

多业务蜂窝中继系统的接入控制算法^①龚 萍^② 王东昊 牛 凯 吴伟陵

(北京邮电大学信息与通信工程学院 北京 100876)

摘 要 以多业务蜂窝中继系统已接入用户的服务质量(QoS)指标、中继负载大小为约束条件,在正交频分多址(OFDMA)方式下,将接入控制问题转化为最大化中继传输下所减少使用的子载波数的问题,并进一步考虑了用户对中继的选择、用户间竞争接入等情况,设计了几种改进的接入控制算法。同时,把这些算法推广到多业务的应用场景中,研究了不同速率业务比例对系统性能的影响。仿真结果表明,所提出的接入算法能支持更多接入用户、降低接入阻塞率和增加节省的子载波数,从而有效地提高了系统容量和资源利用率。

关键词 接入控制, 中继, 多跳, 多业务, 正交频分多址(OFDMA), 业务质量(QoS)

0 引 言

未来无线和移动通信系统将致力于在全网覆盖范围内为尽可能多的用户提供各种服务质量需求的高速率数据业务,这对现有的通信技术和网络结构是个巨大挑战。近年来,一种高效、低成本的的网络构建方案——蜂窝中继网络^[1,2]受到了广泛关注。蜂窝中继系统将中继多跳技术融入到传统蜂窝网络中,具有延伸网络覆盖范围、提高小区边缘服务质量、克服多径损耗和增加系统容量等优点,成为下一代无线通信的一种很有应用前景的构网方式。

接入控制(connection/call admission control, CAC)是负责对用户的接入请求进行准许判决,决定是否允许系统为用户提供相应请求服务的无线资源管理功能实体。对于无线通信网络来说,CAC在保障业务质量、降低系统阻塞率的同时,应尽可能在提高网络资源利用率等许多方面发挥关键作用。目前,关于蜂窝中继系统的无线资源管理方面的研究多集中于调度和功率分配问题上^[3-5]。对CAC尤其是多业务应用场景下的CAC研究很少,中继的负载能力在接入控制和系统容量等方面的影响也很少予以考虑。文献[6]提出了两种在保证已有用户QoS的前提下能支持更多用户数的中继接入控制算法,较好地提高了系统容量。但是文献[6]仅考虑了单速率业务下系统的性能,并且忽略了用户对中继的

选择问题,以及用户之间存在接入竞争的可能性。本文主要针对固定型中继系统,考虑正交频分多址接入(orthogonal frequency division multiplexing access, OFDMA)方式下与路由策略有效结合的CAC算法。首先解决路由问题,即用户选择直传还是多跳中继路径的问题,以及中继的选择问题,然后由CAC确定能否为各链路分配子载波资源。以中继传输下可减少使用的子载波数目最大化为优化目标,综合考虑了中继负载、已接入用户的QoS需求、中继和用户间的选择配对等各方面的约束,提出了几种改进的CAC算法,并仿真研究了不同速率要求的业务比例对系统性能的影响。仿真结果验证了这几种算法在提高系统容量等方面性能的优越性。

1 系统模型

1.1 小区模型

本文以研究最为广泛的两跳固定中继传输的应用场景为例,考虑基于OFDMA的蜂窝中继系统中的下行链路,具体模型如图1所示。其中,基站(BS)位于小区的中心,多个中继(RS)部署于BS和小区顶点连线上,与BS的距离为小区半径的2/3,并且都为采用解码-转发(DF)方式前传信号的再生中继。移动台(MS)可有两种模式与BS通信:直接与BS通信,即单跳直传传输;或通过RS与BS通信,即经过RS的两跳传输。这里设定一个MS最多能接入一

① 国家自然科学基金(60772108)资助项目。

② 女,1975年生,博士,讲师;研究方向:未来移动通信的关键技术研究;联系人,E-mail: pgong@bupt.edu.cn
(收稿日期:2009-12-22)

