

基于合作中继的 OFDM 蜂窝网络的 QoS 感知资源调度算法

黄晓燕 毛玉明 吴凡

(电子科技大学通信与信息工程学院 成都 611731)

摘要: 针对基于中继的 OFDM 蜂窝网络, 该文考虑具有不同 QoS 要求的混合业务场景, 引入合作传输机制, 提出了一种基于合作中继的 QoS 感知资源调度算法, 解决了合作中继节点选取, 子载波分配以及功率控制等问题。以最大化系统效用为目标, 在考虑 QoS 业务的速率要求与基站功率约束的同时, 针对中继结构引入了中继节点的功率约束。为降低计算复杂度, 将原非线性组合优化问题分解为子载波分配与功率控制两个子问题。仿真结果表明, 该文所提算法在能量节约、系统效用, 吞吐量等性能方面都有显著优势。

关键词: 无线通信; 合作中继; 子载波分配; 功率控制; 服务质量

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)12-2948-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00055

QoS-Aware Resource Allocation Algorithm for Cooperative Relay-based OFDM Cellular Networks

Huang Xiao-yan Mao Yu-ming Wu Fan

(School of Communication & Information Engineering,

University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: This paper propose a QoS-aware resource allocation algorithm for cooperative relay-based OFDM cellular network with mixed services of different QoS requirements. The proposed algorithm solves relay selection, subcarrier allocation and power control issues. The design of resource allocation is formulated as a non-linear combinatorial optimization problem, which aims at maximizing the system sum utility while considering the data rate requirements of QoS users and the transmit power constrains for the base station as well as each relay station. To reduce the computational complexity, the global optimization issue is decomposed into subcarrier allocation and power control sub-issues. Numerical results demonstrate that the proposed algorithm is able to improve significantly the network performance in terms of power saving, system utility and system throughput.

Key words: Wireless communication; Cooperative relay; Subcarrier allocation; Power control; Quality-Of-Service (QoS)

1 引言

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)技术以支持突发高速数据传输, 频谱效率高, 抗多径能力强等显著特征已被公认为 B3G/4G 系统的核心技术之一^[1]。然而, 在传统的蜂窝网络中, 为了提高系统容量, 扩大网络覆盖范围通常需要部署大量的 BS(Base Station), 从而导致建网成本成倍增加。为了在系统性能与建网成本之间达到一个较好的折中, 在传统蜂窝网络里部署 RS(Relay Station)以低成本换取较高的系统性能提升, 构成了新一代基于中继的蜂窝网络架构^[2]。在传统蜂窝网络里部署中继节点可以在提高系统容量,

扩张覆盖范围以及节约功率等性能方面得到显著改善^[3]。近年来, 合作传输技术作为一种新兴的传输技术得到了越来越多的关注。合作传输技术能够有效地增加网络覆盖范围, 提高传输可靠性^[4]。

本文在基于中继的 OFDM 蜂窝网络架构中引入合作传输机制, 并考虑具有不同 QoS 要求的混合业务, 包含 QoS 业务与 BE (Best Effort)业务, 重点研究这种网络场景下的资源分配问题。与传统蜂窝网络相比, 基于合作中继的 OFDM 混合业务蜂窝网络的资源优化更具挑战性, 它需要解决在保证各类业务 QoS 要求前提下如何进行合作中继节点的选取, 如何在基站与合作中继节点之间进行联合子载波、功率分配等问题。目前, 研究基于合作中继的 OFDM 蜂窝网络资源的高效、联合分配的文献还比较有限。文献[5]研究了基于网络合作的资源分配问

2010-01-19 收到, 2010-06-10 改回

国家自然科学基金(60802024)资助课题

通信作者: 黄晓燕 beacon420@gmail.com; xyhuang@uestc.edu.cn

题, 提出通过相邻小区的基站之间的合作来保证 QoS 用户的速率要求, 但是作者没有考虑资源分配的用户公平性问题。文献[6]针对只有一个中继节点的网络场景提出了一种启发式的子载波分配算法, 但并未考虑中继节点选取以及功率分配等问题。文献[7]研究了 OFDMA 蜂窝网络下行链路的机会功率调度问题, 提出了一个以最大化系统吞吐量为目标的随机优化模型。但是作者没有考虑合作中继, 同时也没讨论子载波分配以及用户公平性问题。

