



基于有限反馈的协作多播高效资源分配策略

陈雷

(中国刑事警察学院, 辽宁 沈阳 110035)

摘要: 提出了协作多播网络中基于有限反馈的联合子载波和功率分配策略, 在满足 QoS 需求的条件下使功率消耗最小化。该策略首先利用有限的反馈信息在等速率分配下将子载波分给不同的多播组, 并提出“公平子载波分配”策略, 达到了功率消耗和公平性的折中。然后利用提出的“协作功率迭代”策略完成有效的功率分配, 该策略利用注水定理确定每个子载波的目标速率后, 又通过一个功率迭代过程实现功率最佳化。仿真结果显示, 新的协作策略大大降低了上行反馈开销, 且所需功率和多播业务中断概率远远小于直传策略。此外, 协作功率迭代策略由于有较低的计算复杂度, 因此更适合于实际系统。

关键词: 多播; 协作分集; 资源分配; 有限反馈

中图分类号: TN929.53

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017252

A cooperative multicast efficient resource allocation scheme based on limited feedback

CHEN Lei

Criminal Investigation Police University of China, Shenyang 110035, China

Abstract: A joint subcarrier and power allocation scheme based on limited feedback for cooperative multicast network was proposed to minimize the consumed power under constrain of QoS requirement. The new scheme worked in two steps. Firstly, subcarriers were distributed to different multicast groups with equal rate assumption according to limited feedback information, where fair subcarrier allocation scheme was used to achieve a tradeoff between power and fairness. Then, a cooperative power iterative scheme was adopted to allocate power effectively, where target rate on each subcarrier was computed by water-filling algorithm in the first place and then a power iterate process was implemented to optimize power allocation. Simulation and comparison results show that the new scheme significantly reduces uplink feedback overhead and the required power and the multicast service outage of cooperative scheme is much less than those of the direct scheme. Besides, cooperative power iterative scheme has lower computational complexity and therefore is suitable for practical system.

Key words: multicast, cooperative diversity, resource allocation, limited feedback

收稿日期: 2017-06-21; 修回日期: 2017-08-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61172058); 辽宁省科技厅博士科研启动基金资助项目 (No.201601083); 辽宁省教育科学“十三五”规划 2017 年度基金资助项目 (No.JG17DB537)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61172058), The Scientific Research Foundation for Doctor, Science and Technology Department of Liaoning Province (No.201601083), The Education Science “13th Five-Year” 2017 Project Planning of Liaoning Province (No.JG17DB537)



1 引言

由 IEEE 802.16e 提出的多播广播业务(multicast and broadcast service, MBS)^[1]和由 3GPP 组织提出的多媒体广播多播业务(multimedia broadcast multicast service, MBMS)^[2],能高效地利用有限的无线资源,发送相同数据给大量的用户,因此,引起了学术界和产业界的广泛关注。然而,MBMS 研究多集中在非协作的直传模式下^[3-6]。例如:在参考文献[3]中,在一个多播组中提出了使用多描述编码将发送端数据分为多层,在接收端根据不同信道条件,恢复不同质量的数据,因此可以充分利用信道条件的差异,但是该策略没有考虑不同用户的不同 QoS 需求。针对该问题,在参考文献[4]中,对一个多播组内的用户,采用分层编码的机会多播策略,满足不同用户的不同 QoS 需求,并提出了新颖的子载波和比特分配策略,最大化整个多播组的吞吐量,但是该策略是在用户信道信息完全已知的情况下进行的。在参考文献[5]中,将研究扩展到多个多播组,使用信源信道联合编码的策略提高系统容量,并且采用有限反馈策略减少上行反馈负载。在参考文献[6]中,采用有限反馈策略,并且将多天技术引入多播传输中来提高系统性能。

由于 5G 多播传输网络需要更高的传输速率,但在现有直传模式下,由于没有利用协作分集提供的潜在增益,因此其传输速率很难满足 5G 的需求。最近,协作通信由于能够获得很高的传输速率和扩展覆盖范围,而被引入无线多播网络中。目前,关于协作多播的研究场景分为多小区(单频网)^[7,8]和单小区^[9,10]两类。参考文献[7]在单频网系统中提出了基于迭代注水定理的功率分配策略,但是该策略假设所有用户的信道信息在资源分配中是完全可用的,就需要大量的上行反馈资源,这对于实际系统来说是难以实现的。为了减少上行反馈负载,参考文献[11]在单频网系统中提

