

有限反馈中继系统基于业务速率的跨层调度算法

陈前斌* 蒋广健 唐伦 李征

(重庆邮电大学移动通信技术重点实验室 重庆 400065)

摘要: 针对正交频分复用(OFDM)中继系统中用户不同业务速率需求的应用场景, 该文提出了一种基于用户业务速率的反馈机制(Considering Traffic Rate Feedback, CTRF)。CTRF 根据业务速率动态调整用户的反馈效用函数值, 并与反馈门限比较判决用户是否反馈, 从而减少系统的反馈量。同时, 提出了一种基于业务队列公平性(Traffic Queue Proportional Fair, TQPF)的跨层调度准则。在此基础上, 给出了一种联合 CTRF 与 TQPF 的支持不同业务速率的减少反馈调度算法(CTRF-TQPF)。理论和仿真结果表明, CTRF 可以有效地减少反馈量, CTRF-TQPF 算法可以有效保障用户的不同业务需求, 降低系统的丢包率。

关键词: 正交频分复用; 中继; 调度; 减少反馈; 业务速率; 业务影响因子

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)01-0026-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00163

A Novel Method of Feedback Reducing and Cross-layer Scheduling Based on Traffic Rate for Relay System

Chen Qian-bin Jiang Guang-jian Tang Lun Li Zheng

(Key Lab of Mobile Communication Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Considering Traffic Rate Feedback (CTRF) is proposed for Orthogonal Frequency Division Multiple (OFDM) relay system with different user traffic rate. According to user traffic rate and channel gain, CTRF adjusts dynamically the value of feedback utility function and then compares it with feedback threshold to decide feedback, which can reduce the feedback quality of the system. Meanwhile, a cross-layer scheduling criterion based on user Traffic Queue Proportional Fair (TQPF) is proposed. Finally, a feedback reducing and scheduling algorithm combining CTRF and TQPF (CTRF-TQPF) is proposed to support different traffic rate. Theoretical and simulation results show that CTRF can reduce feedback and CTRF-TQPF can meet user traffic need and reduce packet loss rate of the system.

Key words: Orthogonal Frequency Division Multiple (OFDM); Relay; Scheduling; Feedback reducing; Traffic rate; Traffic impact factor

1 引言

中继技术可以提供无处不在的通信, 增加覆盖区域, 克服路径损耗, 增加网络吞吐量^[1,2]。正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiple, OFDM)可以减轻频率选择性衰落和符号间干扰。因此中继技术和 OFDM 的结合可以有效的增加系统容量和覆盖范围^[3]。

资源分配和调度的前提是获取时变的信道信息, 反馈信道将用户的信道信息反馈给基站, 上行

的反馈量已成为评价系统性能的一种指标^[4]。感知信道状态的调度不考虑分组传输延迟和用户缓存容量, 但是在多数应用中, 不受限的延迟和队列积累会导致业务的不连续性, 如溢出和分组阻塞。为了解决此类问题, 同时支持用户的业务需求, 文献[5,6]提出了基于信道, 队列和业务的调度准则, 虽然可以达到期望的性能, 但反馈量很大, 影响了中继系统的性能。针对这一问题, 文献[7]研究了 OFDM 中继网络中中继处基于子载波选择的减少反馈调度, 但是基站采用了全反馈, 系统总反馈量没有明显减少。文献[8-10]研究了不同网络中的有限反馈机制, 虽然减少了反馈量, 但影响了用户的性能, 不具普遍适用性。文献[11,12]提出了单跳网络中基于用户需求的反馈机制。现有文献针对多用户 OFDM 中继系统中支持不同用户业务速率的反馈机制缺乏深入研究。

2011-03-03 收到, 2011-10-24 改回

国家自然科学基金(60972070), 重庆市自然科学基金重点项目(CSTC2009BA2090), 重庆市教委项目(KJ100514), 重庆邮电大学博士启动基金(A2011-02)和重庆市科委重点实验室专项经费资助课题

*通信作者: 陈前斌 chenqb@cqupt.edu.cn

针对 OFDM 中继系统中不同业务速率的场景，本文首先提出了一种基于中断概率的减少反馈机制；为了支持不同用户的业务速率，本文进一步提出了基于不同业务速率的减少反馈机制。根据用户的业务速率及信道增益动态地调整用户的反馈效用函数值，然后与反馈门限比较。由于高业务速率用户有较大的业务影响因子，可反馈更多的子载波状态信息。基于上述的反馈机制，本文提出了 OFDM 中继系统中结合用户业务速率的跨层调度准则，可保证用户业务的公平性并减少系统的丢包率。

