

分布式无线通信系统中协同传输预编码方法分析

杨 军¹, 张正孝^{2*}, 李敏之², 蒋占军^{2,3}

(1. 兰州交通大学 研究生学院, 兰州 730070; 2. 兰州交通大学 电子与信息工程学院, 兰州 730070;

3. 东南大学 移动通信国家重点实验室, 南京 210096)

(* 通信作者电子邮箱 zhangzx005@163.com)

摘 要:在分布式无线移动通信多点协同传输系统中,对于小区边缘用户而言,信道质量的恶化将导致系统接收性能的下降,为此,可以使用协同编码处理以提高接收质量。提出了一种协同传输联合预编码方法,系统针对协同的远端天线单元(RAU)进行联合处理,各RAU根据信道状态信息好坏采用不同的预编规则对同一用户发送数据,而在接收端使用最大比合并的方式对各链路信号进行处理。仿真实验结果表明,该方法能有效地改善用户的误码率性能,提高传输可靠性。

关键词:协同多点;分布式无线通信网络;远端天线单元;预编码;误码率

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A

Analysis of coordinated transmission pre-coding in distributed wireless communication system

YANG Jun¹, ZHANG Zheng-xiao^{2*}, LI Min-zhi², JIANG Zhan-jun^{2,3}

(1. School of Graduate Studies, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu 730070, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu 730070, China;

3. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: In distributed wireless communication and Coordinated Multi-Point (CoMP) system, the deterioration of channel quality seriously affect the system receptivity of edge users, and therefore the coordinated coding processing is used to improve the quality of reception. A coordinated transmission and joint pre-coding method was proposed in this paper. Coordinated Remote Antenna Units (RAU) were processed jointly. According to the state information of channel, different pre-coding rules were adopted by each RAU to transmit data to the same user. A Maximal-Ratio Combining (MRC) algorithm was used to calculate the received signals of terminals. The simulation results show that the proposed method can effectively decrease the Bit Error Rate (BER) and improve the transmission reliability.

Key words: Coordinated Multi-Point (CoMP); distributed radio mobile communications network; Remote Antenna Unit (RAU); pre-coding; Bit Error Rate (BER)

0 引言

随着无线移动通信技术从3G向4G的逐渐演进,为满足高速率数据业务发展的更多应用和需求,网络资源变得更为珍贵,合作通信、协同传输已成为必然的趋势。协同多点(Coordinated Multi-Point, CoMP)传输统一定义为多点协作MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)技术,其主旨是以协作通信的方式传输信号避免或消除同频干扰,并在此基础上优化协作系统的整体性能和改善边缘用户的性能^[1]。而作为未来移动通信网络中一种关键的多天线接入技术,分布式无线移动通信系统以其覆盖范围广、系统容量大和系统功率效率高的特点被广泛认可^[2]。因此分布式无线通信网络和CoMP技术的结合将更有利于实现未来移动通信的发展目标。

目前分布式无线通信系统中CoMP传输模型,通常是由多个RAU协同完成信号的传输^[3]。若用户终端到所有RAU

之间链路的信道状态信息(Channel State Information, CSI)都能获得,则可用预编码的方法变多用户间的干扰为可利用信息,使系统性能得以提升^[4-5]。然而由于受到复杂通信环境的影响,信道状态信息很难被短时、精确地估计,这使得使用一种预编码方法的系统环境适应能力较差。因此,研究多种方式的预编码对同一用户联合传输具有重要的意义。

预编码作为提升无线通信系统性能的链路自适应技术,当前主要的研究集中在基于信道矩阵的非线性预编码、接近最大信道容量的预编码以及联合预编码方面^[6-7]。文献[6]提出了CoMP系统中一个BBU(Base Band Unit)与多个RRU(Radio Remote Unit)以集中化的方式来实现联合编码的策略,使CoMP系统性能得到优化;但该方法却受限于RRU的集中程度以及CSI的精确估计,使之无法使用于分布式无线通信系统中。为了协调上下行链路,文献[7]提出了一种协同预编码的实现方法。一方面采用线性插值信道估计法解决了收发两端码本不匹配的问题;另一方面使用双码本方案减