本文的主要贡献是为支持混合业务的 OFDM 蜂窝网络里提出了一个简单有效的基于合作中继的 QoS 感知联合资源调度算法, 该算法兼顾了资源分配的效率与公平性, 提出了合作中继节点选取、子载波分配以及功率控制等问题的一系列解决方案。

2 系统模型

本文考虑基于合作中继的 OFDM 蜂窝网络下行链路多用户网络环境, 如图 1 所示, 包含一个基站(BS), M 个中继节点(RS)和 K 个用户(包含 K_Q 个 QoS 用户和 K_B 个 BE 用户)。系统的整个带宽被划分成 N 个等宽正交的子载波。假设无线信道为时变频率选择性信道, 但是每个子载波上的衰落近似为平坦衰落, 并且每个子载波的信道增益在一个调度周期内保持不变^[5,6]。本文采用基站与中继节点合作传输的方式为 QoS 用户传输数据, 而由基站直接向 BE 用户传输数据。每个 QoS 用户只能选择一个合作中继节点。假设所有中继节点均采用译码前向(Decode-and-Forward, DF)的中继方式, 并且不能同时发送和接收数据。每个调度周期分为两个时长相等的阶段: 在第 1 阶段, 基站发送数据, 中继节点和用户接收数据, 中继节点并对接收到的数据进行处理; 在第 2 阶段, 基站与中继节点通过频分复用占用信道, 中继节点在与第 1 阶段接收数据相同的子载波上为对应的 QoS 用户中继数据, 而基站则利用剩余的子载波为 BE 用户发送数据。

为了兼顾资源分配的效率与公平性, 本文采用

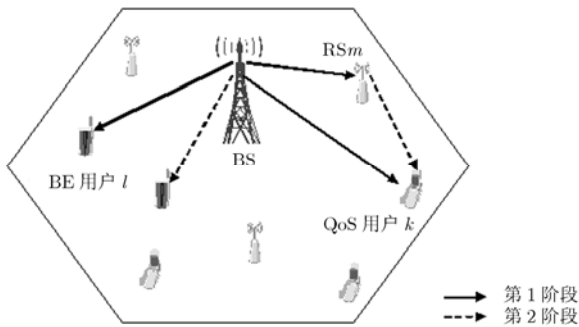


图 1 基于合作中继的蜂窝网络

基于效用的资源分配策略, 使用关于速率的效用函数来描述 QoS 用户和 BE 用户对网络服务质量的满意程度^[8]。QoS 用户的效用函数定义为一个阶跃函数, $U_k(r) = \begin{cases} 1, & r \geq R_k^{\text{req}} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$, 即一旦系统满足了用户

速率要求 R_k^{req} , 用户满意度达到最大值。而 BE 用户的效用函数则定义为一个非递减的凹函数, $U_k(r) = 1 - e^{-0.1r}, r > 0$, 随着系统提供速度的逐渐增加, 用户满意度也随之增加, 但增长趋势逐渐减缓。

假设基站或中继节点到用户的无线链路用 (k, m) 表示, 其中 $k \in \{1, 2, \dots, K\}$, $m \in \{0, 1, \dots, M\}$, $m=0$ 表示基站。定义 $H_{n,k,m}$ 为链路 (k, m) 在第 n 个子载波上的信道增益, σ^2 为白噪声平均功率。因此, 链路 (k, m) 在第 n 个子载波上的单位发射功率信噪比可表示为

$$\eta_{n,k,m} = |H_{n,k,m}|^2 / \sigma^2 \quad (1)$$

定义 $c_{n,k}$ 为子载波分配指示符, 其值为 1 表示将第 n 个子载波分配给用户 k ; 反之则为 0。为了避免同信道干扰, 每个子载波只能分配给一个用户, 即

$$\sum_{k=1}^K c_{n,k} = 1, c_{n,k} \in \{0, 1\}, \forall n \quad (2)$$

定义 $p_{n,k,m}^{(\tau)}$ 为第 τ 阶段, 链路 (k, m) 在第 n 个子载波上分配的功率。因此, 在第 τ 阶段用户 k 在链路 (k, m) 上可获得的归一化带宽速率为

$$R_{k,m}^{(\tau)} = \sum_{n=1}^N c_{n,k} \lg(1 + p_{n,k,m}^{(\tau)} \eta_{n,k,m}), \quad \forall \tau \in \{1, 2\}, m \in \{0, 1, \dots, M\} \quad (3)$$

