轴向排列的半波振子天线的结构图。阵元之间的距离是 d ，垂直轴线与电磁波辐射方向的夹角是 θ ，相邻阵元摄入信号的相位差是 α ，相邻阵元发出电磁波到达同一地点的程差为 $d\cos\theta$ ，相邻阵元发出电磁波到达同一地点的相位差参看式(1)。

$$\begin{aligned} E &= E_0 (1 + e^{j\phi} + e^{j2\phi} + \dots + e^{j(n-1)\phi}) \\ \varphi &= \beta d \cos \theta - \alpha \\ \beta &= \frac{2\pi}{\lambda} \end{aligned} \quad (1)$$

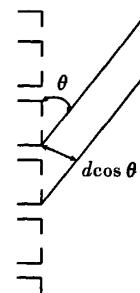


图 2 轴向排列的半波振子天线阵元间的相位差

根据以上讨论的情况，仿真出轴向排列天线阵列的方向图，均匀轴向排列（8 阵元）线状天线阵。改变阵元之间的间距 d 、阵元数 n 、各阵元馈电的相位 a_i 都可以改变波束下倾的形状。

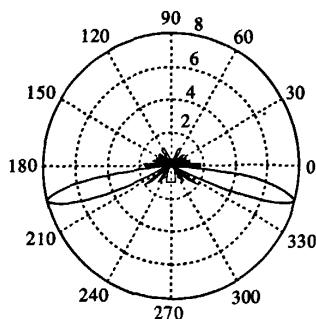


图 3 轴向阵列波束下倾的仿真图

采用等距离圆阵来讨论天线阵的波束形成。下图所示是等距离圆线阵的三维图。

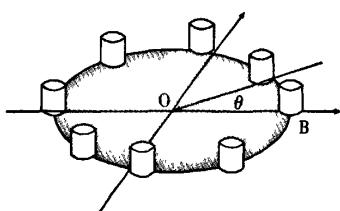


图 4 等距离圆线阵的三维图

可以将天线阵元顺序定为从 OB 起顺时针排列为 0 到 $M-1$ 。若有一平面波以 θ 角入射到阵列上，则 K 号阵元上产生的信号为 x_K ，它与到达阵元中心的第一个波的相位差是 $A_K(\theta) = \exp\left(-j2\pi \frac{r}{\lambda} \cos(\varphi_k + \theta)\right)$ ； λ 与 r 分别是入射波的波长和阵列圆的半径， A_K 亦称阵列因子。为了使天线阵的输出满足需要，在每个阵元加上加权因子 w_K 控制。这样第 K 号阵元上输出的信号为 $w_K A_K x_K$ 。若到达天线阵的信号是 N 个，天线阵的输出是 N 个信号在 M 个阵元上的输出的叠加。用解析式表达如下

$$A_{K1}(\theta) = \exp\left(-j2\pi \frac{r}{\lambda} \cos(\varphi_k + \theta)\right) \quad (2)$$

$$A_K = [A_{K1}, A_{K2}, \dots, A_M]^H \quad (3)$$

$$X(n) = [x_0(n), x_1(n), \dots, x_{M-1}(n)]^H \quad (4)$$

式中， φ_K 是 K 阵元以 OB 为基准顺时针画出的角度。

$$A = [A_1, A_2, \dots, A_N] \quad (5)$$

$$W = [w_0, w_1, \dots, w_{M-1}]^H \quad (6)$$

$$y(t) = W^H A X = W^H U \quad (7)$$

为了求得多个信号到达的方向(波达方向)，可以采用 Capon, MUSIC 两种方法。

3.2 Capon 法

Capon 法又称为最小方差无畸变相应 MVDR (Minimum Variance Distortion - Less Response)。天线阵列中的阵元个数决定了阵列方向图设计中的自由度数。Capon 法将阵列中可控的自由度用来形成期望的波束形状，达到对有用信号进行提升和对无用信号进行抑制的目的，并将其优化问题表达为

$$\min_E \{ |y(n)|^2 \} = \min_W W^H R_{UU} W \quad (8)$$

其约束条件为 $W^H A(\varphi_0) = 1$ 。可以证明上式的解为

$$W_{cap} = \frac{R_{UU}^{-1} A(\varphi)}{A^H(\varphi) R_{UU}^{-1} A(\varphi)} \quad (8)$$

代入式(8)，可以得到相应的功率为

$$P_{cap} = \frac{1}{A^H(\varphi) R_{UU}^{-1} A(\varphi)} \quad (9)$$

3.3 MUSIC 法

MUSIC 法亦称多重信号分类 (Multiple Signal Classification)。当入射信号数 N 小于阵元数 M 时， $M \times M$ 的 R_{UU} 矩阵有与进入阵列的信号数目相等的非零特征值及 $M-N$ 个为零的特征值。

$V_n = [v_{N+1}, v_{N+2}, \dots, v_M]$ (V_n 是 R_{UU} 相应的噪声特征矢量)

