



LTE-Advanced 异构网中载波选择与波束成形联合算法

方 锐,孙长印,卢光跃,郑龙龙

(西安邮电大学无线网络安全技术国家工程实验室 西安 710121)

摘 要:为解决 LTE-Advanced 异构网内宏小区及微小区间的相互干扰问题,提出了载波选择与波束成形联合算法。在高密度、多低功率微基站节点的异构网中,通过关闭部分基站的部分载波,并在开启载波的基站天线上进行波束成形,使接收端受到的干扰大幅度降低。另外,基于效用函数的约束,对载波、波束分别计算,使原本二维联合优化问题变成两个一维优化问题,降低了算法复杂度。仿真结果表明该方案增加了异构网中边缘用户及整个系统的吞吐量。

关键词:异构网;载波聚合;波束成形;小区间干扰协调

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015004

Component Carrier Selection and Beamforming Jointly in LTE-Advanced Heterogeneous Network

Fang Rui, Sun Changyin, Lu Guangyue, Zheng Longlong

(National Engineering Laboratory of Wireless Network Security,

Xi'an University of Post and Telecommunication, Xi'an 710121, China)

Abstract: To deal with the interference between macro cell and pico cell, or between pico cell themselves in LTE-Advanced heterogeneous network, joint algorithm of component carrier selection and beamforming was proposed. By shutting down a subset of the component carrier in the dense low power node deployment scenario, it could remove lots of interference at the receive side. Additionally, based on utility function and calculate separately, algorithm reduced the dimensions and the searching complexity of the algorithm. Simulation results show that the proposed scheme can bring a great throughput gain of edge users and the whole system in the heterogeneous network.

Key words: heterogeneous network, carrier aggregation, beamforming, inter-cell interference coordination

1 引言

LTE 异构网方案的提出,激起了优化异构网络性能的研究^[1,2]。在原本紧张的频谱上,异构网多节点分布、微基站低功率节点的地理位置随机分布以及宏基站与微基站之间发射功率与覆盖范围的不平衡性,导致用户将面临严峻

的干扰问题^[3]。

为此,在下一代演进系统如 3GPP-LTE-Advanced 标准中^[4],采用了小区间增强型干扰协调(enhanced inter-cell interference coordination, eICIC)^[5] 技术解决此问题。因涉及的无线资源不同,eICIC 可分为时域技术^[6,7]、频域技术^[8]和功率控制技术^[9]等。当采用多天线技术时,小区间干扰协调

收稿日期:2014-06-15;修回日期:2014-11-09

基金项目:中兴项目产业资助项目(基于载波聚合的异构网干扰管理研究),西安邮电大学创新基金资助项目(No.ZL2013-15)

Foundation Items: The Project Foundation of ZTE, The Innovation Foundation of Xi'an University of Post and Telecommunication (No.ZL2013-15)



可进一步在空域进行,如协作多点(coordinated multi-point, CoMP)传输。

对于 LTE-Advanced 系统的进一步演进系统如 LTE-A-beyond 系统^[10],低功率节点密度高,若采用限制频域资源,则会造成频率分集增益减少;若采用限制时域资源,则会造成扩充模块 AMC(advanced mezzanine card)增益减少;若采用限制空域资源,则造成空域特性与波束匹配性差,使得空域增益如波束成形增益减少。

为此,在基于载波聚合的小区间干扰协调框架下,研究干扰管理体系中基于联合成员载波选择及 CoMP 技术的干扰管理策略和途径,探索克服传统 eICIC 在低功率节点密度高的异构网络场景中干扰管理自由度受限问题的方法,以达到减少小区间干扰、最大化系统容量和覆盖的目的。

2 异构网下行链路吞吐量计算模型

对于移动通信异构网模型而言,用户随机分布在宏小区内。边缘用户由于距离宏基站远、信号弱,故在宏小区边缘部署微小区。研究考虑 Q 个小区、 M 个用户和 K 个载波的下行链路传输。假定基站和用户分别具有 N 个发射天线和一个接收天线,为简单起见,每个小区的每个载波发送功率 P_i 保持不变。