假设 QoS 用户 k 选择中继节点 g_k 作为合作中继节点, 且基站到中继节点 g_k 的链路在第 n 个子载波上的信道增益为 \tilde{H}_{n,g_k} , 那么在第 1 阶段, 中继节点 g_k 关于 QoS 用户 k 的数据的接收速率可表示为

$$R_{g_k} = \sum_{n=1}^N c_{n,k} \lg(1 + p_{n,k,0}^{(1)} \varsigma_{n,g_k}) \quad (4)$$

其中 $\varsigma_{n,g_k} = |\tilde{H}_{n,g_k}|^2 / \sigma^2$, 表示基站到中继节点 g_k 的链路在第 n 个子载波上的单位发射功率信噪比。定义 R_k^{co} 为 QoS 用户 k 可获得的合作速率^[9]:

$$R_k^{\text{co}} = \sum_{n=1}^N c_{n,k} \lg(1 + p_{n,k,0}^{(1)} \eta_{n,k,0} + p_{n,k,m}^{(2)} \eta_{n,k,m}) \quad (5)$$

因此, 在一个调度周期内, QoS 用户 k 与 BE 用户 l 获得的有效速率分别为^[9]

$$R_k^{\text{QoS}} = \frac{1}{2} \min\{R_{g_k}, R_k^{\text{co}}\}, k \in \{1, 2, \dots, K_Q\} \quad (6)$$

$$R_l^{\text{BE}} = \frac{1}{2} (R_{l,0}^{(1)} + R_{l,0}^{(2)}), l \in \{K_Q + 1, \dots, K\} \quad (7)$$

假设基站在第1阶段和第2阶段的最大发射功率分别为 P_0 和 $P_{2,0}$, 中继节点 m 在第2阶段的最大发射功率为 $P_{2,m}$, 那么功率分配必须满足以下两个条件:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N p_{n,k,0}^{(1)} \leq P_0 \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N p_{n,k,m}^{(2)} \leq P_{2,m}, \forall m \in \{0, 1, \dots, M\} \quad (9)$$

3 基于合作中继的 QoS 感知资源调度模型

3.1 QoS 用户的中继节点选择策略

本文使用基站与中继节点之间的合作传输机制来保证 QoS 用户的服务质量要求, 因此, 合作中继节点的选取在无线资源分配中起着至关重要的作用。为每个 QoS 用户选择适当的合作中继节点不仅能保证 QoS 用户的服务质量要求, 还能尽可能地节约基站功率, 从而为 BE 用户分配更多的功率以提高系统效用。显而易见, 如果中继节点与基站及用户之间的链路质量都足够好, 那么选其作为合作中继节点就可以得到较高的合作分集增益。否则, 基站与用户之间的通信质量将因为其中某条中继链路质量较差而受到影响。

本文采用了一种简单而有效的中继节点选取方案, 为每个 QoS 用户选择等效端到端信道增益最好的中继节点作为合作中继节点。定义 h_{sj} 和 h_{jk} 分别表示基站到中继节点 j , 以及中继节点 j 到 QoS 用户 k 的链路质量, 它们是通过每条链路上的每个子载波的信道增益取 2-范数获得。假设 g_k^j 表示 QoS 用户 k 以中继节点 j 作为合作中继时到基站的等效端到端信道增益。因此, QoS 用户 k 选择的合作中继节点的索引号^[10]可以表示为

$$g_k = \arg \max_j \{g_k^j\}, \quad j \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (10)$$

$$\text{其中 } g_k^j = g(h_{sj}, h_{jk}) = \frac{1}{\frac{1}{|h_{sj}|^2} + \frac{1}{|h_{jk}|^2}} \equiv \frac{|h_{sj}|^2 |h_{jk}|^2}{|h_{sj}|^2 + |h_{jk}|^2}。$$

3.2 QoS 感知联合资源调度模型

为了兼顾资源分配的效率和公平性, 本文提出了一种基于效用的 QoS 感知联合资源分配模型, 将联合子载波, 功率分配形式化为一个非线性组合规划问题(P1), 以最大化系统效用为目标, 同时满足 QoS 用户的速率要求, 以及基站与中继节点各自的最大发射功率等约束。

$$\text{P1: } \max_{c_{n,k}, p_{n,k,m}^{(\tau)}} \sum_{k=1}^K U_k(R_k) \quad (11a)$$

$$\text{s.t. } R_k^{\text{QoS}} \geq R_k^{\text{req}}, \quad k \in \{1, 2, \dots, K_Q\} \quad (11b)$$