2 系统模型

如图 1 所示，基站(Base Station, BS)在半双工解码转发(Decode-Forward, DF)中继站(Relay Station, RS)协助下与用户通信。RS 采用时分双工(Time Division Duplexing, TDD)模式，每个时隙分为两个子时隙，对于两跳中继模式，第 1 跳指 BS 到 RS 之间的链路，第 2 跳指 RS 到移动站(Mobile Station, MS)之间的链路。在中继辅助系统中，如果用户接入 BS，称其为 BS 域的直传用户，否则为 RS 域的中继用户。

假设系统有 N 个子载波，系统总带宽为 B ，子

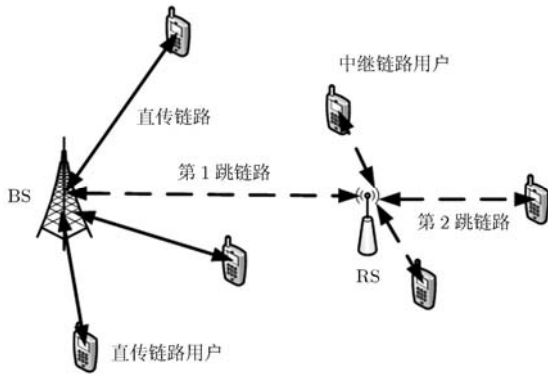


图 1 系统模型

载波功率为 p 。BS 域的直传用户集合为 U_D ，用户数为 M_1 ，RS 域的中继用户集合为 U_R ，用户数为 M_2 ，总用户数为 $M = M_1 + M_2$ ，不考虑基站与中继之间的协作传输。 $g_{k_D,n}$ 、 $g_{k_R,n}$ 和 g_n 表示信道增益； $g_{k_D,n}$ 、 $g_{k_R,n}$ 服从相同的瑞利分布。考虑实际通信系统中基站与中继间的信道条件优于中继与用户间的信道条件，文中假设 g_n 优于 $g_{k_R,n}$ 。

直传用户 k_D 在子载波 n 上的容量为

$$r_{k_D,n} = \frac{B}{N} \log_2(1 + pg_{k_D,n}^2 / (\Gamma\sigma^2)) \quad (1)$$

直传用户 k_D 的传输速率为

$$C_{k_D} = \sum_{n=1}^N a_{k_D,n} r_{k_D,n} \quad (2)$$

中继用户 k_R 通过中继在子载波 n 上的容量为

$$r'_{k_R,n} = \frac{B}{N} \log_2(1 + pg_{k_R,n}^2 / (\Gamma\sigma^2)) \quad (3)$$

中继在子载波 n 上的信道容量为

$$r_n = \frac{B}{N} \log_2(1 + pg_n^2 / (\Gamma\sigma^2)) \quad (4)$$

对中继用户 k_R ，由于中继采用 DF 模式，所以

$$r_{k_R,n} = \min\{r'_{k_R,n}, r_n\} \quad (5)$$

中继用户 k_R 的传输速率为

$$C_{k_R} = \sum_{n=1}^N a_{k_R,n} r_{k_R,n} \quad (6)$$

式中 σ^2 表示加性高斯白噪声的功率， $\sigma^2 = N_0B / N$ ， Γ 是与误码率相关的常数， $\Gamma = -\ln(5 \times \text{BER}) / 1.5$ ，当子载波 n 分配给用户 k_R 、 k_D 时，指示变量 $a_{k_R,n}$ 、 $a_{k_D,n}$ 为 1，反之为 0。

如图 2 所示，BS 为用户分别建立缓存队列，各队列均按照先进先出原则发送数据。假设系统中各用户的业务速率恒定，且每个用户的业务速率不同。BS 根据用户反馈的信道状态信息和用户的队列状态信息，遵循调度算法对用户进行调度。

