

H2H/M2M 共存场景下基于图论的干扰协调机制

随楠楠¹ 徐友云² 王 聪¹ 谢 威¹ 朱 贇³

(陆军工程大学通信工程学院 南京 210007)¹

(南京邮电大学通信与网络技术国家工程研究中心 南京 210003)²

(赣南师范大学物理与电子信息学院 江西 赣州 341000)³

摘 要 针对 H2H/M2M 共存的 LTE-A 全频复用异构蜂窝网络,提出基于最大独立集的干扰协调和 RB 扩展分配算法(CGMMIS 算法),以在保证 RB 分配连续性的前提下优化系统和速率。首先,基于节点之间的相对干扰强度构建干扰图。然后,CGMMIS 算法将存在强干扰的节点分到不同的独立集中,同时最大化独立集内各节点的信道增益之和。最后,利用 RB 扩展分配算法保证 RB 分配连续性,使得节点仅选择使其可达速率最大的独立集。仿真结果表明,在 M2M 设备密集部署的场景下,CGMMIS 算法的系统速率明显优于非协同算法和基于着色的最大独立集随机搜索算法。

关键词 M2M 通信,LTE-A,最大独立集,RB 扩展分配

中图分类号 TN929.5 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2019.05.009

Graph Theory Based Interference Coordination for H2H/M2M Coexisting Scenarios

SUI Nan-nan¹ XU You-yun² WANG Cong¹ XIE Wei¹ ZHU Yun³

(College of Communications Engineering,PLA Army Engineering University,Nanjing 210007,China)¹

(National Engineering Research Center of Communication and Network Technology,Nanjing University of Posts and Telecommunications,Nanjing 210003,China)²

(School of Physics and Electronic Information,Gannan Normal University,Ganzhou,Jiangxi 341000,China)³

Abstract For human-to-human (H2H) and machine-to-machine (M2M) communications coexisting scenarios in the channel deployed LTE-A heterogeneous networks, a maximum independent set (MIS) based interference coordination and resource block (RB) expansion allocation algorithm (CGMMIS) was proposed to maximize the system sum rate while ensuring RB allocation continuity. Firstly, the interference graph is obtained according to the relative interference between two nodes. Secondly, CGMMIS algorithm divides the nodes with strong interference to each other into different MISs and maximizes the sum channel gain of the nodes in the MIS. However, a node may belongs to multiple MISs under this circumstance. Lastly, in order to guarantee the consecutive allocation of RBs, the RB expansion allocation method is exploited in CGMMIS algorithm, in which the node will only select the MIS that can maximize its achievable rate. Simulation results demonstrate that in the dense deployment scenario of M2M devices, the proposed CGMMIS algorithm is superior to both the non-cooperative algorithm and the random graph coloring based MIS search algorithm in terms of system sum rate.

Keywords Machine to machine (M2M) communications, LTE-A, Maximum independent set, RB expansion allocation

1 引言

机器对机器(Machine to Machine, M2M)通信是当前物联网(Internet of Things, IoT)最主要的应用形式,是下一代无线移动通信系统(5G)的关键使能技术之一,在电子医疗、智能家居、智能交通、智慧城市以及智能工厂等领域有着广阔

的应用前景^[1-2]。相比以下行业业务为主的人对人(Human to Human, H2H)通信, M2M 通信以上行数据传输和海量终端接入为主要业务特征,如 Ericsson 预测到 2020 年 M2M 终端数量将达到 500 亿^[3], M2M 业务类型的服务质量(Quality of Services, QoS)需求具有极大的多样性和差异性。当前, LTE-A 蜂窝网络主要是为 H2H 通信优化设计的,在应对 H2H/

到稿日期:2018-05-21 返修日期:2018-09-14 本文受国家自然科学基金(61371123, 61771486),国家自然科学基金重大项目(91438115),国家自然科学基金青年项目(61301165),江西省科技支撑计划重点项目(20161BBF60089)资助。

