

OFDMA 协同通信系统资源分配算法

王东 冯文江 衡玉龙

(重庆大学通信工程学院 重庆 400044)

摘要 提出了一种 OFDMA 协同蜂窝网中满足用户 QoS 需求且兼顾用户公平性的子载波和功率联合分配算法。针对已有算法仅考虑平均功率下的子载波分配、中继节点存在未用功率的情况,研究了子载波分配完毕后中继节点剩余功率最优分配问题。给出了一种基于二分法的功率注水分配方案。仿真结果表明,所提出的子载波和功率联合分配算法能够在满足用户 QoS 需求及公平性的同时,进一步提高网络吞吐量。

关键词 正交频分多址,协作通信,资源分配,公平性

中图分类号 TN929.5 **文献标识码** A

Resource Allocation Algorithm for OFDMA-based Cooperative Communication Systems

WANG Dong FENG Wen-jiang HENG Yu-long

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract Taking users' demand for both QoS and fairness into account, a joint sub-carrier and power allocation algorithm was proposed for OFDMA-based cooperative cellular networks. Existing sub-carrier allocation algorithm considers only average power allocation, in which incomplete application of power in relaying nodes exists. As a versus, we studied the optimal residual power allocation on the completion of sub-carrier allocation. Consequently, a water-filling power allocation scheme ground on dichotomy was given. Simulation shows that our proposed joint allocation algorithm can satisfy users' need for QoS and fairness, while it boosts the networking throughput dramatically.

Keywords OFDMA, Cooperative communication, Resource allocation, Fairness

1 引言

正交频分多址(Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access, OFDMA)以 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)即正交频分复用技术为基础,其频谱利用率高、抗多径能力强^[1]。协同通信基于中继信道理论获得空间分集增益,能提高通信的可靠性。将 OFDMA 和协同通信相结合,进一步提高数据传输速率和通信可靠性,改善系统性能。

不同于传统的单跳网络,协同通信系统的传输过程需要信源和中继共同完成,因此协同通信系统的资源必须根据信源、中继和目标节点间的信道状态,在信源和中继之间合理分配。近年来,OFDMA 协同通信系统的资源分配问题引起了众多学者的广泛关注。文献[2,3]提出了在总发射功率受限条件下最大化系统吞吐量的 Max-min 算法;文献[4]则在满足用户数据速率需求及系统总发射功率受限条件下,提出以最小化系统误比特率为优化目标的比特加载和功率分配算法;文献[5]进一步增强约束条件,分别以容量和基于比例公平的容量最大化为目标,提出一种次优的贪婪功率和子载波联合分配算法;文献[6]考虑用户的服务质量(Quality of Service, QoS)需求,在系统容量受限条件下,利用子载波分配,最大化可接入用户数。然而,在实际系统中,资源分配既

不是仅以系统容量最大化为目标,也不是仅满足用户需求或扩大可服务的用户数。高性能的资源分配应当不仅满足用户的 QoS 需求,还应尽可能地提高系统容量。为此,文献[7-9]通过建立在满足用户最低速率需求下最大化系统容量的数学模型,来研究资源分配策略。该策略虽然能满足用户最小速率需求,但可能出现某些用户资源分配过饱和,而另一些用户一直处于最低速率传输的现象。为了在满足用户需求的同时,进一步将可用剩余资源合理分配给不同用户,文献[10]提出一种保证用户间公平性的资源分配算法,但该算法仅考虑了平均功率分配下的子载波分配。当网络中存在多个中继站时,所有用户使用同一个中继站子载波来转发数据的可能性较小,即每个中继节点都可能存在未用功率。为了进一步优化资源配置,本文以文献[10]为基础,分析中继节点剩余功率分配问题,提出一种在 OFDMA 协同通信系统中基于公平性的子载波和功率联合分配算法。本算法在资源分配过程中,以最大化系统中当前速率最小用户的数据速率为目标,避免饥饿现象,为每个用户提供基本一致的服务质量。

2 系统建模

2.1 网络模型

典型的协同通信系统模型如图 1 所示。小区半径为 R_1 ,

到稿日期:2011-06-08 返修日期:2011-09-05 本文受重庆市自然科学基金重点项目(CSTC2009BA2064)资助。

王东(1983-),女,硕士生,主要研究方向为协同通信,E-mail:wangdong_1015@163.com;冯文江(1963-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为宽带无线接入技术、认知无线电、通信信号处理等;衡玉龙(1988-),男,硕士生,主要研究方向为通信信号处理。

