



基于多目标的 MIMO 无线 mesh 网络信道优化策略

乐光学¹, 宋昊^{1,2}, 熊小峰², 刘建生², 马柏林¹

(1. 嘉兴学院数理与信息工程学院, 浙江 嘉兴 314001;

2. 江西理工大学理学院, 江西 赣州 341000)

摘要: MIMO 是一种可有效提高无线网络信道带宽的技术。将 MIMO 技术应用在无线 mesh 网络中会遇到信道干扰和无线节点之间无协同策略等问题, 导致网络效率降低。基于无线 mesh 网络中节点的多属性特征, 以节点属性和内容分发为约束, 提出了基于多目标优化算法与多层分发联合的调度和优化策略。实验结果表明, 该算法能有效降低无线 mesh 网络分发数据过程中的时延, 提高网络的吞吐表现和服务质量。

关键词: 无线 mesh 网络; 多人多出; 信道分配; 目标优化

中图分类号: TP311

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016295

Channel optimization scheme for MIMO wireless mesh network based on multi-objective

YUE Guangxue¹, SONG Hao^{1,2}, XIONG Xiaofeng², LIU Jiansheng², MA Bailin¹

1. College of Mathematics Physics & Information Engineering, Jiaxing University, Jiaxing 314001, China

2. School of Science, Jiangxi University of Science & Technology, Ganzhou 341000, China

Abstract: MIMO is a technology which can effectively improve the channel bandwidth of wireless networks. When MIMO technology is used in wireless mesh networks, the problems of channel interfere and no coordination policy among wireless nodes will occur, thus resulting the reduction of network efficiency. Based on multi-attribute feature of nodes in wireless mesh networks, an optimization algorithm based on multi-objective and schedule and optimization policy of multi-layer distribution union was proposed, where node attributes and content distribution were used as constraints. Experimental results show that the proposed algorithm can effectively reduce the delay in the data distribution process of wireless mesh networks and improve the throughput and service quality of networks.

Key words: wireless mesh network, multi-input multi-output, channel allocation, objective optimization

1 引言

随着无线网络技术的迅速发展和智能终端用户的普及, 用户对无线网络带宽的需求越来越高。运营商通过大

量部署网络基础设施, 如无线网络接入点 (access point, AP)、基站, 用户通过部署私有局域无线网络等缓解无线网络带宽需求急剧增长问题。这样密集的网络设备部署虽然解决了一部分流量需求, 但由于不同网络之间缺乏协同

收稿日期: 2016-02-29; 修回日期: 2016-11-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61572014); 浙江省自然科学基金资助项目 (No.LY15F020040, No.LY16F020028, No.LQ15F010008)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61572014), Natural Science Foundation of Zhejiang Province of China (No.LY15F020040, No.LY16F020028, No.LQ15F010008)

与优化选择,也给稀缺的无线频段资源带来了巨大压力,无线网络间互相干扰的情况越来越严重,信道分配成为关键技术之一。无线 mesh 网络由其本身易扩展、低成本的特点,可通过较少的无线 mesh 接入点为大量客户提供服务这一特性,适用于一定区域中存在大量客户端多播数据的情况,为减轻无线接入点并发压力,提高无线传输效率,是一种有效的接入网络技术。而大量用户在近距离互联时,如何在开放 ISM(industrial、scientific and medical)频谱中,应用在现有无线网络信道中以提高利用率、降低干扰,是当前无线 mesh 网络部署中急需解决的一个问题。

为了向用户提供高可用、低时延和高吞吐量的无线网络,对无线 mesh 网络节点之间的信道干扰和传输距离提出了要求。IEEE 802.11 无线网络中根据无线信道状态自适应地选择最优调制与编码策略(modulation and coding scheme, MCS),速率自适应机制得到广泛应用,IEEE 802.11n 无线网络在物理层增加了 MIMO (multiple-input multiple-output,多输入多输出)和信道绑定,使无线网络速率自适应能力得到进一步提升。

MIMO 在不增加额外带宽和功率的基础上提高了系统容量和传输可靠性^[1-3]。MIMO 无线网络使用空间复用(spatial multiplexing, SP)技术和空间分集(spatial diversity, SD)技术分别解决信道衰落和容量,以获得高可靠的传输率^[4,5]。Wolniansky P W 等人^[6]结合实时的信道状态在空间复用增益和空间分集增益之间进行动态切换,提高节点间的通信带宽和系统性能,但是无法实现无线 mesh 网络节点间的优化传输并提高分发能力。Chakraborty^[7]提出了一种智能框架 i-QCA 用以解决无线 mesh 网络多播服务质量优化和控制的问题,提高了部分节点的服务质量,但是对全局的优化有限且耗费资源较多。Zheng 和 Tse 等人^[8]从信息论的角度给出了严格的证明,在 MIMO 系统中,空间分集增益和空间复用增益之间存在着严格的约束关系,其中一种增益的增大一定是以另一种增益的减小为代价的,对网络优化具有理论指导意义。

本文针对现有服务质量优化策略的不足,通过分析无线网络的节点属性和信道占用情况,提出基于多目标优化策略和信道分配策略的优化模型,优化无线 mesh 网络中的信道分配和内容分发策略。