出了一种用户连接控制策略,在该策略中用户选择部分基站反馈信道信息,因此减少了上行反馈负载。参考文献[8]将参考文献[11]的应用扩展到单频网多天线多播系统中,该策略将多天线技术引入,采用多小区公共正交空时码和各小区码重用的方法,并且为了减少上行反馈,采用反馈门限的策略,只有用户的信道增益在设定的信道增益反馈区间内时,才进行上行反馈。参考文献[9]在假设所有用户都反馈其瞬时信道信息的情况下,研究了单小区内协作多播传输的动态资源分配问题。参考文献[10]对单小区的协作多播资源分配策略进行了总结,但是这些策略都需要全部用户反馈其信道信息。可知,单小区协作多播的文章,大都假设所有用户的全部瞬时信道信息是已知的,但在实际系统中,当用户数很多时,就需要用户反馈大量的信道信息,这对于实际的多播系统来说是不现实的。

为了减少多播用户的上行反馈负载和提高系统容量扩展多播覆盖范围,针对参考文献[9,10]的缺点,本文提出了一种在单小区固定中继协作架构下,基于有限反馈的协作多播资源分配策略,根据预先设定的反馈门限值,确定需要反馈信息的用户,并依照这些信息,进行联合的子载波与功率分配。新的协作多播资源分配策略大大降低了上行反馈的开销,提高了多播系统的性能^[12]。

2 系统模型与问题描述

如图 1 所示,基站和中继之间的信道信息是已知的。由于距离基站近的用户信道信息一般较好,并且,多播传输的速率是由多播组中最差用户的信道质量所决定的,因此,通常能够决定多播传输速率的用户,一般距离基站较远,所以,设定当用户位于反馈区域内,即它到基站的距离大于反馈门限值 L 时,该用户反馈其瞬时信道信息,否则不反馈。系统采用如下的传输协议:系统采用 2 跳协作传输:第一跳,基站发送多播数

据, 中继和用户接收; 第二跳, 每个中继利用相同的资源将接收的多播数据传递给多播用户。若基站没有收到用户反馈信息, 系统将采用直传模式, 资源分配根据已知的中继信道信息实现。

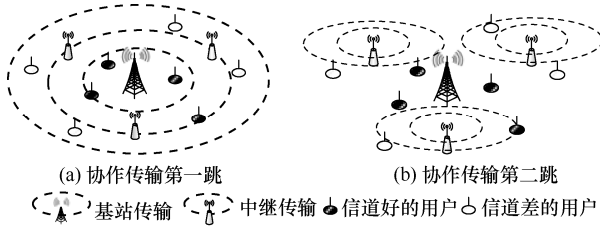


图1 两跳协作无线多播系统模型

假设 F 是固定中继的集合, K 是集合 F 的数量大小。 $P_{sg}(n)$ 、 $P_{kg}(n)$ 分别是基站和中继 k 分给子载波 n 的功率; $G_{sk}(n)$ 、 $G_{gm}(n)$ 和 $G_{gm}^k(n)$ 分别是基站到中继 k 、基站到多播组 g 内用户 m 、中继 k 到多播组 g 内用户 m 在子载波 n 上的信道增益值。

当多播组 g 采用协作传输时, 其组内用户 m 在第一跳和第二跳分别占用子载波 n 和 j 所能达到的速率可表示为:

$$R_{gm}(n, j) = \frac{1}{2} \begin{cases} \ln(1 + P_{sg}(n) \min_{k \in F} G_{sk}(n)) \\ \ln(1 + P_{sg}(n) G_{sk}(n) + \sum_{k=1}^K P_{kg}(j) G_{gm}^k(j)) \end{cases} \quad (1)$$

