

一种非理想反馈 MIMO-OFDM 系统资源分配算法*

杜 崇, 陈 松, 仵国锋, 胡捍英
(解放军信息工程大学 信息工程学院, 郑州 450002)

摘要: 针对多用户 MIMO-OFDM 系统资源分配问题, 给出了一种基于非理想反馈的自适应子载波分配算法。由于实际系统中往往存在反馈时延和反馈误差, 利用置信系数和等价方差模型来表征反馈信道状态信息的质量, 以最大化系统和容量为目标, 在发射总功率一定并满足误码率约束条件下, 将子载波分配给信道增益最好的用户, 然后对所有子载波进行注水功率分配。理论分析和仿真结果表明, 该算法能够充分利用多用户的分集增益, 有效地提高了系统和容量性能。

关键词: 多输入多输出; 正交频分复用; 反馈时延; 反馈误差; 资源分配

中图分类号: TN929.5; TP301.6 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2012)11-4257-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.11.065

Resource allocation algorithm for MIMO-OFDM systems with imperfect feedback

DU Chong, CHEN Song, WU Guo-feng, HU Han-ying

(Institute of Information Engineering, PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: This paper proposed an adaptive subcarrier allocation algorithm for multiuser MIMO-OFDM systems with imperfect feedback. Because of feedback delay and feedback error in actual environment, this algorithm used the confidence coefficient and equivalent variance to indicate the feedback CSI quality. The proposed algorithm aimed at maximizing system throughput and under the constraint of transmit power and BER, assigned the subcarrier to the best user step by step, and then implemented water-filling power allocation. The theoretical analysis and simulation results show that the algorithm can take full advantage of multiuser diversity, and improve the system capacity effectively.

Key words: MIMO; OFDM; feedback delay; feedback error; resource allocation

多媒体业务的高速发展, 要求无线通信系统能够在有限的资源下, 为用户提供高的传输速率并满足其不同的服务质量 (quality of service, QoS) 需求。基于此高效的资源分配算法成为目前国内外的研究热点。

文献[1~3]研究了 MIMO-OFDM 系统的资源分配问题, 但都假设收发双方可以获得完全相同的信道状态信息 (channel state information, CSI), 而实际系统中往往存在反馈时延和误差。针对非理想反馈的 MIMO-OFDM 系统, 文献[4]研究了存在反馈时延时系统误码率性能; 文献[5]给出了一种存在信道估计误差时的最优功率分配算法; 文献[6]针对非理想 CSI 反馈 OFDM 系统, 对比了采用自适应资源分配和非自适应传输模式时系统和容量性能。目前, 已有的研究主要针对反馈时延和反馈误差单一存在的情况, 而实际系统中二者往往同时存在。

因此, 本文将对反馈时延和反馈误差同时存在时的多用户 MIMO-OFDM 系统下行链路进行研究。在发射总功率一定并满足用户 QoS (如误比特率 BER) 需求的情况下, 以最大化系统和容量为目标, 给出一种非理想反馈下自适应资源分配算法。

1 系统模型与信道模型

1.1 系统模型

多用户 MIMO-OFDM 系统下行链路模型框图如图 1 所示。

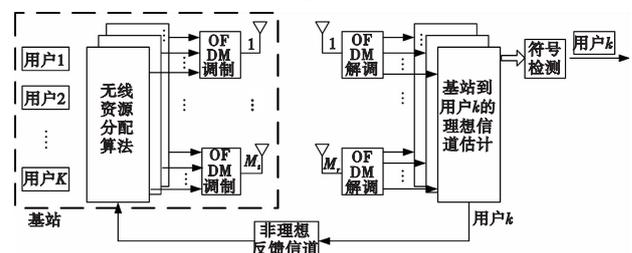


图1 多用户MIMO-OFDM系统下行链路模型框图

系统由 1 个基站和 K 个用户组成, 基站端有 M_t 根发射天线, 每个用户有 M_r 根接收天线, 各收发天线对之间的信道相互独立。系统子载波个数为 M , 且每个子载波在同一时刻只被一个用户使用, 各子载波之间无干扰。用户在小区中服从均匀分布, 用户间信道相互独立。基站与用户间的 CSI 通过反馈信道反馈给基站, 由于存在反馈时延和反馈误差, 基站得到的是不准确的 CSI。

