

基于多用户 QoS 的中继系统功率分配算法

严靖琳¹, 唐 伦¹, 陈前斌¹, 陈 波²

(1. 重庆邮电大学 移动通信重点实验室, 重庆 400065; 2. 中国人民银行 重庆营业管理部, 重庆 400065)

(yanjinglin@yeah.net)

摘 要:研究了非再生中继满足不同用户速率需求的公平性功率分配问题。提出了基于用户期望速率比例公平性功率分配算法,由于源端无法预先接收用户期望速率信息,该算法在实际操作中存在一定的不可操作性。进一步提出了预均分公平性功率分配算法,可弥补基于用户期望速率比例公平性功率分配算法的不足。仿真结果表明,两种算法都实现了保证用户服务质量(QoS)的最优功率分配以最小化用户速率与期望速率差值,节约网络资源的优化目标。

关键词:公平性;功率分配;启发式算法;中继

中图分类号: TN911.22; TP393.01 **文献标志码:** A

Power allocation algorithm with QoS-requirements in multi-user relay networks

YAN Jing-lin¹, TANG Lun¹, CHEN Qian-bin¹, CHEN Bo²

(1. Key Laboratory of Mobile Communication, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2. Chongqing Branch, People's Bank of China, Chongqing 400065, China)

Abstract: To study the fairness-optimization problem with different user-rate in non-regenerative relay network, a power allocation algorithm based on user-required rate proportional fairness was proposed. Because the source could not receive the messages of the user's hope rate, a pre-average allocation fairness algorithm was proposed to overcome the disadvantage of the prior algorithm. The simulation results show that the two algorithms realize goal of minimizing the difference between user-rate and required rate and save the resource in network with assuring the users' requirement of Quality of Service (QoS).

Key words: fairness; power allocation; heuristic algorithm; relay

0 引言

随着无线通信的飞速发展和 Internet 业务的加入,人们对无线通信业务的需求从单纯的语音业务转化为了复杂的混合业务,包括音频、视频、数据等。不同业务所需的服务质量各不相同,例如数据业务要求高准确性,语音业务要求高速度。同时由于无线资源的有限性,如何提高无线资源的利用率,减少能耗成为了研究热点。文献[1-2]研究了最大化系统吞吐量时的功率分配算法;文献[3]在满足用户中断概率的约束下,提出了最大化最小用户传输速率的功率分配模型;文献[4-6]考虑不同场景下最小化系统中断概率的功率分配算法,并基于凸优化理论进行求解;文献[7]研究了部分信道信息条件下无线中继网络的优化问题,利用凸优化理论提出了最大化系统平均信噪比的最优功率分配算法。以上研究都没有确保每个用户获得的传输速率都能满足各个用户的数据速率需求。在实际通信中各个用户不同业务所需的速率是不相同的,若使各用户按其各自所需的数据速率进行通信,不仅保证了用户对数据速率的服务质量(Quality of Service, QoS)需求及各用户间的公平性,又能降低通信过程中消耗的能量,并有可能接入更多的用户进行同时通信。

本文的研究正是基于上述思想,在中断概率和公平性约束条件下,建立了最小化各用户实际速率与期望速率差值总

和的优化目标。由于该目标函数是一个 NP 难问题,很难获得最优解,因此本文提出了两种启发式算法,以获得优化目标的次优解。

1 系统模型

本文假定网络中有一个基站(Base Station, BS),一个中继站(Relay Station, RS), N 个用户,记为 Destination Station(DS), N 个用户 DS 共用一个中继站 RS。采用非再生中继方式(Amplify-and-Forward, AF),即中继器将从基站接收的信号简单放大后转发给用户。本文将信息的传输过程分为两个时隙。