约束条件式(2), 式(8)及式(9)

值得注意的是 QoS 用户的效用函数是一个阶跃函数, 一旦满足了约束条件式(11b), QoS 用户的总效用值将恒为 K_Q 。因此, 原规划 P1 的优化目标可等效为最大化 BE 用户的总效用, 即

$$\max_{c_{n,k}, p_{n,k,m}^{(\tau)}} \sum_{k=K_Q+1}^K U_k(R_k) \quad (12)$$

根据式(6)可知 QoS 用户在一个调度周期内的有效速率等于合作中继节点的接收速率 R_{g_k} 与合作速率 R_k^{co} 之中的较小者, 结合 QoS 用户速率约束式(11b)可以推出以下结论: 如果 R_{g_k} 与 R_k^{co} 均满足了 QoS 用户速率约束, 但是二者不相等, 那么可以通过减少分配给较大者的功率, 使得二者速率相等, 这样既不会影响 QoS 用户的有效速率, 还能提高无线资源的利用效率。所以, QoS 用户的速率约束可以重新表示为

$$\frac{1}{2} R_{g_k} = \frac{1}{2} R_k^{\text{co}} \geq R_k^{\text{req}}, \quad k \in \{1, 2, \dots, K_Q\} \quad (13)$$

规划 P1 是一个 NP 完全问题。为了降低求解 P1 的计算复杂度, 本文提出了一个次优算法, 将原优化 P1 分解为两个子问题: 第 1 个子问题是在固定功率分配的基础上寻找最优的子载波分配, 而第 2 个子问题则是在第 1 个子问题的结果基础之上进行功率控制。

4 子载波分配与功率控制算法

4.1 子载波分配算法

假设 p_0 和 p_m 分别表示基站与中继节点 m 在每个子载波上的平均功率, 根据式(12)和式(13), 固定功率分配下的子载波分配问题可以形式化为一个非线性整数规划问题(P2):

$$\text{P2: } \max_{c_{n,k}} \sum_{k=K_Q+1}^K U_k \left(\sum_n c_{n,k} \lg(1 + p_0 \eta_{n,k,0}) \right) \quad (14a)$$

$$\text{s.t. } \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N c_{n,k} \lg(1 + p_0 \eta_{n,k,0} + p_m \eta_{n,k,g_k}) \geq R_k^{\text{req}}, \quad k \in \{1, \dots, K_Q\} \quad (14b)$$

约束条件式(2)

当子载波数 N 和用户数 K 取值较大的时候, 求解规划 P2 的计算复杂度非常高 ($O(N^K)$)。因此, 本文首先对同信道干扰约束条件进行松弛, 引入一个实数变量 $\rho_{n,k}$, $0 \leq \rho_{n,k} \leq 1 (\forall n, k)$ 来替代原整数变量 $c_{n,k}$, 从而将规划 P2 转化为一个凸规划问题, 进而可以通过优化工具直接求解。但是, 最优松弛解 $\rho_{n,k}^*$ 是实数, 需要将其调整为整数值才能完成子载波的分配。

基于最优松弛解, 以及目标函数的凹性特征, 本文提出了一种动态子载波分配算法^[11]。首先, 在

所有未满足速率要求的 QoS 用户中查找 $\rho_{n,k}^*$ 值最大者, 并将对应的子载波分配给它。若按上述步骤分配之后还存在没有满足速率要求 QoS 用户, 则执行补偿算法, 即对于任何一个未满足速率要求的 QoS 用户, 依次为其分配信道容量最接近其速率要求的子载波, 直到满足速率要求, 或子载波分配完毕为止。当所有 QoS 用户满足需求后, 将剩余的子载波分配 $u_k(R_k^*)r_{n,k}$ 取值最大的 BE 用户, 其中 $u(R_k^*)$ 为边界效用值; 若同时存在多个最大者, 则分配给 $\rho_{n,k}^*$ 取值最大者。其间, BE 用户一旦达到最优速率将不再参加分配。