使用二进制矩阵 $A = \{a_{k,m} | a_{k,m} \in \{0,1\}\}_{K \times M}$ 描述用户之间的载波选择,其中, $a_{k,m}=1$ 表示将载波 k 分配给用户 m , 否则 $a_{k,m}=0$ 。用 $S_{k,m,i} = h_{k,m,i} b_{k,i}$ 表示在某个时隙的信道增益, $h_{k,m,i} = [h_{k,m,i}^1, h_{k,m,i}^2, \dots, h_{k,m,i}^N]$ 表示信道, $b_{k,i} \in C^{N \times 1}$ 表示波束成形矩阵,则快衰落场景下信干噪比为:

$$SINR_{k,m,q} = \frac{P_q |h_{k,m,q} b_{k,q}|^2}{\sum_{i=1, i \neq q}^N a_{k,i} P_i |h_{k,m,i} b_{k,i}|^2 + \sigma_q^2} \quad (1)$$

第 m 个用户的速率定义为:

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

为简化模型,假设每个基站每个时隙只调度一个用户,式(2)求和变为系统总速率:

$$R = \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K \text{lb} \left(1 + \frac{a_{k,q} P_q |h_{k,q,q} b_{k,q}|^2}{\sum_{i=1, i \neq q}^N a_{k,i} P_i |h_{k,q,i} b_{k,i}|^2 + \sigma_q^2} \right) \quad (3)$$

其中, $a_{k,q}$ 表示某时隙将载波 k 分配给小区 q 。

最优化问题是找出合适的 $a_{k,q}$ 和 $b_{k,q}$, 把系统总速率最大作为效用函数,则得到下面具有约束的优化问题:

$$\begin{aligned} R &= \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K R_{k,q} \\ \text{s.t. } (1) &\sum_{k=1}^K a_{k,q} \leq C_q \\ (2) &|b_{k,q}| = 1 \end{aligned} \quad (4)$$

上述问题是一个非凸优化问题,同时是一个包括整数变量和连续变量的混合优化变量问题。为了得到该问题的解,需要搜索所有可能的波束矢量和载波选择向量,其复杂度极高,很难直接求解。

3 载波、波束联合求解方法

采用分维相继优化,迭代逼近最优点技术,将联合多维优化问题分解为成员载波选择及空域波束避免两个问题以降低算法复杂度。优化过程首先初始化载波选择矩阵 $A = \{a_{k,m} | a_{k,m} = 1\}_{K \times M}$, 然后成员载波选择与空域波束避免逐次优化,直到逼近目标函数,如图 1 所示。

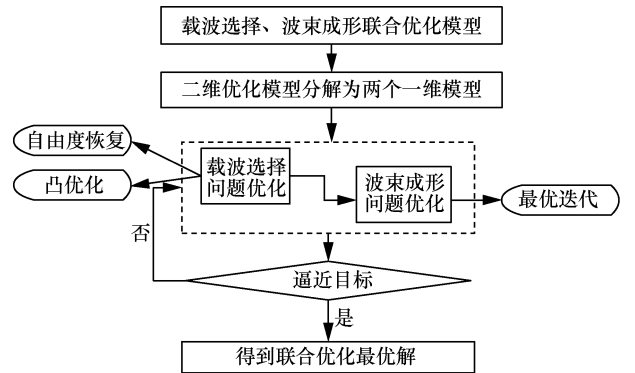


图 1 方案流程

首先采用拉格朗日去耦的方法将原问题(4)分解为 K 个独立的子优化问题,其次,在各子优化问题的求解上,采用交替迭代,分步优化的策略。令:

$$J = \sum_{k=1}^K \left\{ \sum_{q=1}^Q R_{k,q} - \sum_q \lambda_q a_{k,q} \right\} + \sum_q \lambda_q C_q \quad (5)$$

