

基于网络编码的分布式 天线系统性能分析

The Performance Analysis of Distributed Antenna Systems Based on Network Coding

中图分类号:TN911 文献标识码:A 文章编号:1009-6868 (2009) 01-0043-03

覃团发/QIN Tuan-fa

罗会平/LUO Hui-ping

(广西大学计算机与电子信息学院, 广西 南宁 530004)

(School of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Nanning 530004, China)

摘要: 文章针对多输入多输出(MIMO)系统在移动终端实现上的限制, 提出分布式天线系统(DAS)的解决方案来获得空间分集增益。采用DAS模型, 通过使用一个具有网络编码解码运算能力的辅助天线增强用户与基站间的通信, 探讨基于网络编码的天线分集增益。分析比较无辅助天线系统、简单DAS和基于网络编码的DAS中断概率性能后, 理论分析和计算机仿真结果表明, 相比简单DAS, 基于网络编码的DAS节约硬件成本并提高了频谱利用率; 系统中断概率平均降低0.0164, 可获得更大的分集增益。

关键词: 网络编码; 天线分集增益; 分布式天线系统; 系统中断概率

Abstract: Due to the limitation of mobile terminal implementation in MIMO systems, Distributed Antenna System (DAS) is proposed to provide space diversity gain. In order to discuss the antenna diversity gain offered by implementing network coding, this paper adopts the DAS model which uses assisting antennas to enhance the communication between users and terminals. By comparing traditional system without assisting antennas, simple DAS and network-coded DAS, theoretical analysis and computer results show that network-coded DAS leads to higher diversity gain, saving the hardware cost while making higher use of spectral efficiency, probability of system outage reduced by average of 0.0164.

Key words: network coding; antenna diversity gain; distributed antenna system; probability of system outage

空间分集是一种对抗无线环境下衰落的有效方式, 它通过多个收发天线的多径传输来提高系统的抗衰落性能, 降低传输误比特率。在移动通信系统中, 为了达到全分集, 需要在终端和基站安装足够多的天线并保持在一定的距离范围内, 对于小巧便捷的手机终端来说是不可能实现的。为了解决实际应用中碰到的矛盾, 文献[1]提出一种分布式天线系统来解决。文献[2]中提出的网络编码技术融合编码和路由的概念, 通过允许对来自不同链路的信息进行编码

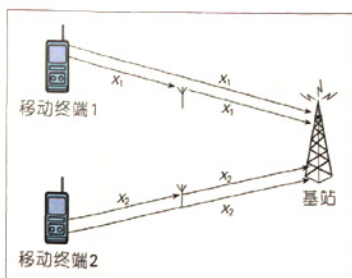
组合, 使得网络节点既具有路由功能又具有编码功能。文献[3]提出一种在无线 mesh 网络中网络编码的简化文件共享模型, 基于网络编码转发机制显著地降低文件传输系统的分发时间, 从而提高网络的吞吐量。

本文采用文献[1]的分布式天线模型, 假设分布式天线系统的终端(辅助天线)具有简单网络编码运算能力, 研究网络编码在分布式天线系统的应用。网络编码采用线性网络编码算法, 信号调制方式采用脉冲位置调制(PPM), 推导无辅助天线系统的误

码率与中断概率关系。通过理论分析及仿真验证的方法, 研究基于网络编码的分布式天线系统可实现的分集增益。首先, 在分析小型无线网络(2到3个节点)基础上, 讨论系统误码率与中断概率的关系。中断概率定义为, 当基站不能准确接收来自任何一个用户的数据, 通信中断或中止出现的概率, 与系统的误比特率和信噪比有关。然后, 将网络进一步扩大到多用户协作网络, 分析讨论系统的中断概率, 得出一般性结论。最后, 计算机仿真得出系统误码率与中断概率的关系。

1 网络编码和分布式天线系统

与传统的路由相比, 网络编码能够提高系统的传输比特率。在传统路由体系中, 节点只是简单存储复制转发接收的数据, 但中继节点采用网络编码之后, 中继节点能够整合(异或)来自多条链路上接收到的数据。网络编码的核心思想是通过中继节点简单的编码能力来达到网路性能的增益。在有线链路上通过编码能够获得巨大的容量增益。目前, 很多研究都是关注在有线网路上, 也有部分在无