个 RS。

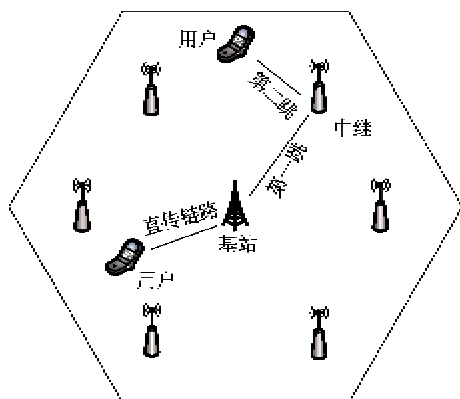


图1 系统模型示意图

这样,此系统中共存在 BS-MS 链路、BS-RS 链路和 RS-MS 链路三种通信链路,分别记为 L_S, L_{RX} 和 L_{TX} 链路。假设 L_{RX} 信道传输质量良好可视为视距传输, L_{TX} 和 L_S 则均为非视距传输。

设小区内的全部载波资源由直传和两跳通信两部分使用,并设两跳链路 L_{RX} 和 L_{TX} 采用时分双工(TDD)方式共享同一子载波,具体分配模型如图2所示。

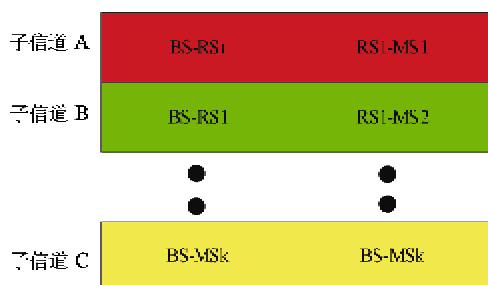


图2 子载波分配模型

由于再生中继进行解码转发,会使每一跳产生的误码率传播到下一跳。因此,为了满足系统对两跳传输所要求的误码率目标 $\bar{B}$,每一跳产生的误码率目标值的和不能大于 $\bar{B}$,即 $\sum_{i=1}^2 \bar{B}_{L_i} \leq \bar{B}$,其中 $\bar{B}_{L_i}, i = 1, 2$ 是第 i 跳所要求的误码率。

另外,由于从 BS 到 MS 端到端的信息速率是由两跳中最小的信息速率决定的,因此,每一跳的目标信息速率,应不小于系统所要求的信息速率目标 $\bar{R}$,即 $\bar{R}_{L_i} \geq \bar{R}$,其中 $\bar{R}_{L_i}, i = 1, 2$ 是第 i 跳的信息速率目标。

未来无线通信将提供各种数据业务和多媒体业务,满足用户的多种 QoS 要求,如最低传输速率、时

延、误码率等。本文主要考虑的是不同用户的业务速率需求。不失一般性,分别考虑最低速率下限为 16kb/s 的低速率和 48kb/s 的高速率两种业务,并设系统中低速率业务与高速率业务的用户比例为 γ 。

1.2 中继负载能力分析

设信道为频率选择性信道,这样每一个链路 L 上的信道损耗和衰落的影响可表示为 $G_L = F_L \cdot d_L^{-\alpha} \cdot 10^{\epsilon/10}$,其中 F_L 是复高斯随机变量,表示频率选择性衰落; d 是链路 L 上收发端间的传输距离; α 为路径衰落因子; ϵ 是表示阴影衰落的随机变量。不考虑小区间的同频干扰而只考虑噪声的影响,则每一个链路 L 上的信噪比(SNR)为

$$\Gamma_L = \frac{G_L \cdot P_L}{\eta} \quad (1)$$

其中 η 是加性高斯白噪声的功率, P_L 是该链路上的信号发送功率。

由自适应调制(AMC)原理^[7],子载波在链路 L 上可达到的信息速率为

$$R_L = B \log_2 \left(1 + \frac{-1.5}{\ln(5 \cdot \bar{B}_L)} \cdot \Gamma_L \right) \quad (2)$$

