

基于业务感知的增强型小区间干扰协调算法*

张元宝, 唐 伦, 陈前斌

(重庆邮电大学 移动通信技术重点实验室, 重庆 400065)

摘要: 针对异构密集网络中宏基站对微基站用户干扰严重、用户业务变化剧烈,以及系统边缘频谱效率低下的问题,提出了一种基于业务感知的增强型小区间干扰协调算法。该算法首先利用离散马尔可夫调制过程对用户业务进行建模;然后提出了一种基于部分可观察马尔可夫决策过程的感知算法来感知用户业务变化;最后在感知结果的基础上提出了一种适应用户业务变化的动态 ABS 调整方案。仿真结果表明,所提方案有效地提升了系统边缘频谱效率,同时用户平均丢包率也得到了显著的下降。

关键词: 密集网络; 业务感知; 干扰协调; 边缘频谱效率

中图分类号: TN929.53

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2018)05-1495-05

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2018.05.047

Algorithm research of enhanced inter-cell interference coordination based on traffic-aware

Zhang Yuanbao, Tang Lun, Chen Qianbin

(Key Laboratory of Mobile Communication Technology, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Aiming to address the serious interference problem with the user traffic changing severely and improve the low cell edge spectrum efficiency of the heterogeneous dense network, this paper proposed an enhanced inter-cell interference coordination algorithm based on traffic-aware. This scheme built the traffic model based on the discrete Markov modulated Poisson process, and then proposed a traffic-aware algorithm based on partially observable Markov decision processes. Finally, on the basis of the predicted result, this paper presented a dynamic ABS adjustment algorithm which adapted to the change of traffic volume. Simulation results show that the proposed method improves the cell edge spectrum efficiency, meanwhile, decreases obviously the average packet loss ratio of system users.

Key words: dense network; traffic-aware; interference coordination; cell edge spectrum efficiency

0 引言

随着无线终端数量的快速增长,移动通信技术正逐渐从4G向5G演进。密集组网技术由于能使频谱资源得到尽可能的重用,被认为是下一代网络将采用的关键技术之一^[1]。密集组网通常由宏基站和微基站组成的异构网络实现,其中,宏基站用于保证网络的基本覆盖,而微基站一般用于扩展热点地区容量以及提升盲区的覆盖性能。然而,由于宏基站比微基站拥有更高的发射功率,导致大量的微蜂窝用户仍然选择信号强度更高的宏基站作为服务基站,造成微基站资源利用效率低下。为了使微基站资源得到充分利用,消除由于基站功率差异带来的影响,LTE-A引入了小区范围扩展(cell range extension)技术来解决宏蜂窝与微蜂窝间的负载均衡问题。在使用CRE技术后,用户进行接入时会在不同基站的参考功率接收信号(RSRP)上增加不同的偏置值,然后选择最大RSRP所对应的基站进行接入^[2]。如图1(a)所示,小区范围扩展扩大了微蜂窝覆盖范围,使原来处于扩展区域中的用户更容易接入到相邻的微基站中。然而,对于通过小区范围扩展接入到微基站的这部分用户来说,由于接收到的微基站信号强度小于宏基站信

号,所以此时将遭受严重的宏站干扰^[3]。

为了降低宏基站对微蜂窝边缘用户的干扰,已有大量的机构和组织展开研究。从LTE标准R10开始,3GPP标准化组织通过引入eICIC(enhanced inter-cell interference coordination)技术来实现小区间干扰协调^[4]。如图1(b)所示,eICIC主要通过宏基站在几乎空白子帧(almost blank subframe,ABS)上保持静默,让微蜂窝中干扰较重的边缘用户接受服务。从其工作原理可以看出,eICIC技术是通过牺牲宏用户性能来实现小区间干扰协调的。因此在使用eICIC时,必须选择恰当的ABS密度(ABS子帧占总子帧数的比例)来保证宏基站在降低干扰的同时,又不至于对宏用户性能造成较大损失。文献[5]提出了一种通过功率控制的方式使得系统吞吐量最大的全局优化算法,但其在工作中产生了较大开销,因此难以应用于实际环境中。文献[6]提出了一种通过分簇和功率调整相结合的方案,通过分配最优的功率降低干扰,最大化系统吞吐量。文献[7]研究了如何对ABS密度进行确定,他们认为ABS周期数量正比于扩展区域中的用户数量,但该方法未考虑宏蜂窝的业务负载情况。相反,文献[8]认为ABS周期的设置与宏蜂窝的负载密切相关,通过分别计算各微蜂窝所需的ABS周期长度,最后

