

## OFDMA 协同网络中基于 QoS 保证的资源分配算法\*

邱琳<sup>+</sup>, 宋美娜, 宋俊德

(北京邮电大学 计算机科学与技术学院, 北京 100876)

### QoS Aware Resource Allocation Algorithm in OFDMA Cooperative Network

QIU Lin<sup>+</sup>, SONG Mei-Na, SONG Jun-De

(School of Computer Science and Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

+ Corresponding author: E-mail: qiulin19861013@gmail.com

**Qiu L, Song MN, Song JD. QoS aware resource allocation algorithm in OFDMA cooperative network. *Journal of Software*, 2010,21(Suppl.):341-348. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/10035.htm>**

**Abstract:** This paper investigates resource allocation in OFDMA cooperative networks for maximizing the network data rate and providing QoS guarantees of best effort services and real time services. It defines a network utility function of data rate, delay, and packet loss with power constraints, and the relay and subcarrier dedicated to achieve the optimal utility will be selected for cooperation transmission. With the proposed resource allocation scheme for power allocation on user-relay pairs or only the user over each subcarrier, QoS guarantees of different applications will be achieved. The objective of resource allocation is to strike a balance between maximizing the data rate utility and minimizing the delay and packet loss. By using the optimization theory and related methods, this paper solves the utility function and derives the resource allocation result. Simulation results show that the algorithm can converge. And they show the effectiveness of the algorithm by presenting the power allocation result and the throughput performance and delay performance of the proposed scheme.

**Key words:** cooperation diversity; resource allocation; relay selection; quality-of-service (QoS)

**摘要:** 针对正交频分多址(OFDMA)协作通信系统,为了解决数据传输速率最大化并提供尽力而为业务与实时业务的服务质量(QoS)保证问题,提出新型资源分配算法.通过以总功率受限为约束条件,定义基于数据速率、时延和丢包率的效用函数,并以在协作传输中以最大化效用函数为目标进行中继选择和子载波分配.通过中继和用户上的子载波和功率分配方案的设计,从而最大化网络数据传输速率并最小化时延与丢包率,为多种业务提供服务质量保证.采用最优化理论与方法求解效用函数,得到了资源分配结果.仿真结果验证了算法收敛,并给出功率分配结果,以及网络吞吐量和时延性能指标情况,验证了算法的有效性.

**关键词:** 协作分集;资源分配;中继选择;服务质量(QoS)

近年来,在无线通信网络领域数据业务尤其是多媒体业务逐渐成为网络主要承载对象.传统的移动通信系

\* Supported by the National Key project of Scientific and Technical Supporting Programs of China under Grant No.2008BAH24B04 (国家“十一五”科技支撑计划); the Program for New Century Excellent Talents in University of China under Grant No.NCET-08-0738 (新世纪优秀人才支持计划); the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (重点高校基础研究基金); the Innovation Technology Star Program of Beijing of China under Grant No.2007A045 (北京创新科技新星计划)

Received 2010-07-01; Accepted 2010-12-10

统,如 GSM 和 TD-SCDMA,采用蜂窝形式的接入网络架构但是在下一代具有高速率的无线移动通信系统中采用传统的蜂窝结构会存在很多问题,首先系统传输速率比第三代要高一两个数量级,因此,要达到相同的覆盖范围就要增加基站的发送功率,这种需求将产生严重的功耗问题并且增加了信号间干扰.其次,系统的频段将会在 2GHz~3GHz 甚至更高.通常这样的频段在非可视条件下,传输效果很差,这就进一步限制了传输距离和范围.要解决上述两个问题,必须大大减少小区覆盖范围,也就是增加基站(BS)的数量和密度,这就又导致组网成本大幅提高,对于运营商来说不是合理方案.为了提高系统的频谱效率,尽量使频率复用系数达到 1,采用传统的蜂窝结构将面临很多挑战.如何减少干扰,提高系统性能,降低组网成本,一直是业界研究的热点.