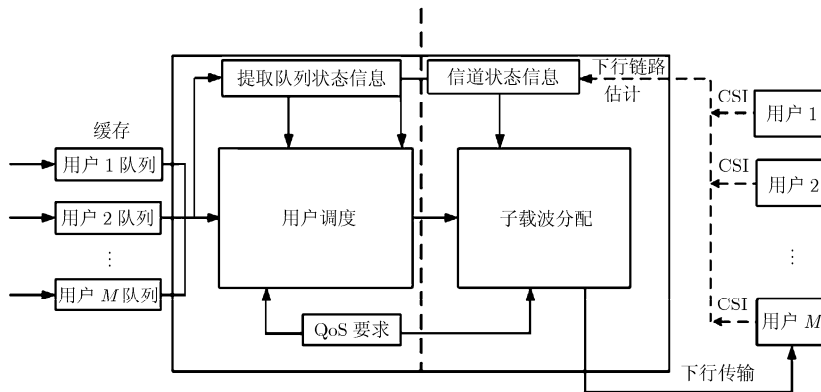


图 2 基站调度器

3 跨层调度算法

文献[6]中业务公平性(Traffic Proportional Fair, TPF)调度准则考虑了用户的业务速率,但没有考虑用户队列信息。用户队列信息及时反映用户缓存的状态,基于用户队列信息,将资源优先分配给缓存队列较长的用户,可以有效避免因数据溢出而产生的丢包。基于 TPF,本文提出了一种联合感知信道状态和感知队列状态的跨层调度准则,即业务队列公平性(Traffic Queue Proportional Fair, TQPF)调度准则。

本节首先描述了 TQPF 调度准则;然后分别阐述了不考虑用户业务速率的反馈机制(Non-Considering Traffic Rate Feedback, NCTRF)与基于用户业务速率的反馈机制(Considering Traffic Rate Feedback, CTRF)的门限设置;最后提出了支持不同业务速率的减少反馈调度算法。

3.1 TQPF 调度准则

为了减少高业务速率用户缓存中队列的长度并保证用户业务速率的公平性,应保证各时隙内用户获得的传输速率与其业务速率成正比,即

$$C_1(t)/\Psi_1 = C_2(t)/\Psi_2 = \dots = C_M(t)/\Psi_M \quad (7)$$

Ψ_k 为用户 k 的业务速率, $C_k(t)$ 为 t 时隙用户 k 的传输速率, $C_k(t)/\sum_{j=1}^M C_j(t)$ 较 $\Psi_k/\sum_{j=1}^M \Psi_j$ 的偏移量为

$$f_k(t) = \Psi_k \left/ \sum_{j=1}^M \Psi_j - C_k(t) \right/ \sum_{j=1}^M C_j(t) \quad (8)$$

定义数据链路层的权值为

$$w_k(t+1) = w_k(t) + \frac{1}{t} f_k(t) \quad (9)$$

$f_k(t) > 0$ 表示 t 时隙用户的传输速率较低,经式(9)迭代运算,第 $t+1$ 个时隙的加权因子 $w_k(t+1)$ 会增大,在接下来的速率分配中该用户会获得较高的传输速率,从而实现对公平性的调整补偿,反之亦然。

本文采用上述业务公平的基础上,综合考虑信道信息和用户缓存队列信息,定义调度准则如下:

$$k^* = \operatorname{argmax} q_k(t) w_k(t) r_{k,n}(t) \quad (10)$$

其中 $r_{k,n}(t)$ 为时隙 t 用户 k 在子载波 n 上的速率, $q_k(t)$ 为

$$q_k(t) = e^{(l_k(t-1))/L_k} \quad (11)$$

L_k 为用户 k 缓存队列的长度, $l_k(t-1)$ 为用户在时隙 $t-1$ 的队列长度,指数形式是为了避免缓存队列为空时用户的优先级为 0。式(11)表明了用户缓存队列信息, $l_k(t-1)$ 越大,表明用户缓存中的数据越多,用户需要获得更高的传输速率以避免后面到达的数据溢出丢失。

3.2 反馈门限设置

门限的设置对于系统性能和反馈开销有重要影响。本文首先引用文献[4]中基于反馈中断概率的方法,讨论 OFDM 中继系统中 NCTRF 的门限设置;然后基于 NCTRF 的门限,对 CTRF 的门限进行设置。

(1)NCTRF 的门限设置 以中继用户为例,假设信道的增益均服从瑞利分布,概率密度函数为

$$p(g) = \frac{g}{\delta^2} e^{-g^2/(2\delta^2)} \quad (12)$$

其中 g 为用户的信道增益, δ^2 为瑞利分布的方差。

任一用户信道增益小于 x 的概率为

$$P(g < x) = \int_0^x p(g) dg = 1 - e^{-x^2/(2\delta^2)} \quad (13)$$

则全部中继用户对应的增益均小于 x 的概率为

$$\begin{aligned} P_{M_2}(x) &= P_{M_2}(g_1, \dots, g_{M_2} < x) = \prod_{k=1}^{M_2} P(g < x) \\ &= [P(g < x)]^{M_2} = (1 - e^{-x^2/(2\delta^2)})^{M_2} \end{aligned} \quad (14)$$