收稿日期: 2017-01-08; 修回日期: 2017-03-06 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61571073)

作者简介: 张元宝(1991-),男,贵州遵义人,硕士研究生,主要研究方向为密集微蜂窝网络资源管理(zhangyuanbao1991@126.com);唐伦(1973-),男,教授,主要研究方向为新一代无线通信技术、LTE-A异构微蜂窝网络;陈前斌(1967-),男,教授,主要研究方向为个人通信、LTE-A异构微蜂窝网络。

结合宏站负载综合获得一个合理值。在现有文献中,大多数研究都是在特定的业务下进行的,然而在实际环境下,由于用户业务的多样性以及用户间客观存在的行为习惯差异,用户在不同时刻的业务量以及使用的业务类型往往是有差异的^[9]。当用户业务变化剧烈时,系统若基于前一时段的统计值直接进行下一时段的资源管理将存在着滞后性,所以首先感知用户业务数据量后再进行操作是非常有必要的。同时,鲜有文献考虑基站数据缓存容量有限这一因素。在实际环境下,基站中用于维护用户数据的缓存空间大小往往是有限的,当缓存数据超过缓存容量后,数据将发生溢出,造成丢包。为此,本文在考虑用户业务动态变化以及缓存容量有限的前提下展开研究,重点关心系统边缘频谱效率和用户丢包率的变化情况,在感知业务基础上提出了一种适应业务变化的 ABS 密度调整方案,实现在提升系统边缘频谱效率的同时,减少缓存溢出的发生。

1 网络模型

考察如图 1(a) 所示的 LTE-A 异构网络下行链路模型,设系统中存在 M 个宏基站,各宏蜂窝内均匀分布 N 个微基站, K 个移动用户均匀分布在网络中,并按照 max-RSRP (reference signal receiving power) 原则选择服务基站,宏基站与微基站共享频谱资源,各基站在每个调度周期采用比例公平原则对服务用户进行资源分配。在 eICIC 方案中,宏基站在 N-ABS 期间为宏用户提供数据服务,在 ABS 期间保持静默;微基站在 N-ABS 期间为信号较好的用户提供服务,在 ABS 期间为扩展区域用户提供服务。

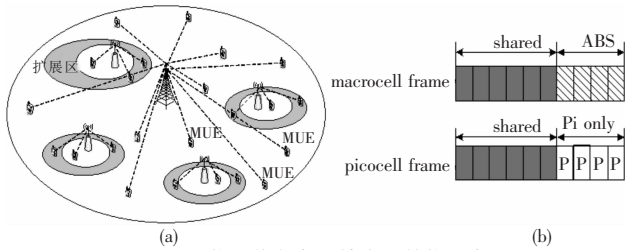


图 1 异构网络与各子帧类型结构示意图

如图 1(a) 所示,宏基站通常保持较高的功率为系统用户提供一个基础覆盖,而在热点区域以及覆盖盲区部署较低功率的微基站,通过分层组网方式增强热区容量以及盲区的覆盖性能。在异构密集网络中,当宏基站与微基站采用不同的载波频率时,称为异频组网;当采用相同载波频率时,称为同频组网。虽然异频组网可以有效减小层间干扰,但其降低了频谱资源利用率,由于频谱资源极为宝贵,所以同频组网显得更有吸引力。在本文研究的网络场景中,宏蜂窝与微蜂窝采用同频方式进行组网。

由 eICIC 工作原理可知,在 ABS 与 N-ABS 期间,受不同网络层服务的系统用户所遭受的干扰也是不同的。在 N-ABS 子帧期间,不管是宏用户还是微蜂窝用户,都同时受到同层干扰以及跨层干扰,此时宏用户 (MUE) 的信干噪比可表示为

$$\text{SINR}_{ij} = \frac{P_j \times h_{ij}}{\sum_{m=1 \dots M} P_m \times h_{im} + \sum_{n=1 \dots MN} P_n \times h_{in} + \sigma^2} \quad (1)$$

其中: P_j 表示宏基站 j 的发射功率; h_{ij} 表示用户 i 与基站 j 之间的信道增益; σ^2 表示噪声功率; M 为宏基站数量, MN 表示网络中微基站总数。在式(1)的分母中,第一项表示用户受到的来自别的宏层基站的干扰,第二项表示所遭受的来自与微蜂窝层基站的干扰。同理,微蜂窝用户 (PUE) 受微基站 j 服务时,其

