

## 异构网中多天线用户吞吐量性能分析

鲍慧,石盼

(华北电力大学 电气与电子工程学院,河北 保定 071003)

**摘要:**针对异构网络中多种网络形式互干扰的问题,提出将协作多点传输技术应用于异构网络进行干扰消除。在用户终端配置多根天线的条件下,联合考虑基站间协作传输时延和信道量化误差对干扰消除的影响,利用数学理论推导这两种非理想因素导致的系统吞吐量损失,得出吞吐量损失的理论上限。仿真结果表明,采用协作多点传输技术能够减小吞吐量损失,对实际系统具有指导意义。

**关键词:**异构网;协作多点;传输时延;量化误差

**中图分类号:**TN911.23

**文献标志码:**A

### Performance Analysis of Throughput for Multi-antenna User in Heterogeneous Networks

BAO Hui, SHI Pan

(School of Electrical and Electronic Eng., North China Electric Power Univ., Baoding 071003, China)

**Abstract:** In order to solve the mutual interference problem in heterogeneous networks, the coordinated multi-point (CoMP) transmission technology was proposed to interference elimination for heterogeneous networks. When the end users configure multiple antennas, the coordinated transmission delay and channel quantization errors were considered jointly how to affect the interference elimination. By mathematical theory, the system throughput loss caused by the negative factors was analyzed, and the theoretical throughput loss upper bound was obtained. The simulation results showed that the throughput loss can be decrease by CoMP technology, which is meaningful for the actual system.

**Key words:** heterogeneous networks; coordinated multi-point (CoMP); transmission delay; quantization errors

异构网络是第五代移动通信系统的关键技术之一,其可以增加系统的吞吐量,改善小区边缘用户的服务质量,而微蜂窝基站的引入导致微蜂窝基站和宏蜂窝基站对彼此边缘用户的干扰。协作多点(CoMP)传输技术可以利用宏蜂窝基站与微蜂窝基站间的协作波束成形,将异构网络小区间的干扰消除。因此,将CoMP技术引入到异构网络可以提高整个系统的吞吐量性能,吞吐量是衡量第五代移动通信系统的主要指标,具有现实意义。

目前,针对异构网络干扰消除的研究已经取得一定成果。以往多数CoMP研究仅仅是将其应用于传统的宏蜂窝基站之间<sup>[1]</sup>,并未应用于异构场景。文献[2]提出了一种基于能源效率的异构网络

CoMP波束成形方案,通过干扰消除使系统的能源效率大大提高,但该方案是在假设信道状态信息完整的情况下提出。文献[3]研究的CoMP方案根据协作基站间回程网络容量无限大的场景进行设计,但随着移动用户数的增加,回程网络容量已无法承载过多的信息交互。为了减小用户信道状态信息数据量,文献[4]将有限反馈策略引入到异构CoMP方案中,但同时带来了反馈量化误差这个不利因素,且未对其分析。此外,协作基站间的回程网络存在开销时延,协作基站并不能及时收到用户的信道状态信息,波束成形设计受到不利影响。文献[5]建立了开销时延为定值的模型,但是实际系统中,时延往往是随机的。文献[6]根据终端用户配置单根天线

收稿日期:2015-06-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61302105;61501185);北京市自然科学基金资助(4164101)

作者简介:鲍慧(1962—),女,副教授。研究方向:无线通信;宽带网络。E-mail:baohui20131228@126.com

网络出版时间:2016-5-13 10:39:57 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/51.1596.T.20160513.1039.001.html>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

的情况,分析了信道开销时延对系统吞吐量性能的影响,但实际情况通常是终端用户配置多根天线的场景。

以往针对异构 CoMP 的研究只是独立地考虑信道开销时延或量化误差对系统性能的影响,本文最主要的创新之处是联合考虑开销时延和量化误差对系统吞吐量性能的影响。采用块衰落信道开销时延模型,利用有限的量化反馈比特,通过块对角化波束成形方案,推导出完整信道状态信息和非完整信道状态信息下用户吞吐量差值,仿真得出 2 个不利因素如何影响系统吞吐量性能。