为解决上述问题,协同分集技术作为下一代无线通信系统中很具有发展前景的技术已受到广泛关注.协作分集这种空间分集技术继承了多入多出(MIMO)技术的高频谱效率优势,能有效提高网络容量克服频率选择性衰落.通过把同一信号在不同时刻不同位置发送传输到目的节点而形成虚 MIMO,目的节点将接收到的多个信号作合并处理从而屏蔽了由于衰落和阴影效应带来的信道衰落影响,带来空间分集增益,有效提高了频谱利用率<sup>[1,2]</sup>.协同通信利用中继节点传输信号有效改善了衰落信道上的信号传输质量,从而为终端用户节省了能量并改善了服务质量.在协同通信技术的发展中,Sendonafis 提出了放大转发(amplify and forward,简称 AF)和解码转发(decoded and forward,简称 DF)两种协同模式.放大转发是指中继不对接收到的信号进行解调和解码,而是直接将收到的模拟信号放大前传.解码转发是指中继先要对接收到的信号进行解调,解码和判决,然后将判决后的数据进行编码调制再前传.Laneman 提出了空时码协同和选择协同,空时码协同即利用其他用户的天线来形成 Alamouti 空时码.选择协同方式下需要节点首先解码源信息,在多跳环境中,选择可以被解释为根据信道质量进行路由的方式.Hunter 将协同与信道编码结合起来提出了编码协同(coded cooperation),其本质是把码字分成数据位和校验位两部分,对冗余校验位进行协同.协同分集技术已经被 IEEE 802.16j 中继工作组采用作为多跳中继网络中的一种传输方式.

正交频分多址(OFDMA)技术是宽带传输中有效的传输和调制方式,能有效的减少由频率选择性衰落带来的符号间干扰,从而提高频谱利用率,被认为是下一代网络中最有潜力的技术之一.对于工作在协作模式下的 OFDMA 系统,除了要考虑如何为用户选择合适的中继节点和分配合适的子载波以外,还涉及功率分配问题,这使得协作模式下的资源分配问题具有更高的复杂度.随着用户规模的增大、用户对服务质量需求的增长,这为基于协作模式的 OFDMA 蜂窝网络中的资源分配技术提出更高要求.

目前,OFDMA 系统的资源分配的研究多集中于提高数据传输速率上.关于如何在 OFDMA 协同网络的资源分配中满足数据速率最大化的同时提供 QoS 保证的研究很少.文献[3]研究了下行 OFDMA 系统中资源分配技术,其目标是在功率受限条件下最大化多用户的最小数据传输速率值,并提出了在均等功率分配策略下的子载波分配方案,目标是最大-最小数据速率.文献[4]采用了上述方法,在假设已知所有用户的瞬时信道增益前提下,进一步提出了能够同时为保证性能需求用户和尽力而为业务用户提供不同的 QoS 保证的资源分配算法.但是由于最大-最小数据速率目标不能保证所有用户的目标传输速率值,因此该方法不是最优的.文献<sup>[5]</sup>提出了分布式资源分配算法,利用协同分集技术为每一个有性能保证需求的用户提供所要求的数据速率.但是由于没有考虑用户的实际业务需求,无法支持视频、语音等有不同延时的 QoS 保证类业务.

为了高效公平的进行资源分配,利用效用函数来衡量使用某些资源的益处,该理论已在经济学中得到很好的研究.类似地,可以在通信网络中应用效用理论,从而来评定网络对用户业务服务质量需求的满足程度<sup>[6]</sup>.在有线网络领域,效用和定价机制已被用于流控制,拥塞控制和路由方面<sup>[7]</sup>.在无线网络领域,文献[8]提出了 CDMA 下行系统中为传送语音和数据类应用业务而进行的基于效用函数的功率分配方案.关于利用效用函数对资源分配问题进行建模,其理论模型已被研究用于 OFDM 无线网络中.文献[9]提出了基于效用函数的联合传输调度、动态子载波分配和动态功率分配方案.利用效用函数的建模在平衡了有效性和公平性的同时满足实时业务用户的 QoS 需求.跨层优化方面,文献[10]利用效用函数的方法将物理层和媒体接入控制(MAC)层联合优化,平衡了无线资源分配的有效性和公平性.