SINR 可表示为

$$\text{SINR}_{ij} = \frac{P_j \times h_{ij}}{\sum_{m=1 \dots M} P_m \times h_{im} + \sum_{n=1 \dots MN} P_n \times h_{in} + \sigma^2} \quad (2)$$

在 ABS 子帧期间,用户所在宏基站保持静默,MUE 此时不进行数据服务,因此 SINR 可看成 0。在静默期间,宏基站可能会向 MUE 发送一些必要的控制信令,但这部分信号 PUE 是可以消除的^[2],因此,PUE 的 SINR 可表示为

$$\text{SINR}_{ij} = \frac{P_j \times h_{ij}}{I_i + \sigma^2} \quad (3)$$

其中: I_i 表示此时用户 i 所受干扰,包括微蜂窝层干扰以及部分此时系统中未保持静默的宏基站的干扰。由香农公式可知,信干噪比的不同直接影响了可实现的频谱效率,因此在不同干扰情况下,根据 QoS 需求研究如何进行时域资源管理是非常有必要的。

2 系统模型

2.1 业务模型

一般来说,用户间通常存在着一定的行为习惯差异,用户何时使用业务、业务量变化趋势如何,对于基站来说往往是难以预料的。为了感知业务变化,首先应知道业务的变化规律,即应先找到一种合适的业务模型对业务变化进行描述。本文利用 dMMPP (discrete Markov modulated Poisson process) 对业务进行建模,通过多个泊松流及其相互之间的状态转移概率,实现对用户数据包到达规律的描述。由文献[10]可知,对于随时间动态变化的因特网业务,可将其看成由多个服从泊松分布的业务流混合而成,而各个泊松流在不同的调整周期之间以一定的概率进行转移,即可通过状态转移矩阵 P 以及泊松流强度矩阵 Λ 对业务进行描述。

$$P = \begin{bmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \dots & p_{1,M} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \dots & p_{2,M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{M,1} & p_{M,2} & \dots & p_{M,M} \end{bmatrix} \quad \Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_M \end{bmatrix}$$

其中: M 表示泊松流数量; $p_{i,j}$ 表示由泊松流 i 到泊松流 j 时的转移概率; $\lambda_1, \dots, \lambda_M$ 表示各个泊松流对应的业务强度。关于利用 dMMPP 的详细建模流程,可参阅文献[10,11]。

2.2 基于 POMDP 的业务感知方法

POMDP (部分可观察马尔可夫决策过程) 适合解决在状态不确定的情况下,主体与环境交互并进行决策的问题^[12]。如图 2 所示,主体根据观察值变化情况,计算处于当前观察值环境下各个状态对应的信念状态,由此作为主体进行决策的依据,实现在环境感知的基础上解决问题。一般来说,POMDP 模型中包含状态空间、观测值、状态转移空间、观察函数等几个部分,结合本文要解决的问题,每一部分内容定义如下:

a) 状态空间 $S = \{s_1, \dots, s_m, \dots, s_M\}$, 在本文中, s_m 表示泊松到达率为 λ_m 的业务。

b) 观测值定义为在周期 $[d_{t-1}, d_t]$ 内数据包到达的个数。

c) 观察函数。观察函数空间表示观察值在各状态下对应出现的概率,由于状态空间中各状态定义为服从不同到达率的泊松分布的业务,所以当观察值为 N 时,观察函数空间可表示为 $O_t = \{o_t(s_1), \dots, o_t(s_m), \dots, o_t(s_M)\}$, 其中:

$$o_t(s_m) = \Pr(N|s_m) = \frac{(\lambda_{s_m} T)^N e^{-\lambda_{s_m} T}}{N!} \quad (4)$$

d)信念状态。信念状态使用 $b(s_m)$ 表示系统处于状态 s_m 的概率,因此相应的信念状态空间可表示为 $B_{d_{t-1}} = \{b_{d_{t-1}}(s_1), \dots, b_{d_{t-1}}(s_M)\}$,信念状态的计算与观察函数、状态转移概率以及上一决策周期系统信念状态有关,具体可由式(5)计算获得。

$$b_{d_t}(s_m) = \frac{o(s_m) \sum_{s_n \in S} P_{n,m} b_{d_{t-1}}(s_n)}{\sum_{s_n \in S} o(s_n) \sum_{s_n \in S} P_{n,m} b_{d_{t-1}}(s_n)} \quad (5)$$