K 个中继站 $RS_k (k=1, 2, \dots, K)$ 部署在用户站 $UT_m (m=1, 2, \dots, M)$ 和基站之间半径为 R_2 的圆环上, 其负责在基站和 UT_m 之间转发数据。假设系统可用子载波集为 N , 且每个子载波对应一个频谱带宽为 W 的子信道。

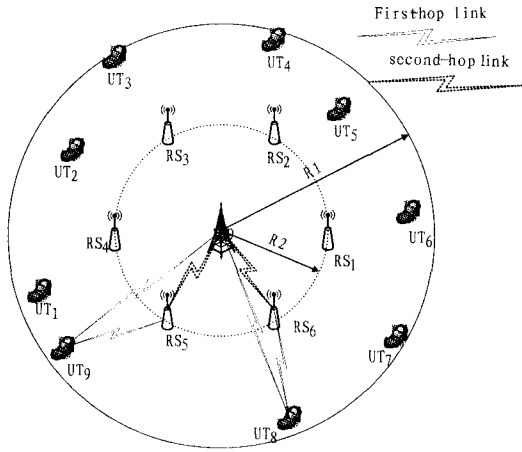


图1 网络模型

OFDMA 协同通信系统上行链路数据帧的时频域结构如图 2 所示。在上行链路, 基站通过专用信道来获取与用户站和中继站的信道状态信息, 并将资源分配结果通过此信道回馈给所有用户站和中继站。在时域子帧 T_{UT} 中, 用户站使用子载波集 N 向基站和中继站发送数据; 在时域子帧 T_{RS} 中, 中继站使用子载波集 N 向基站转发在 T_{UT} 中接收到的来自用户站的发送数据。系统相关参数说明如下:

UT_m 和 RS_k 的最大发射功率分别为 P_m^{\max} 和 P_k^{\max} , UT_m 可容忍的带宽归一化最小传输速率为 R_m^{\min} (bits/s/Hz)。依据文献[10]的协同中继过程, 即第 1 跳 $UT_m \rightarrow RS_k$ 、 $UT_m \rightarrow BS$ 和第 2 跳 $RS_k \rightarrow BS$ 使用相同子载波; $h_{m,k}^n, h_{k,d}^n, h_{m,d}^n$ 分别表示 $UT_m \rightarrow RS_k$ 、 $UT_m \rightarrow BS$ 、 $RS_k \rightarrow BS$ 这 3 条链路子载波 n 的信道增益, $z_{m,k}^n, z_{k,d}^n, z_{m,d}^n$ 分别为相应的加性高斯白噪声; $\rho_{m,k}^n$ 为子载波分配状态, 若将子载波 n 分配给用户站 UT_m 和中继站 RS_k , 则 $\rho_{m,k}^n = 1$, 否则 $\rho_{m,k}^n = 0$ 。 UT_m 和 RS_k 在子载波 n 上的发射功率分别为 P_m^n 和 P_k^n 。系统中所有用户站地位平等, 根据 QoS 需求和自身条件约束配置资源, 采用解码前传 (Decode-and-Forward, DF) 协同中继模式。

2.2 协同传输过程

依据图 2 所示的数据帧结构, 将 OFDMA 协同通信系统的上行链路, DF 中继模式下的协作过程分两个时隙完成。第 1 时隙: UT_m 以功率 P_m^n 在子载波 n 上广播发送数据给基站并分配给它的中继站; 第 2 时隙: 被选择的中继站解码在第 1 时隙接收的信号并向基站转发, 基站利用最大比合并获取在两个时隙接收的信号。假设系统中的加性高斯白噪声是独立同分布的, 且方差均为 σ^2 , 则基站通过协同中继方式接收来自用户站 UT_m 在子载波 n 上的信噪比为^[11]:

$$\gamma_m^n = \gamma_{m,d}^n + \gamma_{k,d}^n = \frac{P_m^n |h_{m,d}^n|^2}{\sigma^2} + \frac{P_k^n |h_{k,d}^n|^2}{\sigma^2} \quad (1)$$