其中 B 是子载波带宽。设用户 k 的最低传输速率要求为 R_k ,则 k 在链路 L 上所需的最少的子载波数目可以近似表示为

$$C_{k,L} = \lceil R_k / R_L \rceil \quad (3)$$

其中, $\lceil x \rceil$ 表示大于等于 x 的最小整数。那么,为了达到数据传输的 QoS 要求,用户使用直传和两跳中继时所需要的总的子载波数目 C_k^{SH} 和 C_k^{MH} 分别表示为

$$C_k^{SH} = C_{k,L_S}, C_k^{MH} = C_{k,L_{RX}} + C_{k,L_{TX}} \quad (4)$$

设只有当第 k 个用户 MS_k 使用 RS 传输时所需要的子载波数少于直传需要的子载波数,即 $C_k^{MH} < C_k^{SH}$ 时,信号才会经 RS 传输。则可定义 MS_k 获得的两跳增益 S_k 为使用 RS 传输所能减少使用的子载波数,即

$$S_k = \max \{ C_k^{SH} - C_k^{MH}, 0 \} \quad \forall k \quad (5)$$

在所有的 MS 中,定义那些希望通过 RS 传输的用户为多跳用户(MU)。若第 i 个 RS 在 L_{RX} 链路和 L_{TX} 链路上最多能提供 $N_{i,RX}$ 和 $N_{i,TX}$ 个子载波给 MU 接入,则定义 $N_{i,RX}$ 和 $N_{i,TX}$ 为它在 L_{RX} 链路和 L_{TX} 链路上的负载。

2 接入控制算法

2.1 问题描述

当请求接入的 MU 所需的子载波数超过 RS 的负载时,就需要启动接纳控制算法进行处理。由于每个 MU 具有不同的两跳增益,因此中继系统的接入控制问题可转化为最大化系统获得的总的两跳增益的问题。设 RS 个数为 F , 则

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{i=1}^F \sum_{k \in \overline{MU}_i} x_k \cdot S_k \\ s. \quad & t \quad C_{1,i}: \sum_{k \in \overline{MU}_i} x_k \cdot C_{k,L_{RX}} \leq N_{i,RX}, \forall i \\ & C_{2,i}: \sum_{k \in \overline{MU}_i} x_k \cdot C_{k,L_{TX}} \leq N_{i,TX}, \forall i \\ & C_3: x_k \in \{0,1\}, \forall k \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $\overline{MU}_i$ 是希望从第 i 个 RS 接收信号的 MU 的集合。 x_k 为是否能接入 RS 的指示参数,即如果 MS_k 被允许使用 RS,则 $x_k = 1$, 否则 $x_k = 0$ 。

运用拉格朗日(Lagrange)乘子法,重新定义式(6)为

$$\begin{aligned} Lag(u, u') = \sum_{i=1}^F [& \sum_{k \in \overline{MU}_i} x_k \cdot S_k \\ & - u_i \sum_{k \in \overline{MU}_i} (x_k \cdot C_{k,L_{RX}} - N_{i,RX}) \\ & - u'_i \sum_{k \in \overline{MU}_i} (x_k \cdot C_{k,L_{TX}} - N_{i,TX})] \end{aligned} \quad (7)$$

其中, u 和 u' 是拉格朗日乘数。重新定义式(7)为

$Lag(u, u') = \sum_{i=1}^F Lag(u_i, u'_i)$ 。由于每个 RS 上的用户接入控制是独立进行的,因此问题即转化为每个中继上的接入控制问题,形式如下:

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{k \in \overline{MU}_i} x_k \cdot S_k \\ s. \quad & t \quad C_{1,i}, C_{2,i}, \text{ and } C_3 \end{aligned} \quad (8)$$

这是一个二维背包问题即 NP-hard 问题,求解复杂性非常高^[8]。因此,根据对用户接入优先级的不同定义,文献[6]提出了两种启发式算法,即 BLMUA(平衡式接入控制)和 FLMUA(集中式接入控制)算法。BLMUA 算法认为当 MU 请求 RS 接入时,需要同时考虑 L_{RX} 和 L_{TX} 链路负载情况;FLMUA 算法认为影响数据传输率的主要是非视距传输的 L_{TX} 链路,则只考虑 L_{TX} 链路负载情况。

2.2 改进算法

在前两个算法的基础上,我们提出了几种改进算法来进一步提高系统性能。针对 BLMUA 和 FLMUA 算法,进一步考虑了用户对中继的选择问题,即当某一用户不能被中继 i 接入时仍然具有被

其他中继接入的可能性,加入了请求所有剩余中继的过程,设计了 BLMUA 改进(BLMUA Improved)和 FLMUA 改进(FLMUA Improved)算法。