而多播组的传输速率是由信道条件最差的用户决定的, 因此, 多播组 g 占用子载波对 (n, j) 所达到的速率是:

$$R_g(n, j) = \min_{m \in G_g} R_{gm}(n, j) \quad (2)$$

则多播组 g 的总传输速率可表示为:

$$R_g = \sum_{j=1}^N \sum_{n=1}^N \rho_g(n, j) R_g(n, j) \quad (3)$$

其中, G_g 是多播组 g 的反馈用户的集合, M_g 是集合 G_g 的数量大小, N 是系统中可用的子载波个数。 $\rho_g(n, j)$ 表示协作链路 (n, j) 是否被多播组 g 占用。如果被占用, $\rho_g(n, j)=1$; 否则, $\rho_g(n, j)=0$ 。

同理, 组 g 采用直传模式时获得的总速率是:

$$R_g = \sum_{n=1}^N \rho_g(n) \min_{g \in G_g} \ln(1 + P_{sg}(n) G_{gm}(n)) = \sum_{n=1}^N \rho_g(n) R_g(n) \quad (4)$$

其中, $\rho_g(n)$ 表示组 g 是否占用子载波 n 。

为了简便, 引入一个通用的计算式, 将组 g 的总速率表示为:

$$R_g = \Delta_g \sum_{n=1}^N \rho_g R_g(n) + (1 - \Delta_g) \sum_{j=1}^N \sum_{n=1}^N \rho_g(n, j) R_g(n, j), \quad \Delta_g = \{0, 1\} \quad (5)$$

其中, Δ_g 表示组 g 的传输模式。当 $\Delta_g=0$ 时, 表示该组采用协作传输, 此时消耗的功率是:

$$P_g = \sum_{j=1}^N \sum_{n=1}^N \rho_g(n, j) (P_{sg}(n) + \sum_{k=1}^K P_{kg}(j)) \quad (6)$$

否则采用直接传输, 此时消耗的功率是:

$$P_g = \sum_{n=1}^N \rho_g(n) \bar{P}_{sg}(n) \quad (7)$$

其中, $\bar{P}_{sg}(n)$ 是组 g 在直传模式下, 为了满足最差用户的需求, 基站分配给子载波 n 的功率。那么该组消耗功率的通用表达式为:

$$P_g = \Delta_g \sum_{n=1}^N \rho_g \bar{P}_{sg}(n) + (1 - \Delta_g) \sum_{j=1}^N \sum_{n=1}^N \rho_g(n, j) (P_{sg}(n) + \sum_{k=1}^K P_{kg}(j)) \quad (8)$$

3 子载波、功率分配策略

本文的目的是在满足每个组的 QoS 需求条件下最小化系统所需的总功率。因此, 目标函数可表示为:

$$\min \sum_{g \in U} P_g \quad (9)$$

满足:

$$(C1) \Delta_g \sum_{n=1}^N \rho_g R_g(n) + (1 - \Delta_g) \sum_{j=1}^N \sum_{n=1}^N \rho_g(n, j) R_g(n, j) \geq R_{Tg}, \quad R_g(n) \geq 0, R_g(n, j) \geq 0, \quad \forall g \quad (10)$$

$$(C2) \sum_{g \in U} \sum_{n=1}^N \rho_g(n, j) \leq 1, \quad \forall j$$



$$\sum_{g \in U} \sum_{j=1}^N \rho_g(n, j) \leq 1, \quad \forall n \quad (11)$$

$$(C3) \sum_{g \in U} \rho_g(n) \leq 1, \quad \forall n \quad (12)$$

其中, U 是系统内所有多播组的集合, R_{Tg} 是组 g 的目标速率。C1 表示每个多播组都应达到的目标速率。C2 和 C3 表示在每一跳每个子载波至多被一个多播组占用。

3.1 公平子载波分配策略

通过上述分析可知, 为了得到最优化解, 需要子载波和功率进行联合分配, 但是解这个最优化问题有很高的计算复杂度。因此, 采用次优化方法进行求解, 首先在每个子载波有相等目标速率的条件下分配子载波, 然后再根据这个结果分配每个子载波的功率。

在子载波分配中如果采用协作传输, 为了简化, 首先假设给每个中继分配相同的功率 $P_g(j)$ 给予载波 j 发送多播数据。由式 (1) 可知, 组 g 占用协作链路(n, j)所需功率达到最小值时, 应满足:

$$\begin{aligned} & P_{sg}(n) \min_{k \in F} G_{sk}(n) \\ &= \min_{m \in G_g} (P_{sg}(n) G_{gm}(n) + P_g(j) \sum_{k \in F} G_{gm}^k(j)) \end{aligned} \quad (13)$$