本文的创新和贡献在于,提出了一种最大化数据速率并最小化时延和丢包率的资源分配算法,以用户和中

继节点上分配的总功率受限为约束条件,综合考虑了实时业务和尽力而为业务的 QoS 保证问题,定义了基于数据速率、时延和丢包率的网络效用函数.以最优效用函数为目标进行功率和子载波的分配,能够为多种应用业务需求提供 QoS 保证.协作方式采用放大转发模式.仿真结果表明该算法收敛,并给出了中继和用户上的功率分配情况,比较了网络吞吐量和时延性能指标,从而验证了算法的有效性.

## 1 系统模型

### 1.1 业务服务模型

根据应用业务的种类不同,相应的 QoS 参数不同,QoS 参数一般包括时延、抖动和丢包率等.本文将业务模型以三维建模,由于高时延抖动带来的影响类似于丢包,因此不考虑时延抖动参数,而以丢包代表该作用的影响<sup>[11,12]</sup>.时延和丢包率参数值对于各个服务来说相对独立.在某个门限值以内,服务质量可以被接受,而高于和低于相应的门限表示该服务不可用.本文中的协同网络支持 4 种业务,包括 VoIP,视频电话,IPTV,和尽力而为业务.尽力而为业务的丢包率指标为  $10^{-6}$ .

表 1 不同应用业务的业务 QoS 门限值,门限  $th_{\min}$  表征了最小值, $th_{\max}$  表征了最大值

业务	时延(ms)		丢包率		参考文献
	$th_{\min}$	$th_{\max}$	$th_{\min}$	$th_{\max}$	
VoIP	100	150	1%	3%	[13-15]
视频电话	150	400	-	1%	[16]
IPTV	200	150~500	$10^{-4}$ %	1%	[17,18]

### 1.2 协作模型

本文考虑基于 OFDMA 的协作蜂窝系统下行链路.该网络包括 1 个基站,即信号发送方, $J$  个目的节点,即用户节点,标记为  $\{1 \dots j \dots J\}$ ;  $K$  个中继节点,标记为  $\{1 \dots k \dots K\}$ .OFDM 信道总带宽为  $B$  Hz 且整个信道被分为  $M$  个频率平坦性衰落的子载波.

在此协同网络中,下行协作发生在基站和中继间,采用放大转发协作模式.当基站和用户间的直传信道的数据传输可靠,基站直接发送信号给用户,否则,中继节点将进行协作传输.信道状态信息在网络中交换,基站将决定是否选择中继进行协作传输.所有的基站 OFDMA 采用相同 FFT,大小为 NFFT,并且总可用带宽为  $B$ .下文中,采用  $m$  标识把第  $m$  个子载波分配给用户  $j$ .

协同传输经历两个阶段.在第 1 阶段,源节点  $i$ (基站)发送信号  $x$  到中继节点.以  $x_{jm} = (x_{jm}^1, x_{jm}^2)$  表示基站的发送信号,以  $y_{jm} = (y_{jm}^1, y_{jm}^2)$  表示用户  $j$  在第  $m$  个子载波上的接收信号.如图 1 所示,在第 1 个时隙里,源节点与中继节点以及目的节点进行通信.第 2 阶段即在第 2 个时隙,源节点以及中继节点与目的节点通信.假设用户节点在第  $m$  个子载波上第 1 个时隙和第 2 个时隙收到的信号分别为  $y_{jm}^1$  与  $y_{jm}^2$ ,则有如下关系式:

$$\begin{cases} y_{jm}^1 = h_{ijm} \sqrt{\frac{p_{ijm}}{l_{ij}(\sigma^2 + I_{ijm})}} x_{jm}^1 + n_{jm}^1 \\ y_{jm}^2 = h_{kjm} \sqrt{\frac{p_{kjm}}{l_{kj}(\sigma^2 + I_{kjm})}} x_{jm}^1 + h_{ijm} \sqrt{\frac{p_{ijm}}{l_{ij}(\sigma^2 + I_{ijm})}} x_{jm}^2 + n_{jm}^2 \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $h_{ijm}$  表示源节点和目的节点在第  $m$  个子载波上的信道指数,  $h_{kjm}$  表示中继和用户  $j$  间在  $m$  个子载波上的信道指数.  $n_{jm}^1$  和  $n_{jm}^2$  表示加性白高斯噪声.  $p_{ijm}$  和  $p_{kjm}$  分别表示源节点在  $m$  个子载波上发送到目的节点的发送功率和中继节点在  $m$  个子载波上发送到目的节点的发送功率.  $l_{ij}$  和  $l_{kj}$  分别表示源节点到用户节点  $j$  的路径损耗以及中继节点到用户节点  $j$  的路径损耗.  $I_{ijm}$  和  $I_{kjm}$  表示用户  $j$  在第  $m$  个子载波上与 BS 间链路间的干扰以及中继节点  $k$  在第  $m$  个子载波上与 BS 间链路间的干扰.  $\sigma^2$  表示噪声变量,其在两个链路上相同.假设基站上有每个用户的信道状态信息,功率分配在每个时隙上进行.传输信道建模成:  $\overline{y_{jm}} = H_{jm} \overline{x_{jm}} + \overline{n_{jm}}$ ,其中得到信道矩阵:

$$H_{jm} = \begin{pmatrix} h_{ijm} \sqrt{\frac{P_{ijm}}{I_{ij}(\sigma^2 + I_{ijm})}} & 0 \\ h_{kjm} \sqrt{\frac{P_{kjm}}{I_{kj}(\sigma^2 + I_{kjm})}} & h_{ijm} \sqrt{\frac{P_{ijm}}{I_{ij}(\sigma^2 + I_{ijm})}} \end{pmatrix} \quad (2)$$

BS 和用户  $j$  之间在第  $m$  个子载波上的链路容量<sup>[19]</sup>为

$$D_j = \frac{1}{2} \log_2(\det(I + H_{jm} H_{jm}^*)) = \frac{1}{2} \log_2 \left( \left( 1 + \frac{|h_{ijm}|^2 P_{ijm}}{I_{ij}(I_{ijm} + \sigma^2)} \right)^2 + \frac{|h_{kjm}|^2 P_{kjm}}{I_{kj}(I_{kjm} + \sigma^2)} \right) \quad (3)$$

那么,用户  $j$  的数据传输速率为

$$D_j = \sum_{m=1}^M \frac{B}{N_{FFT}} \frac{1}{2} \log_2(\det(I + H_{jm} H_{jm}^*)) \quad (4)$$

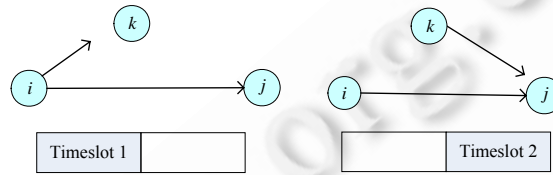


Fig.1 Block diagram of cooperation system

图 1 协作模型示意图

## 2 面向 QoS 保证的资源分配

基站上的资源分配方案目的是最大化效用函数,从而为多种应用业务提供 QoS 保证.网络中的业务流包括尽力而为业务和时延敏感的实时业务.每一个子载波最多分配给 1 个用户.每一个用户上有多个子载波.资源分配方案的目的是最大化数据速率的同时最小化时延和丢包率.