并且,综合考虑了可能会出现优先级低的用户获得的两跳增益,反而会大于优先级高的用户获得的两跳增益的情况。引入进一步竞争的机制,将接入过程分为预接入和竞争两个阶段。初次分配子载波后,在已允许接入和未能接入的用户间再进行两跳增益的比较,以调整并确定最后接入用户,设计了竞争决策(Compete)算法和竞争决策改进(Compete Improved)算法。

几种算法的具体流程如下:

(1) BLMUA Improved 算法

1) $i = 1$, 同文献[6]中 BLMUA 算法,首先对 RS_i 判断是否需要启动接入控制算法,如需要进入 2),反之则直接进入 5)。

2) 对所有希望接入到 RS_i 的用户 MS_k , 按照式

$$U_k = \frac{S_k \sqrt{l_{RX}^2 + l_{TX}^2}}{C_{k,L_{RX}} \cdot l_{RX} + C_{k,L_{TX}} \cdot l_{TX}} \quad (9)$$

计算其优先级 U_k , 并按从大到小的方式排序。其中 l_{RX} 和 l_{TX} 分别是 L_{RX} 和 L_{TX} 链路上当前已经被允许接入的 $\overline{MU}_i$ 使用的子载波数目。

3) 根据优先级大小按照 BLMUA 算法的流程确定允许接入的用户。

4) 对于 3)中不能接入到 RS_i 的用户,计算其在剩余中继中的优先级,并寻找其中最大值对应的 RS_j , 将此用户加入到希望接入 RS_j 的 $\overline{MU}_j$ 中。

5) $i = i + 1$, 如果 $i \leq F$, 则返回 1);反之,算法结束。

(2) FLMUA Improved 算法

1) $i = 1$, 同文献[6]中 FLMUA 算法,首先判断是否需要接入控制算法,如需要进入 2);反之则直接进入 5)。

2) 对所有希望接入到 RS_i 的用户 MS_k , 按照式

$$U_k = \frac{S_k}{C_{k,L_{TX}}} \quad (10)$$

计算其优先级 U_k , 并按从大到小的方式排序。

3) 根据优先级大小按照 FLMUA 算法的流程确定允许接入的用户。

4) 同 BLMUA Improved 算法中的第 4 步。

5) $i = i + 1$, 如果 $i \leq F$, 则返回 1);反之,算法结束。

(3)竞争决策(Compete)算法(具体算法流程见图 3)