上述拉格朗日问题可以分解成为 K 个独立的子优化问题,对于固定的 λ_q ,即:

$$\begin{aligned} \{B_k, a_k\}^{\text{opt}} &= \arg \min \{-J_k\} \\ \text{s.t. } (1) &|b_{k,q}| = 1 \\ (2) &\lambda_q \geq 0 \\ (3) &a_{k,q} \in \{0,1\} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $-J_k = \sum R_{k,q} - \sum \lambda_q a_{k,q}$, 为了满足原约束条件,需要通过更新过程^[11]调整 λ_q 的取值。假设 $a_{k,q}$ 已知, λ_q

固定, 实现系统总速率最大的波束矢量 b_q 可由最优迭代法^[12]获得。

3.1 载波选择

得到最佳波束矢量 b_q 后, 定义 $\bar{h}_{k,q,q} = |h_{k,q,q} b_{k,q}|^2$, $\bar{h}_{k,q,i} = |h_{k,q,i} b_{q,i}|^2$, 代入式(5)得 $a_{k,q}$ 的一维优化函数:

$$-J_k = \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K \text{lb} \left(1 + \frac{a_{k,q} P_q |\bar{h}_{k,q,q}|^2}{\sum_{i=1, i \neq q}^N a_{k,i} P_i |\bar{h}_{k,q,i}|^2 + N_q^2} \right) \sum \lambda_q a_{k,q} \quad (7)$$

小区数目少时载波选择算法有穷举法、贪婪算法。穷举法列出所有可能性以找出最优解; 贪婪算法(贪心算法)是指在对问题求解时, 总是做出在当前看来是最好的选择而不从整体最优上加以考虑, 它得到的仅是在某种意义上的局部最优解。小区数目多时, 上述两种算法复杂度高, 为此提出自由度恢复算法和凸优化算法。

3.2 自由度恢复算法

先在载波上进行波束成形, 通过关闭准则(信噪比最低 && 所受干扰 > 所受噪声) 找出该载波频段上最差的小区, 并将其关闭, 其余小区再依次进行上述关闭方法, 直到 $-J_k$ 不再减小, 求出最优方案, 自由度恢复法分别在每个载波频段上进行最优化。虽然这种“简单、粗暴”的算法计算精度不高, 最优解与理论最优解有一定差距, 但算法复杂度低, 硬件可轻易实现。

自由度恢复算法步骤如下:

- (1) 载波选择向量全置 1;
- (2) while $-J_k$ 减小;
- (3) 采用最优迭代波束成形算法;
- (4) 选择关闭载波用户, 选择准则为(信噪比最低) & (所受干扰 > 所受噪声);
- (5) 将载波选择向量相应位置置 0;
- (6) 除去载波选择向量为 0 的小区, 计算 $-J_k$;
- (7) end while.

3.3 凸优化算法

由于式(7)是非凸优化问题, 很难直接求解。在此, 采用非凸问题线性松弛技术, 将其转化为凸优化问题, 然后采用标准的优化算法求解。为此, 首先将式(7)问题进一步写为:

$$-J_k = -\sum_q \left\{ \text{lb} \left(\sum_{i=1}^Q a_{k,i} P_i |\bar{h}_{k,q,i}|^2 + \sigma_q^2 \right) + \lambda_q a_{k,q} \right\} + \sum_q \text{lb} \left(\sum_{i=1, i \neq q}^Q a_{k,i} P_i |\bar{h}_{k,q,i}|^2 + \sigma_q^2 \right) \quad (8)$$

式(8)问题前半部分为凸函数, 后半部分为凹函数, 把后半部分利用泰勒级数线性松弛近似得:

$$-J_k^{\text{rel}} = A + \sum_q \left(\sum_{i=1, i \neq q}^Q u_{k,i} a_{k,i} + v_{k,i} \right) \quad (9)$$

其中:

$$\left(\sum_{i=1, i \neq q}^Q u_{k,i} a_{k,i} + v_{k,i} \right) \geq \text{lb} \left(\sum_{i=1, i \neq q}^Q a_{k,i} P_i |\bar{h}_{k,q,i}|^2 + \sigma_q^2 \right) \quad (10)$$