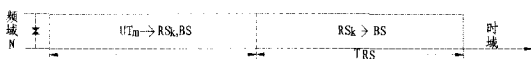


图2 上行链路数据帧的时频域结构

UT_m 在子载波 n 上的带宽归一化传输速率 $R_{m,k}^n$ 为^[11]:

$$\begin{aligned} R_{m,k}^n &= \frac{1}{2} \min\{\log_2(1 + \gamma_{m,k}^n), \log_2(1 + \gamma_{m,d}^n + \gamma_{k,d}^n)\} \\ &= \frac{1}{2} \min\{\log_2(1 + \frac{P_m^n |h_{m,k}^n|}{\sigma^2}), \log_2(1 + \frac{P_m^n |h_{m,d}^n|}{\sigma^2} + \frac{P_k^n |h_{k,d}^n|}{\sigma^2})\} \end{aligned} \quad (2)$$

3 资源分配算法

高效的 OFDMA 协同通信系统资源分配算法应在提高系统频谱资源利用率的同时, 确保用户间资源分配的公平性。利用文献[10]给出的效用函数:

$$U_m = R_m - R_m^{\min} \quad (3)$$

式中, R_m 为 UT_m 的带宽归一化可用传输速率。效用函数描述了在满足 UT_m 最小传输速率需求后额外可用的传输速率。

在满足用户 QoS 需求的同时, 为了保证用户间资源分配的公平性, 引用文献[10]给出的资源分配优化模型:

$$U = \prod_{m=1}^M U_m \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \max_{\rho_{m,k}^n} U &= \max_{\rho_{m,k}^n} \prod_{m=1}^M (R_m - R_m^{\min}) \\ &= \max_{\rho_{m,k}^n} \prod_{m=1}^M (\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N (\rho_{m,k}^n \times R_{m,k}^n - R_m^{\min})) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{s. t } \rho_{m,k}^n \in \{0, 1\} \quad \forall m, k, n \quad (6)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \rho_{m,k}^n \leq 1 \quad \forall n \in N \quad (7)$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \rho_{m,k}^n \times R_{m,k}^n \geq R_m^{\min} \quad \forall m \in M \quad (8)$$

$$\sum_{n=1}^N P_m^n \leq P_m^{\max} \quad \forall m \in M \quad (9)$$

$$\sum_{n=1}^N P_k^n \leq P_k^{\max} \quad \forall k \in K \quad (10)$$

$$P_m^n \geq 0 \quad \forall m, n \quad (11)$$

$$P_k^n \geq 0 \quad \forall k, n \quad (12)$$

式(6)表示任一子载波只能分配给用户, 且该子载波同时承担了 UT_m 在第 1 跳和 RS_k 在第 2 跳时发送信号的任务; 式(7)保证满足 UT_m 的最小传输速率需求; 式(8)~式(11)分别为 UT_m 和 RS_k 的功率约束。

3.1 子载波分配算法

对于用户站和中继站功率同时受限的系统, 为了简化资源分配, 需要对上述优化问题进行缩放。首先分析平均功率下的子载波分配, 此时 UT_m 和 RS_k 的子载波发射功率分别为 P_m^{\max}/N 和 P_k^{\max}/N 。子载波分配过程分为两个阶段。

第一阶段: 从子载波集 N 中随机选择 1 个子载波, 将其分配给没有达到可容忍带宽归一化最小传输速率需求, 且在该子载波上的传输速率最大的 UT_m 。重复上述过程, 直到所有 UT_m 达到可容忍带宽归一化最小传输速率要求。在此阶段, 每次都随机选择的子载波分配给了最适合的 UT_m , 这能获得较高的系统容量, 但用户间资源分配的公平性较差, 需要利用第二阶段调整。

第二阶段: 从剩余子载波集中随机选择 1 个子载波并计算所有 UT_m 在该子载波上的分配效率 $F_m = U_m' / U_m$, $U_m' = U_m + R_{m,k_m}^n$, 其中, R_{m,k_m}^n 为 UT_m 在子载波 n 上经 $RS_{k_m}^n$ 中继的带宽归一化传输速率, 将所选子载波分配给具有最大分配