随楠楠(1990—),男,博士生,主要研究方向为 M2M 通信和异构网络无线资源管理;徐友云(1966—),男,博士,教授,主要研究方向为无线通信理论与应用、下一代网络技术, E-mail: yyxu@njupt.edu.cn(通信作者);王 聪(1975—),男,博士,副教授,主要研究方向为软件工程和网络安全;谢 威(1977—),男,博士,副教授,主要研究方向为移动通信和认知无线电;朱 贇(1980—),男,博士,主要研究方向为移动通信。

M2M 共存场景下的海量 M2M 设备接入问题面临严峻的挑战^[4]。

LTE-A 网络为了降低峰均功率比,在上行方向采用单载波频分多址(Single Carrier Frequency Division Multiple Access, SC-FDMA)技术,要求资源块(Resource Block, RB)的分配必须是连续的,且用户在所有 RB 上平均分配功率。在此约束下,上行 RB 分配问题大致有 3 类解决思路:1)采用穷举搜索方法,例如,文献[5]将 RB 分配建模为二进制整数规划问题(Binary Integer Programming, BIP),通过分支定界方法搜索最优解;2)采用对偶理论求解,例如,文献[6]在 H2H/M2M 共存场景下利用有效容量来分析时延 QoS,利用正则对偶方法对能量效率进行优化;3)采用启发式算法,如文献[7]提出了 4 种针对 LTE 上行链路的比例公平调度算法。

上述文献只针对单个宏小区场景进行研究,而基于小小区构建异构蜂窝网络,通过网络密集化进行空间频谱复用,从而提升网络容量,以满足 H2H/M2M 共存场景中的多样业务需求,是未来 5G 的主要使能技术之一^[8];但同频复用的小小区网络也带来了复杂的层间干扰和层内干扰问题。文献[9]利用非合作博弈理论研究了 LTE 上行链路的能效优化问题,提出了低复杂度的迭代分布式算法,以获取最优的 RB 和功率分配。文献[10]假设只存在小小区与宏小区之间的层间干扰,小小区之间则由于衰减等因素不存在干扰。为了保证宏小区用户的速率,该文献提出了 2 种干扰约束模式,并针对 RB 分配提出了一种 BIP 方法和一种低复杂度的次优算法。文献[11]基于着色理论提出了一种分布式的最大独立集(Maximum Independent Set, MIS)生成算法,其在保证每个用户最小速率约束的基础上求解每个最大独立集占用的最佳时间比例,从而最大化系统和速率。但文献[9]假设每轮迭代只能有一个小区进行策略调整,文献[10]没有考虑层内干扰,文献[11]则没有考虑 RB 分配的连续性约束,且上述文献都没有充分地解决 LTE-A 小小区网络中的 RB 分配问题。

本文考虑一个全频复用的 LTE-A 异构蜂窝网络环境,在保证子载波分配连续性的约束下,以最大化 M2M 业务的系统和速率为目标,针对 H2H/M2M 共存场景中的 RB 分配问题提出了一种基于最大独立集的干扰协调和 RB 扩展分配算法(CGMMIS 算法),前者在避免独立集内部节点之间强干扰的同时最大化了节点的信道增益之和,而 RB 扩展分配算法则保证了子载波分配的连续性。仿真结果表明:CGMMIS 算法优于非协同算法以及文献[11]中基于图论着色的最大独立集随机搜索算法。

2 系统模型与问题建模

2.1 系统模型

图 1 所示为全频复用的 LTE-A 两层异构蜂窝网络,其包括一个宏小区和在其覆盖半径内的 J 个小小区,所有的小小区用集合 $\mathcal{J} = \{0, 1, \dots, j, \dots, J\}$ 表示,其中 0 表示宏小区。在宏小区覆盖半径内均匀分布着 H 个 H2H 用户和 M 个 M2M 设备,分别用集合 $\mathcal{H} = \{1, \dots, h, \dots, H\}$ 和 $\mathcal{M} = \{1, \dots, m, \dots, M\}$ 来表示,集合 $\mathcal{U} = \mathcal{H} \cup \mathcal{M}$ 则表示全部节点。全部 K 个上行 RB 资源用集合 $\mathcal{K} = \{1, \dots, k, \dots, K\}$ 表示。为了防止 H2H 和