得到的式(9)是一个凸优化问题, 由于空间的约束, 证明该松弛过的函数单调递减并且收敛, 可以用内点法^[13]高效解决。需要指出的是, 以上获得的也是一个局部最优解, 不是全局最优解, 仿真发现, 在多小区情境下, 此方法较自由度恢复算法更大计算复杂度, 但可以获得更大优化增益。

凸优化算法步骤如下:

- (1) 载波选择向量全置 1;
- (2) while $-J_k$ 减小;
- (3) 采用最优迭代波束成形算法;
- (4) 利用泰勒级数松弛差分凸函数;
- (5) 利用内点优化算法求凸优化问题, 实数取整, 获得选择向量;
- (6) 除去载波选择向量为 0 的小区, 计算 $-J_k$;
- (7) end while.

4 算法仿真

4.1 仿真场景及参数设置

宏基站覆盖半径 1 000 m, 微基站覆盖半径 100 m, 100 个用户分布在宏基站边缘并在其附近增加若干微基站。参数设置见表 1。

表 1 仿真参数

参数	数值
载波带宽/MHz	10
载波数	2
微基站路损/dB	140.7+36.7lg10(R), R 的单位为 km
宏基站路损/dB	128.1+37.6lg10(R), R 的单位为 km
阴影衰落/dB	8
宏基站发射功率/dBm	43
微基站发射功率/dBm	20

4.2 仿真结果及性能分析

图 2 是 1 个宏小区、2 个微小区分布及吞吐量 CDF 曲线, 可以看出载波选择的自由度恢复算法带来增益明显。

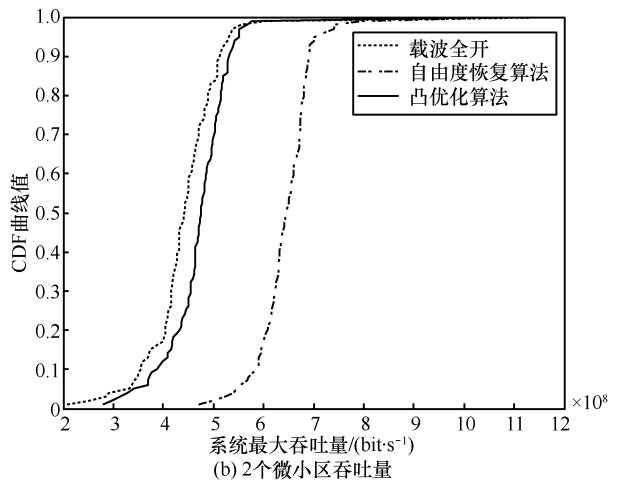
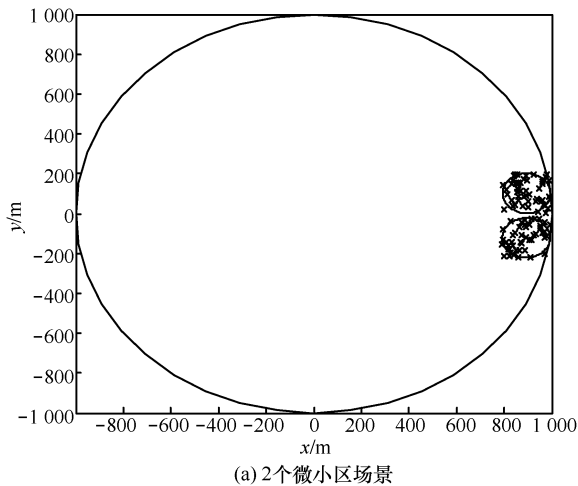


图2 3个小区分布图及吞吐量 CDF 曲线

小区数目少导致凸优化算法中式(9)产生的近似误差占 $-J_k$ 的比重大,精确度低从而不理想。

图3(a)将微小区数目增加到20个,可以看出自由度恢复算法也对系统吞吐量有稳定的增益,而凸优化算法由于小区数目增多近似误差占 $-J_k$ 比重减小,精确度高从而性能变得突出。