## 1 系统模型

考虑异构蜂窝网络下行传输过程,其由  $K$  种接入网络(如宏蜂窝网络、微蜂窝网络、家庭小区网络等)组成,对于第  $k$  种网络类型,基站的发送功率为  $P_k$ ,天线数目为  $N_k$ ,路径损耗指数为  $\alpha_k$ 。假设  $X_{i,k}$  为第  $k$  层网络中距离终端用户第  $i$  个邻近的基站位置,即可以表示为  $X_{i,k} (k = 1, 2, \dots, K, i \in \mathbb{N})$ 。为了使基站之间能够进行协作,终端用户需要探测不同基站的下行导频信号并度量出其平均功率,终端用户会选择信号功率为最大值,即  $\max_{k=1,2,\dots,K,i \in \mathbb{N}} \{P_k \cdot |X_{i,k}|^{-\alpha_k}\}$  的基站作为服务基站,选择服务基站的索引可表示为:

$$\{i^*, k^*\} = \arg \max_{k=1,2,\dots,K,i \in \mathbb{N}} \{P_k |X_{i,k}|^{-\alpha_k}\} = \arg \max_{k=1,2,\dots,K} \{i^* = 1, P_k |X_{1,k}|^{-\alpha_k}\} \quad (1)$$

因此,可以将服务基站表示为  $BS_{1,k^*}$ , 设与服务基站进行协作的基站共  $L_{1,k^*}$  个,协作基站的集合可以表示为  $S_{1,k^*}$ 。

由于利用 CoMP 方案来消除非服务小区对终端用户的干扰,故有必要研究小区间的开销信息对 CoMP 方案的影响,开销信息主要是用户的信道状态信息。采用独立同分布(i. i. d.)的块衰落模型<sup>[7]</sup>,假设开销信息在时间  $T_{i,k}$  内保持恒定,随后产生新的块衰落,则开销信息也会更新为下一个独立同分布(i. i. d.)值,开销信息的平均变化速率可以表示为  $\eta_{i,k} = \frac{1}{E[T_{i,k}]}$ ,考虑时间  $T_{i,k}$  服从伽玛(Gamma)分布,即

$$T_{i,k} \leftrightarrow \Gamma(Q, \frac{1}{Q\eta_{i,k}}) \quad (2)$$

式中,  $Q$  为伽玛分布的模型参数。在采用独立同分布(i. i. d.)的块衰落模型下,开销信息每经过时间  $T_{i,k}$  就会更新,由于开销信道存在时延使开销信息

并不能及时到达协作基站,进而影响了基站协作的效果,假设开销时延为  $D_{i,k}$ 。

采用块对角化(block diagonalization, BD)算法对基站所发信号进行波束成形(beam forming, BF),波束成形矢量为  $\mathbf{F}_{i,k}$ 。在 CoMP 块对角化波束成形(BDBF)中,考虑开销信息的主要参数为信道的方向信息,即有:

$$\tilde{\mathbf{H}}_{i,k} = \frac{\mathbf{H}_{i,k}}{\|\mathbf{H}_{i,k}\|_F} \quad (3)$$

式中,  $\mathbf{H}_{i,k}$  为  $N_k \times M$  维的基站和终端用户间的信道衰落矢量,  $M$  为用户接收天线数。根据独立同分布(i. i. d.)的块衰落模型,在时间  $T_{i,k}$  内  $\mathbf{H}_{i,k}$  保持恒定。根据文献[8],可以对信道方向信息  $\tilde{\mathbf{H}}_{i,k}$  进行变换,即:

$$\tilde{\mathbf{H}}_{i,k} = \hat{\mathbf{H}}_{i,k} \mathbf{V}_{i,k} \mathbf{Y}_{i,k} + \boldsymbol{\xi}_{i,k} \mathbf{Z}_{i,k} \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{V}_{i,k} \in \Omega^{M \times M}$  满足高斯漫流型分布  $G_{M,M}$ ;  $\mathbf{Z}_{i,k} \in \Omega^{M \times M}$  为上三角形矩阵,并满足  $\text{tr}(\mathbf{Z}_{i,k}^H \mathbf{Z}_{i,k}) = d^2(\mathbf{H}_{i,k}, \hat{\mathbf{H}}_{i,k})$ ;  $\mathbf{Y}_{i,k} \in \Omega^{M \times M}$  同样为上三角形矩阵,且满足  $\mathbf{Y}_{i,k}^H \mathbf{Y}_{i,k} = \mathbf{I}_M - \mathbf{Z}_{i,k}^H \mathbf{Z}_{i,k}$ , 其中,  $\mathbf{I}_M$  为单位矩阵;  $\boldsymbol{\xi}_{i,k} \in \Omega^{N_k \times M}$  为  $\hat{\mathbf{H}}_{i,k}$  的左零空间正交基;  $\hat{\mathbf{H}}_{i,k}$  为  $\mathbf{H}_{i,k}$  的量化矩阵。