M2M 业务之间相互干扰,更利于提供有差异的 QoS 保证,将频谱资源分成 H2H 专用和 M2M 专用两部分,用集合 $\mathcal{K}_{H2H} = \{1, \dots, k_{H2H}, \dots, K_{H2H}\}$ 和 $\mathcal{K}_{M2M} = \{1, \dots, k_{M2M}, \dots, K_{M2M}\}$ 表示,因此 $\mathcal{K} = \mathcal{K}_{H2H} \cup \mathcal{K}_{M2M}$,并设 $\alpha = K_{M2M}/K$ 表示分配给 M2M 业务的 RB 资源比例。

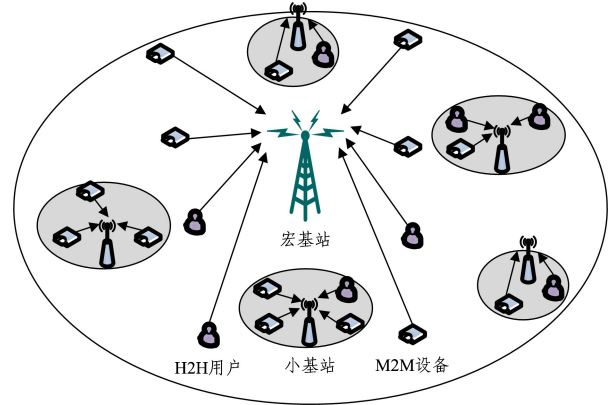


图 1 LTE-A 两层异构蜂窝网络环境

Fig. 1 LTE-A two-tier heterogeneous cellular network environment

节点与基站之间在每个 RB 上都是平坦的瑞利衰落信道,节点 $u \in \mathcal{U}$ 与小区 $j \in \mathcal{J}$ 之间在 RB k 上的信道增益表示为 $h_{u,j}^k$,包括大尺度路径损耗和小尺度瑞利衰落。所有节点基于最大参考信号接收功率选择小区接入, \mathcal{U}_j 表示接入小区 j 内的全部节点集合。若小区 j 将 RB k 分配给了节点 u ,则节点 u 在第 k 个 RB 上的信干噪比(SINR) $\gamma_{u,j}^k$ 可表示为:

$$\gamma_{u,j}^k = \frac{p_{u,j}^k h_{u,j}^k}{\sum_{j' \in \mathcal{J}/j} p_{u,j'}^k h_{u,j'}^k + \sigma^2} \quad (1)$$

其中, $p_{u,j}^k$ 表示节点 u 在第 k 个 RB 上的发送功率, $p_{u,j'}^k h_{u,j'}^k$ 表示来自邻小区 j' 的干扰信号, σ^2 表示加性高斯白噪声的功率。

由于上行方向基于 SC-FDMA,分配给节点 u 的子载波是连续的,且数据符号扩展到每一个子载波上,因此节点 u 的有效 SINR $\gamma_{u,j}^{eff}$ 可表示为:

$$\gamma_{u,j}^{eff} = \left(\frac{1}{K_u} \sum_{k \in \mathcal{K}_u} \frac{1}{\gamma_{u,j}^k} \right)^{-1} \quad (2)$$

其中, \mathcal{K}_u 表示分配给节点 u 的 K_u 个 RB 的集合。节点 u 在小区 j 中的可达速率为:

$$R_{u,j} = K_u B \log_2 (1 + \gamma_{u,j}^{eff}) \quad (3)$$

其中, B 表示每个 RB 的带宽。

因此,系统和速率 R 可以表示为:

$$R = \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{u \in \mathcal{U}_j} R_{u,j} \quad (4)$$

2.2 系统和速率优化问题的建模

设 $W_{u,j}$ 表示节点 u 在小区 j 内的 RB 分配模式矩阵,其中 $W_{u,j}$ 的每一行对应着小区 j 内相应的 RB 资源,每一列表示一种可能的 RB 分配结果。当 RB 数量 K 为 4 时,其对应的 RB 分配模式矩阵就可表示为:

$$W_{u,j} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据定义, $W_{u,j}$ 是一个 $K \times A$ 的矩阵,其中 $A = K(K +$