2 系统模型

在基于 MIMO 的无线 mesh 网络中,节点间互相存在

着多条传输链路,链路之间可能存在着互相干扰的情况。为降低链路间的信道干扰问题,信道分配策略是抑制信道干扰的关键。MIMO 无线网络系统多天线逻辑结构提供了空间分集和空间复用方法,为了将信道分配策略更好地与 MIMO 系统的逻辑特性相关联,可采用天线分组策略以实现性能的提升。无线 mesh 节点属性为约束,通过多目标优化建模,在网络中选出性能较好并能对网络作出稳定贡献的节点作为精英节点^[9],构建信道分配优化策略。首先优化接入点到精英节点的信道和带宽,再根据无线网络节点的质量递归向下发展子节点以覆盖区域内所有无线节点。而天线分组策略根据不同设备之间多天线配置的不同,选择不同的天线分组策略和连接策略,保持连接效率并保护非对称传输。通过以上方法,在信道和分集天线服务质量采集的基础上,分析分组丢失率和用户带宽需求,建立自适应动态变化的无线网络信道分配模型。系统模型如图1所示。

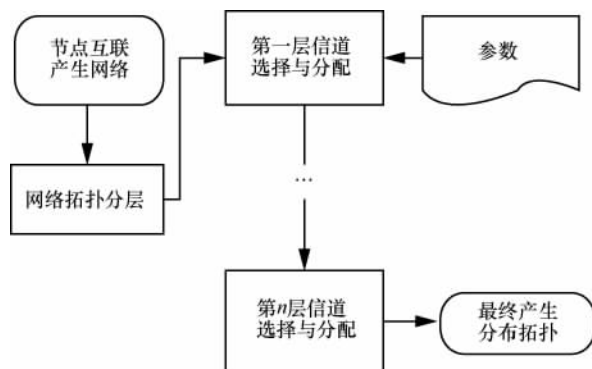


图1 系统模型

2.1 多目标优化模型

2.1.1 多目标优化算法 NSGA2

为实现节点间传输性能优化,通过利用无线 mesh 节点的各类属性作为一组种群,经过多目标优化方法后得到 Pareto (帕雷托)最优解集以实现网络优化。多目标优化领域常见的优化方法有 NSGA2、PESA2、SPEA2 等多目标优化方法。本文对比了具有代表性的几种多目标优化方法^[10-12],其性能见表1。

由表1可知,NSGA2 多目标优化算法的效率、复杂度和开销最优,NSGA2 多目标优化算法能很好地适用于无线 mesh 网络信道优化。

2.1.2 多目标优化的改进策略 NSGAnet

NSGA2 采用的 Pareto 排序策略是判断当前群体中不



表 1 几种多目标优化方法对比

多目标进化算法	主要思想 Pareto 优化	优势	缺点
NSGA2		效率高,解集分布性高对低维优化表现良好	解集多样性不够理想,解集过程有缺陷
PESA2		收敛性好,高维问题易接近最优面	选择操作一次只能选择一个个体时间复杂度大、多样性差
SPEA2		对高维问题解集分布性高	聚类过程中保持多样性耗时长运行效率低
多目标模拟退火算法	Monte Carlo(蒙特卡罗) 迭代求解	具有跳出局部最优的能力,通用性、灵活性高	对初始温度和退温系数这两个参数依赖性较强,直接关系到性能
多目标蚁群优化算法	蚁群模拟,仿生优化算法	算法可靠性高,具有较强的全局搜索能力	需要较长的搜索时间,易出现早熟停滞现象

被任何其他个体(即本文所述的无线 mesh 节点,为描述算法在本节表述为个体)支配的个体是非支配个体,并将其 Pareto 排序值赋值为 1,全部非支配个体的个体集是第一级非支配个体集;而其他则加入第二层,并将 Pareto 排序值赋为 2,以此类推直至确定所有个体。但是此方法的问题在于个体的 Pareto 值不能很好地反映其周围节点的密度情况,在无线 mesh 网络中,无线客户端之间距离和无线 mesh 节点密度对网络的影响非常重要,所以本文所述的 NSGANet 优化方法中通过计算节点间时延和接收信号强度指示(received signal strength indicator)这两个属性综合产生节点间距离估计值,从而获得节点密度情况。

设在第代种群中支配个体的个体集为 $n_1, n_2, \dots, n_m$,则支配个体中所有个体的 Pareto 排序值的和为:

$$rank(n, t) = \sum_{i=1}^m dist(RTT, RSSI) \quad (1)$$

其中,质量最佳的节点 $i=1$, RTT 和 $RSSI$ 为支配个体 n 中质量最佳的节点到其他节点的值。此方法在不增加计算复杂度的同时使 Pareto 排序值对节点密度做出相应的度量,解决了原算法中个体的 Pareto 值不能很好地反映其周围节点密度的问题。

2.2 网络拓扑生成方法

2.2.1 网络拓扑分层生成方法

开始时,先将第一个解加入集合 P' ,其后 P 种群中的其他解都和 P' 集合中的解比较,如果 P 集合中的任何个体支配 P' 中的任何个体,此时将 P' 集合中的 q 个体移除。通过这种方法,所有的非支配个体都被保留。否则,如果个体 p 被 P' 中的所有个体支配,则不将 p 包含进 P' 中。为了找到其他非支配层级, P' 中的成员将不被再次计入,再重复上面的循环操作。NSGANet 算法中的拓扑结构目标生成描述如下。

fast-nondominant-sort(Rt)