设计另一种分布场景,让部分微基站向宏基站移动,如图4(a)所示,导致微小区受到宏小区及临小区干扰增大。从图4(b)可以观察到,3条CDF曲线均较图3(b)有所降低,但两种算法依旧带来系统增益。

5 结束语

波束成形与两种载波选择的联合算法较单独波束成形算法带来了更大的系统吞吐量增益,并且载波选择算法中

凸优化算法更适用于多小区场景。另外小区数目增加,拓扑结构改变导致异构网出现严重干扰问题时,联合算法也能降低系统干扰、提高系统性能,获得很大的小区分裂增益。

参考文献

- 1 赵旭淞, 张新程. TD-LTE 网络深度覆盖解决方案初探. 中国移动通信集团设计院有限公司第十七届新技术论坛, 中国, 2011
Zhao X S, Zhang X C. Exploration of TD-LTE network deeply coverage solution. Proceedings of the Seventeenth New Technology Forum of China Mobile Group Design Institute Co., Ltd, China, 2011
- 2 Qualcomm Incorporated, LTE advanced: heterogeneous networks. <http://www.qualcomm.co.kr/documents/lteadvanced-heterogeneous-networks>, 2010
- 3 袁弋非. LTE/LTE-Advanced 关键技术与系统性能. 北京: 人民邮电出版社, 2013

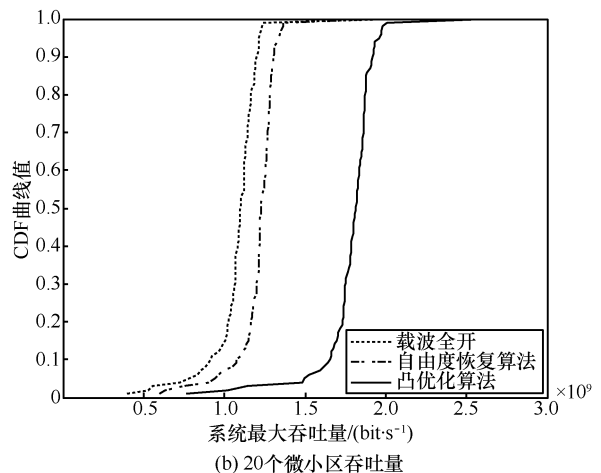
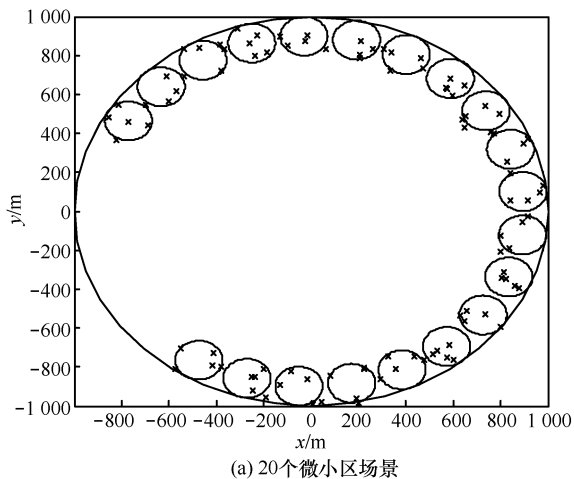
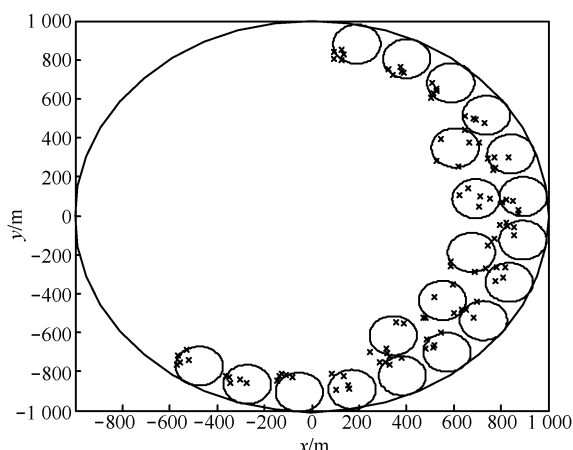
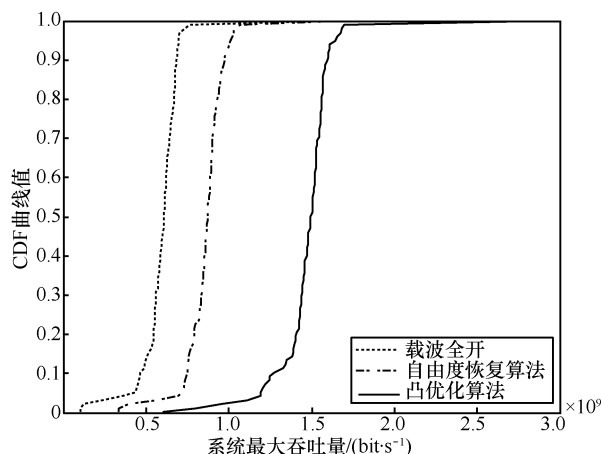