这里定义效用函数为数据速率,时延和丢包率的函数.

$$U(r, t, p) = u_r(r) * u_t(t) * u_p(p) \quad (5)$$

其中, $r$  表示数据传输速率, $t$  表示时延, $p$  表示丢包率.假设时延指针是 1,一次到达处理器 4 个包.当一个包发送时,指针增加 1,定义包到达时间为  $time$ ,从 1 开始线性增加.从而时延表示为  $time+1-d(b/4)$ , $d(x)$  函数表示取  $x$  的整数.

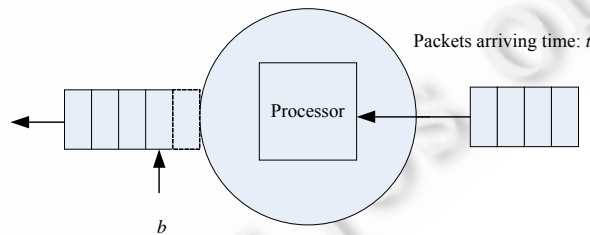


Fig.2 The delay computing process

图 2 时延计算模型示意图

定义时延的效用函数表示为  $U_t(t) = \exp\left(\frac{t'_j - t_j}{t'_j}\right)$ ,  $t'_j$  表示第  $j$  个用户的时延门限,从而以指数形式表示时延的相对值,是一个归一化值.定义  $U_p(p)$  为  $U_p(p) = \frac{p'_j}{p_j}$ , 其中,  $p'_j$  为用户  $j$  的丢包率门限,  $p_j$  为当前的丢包率.因此,

可以得到网络效用函数为

$$U_j(r, t, p) = D_j \cdot \exp\left(\frac{t'_j - t_j}{t_j}\right) \frac{p'_j}{p_j} \quad (6)$$

设  $P$  为基站最大总发射功率.因此,总的发送功率应该小于等于  $P$ .最大化数据传输速率同时最小化时延和丢包率问题可以表达成如下优化问题,优化目标是最大化网络中所有用户的效用函数之和:

$$\text{Maximize } U = \sum_{j=1}^J U_j(r, t, p) \quad (7)$$

$$\text{Subject to } \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J x_{jm} (p_{ijm} + \sum_n a_{k_n, jm} p_{ijm}) \leq P \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{jm} = 1, m = 1, \dots, M \quad (9)$$

$$x_{jm} \in \{0, 1\} \quad (10)$$

其中,  $x_{jm}$  为子载波分配标识,  $x_{jm} = 1$  表示子载波分配给了用户  $j$ , 否则  $x_{jm} = 0$ . 对于  $j=0$  的情况  $u_{ijm} = 0, p_{ijm} = 0$ .  $a_{k_n, jm}$  为中继选择标识符, 如果中继  $k$  在第  $n$  个子载波上中继数据, 那么  $a_{k_n, jm} = 1$ .  $P$  表示基站处总功率门限. 式(9)和式(10)保证 1 个子载波最多分配给 1 个用户.

为了求解最优问题(7), 引入拉格朗日乘子  $\lambda$ , 相应拉格朗日函数可以表达为

$$L(\lambda, P) = \sum_{j=1}^J U_j(r, t, p) - \left( \sum_{j=1}^J \lambda \sum_{m=1}^M x_{jm} (p_{ijm} + \sum_n a_{k_n, jm} p_{ijm}) - P \right) \quad (11)$$

其中,  $P$  为分配功率向量,  $\lambda$  为拉格朗日乘子. 对偶问题目标函数定义为

$$D(\lambda) = \max L(\lambda, P) \quad (12)$$

我们采用次梯度算法求解最优化问题<sup>[20,21]</sup>. 次梯度算法沿着目标函数次梯度方向, 循环更新对偶变量, 搜索凸优化函数的最优解. 如果得到  $\lambda_j (j = 1, \dots, J)$ , 求解问题即可得到结果. 当满足  $\frac{\partial L}{\partial p_{kjm}} = 0, \frac{\partial L}{\partial p_{ijm}} = 0$  时求解结果最优. 这样通过以下公式的计算得到最优解:

$$\frac{\partial L}{\partial p_{kjm}} = U_m \frac{2v_1(1 + v_1 p_{ijm})}{2((1 + v_1 p_{ijm})^2 + av_2 p_{kjm}) \ln 2} - \lambda = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial L}{\partial p_{ijm}} = U_m \frac{av_2}{2 \ln 2((1 + v_1 p_{ijm})^2 + av_2 p_{kjm})} - a\lambda = 0 \quad (14)$$