$P'=\{1\}$ //将第一个成员加入 P' 中,这里的第一

个成员是 AP

for each $p \in P \setminus p \in P'$ //每次选择一个不在 P' 中的 p

$P'=P' \cup \{p\}$ //将 p 临时性地包含在 P' 中

for each $q \in P' \setminus q \in P$ //将 p 与 P' 中的其他成员

比较

if $p < q$

$P'=P' \setminus \{q\}$ //如果支配 P' 中的任何一个成员,

则删除 P' 中的该成员 q

else if $q < p$

$P=P' \setminus \{p\}$ //如果 p 被 P' 中的所有成员支配,则不

将 p 包含在 P' 中

2.2.2 多目标优化策略

受 CDN(content distribution network,内容分发网络)^[11] 技术的启发,采用 NSGA2 对无线网络中的 n 个无线节点进行排序,在排序的同时为了优选出具有良好性能和提供较好服务质量的节点。具体过程为:在进行选举之前,将种群以非劣性进行排序(即对种群节点统计其适应度值),并对同一类的个体都赋予相同的复制机会。然后忽略这些已经划分了不同类别的个体,对种群中其余个体重复进行此步骤,直到所有个体都被划分为一类。至此通过种群大小,选出适当数量的精英节点作为此层 mesh 网络的骨干节点,而其余节点都作为备选节点或纯客户节点。NSGANet 算法层级节点优化流程如图 2 所示。

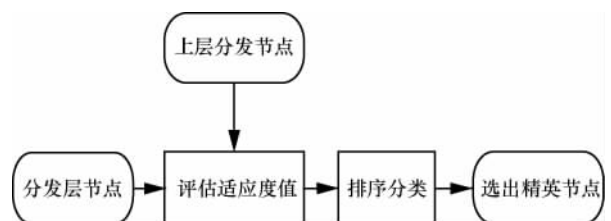


图 2 多目标优化策略流程

由于原始 NSGA 种群中非劣排序算法要进行多次搜索,搜索次数随着目标数量和种群大小的增大而急剧增

多。这对无线网络环境适应性不佳,本文选择通过计算节点属性直接进行排序,降低计算复杂度。

2.3 信道选择策略

由于 2.4 GHz 频段无线网络中 1、6、11 这 3 个信道互不重叠,基于已有的信道分配经验,优先将互不重叠的信道分配给优先级较高的分发节点,将无线 mesh 节点所在分发层次进行排序,根据无线节点的服务能力和稳定贡献度,选举出稳定可靠的节点。根据 Breiman L^[13]提出的经典 CART(classification and regression tree)方法通过节点属性变量的选择迭代建立一棵分类树,使得每次分类平面能最好地将剩余数据分为两类。此方法简单易行,但是分类精度和分类效率仍需改进。本文根据经典 CART 方法的思想,在产生 MIMO 模式与信道宽度的分类回归树时简化流程,分类时分为转发节点和客户节点两类。通过选取无线节点的 3 个属性:距离、服务时间和吞吐量,采用加权的方法突出具有优势性能的节点,同时将特性矩阵转换为特性离散值,从而从中选出合适的转发节点^[13]。每次评价产生加入该转发层或不加入该转发层的结果,并根据当前服务质量和网络稳定性评估。构造 NSGANet 算法信道选择策略,设 α 、 β 、 γ 为距离、服务时间和吞吐量的权重,同时满足:

$$\alpha + \beta + \gamma = 1 \quad (2)$$

α 、 β 、 γ 的取值根据不同网络条件改变。由此产生的评价策略函数为:

$$Q_n = [\alpha \beta \gamma] \begin{bmatrix} Dist_n \\ ST_n \\ e_n^m \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$div_n = - \sum_{k=1}^K Q_{nk} \lg Q_{nk} \quad (4)$$

其中, Q_n 是评价节点服务质量的函数, div_n 为节点 n 的分裂策略值, k 为节点在子节点集 K 中的索引。在具有 n 个节点的网络图 $G(V, E)$ 、时延矩阵 RTT_n 和吞吐量矩阵 TH_n , 通过建立报酬函数评估节点服务质量。

定义 α 是最大发射功率与节点 n 到其源节点的距离之比, 其中, $e^{\frac{P_i}{\bar{P}}}$ 为节点功率与平均功率之比, 通过此方法提高了发射功率较大节点的权重:

$$\alpha_i = \frac{P_i}{Dist_{n-s}} e^{\frac{P_i}{\bar{P}}} \quad (5)$$

其中, P_i 为节点 i 的发射功率, $\bar{P}$ 为该节点集的平均发

射功率, $Dist_{n-s}$ 为节点 n 到 s 的距离, 以 RSSI 值推算。

定义 β 是节点 n 到其源节点 s 的服务时间权重:

$$\beta_i = \frac{TH_i}{RTT_n} e^{\frac{ST_i}{\bar{ST}}} \quad (6)$$

其中, TH_i 是节点 i 的吞吐量, RTT_i 是节点收发数据分组的往返时延 (round-trip time, RTT), ST_i 为节点 i 在此集中的生存时间, $\bar{ST}$ 为此节点中各节点的平均生存时间。

