

智能天线非理想波束赋形对 TD-SCDMA 系统性能的影响

陈波^① 杨光^② 常永宇^① 杨大成^①

^①(北京邮电大学电信工程学院 北京 100876)

^②(法国电信(北京)研究院 北京 100080)

摘要: 在实际的无线网络中, 由于无线信道的复杂性以及DOA估计的误差, 会导致智能天线系统的波束赋形出现一定程度的偏差。该文通过分析智能天线系统的原理, 提出了非理想波束赋形智能天线对系统性能影响的研究方法, 研究了智能天线系统的鲁棒性以及不理想波束赋形的智能天线对TD-SCDMA系统性能的影响。理论和仿真结果表明, 波束赋形的准确度直接影响移动通信系统的性能, 系统所能容忍的波束赋形偏差有一个固定的门限值, 该门限值随着系统负载的增加而减小。

关键词: 智能天线; 非理想波束赋形; 系统容量

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)04-0776-04

Performance of TD-SCDMA System with Imperfect Beamforming Smart antennas

Chen Bo^① Yang Guang^② Chang Yong-yu^① Yang Da-cheng^①

^①(College of Telecommunications, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China)

^②(France Telecom R&D Beijing, Beijing 100080, China)

Abstract: In practical wireless communication networks, downlink beamforming weights at the node B of smart antenna systems can be deteriorated due to variation of spatial signal vectors corresponding to mobile users or DOA estimation error. In this paper, the methodology for smart antenna systems with imperfect beamforming is proposed, the performance of smart antenna systems is studied in existing beamforming error scenarios and the accepted tolerance of the beamforming error in TD-SCDMA systems is researched on from the aspect of system capacity. On the one hand, the theoretical and simulation results show that beamforming accuracy of the smart antenna systems have great effect on the system capacity. On the other hand, they also indicate that the performance deterioration is remarkable if the beamforming error exceeds a threshold which is related to the system load.

Key words: Smart antenna; Imperfect beamforming; System capacity

1 引言

由于智能天线能够有效降低多址干扰(MAI)和减小多径效应, 因此智能天线成为提高移动通信系统容量和吞吐量的主要技术。TD-SCDMA标准把它作为关键的技术之一, 而其他标准也把智能天线作为提高系统性能的选择方案。智能天线包括自适应跟踪和固定波束切换两种类型。文献[1-4]从理论上分析了智能天线抑制MAI并提高信噪比的原理。文献[5]也从理论和仿真两个方面比较了这两种类型智能天线的性能。由于自适应跟踪智能天线技术通过实时调节各阵元信号的加权幅度和相位来改变阵列的天线方向图, 并将最理想的波束时刻对准目标用户, 对系统的增益远大于固定波束切换类型的智能天线。

以往对智能天线的分析和结论都是基于一个相同的假

设: 理想的波束赋形。对于自适应跟踪的智能天线, 就是假设采用理想的到达角(DOA)估计算法, 使得智能天线的主波束能够一直对准并实时跟踪目标用户。文献[6, 7]介绍了4类基于阵列的DOA估计算法: 传统法、子空间法、最大似然法和综合法。传统法基于经典波束形成方法, 需要大量阵元才能获得高分辨率; 子空间法利用输入数据矩阵的特征结构, 是最大分辨率的次最优方法; 最大似然法是最优方案, 即使在低信噪比环境下也能获得良好的性能, 但计算量较大; 综合法利用特性恢复方案区分多个信号, 估计空间特性, 进而采用子空间法确定波束方向。虽然上述的DOA估计算法在理论上可以较为准确地由观测信号以及阵列流型估计出信源个数及其方向DOA, 但是在实际的恶劣的无线传输环境中, 各种各样反射、折射、散射的信号存在以及各种衰落、时延、共信道干扰以及多址干扰的存在, 在很大程度上都会恶化DOA估计的准确性。

目前对智能天线技术的研究, 要么侧重于智能天线的结

构、波束赋形和波束选择算法设计等理论方面,要么也只是对理想条件下的智能天线性能进行了评估。有关实际应用的非理想的智能天线技术对系统性能影响的研究和分析很少。本文的目标就是研究自适应跟踪智能天线由于不理想DOA估计导致的波束赋形偏差对系统性能的影响以及TD-SCDMA系统对智能天线的波束赋形偏差的最低容限。