4.2 功率控制算法

本文所提的资源调度算法的目标是最大化 BE 用户的效用和, 同时满足 QoS 用户的速率要求, 以及基站与中继节点各自的最大发射功率约束。值得注意的是, BE 用户的效用函数是关于速率的非递减函数, 而速率又是关于功率的递增函数。因此, 当子载波分配确定之后, 功率控制的目标可以等效为最小化满足所有 QoS 用户速率要求所需的基站功率, 以此最大化 BE 用户的总效用。基于以上分析, 本文将功率控制问题进一步按用户类型分解为两个子问题。

4.2.1 QoS 用户的功率控制算法 对于 QoS 用户, 功率控制问题可以描述为如下规划问题(P3):

$$P3: \min_{p_{n,k,0}^{(1)}, p_{n,k,m}^{(2)}} \sum_{k=1}^{K_Q} \sum_{n=1}^N p_{n,k,0}^{(1)} \quad (15a)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k=1}^{K_Q} \sum_{n=1}^N p_{n,k,m}^{(2)} \leq P_{2,m}, \quad \forall m \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (15b)$$

约束条件式(13)

根据式(4), 式(5)与式(13), 可以得到 $p_{n,k,0}^{(1)}$ 与 $p_{n,k,g_k}^{(2)}$ 的如下关系:

$$p_{n,k,g_k}^{(2)} = \alpha_{n,k,g_k} p_{n,k,0}^{(1)}, \quad \forall n, \forall k \in \{1, 2, \dots, K_Q\} \quad (16)$$

其中 $\alpha_{n,k,g_k} = (\eta_{n,g_k} - \eta_{n,k,0}) / \eta_{n,k,g_k}$ 。

将式(16)代入式(15b), 规划 P3 的约束条件式(15b)可转化为

$$\sum_{k=1}^{K_Q} \sum_{n=1}^N \alpha_{n,k,g_k} p_{n,k,0}^{(1)} \leq P_{2,g_k}, \quad \forall g_k \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (17)$$

在高信噪比环境里, 根据式(4)规划 P3 的约束条件式(13)可转化为

$$\left(\prod_{n=1}^N p_{n,k,0}^{(1) c_{n,k}} \right) \geq \left(2^{2R_k^{\text{req}}} - 1 \right) / \left(\prod_{n=1}^N \zeta_{n,g_k} c_{n,k} \right), \quad k \in \{1, 2, \dots, K_Q\} \quad (18)$$

此时, 规划 P3 可转化为一个关于决策变量 $p_{n,k,0}^{(1)}$ 的几何规划问题。通过使用一些常用的优化工具即可求得最优解。

4.2.2 BE 用户的功率控制算法 对于 BE 用户, 功率控制问题可以形式化为一个凸规划问题(P4), 以最大化 BE 用户的效用和为优化目标, 并满足第 1 阶段和第 2 阶段的最大发射功率约束。

$$P4: \max_{p_{n,k,0}^{(1)}, p_{n,k,0}^{(2)}} \sum_{k=K_Q+1}^K U_k(R_k) \quad (19a)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k=K_Q+1}^K \sum_{n=1}^N p_{n,k,0}^{(1)} \leq P_0 - P_{\text{QoS}} \quad (19b)$$

$$\sum_{k=K_Q+1}^K \sum_{n=1}^N p_{n,k,0}^{(2)} \leq P_{2,0} \quad (19c)$$

其中 P_{QoS} 表示第一阶段 QoS 用户消耗的基站功率, 该值可以通过求解规划 P3 获得。通过采用拉格朗日乘法, 凸规划 P4 的最优解可以表示为

$$p_{n,k,0}^{(1)*} = c_{n,k} \left[\frac{U'_k(R_k^*)}{2\lambda} - \frac{1}{\eta_{n,k,0}} \right]^+ \\ p_{n,k,0}^{(2)*} = c_{n,k} \left[\frac{U'_k(R_k^*)}{2\mu} - \frac{1}{\eta_{n,k,0}} \right]^+, \quad k \in \{K_Q + 1, \dots, K\} \quad (20)$$

当子载波分配确定之后, 凸规划问题 P4 可以采用 Frank-Wolfe 方法^[12], 通过在与其相同的约束条件下求解一系列线性优化问题 $\max \sum_{k=K_Q+1}^K u_k r_k$, 其中 u_k 为边界效用值, 最终解出 P4 的最优解。