定义 γ 是节点到其源节点的吞吐量权重:

$$\gamma_i = \frac{TH_i}{RTT_n} e^{\frac{BW_i}{\bar{BW}}} \quad (7)$$

其中, BW_i 为节点 i 的可用吞吐量, $\bar{BW}$ 为节点的平均吞吐量, $i = \{1, 2, \dots, n\}$, $i \in L$, L 是区域中无线节点集。

实际应用中, 无线发送层 (layer) 以 RSSI 值来判断链路质量和广播发送强度, 通过接收端接收的信号强弱和位置关系计算源端节点和接收端节点的距离 $Dist$, 构建可信的 RSSI 网络链路, 维持每个节点有 K 个邻居节点的拓扑结构, 实现节点定位、维持网络拓扑相对稳定和连通性。因此, RSSI 可由 $Dist$ 和 $Layer$ 构建描述表征函数, 其中 $Layer$ 为同层约束。

在无线 mesh 网络中, 每个节点既要发送自身产生的业务数据流, 同时担负中继转发其他节点产生的业务数据流的责任, 节点的吞吐量直接影响网络的整体吞吐量和服务质量。无线发送层中, 在保持连通性和适量开销的情况下, 一般均维持一个具有 K 连通性的网络规模, 网络规模 G 决定网络的吞吐量 TH 。因此, TH 可由 G 和 $Layer$ 构建描述表征函数。

由于节点所处位置不同和其自身性能的差异, 所以其权重也有所不同。NSGANet 算法中信道分配和信道宽度控制算法如下。

初始化(节点网络图 G , 节点数 n , 服务质量权重矩阵 Q , 网络属性 RTT 、 $RSSI$ 、 $Dist$ 、 $Layer$ 、 ST 、 TH 参数)

For n_node From G

$RSSI[n] = RSSI(Dist[n], Layer[n])$

$Dist[n] = \alpha_n \times \lg(-RSSI[n])$

$RTT[n] = RTT$

$TH[n] = \gamma_n \times TH(G[n], Layer[n])$

$G[n] = \alpha_n Dist[n] + \beta_n ST[n] + \gamma_n TH[n]$

If $G[n] < QoS[Layer]$, $RSSI < -95$ dBm

标记不可达节点

Else



标记 RSSI 节点及 G 性能

End If

End For

3 实验性能评价

实验使用 Ubuntu14.04 操作系统、Python3.5 和 NS2 网络仿真工具实现,实验随机产生 50、200、1 000 个无线 mesh 节点数据样本,并对其进行信道分配优化,将优化后的信道分配方案交由 NS2 进行网络质量仿真,实验进行 10 次,每次皆采用 3 个固定位置的 WMN 网关,用户与 WMN 网关的距离为 2~50 m,用户与用户之间的距离 ≥ 0.5 m,无线传输标准以 IEEE 802.11b 标准和 IEEE 802.11n 标准作为仿真过程中的速率参考,并定义峰值速率为 11 Mbit/s 和 150 Mbit/s,产生大小为 100 KB 的 TCP 和 UDP(user datagram protocol)数据分组,统计平均吞吐、平均时延和 TCP、UDP 流的数据分组到达率,每次仿真时间为 300 s。

3.1 网络拓扑生成

通过以上拓扑生成方法,为直观地验证拓扑有效性,对 50 个随机生成的无线节点进行拓扑结构生成仿真;另一方面,为证明拓扑在大量节点环境中的可靠性,分别对 200 个和 1 000 个随机生成的无线节点进行拓扑结构仿真。仿真实验结果表明,本文提出的优化算法能有效对网络节点进行层级分类和覆盖,其网络拓扑分类如图 3 所示,分组见表 2~表 4。

(1)分发组明显地被分层,无线 mesh 接入点与网络中提供良好贡献的节点形成了分发网络,通过 3 层分发覆盖处于边缘的无线节点。

(2)大量用户同时在线时无法同时分配互不干扰的无线信道,从图 3(b)、图 3(c)中可以看到并没有完全规避干扰,并且存在大量节点时信道干扰仍是一个无法避免的问题。

实验结果表明,算法能有效实现分发聚类。为了减弱信道干扰并提高网络容量,以功率控制和优化对信道干扰和天线实现均衡,有效抑制信道干扰,提高网络容量。

3.2 MIMO 全局平均吞吐

通过产生规定大小的 UDP 分组模拟分发过程,实验分别设置 30、50 和 1 000 个无线客户端,由一个无线 mesh 接入点下发数据,设置单节点带宽需求为 10 Mbit/s,并预加载 5 s 内容,通过此统计各个节点的吞吐量并取平均值,并计算平均每节点消耗的带宽。为了验证 NSGAnet 算