收稿日期: 2011-09-18; 修回日期: 2011-11-19。 基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20106204120002); 甘肃省高等学校基本科研业务费资助项目(20996); 兰州交通大学“青蓝”人才工程基金资助项目(152006); 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金资助项目(W20091)。

作者简介: 杨军(1973-),男,宁夏吴忠人,副教授,博士,主要研究方向: 计算机图形学、虚拟现实、数字图像处理; 张正孝(1980-),男,甘肃白银人,硕士研究生,主要研究方向: 未来移动通信系统协同传输; 李敏之(1980-),女,甘肃兰州人,博士研究生,主要研究方向: 未来移动通信系统协同传输; 蒋占军(1975-),男,宁夏中卫人,副教授,博士,主要研究方向: 未来移动通信系统基础理论与技术。

小了 CoMP 反馈量,加强了基站间的同步。本文综合分析了上述两种系统的特点,将协同传输联合预编码的思想应用到分布式无线通信系统中,以达到提升系统性能的目的。

1 分布式无线通信网络 CoMP 系统模型

本文主要研究应用的系统模型是由一个统一的 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 系统基带处理单元和多个远端天线单元构成。整个系统可以看作是一个中心基站(Base Station, BS)集中管理下的分布式天线系统,如图1所示。在联合处理(Joint Processing, JP)方式下,协同的RAU为其服务区内的多个移动用户(Mobile Station, MS)提供传输服务;系统利用联合预编码来实现一定质量指标下的有效、可靠传输,特别是提升小区边缘用户性能。

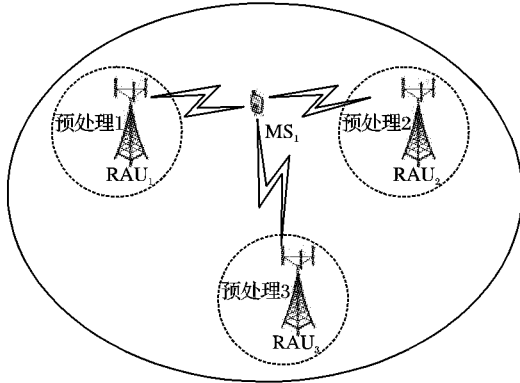


图1 协同传输场景

根据分布式天线系统的特点,假定协同地域内的射频天线接入系统有3个RAU为一个移动台MS提供服务,每个RAU有 m 个发送天线,每个MS有 l 个接收天线。对于下行链路,若第 n 个载波上第 i 个RAU的发送矢量为 $S_i[n] = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$,其中 x 表示天线发送的符号, $(*)^T$ 表示转置,则接收矢量为 $R[n] = H_i[n]S_i[n] + N_i[n]$ 。其中 $R[n] = (y_1, y_2, \dots, y_l)^T$, $y_i (i = 1, 2, \dots, l)$ 为MS天线上接收的信号, $H_i[n]$ 是 $m \times l$ 的复信道矩阵, $N_i[n]$ 是 $l \times 1$ 的复高斯白噪声矢量,均值为0,方差为 σ_n^2 。不失一般性,以下假定 $m = l$ 。

联合处理时根据用户所处地域不同,噪声和干扰的强弱不同,通过上行反馈信息(部分或全部)对信道做出估计,协作的各RAU采用不同的预编码方式 $F_i[n]$ 对数据矢量 $D_i[n]$ 分别进行预处理,即 $S_i[n] = F_i[n]D_i[n]$ 。而接收端则对各链路的信号经过一定准则的合并以得到数据信息。本文采用以下几种预编码方式。