▲图1 简单分布式天线系统

线环境下的探索性研究^[4]。尽管无噪声的假设在无线介质下不可能出现,但无线媒介提供一些更加好的性能:无需额外的成本就可广播信息。本文通过引入网络编码算法探讨无线网络的分集增益和系统中断概率性能。

分布式天线系统(DAS)^[5]的提出主要为了解决无线环境下的路径损耗、快衰落和阴影衰落,从而改善覆盖特性,提高系统容量。这种网络结构可提高系统无线信号的覆盖能力和系统容量,并且可获得较高的系统功率效率。

2 系统模型

本文主要关注系统的中断概率性能。根据多输入多输出(MIMO)天线的设置模型,假设系统中有一个辅助天线单元,随机地分布在无线网络中,用来增强用户和本地基站的通信稳定性,即系统中每个用户安装有一个辅助天线,可以解调出每个用户的数据。在价格和实现复杂度上,相比用户终端,辅助天线更具有优势。这种分布式辅助天线作为用户终端和基站的中继,用于增强通信链路的稳定性。在最简单的配置中,每个用户终端安装一个辅助天线,可以处理简单编码和解码,叫做简单DAS,如图1所示。基站除了接收经过中继的数据,也可接收来自用户终端的信息。

为了节约辅助天线的硬件成本,引入网络编码数据处理方式。基于网络编码的DAS模型如图2所示。用户1和用户2分别发送数据 x_1 和 x_2 到基站,由于无线网络的广播特性,辅助天线

单元也将接收到信号 x_1 和 x_2 ,并可同时发送数据到基站。辅助天线通过线性网络编码,不是中继转发数据 x_1 和 x_2 ,而是通过发送 x_1 和 x_2 异或后的数据。基站只要接收到用户1或用户2的任意一方数据就可以解调出未接收到的数据。

可以看出,通过应用网络编码算法,节约了硬件资源,并达到提高系统性能的目的。

3 分布式天线系统性能分析

3.1 理论分析

首先,研究包含两个用户的简单网络系统,讨论基于网络编码的分布式天线系统和无网络编码的分布式天线系统性能。考虑公平性,辅助天线单元假设应用在简单DAS和基于网络编码DAS中。分集增益通常用分集度来衡量,基于信噪比(SNR)统计特性的中断概率是研究协作方案分集度最常用的方法。为了比较这两种DAS的性能,定义中断概率为当基站不能同时准确接收来自用户A和用户B的信息时所出现的概率,记为PS。并假设用户A和用户B到基站上行链路的误比特率分别为 p_A 和 p_B ,用户A和用户B到辅助天线上行链路的误比特率分别为 p_1 和 p_2 。简单DAS的中断概率可以表示为:

$$P_{\text{DAS}} = p_A p_1 (1 - p_B p_2) + p_B p_2 (1 - p_A p_1) + p_A p_1 p_B p_2 = p_A p_1 + p_B p_2 - p_A p_1 p_B p_2 \quad (1)$$

对于基于网络编码的DAS来说,假设辅助天线的误比特率为 p_i ,可以得到,系统中断概率为:

$$P_{\text{NC}} = p_A p_1 (1 - p_B) + p_B p_2 (1 - p_A) + p_A p_B (1 - p_1) + p_A p_1 p_B = p_A p_B + p_A p_1 + p_B p_2 - 2 p_A p_1 p_B \quad (2)$$