5 仿真分析

假设 OFDM 蜂窝网络的半径为 1000 m, 基站位于小区的中心, 6 个中继节点均匀分布在距基站 300 m 处的圆周上, 而用户则均匀分布在距基站 700 m 到 1000 m 的边缘区域。QoS 用户的速率要求均匀分布于 0.7 Mbps 至 2 Mbps 之间。系统总带宽为 5 MHz, 包含 128 个子载波。假设 E_0 和 E_1 分别表示基站和中继节点的最大发送功率, 且 $P_0 = P_{2,0} = E_0 = 8$ W, $P_{2,m} = E_1$, 白噪声平均功率为 -105 dBm。对时变频率选择性信道的建模考虑路径损耗, 阴影衰落以及快速瑞利衰落。借鉴文献[5,7], 假设基站与中继节点之间的路径损耗因子为 2, 基站与用户, 中继节点与用户之间的路径损耗因子为 4, 阴影衰落方差为 7 dB。

为了验证本文提出的基于合作中继的 QoS 感知联合子载波、功率分配算法(Cooperative Joint Subcarrier and Power Allocation, C-JSPA)的有效性, 本文将其与其它两种资源分配算法进行比较:

(1) 非合作联合子载波、功率分配算法(Non-Cooperative Joint Subcarrier and Power Allocation, NC-JSPA), 该算法没有采用合作中继

机制,只在基站进行子载波、功率的联合调度;(2)非合作动态子载波分配算法(Non-Cooperative Dynamic Subcarrier Allocation, NC-DSA)^[1],该算法同样没有采用合作中继机制,而且基站只进行了平均功率分配下的子载波分配。

第1个仿真实验 BE用户数 $K_B = 40$ 保持不变,而 QoS 用户数 K_Q 从 15 逐步增长为 33,同时,中继节点的功率设为 $E_1 = 4$ W。图 2 比较了 3 种算法获得的 BE 用户总效用。仿真结果表明:随着 QoS 用户数的逐渐递增,BE 用户获得的总效用随之递减。然而,C-JSPA 算法获得的 BE 用户总效用始终优于其它两种算法,而且获得的增益随着 QoS 用户数的递增而不断增加。当 QoS 用户数增长为 33 时,C-JSPA 算法相对于 NC-JSPA 算法和 NC-DSA 算法分别获得高达 21.26% 和 27.56% 的增益。图 3 比较了 3 种算法 QoS 用户消耗的基站总功率。仿真结果表明:在满足相同数量 QoS 用户的条件下,C-JSPA 算法消耗的基站功率最少,由此可见,C-JSPA 算法在节约功率方面比其它两种算法都更有效。虽然 3 种算法的 QoS 用户消耗的基站功率均随着 QoS 用户数的递增而逐渐增加,但是 C-JSPA 算法的增长速度最慢,NC-DSA 算法的增长速度最高,而 NC-JSPA 算法居中。由此可见,在混合业务场景下,引入合作中继机制并在基站与合作中继节点之间进行资源的协调分配,不仅能保证 QoS 用户的质量要求,还能有效地节约功率,从而为 BE 用户提供更高的吞吐量,以获得更高的效用。

第2个仿真实验 主要研究了中继节点的最大

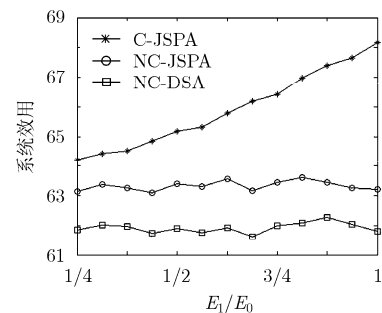
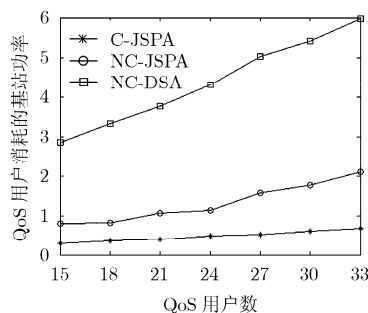
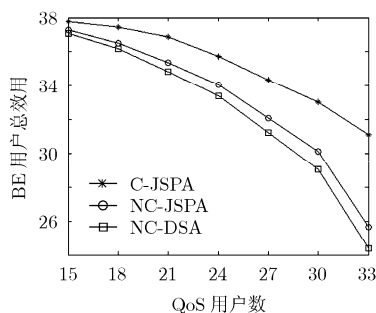


