

一种基于 OFDMA 的无线多播比例公平调度方案

王斌^{*①②} 张艳凤^① 王文霏^①

^①(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)

^②(南京邮电大学宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室 南京 210003)

摘要: 为了在无线多播网络中提高系统吞吐量, 该文提出了一种新型的多播组间公平的无线资源分配方案。方案在保证公平分配无线资源的基础之上, 运用设置平均误块率门限的方法, 在系统的多用户分集增益和多播增益之间找到了最佳平衡, 从而提高了系统的吞吐量。理论和仿真分析表明, 与已有的传统多播方案相比, 该方案在保证误块率不超过用户忍受的最高限度时, 系统能够提供更高的吞吐量。该方案在实际应用中, 具有一定的可行性和可操作性。

关键词: 无线通信; 无线多播; 多播组间的比例公平; 吞吐量; 多用户分集

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)07-1672-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.01310

A Proportional Fair Scheduling Based on OFDMA for Wireless Multicast Service

Wang Bin^{①②} Zhang Yan-feng^① Wang Wen-nai^①

^①(College of Telecommunications & Information Engineering,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

^②(Key Lab of Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: In order to improve the throughput in wireless multicast scenario, a new type inter-group proportional fairness scheme with average block error rate threshold is proposed, which can not only guarantee fair radio resource allocation but also provide better balance between multi-user diversity and the multicast gain. Theoretical analysis and simulation show that the proposed scheme can effectively improve the wireless multicast system throughput subject to constraint on the average error block rate in comparison with the existing approaches.

Key words: Wireless communication; Wireless multicast; Inter-group proportional fairness scheme; Throughput; Multi-user diversity

1 引言

无线多播是一种将相同内容同时传输到多个终端的方法, 能够有效地节约无线资源的使用, 但是它的资源分配机制相对单播资源分配更加复杂, 原因是: 在一个时隙内, 基站只能为多播组内的用户分配同一种速率, 如果多播组的速率按照组内信道状况最好的用户进行分配, 组内其它用户将不能正确收到基站发送来的分组; 如果多播组的速率按照

组内信道状况最差的用户进行分配, 组内所有用户虽然能够正确收到基站发送来的分组, 但是系统的吞吐量将大大降低, 如何为多播组选择恰当的速率是无线多播资源分配的关键。

目前, 很多研究^[1-7]已经对无线多播领域的资源分配展开了研究, 文献[1-3]主要从多用户分集增益的角度来优化传统的多播传输, 基本思想是将多播组内的用户按信道质量的好坏进一步分成多个子组, 不同子组根据各自最差用户的信道质量来分别接受多播数据包, 这类方案在保证多播增益的同时也兼顾了多用户分集的效果, 缺点是多播分组传输到各个子组是不同步的, 增加了传输时延。文献[4-7]在多播资源分配中引入了资源分配的公平性要求, 比例公平(proportional fairness)方案^[8]能够在用户的公平性和系统的最大吞吐量之间取得折中, 已经

2011-12-09 收到, 2012-03-01 改回

国家科技重大专项(2011ZX03005-004-03), 江苏省高校自然科学基金基础研究重大项目(10KJA510037), 南京邮电大学引进人才项目(NY209002), 南京邮电大学宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室开放研究基金(NYKL201108)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(信息与通信工程)资助课题

*通信作者: 王斌 wangbin7062@sohu.com

成为工业界的基础方法，文献[4]为了解决无线多播传输中公平性的问题，提出了 IPF(Inter-group Proportional Fairness) 和 MPF(Multicast Proportional Fairness)两类调度方案，分别解决了多播组间和多播组内用户服务的公平性问题。文献[9–11]是研究基于分层编码的 IPTV 多播方案，主要目的是解决 IPTV 分组的基层和增强层之间在多播环境下的协调传输的问题。