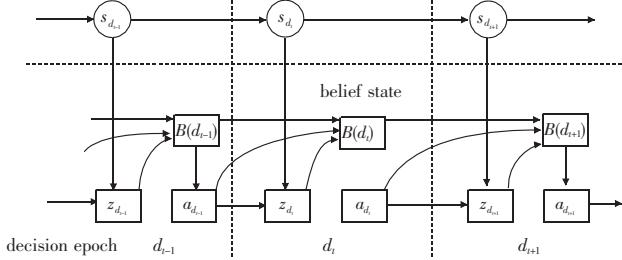


图2 POMDP 工作示意图

假设用户业务都使用 dMMPP 过程进行建模,并获得了用于描述用户业务状态的概率转移矩阵 P 和状态矩阵 Λ 。根据 POMDP 工作原理,对于每个调整周期,可根据当前周期观察值以及上一周期所处状态以及状态间转移概率矩阵,推测出当前周期最有可能出现的状态,为系统决策做准备。因此,在实际进行业务感知时,可通过用户缓存队列在上一周期中数据包到达情况以及各个泊松流对应信念状态,计算当前调整周期内各个泊松流出现的概率,由此得到调整周期内用户业务的平均到达率。

关于调整周期内业务感知算法的详细流程如算法1所示。

算法1 基于 POMDP 的业务感知方法

- 根据前一周期用户新到达数据包 ρ ,按式(4)计算观察空间中各元素。
- 结合前一周期信念状态空间 $B_{d_{t-1}}$ 、观察函数、状态转移概率 $p_{n,m}$,按式(5)更新当前周期信念状态空间 B_{d_t} 中所有元素。
- 按顺序取出泊松强度矩阵 Λ 中各元素,按式 $\bar{\lambda} = \sum_{i=1}^M \lambda_i \times b(s_i)$ 计算该周期平均业务强度。
- 按式 $\bar{\rho} = \bar{\lambda} \times \Delta t$ 即可计算得到研究周期内可能出现的到达包个数。

2.3 优化目标建立

在 LTE 系统下行链路中,基站向用户传输数据时通常会为其维护一个专属的数据缓存队列,并等待调度器进行调度^[13]。当待传数据超过缓存队列容量时,缓存队列将会溢出,发生丢包。因此对于系统来说,总希望待传包数量尽可能小于缓存队列容量,避免丢包的发生。由香农公式可知,当宏基站选取的 ABS 密度为 α 时,各基站实际可传数据量可表示为

$$T(\alpha) = \sum_{i \in U} \varphi_i(\alpha) \times c_{i,ABS} + \varphi_i(1-\alpha) \times c_{i,NABS} \quad (6)$$

其中: U 为该基站服务的用户数量; $\varphi_i(\alpha)$ 表示用户 i 在 ABS 期间分配到的频谱资源; $\varphi_i(1-\alpha)$ 表示用户 i 在 N-ABS 期间分配到的频谱资源; $c_i = \log_2(1 + \text{SINR}_i)$ 表示频谱效率。由于在不同时刻各用户到达的业务包数量存在着差异,如果在各个调整周期开始前,只基于各用户当前缓存来选择 α 进行干扰协调,将很难获得理想的调整结果。由于在调整周期内各用户数据包也在源源不断地到达缓存队列,在进行调整时,必须联合考虑调整周期内即将到达的用户业务包数量。设用户 k 在 $t-1$ 周期缓存队列长度为 $Q^{(k)}(t-1)$, $\lambda^{(k)}(t)$ 表示在 t 周期到达的包数量,在周期 t 结束时,微蜂窝扩展用户缓存队列长度可

表示为

$$Q^{(k)}(t) = Q^{(k)}(t-1) + \lambda^{(k)}(t) - (\mu_{ij} \times \alpha \times \Delta t) / p_s \quad (7)$$

对于常规子帧期间进行调度的用户来说,缓存队列长度为

$$Q^{(k)}(t) = Q^{(k)}(t-1) + \lambda^{(k)}(t) - \mu_{ij} \times (1-\alpha) \times \Delta t / p_s \quad (8)$$

其中: p_s 表示单个数据包的大小; $\mu_{ij} = \varphi_i(\alpha) \times c_i + \varphi_i(1-\alpha) \times c_i$ 表示基站在周期 t 内基站 j 对用户 i 的数据服务能力。