图 2 BE 用户总效用与 QoS 用户数的关系 图 3 QoS 用户消耗的基站功率与 QoS 用户数的关系 图 4 系统效用与 E_1/E_0 的关系

参考文献

- [1] 3GPP TS 36.300. E-UTRA and E-UTRAN: Overall Description, Stage 2(Relase 8) [S]. Mar. 2008.
- [2] Genc V, Murphy S, and Yu Y, *et al.* IEEE 802.16j relay-based wireless access networks: a novel view [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2008, 15(5): 56-63.
- [3] Pischella M and Belfiore J-C. Power control in distributed cooperative OFDMA cellular networks [J]. *IEEE Transaction on Communications*, 2008, 7(5): 1900-1906.
- [4] Pan Siriwongpairat W, Sadek A K, and Liu K J R. Cooperative communications protocol for multiuser OFDM networks [J]. *IEEE Transaction on Communications*, 2008, 7(7): 2430-2435.

发射功率对系统效用(即 QoS 用户与 BE 用户的效用和)的影响。设置 QoS 用户数为 $K_Q = 50$, BE 用户数为 $K_B = 30$, 且均保持不变,并逐渐增加中继节点最大发射功率与基站最大发射功率的比值 E_1/E_0 。图 4 比较了 3 种算法获得的系统效用。仿真结果表明:随着比值 E_1/E_0 的不断增大,C-JSPA 算法获得的系统效用也随之增加。而 NC-JSPA 算法和 NC-DSA 算法由于没有引入合作中继机制,因此它们的系统效用始终维持在一个水平附近,而由于无线信道的变化特性呈现小幅度波动。由此可见,增大中继节点的最大发射功率有助于提高系统整体效用。

6 结束语

本文针对基于中继的 OFDM 混合业务蜂窝网络,引入合作传输机制,提出了一个基于合作中继的 QoS 感知资源调度算法,即 C-JSPA 算法。该算法以最大化系统效用为优化目标,同时考虑 QoS 用户的速率要求,以及基站与中继节点各自的最大发射功率等约束条件,解决了中继节点选择,子载波分配以及功率控制等问题。由于 C-JSPA 算法引入了合作中继机制,并在基站与中继节点之间进行联合资源调度,仿真结果表明 C-JSPA 算法相较于未考虑合作中继和/或联合资源调度的算法在节约能量、系统效用,吞吐量等性能方面都有显著优势。下一步的研究工作将是在合作中继节点上进行比特重分配,以充分利用无线系统的时间、空间、频率和多用户分集特性,进一步提高系统性能。

- [5] Pischella M and Belfiore J-C. Resource allocation for QoS-aware OFDMA using distributed network coordination [J]. *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, 2009, 58(4): 1766-1775.
- [6] Kaneko M and Popovski P. Radio resource allocation algorithm for relay-aided cellular ofdma system [C]. IEEE ICC, Glasgow, 2007: 4831-4836.
- [7] Kim Byung-gook and Lee Jang-Won. Opportunistic power scheduling for OFDMA cellular networks with scheduling at relay stations [C]. IEEE WCNC, Budapest, 2009: 1-6.
- [8] Song Guo cong and Li Ye. Cross-layer optimization for OFDM wireless networks – Part II: algorithm development [J]. *IEEE Transaction on Communications*, 2005, 4(2): 625-634.
- [9] Nicholas Laneman J. Cooperative diversity in wireless networks: algorithms and architectures [D]. [Ph.D. dissertation], Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- [10] Zhang Yan, Chen Hsiao-hwa, and Guizani M. Cooperative Wireless Communications [M]. Boca Raton, Auerbach Publications, 2009: 92-94.
- [11] Huang Xiaoyan, Mao Yuming, and Wu Fan. Low complexity utility-based scheduling algorithm for heterogeneous services in OFDM wireless networks [C]. Proc. of ICCAS 2009, San Jose, USA, 2009, Vol 1: 48-52.
- [12] Mordecai A. Nonlinear Programming: Analysis and Methods [M]. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1976: 442-452.
- 黄晓燕: 女, 1982 年生, 讲师, 博士生, 研究方向为无线网络资源优化。
- 毛玉明: 男, 1956 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为网络体系结构与协议、宽带通信网、无线通信网。
- 吴 凡: 男, 1978 年生, 讲师, 博士生, 研究方向为无线自组织网络、资源调度。