收稿日期: 2012-03-27; 修回日期: 2012-05-05 基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2009ZX03003-008-02); 国家“863”计划资助项目(2009AA011504)

作者简介: 杜崇(1987-), 男, 河南舞阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为 MIMO-OFDM 系统资源分配技术(rainpopo@126.com); 陈松(1986-), 男, 福建永安人, 博士研究生, 主要研究方向为 MIMO-OFDM 技术; 仵国锋(1974-), 男, 河南灵宝人, 讲师, 博士, 主要研究方向为认知 Mesh 网络; 胡捍英(1961-), 男, 河南内乡人, 教授, 博导, 主要研究方向为移动与无线通信。

定义 $M_r \times M_t$ 矩阵 $H_{k,m}$ 为用户 k 在子载波 m 上的信道增益矩阵,则在时刻 t 用户 k 在子载波 m 上接收到的信号可以表示为

$$Y_{k,m}(t) = H_{k,m}(t) X_{k,m}(t) + n_{k,m}(t) \quad (1)$$

其中: $Y_{k,m}(t)$ 为 $M_r \times 1$ 接收信号矩阵; $X_{k,m}(t)$ 为 $M_t \times 1$ 发送信号矩阵; $n_{k,m}(t)$ 为 $M_r \times 1$ 噪声矩阵,且矩阵各元素服从均值为 0、方差为 σ_n^2 的加性复高斯分布。

对 $H_{k,m}$ 进行奇异值分解(SVD):

$$H_{k,m} = U_{k,m} S_{k,m} V_{k,m}^H = \sum_{i=1}^{\text{rank}(H_{k,m})} u_{k,m}^i s_{k,m}^i (v_{k,m}^i)^H \quad (2)$$

令 $u_{k,m}^i$ 、 $v_{k,m}^i$ 分别表示用户 k 在子载波 m 第 i 个空间子信道上发射天线的波束成型矢量和接收天线的加权矢量,则各子载波上的 MIMO 信道可以划分成多个独立并行的空间子信道。

1.2 信道模型

假设接收端有理想信道估计,由于系统中存在反馈时延和反馈误差,发送端在子载波 m 上得到的反馈 CSI 为 H_m^f 时,真实信道状态信息 H_m 可表示为^[7]

$$H_m = \bar{H}_m + \Xi_m \quad (3)$$

其中: \bar{H}_m 为给定 H_m^f 时 H_m 的条件均值,可以表示为 $\bar{H}_m = E\{H_m^f | H_m^f\} = \rho H_m^f$, ρ 为置信系数且 $\rho \in (0, 1]$, 表示反馈信道的可信程度; Ξ_m 为反馈误差矩阵,其元素服从均值为 0、方差为 σ^2 的复高斯分布, σ^2 为等价方差,表示在给定 H_m^f 条件下 H_m 的不确定程度。

可以证明置信系数 ρ 和等价方差 σ^2 的数学表达^[7] 为

$$\rho = \frac{J_0(2\pi f_D \tau)}{1 + \sigma_E^2} \quad (4)$$

$$\sigma^2 = 1 - \frac{[J_0(2\pi f_D \tau)]^2}{1 + \sigma_E^2} \quad (5)$$

其中: $J_0(\cdot)$ 表示第一类零阶 Bessel 函数, f_D 为多普勒频率; τ 为信道反馈时延,实际系统中,反馈时延主要由处理等待时延决定,对于 LTE 系统,处理等待时延约为 5 ~ 10 ms^[8]; σ_E^2 表示反馈误差功率,在瑞利块衰落信道中,使用正交训练序列,最小均方误差(MMSE)估计 σ_E^2 可表示为^[9]

$$\sigma_E^2 = 1 / (1 + \frac{T_r \cdot P_r}{M_t}) \quad (6)$$

其中: T_r 表示每个相干时间内训练符号的数量, P_r 表示训练过程中的信噪比。

2 非理想反馈资源分配

在多用户系统中,不同用户同一时刻可能有不同的业务需求,如语音、视频、短信等,不同业务对系统 BER 的要求也不相同,对于实时业务,要求 $BER = 10^{-3} \sim 10^{-7}$; 对于非实时业务,要求 $BER = 10^{-5} \sim 10^{-8}$ ^[10]。本文在发射总功率一定的前提下,根据不同业务的不同 QoS 需求,以最大化系统和容量为目标,给出了一种非理想反馈下子载波与功率分配算法。