因此, 该协作链路所需要的功率可表示为:

$$\begin{aligned} P_g(n, j) &= P_{sg}(n) + K \times P_g(j) \\ &= P_{sg}(n) \max_{m \in G_g} = \frac{\sum_{k \in F} G_{gm}^k(j) + K(\min_{k \in F} G_{sk}(n) - G_{gm}(n))}{\sum_{k \in F} G_{gm}^k(j)} \end{aligned} \quad (14)$$

假设 P_{req} 是系统可靠传输所需的接收功率, 则有:

$$P_{sg}(n) \min_{k \in F} G_{sk}(n) \geq P_{\text{req}} \quad (15)$$

$$P_g(n, j) G_g(n, j) \geq P_{\text{req}} \quad (16)$$

其中, $G_g(n, j)$ 是协作链路(n, j)的等效增益。因此 $G_g(n, j)$ 可以表示为:

$$\begin{aligned} G_g(n, j) &= \\ & \min_{m \in G_g} \frac{\sum_{k \in F} G_{gm}^k(j)}{K(\min_{k \in F} G_{sk}(n) - G_{gm}(n)) + \sum_{k \in F} G_{gm}^k(j)} \min_{k \in F} G_{sk}(n) \end{aligned} \quad (17)$$

在本文的子载波分配策略中, 由于每个多播组的 QoS 需求不同, 因此它们的服务优先级也不同, QoS 需求高的多播组优先级也高, 可分得较多的子载波。故该分配策略的目标函数可表示为:

$$\max \min_{g \in U} \frac{P_g}{R_{Tg}} \quad (18)$$

其分配步骤如下所示。

步骤 1 初始化: 协作模式下第一跳和第二跳空闲子载波的集合分别是 $T_1 = \{1, \dots, N\}$, $T_2 = \{1, \dots, N\}$; 直传模式下空闲子载波集合是 $T = \{1, \dots, N\}$ 。 Δ_g 是由是否有反馈信息决定的。 $P_g = 0$ 。

步骤 2 在 $g=1, \dots, G$ 中: 若 $\Delta_g=1$, 找到子载波 $i = \arg \max_{i \in T} \min_{m \in G_g} G_{gm}(i)$ 后, $T_1 = T_1 - \{i\}$, $T_2 = T_2 - \{i\}$, $T = T - \{i\}$, $P_g = P_g + \bar{P}_{sg}(i)$, 重新进行步骤 2; 若 $\Delta_g=0$, 找到子载波对 $(i, j) = \arg \max_{i \in T_1, j \in T_2} G_g(i, j)$ 后, $T_1 = T_1 - \{i\}$, $T_2 = T_2 - \{j\}$, $T = T - \{i\} - \{j\}$; $P_g = P_g + P_g(i, j)$ 。

步骤 3 当 $T_1 \neq \emptyset \cap T_2 \neq \emptyset$ 时, 找到组 $g = \arg \max_{g \in U} \frac{P_g}{R_{Tg}}$ 。若 $\Delta_g=1$, 找到子载波 $i = \arg \max_{i \in T} \min_{m \in G_g} G_{gm}(i)$ 后, $T_1 = T_1 - \{i\}$, $T_2 = T_2 - \{i\}$, $T = T - \{i\}$, $P_g = P_g + \bar{P}_{sg}(i)$, 重新进行步骤 3; 若 $\Delta_g=0$, 找到子载波对 $(i, j) = \arg \max_{i \in T_1, j \in T_2} G_g(i, j)$ 后, $T_1 = T_1 - \{i\}$, $T_2 = T_2 - \{j\}$, $T = T - \{i\} - \{j\}$; $P_g = P_g + P_g(i, j)$ 。

3.2 协作功率迭代策略

在上述的资源分配策略中, 假设每个子载波有相同的目标速率且每个中继采用相同的功率传输, 这样就不能有效地利用功率资源, 因此本文提出了一个协作功率迭代策略, 目的是在满足每个多播组