其中,  $v_1 = \frac{|h_{ijm}|^2}{I_{ij} + \sigma^2}, v_2 = \frac{|h_{kjm}|^2}{I_{kj} + \sigma^2}, U_m = \exp\left(\frac{t'_j - t_j}{t_j}\right) \frac{p'_j}{p}$ .

算法的执行过程为, 首先, 我们选择中继节点并分配相应的子载波给中继和用户. 中继节点的选择和子载波分配的目标是最大化网络效用函数. 然后我们初始化  $\lambda$  通过式(13)和式(14)来计算  $p_{kjm}$  和  $p_{ijm}$ , 设第  $s$  次循环对偶变量为  $\lambda_s, \rho(\lambda_s)$  是  $D$  在  $\lambda_s$  处的次梯度, 其值为  $\frac{\partial r}{\partial p}, \alpha_s$  是在当前循环对偶变量更新的步长, 满足  $\lim_{k \rightarrow 0} \alpha_s = 0$  并且

$\sum_{k=1}^{\infty} \alpha_s = \infty$ , 这里我们设定  $\alpha_s = 0.01$ , 在第  $i$  次循环通过如下方式更新对偶变量:

$$\lambda_{s+1} = \lambda_s - \alpha_s \rho(\lambda_s) \quad (15)$$

$\lambda$  通过循环更新, 代入式(13)和式(14)获得新的  $p_{kjm}$  和  $p_{ijm}$ . 算法执行, 直到算法收敛, 从而获得中继  $K$  和用户  $j$  上的最优功率分配值  $p_{kjm}$  和  $p_{ijm}$ .

### 3 仿真结果和分析

在本仿真中我们设计一个半径为 1 500m×1 500m的固定基站和中继的 OFDMA 蜂窝网络小区场景.网络场景包括 2 个~20 个用户,6 个中继和 1 个基站.中继节点均匀分布在基站周围,且到基站的距离相同,用户节点均匀分布.算法采用 11 次循环.假设瑞利衰落在每个子载波上是独立同分布的.仿真参数如下:路径损耗模型为奥村 Hata 模型<sup>[22]</sup>: $l(d)=137.74+35.22\log(d)$ ;下行噪声为  $\sigma^2=-105\text{dBm}$ ;基站最大传输功率为 10w;总带宽为  $B=1\text{MHz}$ ;子载波个数为 128.

从图 3 和图 4 我们可以看出,中继上和用户上的功率分配在 3 次循环后收敛到了一个稳定值.图 3 给出的是中继节点上的功率分配值,给出了算法的收敛性.图 4 给出了用户节点上的功率分配值,给出了算法的收敛性.

图 5 显示了在不同用户数目条件下网络吞吐量的情况,图中可以看出,在考虑了 QoS 保证的条件下进行资源分配后网络的吞吐量低于仅以最大化传输速率为目标不考虑 QoS 参数指标的情况下的网络吞吐量.在不考虑 QoS 指标时网络吞吐量性能有 11%~13%的增量.图 6 显示了基站距用户距离不同时网络时延性能指标,比较了在最优化效用函数中考虑最小化时延和丢包率的情况和不考虑 QoS 保证的情况,时延指标值表征了时延大小.图中可以看出,在考虑了 QoS 保证情况下网络时延低于不考虑 QoS 指标的情况.在基站距离用户 1 100m 条件下,网络时延低于不考虑 QoS 的情况 40%.以上仿真验证了算法的有效性.