2.1 子载波分配

假设子载波 m 分配给用户 k ,由式(3)知,用户 k 在子载波 m 上的真实信道状态信息 $H_{k,m}$ 不再看做确定量,可用条件均值 $\bar{H}_{k,m}$ 代替 $H_{k,m}$ 构建一组独立并行的空间子信道,即

$$\bar{H}_{k,m} = \rho H_{k,m}^f = \sum_{i=1}^I u_{k,m}^i (\rho s_{k,m}^i) (v_{k,m}^i)^H \quad (7)$$

式中: I 为可获得的空间子信道个数,若用户 k 在子载波 m 上

的发送信号矢量为 $x_{k,m} = [x_{k,m}^1, x_{k,m}^2, \dots, x_{k,m}^I]^T$,则用户 k 在子载波 m 的第 i 个空间子信道上接收到的信号为

$$y_{k,m}^i = (u_{k,m}^i)^H H_{k,m} v_{k,m}^i x_{k,m}^i + (u_{k,m}^i)^H n_{k,m} \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (8)$$

将式(2)(3)代入式(8)得

$$y_{k,m}^i = \rho s_{k,m}^i x_{k,m}^i + (u_{k,m}^i)^H \Xi_m v_{k,m}^i x_{k,m}^i + (u_{k,m}^i)^H n_{k,m} \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (9)$$

式中后两项为干扰与噪声之和,由于其非高斯性,该式的互信息难以计算,但当发送符号独立同高斯分布并利用最近解码规则时,其广义互信息可以表示为^[11]

$$I(x_{k,m}^i; y_{k,m}^i | \rho s_{k,m}^i) = \log_2 \left(1 + \frac{(\rho s_{k,m}^i)^2 P_{k,m}^i}{\sigma_{k,m}^2 P_{k,m} + \sigma_n^2} \right) \quad (10)$$

式中, $P_{k,m}^i$ 为用户 k 在子载波 m 的第 i 个空间子信道上的发射功率; $P_{k,m}$ 、 $\sigma_{k,m}^2$ 分别表示用户 k 在子载波 m 上的发射功率和等价方差。因此用户 k 在子载波 m 第 i 个空间子信道上的信噪比可以表示为

$$SNR_{k,m}^i = \frac{(\rho s_{k,m}^i)^2 P_{k,m}^i}{\sigma_{k,m}^2 P_{k,m} + \sigma_n^2} \quad (11)$$

令 $b_{k,m}^i$ 表示用户 k 在子载波 m 第 i 个空间子信道上加载的比特数, BER_{target}^k 为用户 k 的目标误比特率,则在加性高斯白噪声信道(AWGN)中,采用 MQAM 调制方式时,BER 可近似表达为^[12]

$$BER_{k,m}^i = 0.2 \exp \left[-\frac{3SNR_{k,m}^i}{2(2^{b_{k,m}^i} - 1)} \right] \quad (12)$$

暂不考虑比特为整数的要求,则

$$b_{k,m}^i = \log_2 \left[1 - \frac{3(\rho s_{k,m}^i)^2 P_{k,m}^i}{2(\sigma_{k,m}^2 P_{k,m} + \sigma_n^2) \ln(5BER_{\text{target}}^k)} \right] \quad (13)$$

其中: σ_n^2 表示噪声功率,令

$$\xi_{k,m}^i = -\frac{3P_{k,m}^i \rho^2}{2(\sigma_{k,m}^2 P_{k,m} + \sigma_n^2) \ln(5BER_{\text{target}}^k)}$$

则用户 k 在子载波 m 上携带的比特数为

$$b_{k,m} = \sum_{i=1}^I b_{k,m}^i = \sum_{i=1}^I \log_2 [1 + \xi_{k,m}^i (s_{k,m}^i)^2] = \log_2 \left\{ \prod_{i=1}^I [1 + \xi_{k,m}^i (s_{k,m}^i)^2] \right\} \quad (14)$$