在每个块衰落的开始,终端用户都会根据码本  $C_{i,k}$  来探测衰落矢量  $\mathbf{H}_{i,k}$ 。码本  $C_{i,k}$  由  $2^{B_{i,k}}$  个码字组成,在码本  $C_{i,k}$  中选择码字  $\mathbf{c}_{i,k}$ ,使其满足  $\hat{\mathbf{H}}_{i,k} = \arg \min_{\mathbf{c}_{i,k} \in C_{i,k}} d^2(\mathbf{H}_{i,k}, \mathbf{c}_{i,k})$  值最大。终端用户利用  $B_{i,k}$  比特将码字  $\mathbf{c}_{i,k}$  反馈回服务基站  $BS_{1,k^*}$ ,通过开销信道传输给协作基站。根据开销信息设计波束成形矢量,满足  $|\mathbf{F}_{i,k} \mathbf{c}_{i,k}|^2 = 0$ 。考虑弦距离的定义:

$$d(\mathbf{H}_{i,k}, \mathbf{c}_{i,k}) = \sqrt{\sum_{j=1}^M \sin^2 \theta_j} \quad (5)$$

式中,  $\theta_j$  为矩阵  $\mathbf{H}_{i,k}$  和  $\mathbf{c}_{i,k}$  的列向量间的角度,  $\mathbf{c}_{i,k}^H \mathbf{c}_{i,k} = \mathbf{I}_M, \forall \mathbf{c}_{i,k} \in C_{i,k}$ 。定义  $\mathbf{H}_{i,k}$  与给定码本  $C_{i,k}$  间的量化误差为:

$$\mu \triangleq E[d^2(\mathbf{H}_{i,k}, \hat{\mathbf{H}}_{i,k})] = E[\min_{\mathbf{c}_{i,k} \in C_{i,k}} d^2(\mathbf{H}_{i,k}, \mathbf{c}_{i,k})] \quad (6)$$

由文献[9]可知  $\mu \leq \bar{\mu}$ ,当码本大小为  $2^{B_{i,k}}$  时,量化误差取最大值:

$$\bar{\mu} = \frac{\Gamma(\frac{1}{W})}{W} (C_{N_k M})^{-\frac{1}{W} 2^{-\frac{B_{i,k}}{W}}} + M \exp[-(2^{B_{i,k}} C_{N_k M})^{1-a}] \quad (7)$$

且  $W = M(N_k - M), a \in (0, 1)$  满足

$$C_{N_k M} = \frac{1}{W!} \prod_{i=1}^M \frac{(N_k - i)}{(M - i)}, (C_{N_k M} 2^{B_{i,k}})^{-\frac{a}{W}} \leq 1。$$



基站发射天线数、用户接收天线数多个因素相关。

### 3 仿真结果及分析

考虑一个3层的异构蜂窝网络,其由宏蜂窝基站、微蜂窝基站以及家庭基站组成,其中,服务基站是宏蜂窝基站。令服务基站  $BS_{1,k}$  与其他  $L_{1,k}$  个对用户终端干扰较大的基站进行协作,此时,用户终端的干扰可以最大限度地消除。通过 MATLAB 搭建异构网络仿真环境,其主要仿真参数如表1所示。

表1 仿真参数设置

Tab.1 Simulation parameter settings

参数	参数描述	参数设置
$P_k/W$	第 $k$ 层发射功率	$P_1 = 40, P_2 = 2, P_3 = 0.2$
$N_k$	第 $k$ 层基站发射天线数	$N_1 = 8, N_2 = 4, N_3 = 2$
$M/ms$	用户接收天线数	$M = 2$
$T_{i,k}$	信道衰落块长度	80
$t_{i,k}$	$BS_{i,k}$ 协作阶段时间比例	非定值
$B_{i,k}/bit$	$BS_{i,k}$ 开销量化比特数	非定值

#### 3.1 开销时延对吞吐量特性的影响

当用户终端配置单根天线和多根天线的情况下,时延对系统的影响程度是不一样的<sup>[12]</sup>。图1为存在开销时延的情况下,分别采用迫零对角化波束成形(ZFBF)和块对角化波束成形(BDBF)算法,得到用户终端的吞吐量。