因为 A 与 V_n 的正交性，分母很小，峰值很大，这样就可以得出 MUSIC 法的空间谱为

$$P_{music} = \frac{A^H(\varphi) A(\varphi)}{A^H(\varphi) V_n V_n^H A(\varphi)} \quad (10)$$

其中， $V_n V_n^H$ 称为噪声子空间的正交投影设计。

波束形成可以采用下面介绍的方法：当 N 个信号输入时，其中有 1 个信号是关心想得到的， $N-1$ 个信号是需要被抑制的。方程组(12)描述了上述需求的约束条件(4 个信号输入中，第 1 个信号是被关心的，其余的信号是需要抑制的)

$$W^H U = [1, 0, 0, 0]^T \quad (11)$$

根据信号波达方向的知识 U ($U = AX$) 及约束条件求解方程组(11)，可以得到

$$W = [w_0, w_1, \dots, w_{M-1}] \quad (12)$$

带入式(7)可以得到阵列输出的方向特性。

下面是 4 个输入信号八单元阵列天线阵的波达方向估计和波束形成，4 个信号入射角度分别为 $\pi/4, \pi \cdot 2/3, \pi \cdot 3/2, \pi \cdot 5/8/6$ 。

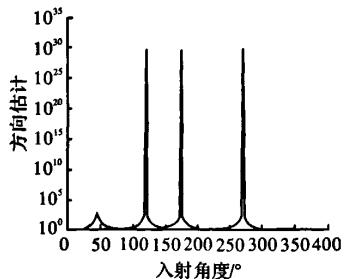


图 5 MUSIC 算法波达方向估计

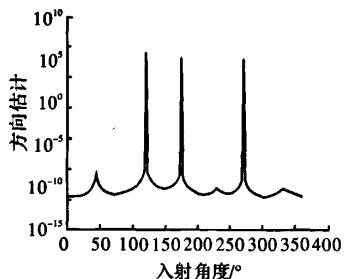


图 6 Capon 算法波达方向估计

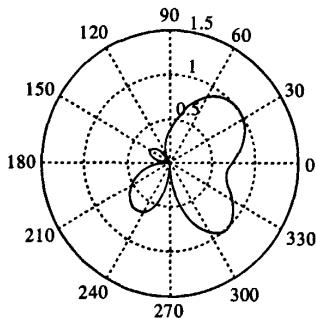


图 7 波束形成

4 结束语

我国提出的第三代移动通信系统 TD - SCDMA 投入商用已进入实质性阶段，而智能天线技术 TD 系统具有代表性的核心技术之一。它带给第三代移动通信系统的优势是其他技术都难以取代的，但是随着它的应用也会产生许多新的问题。例如共享下行信道及不连续发射，智能天线的校准，智能天线和其他抗干扰技术的结合等一系列问题等待被解决。而且智能天线技术未来将向着数字、集成以及适合宽带高速传输并能抑制更多个干扰方向发展，其不仅可以用于 TDD 系统，也适用于 FDD 系统，它的商用价值有待进一步研究及开发。

参考文献

- [1] Thompson J S, Grant PM, Mulgrew B. Smart Antenna Arrays for CDMA System [J]. IEEE Personal Commun., 1996, 3(5): 16 - 25.
- [2] Chrysomallis M. Smart Antennas [J]. IEEE Antennas and Propagation Mag, 2000, 42(3): 129 - 136.
- [3] Haykin S. Adaptive Filter Theory (Third edition) [M]. Third Edition. Prentice - hall, Inc, 1998.
- [4] Naguib A F. Adaptive Antennas for CDMA Wireless Networks. PhD Thesis [D]. USA: Stanford University, 1996.
- [5] Biedka T E. A Method for Reducing Computations in Cyclostationarity - exploiting Beamforming [C]. Proc. IEEE ICASSP, 1995: 1828 - 1831.
- [6] 徐明远. Matlab 仿真在通信与电子工程中的应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.

我校图像研究所成功参研神七伴飞卫星图像压缩系统

2008 年 9 月 27 日晚 20 点，我国载人航天工程空间应用系统有效载荷总体单位中科院光电研究院，给我校通信工程学院 ISN 国家重点实验室图像研究所发来消息，由图像研究所参与研制的神七伴飞小卫星图像压缩系统正常工作，地面获得的图像数据已恢复出神七卫星的清晰图像。全所师生在得知这一消息后无比兴奋，并预祝神七载人航天工程圆满成功！

图像研究所从 2005 年开始参加神七伴飞小卫星图像压缩系统的研制工作，并与中科院光电研究院成立了图像压缩联合实验室，共同研制载人航天工程的图像压缩系统。在与中科院光电研究院合作共同完成的神七伴飞小卫星图像压缩解码系统中，设计人员艰苦奋斗，精益求精，不断提高恢复图像的质量以及提高运算速度，使该系统达到了设计指标的要求。

此次成功研制神七伴飞小卫星中的有关图像压缩系统，是图像研究所师生继成功研制我国嫦娥一号图像压缩系统后，为我国探月工程和载人航天工程做出的又一贡献！

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>