第一时隙 基站将信号发送给中继,中继接收到的信号^[8]为:

$$y_R = \sqrt{p_{BS}} h_{BS,R}(n) x(n) + n_{BS,R}(n) \quad (1)$$

第二时隙 中继将接收到的信号放大发送给用户,用户接收的信号为:

$$y_D = \alpha h_{R,D}(n) y_R + n_{R,D}(n) = \alpha h_{R,D}(n) (\sqrt{p_{BS}} h_{BS,R}(n) x(n) + n_{BS,R}(n)) + n_{R,D}(n) \quad (2)$$

其中 α 为放大因子,必须满足 $\alpha \leq \sqrt{\frac{P_R}{p_{BS} |h_{BS,R}(n)|^2 + \delta^2}}$ 。

收稿日期: 2010-08-13。 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60972070);重庆市自然科学基金重点资助项目(CSTC2009BA2090);重庆市教委科学技术研究项目(KJ100514)。

作者简介: 严靖琳(1986-),女,福建建阳人,硕士研究生,主要研究方向:中继系统资源优化;唐伦(1973-),男,重庆合川人,博士研究生,主要研究方向:新一代无线通信系统资源管理;陈前斌(1967-),男,四川营山人,教授,博士生导师,主要研究方向:下一代网络、个人通信、多媒体信息处理与传输;陈波(1978-),男,重庆合川人,硕士,主要研究方向:计算机网络。

根据香农理论,AF 协议下的传输速率为:

$$R = \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{p_{BS} h_{BS,R}^2 p_R h_{R,D}^2}{\delta^2 (p_{BS} h_{BS,R}^2 + p_R h_{R,D}^2 + \delta^2)} \right) \quad (3)$$

其中: p_{BS} 和 p_R 分别为基站的发射功率和中继的发射功率; $h_{BS,R}$ 和 $h_{R,D}$ 分别是基站到中继和中继到用户的传播损耗,均包含路径损耗和服从瑞利分布的快衰落; δ^2 表示噪声的平均功率,服从零均值的复高斯分布。

在信噪比较大时, $\frac{p_{BS} h_{BS,R}^2 p_R h_{R,D}^2}{\delta^2 (p_{BS} h_{BS,R}^2 + p_R h_{R,D}^2 + \delta^2)} \gg 1$, AF 协议下的传输速率可简化为:

$$R = \frac{1}{2} \log \left(\frac{p_{BS} h_{BS,R}^2 p_R h_{R,D}^2}{\delta^2 (p_{BS} h_{BS,R}^2 + p_R h_{R,D}^2 + \delta^2)} \right) \quad (4)$$

为了满足用户 QoS 的要求,用户的中断概率 p_{out} 必须小于该用户所能允许的最大中断概率 η , 本文假定每个用户的中断概率相同,为一定值^[9],即:

$$p_{out} \leq \eta$$

其中: $p_{out} = \left(\frac{p_{BS} h_{BS,R}^2 + p_R h_{R,D}^2}{p_{BS} h_{BS,R}^2 p_R h_{R,D}^2} \right) (2^{2R^i} - 1) \delta^2$, R^i 为保证用户传输不中断的最低速率。本文中为了方便计算,假设 $R^i = 1$ bps。

为了满足用户之间公平性要求,定义了一个归一化的公平性因子 β_i :

$$\beta_i = R_r^i / R_d^i$$

则用户间的公平性可表示为任意两用户之间的公平性因子 β_i, β_j 的差值小于一个门限值(假设 $\beta_i > \beta_j$) 即:

$$(R_r^i / R_d^i) - (R_r^j / R_d^j) \leq \rho; \quad \forall i, j \in (1, 2, \dots, N)$$