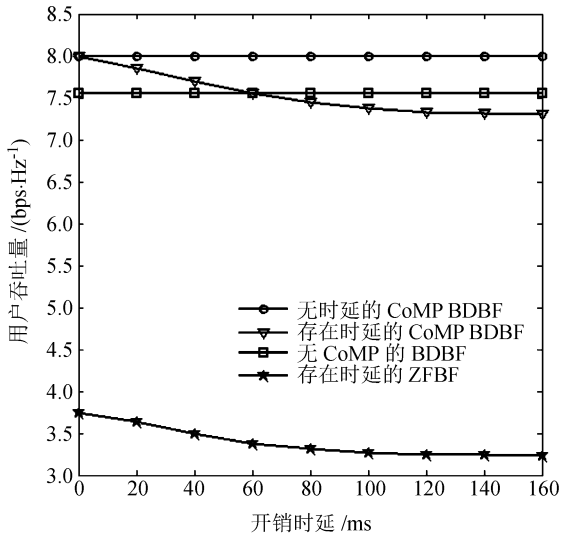


图1 开销时延对吞吐量的影响

Fig.1 Effects on throughput of overhead delay

由图1可知,不采用 CoMP 方案时,系统吞吐量性能较差,采用 CoMP 方案且不存在开销时延时,系统的吞吐量性能最好。开销时延对配置多天线用户终端的不利影响更严重,其衰落速率也较大。当开销时延增大时,用户吞吐量随其下降,当开销时延

大于块衰落时间  $T_{i,k}$  的 70% 时,CoMP 方案将不会带来任何增益。

#### 3.2 协作基站数对吞吐量的影响

在采用 CoMP 方案时,重要的问题是如何选择相邻的基站进行协作,以及协作基站的数量多大。选择多个基站进行协作,可以最大限度地消除其他小区对终端用户的干扰,但是,大大增加了开销信息的交互时延,基站间的回程网络容量也要扩大。当网络是多层的异构蜂窝网络时,考虑信道开销时延和回程网络容量受限的情况下,由图2可知,协作基站的数量为2(即  $L_{1,k} = 2$ ) 时,终端用户的吞吐量将达到最大值。这表明在非理想因素的限制条件下过多的协作基站信息交互已不能给终端用户的吞吐量带来高增益。

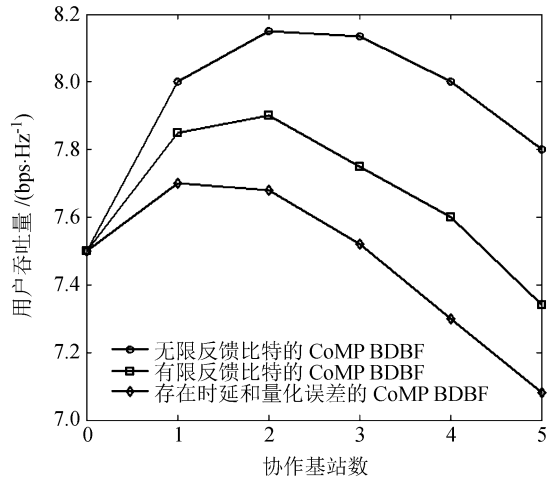


图2 协作基站数对吞吐量的影响

Fig.2 Effects on throughput of coordinated base station number

#### 3.3 开销时延和量化误差对吞吐量损耗的影响

已经推导出在联合考虑开销时延和量化误差的情况下,用户吞吐量损耗的上界。下面通过仿真,联合分析开销时延和量化误差对吞吐量损耗的影响。由图3可知,量化比特为10 bit 时,随着开销时延的增加,用户吞吐量的损耗也在增大,当时延大于一个块衰落时间后,吞吐量的损耗将趋于一个定值。

图4为在时延为20 ms 的情况下,量化比特对吞吐量损耗的影响。由图4可知,随着量化比特的增加,终端用户的吞吐量损耗呈现出线性减小的现象,这说明量化比特越大,系统的量化误差也就越小。