本文将在文献[4]的研究基础之上展开工作，主要贡献如下：(1)通过理论推导，将 IPF 的资源分配方案扩展到 OFDM 系统，提出了 GOIPF(General Inter-group Proportional Fairness Scheduling for OFDM System)。(2)运用平均误块率的思想提出了基于 GOIPF 的 LIPF(Inter-group Proportional Fairness Scheduling for LTE Cellular Networks)方案，提高了多用户分集增益，改善了系统的整体吞吐量。(3)运用系统级仿真在 LTE 系统中对 LIPF 方案展开性能评估。

2 基于 OFDM 的 GOIPF 资源分配方案

2.1 系统模型和相关定义

假定系统中有一个基站，并且它的扇区内有多个多播组，每个多播组接收不同的多播流。基站根据移动用户的信道质量指示符(Channel Quality Indicator, CQI)反馈确定多播流的传输速率，系统内的相关参数定义如下： G 为系统内多播组的数目。 W_g 为表示第 g 多播组内用户的数目。 $r_{im}^g(t)$ 为表示在 t 时隙，第 g 多播组的用户 i 在资源块(Resource Block, RB) m 上能够获得的最大速率。 $r_{gm}(t)$ 为表示在 t 时隙，基站对第 g 多播组在资源块 m 上实际发送的速率。 $R_{gm}(t)$ 为表示在 t 时隙，第 g 多播组的所有用户在资源块 m 上能够获得的速率的总和。 $I_{gim}^S(t)$ 为当调度器 S 在资源块 m 上选取多播组 g 服务且用户 i 满足 $r_{im}^g(t) \geq r_{gm}(t)$ ，则 $I_{gim}^S(t) = 1$ ，其它情况时， $I_{gim}^S(t) = 0$ 。 $R_{gi}(t+1)$ 为表示到 $t+1$ 时隙为止，第 g 组的用户 i 获得的平均速率，具体为

$$R_{gi}(t+1) = (1 - 1/T)R_{gi}(t) + (1/T) \cdot \sum_{m=1}^{N_{RB}} r_{gm}(t+1)I_{gim}^S(t+1) \quad (1)$$

其中 N_{RB} 是用户系统的资源块的总数。

$R_g(t+1)$ 为表示到 $t+1$ 时隙为止，第 g 组的所有用户 i 获得的平均速率之和，即

$$R_g(t) = \sum_{i=1}^{W_g} R_{gi}(t) \quad (2)$$

其中 W_g 为第 g 多播组内的用户数。

2.2 GOIPF 资源调度方案的理论基础

根据文献[8]中给出的比例公平调度方案的阐述，IPF 的定义可以描述如下：

定义 1 如果调度器 S 是 IPF 调度方案，那么对于任意调度器 P 而言，满足

$$\sum_{g=1}^G (R_g^P - R_g^S) / R_g^S \leq 0, \quad \text{其中} \\ R_g^S = \lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^{W_g} R_{gi}(t)$$

由文献[8]可知，IPF 的调度问题可以表达为

$$\max \left\{ \lim_{t \rightarrow \infty} f(R(t)) \right\} \quad (3)$$

式(3)中的 $f(R(t))$ 为

$$f(R(t)) = \sum_{g=1}^G \ln(R_g(t)) = \sum_{g=1}^G \ln \left(\sum_{i=1}^{W_g} R_{gi}(t) \right) \quad (4)$$

其中 $\ln(\cdot)$ 为以 e 为底的对数函数。

为了获得 IPF 在 OFDMA 系统中的在线调度方法，本文用式(4)的变化量来解决式(3)的问题，即

$$f(R(t)) - f(R(t-1)) = \sum_{g=1}^G (\ln(R_g(t)) - \ln(R_g(t-1))) \quad (5)$$

在较大时间窗口范围内，由于多播组的平均吞吐量在一次调度时间范围内的变化量是非常小的，所以在 $x_0 = R_g(t-1)$ 处，运用泰勒公式对 $\ln(R_g(t))$ 进行展开，可以得到 $\ln(R_g(t)) \approx \ln(R_g(t-1)) + (R_g(t) - R_g(t-1)) / R_g(t-1)$ ，进而可以得到

$$f(R(t)) - f(R(t-1)) \\ \approx \sum_{g=1}^G (R_g(t) - R_g(t-1)) / R_g(t-1) \\ = \sum_{g=1}^G (1 / R_g(t-1)) \sum_{i=1}^{W_g} (R_{gi}(t) - R_{gi}(t-1)) \quad (6)$$