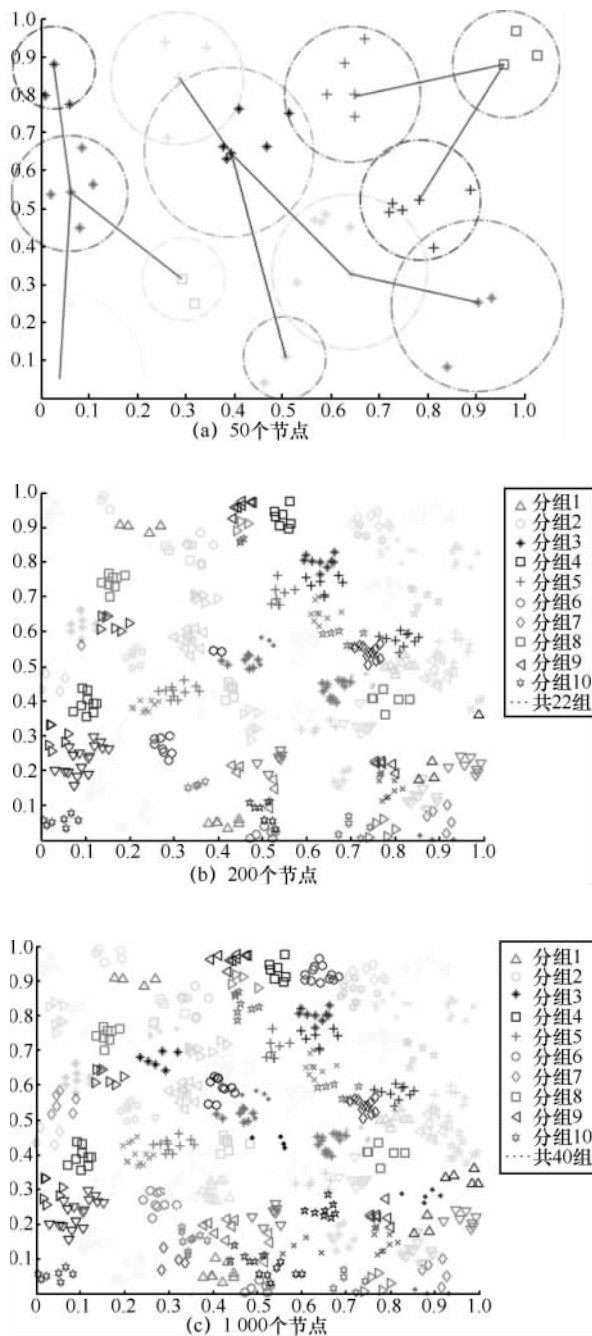


图 3 随机生成的区域内无线节点拓扑结构分类

法的吞吐率,在 MIMO-Testbed 性能测试平台上进行对比仿真。

实验首先对采用 CSMA/CA 的 IEEE 802.11b 无线 mesh 网络和基于 IEEE 802.11n 标准的无线网络对比,无线 mesh 网络节点数量为 30 个,结果如图 4 所示。

仿真结果显示:在用户数量为 1~15 个时,网络都发挥了其应有的性能。如图 4(b)所示,用户节点超过 18 个时,

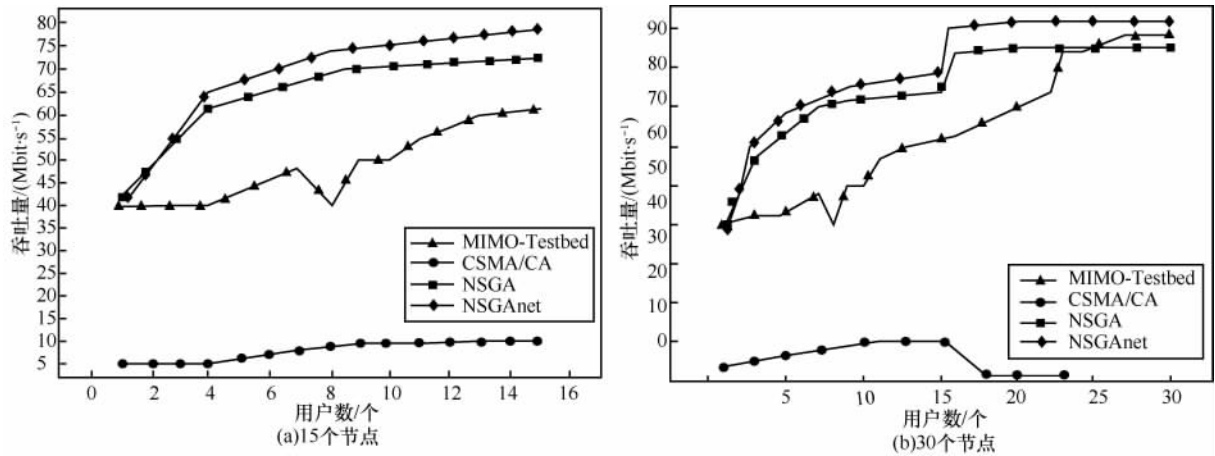


图 4 几种无线 Mesh 网络优化方法对比

表 2 1 000 个节点无线分组状态

组	节点数/个	组	节点数/个
1	61	21	23
2	62	22	19
3	48	23	35
4	50	24	22
5	50	25	16
6	56	26	21
7	53	27	2
8	51	28	7
9	49	29	9
10	32	30	5
11	45	31	7
12	39	32	2
13	46	33	6
14	34	34	4
15	17	35	1
16	37	36	1
17	30	37	1
18	27	38	1
19	6	39	2
20	22	40	1

表 3 200 个节点无线分组状态

组	节点数/个	组	节点数/个
1	21	12	9
2	18	13	4
3	20	14	7
4	15	15	4
5	15	16	6
6	13	17	5
7	13	18	5
8	10	19	2
9	8	20	3
10	12	21	1
11	8	22	1