图3 21个小区分布图及吞吐量 CDF 曲线



(a) 20个微小区新场景



(b) 20个微小区新场景吞吐量

图4 21个小区新分布分布及吞吐量 CDF 曲线

- Yuan Y F. LTE/LTE-Advanced Key Technology and System Performance. Beijing: Post & Telecom Press, 2013
- 4 Erik D, Stefan P, Johan S. 4G: LTE/LTE-advanced for Mobile Broadband. Waltham: Academic Press, 2011
 - 5 Lopez-Perez D, Guvenç I, DE L A Roche G. Enhanced intercell interference coordination challenges in heterogeneous networks. IEEE Wireless Communicaitons, 2011(18)
 - 6 3GPP Tdoc R4-083018. Qualcomm Europe, Range Expansion for Efficient Support of Heterogeneous Networks, 2008
 - 7 3GPP TS 36.211. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA);Physical Channels and Modulation, 2011
 - 8 Krishna B, Kang J H, Mehmet K. Cell selection with downlink resource partitioning in heterogeneous networks. Proceedings of IEEE International Conference on Communications, Kyotos Japan, 2011
 - 9 Wonjae S, Changyong S, Kyunghun J. Distributed frequency resource control for intercell interference control in heterogeneous networks. Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Paris, France, 2012
 - 10 Dahlman E, Parkvall S, Skold J. 4G 移动通信技术权威指南: LTE 与 LTE-Advanced. 北京:人民邮电出版社, 2012
 - 11 Dahlman E, Parkvall S, Skold J. 4G LTE: LTE-Advanced for Mobile Broadband. Beijing: Post & Telecom Press, 2012
 - 12 Woohyun S, Sooyong C, Daesik H. A beamforming codebook restriction for cross-tier interference coordination in two-tier femtocell networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011,60(4):1651~166
 - 13 Yu W, Lui R. Dual methods for nonconvex spectrum optimization of multicarrier systems. IEEE Transactions on Communications, 2006,54(7): 1310~1322
 - 14 陈宝林. 最优化理论与算法. 北京:清华大学出版社, 2005
- Chen B L.Optimization Theory and Algorithm.Beijing: Tsinghua

University Press,2005

- 14 Barbieri A, Gaal P, Geirhofer S. Coordinated downlink multi-point communications in heterogeneous cellular networks. Proceedings of Information Theory and Applications Workshop (ITA), San Diego, CA,USA,2012

[作者简介]



方锐,男,西安邮电大学硕士生,主要研究方向为移动通信。



孙长印,男,西安邮电大学副研究员,主要研究方向为移动通信。



卢光跃,博士,男,西安邮电大学教授,主要研究方向为移动通信。

郑龙龙,男,西安邮电大学硕士生,主要研究方向为移动通信。