

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.07.016

基于信漏噪比的异构网络载波干扰协调技术*

黄 岚**,孙长印,卢光跃,姜 静

(西安邮电大学 通信与信息工程学院,西安 710061)

摘 要:针对异构网络存在小区间干扰的问题,提出了一种基于频域载波聚合的干扰协调管理机制。该机制将所有小区的用户分为中心用户和边缘用户,采用可降低干扰的信漏噪比(SLNR)准则,动态调度用户和选择小区载波,并将每种小区载波选择方案对应一种调度用户分组的机制,即对小区的中心用户和边缘用户采用不同优先级,以此有效避免小区间的干扰,其中优先级采用比例公平和 SLNR 准则。仿真结果表明,由于在系统目标最大化时实现了频率复用增益和干扰消除增益间实现最佳的平衡,可有效取得系统流量的分流和总吞吐量的提升。

关键词:LTE-A;异构网络;载波聚合;信漏噪比;干扰协调

中图分类号:TN929.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)07-0904-05

Interference Coordination Technology Based on Signal-to-Leakage Plus-Noise Ratio with Carrier Aggregation in Heterogeneous Networks

HUANG Lan, SUN Chang-yin, LU Guang-yue, JIANG Jing

(School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to minimize inter-cell interference in heterogeneous networks, a new interference coordination mechanism based on carrier aggregation is proposed. The proposed method first divides the users into center users and edge users, then uses the signal-to-leakage-plus-noise ratio(SLNR) criterion to schedule the different users across the cells to share the same carrier resources. As a result, the method selects cells and carriers dynamically, and schedules users corresponding to each specific combination of carrier and cell. The scheduling method is based on modified PFS and SLNR criterion which gives different priority for center users and edge users. Simulation results show that the proposed scheme can realize the best tradeoff between the gain of frequency reuse and interference avoidance when maximizing the system objective, so as to effectively offload system flow from the Macro cell to Pico cell and improve system throughput.

Key words: LTE-A; heterogeneous network; carrier aggregation; SLNR; interference coordination

1 引 言

在 LTE-A 系统中部署异构网络是提高边缘小区性能^[1]的重要途径之一。异构网络是将微基站(Pico)等低功率节点部署在高功率节点如宏基站

(Macro)小区内部,形成由不同类型节点组成的网络,其中 Macro 和 Pico 小区载波配置相同。由于 Pico 基站分布随机、Pico 与 Macro 发射功率差异较大以及传输路径损耗等原因,异构网络普遍存在的问题是小区间的干扰,解决的关键方案是在异构网络

* 收稿日期:2013-01-08;修回日期:2013-03-19 Received date:2013-01-08;Revised date:2013-03-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61102047,61271276);国家科技重大专项(2012ZX03001025-004);陕西省教育厅自然科学基金资助项目(2013JK1045,11JK1016)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(No.61102047,61271276);The National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China(2012ZX03001025-004);The Natural Science Foundation of Education Department of Shaanxi Province(2013JK1045,11JK1016)

** 通讯作者:huangl0928@163.com Corresponding author: huangl0928@163.com

中进行干扰协调管理。目前,3GPP-LTE 致力于研究小区间干扰协调(Inter-cell Interference Coordination, ICIC)的标准化方案,核心是对无线资源在干扰基站间进行时域、频域和空分域的协调。ICIC 在 LTE-A 中称为增强型小区间干扰协调(eICIC),它是实现基于覆盖距离扩展^[2]的异构网络系统容量提升的根本。

载波聚合(Carrier Aggregation, CA)技术作为主要的频域 eICIC 方案,不仅将多个独立的成员载波(Component Carrier, CC)聚合为大带宽,而且也使调度者可以采用静态或半静态方式在多个成员载波上任意快速切换,即可以在一个载波上发送控制信息的同时,在另一个载波上发送数据信息。因此可对 Macro 小区和 Pico 小区分别用不同的载波来调度控制信息和数据信息,以此有效避免干扰;当干扰处于 Pico 小区中心用户可接受范围内,可在同频载波上调度 Pico 小区的中心用户和 Macro 小区的用户;当干扰超出 Pico 小区中心用户可承受的范围,则可在不同载波上调度 Pico 小区和 Macro 小区的用户。