QoS 需求情况下, 最小化系统消耗的功率。

该功率分配策略主要分两步完成。

步骤 1 依靠每个传输链路的等效信道增益确定每个子载波的目标速率。此时, 其目标函数可写成:

$$\min P_g = \min \left\{ 4_g \sum_{n \in S_g} \frac{2^{R_g(n)} - 1}{\min_{m \in G_g} G_{gm}(n)} + (1 - 4_g) \sum_{(n,j) \in S_g} \frac{2^{2R_g(n,j)} - 1}{G_g(n,j)} \right\}, \forall g \quad (19)$$

满足:

$$\sum_{(n,j) \in S_g} R_g(n,j) \geq R_{Tg} \quad (20)$$

或:

$$\sum_{n \in S_g} R_g(n) \geq R_{Tg} \quad (21)$$

其中, S_g 是分给多播组 g 的子载波或子载波对的集合, N_g 是集合 S_g 的数量大小。根据注水定理可以得出:

$$R_g(n,j) = (\lambda_1 + \frac{1}{2} \lg G_g(n,j))^+ \quad (22)$$

$$R_g(n,j) = (\lambda_2 + \lg(\min_{m \in G_g} G_{gm}(n)))^+ \quad (23)$$

其中, $(x)^+ = \max(x, 0)$, λ_1 、 λ_2 是注水程度。

步骤 2 基站和中继根据步骤 1 确定的目标速率为每个子载波分配功率。当组 g 采用直传时应满足:

$$\bar{P}_{sg}(n) \min_{k \in G_g} G_{sk}(n) \geq 2^{R_g(n)} - 1, \forall n \in S_g \quad (24)$$

因此, 可得出此时多播组 g 所需的最小功率。

当采用协作传输时, 对于分配给多播组 g 的子载波对 (n,j) 来说, 其目标函数是:

$$\min \{ P_{sg}(n) + \sum_{k=1}^K P_{kg}(j) \} \quad (25)$$

满足:

$$(C1) P_{sg}(n) \min_{k \in F} G_{sk}(n) \geq 2^{2R_g(n,j)} - 1 \quad (26)$$

$$(C2) P_{sg}(n) G_{gm}(n) + \sum_{k=1}^K P_{kg}(j) G_{gm}^k(j) \geq 2^{2R_g(n,j)} - 1, \forall m \in G_g \quad (27)$$

上面的最优化问题是一个线性规划问题, 可以采用单纯形法得到多播组 g 需要的功率。然而单纯形法在理论上并不是多项式策略, 它的计算复杂度会随着用户数的增加呈指数增长趋势, 计算效率较低。因此, 在这一步利用提出的功率迭代方法分配功率。策略具体步骤如下。

步骤 1 初始化: 对于分配给多播组 g 的协作链路 (n,j) 来说, 根据 $P_{sg}(n) = \frac{2^{2R_g(n,j)} - 1}{\min_{k \in F} G_{sk}(n)}$ 计算第 1 跳所需的功率。设置第 2 跳每次迭代变化的功率 $\Delta P > 0$, $P_{kg}(n) = 0$ 。

步骤 2 对于所有的中继 k 计算:

$$C_k = \min_{m \in G_g} 0.5 \lg(1 + P_{sg}(n) G_{gm}(n) + \sum_{l \in F, l \neq k} P_{lg}(j) G_{gm}^l(j) + (P_{kg}(j) + \Delta P) G_{gm}^k(j)) \quad (28)$$

步骤 3 找到中继 $k = \arg \max_{k \in F} C_k$, 更新 $P_{kg}(j) = P_{kg}(j) + \Delta P$ 。

步骤 4 如果 $C_k \geq R_g(n,j)$, 策略结束, 否则返回到步骤 2。

通过分析可知, 该策略的计算复杂度是 $O(K \times M_g \times N_g)$, 与 K 、 M_g 和 N_g 呈线性关系, 这种计算复杂度对于实际的协作多播系统是可以接受的。

4 仿真结果与分析

在本文仿真场景中, 假设无线协作多播系统中有 2 个多播组, 且每个组的用户数和目标速率相同。用户随机分布在半径为 1 km 的小区内, 3 个中继均匀分布在距基站 500 m 的圆周上。信道增益由大尺度衰落和阴影衰落组成, 路径损耗是 3。