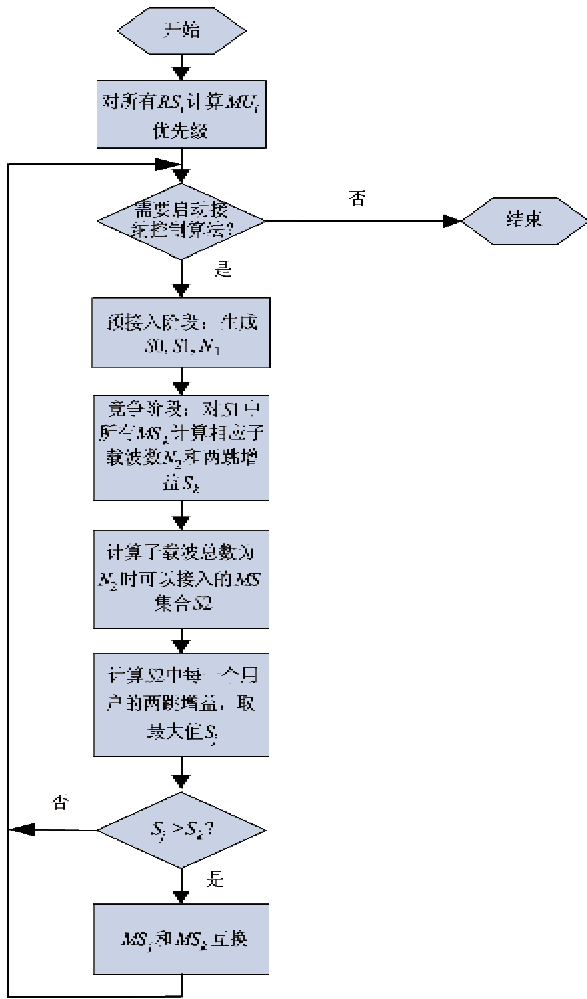


图3 竞争决策算法流程图

1) $i = 1$, 同 FLMUA 算法, 首先判断是否需要接入控制算法, 如需要进入 2); 反之则直接进入 6)。

2) 按照式(10)计算对所有希望接入到 RS_i 的 MU_i 中用户的优先级。

3) 预接入阶段: 根据优先级的大小依次将用户进行接入, 直到不能继续接入 RS_i 为止; 假设此时剩余的子载波数目为 N_1 , 并设接入用户的集合为 S_1 , 未接入的用户集合为 S_0 。

4) 竞争阶段: 对 S_1 中的每个 MS_k , 已知其需要的子载波为 C_k^{MH} , 获得的两跳增益为 S_k 。令 $N_2 = N_1 + C_k^{MH}$, 从优先级最大的 MS_k 开始, 计算集合 S_0 中在子载波总数为 N_2 时可以接入的 MS 集合 S_2 , 并计算 S_2 中每一个 MS_j 此时可以减少使用的子载波的数目 S_j 。选择其中最大值对应的 MS_j 进行比较; 如果 $S_j > S_k$, 则允许集合 S_2 中的 MS_j 接入而不允许用户 MS_k 接入, 并在 S_1 和 S_0 中替换 MS_k 和 MS_j 的位置; 反之, 保留 MS_k 在 S_1 中并不再参加竞争。

5) 对 S_1 剩下的用户循环此过程直到完成对 S_1 中所有用户的竞争。

6) $i = i + 1$, 如果 $i \leq F$, 则返回 1); 反之, 算法结束。

(4) 竞争决策改进(Compete Improved)算法

1) $i = 1$, 同 Compete 算法的第 1 步。

2) 同 Compete 算法的第 2-5 步, 确定允许接入 RS_i 的用户。

3) 同 BLMUA Improved 算法中的第 4 步。

4) $i = i + 1$, 如果 $i \leq F$, 则返回 1); 反之, 算法结束。

3 仿真结果与分析

仿真假设 BS 与 RS 间视距传输的衰落因子为 2.35, RS 与 MS, BS 与 MS 间非视距传输的衰落因子为 3.76; 各链路均不考虑阴影衰落。假设频率选择性信道包括 6 径独立瑞利多径, 每径由 Clarke 平坦衰落模型建模。假设小区内总子载波数目为 1024, 分配给直传部分的为 640; 设共有 6 个 RS, 不失一般性, 将分配给两跳部分的子载波均分给每个 RS, 即这 6 个 RS 的负载能力相等都为 64 个子载波。设传输过程中每个子载波上的功率是相同的, 都为 10W。用户数目仿真范围为 370 ~ 550, 两种速率业务误码率都设为 10^{-3} 。具体仿真参数见表 1。

表 1 主要参数

参数	数值
小区半径	600m
中心频移	5GHz
中继个数	6
子载波总数	1024
子载波带宽	5000Hz
噪声功率谱密度	-174dBm/Hz
基站发送功率	20W
中继发送功率	10W
中继负载能力	64
用户数目	370 ~ 550
用户最低速率要求	48kb/s, 16kb/s
误码率目标	10^{-3}

仿真中, 定义了一种随机接入(Rand)算法, 即对 MU 采取随机接入的方式, 直到接入的子载波数目达到中继的负载的策略作为对比算法。本研究中仿真比较了当 $\gamma = 3$ 时, 几种改进算法、原有两种算法

以及 Rand 算法的性能。

图 4 所示是几种算法下中继接入用户数的比较结果。可以看出 Compete Improved 算法性能是最佳的,在用户总数为 490 时,接入的用户数比相应的 BLMUA、FLMUA 算法约多 15 个。其次,BLMUA Improved 和 FLMUA Improved 算法下能多出约 10 个,而 Compete 算法的性能也有进一步的提高,Rand 算法由于没有考虑用户之间在节省子载波方面的差异,性能是最差的。