1)/2+1 表示全部可能的 RB 分配方案数量。由于是全频复用,每一个节点的 RB 分配模式矩阵均相同,而节点 u 最多只能有一种分配结果,将其表示为:

$$q_{u,j}^n = \begin{cases} 1, & \text{矩阵 } W_{u,j} \text{ 的第 } n \text{ 列被分配给节点 } u \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

本文的主要目的是通过 RB 分配来最大化系统和速率,将优化目标建模为:

$$\max_{q_{u,j}^n, \forall u,j,n} R = \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{u \in \mathcal{U}_j} R_{u,j} \quad (7)$$

$$\text{s. t. } \sum_{n=1}^A q_{u,j}^n = 1, \forall u \in \mathcal{U}_j, \forall j \in \mathcal{J} \quad (7a)$$

$$\sum_{u \in \mathcal{U}_j} \sum_{n=1}^A q_{u,j}^n W_{u,j}(k,n) \leq 1, \forall k \in \mathcal{K} \quad (7b)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{n=1}^A q_{u,j}^n W_{u,j}(k,n) = K_u, \forall u \in \mathcal{U}_j, \forall j \in \mathcal{J} \quad (7c)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{n=1}^A p_{u,j}^k q_{u,j}^n W_{u,j}(k,n) = P, \forall u \in \mathcal{U}_j, \forall j \in \mathcal{J} \quad (7d)$$

$$p_{u,j}^k = p_{u,j}^{k'}, \forall k, k' \in \mathcal{K}_u, \forall u \in \mathcal{U}_j, \forall j \in \mathcal{J} \quad (7e)$$

其中,式(7a)表示节点一定占用一种 RB 分配模式,式(7b)表示 RB 分配的唯一性和排他性,式(7c)表示 RB 分配的连续性,式(7d)表示节点以最大功率发送数据,式(7e)说明节点在每个 RB 上以等功率发送数据。

显然,上述问题是一个 NP 难的 BIP 问题,全部搜索空间为 $\prod_{j \in \mathcal{J}} A^{|\mathcal{U}_j|}$,例如,当 $K=25, |\mathcal{U}_j|=20, J=5$ 时,共有 326^{100} 种备选方案。为此,本文提出一种低复杂度的基于最大独立集的干扰协调机制(CGMMIS 算法),尽量避免来自邻近小区的强干扰,并将其与 RB 扩展分配算法结合,以保证 RB 分配的连续性。

3 基于最大独立集的 RB 扩展分配算法

3.1 无向干扰图的构建

本文基于节点之间的相对干扰强度来构建无向干扰图 $\mathcal{G}=(\mathcal{V}, \epsilon)$,节点 u 的邻居节点集合为 \mathcal{N}_u 。设 $d_{u,u}$ 表示节点 u 与其服务基站之间的距离, $d_{v,u}$ 表示干扰节点 v 与节点 u 的服务基站之间的距离,若 $d_{v,u}/d_{u,u} \leq \beta$,则判定节点 v 对节点 u 有强干扰,两节点之间存在一条边,其中 $\beta \geq 1$ 是预设的门限值。

3.2 基于信道增益的最大独立集构造算法

独立集指干扰图 \mathcal{G} 中两两不相邻的节点构成的集合,最大独立集则是指不可能再增添任何新的节点,使得集合中的节点之间仍然保持独立性。因此,最大独立集中节点之间没有强干扰,将相同的 RB 资源分给最大独立集中的节点,可实现干扰协调,从而提高频谱效率。

CGMMIS 算法基于信道增益构建最大独立集,分两步进行,详见算法 1。设 MIS_c 表示第 c 个最大独立集, $\mathcal{S}=\{MIS_c\}$ 表示全部的最大独立集,若节点 u 的邻居节点数量最多,则其邻居节点的个数即为干扰图的度 Δ ,算法生成的最大独立集个数不会超过 $\Delta+1$ 。

算法 1 CGMMIS 算法第一阶段

输入: $\mathcal{U}, \mathcal{G}=(\mathcal{V}, \epsilon), \mathcal{N}_u, \mathcal{H}=\{h_{u,u} | \forall u \in \mathcal{U}\}$