而

$$R_{gi}(t) = (1/t) \sum_{\tau=1}^t \sum_{m=1}^{N_{RB}} r_{gm}(\tau) I_{gim}(\tau) \\ = (1/t) \left(\sum_{\tau=1}^{t-1} \sum_{m=1}^{N_{RB}} r_{gm}(\tau) I_{gim}(\tau) \right) \\ + (1/t) \sum_{m=1}^{N_{RB}} r_{gm}(t) I_{gim}(t) = (1/t)((t-1) \\ \cdot R_{gi}(t-1)) + (1/t) \sum_{m=1}^{N_{RB}} r_{gm}(t) I_{gim}(t)$$

因而有

$$R_{gi}(t) - R_{gi}(t-1) \\ = (1/t) \left(-R_{gi}(t-1) + \sum_{m=1}^{N_{RB}} r_{gm}(t) I_{gim}(t) \right) \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)可得

$$\begin{aligned}
 & f(R(t)) - f(R(t-1)) \\
 & \approx \sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^{W_g} \left(\frac{-R_{gi}(t-1) + \sum_{m=1}^{N_{RB}} r_{gm}(t) I_{gim}(t)}{tR_g(t)} \right) \\
 & = \sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^{W_g} \left(\frac{\sum_{m=1}^{N_{RB}} r_{gm}(t) I_{gim}(t)}{tR_g(t-1)} \right) \\
 & \quad - \sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^{W_g} \left(\frac{R_g(t-1)}{tR_g(t-1)} \right) \\
 & = \sum_{g=1}^G \left(\frac{\sum_{m=1}^{N_{RB}} r_{gm}(t) \sum_{i=1}^{W_g} I_{gim}(t)}{tR_g(t-1)} \right) - (GW_g/t) \\
 & = \sum_{g=1}^G \sum_{m=1}^{N_{RB}} \left(\frac{R_{gm}(t)}{tR_g(t-1)} \right) - (GW_g/t) \tag{8}
 \end{aligned}$$

由式(8)可知,式(3)的费用最大化问题可转化为调度器 S 在每个时隙内满足:

$$\max \left(\sum_{m=1}^{N_{RB}} \sum_{g=1}^G \left(\frac{R_{gm}(t)}{R_g(t-1)} \right) \right) \tag{9}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{g=1}^G I_{gm}(t) = 1 \tag{10}$$

$I_{gm}(t)$ 的含义是: 在时隙 t , 资源块 m 是否选取多播组 g 进行服务, 若选取则 $I_{gm}(t) = 1$, 否则 $I_{gm}(t) = 0$ 。式(10)说明了在一个时隙内一个资源块只能为一个多播组服务。

2.3 GOIPF 资源调度算法描述

根据式(9)和式(10), 可以得到基于 OFDM 的 IPF 通用算法, 算法的特点是以 2 维矩阵来描述资源分配的过程(如图 1 所示), 矩阵的行和列分别代表多播组标号和资源块号, 矩阵中的元素表示多播组选取对应的资源块的权重值, 算法的目标是保证在调度完成时, 所有多播组选取对应的资源块的权重值的总和最大。

描述算法之前, 先给出两个假设条件, 即:

	RB ₁	RB ₂	...	RB _N
g_1	P_{11}	P_{12}	...	P_{1N}
g_2	P_{21}	P_{22}	...	P_{2N}
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots
g_G	P_{G1}	P_{G2}	...	P_{GN}