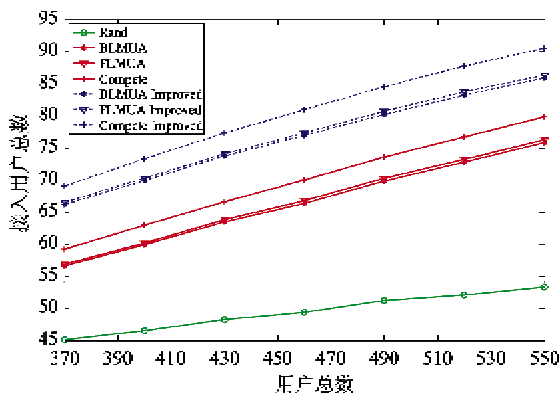


图 4 中继接入用户数目图

图 5 显示了几种算法下系统阻塞率即未接入用户数占用户总数的比率,随小区内用户总数增加而变化的结果。可以看出 Compete Improved 算法下阻塞率最低,在用户总数为 490 时,比相应的 BLMUA、FLMUA 算法约低 2.5%,BLMUA Improved 与 FLMUA Improved 算法下的阻塞率也约低 2%,Compete 算法也能进一步降低用户阻塞率,而 Rand 算法性能仍是最差的。

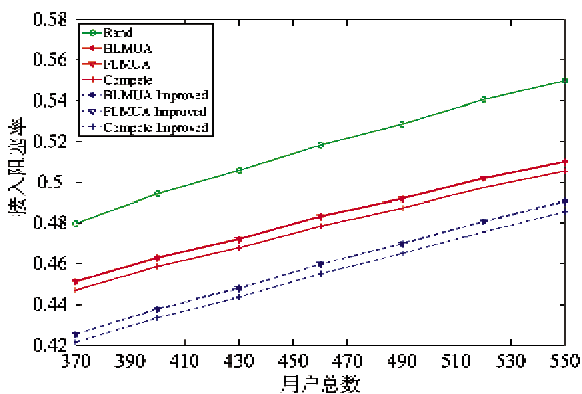


图 5 用户阻塞率图

图 6 给出了几种算法下平均每个中继可以节省的子载波数目的比较结果。可以看出,由于考虑了整个系统的接入性,Compete Improved、BLMUA Im-

proved 和 FLMUA Improved 算法性能接近,并明显优于相应的 Compete、BLMUA 和 FLMUA 算法。在用户总数为 490 时,多出约 80 个子载波,Rand 算法性能仍是最差。

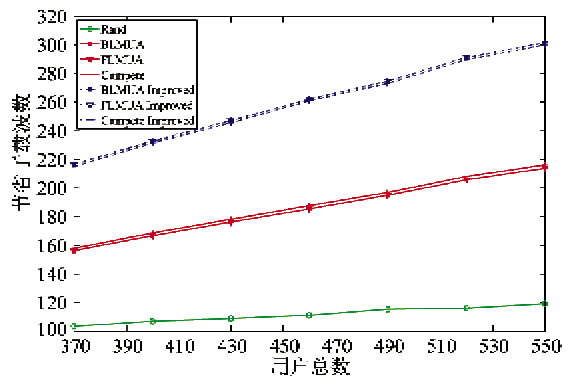


图 6 平均每个中继节省子载波数目图

为了考察不同业务速率要求的用户比例对系统性能的影响,以 FLMUA 和 FLMUA Improved 算法为例,仿真了 γ 分别取 2,3,4 时系统阻塞率的变化。从图 7 可以看出,相同的算法下,由于高速率业务占用子载波数更多,所以高速率业务用户所占比例越大(即 γ 越小时),系统阻塞越严重。但随着 γ 的增加,性能的差异缩小。同时,在相同的高低速率业务用户比例下,FLMUA Improved 都较 FLMUA 算法性能优异,能降低约 2% 的阻塞率。