输出: $\mathcal{S}=\{MIS_c\}$

第一步 构造独立集基本框架

1. 初始化独立集个数: $c=0$

2. 复制干扰图 \mathcal{G} 中的节点: $\mathcal{W}=\mathcal{V}$

3. while $\mathcal{W} \neq \emptyset$ do

4. $c=c+1$

5. 创建新的最大独立集: $MIS_c = \emptyset$

6. while $\mathcal{W} \neq \emptyset$ do

7. $u^* = \arg \max_{u \in \mathcal{W}} \mathcal{H}$

8. $MIS_c = MIS_c \cup u^*$

9. $\mathcal{W} = \mathcal{W} \setminus \{\mathcal{N}_{u^*} \cup u^*\}$

10. end while

11. 当前干扰图中剩余未分配的节点: $\mathcal{W} = \mathcal{V} \setminus \mathcal{S}$

12. end while

第二步 扩展为最大独立集

13. for each $MIS_c \in \mathcal{S}$ do

14. 复制干扰图 \mathcal{G} 中的节点: $\mathcal{W}=\mathcal{V}$

15. for each $u \in MIS_c$ do

16. $\mathcal{W} = \mathcal{W} \setminus \{\mathcal{N}_u \cup u\}$

17. end for

18. while $\mathcal{W} \neq \emptyset$ do

19. $u^* = \arg \max_{u \in \mathcal{W}} \mathcal{H}$

20. $MIS_c = MIS_c \cup u^*$

21. $\mathcal{W} = \mathcal{W} \setminus \{\mathcal{N}_{u^*} \cup u^*\}$

22. end while

23. end for

算法 1 的第一步决定最大独立集的个数以及基本框架,信道增益参数 $h_{u,u}$ 表示节点 u 与服务基站之间的期望信道增益,第 6-10 行表示每次都从剩余节点中选择信道增益最大的节点来构造独立集。第一步的主要思路是每个节点只分到一个独立集中,以尽可能少的独立集数量覆盖整个干扰图,同时最大化独立集内部的信道增益。但是,第一步显然并没有完成最后的构造,因此须在第二步对独立集进行扩展,以完成最大独立集的构造。图 2 为最大独立集构造算法示意图,节点的标号表示信道增益由高到低的排序。其中, MIS_3 经过算法 1 第一步的处理后仅包含节点 5,算法 1 的第二步将节点 1 加入 MIS_3 后才完成最大独立集的构建。

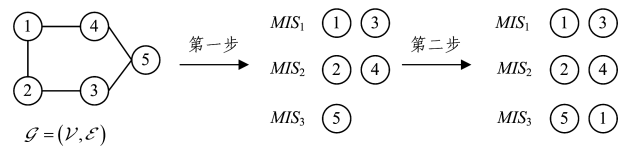


图 2 最大独立集的构造

Fig. 2 Construction of maximum independent set

3.3 保证子载波连续性的 RB 扩展分配算法

问题(7)的主要难点是如何在进行干扰协调的同时保证 RB 分配的连续性,虽然 CGMMIS 算法生成的最大独立集内部避免了强干扰,但节点可能归属于多个最大独立集。针对以上问题提出 CGMMIS 算法的第二阶段,利用复杂度较低的 RB 扩展分配算法保证 RB 分配的连续性^[7],详见算法 2。CGMMIS 第二阶段算法分 3 个步骤。

1) 第一步:将每个最大独立集看作一个虚拟用户,算法 2 中第 4 行的度量值 $\omega_{c,k}$ 表示第 c 个最大独立集 MIS_c 中每个节点在第 k 个 RB 上的速率之和,此时仅考虑 MIS_c 内部节点之间的相互干扰。图 3 为 RB 扩展分配算法示意图,第 1 轮

根据度量值最大准则得到最优配对 $\langle MIS_1, RB 5 \rangle$;同理,第 2 轮得到最优配对 $\langle MIS_2, RB 4 \rangle$ 。接下来的度量值最大配对是 $\langle MIS_1, RB 3 \rangle$,但其不满足 RB 分配连续性准则,因此继续搜索次优的配对,最终第 3 轮得到最优配对 $\langle MIS_3, RB 2 \rangle$ 。依此进行,最终的 RB 分配结果如图 3 所示。