式(14)中,若将 x 取值设为中继门限,其含义便是中继反馈中断概率:

$$P_{\text{outR}} = P_{M_2}(g_{\text{thR}}) = (1 - e^{-g_{\text{thR}}^2/(2\delta^2)})^{M_2} \quad (15)$$

由式(15)可求得中继反馈门限为

$$g_{\text{thR}} = [-2\delta^2 \ln(1 - P_{\text{outR}}^{1/M_2})]^{1/2} \quad (16)$$

同理,可得基站的反馈门限为

$$g_{\text{thB}} = [-2\delta^2 \ln(1 - P_{\text{outB}}^{1/M_1})]^{1/2} \quad (17)$$

(2)CTRF 的门限设置 以上门限设置没有考虑用户的业务速率,本文进一步提出了 CTRF。为了避免丢包,高业务速率用户需要获得更多的子载波以拥有较大的传输速率,而反馈是用户获得载波的前提,因此在反馈时需要考虑用户的业务信息。本文根据用户的业务速率及信道增益,定义用户的反馈效用函数为

$$h_k(g_k, \Psi_k) = g_k \Psi_k \left/ \left(\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \Psi_k \right) \right. \quad (18)$$

其中 g_k 为信道增益, $\Psi_k/\left(\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \Psi_k\right)$ 体现了用户业务速率对反馈的影响,定义用户的业务影响因子为

$$a_k = \Psi_k \left/ \left(\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \Psi_k \right) \right. \quad (19)$$

从式(18),式(19)可知 a_k 正比于 Ψ_k ;同时 Ψ_k 越大,用户的反馈效用函数值越大。

用户通过比较反馈效用函数值与门限决定是否反馈。若 $h_k > g_{\text{th}}$,表明用户在子载波上的信道增益较好,同时该用户拥有较高的业务速率,此时用户可以将信道状态信息反馈给基站或中继,反之,则

不反馈。高业务速率用户与低业务速率用相比,其 h_k 较大,因此在 g_{th} 相同的情况下,高业务速率用户可以反馈更多子载波的信息,从而可以支持业务速率的不同。CTRF 的门限 g_{th} 可按照 NCTRF 的推导方法得出。

3.3 支持不同业务速率的减少反馈调度算法描述

本文提出了一种支持不同业务速率的减少反馈调度算法,即联合 CTRF 与 TQPF(CTRF-TQPF),具体描述如下:

(1)初始化用户业务速率 Ψ_k , 用户传输速率 $C_k = 0$, 用户缓存队列长度 $l_k = 0$, 子载波集合 $X = \{1, 2, \dots, N\}$, BS 域的直传用户集合 $U_D = \{1, 2, \dots, M_1\}$, RS 域的中继用户集合 $U_R = \{1, 2, \dots, M_2\}$ 。

(2)BS 根据用户业务速率 Ψ_k 按式(19)计算出每个用户的业务影响因子 a_k , 并告知 RS。

(3)对每个子载波:

(a)RS 根据式(16)计算门限 g_{thR} 并将其与用户的业务影响因子 a_k 广播给 RS 域的中继用户 U_R 。

(b)中继用户 U_R 按式(18)计算反馈效用函数值 h_{kR} , 然后与中继门限 g_{thR} 比较,若 $h_{kR} > g_{thR}$, 则该用户将其信道增益 g_{kR} 反馈给中继,反之则不反馈。可得中继反馈用户集合 U_{RF} 。

(c)BS 根据式(17)计算出门限 g_{thB} 后,将其与用户的业务影响因子 a_k 广播给 BS 域的直传用户 U_D 。

(d)直传用户 U_D 按步骤(b)中的方法同样进行反馈,可得直传反馈用户集合 U_{DF} 。同时中继将其反馈用户 U_{RF} 的信道状态信息发送给 BS。反馈结束,基站得到每个子载波上的反馈用户 U_F 。

(e)BS 根据反馈用户 U_F 在子载波上的优先级,将子载波分配给优先级最高的用户 $k^* = \operatorname{argmax} q_k(t)w_k(t)r_{k,n}(t)$, 指示变量 $a_{k,n}$ 变为 1, $X = X \setminus n$ 。

(f)重复(a)-(e)中的步骤,直到 $X = \phi$ 停止。

(4)所有子载波分配完成以后,计算出每个用户此时隙内的传输速率 $C_k = \sum_{n=1}^N a_{k,n} r_{k,n}$, 根据式(8),式(9)更新链路层权值 $w_k(t)$, 同时更新用户缓存队列长度 $l_k(t) = \max(l_k(t-1) + \Psi_k - C_k(t-1), 0)$ 。