本文比较了不同资源分配策略下的系统性能。其中, “直传等速率法” 是指系统采用直接传输时, 每个子载波在相等速率情况下的功率分配; “直传注水法” 是系统在直传时, 确定每个子载波的目标速率后根据式 (24) 实现的功率分配; “协作单纯形法”



是系统采用协作传输时,确定每个子载波的目标速率后利用单纯形法完成的功率分配。

不同目标速率下,归一化功率和中断概率曲线如图2所示,反馈门限 $L=850$, 每组用户数是50。从图2可以得到,直传策略消耗的功率和中断概率都明显大于协作策略,这是因为多播性能是由最差用户决定的,当用户位于小区边缘时,该用户的直传信道增益很小,多播性能将大大降低。而在协作策略中,固定中继将转传多播数据给这些边缘用户。由于获得了协作分集增益,多播组的性能得到大大提高。本文协作策略消耗的功率略大于“协作单纯形法”,但中断概率明显低于后者。“直传注水法”的功率和中断概率都大大低于“直传等速率法”,即采用等速率注水法可以显著改善系统性能。

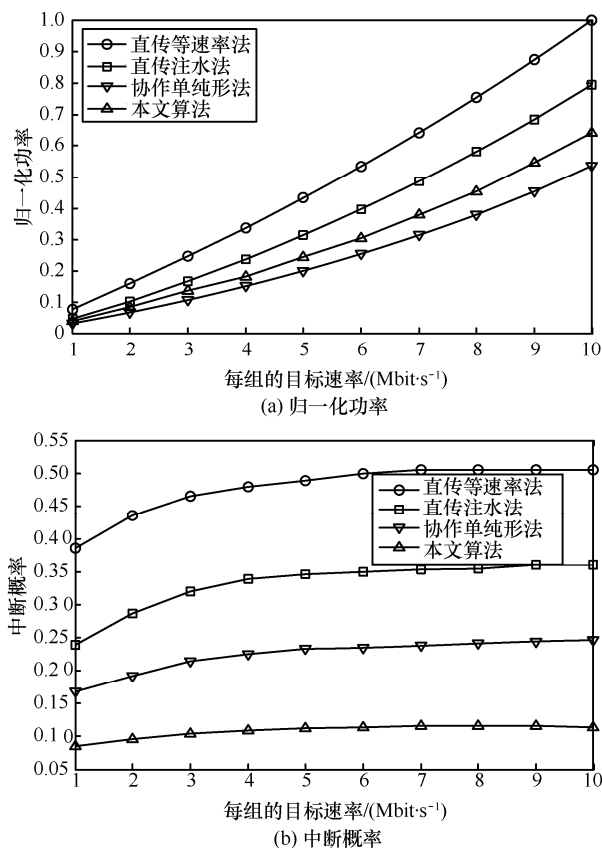


图2 不同目标速率下,归一化功率和中断概率曲线

不同反馈门限下,归一化功率、中断概率、用户反馈比例曲线如图3所示,每组的用户数是50,目标速率是1 Mbit/s。

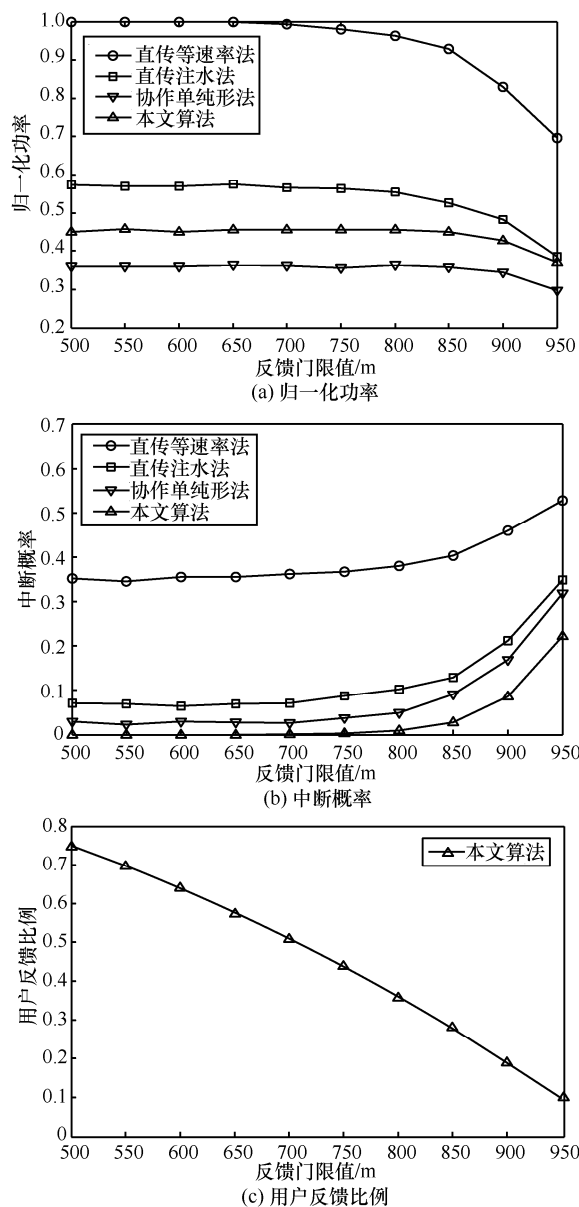