图 1 多播组在 RB 上的权重值

(1)NodeB(基站)在每个传输时间间隔(Transmission Time Interval, TTI) 都能获得用户设备 (User Equipment, UE) 的 CQI 反馈, 信道质量报告的详细程度涵盖系统的所有频段。(2)UE 收到传输块后, 都必须发送 ACK 或 NACK 反馈消息, ACK 消息表示传输块发送成功, NACK 消息表示发送失败。算法的描述具体如下:

步骤 1 如图 2 所示, 根据 CQI 反馈计算每个多播组 g 内的 UE _{gi} 在各个资源块 m 上所能获得的最大传输速率 $r_{im}^g(t)$ 。

	RB ₁	RB ₂	...	RB _N
UE ₁₁	r_{11}^1	r_{12}^1	...	r_{1N}^1
UE ₁₂	r_{21}^1	r_{22}^1	...	r_{2N}^1
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots
UE _{G1}	r_{11}^G	r_{12}^G	...	r_{1N}^G
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots
UE _{Gk}	r_{k1}^G	r_{k2}^G	...	r_{kN}^G

图 2 UE 在 RB 上的传输速率

步骤 2 根据步骤 1 的结果和相应的准则 X , 计算多播组 g 在资源块 m 上发送的实际速率 $r_{gm}(t)$ 。根据 $r_{gm}(t)$ 计算出多播组 g 的所有用户在资源块 m 上能够获得的速率总和 $R_{gm}(t)$, 并由 $R_{gm}(t)/R_g(t-1)$ 形成图 1 中 2 维矩阵表中的权重值。

步骤 3 在图 1 所示的 2 维矩阵表中寻找多播组和 RB 对应的最大权重值。

步骤 4 将所述的最大权重值对应的 RB 分配给对应的多播组。

步骤 5 删除所述的最大权重值对应的行(多播组)和列(RBs)。

步骤 6 对剩下的子矩阵重复步骤 3 到步骤 5 的过程, 直到所有的 RB 都被分配完毕。

步骤 7 根据式(1)和式(2)分别更新 UE 和多播组的平均速率。

3 基于 OFDM 的 LIPF 资源分配方案

3.1 GOIPF 资源调度算法的组速率的选择准则

2.3 节给出了基于 OFDM 的 IPF 通用算法, 但是没有给出多播组 g 在资源块 m 上如何选择实际发送的速率 $r_{gm}(t)$ 。对于不同的 $r_{gm}(t)$ 的选取准则, 多播组 g 内的多用户分集的增益是截然不同的, 下面先讨论 3 类 $r_{gm}(t)$ 的选取准则:

准则 1 最小选取准则, 即: MIN 准则。在 MIN 准则中, $r_{gm}(t)$ 的选取规则如下:

$$r_{gm}(t) = \min_i r_{im}^g(t) \quad (11)$$

那么 $R_{gm}(t) = \sum_{i=1}^{W_g} r_{gm}(t)$ 。

MIN 准则的缺陷是: 多播组的速率按照组内信道状况最差的用户进行分配, 组内所有用户虽然都能够正确收到基站发送来的分组, 但是系统的吞吐量将大大降低。

准则 2 最大选取准则, 即: MAX 准则。其主要思想是多播组的速率选择不受差用户的限制, 在 MAX 准则中, $r_{gm}(t)$ 的选取规则如下:

$$r_{gm}(t) = \arg(\max R_{gm}(r_{gm}(t))) \quad (12)$$

其中 $R_{gm}(t) = \sum_{i=1}^{W_g} r_{gm}(t) I(r_{im}^g(t) > r_{gm}(t))$ 。

MAX 准则的缺陷是: 没有考虑用户的丢包情况, 这种算法是以牺牲用户的满意度为代价来提高系统容量的方法。

准则 3 LIPF 的平均误块率准则

LIPF 平均误块率准则的核心思想是: 在满足组内用户的误块率不超过门限值的情况下, 选取的 $r_{gm}(t)$ 使得 $R_{gm}(t)$ 最大, 即

$$r_{gm}(t) = \arg(\max R_{gm}(r_{gm}(t))) \quad (13)$$

情况 1: 当 $\overline{\text{BER}}_{gi} > \theta$ 时, 多播组速率的选择必须保证用户 UE_{gi} 正确收到数据。

情况 2: 当 $\overline{\text{BER}}_{gi} \leq \theta$ 时, 多播组速率的选取可以不保证用户 UE_{gi} 正确收到数据。其中 θ 表示用户忍受的误块率的上限值, $\overline{\text{BER}}_{gi}$ 表示多播组 g 的用户 i 的平均误块率, 它是由基站根据收到的 ACK_{gi} 和 NACK_{gi} 数目推算出来的, 即

$$\overline{\text{BER}}_{gi}(t) = \frac{\sum_{\tau=1}^t \text{NUM}(\text{NACK}_{gi})}{\sum_{\tau=1}^t \text{NUM}(\text{NACK}_{gi}) + \sum_{\tau=1}^t \text{NUM}(\text{ACK}_{gi})} \quad (14)$$

其中 $\text{NUM}(\ast)$ 函数表示统计自变量的个数。

LIPF 平均误块率准则在确保用户满意度的条件下, 增强了多播组的多用户分集的效果, 提升了系统的整体吞吐量。

3.2 基于 OFDM 的 LIPF 资源分配方案

基于 2.3 节和 3.2 节的分析, 在每一个 TTI 内, LIPF 方案的资源分配过程可以描述为:

步骤 1 如图 2 所示, 根据 CQI 反馈计算每个多播组 g 内的 UE_{gi} 在各个资源块 m 上所能获得的最大传输速率 $r_{im}^g(t)$ 。

步骤 2 根据式(14)计算 UE 的平均误块率, 然

后与用户忍受的误块率的上限值 θ 进行比较, 形成图 3 的矩阵表。在图 3 中, “1” 表示对应 UE 的平均误块率低于 θ 值, “0” 表示对应 UE 的平均误块率高于 θ 值, “-” 表示对应的 UE 不在行所指示的多播组内。

	UE_{11}	UE_{12}	...	UE_{1K}	...	UE_{G1}	UE_{G2}	...	UE_{GK}
g_1	1	0	...	1	...	-	-	...	-
g_2	-	-	...	-	...	-	-	...	-
...									
g_G	-	-	...	-	...	0	1	...	1

图 3 用户的平均误块率与门限值比较的状况

步骤 3 根据图 3、步骤 1 和式(13)的结果, 计算多播组 g 在资源块 m 上发送的实际速率 $r_{gm}(t)$, 它的计算过程如下所示:

(1) 根据图 2 给出的 $r_{im}^g(t)$ 的值, 将多播组 g 内的 K 个用户在资源块 m 上可能获得的最大速率由小到大进行排序, 得到的序列为: $\underbrace{r_{6m}^g(t), r_{1m}^g(t), \dots, r_{xm}^g(t)}_{r_{gm}(t) \text{ 选择的范围}}, r_{3m}^g(t), \dots, r_{zm}^g(t)$, 其中, $r_{xm}^g(t)$

对应的用户 UE_{gx} 是序列中第 1 个 BER 值高于 θ 的用户, 构造集合 Ω 包含序列中满足 $r_{im}^g(t) < r_{xm}^g(t)$ 的所有速率。

(2) 在集合 Ω 中选取 $r_{ym}^g(t)$ 使得 $r_{gm}(t) = r_{ym}^g(t) = \arg(\max_{i \in \Omega} R_{gm}(r_{im}^g(t)))$, 此时, $R_{gm}(t) = \sum_{i=1}^{W_g} r_{ym}^g(t) I(r_{im}^g(t) > r_{ym}^g(t))$ 。