效率的 UT_m 。重复上述步骤,直到所有子载波分配完毕。通过第二阶段的子载波再分配, UT_m 间的公平性可以得到改善。

具体算法如下。

(1)初始化:设置用户站数 M 、中继站数 K 、可用子载波集 N 、发射功率 $P_m^n = P_m^{\max}/N$, $P_k^n = P_k^{\max}/N$, 分配效率 $F_m = 0$, $\forall m \in M$, 子载波分配状态 $\rho_{m,k}^n = 0$, $\forall m \in M, k \in K, n \in N$, $R_m = 0$, $U_m = 0$, $U_m' = 0 \forall m \in M$ 。

(2)当 $(M \neq \emptyset$ and $N \neq \emptyset)$ 执行如下 while 循环

①从可用子载波集中随机选择 1 个子载波, 标记为 n^* 。判断子载波 n^* 是否被分配。若没有, 执行步骤②; 否则跳转至步骤①。

②从所有最小传输速率需求没有得到满足的用户站中挑选出在子载波 n^* 上具有最大传输速率的用户站 m^* 和中继站 k^* , $(k^*, m^*) \leftarrow \operatorname{argmax}_{k \in K, m \in M} R_{m,k}^{n^*}$ 。

③将子载波 n^* 分配给用户站 m^* 和中继站 k^* , $\rho_{m^*,k^*}^{n^*} = 1$ 。

④更新参数 $R_{m^*} \leftarrow R_{m^*} + R_{m^*,k^*}^{n^*}$, $N \leftarrow N - \{n^*\}$ 。

⑤判断用户站 m^* 的最小速率需求是否得到满足。如果 $(R_{m^*} > P_{m^*}^{\min})$, 则更新参数 $M \leftarrow M - \{m^*\}$, $U_{m^*} \leftarrow R_{m^*} - R_{m^*}^{\min}$, 然后返回步骤(2), 继续 while 循环。否则, 如果 $(R_{m^*} < R_{m^*}^{\min})$, 直接返回步骤(2), 继续 while 循环。直到条件不满足, 循环结束。

(3)如果 $N \neq \emptyset$, 则执行如下 while 循环, 分配剩余子载波:

①从剩余的可用子载波集中, 随机选择 1 个子载波, 标记为 n' 。计算所有 UT_m 在子载波 n' 上的带宽归一化传输速率 $R_{m,k}^{n'}$, 为每个 UT_m 找到最佳中继站 k_m' , $k_m' \leftarrow \operatorname{argmax}_{k \in K} R_{m,k}^{n'}$, 更新每个 UT_m 的参数 $U_m' = U_m + R_{m,k_m'}^{n'}$, $F_m \leftarrow \frac{U_m'}{U_m}$ 。

②将子载波 n' 分配给具有最大分配效率的 UT_m , $m' \leftarrow \operatorname{argmax}_{m \in M} F_m$, 标记 $\rho_{m',k_{m'}}^{n'} = 1$ 。

③更新参数 $U_{m'} \leftarrow U_{m'}$, $N \leftarrow N - \{n'\}$, 并返回步骤(3), 继续 while 循环, 直到分配完所有子载波。

3.2 中继站剩余功率分配

完成子载波分配后, 由于每个用户站不可能使用完所有子载波(当系统存在多个中继站时, 假定不存在所有用户站使用同一中继站转发数据的特殊情况), 因此每个中继站存在未用功率。为了进一步优化资源配置, 下面分析在上述子载波分配后中继站剩余功率优化问题。此时, 用户站仍采用平均功率分配策略。优化模型描述如下:

$$\max_{\Delta P_k^n} \sum_{m=1}^M R_m \quad (13)$$

$$\text{s. t } \sum_{n=1}^N \Delta P_k^n \leq \Delta P_k \quad (14)$$

其中,

$$R_m = \sum_{n=1}^N \rho_{m,k}^n * \frac{1}{2} \min \begin{cases} \log_2 \left(1 + \frac{P_m^n |h_{m,k}^n|^2}{\sigma^2} \right) \\ \log_2 \left(1 + \frac{P_m^n |h_{m,d}^n|^2}{\sigma^2} + \frac{(P_k^n + \Delta P_k^n) |h_{k,d}^n|^2}{\sigma^2} \right) \end{cases} \quad (15)$$