已有文献对载波资源的分配^[3-5]、载波选择^[6-7]和干扰协调机制^[8]进行了研究,但上述文献的研究主要针对同构网络或家庭基站场景,没有涵盖室外异构网络场景,也没有考虑如何更有效地避免干扰,且频谱利用率较低。本文针对典型异构网络场景,提出了基于信漏噪比(Signal-to-Leakage-plus-Noise Ratio, SLNR)准则的动态干扰协调管理机制,并通过与文献^[10]的比较验证了该机制下方案的可行性。

2 异构网络系统模型

本文研究的典型异构网络场景为:Macro 小区内包含若干个随机分布的 Pico 小区,用户随机分布在小区内,如图 1 所示。

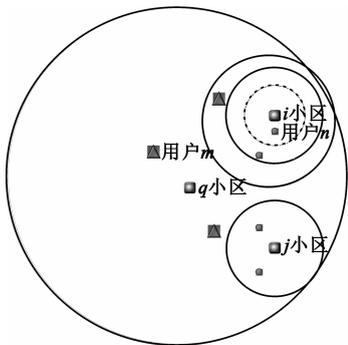


图 1 异构网络场景

Fig.1 The scene of a heterogeneous network

为简单起见,假设有 1 个 Macro 小区和 2 个 Pico

小区的异构网络中有 M 个用户和 K 个载波。由于研究基于块衰落场景,故信号功率在每个时隙保持不变。 $\mathbf{A} = \{a_{k,m} | a_{k,m} \in \{0,1\}\}_{K \times M}$ 为用户的载波选择矩阵,1 表示用户 m 选择载波 k ,0 表示未选中该载波。

假设处于小区 q 载波 k 上的用户 m 在 t 时隙接收到本小区 q 的信号功率为 $S_{q,k,m}$,接收邻小区 i 的干扰信号为 $S_{i,k,m}$, $i \neq q$,噪声是零均值的高斯白噪声,方差为 N_0 ,则用户 m 的信噪比 ξ 为

$$\xi_{q,k,m} = \frac{S_{q,k,m}}{\sum_{i,i \neq q} a_{k,i} S_{i,k,m} + N_0} \quad (1)$$

用户 m 的吞吐量由香农公式得出:

$$R_{q,m} = \sum_{k=1}^K \text{lb}(1 + \xi_{q,k,m}) = \sum_{k=1}^K R_{q,k,m} \quad (2)$$

则在某时隙 t ,系统总吞吐量为所有用户吞吐量之和:

$$R = \sum_q \sum_{k=1}^K a_{k,q} R_{q,k,m} \quad (3)$$

基于载波选择的干扰管理机制在于兼顾用户公平性的前提下为载波选择 $a_{k,m}$ 使系统总吞吐量 R 最大。

3 基于 SLNR 准则的载波干扰协调管理

为了抑制小区间的干扰,提高系统的吞吐量性能,本节在干扰协调管理机制中引入了 SLNR 准则。

信漏噪比准则中的泄漏是指传送给目标用户的小区基站信号对其他激活小区用户造成的干扰,用目标用户泄漏到其他小区用户上的信号功率来度量。SLNR 定义为用户信号功率与用户泄露到其他用户功率和噪声之和的比值。由图 1 看出,当 Macro 小区和两个 Pico 小区用户都处于激活状态时,Macro 小区用户 m 的信漏噪比 δ 为

$$\delta_{q,k,m} = \frac{S_{q,k,m}}{\sum_{m \neq n, n \in U_i} a_{k,n} S_{q,k,n} + N_0} \quad (4)$$

其中, $S_{q,k,n}$ 为处于小区 i 载波 k 上的用户 n 在 t 时隙接收到基站 q 的信号功率, U_i 为干扰小区用户集合。

由于实际中要考虑系统整体吞吐量,则定义系统 SLNR δ 为系统中激活用户的 SLNR 之和:

$$\delta = \sum_{q,m} \delta_{q,k,m} \quad (5)$$

δ 在某成员载波 k 上的值越大,说明该系统中激活小区的的用户间干扰最小。而干扰是影响吞吐量

的重要因素之一,因此可以通过最大化系统 SLNR 来最大化系统吞吐量。

3.1 用户选择小区及用户分组

用户小区选择对异构网络的分裂增益影响极大,故在最大化式(5)前,首先要解决用户服务小区选择问题,常见方式有3种,一是基于用户到服务小区基站的路损最小,二是基于用户接收到服务小区基站功率最大,三是基于用户接收到服务小区基站信噪比最大。在异构网络场景,由于后两种方式有上下行覆盖不平衡的问题,故本文采用简洁有效的基于路损最小的方式选择用户。实现用户小区选择的方法是首先计算所有用户集合到各 Pico 小区基站的距离,其次由计算距离判断用户所属服务小区,落在某一 Pico 小区半径范围内的用户子集属于该 Pico 小区,用户差集属于 Macro 小区。