步骤 4 根据计算得到的 $R_{gm}(t)$, 进一步计算权重值 $R_{gm}(t)/R_g(t-1)$, 形成图 1 所示的 2 维矩阵表。

步骤 5 在图 1 所示的 2 维矩阵表中寻找多播组和 RB 对应的最大的权重值。

步骤 6 将所述的最大权重值对应的 RB 分配给对应的多播组。

步骤 7 删除所述的最大权重值对应的行(多播组)和列(RBs)。

步骤 8 对剩下的子矩阵重复步骤 5 到步骤 7 的过程, 直到所有的 RB 都被分配完毕。

步骤 9 根据式(1)和式(2)分别更新 UE 和多播组的平均速率。

4 LIPF 资源分配的仿真分析

4.1 系统级仿真概述

系统仿真采用 19 个小区, 各个小区有 3 个扇区, 每个扇区内的用户数为 30, 仿真时长选取为 100 s

(即: 100000TTI), 仿真的具体参数如表 1 所示。

在系统级仿真中, 为了获得用户在资源块上的传输速率, 首先要计算用户在每个子载波上的信噪比, 子载波的信噪比为

$$\text{SINR} = (P_{tx} |h_0|^2) / \left(\sigma^2 + \sum_{l=1}^{\text{int}} P_{tx}^l |h_l|^2 \right) \quad (15)$$

式(15)中 $P_{tx} |h_0|^2$ 是用户在所述子载波上接收到的有用信号的功率, $\sum_{l=1}^{\text{int}} P_{tx}^l |h_l|^2$ 为用户在该子载波上接收到其它基站发射的干扰信号的总功率。

由于系统级仿真中的无线资源分配的最小单元是资源块(RB), 因此需要将子载波上的信噪比映射成为资源块上的等效信噪比。EESM 方法可以将多个 OFDM 子载波上的 SINR 通过指数形式映射成资源块的等效的 SINR。假设在 1 个调度周期内, 系统为某个用户分配了 N 个 OFDM 子载波, N 个子载波上的 SINR 值分别为 $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_k$, 则等效 SINR 为 $\gamma_{\text{eff}} = -\beta \ln \left((1/N) \sum_{k=1}^N e^{-(\gamma_k)/\beta} \right)$, 其中 β 为尺度因子。

表 1 仿真参数的设置

仿真参数名称	参数内容
仿真时长	100 s, 即: 100000 TTI
载波频率和带宽	中心频率 2.0 GHz, 带宽 5 MHz, 25 个 RB
热噪声密度	-174 dBm/Hz
接收机噪声值	9 dB
BS 天线增益	15 dBi
小区结构	19 个小区, 每个小区 3 个扇区
路损模型	$L=128.1+37.6\lg(d)$, d 是基站和 UE 之间的距离, 单位是 km
阴影衰落模型	对数正态分布, 方差为 10 dB
扇区中 UE 数目	每个扇区中 UE 数目为 30
UE 的运动速度	18.87 km/h
基站间的距离	500 m
基站的发射功率	43 dBm
有效信噪比算法	EESM 模型
调度算法	MIN-IPF, MAX-IPF, LIPF

在得到资源块上的等效信噪比 γ_{eff} 之后, 就可以通过 γ_{eff} 来估算资源块上传输的比特数。表 2 是在瞬时误块率为 10% 情况下得到的数据^[12], 如果用 γ_{eff} 对表 2 进行查询, 可以得到相应的 CQI 值和编码效率, 例如: 当 $\gamma_{\text{eff}} = 5.238$ dB 时, 由表 2 可以查到 CQI 的序号是 7, 编码效率是 4.697。通过子载波上的编码效率可以最终获得资源块上能够传输的比特数。