式中, M 为 RS_k 服务的用户站数, ΔP_k 为 RS_k 可用剩余功率。

构造拉格朗日函数:

$$L = \max_{\Delta P_k^n} \sum_{m=1}^M R_m + \lambda (\Delta P_k - \sum_{n=1}^N \Delta P_k^n) \\ = \max_{\Delta P_k^n} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \rho_{m,k}^n * \frac{1}{2} \\ \min \begin{cases} \log_2 \left(1 + \frac{P_m^n |h_{m,k}^n|^2}{\sigma^2} \right) \\ \log_2 \left(1 + \frac{P_m^n |h_{m,d}^n|^2}{\sigma^2} + \frac{(P_k^n + \Delta P_k^n) |h_{k,d}^n|^2}{\sigma^2} \right) \end{cases} + \lambda (\Delta P_k - \sum_{n=1}^N \Delta P_k^n) \quad (16)$$

利用 KKT 条件对上式求导:

$$\frac{\partial L}{\partial P_k^n} = 0$$

得到

$$\Delta P_k^n = \min \begin{cases} \left[\mu - \frac{|h_{m,d}^n|^2 * P_m^n}{|h_{k,d}^n|^2} - \frac{\sigma^2}{|h_{k,d}^n|^2} - P_k^n \right]^+ \\ \left[\frac{|h_{m,k}^n|^2 - |h_{m,d}^n|^2}{|h_{k,d}^n|^2} * P_m^n - P_k^n \right]^+ \end{cases} \quad (17)$$

式中, $[x]^+ = \max(x, 0)$, $\mu = 1/(2 \ln 2 \times \lambda)$, 为注水水平线。注水水平线采用下面介绍的“二分法”进行选取。 $\frac{|h_{m,d}^n|^2 * P_m^n}{|h_{k,d}^n|^2} - \frac{\sigma^2}{|h_{k,d}^n|^2} - P_k^n$, 为注水“碗底”。

利用基于二分法的功率注水定理求解最优 ΔP_k^n , 具体算法描述如下:

对每个中继站 RS_k 执行如下步骤:

(1)初始化 $\epsilon \leftarrow 0.0001$, $P_k^n = P_k^{\max}/N$, $P_m^n = P_m^{\max}/N$, 并计算中继站 RS_k 的可用剩余功率 ΔP_k 。

(2)对中继站 RS_k 分配的每个子载波 n , 求其注水“碗底”: $\frac{|h_{m,d}^n|^2 * P_m^n}{|h_{k,d}^n|^2} - \frac{\sigma^2}{|h_{k,d}^n|^2} - P_k^n$ 。

(3)令 $\mu_{\min} \leftarrow 0$, $\mu_{\max} \leftarrow \max \left\{ \frac{|h_{m,d}^n|^2 * P_m^n}{|h_{k,d}^n|^2} - \frac{\sigma^2}{|h_{k,d}^n|^2} - P_k^n \right\}$ 。

(4)执行如下 do-while 循环, 实现功率最优分配。

①令 $\mu \leftarrow (\mu_{\min} + \mu_{\max})/2$, 计算中继站 RS_k 的子载波 n 可能分配的剩余功率:

$$\Delta P_k^n \leftarrow \left[\mu - \frac{|h_{m,d}^n|^2 * P_m^n}{|h_{k,d}^n|^2} - \frac{\sigma^2}{|h_{k,d}^n|^2} - P_k^n \right]^+$$

或者

$$\Delta P_k^n \leftarrow \left[\frac{|h_{m,k}^n|^2 - |h_{m,d}^n|^2}{|h_{k,d}^n|^2} * P_m^n - P_k^n \right]^+$$

②确定中继站 RS_k 的子载波 n 分配的剩余功率。

如果

$$\{ (P_m^n \times |h_{m,k}^n|^2) > (P_m^n \times |h_{m,d}^n|^2 + (P_k^n + \Delta P_k^n) \times |h_{k,d}^n|^2) \}$$

则

$$\Delta P_k^n \leftarrow \left[\mu - \frac{|h_{m,d}^n|^2 * P_m^n}{|h_{k,d}^n|^2} - \frac{\sigma^2}{|h_{k,d}^n|^2} - P_k^n \right]^+ \quad (18)$$