其中 ρ 是一个预先给定的公平程度, ρ 值越小则用户间的公平性越好。

2 优化目标

本文主要研究在 BS 和 RS 总功率限定的条件下,如何分配基站和中继的发射功率 p_{BS}^i 和 p_R^i , 使 N 个用户 DS 满足各自 QoS 需求,使得各用户的实际传输速率 R_r^i 与该用户的期望传输速率 R_d^i 差值的绝对值之和 $\sum_{i=1}^N \Delta R^i$ 最小^[10], 其中 $\Delta R^i = |R_r^i - R_d^i|$, 其目标函数可以写成下列形式:

$$\min_{p_{BS}, p_R} \sum_{i=1}^N |R_r^i - R_d^i| \quad (5)$$

$$\text{s. t. } p_{out}^i \leq \eta \quad (6)$$

$$(R_r^i / R_d^i) - (R_r^j / R_d^j) \leq \rho; \quad \forall i, j \in (1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^N p_{BS}^i \leq p_{BS}^{\max} \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N p_R^i \leq p_R^{\max} \quad (9)$$

其中:约束条件(5)保证了用户通信的可靠性,约束条件(6)体现了各用户间的公平性,约束条件(8)~(10)分别是基站总功率和中继总功率的最大上限。

若此优化问题有解,即可得出一个最优的基于公平性的功率分配方案,使得用户对网络提供其的服务满意度最高,即使得用户实际速率与期望速率相等,节约网络资源,提高网络效用。

3 求解算法

由于传输速率是一个关于 p_{BS}^i 和 p_R^i 双变量的非线性多项

式,本文的优化目标又是一个 NP 难问题。因此提出了两种次优的启发式算法,使求得的可行解接近全局最优解。

根据香农公式可知,用户速率与功率成正比。若用户的需求传输速率越高,则分配给该用户的功率越大;反之,若用户的需求速率越低,则分配给该用户的功率越小。

算法1 基于期望速率的比例公平性分配算法。

本算法基于各用户期望速率中总期望速率的比值分配基站功率 p_{BS}^i 和中继功率 p_R^i , 即: $p_{BS}^i = \frac{R_d^i}{\sum_{i=1}^N R_d^i} p_{BS}^{\max}$, $p_R^i = \frac{R_d^i}{\sum_{i=1}^N R_d^i} p_R^{\max}$, 根据公平性和中断概率调整分配策略,具体算法

如下。

1) 将基站功率 $p_{BS}^{\max}$ 和中继功率 $p_R^{\max}$ 按各用户的期望速率与总期望速率的比值分配给 N 个用户,则每个用户的基站发

射功率和中继发射功率分别为: $p_{BS}^i = \frac{R_d^i}{\sum_{i=1}^N R_d^i} p_{BS}^{\max}$, $p_R^i = \frac{R_d^i}{\sum_{i=1}^N R_d^i} p_R^{\max}$ 。

计算每个用户的实际传输 $R_r^i(0)$ 。

2) 判断 $R_r^i(t)$ 是否满足约束条件(5)~(9),若满足,退出程序。若不满足,判断 $R_r^i(t)$,若 $R_r^i(t) > R_d^i$ 转入第3)步。若 $R_r^i(t) < R_d^i$,转入第4)步。

3) $p_R^i(t+1) = p_R^i(t) - \Delta p$, 计算用户 i 的 $R_r^i(t+1)$, 转入第2)步,直至满足约束条件或达到迭代次数。

4) $p_R^i(t+1) = p_R^i(t) + \Delta p$, 计算用户 i 的 $R_r^i(t+1)$, 转入第2)步,直至满足约束条件或达到迭代次数。

由于实际情况中,基站和中继是无法预先获得用户期望速率,算法1不具备实际可操作性。因此对算法1进行了改进,利用预先知道的用户数目提出了算法2。

算法2 预均分公平性分配算法。

1) 将基站功率 $p_{BS}^{\max}$ 和中继功率 $p_R^{\max}$ 平均分配给 N 个用户,则每个用户的基站发射功率和中继发射功率分别为: $p_{BS}^i = p_{BS}^{\max} / N$ 和 $p_R^i = p_R^{\max} / N$ 。计算每个用户的实际传输 $R_r^i(0)$ 。