干扰协调时除了考虑用户选择小区的因素之外,由于考虑到边缘小区用户受邻小区干扰极大,因此仅为用户区分所属小区是不够的。本文研究基于 SLNR 准则是在用户小区选择基础上,将对同组其他用户干扰最小的用户分为一组,通过该方式实现对小区和载波的协调管理。为此,将各小区的用户分为边缘用户与中心用户,区分边缘用户和中心用户同样采用基于路损的方式。针对 Macro 基站用户集合,若其到 Pico 小区基站的距离落在 Pico 小区半径的 110% 范围内,如图 1 用户子集落在小区 i 外虚线范围之内,则说明该用户子集属于 Macro 小区的边缘用户;对 Pico 小区用户集合而言,若该小区用户子集到该小区基站的距离大于小区半径的 90%,如图 1 落在小区 i 内虚线范围之外,则该用户子集属于该 Pico 小区的边缘用户。

3.2 基于 SLNR 准则的协作小区载波选择和用户调度

式(5)求解包括求解最优载波选择向量 $a_{k,m}$ 和小区最佳用户调度。由于这两个问题相互制约,难以直接求解,为此,分解为两个子过程求解。

(1)对成员载波 k ,逐步增加各个小区在该载波上的干扰泄露,即令选择向量集为

$$a_{k,q} = \{ \{1,0,0\}; \{0,1,0\}; \{0,0,1\}; \{1,1,0\}; \{1,0,1\}; \{0,1,1\}; \{1,1,1\} \},$$

其中, $\{1,1,0\}$ 表示 Macro 小区和 Pico1 小区处于激活状态,而 Pico2 小区处于静默状态;

(2)针对选择向量集中各元素,在每个小区依据表 1 调度机制,选择最佳用户。本文采用基于 SLNR

的载波干扰协调机制,在减小用户间干扰和兼顾用户间公平性的前提下调度用户。

表 1 协作小区调度用户机制

Table 1 Coordination cell user scheduling mechanism

小区状态	调度机制
111	分别调用 3 个小区的中心用户,其中分别采用 PFS 算法从各小区用户集中选择一个最优用户
110	Macro 小区中根据 PFS 准则在边缘用户中选择用户,针对 Pico1 中小区,根据 SLNR 最大准则选择 Pico1 中的用户
101	Macro 小区中根据 PFS 准则在边缘用户中选择用户,针对 Pico2 中小区,根据 SLNR 最大准则选择 Pico2 中的用户
011	对 Pico1 和 Pico2 中负载较小的小区,根据 PFS 算法选择用户,并根据 SLNR 最大准则选择负载较小小区中的用户
100	采用 PFS 算法选择 Macro 小区用户
010	采用 PFS 算法选择 Pico1 小区用户
001	采用 PFS 算法选择 Pico2 小区用户

备注:小区状态标注顺序为 Macro、Pico1、Pico2,其中 1 表示小区激活,0 表示小区静默,如 110 表示 Macro 小区和 Pico1 小区激活,Pico2 小区静默。

4 仿真结果

本节仿真基于 SLNR 的载波干扰协调机制,并与文献[9]进行对比。异构网络包含 1 个 Macro 小区和 2 个 Pico 小区,用户随机散落在各小区。考虑到方案的实用性,仿真参数基于 LTE-A 系统,即载波带宽为 10 MHz,Macro 基站和 Pico 基站发射功率分别为 43 dBm 和 20 dBm,阴影衰落方差为 8 dB,每个小区配置 2 个载波,系统中共有 40 个用户,其他具体仿真参数如表 2 所示。

表 2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters

参数	值
噪声功率/dB	$-173.9 + 10 \times \lg 10^7 + 9$
Macro 小区路损/dB	$128.1 + 37.6 \times \lg R$, R 单位: km
Pico 小区路损/dB	$140.7 + 37.6 \times \lg R$, R 单位: km
Macro 小区半径/m	500
Pico1、Pico2 小区 距离扩展/m	130
业务模型	Full Buffer