在线性结构下,ZF(Zero Forcing)准则的预编码矩阵如式(1)所示,它是对第 n 个载波上第 i 个RAU发送数据的预编码,矩阵满足功率约束。该方法结构简单,易实现,但抗噪声性能较弱。

$$F_{i,zf}[n] = H_i^H[n](H_i[n]H_i^H[n])^{-1} \quad (1)$$

MMSE(Minimum Mean-Square Error)准则的预编码矩阵如式(2)所示,满足功率约束。相较于ZF准则,该方法可有效克服因信道恶化而带来的系统性能的降低。

$$F_{i,mmse}[n] = H_i^H[n] \left(H_i[n]H_i^H[n] + \frac{\sigma_n^2}{\sigma_s^2} I \right)^{-1} \quad (2)$$

在非线性的THP(Tomlinson-Harashima Pre-coding)算法通过反馈结构对MIMO空域干扰信号进行串行消除。该算法实现方式有多种,本文是对信道矩阵表达式进行QR分解,得到一个正交阵 $G_i[n]$ 和上三角矩阵 $W_i^T[n]$ 。令 $F_i[n] = \text{diag}(1/W_{11}, 1/W_{22}, \dots, 1/W_{MM})$ 其中 W_{kk} 是 $W_i[n]$ 的第 k

个对角线元素,则反馈矩阵为 $B_i[n] = W_i[n]F_i[n]$,从而预编码矩阵如式(3)所示,满足功率约束。

$$F_{i,thp}[n] = G_i[n]F_i[n] \quad (3)$$

2 CoMP 联合预编码方案

由于不同的设计准则下,可以推导出不同的预编码矩阵。在分析上述各种预编码方法的优劣的基础上,结合分布式网络和CoMP提出了一种联合处理预编码的实现方案。该方案的基本思想是选择分布式天线系统中协同的RAU形成协作集合,中心基站根据上行链路的反馈信息估计出可用于传输的各种下行链路状态,动态地选择适合各自的RAU,即:根据导频信息估计出信道参数,依据信号强度阈值选择适合传输的RAU加以协同。各RAU分别传送经过各自预编码后的数据,接收端对接收到的各路信号进行合并处理,以取得最大的接收增益,尽可能减小误码,改善接收质量。

据上所述,方案中多个RAU共同完成对同一用户的联合传输。假设每个节点RAU采用的预编码矩阵是在线性ZF、线性MMSE、ZF_THP及MMSE_THP四种方式中选取,即:

$$F_i[n] \in \{F_{i,zf}[n], F_{i,mmse}[n], F_{i,thp,zf}[n], F_{i,thp,mmse}[n]\} \quad (4)$$

当联合处理单元检测出链路状态较好时,可使用线性ZF或线性MMSE方式进行预编码;而如果链路状态较差时采用复杂度高的ZF_THP或MMSE_THP方式预编码。这种选取是自适应的,它要求上下行信道必须互易。选定预编码矩阵后,根据传输数学模型形成发送信号集:

$$S_i[n] \in \{S_{i,zf}[n], S_{i,mmse}[n], S_{i,thp,zf}[n], S_{i,thp,mmse}[n]\} \quad (5)$$

其中 $S_{i,zf}[n]$ 是采用ZF准则线性预编码方式得到的发送矢量, $S_{i,mmse}[n]$ 是采用MMSE准则线性预编码方式得到的发送矢量, $S_{i,thp,zf}[n]$ 是采用ZF准则非线性预编码方式得到的发送矢量, $S_{i,thp,mmse}[n]$ 是采用MMSE准则非线性预编码方式得到的发送矢量。接收端接收到各协同RAU发送来的信号,分别对各链路进行解预编码,得到一个对应于发送信号集的接收集:

$$R[n] \in \{R_{zf}[n], R_{mmse}[n], R_{thp,zf}[n], R_{thp,mmse}[n]\} \quad (6)$$