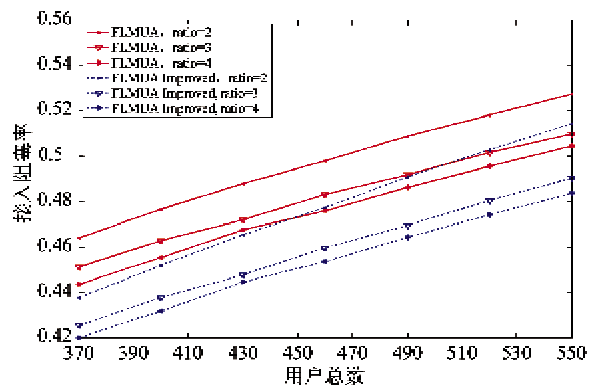


图 7 不同速率比例下用户阻塞率图

以上仿真结果验证了几种改进算法对提高系统容量的显著作用。同时,对几种改进算法进行复杂度分析后得知,在用户总数为 M , RS 个数为 F ,最复杂接入情况下,Compete Improved 算法、Compete 算法、BLMUA Improved 和 FLMUA Improved 的计算复杂度为 $O(M \cdot F)$,相比较 BLMUA 和 FLMUA 算法的复杂度 $O(M)$,在 F 个数通常有限的实际情况下,

改进算法增加的计算量代价可以不予考虑。

4 结 论

本文针对蜂窝中继系统中的接入控制问题,在综合考虑了用户 QoS 需求和用户对中继的选择等各方面的情况下,以中继传输下能减少使用的子载波数目最大化为优化目标,设计了几种改进的接入控制算法,进一步保证了系统资源利用率和服务质量的平衡。同时,把这些算法推广到多业务实用场景下,仿真研究了不同业务速率要求的用户比例对系统性能的影响,又进一步评估了算法复杂度大小。仿真结果验证了这几种改进算法性能的优异性。但本文并未考虑和其他无线资源管理策略结合以及业务特性模型等因素,因此展开这些方向的研究将是下一步工作的重点。

参考文献

- [1] Jaewon C, Zygmunt J H. On the throughput enhancement of the downstream channel in cellular radio networks through multihop relaying. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(7): 1206-1219
- [2] John B, David D F, Halim Y. Multihop diversity in wireless relaying channels. *IEEE Trans on Comm*, 2004, 52(10): 1820-1830
- [3] Cruz R L, Santhanam A V. Optimal link scheduling and power control in CDMA multihop wireless networks. In: *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference*, Taiwan, China, 2002. 52-56
- [4] Shi Jing, Zhang Z Y, Qiu P L, et al. Subcarrier and power allocation for OFDMA-based regenerative multihop links. In: *Proceedings of the 2005 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Wuhan, China, 2005. 207-210
- [5] Jemin L, Sungsoo P, Hano W, et al. QoS- guaranteed transmission scheme selection for OFDMA multi-hop cellular networks. In: *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Communications*, Glasgow, Scotland, 2007. 4587-4591
- [6] Jemin L, Hano W, Sungmook L, et al. A multihop user admission algorithm for fixed relay stations with limited capabilities in OFDMA cellular networks. In: *Proceedings of the 2007 IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Athens, Greece, 2007. 1-5
- [7] Qiu X, Chawla K. On the performance of adaptive modulation in cellular systems. *IEEE Trans on Comm*, 1999, 47(6): 884-895
- [8] Md M A, M. S R, Kaykobad M, et al. Solving the multidimensional multiple-choice knapsack problem by constructing convex hulls. *Computers & Operations Research*, 2005, 33(5): 1259-1273

Admission control algorithms for multi-service cellular relay systems

Gong Ping, Wang Donghao, Niu Kai, Wu Weiling

(School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract

The admission control problem in multi-service cellular relay systems with orthogonal frequency division multiplexing access (OFDMA) was investigated. Taking the quality-of-service (QoS) requirements and the capability of relay as the constraints, the admission control problem was formulated to maximize the amount of subcarriers decreased by relaying transmission. With further consideration of users' selection of relays and the competence among users, several new algorithms were proposed. Meanwhile, the application in multi-service scenario was taken into account, and the effect caused by the ratios of service with different transmission rates was studied. The simulation results verify that the proposed algorithms can support more admitted users, decrease the blocking probability and increase the total number of saved subcarriers, thus effectively improving the system capacity and resource utilization.

Key words: admission control, relay, multi-hop, multi-service, orthogonal frequency division multiplexing access (OFDMA), quality-of-service (QoS)