2 理论分析和性能研究

2.1 智能天线模型

智能天线抑制干扰提高信噪比的基本原理是根据一定的代价函数自动调节各天线阵元激励的幅度和相位加权值,达到最佳接收效果。从空间响应来看,智能天线阵列是一个空间滤波器,在信号入射方向上增益最大,在干扰信号入射方向上形成零陷。而波束赋形算法就是用来自动调整权重以实现信号的最佳接收,目前主要有最大信噪比、最小均方误差、线性约束最小方差等算法。为了使得仿真场景更加贴近实际的系统,研究结果更加准确,本文使用圆形8天线阵列的全向智能天线^[8],天线波束增益图是由TD-SCDMA标准的提出者——CATT所提供^[9],如图1所示。可以看到,这张增益图假设智能天线的主波束对准0°,并且主波束的3dB带宽大约是34°。

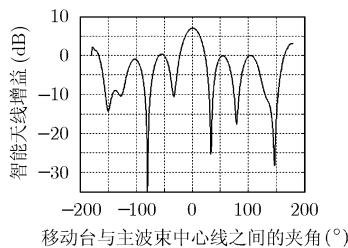


图1 智能天线波束增益图

2.2 智能天线的系统级仿真建模

本文通过动态的系统级仿真来评估不理想的智能天线对TD-SCDMA系统性能的影响。仿真中最理想的智能天线模型应该包含波束赋形算法,在仿真运行的同时实时根据仿真条件,诸如用户的位置信息、无线信道条件等计算智能天线对每个移动台的增益。然而,这样的模型,效率太低,需要的仿真时间太长。所以必须对智能天线的仿真模型在保持其准确性的前提下尽可能地进行简化。

首先来看一下智能天线在TD-SCDMA系统中的工作原理,然后给出简化的仿真模型。图2表示了智能天线大幅度降低MAI的原理。以上行链路为例,假设 $M_s(i,j)$ 表示在小区 i 中的第 j 个移动台, $M_s(0,0)$ 是在小区0中的目标移动台。 $M_s(0,1)$, $M_s(1,2)$, and $M_s(2,3)$ 都是干扰移动台。从图中可以清楚地看到,基站0的主波束对准目标用户,提供给 $M_s(0,0)$ 最大的天线增益,而天线增益的零陷方向正好对准其他的干扰用户,这样其他用户对目标用户的干扰就为零,大大地降

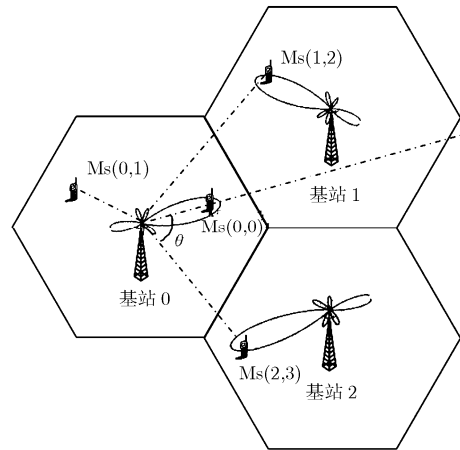


图2 智能天线降低MAI的原理

低了其他用户的干扰。

如何在仿真中实现上述的过程呢?考虑到仿真的效率,必须对前面描述的理想模型进行简化。理想模型中开销最大的部分就是智能天线为每个移动台实时计算各天线阵元激励的幅度和相位加权值,即要为每个用户计算出一张和图1所示类似的天线增益图,那么在仿真中随着移动台数目的增加,这种赋形算法的计算量成几何级数增长。而从每个用户的角度看,虽然每一组权值不同,但是主波束的最大增益值都非常接近;零陷的位置虽然不同,但旁瓣的增益值都比较小,这样对干扰用户的增益值也都比较小。所以可以使用相同的一组权值来简化理想的智能天线模型。假设智能天线对每一个目标用户的波束赋形采用相同的权值,这就意味着对所有的用户使用图1所示的波束增益。这种假设大大降低了模型的复杂性并对仿真结果的准确性影响很小。我们把图1所示的天线增益值与对应的角度存储在表格里,以目标移动台、干扰移动台所处的位置以及他们与主波束的夹角为参数查表即可等到智能天线对它们的增益值。