4 性能分析

进一步,本节在 4.1 节与 4.2 节分别分析推导了 NCTRF 与 CTRF 的平均反馈用户数和平均可达速率。

4.1 NCTRF 的性能

(1)平均反馈用户数 中继用户的信道增益大于门限 g_{thR} 的概率为

$$P = P(g > g_{thR}) = \int_{g_{thR}}^{\infty} p(g)dg = e^{-g_{thR}^2/(2\delta^2)} \quad (20)$$

用户间信道衰落相互独立,因此 k 个用户反馈的概率 P_k 为

$$P_k = \binom{M_2}{k} P^k (1-P)^{M_2-k} \quad (21)$$

每个子载波在第 2 子时隙上的平均反馈用户数为

$$\begin{aligned} \bar{M}_2 &= \sum_{k=0}^{M_2} P_k \cdot k = \sum_{k=0}^{M_2} \binom{M_2}{k} P^k (1-P)^{M_2-k} \cdot k \\ &= \sum_{k=0}^{M_2} \binom{M_2}{k} e^{-\frac{g_{thR}^2}{2\delta^2}k} \left(1 - e^{-\frac{g_{thR}^2}{2\delta^2}}\right)^{M_2-k} \cdot k \end{aligned} \quad (22)$$

子载波在第 1 子时隙的反馈用户数与在第 2 子时隙上的分析相同,反馈用户数为

$$\begin{aligned} \bar{M}_1 &= \sum_{k=0}^{M_1} P_k \cdot k = \sum_{k=0}^{M_1} \binom{M_1}{k} P^k (1-P)^{M_1-k} \cdot k \\ &= \sum_{k=0}^{M_1} \binom{M_1}{k} e^{-\frac{g_{thB}^2}{2\delta^2}k} \left(1 - e^{-\frac{g_{thB}^2}{2\delta^2}}\right)^{M_1-k} \cdot k \end{aligned} \quad (23)$$

因此每个子载波总的反馈用户数为

$$\begin{aligned} M_{sub} &= \bar{M}_1 + \bar{M}_2 = \sum_{k=0}^{M_1} \binom{M_1}{k} e^{-\frac{g_{thB}^2}{2\delta^2}k} (1 - e^{-\frac{g_{thB}^2}{2\delta^2}})^{M_1-k} \cdot k \\ &\quad + \sum_{k=0}^{M_2} \binom{M_2}{k} e^{-\frac{g_{thR}^2}{2\delta^2}k} (1 - e^{-\frac{g_{thR}^2}{2\delta^2}})^{M_2-k} \cdot k \end{aligned} \quad (24)$$

(2)平均可达速率 考虑每个子载波上的平均可达速率为

$$C = E[\log_2(1 + \rho g^2)] \quad (25)$$

其中 g 为信道增益, $\rho = p/(\Gamma\sigma^2)$, $E[\cdot]$ 表示求均值。

根据文献[9],可得 $g_{max} = \max g = x$ 的概率密度函数为

$$\begin{aligned} p_{g_{max}}(x) &= \sum_{k=1}^M \left(p_k(x) \prod_{j=1; j \neq k}^M F_j(x) \right) \\ &= M \frac{x}{\delta^2} e^{-x^2/(2\delta^2)} (1 - e^{-x^2/(2\delta^2)})^{M-1} \end{aligned} \quad (26)$$

其中 $\rho = p/(\Gamma\sigma^2)$, $p_k(x)$ 为 g 的概率密度函数, $F_j(x)$ 为 g 的累积分布函数。将式(26)代入式(25)得

$$\begin{aligned} C &= \int_{g_{th}}^{\infty} \log_2(1 + \rho x^2) dp_{g_{max}}(x) = \int_{g_{th}}^{\infty} \log_2(1 + \rho x^2) dM \\ &\quad \cdot \frac{x}{\delta^2} e^{-x^2/(2\delta^2)} (1 - e^{-x^2/(2\delta^2)})^{M-1} \end{aligned} \quad (27)$$