### 4 结论

联合分析了异构蜂窝网络中2个非理想因

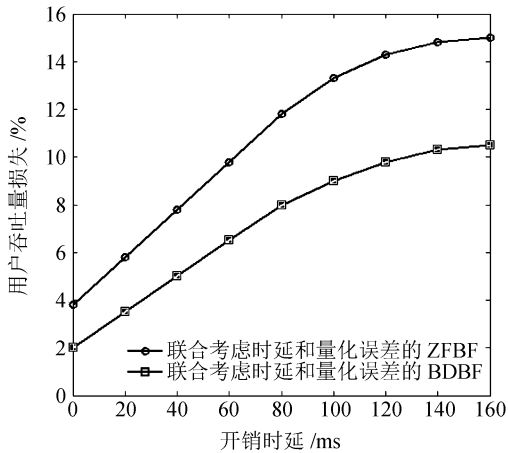


图 3 量化比特为 10 bit 时开销时延对吞吐量损耗的影响

Fig. 3 Effects on throughput loss of overhead delay when the quantization bit is 10 bit

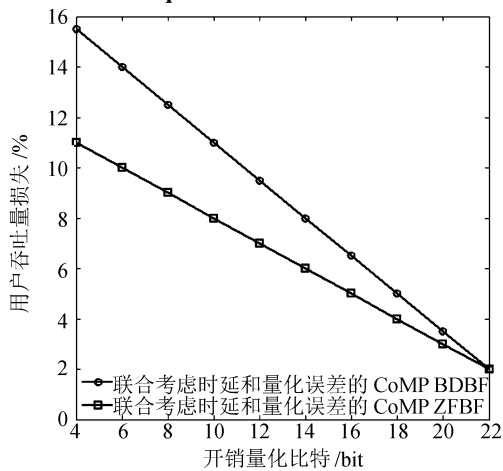


图 4 开销时延为 20 ms 时量化比特对吞吐量损耗的影响

Fig. 4 Effects on throughput loss of quantization bits when the overhead delay is 20 ms

素——基站间信道开销时延和开销量化误差对系统吞吐量性能的影响。通过采用块衰落时延模型,在用户终端配置多根天线的情况下,利用块对角化波束成形算法,推导出用户终端的理想和非理想吞吐量的差值,得到影响异构蜂窝网络吞吐量的因素,对于实际系统的设计具有指导意义。本文的计算基于独立同分布的块衰落时延模型,该模型使分析较方便,但在进一步的工作中,可以考虑更加复杂的时延模型来分析时延因素对系统性能的影响,例如离散时间马尔可夫模型。

#### 参考文献:

- [1] Gesbert D, Hanly S, Huang H, et al. Multi-cell MIMO cooperative networks: A new look at interference [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, 28 (9): 1380 - 1408.
- [2] Xu Z, Yang C, Li G Y, et al. Energy-efficient CoMP pre-

coding in heterogeneous networks [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62 (4): 1005 - 1017.

- [3] Li Y N R, Li Jian, Li Weimin, et al. CoMP and interference coordination in heterogeneous network for LTE-advanced [C] // Proceedings of the 2012 IEEE Globecom Workshops. Anaheim, CA: IEEE, 2012: 1107 - 1111.
- [4] Rao X, Ruan L, Lau V K N. Limited feedback design for interference alignment on MIMO interference networks with heterogeneous path loss and spatial correlations [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61 (10): 2598 - 2607.
- [5] Akoum S, Heath R W. Limited feedback for temporally correlated MIMO channels with other cell interference [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58 (10): 5219 - 5232.
- [6] Xia P, Liu C H, Andrews J G. Downlink coordinated multi-point with overhead modeling in heterogeneous cellular networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12 (8): 4025 - 4037.
- [7] Tse D, Viswanath P. Fundamentals of wireless communication [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [8] Ravindran N, Jindal N. Limited feedback-based block diagonalization for the MIMO broadcast channel [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26 (8): 1473 - 1482.
- [9] Dai W, Liu Y, Rider B. Quantization bounds on Grassmann manifolds and applications to MIMO communications [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54 (3): 1108 - 1123.
- [10] Trivellato M, Boccardi F, Huang H. On transceiver design and channel quantization for downlink multiuser MIMO systems with limited feedback [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26 (8): 1494 - 1504.
- [11] Edelman A, Rao N R. Random matrix theory [J]. Acta Numerica, 2005, 14: 233 - 297.
- [12] Gesbert D, Shafi M, Shiu D, et al. From theory to practice: An overview of MIMO space-time coded wireless systems [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 21 (3): 281 - 302.