2) 判断 $R_r^i(t)$ 是否满足约束条件(5)~(9),若满足,退出程序。若不满足,判断 $R_r^i(t)$,若 $R_r^i(t) > R_d^i$ 转入第3)步。若 $R_r^i(t) < R_d^i$,转入第4)步。

3) $p_R^i(t+1) = p_R^i(t) - \Delta p$, 计算用户 i 的 $R_r^i(t+1)$, 转入第2)步,直至满足约束条件或达到迭代次数。

4) $p_R^i(t+1) = p_R^i(t) + \Delta p$, 计算用户 i 的 $R_r^i(t+1)$, 转入第2)步,直至满足约束条件或达到迭代次数。

具体的算法流程如图1所示。

4 仿真结果

在本文的仿真实验中,基站固定在(200 m, 200 m), 中继固定在(100 m, 100 m), 有5个用户随机分布在 100 m × 100 m 的区域中。基站总功率为 60 W, 中继总功率为 30 W。噪声功率为 -50 dB。信道增益模型采用 $h_{i,j}^2 = K \times d(i, j)^{-3}$, 其中: $K = 10^6$, $d(i, j)$ 表示节点 i 和节点 j 之间的距离^[11]。5个用户的期望速率分别为 2.2、2.8、3.6、4.4、5 bps。具体的仿真结

果如图2~3所示。

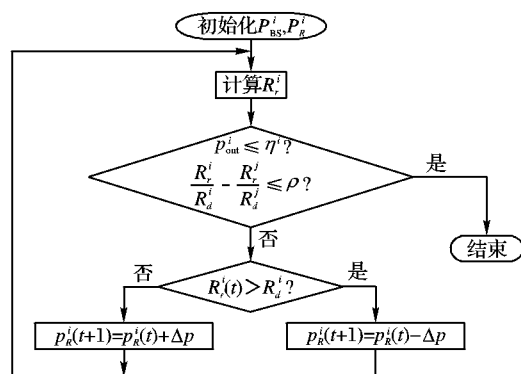


图1 算法流程

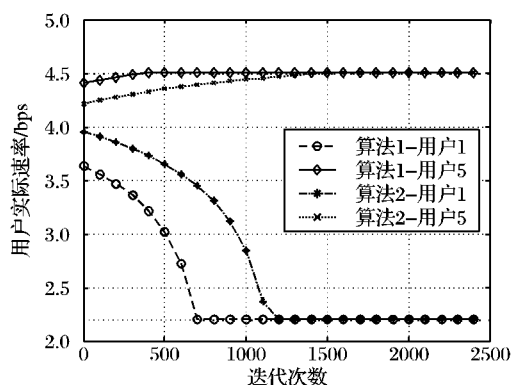


图2 用户实际速率

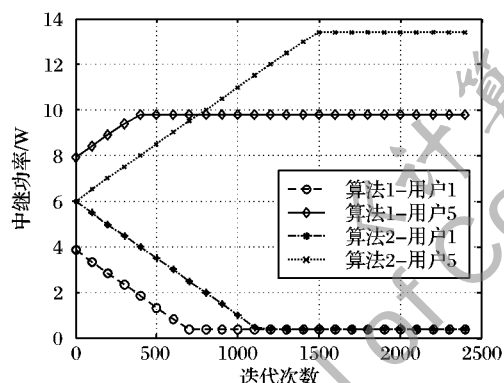


图3 用户中继功率

图2以用户1和用户5为例,显示了两种算法下用户实际速率的收敛速度。从图2中可以得出:采用算法1——基于期望速率的比例公平性分配算法,能较快地收敛到用户的期望速率;而算法2收敛到用户的期望速率要比算法1付出更多的时间成本。即用户的期望速率越大,算法2比算法1的迭代次数差值就越大。例如用户5,两种算法的迭代次数差值为1000,而用户1两种算法的迭代次数差值为500。