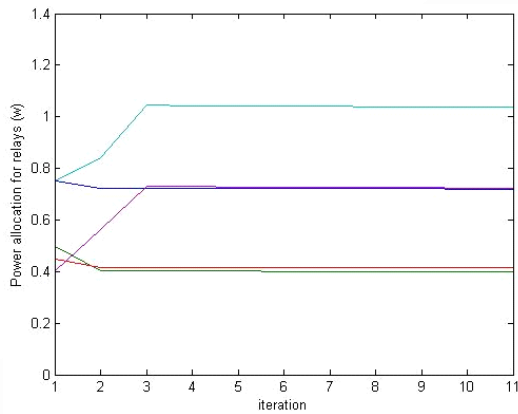


Fig.3 Power allocation for the relays

图 3 中继节点上的功率分配

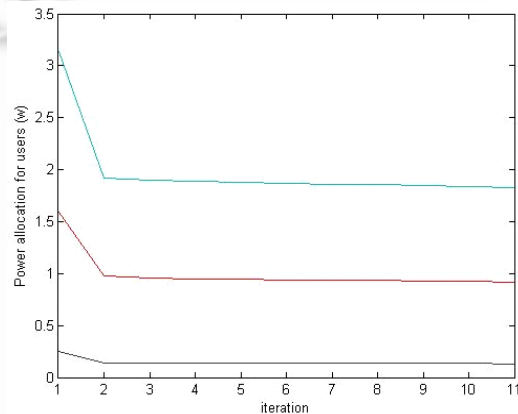


Fig.4 Power allocation for the users

图 4 用户节点上的功率分配

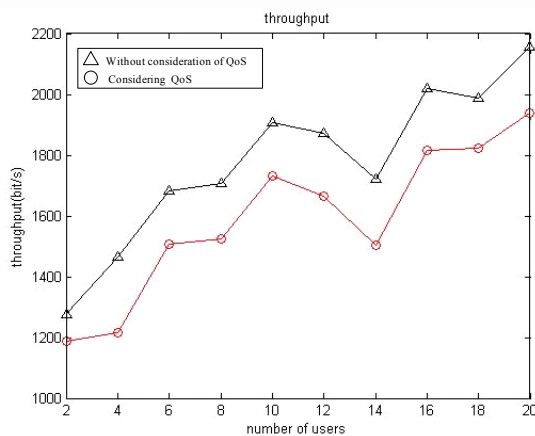


Fig.5 The throughput performance comparison

图 5 网络吞吐量性能比较

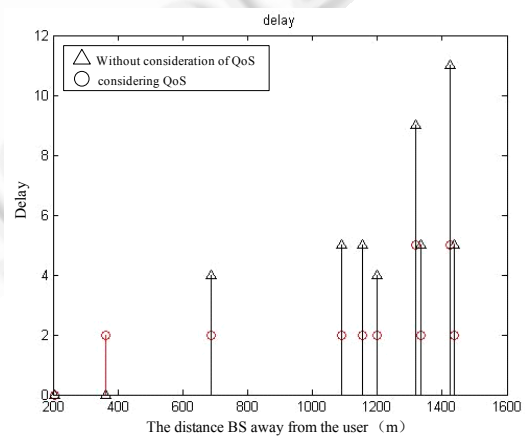


Fig.6 The delay performance comparison

图 6 网络时延性能比较

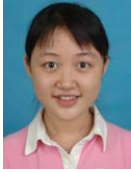
## 4 结 论

本文针对 OFDMA 协同网络中资源分配问题,在综合考虑中继选择和子载波分配情况下,以最大化效用函数为目标,设计了功率分配算法,最大化数据速率并最小化时延和丢包率,从而保证了数据传输速率和服务质量的平衡,为网络支持多种业务提供 QoS 保证.仿真验证了基于次梯度算法提出的资源分配算法的收敛性,并给出了功率分配情况和网络吞吐量和时延性能,验证了算法的有效性.