对小区边缘用户,接收机采用最大比合并的方式判决接收多链路信号,以获得分集增益与合并增益,接收权重为式(7)。其中 $r_k[n]$ 是第 k 个天线,第 n 个载波的接收信号矢量; $E\{r_k[n]r_k^H[n]\}$ 是 $r_k[n]$ 的自相关矩阵。最终接收数据矢量为式(8)。

$$w_{i,opt}[n] = \frac{H_i[n]}{\sum_{k=1}^{n_r} E\{r_k[n]r_k^H[n]\}} \quad (7)$$

$$R_i[n] = \sum_{k=1}^{n_r} R_{i,k}[n]w_{i,opt}[n] \quad (8)$$

3 仿真结果

应用仿真软件对上文提到的各种预编码方法和联合传输预编码方案进行仿真分析,性能参数用信噪比(Signal-to-Noise Rate, SNR)和误码率(Bit Error Rate, BER)曲线来描述。

仿真条件 使用16-QAM方式基带调制;OFDM系统进行信号变换,FFT/IFFT变换长度512 b,循环前缀(Cyclic Prefix, CP)为128 b;3个RAU协同传输;每个RAU有2个发送天线;每个MS有2根接收天线;信道为MIMO信道;噪声为加性高斯白噪声。

非协同传输时,ZF 准则线性预编码、MMSE 准则线性预编码以及 THP 非线性预编码系统误码率曲线如图 2 所示。从图 2 中可知非线性预编码性能优于线性预编码,基于 MMSE 准则的预编码性能优于 ZF 准则的预编码。可见,在非协同环境 MMSE 准则下预编码具有较高的抗干扰特性,但当该方法在信道复杂多变的场景中不具有持久稳定的性能效果。

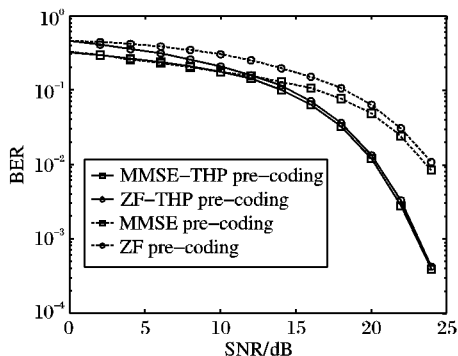


图2 各种预编码性能比较

协同传输时,发送端使用多条链路为同一用户服务,以获得分集增益。分布式无线网络下多点协同传输联合预编码误码率性能体现为图 3 和图 4 中曲线。下面分别对线性预编码和非线性预编码协同传输方案进行比较。

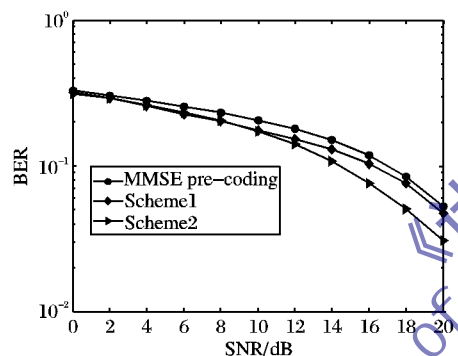


图3 联合传输线性预编码性能比较

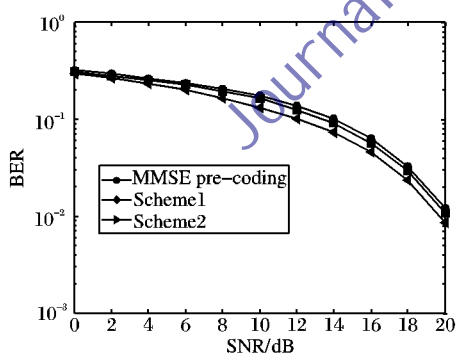


图4 联合传输非预编码性能比较

线性预编码时采用两种协同方案如下。

方案1 RAU1 和 RAU2 共同使用 $F_{i,mmse}[n]$ 的联合预编码,其误码率曲线为 Scheme1。

方案2 RAU1 和 RAU2 分别使用 $F_{i,zf}[n]$ 或 $F_{i,mmse}[n]$ 的联合预编码,误码率曲线为 Scheme2。

由图 3 可知,相对于单独的线性预编码传输,方案 1 在误码率性能上有一定的改善,相同误码率下可获得 1 dB 左右的增益;而方案 2 在方案 1 基础上进一步降低了误码率,相应的系统性能提升约为 2 dB。