如果假设所有的误比特率相同,并记为 p 。那么,式(1)和式(2)可以简化为:

$$P_{\text{DAS}} = 2p^2 - p^4 \sim p^2 \quad (3)$$

$$P_{\text{NC}} = 3p^2 - 2p^3 \sim p^2 \quad (4)$$

从(3)和式(4)可以得出,两个系统的分集增益都为2。

为了比较辅助天线的性能,考虑无辅助天线的非协作通信系统,即系统中无任何中继设备,用户直接与基站通信。假设用户1和用户2到基站上行链路的误比特率分别为 p_1 和 p_2 ,并假设 $p_1 = p_2 = p$ 。可以得到,无辅助天线的非协作系统的系统中断概率为:

$$P = 2p - p^2 \quad (5)$$

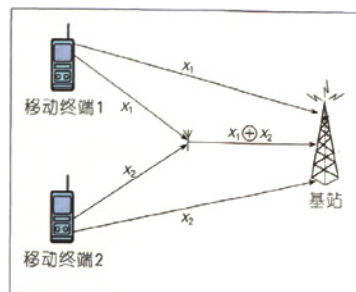
信号采用脉冲位置调制(PPM)方式,信道噪声采用高斯白噪声,其幅度符合瑞利分布。根据文献[5]可以得到上行链路的误比特率为:

$$P = E \{ Q(\sqrt{2 \ln 2 SNR}) \} = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{SNR}{2}\right) = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E}{2N_0}\right) \quad (6)$$

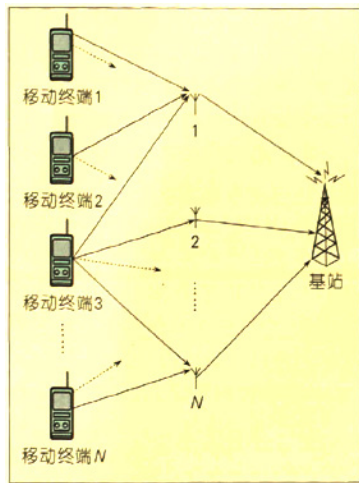
其中 E 是总发送功率, N_0 表示单边带高斯噪声功率。

在讨论结束两个用户的简单网络,现将基于网络编码的DAS放到更加一般的应用场合中。假设系统由 N 个用户, M 个辅助天线单元和一个基站组成,如图3所示。由于简单DAS就是由 N 个用户, M 个辅助天线单元和一个基站组成,系统比较简单,故下面仅讨论基于网络编码的DAS系统。用户的数据可以直接发送到基站,也可以通过每个辅助天线经过网络编码组合来自 k 个用户的数据后发送到基站。

假设来自用户 i 的数据可以准确地由 L_i 个辅助天线单元接收。特别地,假设对于任意一个 i ,都有 $L_i = L \leq M$ 。一个辅助天线单元 R_i 可以从 K 个用户集合中正确解调出数据,即 $K = (N \times L)/M$,同时发送 $x_R = \sum_{k=1}^K x_{Rk}$ 个数据到基站,其中 x_{Rk} 表示从移动终端 k 天



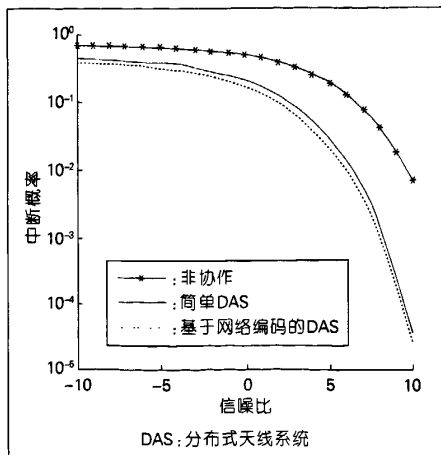
▲图2 基于网络编码的DAS



▲图3 通用网络编码的DAS

线 j 接收到的信号。单一用户 i 的中断概率为 P_{oi} , h_i 表示用户 i 的上行链路增益, h_j 为第 j 根辅助天线的链路增益。假定每个单元发送功率相同, 就有每条上行链路满足 $(p_i, p_j) \sim \frac{1}{\text{SNR}}$, 其中 p_i 表示用户 i 基站链路的误比特率, p_j 表示第 j 个辅助天线单元到基站的误比特率。

考虑系统中有6用户, 4辅助天线单元的情况, 以用户1为研究对象, 假设用户1的数据可被2个辅助天线准确接收, 可得到用户1的中断概率为 $P_{oi} = p(p + 2P_{oi}^2)$, 展开成泰勒级数, 根据文献[6], 可以得出用户1的中断概率为 $P_{oi} \approx \frac{p^3}{8} \sim (\frac{1}{\text{SNR}})^3$, 其他用户的中断