图 2 是 Macro 小区在不同算法下的吞吐量累积概率分布(Cumulative Distribution Function, CDF)。为

了比较,图中同时给出了小区间频率复用因子为 1 的载波配置性能曲线。当系统中有 40 个用户、Macro 基站与 Pico 基站发射功率分别为 43 dBm 和 20 dBm、小区半径分别为 500 m 和 130 m 时,观察在累积概率分布达到 90% 时,基于 SLNR 的小区吞吐量仅为 220 Mb/s,而基于修改 PFS 准则和复用因子为 1 的吞吐量分别为 230 Mb/s 和 270 Mb/s,这是由于 Macro 小区静默了部分载波以降低 Pico 小区传输的干扰,减少自身小区用户传输的机会造成的,因而使得 Macro 小区吞吐量稍有降低。

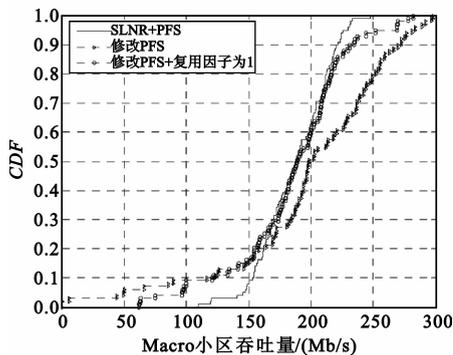


图 2 Macro 小区吞吐量
Fig. 2 The throughput of Macro cell

图 3 和图 4 是 Pico1 和 Pico2 小区在不同算法下的吞吐量 CDF 分布。仿真证明,基于 SLNR 准则的 Pico 小区吞吐量与修改 PFS 算法相比均有所提升,从而说明 Pico 基站的引入能够将系统中部分用户纳入 Pico 小区,为 Macro 小区减少通信业务量,实现了系统分流;同时也说明,基于 SLNR 干扰协调机制与另外两种机制相比,更加有效地量化干扰,从而可以有目的地调度小区与载波组合,以此降低了小区间的干扰,为 Pico 小区纳入更多的用户,因此大大提升了 Pico 小区容量。

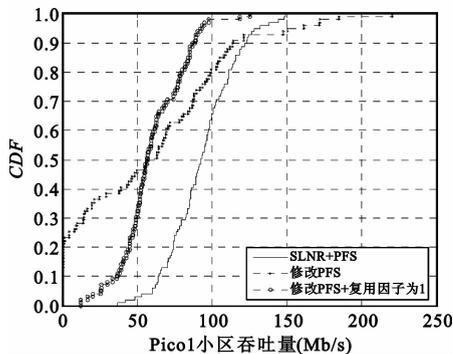


图 3 Pico1 小区吞吐量
Fig. 3 The throughput of Pico1 cell

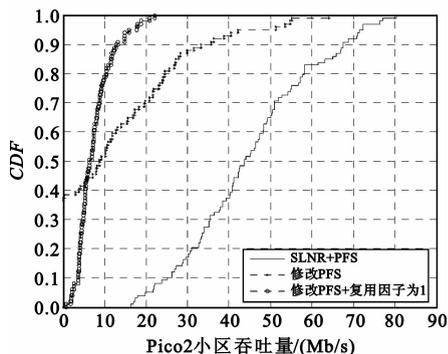


图 4 Pico2 小区吞吐量
Fig. 4 The throughput of Pico2 cell

图 5 是异构网络系统不同算法整体吞吐量的 CDF 分布曲线。仿真结果说明,SLNR 准则的引入,使得频率复用增益和干扰消除增益取得最佳平衡,从而有效降低了小区间的干扰,提高了系统的总体吞吐量,较大程度地实现了系统的扩容。