	RB 1	RB 2	RB 3	RB 4	RB 5
MIS_1	0.68	0.79	0.81	0.82	0.93
MIS_2	0.74	0.75	0.71	0.89	0.91
MIS_3	0.66	0.78	0.69	0.77	0.71

RB分配结果 MIS_3 MIS_1 MIS_2 MIS_2 MIS_1

图 3 RB 扩展分配算法示意图

Fig. 3 Illustration of RB expansion allocation algorithm

第一步仅保证每个独立集获取的资源是连续的,并不能保证归属多个最大独立集的节点获取的资源是连续的。

2)第二步:依据第一步的 RB 分配结果,若节点归属于多个最大独立集,则最终仅获取使其可达速率最大的那个最大独立集的 RB 资源,由此保证每个节点 RB 分配的连续性。具体来说,图 2 中节点 1 同时归属于 MIS_1 和 MIS_3 ,若根据图 3 进行 RB 分配,则节点 1 获取的 RB 资源是不连续的。因此,节点 1 分别计算留在 MIS_1 和 MIS_3 中的可达速率,最终仅归属使其可达速率最大的那个最大独立集。

3)第三步:基于信道增益,每个小区都独立地对小区内剩余的 RB 资源进行扩展分配。

算法 2 CGMMIS 算法第二阶段

输入: $\mathcal{U}, \mathcal{J}, \mathcal{K}, \mathcal{H} = \{h_{u,j}^k \mid \forall u \in \mathcal{U}, \forall j \in \mathcal{J}, \forall k \in \mathcal{K}\}, \mathcal{S}$

输出: 每个节点的 RB 分配结果 $\mathcal{K}_u, \forall u \in \mathcal{U}$

初始化:

1. 每个小区的上行可用 RB: $\mathcal{R}^j = \mathcal{K}, \forall j \in \mathcal{J}$
2. 每个节点的 RB 分配结果: $\mathcal{K}_u = \emptyset, \forall u \in \mathcal{U}$
3. 每个最大独立集的 RB 分配结果: $\mathcal{K}_{MIS_c} = \emptyset, \forall MIS_c \in \mathcal{S}$

第一步 对最大独立集进行 RB 扩展分配

4. 计算度量矩阵:

$$\Omega = \{\omega_{c,k} \mid \omega_{c,k} = \sum_{u \in MIS_c} B \log_2(1 + \gamma_{u,j}^k), \forall MIS_c \in \mathcal{S}, \forall k \in \mathcal{K}\}$$

5. 对最大独立集进行 RB 扩展分配,得到 \mathcal{K}_{MIS_c}

第二步 节点仅归属可达速率最大的独立集

6. 针对每一个节点,针对其归属的每个最大独立集,计算可达速率

$$R_{u, MIS_c}$$

7. for each $u \in \mathcal{U}$ do

$$8. \quad MIS_{c^*} = \arg \max_{MIS_c \in \mathcal{S}} R_{u, MIS_c}$$

$$9. \quad \mathcal{K}_u = \mathcal{K}_{MIS_{c^*}}$$

$$10. \quad \mathcal{R}^j = \mathcal{R}^j \setminus \mathcal{K}_{MIS_{c^*}}, u \in \mathcal{U}_j$$