否则

$$\Delta P_k^n \leftarrow \left[\frac{|h_{m,k}^n|^2 - |h_{m,d}^n|^2}{|h_{k,d}^n|^2} * P_m^n - P_k^n \right]^+ \quad (19)$$

③累加 RS_k 的所有子载波分配的功率 $\sum_{n=1}^N \Delta P_k^n$ 。若 $\sum_{n=1}^N \Delta P_k^n \geq$

ΔP_k , 令 $\mu_{\max} = \mu$; 否则, 令 $\mu_{\min} = \mu$ 。判断 do-while 循环条件 $|\sum_{n=1}^N \Delta P_k^i - \Delta P_k| > \epsilon$ 是否为真。若条件为真, 返回步骤(4), 继续寻找功率最优分配; 否则 ΔP_k^i 即为子载波 n 的最优分配功率。结束循环。

4 算法性能分析

采用 Monte Carlo 法验证上述算法的性能。在一个半径为 1000m 的单小区 OFDMA 协同通信系统内, 中继站等角度间隔分布在以基站为中心、500m 为半径的圆环上, 用户站随机分布在 500m~1000m 的环形区域内, 如图 1 所示。仿真参数^[12]设置如表 1 所列。

表 1 仿真参数设置

仿真参数	参数值
小区半径	1000m
载波频率	1.25GHz
子载波数	128
子信道带宽	1MHz
归一化噪声功率谱密度	-140dB/Hz
用户站和中继站归一化最大发射功率	1
电波传播模型	$128 + 38 \log(d)$ (d 为传播距离, km)
小尺度衰落模型	6 径独立 Rayleigh 衰落

为了评估本文算法的性能, 在性能仿真测试中将本文算法与另外 3 种典型资源分配算法进行对比分析。图例说明如下:

SA+PA: 本文提出的兼顾用户间公平性的子载波和功率联合分配算法;

SA+EQ: 文献[10]提出的平均功率下基于公平性的子载波分配算法;

Greedy+EQ(贪婪算法): 功率平均分配、子载波分配给信道条件最好的用户站;

No cooperation(非协同算法): 不通过协作, 用户站直接发送数据给基站。功率平均分配、子载波分配给信道条件最好的用户站。

图 3 分析比较了不同用户数下系统的吞吐量。由图 3 可知, 无论是否采用协同方式, 其系统吞吐量都会随用户数增加而增大。这是由于: 第一, 用户增多, 总的发射功率增加, 吞吐量相应增加; 第二, 用户增加使得各子信道处于良好状态的概率增大, 子载波分配算法会将子载波分配给信道条件最好的用户, 即用户增加使得多用户分集特性更加明显。此外, 对于特定用户数的场景, 协同方式的系统吞吐量明显优于非协同方式, 可见采用协同方式能增加系统吞吐量。从仿真结果还可以看出, 在特定用户数场景, Greedy+EQ 算法比 SA+EQ 算法更能增加系统吞吐量, 但前者无法保证用户间的公平性。SA+PA 算法由于考虑了中继站剩余功率优化, 在增加系统吞吐量方面优于 Greedy+EQ 算法。

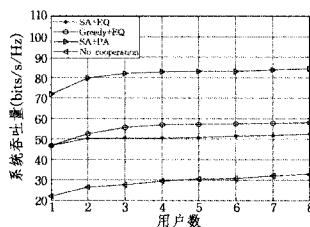


图 3 不同用户数下的系统吞吐量 ($K=6, N=128$)

图 4 比较分析了不同中继数下的系统吞吐量。由图 4 可知, 系统吞吐量会随中继数的增加而增大。这是因为中继站增加, 用户站与所选中继站之间的距离相对更近, 获得的中继信道增益更大, 同时中继站增加也使得更多用户获得了分集增益。在相同场景下, 比较 4 种不同分配算法的仿真结果也表明, SA+PA 算法比 Greedy+EQ 算法能获得更大的系统吞吐量提升。

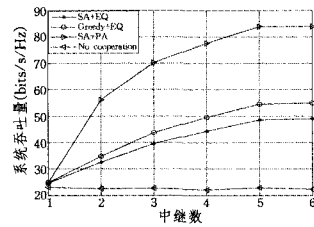


图 4 不同中继数下的系统吞吐量 ($M=8, N=128$)