非线性预编码时亦采用两种协同方案,如下。

方案3 3 个 RAU 共同使用 $F_{i,thp_zf}[n]$ 的联合预编码,误码率曲线为 Scheme3。

方案4 3 个 RAU 分别使用 $F_{i,thp_zf}[n]$ 、 $F_{i,thp_mmse}[n]$ 和 $F_{i,mmse}[n]$ 的联合预编码,误码率曲线为 Scheme4。

由图 4 可知,采用协同方法的方案 3 其误码率性能相较于单独非线性预编码有相应地提高;而方案 4 的应用虽在一定程度上增加了接收端的复杂度,但其再一次降低了误码率,可获得 1 dB 左右的增益。

4 结语

对多点协同传输技术在分布式无线通信系统上进行了建模,分析了各种预编码的优劣,重点对小区边缘用户误码率性能指标进行了仿真评估,提出了在发送端进行联合预编码,各 RAU 协同传输,接收端合并处理的策略。仿真实验结果表明,多个 RAU 协同预编码方式具有很强的环境适应能力,即使在信道恶化情形下也能有较好的接收质量。联合预编码传输方案对系统性能有重要的影响,能很好地抑制小区间的干扰,降低小区边缘用户的误码率,是未来多点协同传输技术广泛应用所要考虑的重要因素之一。

参考文献:

- [1] NAM Y H, LIU L J, YAN W, *et al.* Cooperative communication technologies for LTE-advanced [C] // ICASSP 2010: Proceedings of the 35th International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Dallas: IEEE, 2010: 5610–5613.
- [2] 蒋占军, 赵新胜, 尤肖虎. 一种分布式无线移动通信系统中远端天线单元动态选择模型[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(2): 305–309.
- [3] JUNGNIICKEL V, JAECKEL S, THIELE L, *et al.* Capacity measurements in a cooperative multi-cell MIMO network [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(5): 2392–2405.
- [4] BANDEMER B, HAARDT M, VISURI S. Linear MMSE multi-user MIMO downlink pre-coding for users with multiple antennas[C] // Proceedings of IEEE the 17th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Helsinki: IEEE, 2006: 1–5.
- [5] BUSCHE H, VSNSEV A, ROHLING H. SVD-based MIMO pre-coding and equalization schemes for realistic channel knowledge: Design criteria and performance evaluation [J]. Wireless Personal Communications, 2009, 48(3): 347–359.
- [6] 魏宁, 李少谦. LTE-A 中协同多点传输的联合处理预编码方法[J]. 中兴通讯技术, 2010, 16(1): 37–43.
- [7] 张鸿涛, 张禹强, 隋成良, 等. 一种实现协同预编码的方法和系统: 中国, 102130754 [P]. 2011–07–20.

(上接第 909 页)

- [19] KERNER B S. Three-phase traffic theory and highway capacity[J]. Physica A: Statistical and Theoretical Physics, 2004, 333: 379–440.
- [20] KENDALL M G. 多元分析[M]. 中国科学院计算中心概率统计组, 译. 北京: 科学出版社, 1983.
- [21] WANG TAO, WANG JUN-FENG. An adaptive EBCA model probing the problem of riding against the traffic flow[J]. International Journal of Modern Physics C, 2011, 22(2): 191–208.
- [22] 王涛, 王俊峰, 罗积玉, 等. 基于时空分析的复杂交通流数据挖掘算法[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2011, 43(5): 153–158.