表 2 仿真参数的设置

CQI	调制方式	码速 $\times 1024$	编码效率	Min γ_{eff} (dB)
1	QPSK	78	0.1523	-6.934
2	QPSK	120	0.2344	-5.147
3	QPSK	193	0.3770	-3.180
4	QPSK	308	0.6016	-1.254
5	QPSK	449	0.8770	0.761
6	QPSK	602	1.1758	2.700
7	16QAM	378	1.4766	4.697
8	16QAM	490	1.9141	6.528
9	16QAM	616	2.4063	8.576
10	64QAM	466	2.7305	10.370
11	64QAM	567	3.3223	12.300
12	64QAM	666	3.9023	14.180
13	64QAM	772	4.5234	15.890
14	64QAM	873	5.1152	17.820
15	64QAM	948	5.5547	19.830

4.2 算法性能验证

本节从仿真的角度来验证 LIPF 方案的性能, 对比的方案有 MIN-IPF 和 MAX-IPF 方案, 每个扇区中的用户总数是 30, 扇区内的多播组数和多播组内包含用户数的关系为: (1,30), (2,15), (3,10), (5,6), (6,5), (10,3), (30,1)。仿真从系统的平均吞吐量和用户的平均误块率两方面来验证。在仿真中, 用户平均误块率的门限设置为 10%, 即, 当用户的误块率低于 10%, 基站此次发送的传输块可以不保证该用户正确收到, 否则必须保证所述的用户正确收到该传输块。

由图 4 可以看出, 就系统吞吐量指标而言, MIN-IPF 的性能最差, MAX-IPF 性能最好, LIPF 方案介于 MIN-IPF 和 MAX-IPF 之间, 原因是 LIPF 算法的多用户分集效果比 MAX-IPF 差, 但是却好于 MIN-IPF, 即: 在 MIN-IPF 中, 为了确保多播组内的用户都正确接收到数据, 多播组在一个资源块上选择的速率只能是组内最差用户的速率, 选择的范围最小。在 MAX-IPF 中, 由于不必关心多播组内的所有用户都正确收到数据, 多播组在一个资源块上的速率选择可以是组内任意用户在该资源块上的速率, 选择的范围最大。而在 LIPF 算法中, 多播组在资源块上的速率选择需要满足用户平均误块率的要求, 因此速率选择的范围小于 MAX-IPF 而多于 MIN-IPF。MAX-IPF 虽然吞吐量最高, 并且多用户分集效果最好, 但是, 这是以牺牲用户满意度(平均误块率)为代价的。LIPF 方案兼顾了用户满意

度和多用户分集两方面的性能,吞吐量比 MAX-IPF 略差,但远好于 MIN-IPF。

另外,当 MIN-IPF, MAX-IPF 和 LIPF 方案在扇区内多播组数为 30 时,系统的吞吐量趋于一致(435.79 kbps),原因是扇区内的多播通信退化为单播通信(所有多播组内都只有 1 个用户)。

图 5 是 3 种方案的用户平均误块率的比较,MIN-IPF 的平均误块率最小,原因是调度器必须满足多播组内最差用户的瞬时误块率不能超过 10%(表 2 数据获取的条件),因此多播组内大多数用户的平均误块率远远小于 10%,但这是以牺牲多用户分集增益为代价的。相反,MAX-IPF 只关心系统吞吐量,这必然造成组内多数用户的平均误块率过大,因此它的平均误块率最大,远远超过 10%,用户的满意度最差。LIPF 方案在调度的时候由于主动控制了用户