根据上述方法,给定功率 P 就可以得到各用户在子载波 m 上能够传输的比特数,将子载波 m 分配给在其上传输比特数最大的用户,即

$$k = \arg \max_{k, k \in \{1, 2, \dots, K\}} \left\{ \log_2 \left\{ \prod_{i=1}^I [1 + \xi_{k,m}^i (s_{k,m}^i)^2] \right\} \right\} \quad (15)$$

2.2 多用户资源分配

用布尔变量 $w_{k,m}$ 来表示子载波 m 是否分配给用户 k ,若子载波 m 分配给用户 k ,则 $w_{k,m} = 1$; 反之, $w_{k,m} = 0$ 。设发射总功率为 P_{total} ,以最大化系统和容量为目标的最优化问题可描述为

$$\max \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K w_{k,m} b_{k,m} \quad (16)$$

约束条件为

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K w_{k,m} P_{k,m} \leq P_{\text{total}} \\ & w_{k,m} \in \{0, 1\} \quad \forall k, m \\ & \sum_{k=1}^K w_{k,m} = 1 \quad \forall m, \text{ 且 } \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M w_{k,m} = M \\ & BER_{k,m} \leq BER_{\text{target}}^k \end{aligned} \quad (17)$$

该最优化问题可分两步实现,首先将子载波分配给其上传速率最大的用户,即子载波分配;然后对子载波进行功率分配和比特加载。具体流程如下:

a) 初始化。对存在反馈时延和反馈误差的 $M_r \times M_t$ 维反馈信道矩阵 $H_{k,m}^f$ 根据式(7)作 SVD 分解,得到 $s_{k,m}^1, s_{k,m}^2, \dots, s_{k,m}^L$ 。

b) 子载波根配。根据式(15)将子载波分配给用户。

c) 功率分配,比特加载。由于每个子载波只能分配给一个用户,因此子载波分配之后,就可以不考虑用户的影响,对所有子载波进行注水功率分配,并将子载波上的功率平均分配到其空间子信道上,计算出各子载波上分配的比特数 $b_{k,m}$,对其进行整数化调整 $\hat{b}_{k,m} = \text{floor}(b_{k,m})$, $\text{floor}(\cdot)$ 表示向下取整。

3 性能仿真与分析

3.1 仿真条件

假设系统发送天线和接收天线数均为 4, OFDM 子载波个数为 1 024, 各子载波带宽为 15 kHz, 用户同一时刻只进行一种业务, 即其误码率需求不变。假设实时业务误码率为 10^{-4} , 非实时业务误码率为 10^{-6} , 并且假设所有用户有相同的反馈时延和反馈误差, 同时定义子载波平均发射信噪比为 $10 \lg \left(\frac{P_{\text{total}}}{M\sigma_n^2} \right)$ 。

3.2 仿真结果与分析

本节首先将所提算法与静态分配方式, 即子载波采用轮循分配进行了对比, 结果如图 2 所示。仿真场景中误差参数 $\sigma_E^2 = 0.09$, 时延参数 $f_D\tau = 0.046$ (用户最大移动速度为 5 km/h, 反馈时延为 5 ms), 用户数为 4, 其中两个用户进行实时业务, 误比特率为 10^{-4} , 两个用户进行非实时业务, 误码率为 10^{-6} 。

从图 2 可以看出, 非理想反馈时系统和容量较理想反馈时有所下降, 而且本文算法较静态轮循分配算法系统和容量大, 这是由于所提算法充分利用多用户分集增益的结果。

图 3 比较了理想反馈情况和仅存在反馈误差情况时的系统和容量性能。仿真场景中用户数为 4, 其中两个用户进行实时业务, 误比特率为 10^{-4} , 两个用户进行非实时业务, 误码率为 10^{-6} 。图 3 分别给出了 $T_r = 1, T_r = 4, T_r = 6, P_r = 10$ dB, 即 $\sigma_E^2 = 0.28, \sigma_E^2 = 0.09$ 和 $\sigma_E^2 = 0.06$ 时的系统和容量性能曲线。