图3 不同反馈门限下,归一化功率、中断概率、用户反馈比例曲线

由图3可以得出与图2相似的结论,此外,协作策略在反馈门限小于800 m时所需功率和中断概率基本不变,随着反馈门限的进一步增加,系统消耗的功率减少,中断概率增加。这是因为信道响应是由大尺度衰落和阴影衰落决定的,且这些策略都是根据有限的反馈用户信道增益进行资源分配的。当反馈门限小于800 m时,所有反馈用户的信道增益的差别主要来自于大尺度衰落,因此信道状态最差的用户在反馈范

围内,系统性能保持稳定。而当门限大于 800 m 时,阴影衰落则成为信道增益差别的主要因素,此时信道质量最差的用户可能不在反馈范围内,因此所需的功率减小,中断概率增加。此外,从图 3 (c) 中还可以看出,随着反馈距离的增加,需要反馈的用户比例是显著降低的。因此,在实际系统中可以综合考虑上行反馈开销和系统性能之间的折中。

不同用户数下,归一化功率和中断概率曲线如图 4 所示,反馈门限是 $L=850$ m,目标速率是 1 Mbit/s。

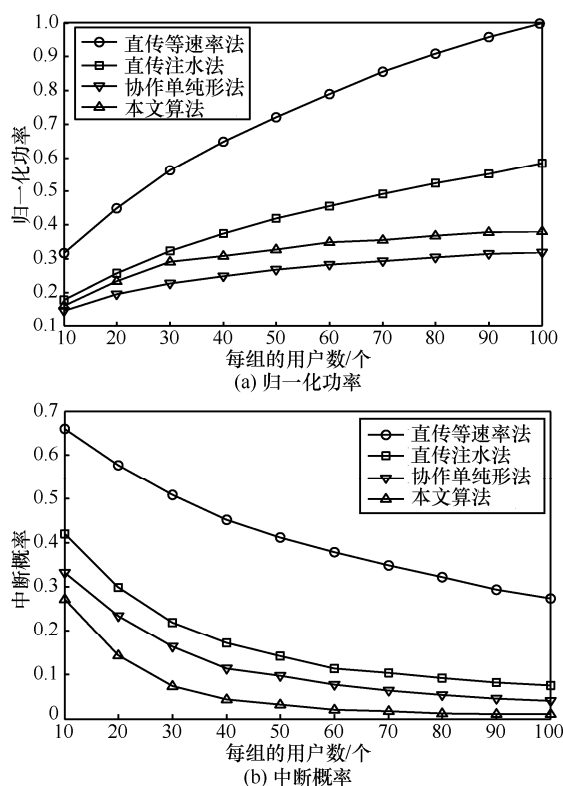


图4 不同用户数下,归一化功率和中断概率曲线

从图 4 可以看出,随着用户数的增加,所有策略消耗的功率增加,中断概率降低。这是由于用户数越多,出现性能较差用户的概率就越大,因此消耗的功率就越多,中断概率越低。当用户数大于 80 时,协作策略的性能趋于稳定。即用户数越多,协作多播策略的性能优势越明显。