图 5 和图 6 分别比较了不同用户数和不同可容忍带宽归一化最小传输速率下吞吐量的平均不达标量。图 5 描述了用户由 1 增加至 8, 每个用户可容忍带宽归一化最小传输速率为 15bits/(s·Hz) 的场景; 图 6 描述了用户数为 8、每个用户可容忍带宽归一化最小传输速率由 14.4bits/(s·Hz) 增加到 16.8bits/(s·Hz) 的场景。仿真结果表明, SA+EQ 算法与 Greedy+EQ 算法在此场景下的性能基本一致。因为前者首先保证每个用户可容忍的带宽归一化最小传输速率, 将随机选择的子载波分配给信道条件较好的用户, 因而在没有采用保证用户间公平性的剩余子载波分配算法时与后者的性能基本一致。而 SA+PA 算法考虑了中继站剩余功率的再分配, 使得系统的资源被充分利用。从仿真结果也可以看到, 在相同场景下, SA+PA 算法能有效降低平均吞吐量的不达标量。

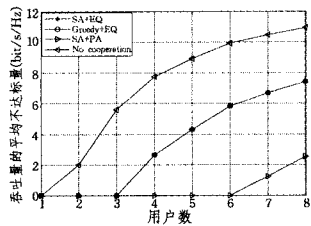


图 5 不同用户数下吞吐量的平均不达标量 ($K=6, N=128$)

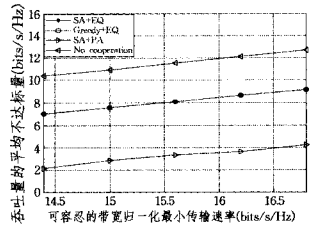


图 6 不同最小传输速率下吞吐量的平均不达标量

图 7 给出了 SA+PA 算法和其他 3 种算法的系统容量对比。在以系统容量为优化目标的 Greedy+EQ 算法中, 系统资源被某些用户不公平地据为己有, 其分配速率远大于需求速率。而其他用户由于地理位置距离基站和/或中继站较远、信道条件较差等原因, 存在分配速率较小的现象。SA+EQ 算法有效地缓解了这种不公平现象。SA+PA 算法以文献[10]为基础, 联合功率分配, 使所有用户的速率都有所提高, 验证了 SA+PA 算法在系统容量方面的优势。

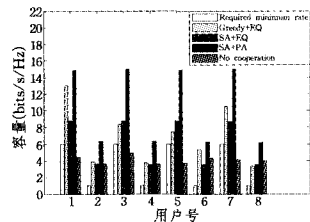


图 7 4 种算法下的用户容量 $K=6, N=128$

结束语 本文以文献[10]为基础,提出了一种 OFDMA 协同通信系统保证用户间公平性的子载波和功率联合分配算法。首先,在平均功率下进行子载波分配,保证每个用户获取最小需求速率的同时兼顾用户间的公平性。其次,在子载波分配结束后对中继站剩余功率进行再分配,进一步提升系统容量。仿真结果表明,本文提出的子载波、功率联合分配算法在提升系统容量的同时,能够公平地将系统资源分配给用户。中继站剩余功率分配以最大化系统容量为目标,对用户间的公平性有一定影响,但中继站发射功率调整对系统容量影响较弱。仿真结果表明,联合分配算法依然保证了用户间的公平性。若中继站发射功率较大,则运行本文提出的子载波、功率联合分配算法后,系统容量会有明显上升,但用户间资源分配的公平性也会受到一定程度的影响。