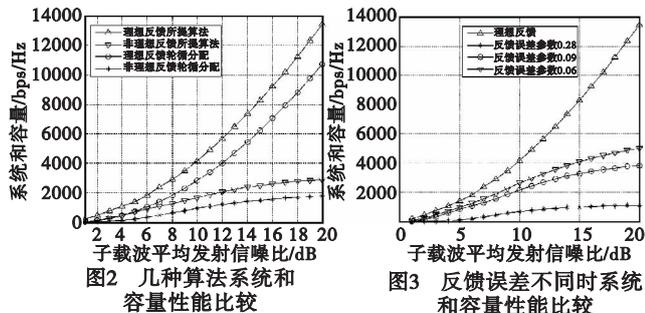


图2 几种算法系统和容量性能比较

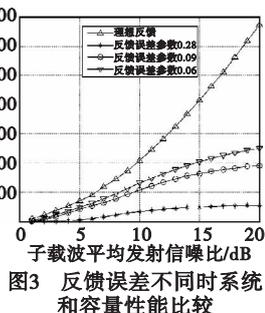


图3 反馈误差不同时系统和容量性能比较

从图 3 可以看出, 存在反馈误差时系统和容量较理想无反馈误差时的系统和容量有所下降, 而且 σ_E^2 越大, 和容量损失越大。这是由于随着反馈误差参数 σ_E^2 的增大, 反馈 CSI 质量降低, 不确定度变大, 即 ρ 减小 σ^2 增大, 导致系统和容量降低。

图 4 比较了不同反馈时延和反馈误差场景下的系统和容量性能。仿真场景中用户数为 4, 其中两个用户进行实时业务, 误比特率为 10^{-4} , 其余用户进行非实时业务, 误码率为

10^{-6} 。图中给出了误差参数 $\sigma_E^2 = 0.09$, 时延参数 $f_D\tau \approx 0.046$ 、 $f_D\tau \approx 0.065$ (反馈时延为 7 ms) 和 $f_D\tau \approx 0.093$ (反馈时延为 10 ms) 三种场景下的系统和容量性能曲线。

从图 4 可以看出, 时延越小, 系统和容量越大, 这是由于时延参数越小, 反馈 CSI 质量越高, 不确定度越小, 即 ρ 越大 σ^2 越小, 导致系统和容量越大。而且随着信噪比的提高, 系统和容量逐渐增大, 增速趋于平缓, 这是由于反馈时延和反馈误差导致式(11)中子载波等效信噪比增速变缓, 从而制约了系统和容量的增速。而实际系统中由于用户所处信道环境、距离基站位置以及用户的移动速度等均会造成反馈时延和反馈误差, 因此有必要综合考虑用户反馈 CSI 的质量, 提高系统性能。

图 5 分析了系统用户数对所提算法和容量性能的影响。假设所有用户的误比特率均为 10^{-6} , $f_D\tau = 0.046$, $\sigma_E^2 = 0.09$ 。图 5 给出了子载波平均发射信噪比为 10 dB、15 dB 时系统和容量随用户数的变化曲线。

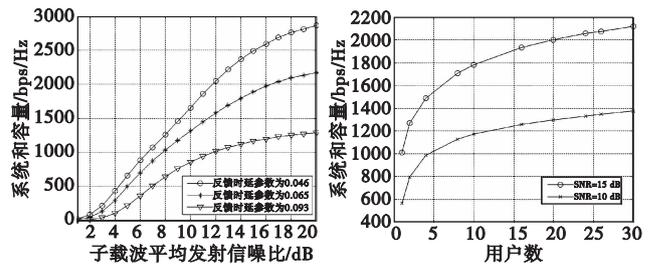


图4 反馈CSI质量不同时系统和容量性能

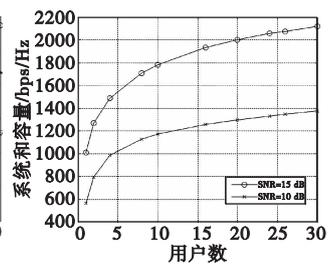


图5 不同用户数时系统和容量性能

从图 5 可以看出, 系统和容量随用户数的增加而增加, 这是由于所提算法有效地利用了多用户的分集增益。由于各个用户经历独立的衰落信道, 利用式(15)分配子载波时, 能够有效利用信道变化的随机性选择信道状况最好的用户进行传输。因此, 随着用户数的增加, 系统和容量也增加。