图3给出了两种算法下用户1和用户5消耗的中继功率。由图3可知,采用算法1用户消耗的中继功率小于算法2消耗的中继功率,特别是在用户的期望速率较大时,差异越显著。但总用户的中继功率,算法1需要21.46 W,算法2需25.225 W,两者的差值仍在可接受的差值范围内。

表1 两种算法下各用户的公平性因子 β_i

算法	用户					Δu
	1	2	3	4	5	
算法1	1.0025	1.0030	1.0001	1.0023	1.0000	0.0030
算法2	1.0036	1.0028	1.0000	1.0023	1.0000	0.0036

表1中, $\Delta u = \max(R_t^i/R_d^i) - \min(R_t^i/R_d^i)$ 。

由表1可看出两种算法的公平性因子 β_i 都几乎为1,说明两种算法都具有很好的公平性。其中算法2中的 $\max(R_t^i/R_d^i) - \min(R_t^i/R_d^i) = 0.0036$ 与算法1中的0.003仅差0.0006,可见算法2的公平性与算法1相同。然而在实际通信过程中,源端无法预先接收用户的期望速率信息,算法2在付出时间和功率成本的条件下,可使用用户的实际速率与期望速率相等,并获得与算法1相同的用户公平性。

5 结语

本文主要研究了在速率中断概率和用户公平性约束条件下,最小化各用户实际速率与期望速率差值总和的优化问题。算法1是基于用户期望速率的比例公平性分配算法,但由于实际运作中无法预先知道用户的期望速率,而预先存储了本网络的用户数,因此提出了算法2——预均分公平性分配算法。由仿真结果得出,两种算法都能获得优化目标的解,并且能够降低发射站的能耗。算法2在付出一定的时间和功率成本下,可以获得与算法1相同的公平性。

参考文献:

- [1] KELLY F P, MAULLOO A, TAN D. Rate control for communication networks: Shadowing prices, proportional fairness, and stability [J]. Journal of the Operational Research Society, 1998, 49(3): 237-252.
- [2] LEE H W, MODIANO E, LE L B. Distributed throughput maximization in wireless networks via random power allocation [C]// Proceedings of the 7th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks. Seoul: [s. n.], 2009: 1-9.
- [3] 唐伦,叶剑雄,陈前斌,等. 中继网络 Max-Min 和 Min-Max 公平性的功率分配[J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(3): 67-70.
- [4] ANNAVAJJALA R, COSMAN P C, MILSTEIN L B. Statistical channel knowledge-based optimum power allocation for relaying protocols in the high SNR regime [J]. IEEE Selected Areas in Communications, 2007, 25(2): 292-305.
- [5] KHABBAZI A, NADER-ESFAHANI S. Power allocation in an amplify-and-forward cooperative network for outage probability minimization [C]// 2008 International Symposium on Telecommunications. Tehran: ISTEEL, 2008: 241-245.
- [6] FAREED M M, UYSAL M. Optimum power allocation for fading relay channels [C]// Vehicular Technology Conference. Baltimore, MD: [s. n.], 2007: 1157-1161.
- [7] PHAM T T, NGUYEN H H, TUAN H D. Power allocation in orthogonal wireless relay networks with partial channel state information [J]. Signal Processing, 2010, 58(2): 869-878.
- [8] ZHANG J, ZHANG Q, SHAO C, et al. Adaptive optimal transmit power allocation for two-hop non-regenerative wireless relaying system [C]// Vehicular Technology Conference. Milan, Italy: [s. n.], 2004: 1213-1217.
- [9] LE L B, HOSSAIN E. Cross-layer optimization framework for multi-hop wireless networks using cooperative diversity [J]. Wireless Communications, 2008, 7(7): 2592-2602.
- [10] 车越岭. 认知无线网络中的功率控制算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [11] 陈实,陈雁,仇佩亮. 无线再生中继网络的用率优化分配[J]. 浙江大学学报, 2006, 40(8): 1297-1299.