综上,为使系统吞吐量最大的同时尽可能地减少用户丢包数量,在调整周期内选择的最佳 ABS 密度应满足下列要求:

$$\begin{aligned} \max_{\alpha} \quad & \sum_{i=1}^M T_i(\alpha) + \sum_{j=1}^P T_j(\alpha) \\ \text{s. t.} \quad & 0 \leq \alpha \leq 1 \\ & Q_k(t) \leq Q' \quad \forall k \in K \end{aligned} \quad (9)$$

其中: Q' 为缓存容量大小; $T_i(\alpha)$ 、 $T_j(\alpha)$ 分别为宏基站和微基站吞吐量; $Q_k(t)$ 为式(7)(8)所示的用户 k 的缓存数据长度。

在网络中,边缘频谱效率往往是由信号质量较差的那部分用户来决定的,由于传输的数据较少,这部分用户对应的缓存队列发生溢出的情况也是非常严重的。所以在 ABS 密度调整过程中,约束用户缓存队列包的数量、减少用户缓存队列发生溢出的次数、传输更多的数据,对边缘频谱效率的提升也有促进作用。

3 动态 ABS 调整策略

3.1 用户频谱资源的确定

在计算最佳 ABS 比之前,应先确定采用何种方法对同一个蜂窝下用户进行资源分配。已知宏用户和微蜂窝中心用户在常规子帧期间获得数据服务,扩展区域用户在空白子帧期间获得数据服务。为了兼顾用户公平性和系统吞吐量,本文采取比例公平方法对用户进行资源分配。由文献[14]可知,采用比例公平方法为用户分配资源时,为了最大化吞吐量,可通过求解下式得到为各用户分配的实际资源数量:

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{i \in K_m} \log(\varphi_i \times c_i) \\ \text{s. t.} \quad & \sum \varphi_i < B \end{aligned} \quad (10)$$

其中: B 表示可用资源总数。由对数运算法则,将式(10)化简得

$$\sum_{i \in K_m} \log(\varphi_i \times c_i) = \sum_{i \in K_m} (\log(\varphi_i) + \log(c_i)) \quad (11)$$

其中: φ_i 为用户 i 所获得的频谱资源, c_i 与用户 SINR 相关。因此式(11)中第一项可进一步化简得

$$\sum_{i \in K_m} \log(\varphi_i) = K_m \times \log \sqrt[K_m]{\varphi_1 \cdots \varphi_{K_m}} \leq K_m \times \log \frac{\varphi_1 + \cdots + \varphi_{K_m}}{K_m} \quad (12)$$

在式(12)中,当且仅当 $\varphi_1 = \varphi_2 = \cdots = \varphi_{K_m}$ 时等号成立,因此,当 $\varphi_1 = \varphi_2 = \cdots = \varphi_{K_m} = B/K_m$ 时,即采取等资源分配时,基站吞吐量可获得最大值。

3.2 基于业务感知的动态 ABS 调整算法

由 2.3 节可知,为尽可能减少用户丢包的发生,系统在配置 ABS 密度时,不能仅考虑总吞吐量大小,应兼顾各用户待传数据包的累积数量,避免过多丢包的发生。当基站为移动用户提供数据服务时,不同的 ABS 密度将直接影响用于分配的资源总量;同时,由于 ABS 密度在实际使用时体现为 ABS 子帧在各调整周期的数量,所以满足式(9)要求的最优解必须使得调整周期内 ABS 数量为整数。为获得满足要求的 ABS 密度值,同时使得计算过程更好地应用于实际环境中,本文在结合

2.1.2.2 节中对用户业务量进行感知的基础上,提出了一种动态 ABS 调整方法来求得满足系统需求的最优 ABS 密度值。在该算法中,通过提前估计每个候选值相应的调整效果,然后根据系统吞吐量和缓存溢出用户数占比这两个指标来筛选出最佳值,详细调整算法如算法 2 所示。

算法 2 基于业务感知的动态 ABS 调整算法

a) 根据子帧类型,各基站统计 ABS、N-ABS 期间的平均 CQI 信息,并按等资源分配原则为用户分配相应的频谱资源。

b) 统计各个用户相应缓存队列长度 Q ,并按算法 1 对服务用户在当前调整周期中的数据包到达情况进行感知,最后各微基站将前述信息上报给宏基站。

c) 结合 a) 中信息 μ_N ,宏基站按顺序选择 ABS 密度候选值集合中元素 $\alpha_i (i=1,2,\dots,L)$,并执行如下操作:

(a) 按 $\mu = (1 - \alpha_i) \times \mu_N + \alpha_i \times \mu_A$ 计算平均服务率;

(b) 计算用户实际传输量 $T(\alpha_i) = \min(\bar{\lambda}T + Q, \mu T)$ 及系统总吞吐量 $\Gamma = T_k(\alpha)$,并按式 $Q(i+1) = Q + (\bar{\lambda} - \mu/I_p)T$ 估计在调整周期结束时各用户待传数据包数,其中 I_p 表示单个数据包大小,设缓存队列容量为 Q_{\max} ,此时统计超过 Q_{\max} 的用户数量 k ,计算其占比 $\beta_i = k/K$;

(c) 如果 $\beta_i < \beta$,则 $\alpha \leftarrow \alpha_i, \beta \leftarrow \beta_i$; 如果 $\beta_i = \beta$,若 $\Gamma_i \geq \Gamma$,则 $\alpha \leftarrow \alpha_i, \Gamma \leftarrow \Gamma_i$ 。

d) 重复步骤 c) 执行完毕,此时 α 所保存的值即为所求最佳 ABS 密度值。

4 仿真验证及结果分析

为了评估所提算法性能,本章将进行仿真分析。仿真场景为传统七小区场景,包含七个宏基站,每个宏基站中随机布置六个微基站和 150 个移动用户。以处于中心基站范围内用户的吞吐量作为研究对象,外层基站给中心基站用户提供小区间干扰。宏站间距为 500 m,微基站间距不小于 40 m,宏站高度为 35 m,微基站高度为 10 m。主要仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数

参数名称	参数取值
宏站发射功率	46 dbm
小站发射功率	23 dbm
载波频率	2 GHz
系统带宽	FDD; 10 MHz + 10 MHz
信道模型	宏基站 UMA, 微基站 UMI
调度方式	Proportional_Fair
单调整周期长度	100 ms
业务流模型	near real time video

由于动态 ABS 调整算法是结合业务感知进行的,所以首先评估了业务感知算法性能。

图 3 展示了业务感知(预测)值与实际值变化情况。从图 3 可以看出,预测值与实际值实现了较好的吻合,尽管实际业务随时间变化较为剧烈,但业务感知算法还是很好地实现了跟踪。在该算法中,首先使用了离散马尔可夫调制过程对业务进行建模,获得了用于表征业务的泊松流矩阵以及与之对应的状态转移矩阵,然后利用部分可观察马尔可夫决策过程计算调整周期内各泊松流出现的概率,最后综合两者实现了对业务的感知。

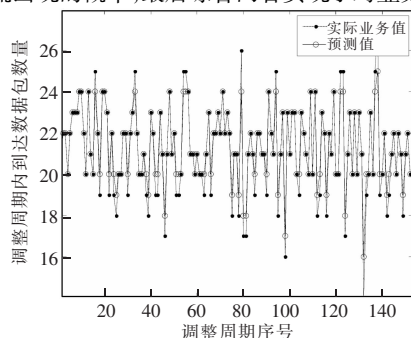
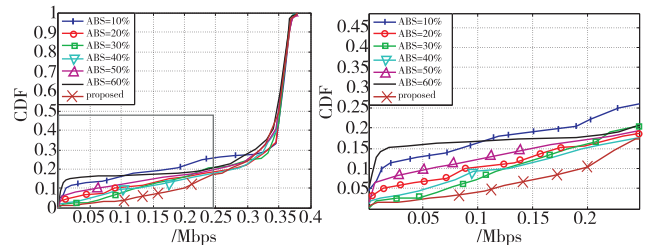


图 3 业务感知算法性能研究

图 4(a) 展示了所提方案与各种不同 ABS 比值下的用户吞吐量的累积概率分布, (b) 为 (a) 中方形区域的局部放大图。从图 4 中可以看出,所提算法使性能最差超过 20% 的用户吞吐量得到了提升,相较于文献[15]中最优 ABS 计算方法,在仿真中体现为 ABS 比为 30% 时,本文所提方案明显提升了这部分用户的传输速率,使更多的数据包得到了发送,因此提升了用户体验。