4 结束语

本文分析了反馈时延和反馈误差同时存在时对 MIMO-OFDM 系统和容量的影响, 给出了一种基于非理想反馈的自适应子载波与功率分配算法, 利用置信系数和等价方差来表征反馈 CSI 的可信程度, 仿真结果表明, 该算法能够充分利用多用户的分集, 有效提高系统的和容量性能。在后续的研究中将针对实际系统中如何有效降低非理想反馈带来的影响, 提高系统性能进行重点研究。

参考文献:

- [1] PENG Ying, ARMOUR S M D, McGEEHAN J P. An investigation of dynamic subcarrier allocation in MIMO-OFDMA systems[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2007, 56(5): 2990-3005.
- [2] AHMADI H, CHEW Y H. Adaptive subcarrier-and-bit allocation in multiclass multiuser OFDM systems using genetic algorithm[C]// Proc of the 20th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. 2009:1883-1887.
- [3] TEJERA P, UTSCHICK W, NOSSEK J, et al. Rate balancing in multiuser MIMO OFDM systems[J]. IEEE Trans on Communications, 2009, 57(5): 1370-1379.
- [4] ZHOU Chan, WUNDER G. A novel low delay scheduling algorithm for OFDM broadcast channel[C]//Proc of IEEE Global Telecommunications Conference. 2007:3709-3713.

从图 3、4 中可以看出,不论是哪种业务流,随着网络规模的增大,节点的时延都逐渐加大。当节点较少时,本文的算法与 LTD、HRF 算法时延比较接近,但随着节点数量的增加,由于对业务流进行了分类,算法对 UGS 业务流时延明显低于 LTD、HRF 算法。对于 BE 业务,由于设定的队列优先级最低,平均时延略高于 HRF 和 LTD 算法。仿真结果体现出了在区分服务流下高优先级业务得到了低延迟服务。

图 5、6 是在不同网络规模下,只产生单一的 UGS 业务数据流的节点平均时延比较。图 5 比较了节点的总体时延,其中横坐标为网络中的节点数,从图中可以看出在单一业务的情况下,随着节点数量的增加,节点通信请求增多,时延逐渐增大,本文采用的计算调度权值方式在单一业务流的总体时延控制优于 HRF 和 LTD 算法。图 6 比较了单一业务下高传输要求节点的时延,其中横坐标为具有高传输要求的节点数,由于 LTD 算法具有最小传输要求的节点总是先调度,因此随着高传输要求节点数量的增加,高传输要求节点的平均时延明显增大;HRF 算法在计算调度权值时一定程度地考虑了高传输要求节点的调度,因此高传输要求节点的时延比 LTD 算法要小;本文算法不仅在计算调度权值考虑了高传输要求的节点,而且会根据等待调度时间的延长对节点调度权值进行补偿,因此对于高传输要求节点的时延上要远远小于 HRF 和 LTD 算法。

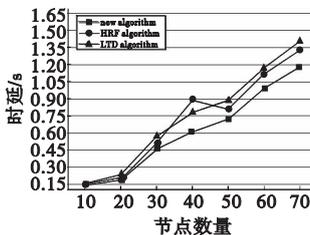


图5 UGS单业务节点的总体时延比较

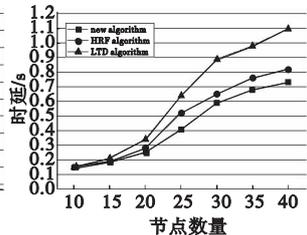


图6 UGS单业务高传输要求节点的时延比较

吞吐量也是衡量 QoS 的一个重要指标,图 7 比较了三种算法在不同网络规模下同时产生多种数据流的吞吐量变化。网络的节点数从 10 ~ 70 增加,随着网络规模的增大,总吞吐量从 0.15 Mbps 逐渐增涨到了 0.65 Mbps。仿真结果表明,在节点数相同的环境下,本文算法比 LTD 的吞吐量略高,但远远高于 HRF 算法。