2.3 基于智能天线的TD-SCDMA系统的干扰分析

由于TD-SCDMA系统采用了智能天线、联合检测等新技术以及TDD的双工方式,使得TD-SCDMA系统的干扰情况较传统的CDMA系统有了很大的不同。一方面,由于采用的智能天线和联合检测等新技术,有效地抑制了TD-SCDMA系统的MAI,另一方面,由于公共信道和专用业务信道占据不同的时隙,即公共信道和专用业务信道的发射功率相互独立,时分的特性使得公共信道不会对专用业务信道造成任何干扰。

传统的CDMA系统是一个干扰受限的系统,TD-SCDMA系统由于智能天线带来的巨大增益,使得系统容量受限于码道资源^[10]。以上行链路为例,系统中第 i 个用户比特能量 E_b 与噪声谱密度 N_0 之比为

$$(E_b/N_0)_i = (C/I)_i \times G \quad (1)$$

其中 G 为TD-SCDMA系统的处理增益。由于TD-SCDMA

系统采用码分多址(CDMA)和时分多址(TDMA)相结合的方式,高业务数据速率可通过用几个时隙并行传输得到,因此不能简单地像传统 CDMA 那样由数据速率得到处理增益,它的处理增益与扩频因子,编码方式,调制方式有关,根据文献[8],TD-SCDMA 系统的处理增益为

$$G = \frac{B \cdot Q \cdot T_c}{R_c \cdot \log_2 M} \quad (2)$$

其中 R_c 是信道编码速率(取决于业务), M 是数据符号表的大小, B 是用户带宽, Q 是每符号码片数, T_c 是码片时长。若考虑 12.2kbps 语音业务,TD-SCDMA 用户带宽为 1.6M, $M=4$, $T_c = 1/1.28M$, $R_c = 0.3971$, $Q=8$,则处理增益为 11dB。

假设 I_{or} 表示小区内的干扰, I_{oc} 表示其他小区的干扰,则对于属于第 l 个基站中的第 k 个移动台 $Ms(l,k)$ 而言, C/I 可以表示为

$$\begin{aligned} \frac{C}{I} &= \frac{P_{l,k} G_{SA}(\alpha) L_{(l,k),l}}{(1-\beta)I_{or} + I_{oc} + N_0 W} \\ &= P_{l,k} G_{SA}(\alpha) L_{(l,k),l} \left/ \left[(1-\beta) \sum_{j=1, j \neq k}^{N_l} P_{l,j} G_{SA}(\theta_{l,j} + \alpha) L_{(l,j),l} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \sum_{i=1, i \neq l}^M \sum_{j=1}^{N_i} P_{i,j} G_{SA}(\theta_{i,j} + \alpha) L_{(i,j),i} + N_0 W \right] \right. \quad (3) \end{aligned}$$

其中 $P_{i,j}$ 是移动台 $Ms(i,j)$ 的业务信道发射功率; $G_{SA}(\alpha)$ 是智能天线对目标移动台 $Ms(l,k)$ 的天线增益值; $L_{(i,j),i}$ 是基站 i 和移动台 $Ms(i,j)$ 之间总的损耗,包括传播损耗、快衰和阴影衰落; β 是干扰消除因子,表示由于采用了联合检测而对小区内 MAI 的抑制程度; $G_{SA}(\theta_{i,j} + \alpha)$ 是智能天线对于干扰用户 $Ms(i,j)$ 的增益值, $\theta_{i,j}$ 是干扰用户所在的方向与智能天线主波束方向的夹角,例如图 2 中的 $\theta_{2,3}$, α 是由于不理想波束赋形导致的偏差; $N_0 W$ 是热噪声功率; N_i 是小区 i 中的移动台数目; M 是系统中总的基站数。

对于理想波束赋形的情形,就认为智能天线的主波束能自适应地一直对准目标用户,譬如图 2 中的 $Ms(0,0)$ 。此时目标用户可以获得智能天线的最大增益值,这就意味着式(3)中的 $\alpha = 0$ 。而对于其他干扰用户,比如图 2 中的 $Ms(2,3)$,智能天线的增益值则根据它所在位置与主波束的夹角 $\theta_{2,3}$ 来决定。本文重点研究非理想波束赋形的情形,即智能天线的主波束不再完全对准目标用户,而是存在一定的偏差,此时式(3)中的 α 不再等于 0,而是符合某种分布的随机变量。那么智能天线对每一个移动台的增益值都将随着 α 的变化而变化。