**致谢** 在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的同行,尤其是北京邮电大学计算机学院宋俊德教授、宋美娜教授领导的讨论班上的同学和老师表示感谢.

### References:

- [1] Laneman JN, Tse DNC, Wornell GW. Cooperative diversity in wireless network: efficient protocols and outage behavior. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2004,50:3062–3080.
- [2] Sendonaris A, Erkip E, Aazhang B. User cooperation diversity—Part II: Implementation aspects and performance analysis. *IEEE Trans. on Communications* 2003,51(11):1939–1948.
- [3] Rhee W, Cioffi JM. Increase in capacity of multiuser OFDM system using dynamic subchannel allocation. In: *Proc. of the Vehicular Technology Conf.*, Vol.2. 2000. 1085–1089.
- [4] Anas M, Kim K, Shin S, Kim K. QoS aware power allocation for combined guaranteed performance and best effort users in OFDMA systems. In: *Proc. of the ISPACS 2004*. 2004. 477–481.
- [5] Pischella M, Belfiore JC. Power control in distributed cooperative OFDMA cellular networks. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2008,7(5):1900–1906.
- [6] Shenker S. Fundamental design issues for the future Internet. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1995,13(7): 1176–1188.
- [7] Kelly FP, Maulloo AK, Tan DKH. Rate control for communication networks: Shadow prices, proportional fairness, and stability. *Journal of Operational Research Society*, 1998,49:237–252.
- [8] Song L, Mandayam NB. Hierarchical sir and rate control on the forward link for CDMA data users under delay and error constraints. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2001,19(10):1871–1882.
- [9] Navaie K, Yanikomeroglu H. Optimal downlink resource allocation for non-realtime traffic in cellular CDMA/TDMA networks. *IEEE Communications Letters*, 2006,10:278–280.
- [10] Song GC, Li Y. Cross-Layer optimization for OFDM wireless networks-part I: theoretical framework wireless communications. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2005,4(2):614–624.
- [11] Boutremans C, Le Boudec JY. Adaptive joint playout buffer and FEC adjustment for Internet telephony. San Francisco: *IEEE Infocom*, 2003.
- [12] Claypool M, Tanner J. The effects of jitter on the perceptual quality of video. Orlando: *ACM Multimedia*, 1999. 115–118.
- [13] G.114: One-Way transmission time. ITU: *ITU Recommendation*, 1996.
- [14] Kitawaki N, Itoh K. Pure delay effects on speech quality in telecommunications. *IEEE/ACM Journal on Selected Areas in Communications*, 1991,9(4):586–593.
- [15] Vegesna S. *IP Quality of Service*. Cisco Press, 2001.
- [16] ITU. G.1010: End-User multimedia QoS categories-11/01. ITU: *ITU Recommendation*, 2001.
- [17] Rahrer T, Fiandra R, Wright S. Triple-Play services quality of experience (QoE) requirements and mechanisms. Draft Working Text, *DSL Forum*, 2006.
- [18] Sziget T, Hattingh C. *End-to-End QoS Network Design: Quality of Service in LANs, WANs and VPNs*. Cisco Press, 2004.
- [19] Telatar iE. Capacity of multi-antenna Gaussian channels. *European Trans, on Telecommunications*, 1999,10(6):585–595.
- [20] Boyd S, Xiao L, Mutapic A. *Subgradient Methods*. Notes for EE392o, Stanford University, 2003.
- [21] Boyd S, Vandenberghe L. *Convex Optimization*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [22] Holma H, Toskala A. *WCDMA for UMTS*. 5th ed., Wiley, 2000.



邱琳(1986—),女,黑龙江大庆人,博士生,主要研究领域为无线多跳网络,协同网络,下一代宽带无线网络关键技术,跨层设计, QoS 保证,定位技术.



宋俊德(1938—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为宽带无线移动通信与互联网,服务科学与工程.



宋美娜(1974—),女,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为服务科学与工程,宽带无线移动通信与互联网.

www.jos.org.cn

www.jos.org.cn