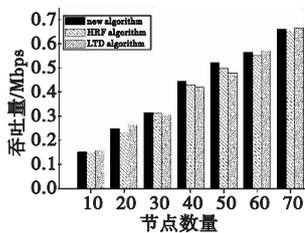


图7 吞吐量比较

4 结束语

本文提出一种在 WiMAX Mesh 集中式模式下基于区分业务流的 QoS 调度算法。算法将 Mesh 模式下的数据流按业务优先级进行分类,同类业务流间的调度兼顾带宽分配的公平性。仿真实验表明,算法在各种规模的 WiMAX Mesh 网络下都具有较好的表现,高优先级的业务流具有较低的平均时延,与两个对比算法相比较,在时延和吞吐量上都具有一定的优势。仿真中没有对集中式下的不同路由调度树构建进行比较,下一步工作将考虑调度树的构建策略对调度算法的影响。

参考文献:

- [1] IEEE Standard 802.16-2004, IEEE standard for local and metropolitan area networks, part16: air interface for fixed broadband wireless access systems[S]. [S. l.]:IEEE Standards Association, 2004.
- [2] CHEN Jian-feng, CHI Cai-xia, GUO Qian. A bandwidth allocation model with high concurrence rate in IEEE802.16 Mesh mode[C]// Proc of International Conference on Asia-Pacific Conference on Communications. 2005:750-754.
- [3] TAO Jian, LIU Fu-qiang, ZENG Zhi-hui, et al. Throughput enhancement in WiMax Mesh networks using concurrent transmission[C]// Proc of International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. 2005:871-874.
- [4] ALGAMALI M H, WANG Jian-xin, ALHAMIDI R A. Base station scheduler scheme of IEEE 802.16 Mesh mode[C]//Proc of International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing. Washington DC:IEEE Computer Society, 2009:294-298.
- [5] WANG Bin, JIN Zhi-gang. A fair centralized scheduling algorithm based on traffic demand for IEEE 802.16 Mesh networks[C]//Proc of International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing. Washington DC: IEEE Computer Society, 2010:1-4.
- [6] 黄彦彬, 杨寿保, 滕达. FFCS: WiMAX Mesh 网络中一种流公平集中式调度算法[J]. 小型微型计算机系统, 2010, 31(9): 1746-1751.
- [7] 冯陈伟. WiMAX Mesh 网络路由与调度算法研究[J]. 计算机工程, 2011, 37(4): 93-95.
- [8] AN Cheng-zhu, XIAO Jun. The research of centralized scheduling algorithms in multi-channel multi-radio WiMAX Mesh network[C]// Proc of International Conference on Information Engineering and Computer Science. 2009:1-4.
- [9] Ns2Centralized80216Mesh. NS2 802.16 mesh centralized scheduling patch[EB/OL]. 2009. <http://code.google.com/p/ns2wcsm/>.
- [10] Ns2mesh80216. NS2 802.16 mesh distributed scheduling patch[EB/OL]. (2009-11-15). <http://cngl.iet.unipi.it/wiki/index.php/Ns2mesh80216>.

(上接第 4259 页)

- [5] LIU Chun-hui, MARTHAR R. Optimal and efficient bit loading for OFDM in the presence of channel uncertainty[C]//Proc of IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems. 2008:11-15.
- [6] KUHNE A, KLEIN A. Throughput analysis of multi-user OFDM systems using imperfect CQI feedback and diversity techniques[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(8): 1440-1450.
- [7] 孙群龙. 多载波系统中的自适应资源分配研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2010.
- [8] GOLDENBAUM M, AKL R A, VALENTIN S, et al. On the effect of feedback delay in the downlink of multiuser OFDM systems[C]//

- Proc of the 45th Annual Conference on Information Sciences and Systems. 2011:1-6.
- [9] HASSIBI B, HOCHWALD B M. How much training is needed in multiple-antenna wireless link? [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2003, 49(4): 951-963.
- [10] 叶银法, 陆健贤. WCDMA 系统工程手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
- [11] YOO T, GOLDSMITH A. Capacity and power allocation for fading MIMO channels with channel estimation error[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2006, 52(5): 2203-2214.
- [12] GOLDSMITH A J, CHUA S G. Variable-rate variable-power MQAM for fading channels[J]. IEEE Trans on Communications, 1997, 45(10): 1218-1230.