(a) 不同 ABS 比值的用户吞吐量累积概率分布 (b) 局部放大图

图 4 用户吞吐量累积概率分布图

图 5 对比了本文所提方案与配置不同 ABS 值时系统边缘频谱效率。从图 5 中可以看出,当采用不同 ABS 密度时,边缘频谱效率呈现先升后降的趋势。当业务随时间呈动态变化时,基站实际待处理的业务数据量也在随时间变化。对于信号较差的那部分用户来说,当缓存队列中数据累积过多时,若不能获得更多频谱资源,将快速导致缓存队列溢出。因此,采用适应业务变化的 ABS 调整方案,更多地兼顾了信号质量较差的边缘用户,实现了边缘频谱效率的显著提升。

图 6 展示了所提方案与不同 ABS 值时丢包率变化情况。从图 6 中可以看出,对于微蜂窝用户(PUE)来说,随着 ABS 子帧比例的增加,用户平均丢包数量呈现下降趋势。原因在于用于传输扩展区域用户数据的总资源数量随着 ABS 的增加而增加,所以这部分受宏基站干扰最严重的用户数据得到了更多的传输,数据缓存队列发生溢出的可能降低,产生了更少的丢包。然而,ABS 比例增加直接导致用于宏用户传输的资源数量减少,造成宏用户(MUE)缓存队列数据快速累积,使得宏用户平均丢包率快速增加。从图 6 中可以看出,本文所提方案使各类型用户平均丢包率都得到了有效控制,产生了更少的丢包,原因在于本文所提方案考虑了业务的动态变化特性,通过提前感知并进行动态调整,使基站用于服务各类型用户的资源发生相应变化,从而降低了缓存队列发生的溢出概率,减少了丢包的发生。

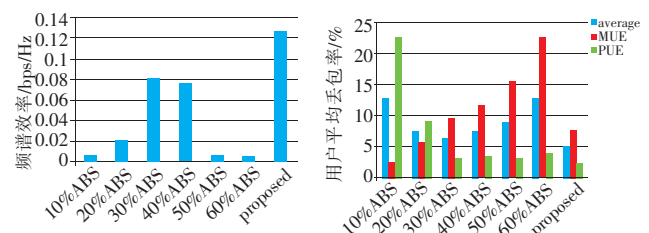


图 5 边缘频谱效率

图 6 偏置值 bias=15 时的用户平均丢包率

图 7、8 分别展示了在不同 CRE 偏置值条件下该算法的性能。通常,偏置值越大导致微基站的服务范围越大,致使更多的宏用户切换到微基站中并接受其服务。由图 7、8 可知,本文提出的动态调整算法在不同 CRE 偏置值条件下,也即用户处在不同干扰条件下时都能获得更好的调整效果。从图 7 可以

看出,偏置值越小导致微基站服务区域也越小,致使大量的移动用户仍然接受宏基站服务,由于总的可用资源相同,可以看出宏用户的丢包率明显比图8中要高;由于更少的用户接受微基站服务,微蜂窝用户丢包率明显比图8所示要低。

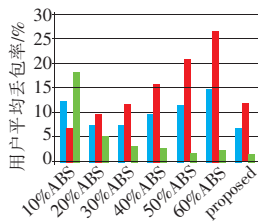


图7 偏置值 bias=10 时的用户平均丢包率

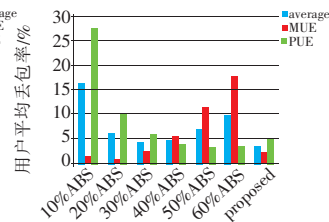


图8 偏置值 bias=20 时的用户平均丢包率

5 结束语

本文以提升边缘频谱效率和降低用户丢包率为目标,针对异构网络中的宏基站对微基站用户干扰严重、用户业务变化剧烈的问题,提出了一种基于用户业务感知的动态 ABS 调整方案。在该方案中,基站首先对调整周期内各用户待传数据量进行感知,结合用户的 QoS 需求以及基站在不同类型子帧下的服务能力差异,根据所提方案获得了最佳 ABS 密度。仿真结果显示,本文方法有效降低了丢包的发生,同时显著提升了边缘频谱效率,实现了对系统性能的改善。

参考文献:

- [1] 尤肖虎,潘志文,高西奇,等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术[J]. 中国科学:信息科学,2014,44(5):551-563.
- [2] Damnjanovic A, Montojo J, Wei Yongbin, et al. A survey on 3GPP heterogeneous networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(3):10-21.
- [3] Zhang Heli, Chen Shanzhi, Li Xi, et al. Interference management for heterogeneous networks with spectral efficiency improvement[J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(2):101-107.