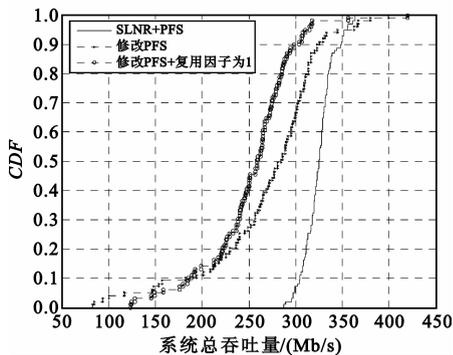


图 5 系统总吞吐量
Fig. 5 The throughput of all cells

5 结束语

异构网络中小区间的干扰严重降低用户通信质量,研究如何降低 LTE-A 系统小区间干扰具有重要意义。本文在 Macro-Pico 异构网络场景下,研究了基于载波聚合的干扰协调机制,并在此基础上提出了基于 SLNR 的载波干扰协调管理机制。该机制通过动态调度小区和载波,以及量化小区间干扰的方式,使得频率复用增益和干扰消除增益取得最佳平衡,在兼顾用户公平性的同时,合理利用频谱资源,实现系统流量的分流和吞吐量的提升。仿真结果验证了该方案的可行性,适合于 LTE-A 异构网络场景。但由于采用该机制动态调度小区和载波需占用较大系统开销,因此如何有效降低系统开销是下一步的研究重点。

参考文献:

- [1] Damjanovic A, Montojo J, Wei Y, et al. A survey on 3GPP heterogeneous networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(3): 10-21.
- [2] Guvenç I. Capacity and fairness analysis of heterogeneous networks with range expansion and interference coordination[J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(10): 1084-1087.
- [3] Wang Y, Pedersen K I, Sørensen T B, et al. Carrier load balancing and packet scheduling for multi-carrier systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(5): 1780-1789.
- [4] Wang Y, Pedersen K I, Sørensen T B, et al. Carrier load balancing and packet scheduling for multi-carrier systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(5): 1780-1789.
- [5] Pedersen K I, Frederiksen F, Rosa C, et al. Carrier aggregation for LTE-advanced: functionality and performance aspects[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(6): 89-95.
- [6] Garcia L G U, Pedersen K I, Mogensen P E. Autonomous component carrier selection: interference management in local area environments for LTE-advanced[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(9): 110-116.
- [7] Garcia L G U, Kovács I Z, Pedersen K I, et al. Autonomous Component Carrier Selection for 4G Femtocells—A Fresh Look at an Old Problem[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(3): 525-537.
- [8] Lopez-Perez D, Guvenç I, De La Roche G, et al. Enhanced intercell interference coordination challenges in heterogeneous networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(3): 22-30.
- [9] Sun C, Huang L, Jiang J, et al. Interference Management by Component Carrier Selection for Carrier Aggregation System in Heterogeneous Networks[C]//Proceedings of the 2012 International Conference on Information Technology and Software Engineering. Berlin Heidelberg: Springer, 2013: 969-977.

作者简介:



黄 岚(1988—),女,湖北随州人,硕士研究生,主要研究方向为异构网络中载波干扰协调技术;

HUANG Lan was born in Suizhou, Hubei Province, in 1988. She is now a graduate student. Her research interests include interference coordination technology based on carrier aggregation in heterogeneous networks.

Email: huangl0928@163.com

孙长印(1963—),男,陕西扶风人,2000年于西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室获博士学位,2001-2009年在中兴通信从事无线通信领域的研发和预研工作,现为西安邮电大学通信与信息工程学院副教授,主要从事宽带无线通信的研究;

SUN Chang-yin was born in in Fufeng, Shaanxi Province, in 1963. He received the Ph. D. degree from Xidian University in 2000. From 2001 to 2009. He was a senior engineer at ZTE Corporation. He is now an associate professor. His research concerns broadband wireless communication.

Email: changyin_sun@163.com

卢光跃(1971—),男,河南南阳人,1999年于西安电子科技大学获信号与信息处理专业博士学位,现为教授、博士生导师、“楚天学者”特聘教授,主要研究方向为现代移动通信中的信号处理;

LU Guang-yue was born in Nanyang, Henan Province, in 1971. He received the Ph. D. degree from Xidian University in 1999. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns signal processing in modern mobile communications.

Email: tonylugy@163.com

姜 静(1974—),女,陕西安康人,2010年于西北工业大学获通信与信息系统专业博士学位,现为西安邮电大学通信与信息工程学院副教授,主要从事宽带无线通信的研究。

JIANG Jing was born in Ankang, Shaanxi Province, in 1974. She received the Ph. D. degree from Northwestern Polytechnical University in 2010. She is now an associate professor. Her research concerns broadband wireless communication.

Email: jiangjing18@foxmail.com