11. end for

第三步 每个小区独立分配剩余的 RB 资源

12. for each cell $\forall j \in \mathcal{J}$ do

13. if $\mathcal{R}^j \neq \emptyset$

14. 基于信道增益进行 RB 扩展分配得到 \mathcal{K}_u

15. end if

16. end for

4 仿真结果与讨论

本文利用 Matlab 对所提算法进行蒙特卡罗仿真,结果取

2000 次独立实验后的平均值。仿真中信道增益参数包含大尺度路径损耗和小尺度的瑞利衰落两部分,其中路径损耗模型为 $d^{-3.76}$ (d 表示设备到基站的距离),瑞利衰落服从均值为 1 的负指数分布。根据文献[12],仿真中 J 个小基站和 M 个 M2M 设备均匀分布在宏小区半径内,每个小区的系统带宽均为 10 MHz,根据 LTE 物理帧结构,可用的 RB 数量即为 50 个,每次独立实验中的小小区和设备位置均是随机生成的,具体仿真参数如表 1 所列。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数名称	值
宏小区半径/m	500
系统带宽/MHz	10
RB 带宽 B/kHz	180
M2M 业务资源分配比例 α	0.4
路径损耗模型	$d^{-3.76}$ (d 的单位为 m)
瑞利衰落参数	$\exp(1)$
宏基站与小基站间最小距离/m	75
小基站与小基站间最小距离/m	40
宏基站与宏小区用户最小距离/m	35
小基站与小小区用户最小距离/m	10
M2M 设备最大发送功率/dBm	14
H2H 用户最大发送功率/dBm	23
噪声功率谱密度/(dBm/Hz)	-174
强干扰判定门限参数 β	2

为了验证所提 CGMMIS 算法的性能,本文设置了 2 种对比算法:第一种为非协同 RB 分配算法,指各小区不进行干扰协调,独立地基于信道增益进行 RB 扩展分配;第二种利用文献[11]提出的分布式着色算法构造最大独立集,之后则依据本文所提出的 RB 扩展分配算法进行资源分配,被称为 MIS 算法。

在给定小小区数目时,图 4 表明,利用 M2M 设备总数增长带来的用户分集增益,3 种算法的系统速率均在增长,但 CGMMIS 算法的系统速率高于其余 2 种算法的系统速率,这一优势随着 M2M 设备数量的增加更加明显;而非协同算法由于没有进行干扰协调,其系统和速率最低。

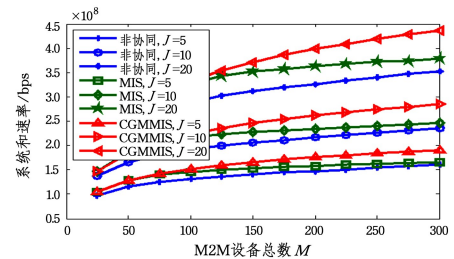


图 4 系统性能与 M2M 设备总数的关系

Fig. 4 Relationship between system performance and total number of M2M devices

当小小区数目 J 为 10 时,图 5 给出了 M2M 设备速率的累积分布函数(CDF)。对比图 4 和图 5 可以看出,随着 M2M 设备总数的增加,所提 CGMMIS 算法的性能优势更加明显,M2M 设备分布在高速率区间的概率明显高于非协同算法和 MIS 算法。

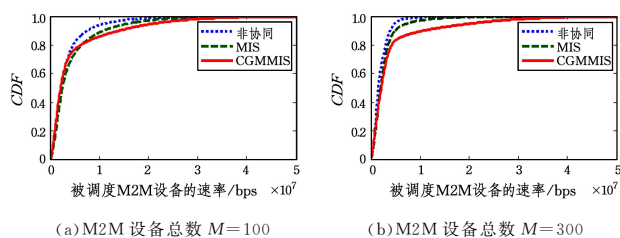


图5 M2M设备速率累积分布函数

Fig. 5 M2M device data rate CDF

在给定 M2M 设备总数时,图 6 表明,随着小小区数量的增加,系统和速率显著提升,这是因为空间上的频谱复用有效地增加了可用资源。从图 6 可以看出,当 M2M 设备的数量较少,如 $M=50$ 时,CGMMIS 算法的系统速率稍低于 MIS 算法的系统速率,这是因为 CGMMIS 算法倾向于以最少的最大独立集个数覆盖整个网络,而文献[11]提出的着色算法实质上是一种随机的最大独立集搜索算法,生成的独立集个数较多,M2M 设备数量较少时,意味着全部最大独立集搜索空间也不大,因而 MIS 算法有可能搜索到更优的最大独立集;而当 M2M 设备数量较大,如 $M=300$ 时,CGMMIS 算法明显优于 MIS 算法,这是因为此时全部搜索空间太大,MIS 算法搜索到更优的最大独立集的概率较小。

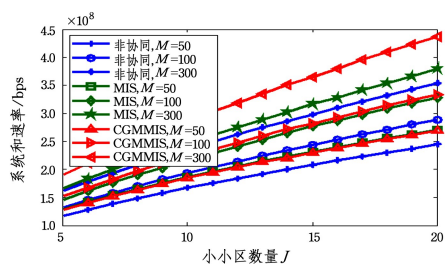


图6 小小区数量对系统性能的影响

Fig. 6 Impact of small cells on the system sum rate.