4.2 CTRF 的性能

(1)平均反馈用户数 用户的反馈效用函数为

$$h_k = a_k g_k \quad (28)$$

其概率密度函数为

$$p(h_k) = \frac{h_k}{a_k^2 \delta^2} e^{-h_k^2/(2a_k^2 \delta^2)} \quad (29)$$

按照 NCTRF 的推导过程可得每个子载波总的反馈用户数为

$$M_{\text{sub}} = \overline{M}_1 + \overline{M}_2$$

$$= \sum_{k=0}^{M_1} k \cdot \binom{M_1}{k} \prod_{i=1}^k e^{-\frac{g_{\text{thB}}^2}{2a_i^2 \delta^2}} \prod_{i=k+1}^{M_1} \left(1 - e^{-\frac{g_{\text{thB}}^2}{2a_i^2 \delta^2}} \right)$$

$$+ \sum_{k=0}^{M_2} k \cdot \binom{M_2}{k} \prod_{i=1}^k e^{-\frac{g_{\text{thB}}^2}{2a_i^2 \delta^2}} \prod_{i=k+1}^{M_2} \left(1 - e^{-\frac{g_{\text{thB}}^2}{2a_i^2 \delta^2}} \right) \quad (30)$$

(2)平均可达速率 考虑用户业务速率, 用户反馈效用函数的概率密度函数为

$$p(h_k) = \frac{h_k}{a_k^2 \delta^2} e^{-h_k^2/(2a_k^2 \delta^2)} \quad (31)$$

由于 a_k 不同, 用户反馈效用函数的分布各不相同, 因此无法采用 NCTRF 中子载波上平均可达速率的推导。当用户的反馈效用函数值最大而信道增益不是最大时, 子载波若反馈该用户, 其速率将会减小。但是, 由于用户的业务影响因子 a_k 围绕 1 上下波动, 反馈时更大程度上取决于用户本身的信道增益, a_k 对子载波速率影响较小, 因此虽然 CTRF 平均可达速率比 NCTRF 的平均可达速率偏小, 但可近似表示为 $C = \int_{g_{\text{th}}}^{\infty} \log_2(1 + \rho x^2) dp_{g_{\text{max}}}(x) = \int_{g_{\text{th}}}^{\infty} \log_2(1 + \rho x^2) dM \frac{x}{\delta^2} e^{-x^2/(2\delta^2)} (1 - e^{-x^2/(2\delta^2)})^{M-1}$, 仿真将对此进行验证。

5 仿真结果

(1)仿真主要参数 考虑单中继多用户 OFDM 系统, 信道增益服从方差为 2 的瑞利分布。基站处每个用户的业务按固定速率到达。具体仿真参数如表 1。

表 1 仿真参数

子载波数	64	瑞利分布方差	2
子载波带宽	0.1 MHz	误码率	0.001
子载波功率	0.1 W	中断概率	0.1
用户数	8, 20, 60, 100	包到达率	1000+100 <i>i</i>
缓存长度	1 m	包/s(<i>i</i> 为用户的序号)	包/s(<i>i</i> 为用户的序号)
时隙长度	10 ms	包长	1000 bit

(2)反馈性能仿真 图 3 表明了反馈中断概率对门限和反馈用户数的影响。图 3(a)为中断概率与门限之间的关系; 图 3(b)中用户数为 60, 随着中断概率的增加, 门限增大, 平均反馈用户数逐渐减少, 当中断概率大于 0.7 时, 平均反馈用户数已减少到 1

以下。为了保证系统性能, 以下部分仿真均设反馈中断概率为 0.1。

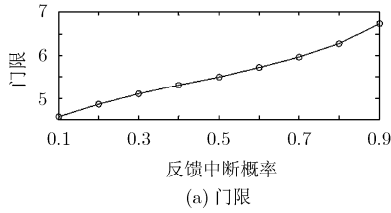
图 4 分析了总用户数和子载波平均反馈用户数之间的关系。当反馈中断概率为 0.1, 总用户数为 100 时, 平均反馈用户数低于 5, 减少的反馈量达到了 95%以上, 这为反馈信道节省了可观的资源。反馈中断概率为 0.05 时的平均反馈用户数比为 0.1 时的多, 进一步验证了图 3 的结论。

由业务速率计算可得用户的业务影响因子, 因此用户业务影响因子体现了用户的业务速率, 两者趋势一致。图 5 分析了用户业务影响因子与用户反馈子载波数的关系。假设用户数为 8, 图 5(b)为每个用户的业务影响因子, 用户 8 的业务影响因子最大且依次递减。图 5(a)中 NCTRF 用户的反馈子载波数基本为一条直线, 这表明每个用户反馈的子载波数相近, 即子载波反馈每一个用户的概率是相同的。CTRF 中由于用户 8 的业务速率最大, 其反馈的子载波数最多, 反之用户 1 的业务速率最低, 其反馈的子载波数最少。