表 4 50 个节点无线分组状态

组	节点数/个	组	节点数/个
1	6	7	3
2	6	8	4
3	6	9	3
4	5	10	2
5	5	11	2
6	3	12	3

不支持 MIMO 的无线 mesh 网络发生雪崩效应，难以承载更多的用户，同时网络服务质量(QoS)大幅下降，网络发生拥塞。基于 MIMO 的无线 mesh 网络通过新协议和多人多出的支持，更好地发挥了网络性能。

实验结果表明，支持 MIMO 的无线 mesh 网络在用户量急剧增加的情况下能够更可靠地为用户提供服务。

为了更进一步测试 NSGANet 的网络吞吐性能，将基于 IEEE 802.11n 标准的无线 mesh 网络和经过 NSGA2、

NSGANet 优化的无线 mesh 网络进行对比，结果如图 5、图 6 所示。

仿真实验表明，在图 5(a)和图 5(b)所示的无信道优化和网络拓扑分层的标准 IEEE 802.11n 无线 mesh 网络中，网络吞吐量利用率基本不随用户量的增加而变化，无线节点间的带宽利用率较低。通过 NSGA2 算法优化的无线 mesh 网络在用户增加的情况下网络吞吐量有效增加。由于新协议和多人多出技术的应用，在用户逐渐增加的情况