小小区数量 J 为 10 时,图 7 表明,系统和速率首先随着 M2M 设备发送功率的增加而增长,并在 M2M 设备发送功率超过一定门限时趋于平稳,这是因为小小区网络中干扰源较多,系统由噪声受限模式转换为干扰受限模式,一味地增加发送功率并不能提升网络性能。上述仿真结果表明:CGMMIS 算法由于对强干扰进行了协调,相对于其他 2 种算法体现出了更好的性能优势。

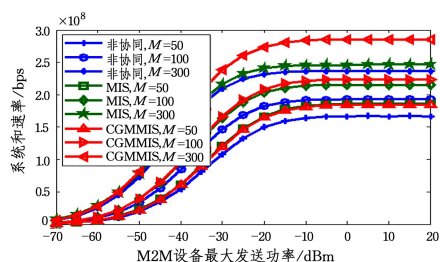


图7 M2M设备最大发送功率对系统和速率的影响

Fig. 7 Impact of M2M device transmission power on system sum rate

结束语 本文针对全频复用的 LTE-A 小小区网络环境,利用 RB 分配矩阵将 M2M 业务的系统和速率优化目标建模

为 NP 难的 BIP 问题,进而利用图论方法提出一种基于最大独立集的干扰协调和 RB 扩展分配算法,使得存在强干扰的节点归属于不同独立集,同时保证 RB 分配的连续性。仿真结果表明,CGMMIS 算法的系统速率明显优于非协同算法和基于着色的最大独立集随机搜索算法的系统速率。下一步将研究功率控制技术以减少不必要的能耗。

参考文献

- [1] 3GPP TS 22.368 V11.0.0. Service Requirements for Machine-Type Communications [S]. Istanbul:3GPP,2010.
- [2] PALATTELLA M-R,DOHLER M,GRIECO A,et al. Internet of Things in the 5G Era:Enablers, Architecture, and Business Models [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2016,34(3):510-527.
- [3] OECD. Machine-to-Machine Communications:Connecting Billions of Devices [R]. Paris: OECD Digital Economy Papers, 2012.
- [4] GHAVIMI F,CHEN H H. M2M Communications in 3GPP LTE/LTE-A Networks: Architectures, Service Requirements, Challenges, and Applications [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials,2015,17(2):525-549.
- [5] WONG I C,OTERI O,MCCOY W. Optimal Resource Allocation in Uplink SC-FDMA Systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2009,8(5):2161-2165.
- [6] AIJAZ A,TSHANGINI M,NAKHAI M R,et al. Energy-Efficient Uplink Resource Allocation in LTE Networks With M2M/H2H Co-Existence Under Statistical QoS Guarantees [J]. IEEE Transactions on Communications,2014,62(7):2353-2365.
- [7] LEE S B,PEFKIANAKIS I,MEYERSON A,et al. Proportional Fair Frequency-Domain Packet Scheduling for 3GPP LTE Uplink [C]//Proceedings of International Conference on Computer Communications. Rio de Janeiro:IEEE Press,2009:2611-2615.
- [8] CHEN S,MA R,CHEN H H,et al. Machine-to-Machine Communications in Ultra-Dense Networks - A Survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials,2017,19(3):1478-1503.
- [9] GRASSI A,PIRO G,BACCI G,et al. Uplink Resource Management in 5G: When a Distributed and Energy-Efficient Solution Meets Power and QoS Constraints [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2017,66(6):5176-5189.
- [10] KHAMIDEHI B,SABBAGHIAN M. Resource Allocation for SC-FDMA Femtocell Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2017,PP(99):1.
- [11] AHUJA K,XIAO Y,SCHAAR M. Distributed Interference Management Policies for Heterogeneous Small Cell Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2015,33(6):1112-1126.
- [12] SAMARAKOON S,BENNIS M,SAAD W,et al. Dynamic Clustering and on/off Strategies for Wireless Small Cell Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2016,15(3):2164-2178.