- [4] Lopez-Perez D, Guvenc I, Roche G D L, et al. Enhanced intercell interference coordination challenges in heterogeneous networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(3):22-30.
- [5] Ho T M, Tran N H, Do C T, et al. Power control for interference management and QoS guarantee in heterogeneous networks[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(8):1402-1405.
- [6] 朱晓荣,朱蔚然. 超密集小蜂窝网中基于干扰协调的小区簇和功率分配算法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(5):1173-1178.
- [7] Vajapeyam M, Damnjanovic A, Montojo J, et al. Downlink FTP performance of heterogeneous networks for LTE-advanced[C]//Proc of IEEE International Conference on Communications Workshops. 2011:1-5.
- [8] Lopez-Perez D, Claussen H. Duty cycles and load balancing in Het-Nets with eICIC almost blank subframes[C]//Proc of the 24th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. 2013:173-178.
- [9] 李全刚. 通信网络中用户行为分析与生成模型研究[D]. 成都:电子科技大学, 2015.
- [10] Wang Ke, Li Xi, Ji Hong, et al. Traffic-based queue-aware scheduling for 3GPP LTE system[J]. Journal of China Universities of Posts & Telecommunications, 2014, 21(2):63-68.
- [11] Hsu C H, Feng Kaiten, Chang C J. Statistical control approach for sleep-mode operations in IEEE 802.16m systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(9):4453-4466.
- [12] 刘峰. 基于部分可观察马尔可夫决策过程的序列规划问题的研究[D]. 南京:南京大学, 2015.
- [13] 3GPP TS 36.321 Std. 10.2.0 (release 10), medium access control (MAC) protocol specification[S]. 2012.
- [14] Ghorbanzadeh M, Abdelhadi A, Clancy C. A utility proportional fairness radio resource block allocation in cellular networks[C]//Proc of International Conference on Computing, Networking and Communications. Washington DC:IEEE Computer Society, 2015:499-504.
- [15] Lembo S, Lunden P, Tirkkonen O, et al. Optimal muting ratio for enhanced inter-cell interference coordination (eICIC) in HetNets[C]//Proc of IEEE International Conference on Communications Workshops. 2013:1145-1149.

(上接第1494页)

参考文献:

- [1] Nakamura T, Nagata S, Benjebbou A, et al. Trends in small cell enhancements in LTE advanced[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(2):98-105.
- [2] Carlaw S. IPR and the potential effect on femtocell markets[R]. London:Allied Business Intelligence Research, 2008.
- [3] Andrews J G, Claussen H, Dohler M. Femtocells: past, present, and future[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(3):497-508.
- [4] 肖竹, 李仁发, 易克初, 等. 两层异构网络中 Femtocell 研究进展与展望[J]. 通信学报, 2013, 34(2):156-169.
- [5] Chandrasekhar V, Andrews J G, Muharemovic T, et al. Power control in two-tier femtocell networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(8):4316-4328.
- [6] Pedersen K I, Michaelsen P H, Rosa C, et al. Mobility enhancements for LTE-advanced multilayer networks with inter-site carrier aggregation[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(5):64-71.
- [7] Li Haoming, Hajipour J, Attar A, et al. Efficient HetNet implementation using broadband wireless access with fiber-connected massively

distributed antennas architecture[J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(3):72-78.

- [8] 郑侃, 彭岳星, 龙航, 等. 协作通信及其在 LTE-Advanced 中的应用[M]. 北京:人民邮电出版社, 2010:12-14.
- [9] 林霏, 罗涛, 路安琼, 等. 协同通信系统中基于遍历容量的近似最优功率分配[J]. 通信学报, 2009, 30(6):26-32.
- [10] De Lima C H M, Bennis M, Ghaboosi K, et al. Interference management for self-organized Femtocells towards green networks[C]//Proc of the 21st IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. 2010:352-356.
- [11] Alves H, Bennis M, Souza R D, et al. Enhanced performance of heterogeneous networks through full-duplex relaying[J]. EURASIP Journal on Wireless Communication and Networking, 2012, 2012(1):365.
- [12] Narasimhan R. Individual outage rate regions for fading multiple access channel[C]//Proc of IEEE International Symposium on Information Theory. 2007:1571-1575.
- [13] Adeane J, Rodrigues M R D, Wassell I J. Characterisation of the performance of cooperative networks in Ricean fading channels[EB/OL] (2016-12-22). http://www.cl.com.ac.uk/research/dtg/tlce-Pub/public/ja316/paper_ver6.pdf.