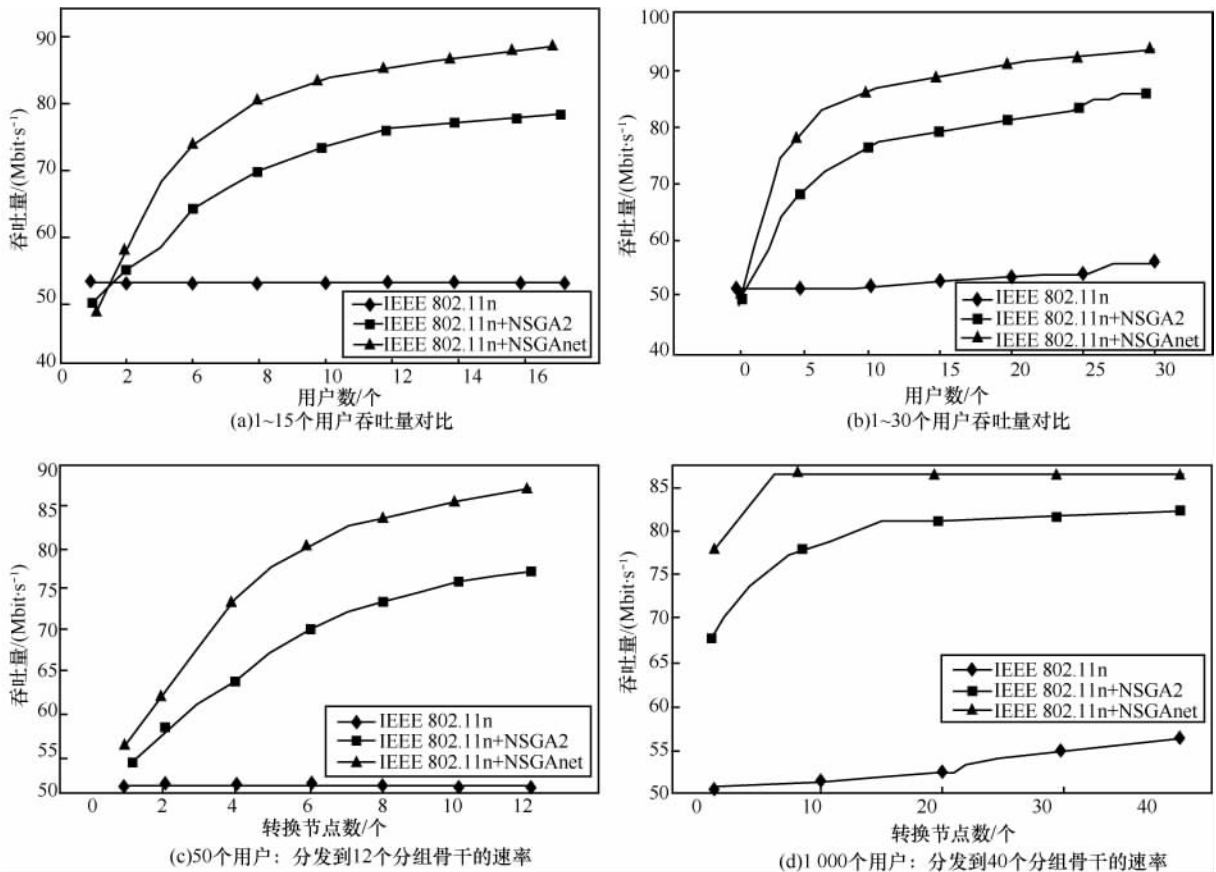


图5 用户数量与全局平均吞吐量对比

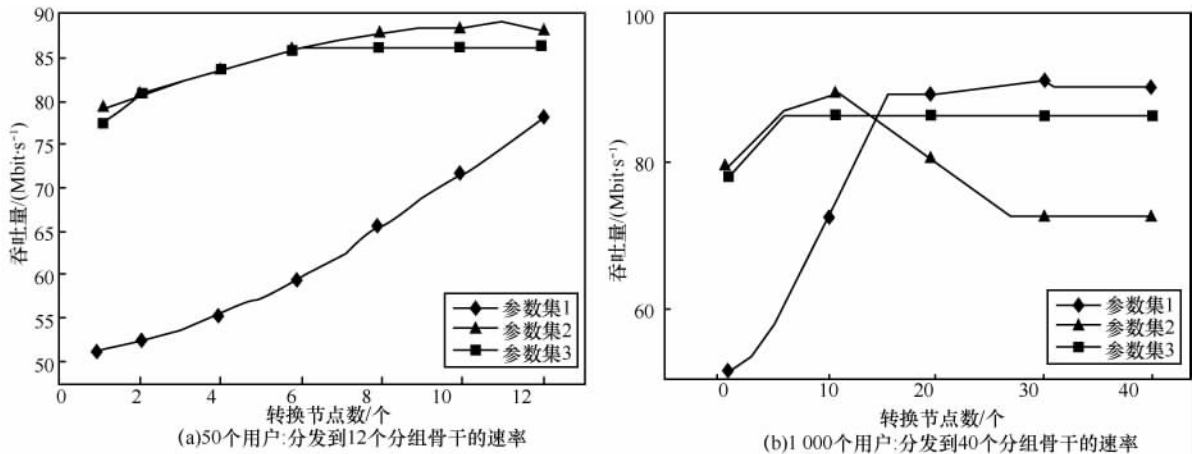


图6 不同参数下 NSGANet 的全局平均吞吐量对比

下两种优化算法都表现出了稳定的承载能力,具有更高的带宽利用率和吞吐稳定性,在用户数量增长的同时平滑地控制节点吞吐量。

实验结果表明,NSGA2 和 NSGANet 两种网络优化方法能有效地优化网络容量,在标准 IEEE 802.11n 无线规范的基础上提高网络利用率。NSGANet 算法在 NSGA2 的

基础上对网络节点属性做了优化调整,吞吐量在用户增加时对网络的优化作用显著。

由于 NSGANet 在信道选择时对节点参数的可变性,通过优化信道选择权重参数,可以获得更好的网络吞吐性能表现。测试选择了 3 组参数集,见表 5。

从图 5、图 6 和表 5 的对比可以看到,不同的优化参

表 5 不同参数集对网络优化结果的影响

参数集	参数			平均吞吐量/(Mbit·s ⁻¹)	
				12 个分组	40 个分组
参数集 1	0.4	0.3	0.3	64.19	81.67
参数集 2	0.1	0.2	0.7	85.61	76.14
参数集 3	0.2	0.4	0.4	84.49	85.98

数将显著地影响网络性能,当权重互相平衡时,网络体现了较为稳定的可靠性,参数偏向功率时对小范围分发的性能提升显著,而服务质量的权重影响着网络的可靠性,这一灵活多变的特性可使 NSGAnet 在复杂网络环境中具有更好的兼容性。

3.3 平均时延

通过统计源到端的数据分组和其时延情况,计算无线 mesh 网关到用户端的数据分组时延,同时通过统计实验中各用户节点的时延,分析用户服务质量。

如图 7 所示,通过第 2.2 节提出的拓扑生成方法,数据分组被首先分发到第一层无线节点并在本组内进行分发,再通过第一层主干分发到第二层节点主干。这种分发方法大幅降低了无线 mesh 接入点的带宽压力和时延,图 8、图 9 给出了数据分组到达时延的统计,从中可以看出 IEEE 802.11n 网络在用户数较少的情况下,无优化的无线 mesh 网络能提供较小的时延,这是因为其基于时分复用(time-division multiplexing, TDM)为用户提供间断的数据流服务,在用户数增加的情况下,服务时隙和信道切换将耗费大量时间。不同参数集对网络优化结果的影响见表 6。

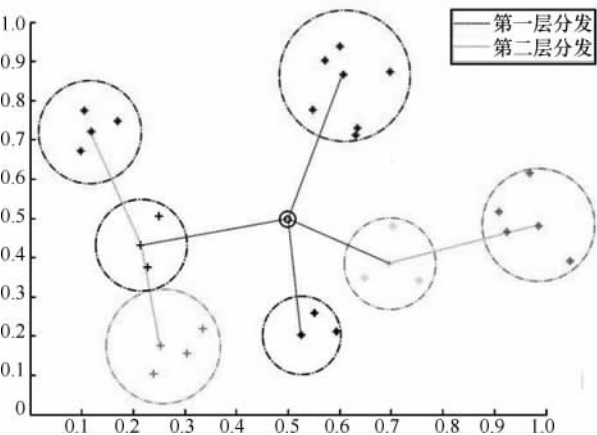


图 7 NSGAnet 分发层拓扑

仿真实验表明:用户较少的无线网络中优化时延效果并不明显。在标准的 IEEE 802.11n 协议下,用户增加的同时时延迅速增加,而通过 NSGA2 和 NSGAnet 优化的无线