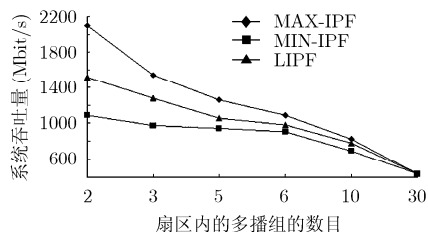


图 4 MIN-IPF, MAX-IPF 和 LIPF 的系统吞吐量比较

的平均误块率,保证平均误块率始终在用户忍受的范围之内,因此它的用户平均误块率介于 MIN-IPF 和 MAX-IPF 之间。

5 结论

本文首先从理论上推导出无线多播资源分配的在线方案——GOIPF,将传统的 IPF 方案引入基于 OFDM 的蜂窝移动通信系统,然后运用平均误块率的概念提出了 LIPF 无线多播资源分配方案。系统级仿真分析表明,LIPF 方案克服了 MIN-IPF 和 MAX-IPF 的缺点,在保证用户平均误块率的基础上,找到了多用户分集和多播增益之间的平衡点,解决了多用户分集和多播增益之间的矛盾,提高了系统吞吐量。因此,LIPF 方案有一定的可行性和可操作性,具有良好的实际应用前景。

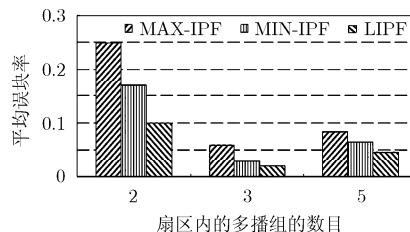


图 5 MIN-IPF, MAX-IPF 和 LIPF 用户平均误块率的比较

参考文献

- [1] Jung-Tsung T and Cruz R L. Opportunistic multicast scheduling for information streaming in cellular networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(6): 1776-1785.
- [2] Li Ming-ming, Wang Xiao-xiang, Zhang Hong-tao, et al. Resource allocation with subcarrier cooperation in OFDM-based wireless multicast system. Proceedings of IEEE 73th Vehicular Technology Conference (VTC 2011), Budapest, Hungary, May 2011: 1-5.
- [3] Chaporkar P, Proutiere A, and Asnani H. Learning to optimally exploit multi-channel diversity in wireless systems. Proceedings of 29th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2010), San Diego, USA, May 2010: 1-9.
- [4] Won H, Cai H, Eun D Y, et al. Multicast scheduling in cellular data networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(9): 4540-4549.
- [5] Koh C and Kim Y Y. A proportional fair scheduling for multicast services in wireless cellular networks. Proceedings of IEEE 64th Vehicular Technology Conference (VTC 2006), Montreal, Canada, Sept. 2006: 1-5.
- [6] Liu Wei, Zhu Ling-chen, Wang Xin-bing, et al. Opportunistic multicast scheduling with resource fairness constraints in cellular networks. Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC 2011), Kyoto, Japan, June 2011: 9-15.

- [7] Low T P, Pun M O, and Peter-Hong Y W. Optimized opportunistic multicast scheduling (OMS) over wireless cellular networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(2): 791-801.
- [8] Kim H and Han Y. A proportional fair scheduling for multicarrier transmission systems. *IEEE Communication Letters*, 2005, 9(3): 210-212.
- [9] Huang Chih-Wei, Huang Shiang-Ming, Wu Po-Han, et al. OLM: opportunistic layered multicasting for scalable IPTV over mobile WiMAX. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2011, 11(3): 453-463.
- [10] Kuo Wen-Hsing, Liao Wan-jiun, and Liu Te-huang. Adaptive resource allocation for layer-encoded IPTV multicasting in IEEE 802.16 WiMAX wireless networks. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2011, 13(1): 116-124.
- [11] Wu P H and Hu Y H. Optimal layered video IPTV multicast streaming over mobile WiMAX systems. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2011, 13(6): 1395-1403.
- [12] Technical Specification Group RAN, "E-UTRA; physical layer procedures," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Tech. Rep. TS 36.213, Sept. 2011.

王 斌: 男, 1970 年生, 副教授, 研究方向包含低轨道卫星通信、LTE 移动通信、电信级以太网保护和高性能交换等。

张艳凤: 女, 1986 年生, 硕士生, 研究方向为无线多播通信和网络编码。

王文鼎: 男, 1966 年生, 教授, 目前研究方向为通信网与泛在融合技术。