3 仿真与结果分析

基于上面的分析和描述,本文用 C++ 搭建了动态的系统级仿真平台。仿真平台主要由仿真驱动与结果统计、网络实体两大类模型,前者包括一些为仿真运行而必须的辅助性模型,如无线链路模型(包括各种衰落和损耗),业务产生模型、用户移动模型、系统级和链路级动态接口模型等等;后者包

括移动台模型、基站模型以及嵌套于各对象模型的各种无线资源管理算法(功率控制、切换技术、接入控制、动态信道分配)等等。

3.1 仿真条件和参数描述

本仿真基于平坦的城区环境,Macro蜂窝模型,小区半径 577m,全向的自适应智能天线,单载波。小区拓扑由 19 个 Macro 蜂窝组成,使用 wrap-around 技术^[11]。基站到用户间的传播损耗模型为 COST-231 Hata 模型^[12]: $L_m(d) = 28.6 + 35 \log d$ ($d \geq 35m$), d 为基站和移动台的距离,单位为 m。基站最大总发射功率为 43dBm,最小单码发射功率为 3dBm;移动终端最大发射功率为 21dBm,最小发射功率为 -49dBm,基站天线增益为 11dB,移动终端天线增益为 0dB;基站热噪声为 -106dBm,移动终端热噪声为 -104dBm,阴影衰落均方差 8.9dB。仿真基于 12.2kbps 的语音业务。其他的关键模型描述见文献[10]。

为了能够评估非理想波束赋形的智能天线对 TD-SCDMA 系统性能的影响,通过仿真平台,比较了在波束赋形算法出现不同程度的偏差时系统的性能。用系统中断率(outage)来表征系统的性能。系统 outage 率是指 outage 的语音用户的比例。outage 的语音用户的判定准则如下: outage 用户是指上行或下行链路中短期 BLER 超过 15% 的时间超过通话时长的 1%,即

$$\sum_{j=1}^M I_j / M > 1\% \quad (4)$$

其中若 $BLER > 15\%$, $I_j = 1$; 若 $BLER < 15\%$, $I_j = 0$; $j=1, \dots, M$ 为仿真运行过程中的时间顺序号。

3.2 仿真结果分析

基于上述的分析和假设,本文对 12.2kbps 的语音业务进行了仿真。图 3 显示了 TD-SCDMA 系统采用理想波束赋形时系统的性能曲线。假设系统中断率小于 5% 时的用户数为系统所能支持的最大用户数,则可以清楚地看到,采用理想波束赋形的智能天线可以极大地提高 TD-SCDMA 系统的性能,使得 TD-SCDMA 系统成为码道资源受限的系统。另一方面,比较不同的无线环境下,随着多径数目的增多,case1, case2, case3^[13] 的系统性能依次变差。

图 4 表示了系统在 100% 负载强度的条件下,采用非理想波束赋形的智能天线时系统的性能曲线。比较曲线可以看出,随着波束赋形偏差的增大,系统性能开始恶化,系统容量也由码道资源受限转为干扰受限。本文同时还对 70% 和 50% 负载强度的系统性能进行了仿真,仿真曲线与图 4 所示的性能非常类似,但系统对 DOA 的误差的容限随着负载的减少而增大。可见,智能天线波束赋形的准确性在很大程度上决定了 TD-SCDMA 系统的性能。

从仿真结果中重点看一下 TD-SCDMA 系统对波束赋形偏差的最低容限。不同系统负载下对应的最低容限门限值见表 1。一方面,随着系统负载的降低,TD-SCDMA 系统对

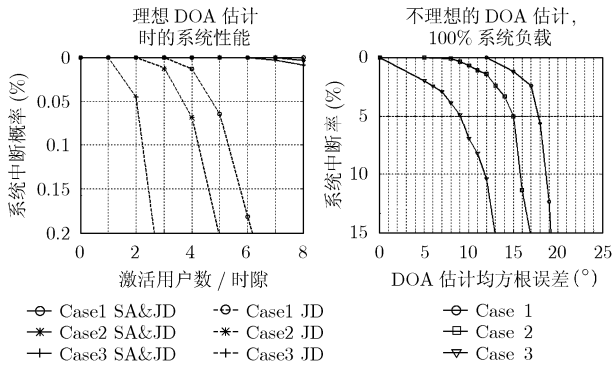


图 3 理想波束赋形时系统性能曲线

图 4 不理想波束赋形时系统性能曲线(100%负载)