▲图4 不同系统的中断概率

概率与用户1通过相同推理可得。

3.2 实验仿真结果和分析

在最简单的DAS中, 每个移动终端都装有一个天线, 用来处理解码和简单的编码。在仿真中, 系统中的用户个数 N 为2, 信号调制采用脉冲位置调制方式, 信道是瑞利衰落信道, 根据系统的辅助天线单元个数以及是否应用网络编码, 将系统分为3类:

(1) 无辅助天线系统, 该系统直接由移动终端发送数据到基站, 系统无辅助天线。

(2) 简单DAS, 该系统由2个辅助天线单元和基站组成。天线系统如图1所示。

(3) 基于网络编码的DAS, 仅由一个辅助天线和基站组成, 系统如图2所示。

通过在第3.1部分的分析, 经MATLAB仿真得到图4的系统中中断概率曲线。

从图4中可得到以下结论:

(1) 相比无辅助天线单元的系统中断概率, 两个基于DAS系统能够达到分集增益2, 而无辅助天线单元的系统没有分集增益, 系统性能最差。

(2) 基于网络编码的DAS系统中中断概率比简单DAS小, 中断概率平均降低0.0164。特别当SNR比较高时, 中断概率迅速下降。

(3) 基于网络编码的DAS需要

更加少的硬件成本。如3.1分析, 假设一个用户终端可以由 L 根天线辅助, 为达到 $L+1$ 的分集增益, 简单DAS系统需要 $L \times N$ 个辅助天线单元, 而网络编码DAS只需 $(N \times L)/M$ 个。其中, N 表示系统中的用户个数, M 为系统的辅助天线单元数目, L 为能够正确解调用户数据的天线数目, 以下同。

(4) 基于网络编码的DAS占用更少的频带资源。为了达到 $L+1$ 的分集增益, 简单DAS系统需要 $(L+1) \times N$ 个正交信道, 而网络编码的DAS只需 $(N+M)$, 而 $(N+M)$

$< (L+1) \times N$ 。

4 结束语

本文将网络编码应用在分布式天线系统的无线网络中, 建立一种基于网络编码的分布式天线分集系统模型。仿真和分析了无辅助天线系统、简单DAS和基于网络编码的DAS性能。仿真结果表明, 基于网络编码的DAS能够得到一个更好的分集性能, 中断概率平均降低0.0164, 节约硬件成本和提高频谱利用率, 使系统获得更大的容量。

5 参考文献

- [1] CHEN Y, KISHORE S, LI J. Wireless diversity through network coding[C]// Proceedings of 2006 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '06): Vol. 3, Apr 3-6, 2006, Las Vegas, Nv, USA. New York, NY, USA: IEEE, 2006: 1681-1686.
- [2] AHLWEDE R, CAI N, LI S Y R, et al. Network information flow[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216.
- [3] 覃团发, 廖素芸, 罗会平. 无线Mesh网络网络编码的文件共享模型[J]. 电讯技术, 2008, 48(5): 17-21.
- [4] ALY S A, JIANG Anxiao. On the Capacity of Network Coding for Wireless Networks[R]. College Station TX, USA: Department of Computer Science, Texas A&M University, 2006.
- [5] 蒋云娥. 分布式天线系统结构及其关键技术分析[J]. 甘肃科技纵横, 2006(6): 37.
- [6] RAPPAPORT T S, GIBSON J D. Wireless communications: Principles and Practice[M]. 2nd Edition. Reading, MA, USA: Addison Wesley, 2007.

收稿日期: 2008-11-05

作者简介



覃团发, 广西大学计算机与电子信息学院副院长、教授、博导, 中国电子学会高级会员, 中国通信学会高级会员。主要研究无线多媒体通信、网络编码、视频编码和图像检索技术。



罗会平, 广西大学计算机与电子信息学院在读硕士研究生, 主要研究网络编码、移动通信技术。

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)，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>