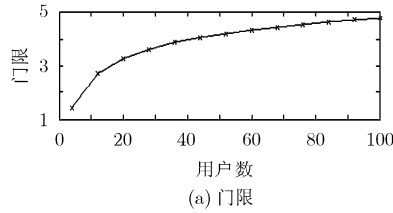
仿真中设中断概率为 0.1, 从图 6 中的仿真结果可以看出子载波速率减少基本为 10%, 与反馈中断概率相一致。另外, CTRF 与 NCTRF 的子载波平均速率相近, 与文中的性能分析一致。

(3)调度仿真 主要研究数据包长度对用户丢包率的影响。仿真的基本参数如表 1。此时用户数固定为 8, 数据包的长度由 800 bit 依次增加 50 bit 到 1200 bit。图 7 比较了 PF, TPF 和 TQPF 3 种调度算法的丢包率。仿真结果表明, 3 种调度算法的丢包率会随着数据包长度的增加而变大。PF 丢包率最大, TQPF 结合了用户业务, 信道状态信息和队列状态信息, 丢包率最小。图 8 表明了 TQPF 调度算法下, CTRF 对丢包率的影响。同样, 用户的丢包率随着数据包长度的增加而变大。显然, 两种反馈机制的丢包率都比全反馈的大, 这是反馈量减少带来的负面影响, 但相对于反馈量方面 90%以上的改进, 系统是可以接受的。CTRF 的丢包率低于 NCTRF 的丢包率, 因此, CTRF 可以更好的支持用户业务速率。

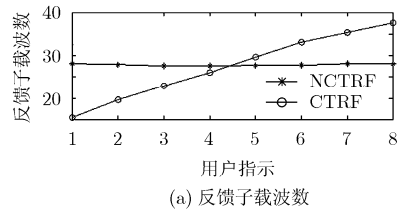
图 9 表明 TQPF 的不同反馈机制对用户传输速率的影响。仿真中的用户数为 8, 数据包的长度为 1000 bit。图 9(b)为用户的业务速率, 由于调度准则中结合了用户的业务速率, 从图 9(a)中可以看出, 用户的传输速率随着用户业务速率的增加而增加。显然, 两种反馈机制下的用户传输速率都低于全反馈时的传输速率, 而 NCTRF 中不同用户的传输速率基本相同, CTRF 中高业务速率用户的传输速率