参 考 文 献

- [1] 沈嘉. 3G 无线通信技术的发展趋势[J]. 现代电信科技, 2007, 37(9):5-8
- [2] Zhao Yi, Adve R, Lim T J. Improving Amplify and Forward Relay Networks; Optimal Power Allocation Versus Selection[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(8): 3114-3123
- [3] Zhang Xing, Chen Shu-ping, Wang Wen-bo. Multi-user Radio Resource Allocation for Multi-service Transmission in OFDMA-based Cooperative Relay Networks[J]. EURASIP on Wireless Communications and Networking, 2009, 11(1):1-14
- [4] Amin O, Uysal M. Optimal Bit and Power Loading for Amplify-and-Forward Cooperative OFDM Systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(3):772-781
- [5] Pan Yu-wen, Nix A, Beach M. Resource Allocation Techniques for OFDMA-based Decode-and-Forward Relaying Networks[C]// Vehicular Technology Conference. 2008;1717-1721
- [6] Jee L, Wang H, Seo W, et al. QoS-Guaranteed Transmission Mode Selection for Efficient Resource Utilization in Multi-hop Cellular Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(10): 3697-3701
- [7] Awad M K, Shen Xue-min. OFDMA Based Two-Hop Cooperative Relay Network Resource Allocation[C]// Proceedings of ICC'08. 2008;4414-4418
- [8] Zhang Dan-hua, Tao Xiao-ming, Lu Jian-hua. Dynamic Resource Allocation for Real-time Services in Cooperative OFDMA Systems[J]. Communications Letters, IEEE, 2011, 15(5):497-499
- [9] Salah A A, Ali B M, Saqer A. An efficient resource allocation algorithm for OFDMA cooperative relay networks with fairness and QoS guaranteed[C]//2010 Second International Conference on Network Applications Protocols and Services (NETAPPS). 2010;188-192
- [10] Chen Kai, Zhang Bi-ling, Liu Dan-pu, et al. Fair Resource Allocation in OFDMA Two-hop Cooperative Relaying Cellular Networks[C]// Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2009-Fall). 2009;1-5
- [11] 彭木根, 王文博. 协同无线通信原理与应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2008
- [12] Zhang Dan-hua, Wang You-zheng, Lu Jian-hua. QoS Aware Resource Allocation in Cooperative OFDMA Systems with Service Differentiation[C]//IEEE International Conference on Communications. 2010;1-5

(上接第 65 页)

挑战,现在仅仅处于开始阶段,还有很多问题需要解决。我们设想了一些未来的研究方向,最有希望的是强制公开检验模型。公开检验^[4,6],允许 TPA 审计云数据存储而不占用用户资源和时间。在模型中能否找到一个既能公开检验,又能保证动态数据存储准确性的方法很值得研究。另外除了研究动态云数据存储外,我们还计划解决更细致的数据错误定位问题。

参 考 文 献

- [1] Bowers K D, Juels A, Oprea A. HAIL: A High-Availability and Integrity Layer for Cloud Storage[R]. 2008/489. Cryptology ePrint Archive, 2008. <http://eprint.iacr.org/>
- [2] Cloud Security Alliance. Security Guidance for Critical Areas of Focus in Cloud Computing[M]. April 2009
- [3] Juels A, Burton J, Kaliski S. PORs: Proofs of Retrievability for Large Files[C]//Proc. of CCS '07. 2007;584-597
- [4] Shacham H, Waters B. Compact Proofs of Retrievability[C]// Proc. of Asiacrypt '08. Dec. 2008
- [5] Bowers K D, Juels A, Oprea A. Proofs of Retrievability: Theory and Implementation[R]. 2008/175. Cryptology ePrint Archive, 2008. <http://eprint.iacr.org/>
- [6] Ateniese G, Burns R, Curtmola R, et al. Provable Data Possession at Untrusted Stores[C]//Proc. Of CCS '07. 2007;598-609
- [7] Ateniese G, Pietro R D, Mancini L V, et al. Scalable and Efficient Provable Data Possession[C]//Proc. of SecureComm '08. 2008;1-10
- [8] Schwarz T S J, Miller E L. Store, Forget, and Check: Using Algebraic Signatures to Check Remotely Administered Storage[C]// Proc. of ICDCS '06. 2006;12
- [9] Lillibridge M, Elnikety S, Birrell A, et al. A Cooperative Internet Backup Scheme[C]//Proc. of the 2003 USENIX Annual Technical Conference (General Track). 2003;29-41
- [10] Hendricks J, Ganger G, Reiter M. Verifying Distributed Erasure-coded Data[C]//Proc. 26th ACM Symposium on Principles of Distributed Computing. 2007;139-146
- [11] Plank J S, Ding Y. Note: Correction to the 1997 Tutorial on Reed-Solomon Coding[R]. CS-03-504. University of Tennessee, 2003
- [12] Wang Q, Ren K, Lou W, et al. Dependable and Secure Sensor Data Storage with Dynamic Integrity Assurance[C]//Proc. of IEEE INFOCOM. 2009