4 结束语

本文提出了一种基于有限反馈策略下得到部分用户信道信息时的协作多播资源分配策略,仿真结果表明,该协作策略消耗的功率和系统的中断概率明显小于直传策略,且随着多播用户数的增加,这种性能优势越加明显。当设定一个适当的反馈门限时,不仅可以显著降低网络的上行反馈开销,而且还能获得较好的系统性能。此外,该策略以少量的性能损失为代价,大大降低了计算复杂度,因此,可以作为一种较实用的协作多播资源分配策略应用在现有的蜂窝网络中。协作多播通信由于能够获得很高的传输速率,近几年被引入无线多播网络中。但现有的研究成果都假设所有用户的瞬时信道信息是已知的,这对于实际多播系统来说是不现实的。对于协作多播系统未来的发展趋势,需要根据网络中的中继位置、多播用户的分布特点和无线信道特征等因素,研究有效的用户反馈算法和易于实现的资源分配方案。此外,还需要对协作多播系统进行性能分析,从而推导出有多少用户反馈量才可以既保证用户多播服务满意度,又能有效降低上行反馈开销,这是协作多播通信未来发展的趋势。

参考文献:

- [1] IEEE Standard 802.16 Working Group. IEEE standard for local and metropolitan area networks part 16: air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems[S]. 2005.
- [2] 3GPP. Introduction to multimedia broadcast and multicast services (MBMS) in radio access network: TS25.346[S]. 2007.
- [3] SUH C, MO J. Resource allocation for multicast services in multicarrier wireless communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(4): 27-37.
- [4] TIAN L, PANG D, YANG Y, et al. Subcarrier allocation for multicast services in multicarrier wireless systems with QoS guarantees[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference, April 18-21, 2010, Sydney, Australia. New Jersey: IEEE Press, 2010: 1-6.
- [5] 陈雷, 王晓湘. 基于减少反馈策略和联合编码策略下的多播资源分配[J]. 北京邮电大学学报, 2013, 36(1): 36-40.



- CHEN L, WANG X X. Reducing feedback strategy and joint coding strategy-based multicast resource allocation algorithm[J]. The Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013, 36(1): 36-40.
- [6] CHEN L. Layered multicast resource allocation with limited feedback scheme in single frequency networks[J]. Wireless Personal Communications, 2016, 87(4): 1131-1146.
- [7] DAI W H, SHEN Y, WIN M Z. Distributed power allocation for cooperative wireless network localization[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(1): 28-40.
- [8] TANG M W, WANG X X. Resource allocation algorithm with limited feedback for multicast single frequency networks[J]. The Journal of Zhejiang University Science C, 2012, 13(2): 146-154.
- [9] 陈雷, 王洪玉, 牛芳琳. 基于 OFDMA 的无线协作多播网络动态资源分配策略[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(9): 2129-2134.
- CHEN L, WANG H Y, NIU F L. Resource allocation in OFDMA-based cooperative wireless multicast networks[J]. The Journal of Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(9): 2129-2134.
- [10] GOMEZ-CUBA F, ASOREY-CACHEDA R, GONZALEZ-CASTANO F J. A survey on cooperative diversity for wireless networks[J]. IEEE Transactions on Communications Surveys & Tutorials, 2012, 14(3): 822-835.
- [11] JORDAN M, DARTMANN G, ASCHEID G. Beamforming in single frequency networks with connection control[C]//IEEE Vehicular Technology Conference, April 26-29, 2009, Barcelona, Spain. [S.l.:s.n.], 2009: 1-5.
- [12] 谭劲, 张玉娟. 一种能量平衡的无线体域网 AODV 多播路由发现协议[J]. 电信科学, 2016, 32(8): 69-76.
- TAN J, ZHANG Y J. An energy balance AODV protocol with multicast route discovery for wireless body area networks[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(8): 69-76.

[作者简介]



陈雷 (1981-), 男, 博士, 中国刑事警察学院讲师, 主要研究方向为无线资源分配、协作通信、无线物理层安全。