表 1 满足系统 5% 中断率时系统所能容忍的波束赋形均方根误差 (°)

系统负载	100%负载	75%负载	50%负载
Case1	18	18.5	22
Case2	15	16	17
Case3	9	12	13.5

波束赋形偏差的最低容限上升, 比如, 在 case1, 100% 负载的条件下, 系统可容忍的门限值是 18°。而在 case1, 50% 复杂的条件下, 这个门限值增加到 22°。这是因为系统负载越小, 小区内多址干扰就越小, 用户越分散, 系统能容忍更大的波束赋形偏差。另一方面, 随着无线传播环境的恶化, 无线信号多径数目的增加, 系统所能容忍的偏差门限值也迅速减少。在 case3, 100% 负载的条件下, 系统所能容忍的波束赋形偏差才只有 9°。

4 结束语

本文从 SINR 及系统 E_b/N_0 对 SA 波束赋形的直接依赖关系出发, 提出了非理想波束赋形智能天线对系统性能影响的研究方法, 并以系统 E_b/N_0 为优化目标, 分析了波束赋形误差的最低容限, 说明了基于波束赋形技术的智能天线系统在具有相关衰落特征的移动传播环境中的适应性。本文结论对 TD-SCDMA 系统的网络规划和优化, 以及智能天线设备的入网检测都有一定的意义。

参 考 文 献

[1] Liberti J C and Rappaport T S. Smart Antenna for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1999: 77-118.
 [2] Rong Z and Rappaport T S. Simulation of multitarget adaptive algorithms for wireless CDMA systems. IEEE

Vehicular Technology Conf., Phoenix, AZ, May 1997: 1-5.
 [3] Garg V K, Laxpati S R, and Wang D. Use of smart antenna system in universal mobile communications systems (UMTS). IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2004, 3: 66-70.
 [4] Hartmann C. Capacity formulas for smart antenna systems with spatial filtering for interference reduction. IEEE Vehicular Technology Conf 2004. Los Angeles, U.S.A, Sept. 2004: 4285-4289.
 [5] Rezk M, Kim W, Yun Z, and Iskander M F. Performance comparison of a novel hybrid smart antenna system versus the fully adaptive and switched beam antenna arrays. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2005, 5: 285-288.
 [6] Chuang C Y, Yu X L, and Kuo C C. Space-time blind delay and DOA estimation in chip-asynchronous DS-SS systems. IEEE Global Telecommunications Conf'2004. Texas, USA, 2004, 4: 2508-2512.
 [7] Kishigami T, Yu D Y, Fukagawa T, and Hoshino M. A low-complexity beamforming algorithm for 3G macro-cellular system to reduce interference from high data rate users. IEEE Vehicular Technology Conf'2003. New York, USA, 2003, 1: 208-212.
 [8] 3GPP TS 25.928 v4.0.1. 1.28Mcps functionality for UTRA TDD Physical Layer.
 [9] CCSA TC5_WG1_SWG1_2004_114B, Study Report for co-existence of TD-SCDMA and WCDMA, Dec. 2004.
 [10] Chen B, Wang Y F and Yang D C. System Level Simulation Based on OMNeT++ for TD-SCDMA. IEEE Proceedings - 2005 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WCNM 2005, Wuhan, China, 2005: 1308-1311.
 [11] 3GPP2 C.R1002-0 cdma2000 Evaluation Methodology.
 [12] Rappaport T S. Wireless Communication Principles & Practice American: Prentice-Hall, Inc, 1996, Chap.3.
 [13] 3GPP TS 25.102 v5.0.1. UE Radio Transmission and Reception (TDD).

陈 波: 男, 1977 年生, 博士, 研究方向为移动通信系统的系统级仿真和无线资源控制方案。
 杨 光: 男, 1975 年生, 博士, 研究方向为无线资源控制方案。
 常永宇: 女, 1963 年生, 副教授, 主要研究方向为第三代移动通信系统的性能分析以及移动通信相关的基础理论和关键技术。
 杨大成: 男, 1952 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为宽带移动通信系统理论和移动通信网络设计与规划等。