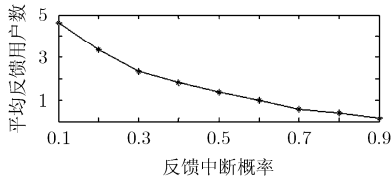
(a) 门限



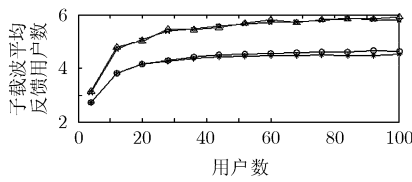
(a) 门限



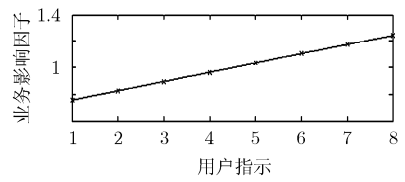
(a) 反馈子载波数



(b) 平均反馈用户数



(b) 子载波平均反馈用户数



(b) 用户业务影响因子

图 3 反馈中断概率与门限、反馈用户数的关系

图 4 用户数与门限、反馈用户数的关系

图 5 用户业务影响因子与用户反馈子载波数的关系

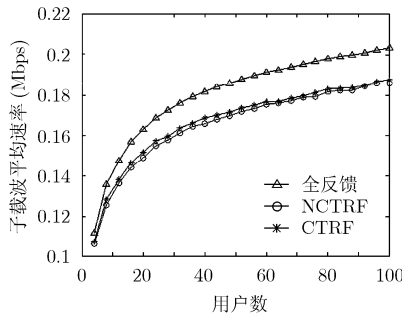


图 6 用户数与子载波平均速率的关系

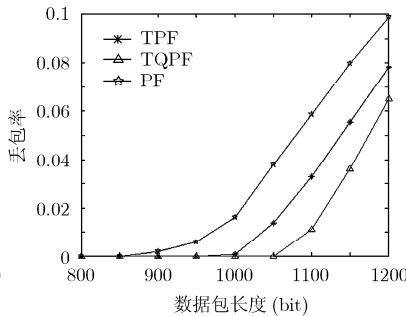


图 7 不同调度算法的丢包率与数据包的长度

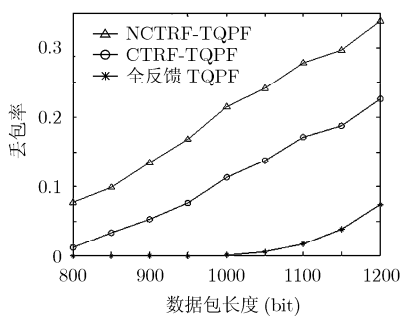
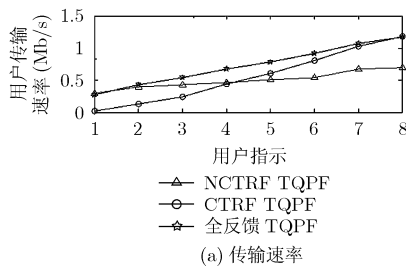
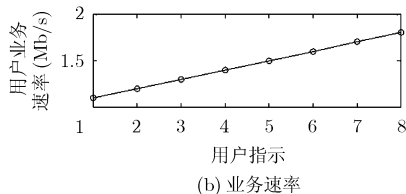


图 8 CTRF 对丢包率的影响



(a) 传输速率



(b) 业务速率

图 9 CTRF 对用户传输速率及业务速率的影响

明显高于低业务速率用户的传输速率。从图 5 和图 9 中可以看出，CTRF 中高业务速率用户可以反馈更多的子载波，从而在调度后可以获得更大的传输速率，这充分的体现了 CTRF 对不同用户业务速率的支持。

6 结论

针对 OFDM 中继系统中不同用户业务速率的场景，本文提出了一种支持用户业务速率的减少反馈调度算法。一方面，在调度准则中结合用户业务信息以支持不同的业务速率。另一方面，提出了一种基于不同业务速率的反馈机制，在决定是否反馈之前计算出用户的反馈效用函数值，然后与接收到的反馈门限进行比较。业务速率高的用户在相同条件下会反馈较多的子载波，从而获得更高的传输速率保障业务速率的不同。分析和仿真结果表明，本文提出的反馈调度在减少反馈的同时支持了用户业务速率的不同。

参考文献

[1] Salem M, Adinoyi A, and Rahman M. Fairness-aware radio resource management in downlink OFDMA cellular relay networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(5): 1628-1639.

[2] Lee Yao-nan, Chen Jung-chieh, Wang Yeong-cheng, et al. A novel distributed scheduling algorithm for downlink relay

- networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(6): 1985–1991.
- [3] Wang Wen-yi, Yan She-feng, and Yang Shu-yuan. Optimally joint subcarrier matching and power allocation in OFDM multihop system[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2008, Article ID 241378, 8 pages.
- [4] 唐志华. OFDM 系统资源分配和调度策略研究[M]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009: 93.
- [5] Chen Gang, Zhang Wen-qiang, and Zheng Xiang. A cross-layer resource allocation algorithm with finite queue for OFDMA system[C]. 2010 Second International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing, Wuhan, 2010, 4: 157–161.
- [6] 殷俊. LTE 系统跨层资源分配算法研究[M]. 南京: 南京邮电大学, 2009: 29–31.
- [7] Ng D W K and Schober R. Cross-layer scheduling OFDMA amplify-and-forward relay networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(3): 1443–1458.
- [8] Shirani-Mehr H, Liu D N, and Caire G. Channel state prediction, feedback and scheduling for a multiuser MIMO-OFDM downlink[C]. Proceedings of 42th Asilomar Conference on Signals, System, and Computers, Pacific Grove, Oct. 2008: 136–140.
- [9] Jang Yong-up, Shin Won-yong, and Lee Y H. Multiuser scheduling based on reduced feedback information in cooperative communications[C]. Vehicular Technology Conference, 2009, VTC Spring 2009, Barcelona: 2009, 4: 1–5.
- [10] Zhou Jian, Hua Xiao-ming, and Zheng Bao-yu. An improved selective feedback scheduling with a fixed relay[C]. Communications and Mobile Computing, 2009, CMC'09. Yunnan, 2010: 1–8.
- [11] Yang Rui-zhe, Yuan Chao-wei, Teng Ying-lei, *et al.* Feedback threshold with guaranteed QoS in multiuser OFDM systems[J]. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2009, 16(2): 24–28.
- [12] Park Seung-young. Performance of differentiated rate scheduling using contention-based CSI feedback[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(6): 3143–3148.
- 陈前斌: 男, 1967 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为下一代网络、个人通信、多媒体信息处理与传输。
- 蒋广健: 男, 1986 年生, 硕士生, 研究方向为中继系统资源调度。
- 唐 伦: 男, 1973 年生, 博士, 副教授, 研究方向为新一代无线通信系统资源管理、包括动态频谱分配、中继系统资源分配。