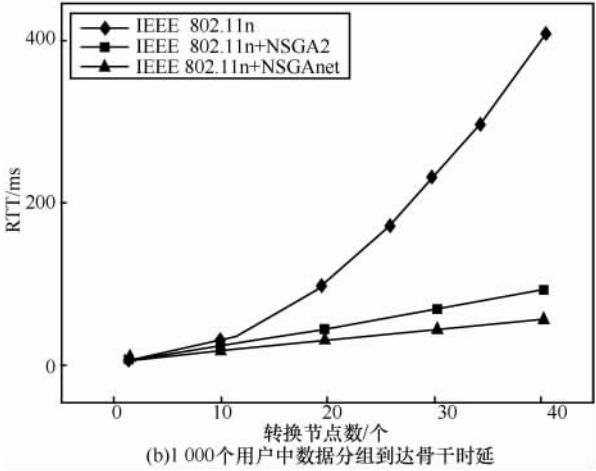
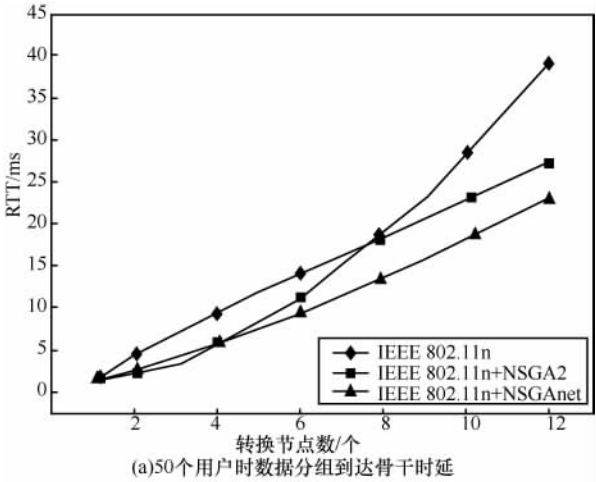


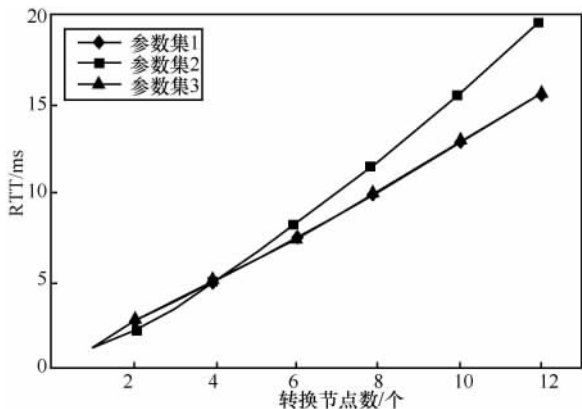
图 8 用户数量与时延

mesh 网络在用户增加的情况下通过应用分发层分类和多人多出,提升了信道利用率。用户节点增加的情况下的时延较为稳定。支持 MIMO 的无线 mesh 网络节点通过应用分发层分类,将大规模无线分发的客户节点时延控制在非常低的范围内,随着分发层的增加,时延略有上升,但是这显著改善了处于弱信号区域用户的覆盖情况。

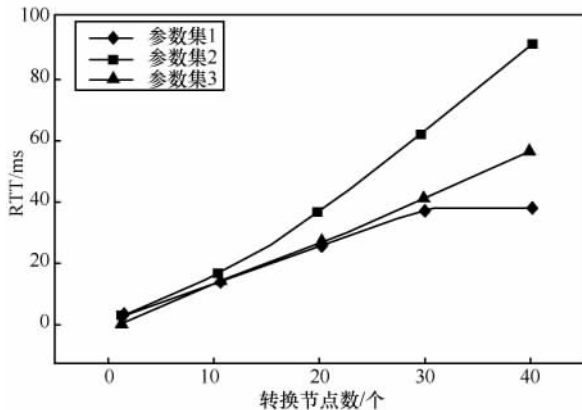
不同参数在用户数量较少时对网络时延并没有明显影响,但分发数量增加到 20 个节点后,参数对网络时延的影响开始显现。由此可以由参数集动态控制网络服务,提供最小时延。

3.4 分组到达率

通过分析分组到达率(packet delivery ratio, PDR)来衡量网络服务质量,同时统计网络中端到端的时延。由图 10 可知,由于 CSMA/CA 的物理实现方法,在服务用户较少的情况下,标准的 CSMA/CA 方法可获得 3 种方法中最佳的分组到达率,但是在用户数量增加后,标准的 CSMA/CA 方



(a)50个用户：分发到12个分组骨干的时延



(b)1 000个用户：分发到40个分组骨干的时延

图9 不同参数下 NSGAnet 的时延对比

表6 不同参数集对网络优化结果的影响

参数集	参数			平均时延/ms	
				12个分组	40个分组
参数集1	0.4	0.3	0.3	9.74	23.87
参数集2	0.1	0.2	0.7	9.62	42.64
参数集3	0.2	0.4	0.4	11.39	26.53

法由于时隙、检查和用户开销骤然增加,远端用户的出现导致服务时隙增大且分组丢失的出现,导致分组到达率骤减,最终变得无法正常为大量用户提供服务。与此同时,通过 NSGA2 算法优化的多入多出 mesh 网络可以在服务大量用户时优化转发路径,继而保证分组到达率在一个较高水平。

为进一步测试 NSGAnet 优化算法在用户量继续增加的情况下对网络的优化质量,本文对其进行了更进一步的仿真测试,如图 11 所示。

仿真实验表明:网络中分组到达率随着传输节点的增加而有所下降,但都维持在 90%以上。通过 NSGA2 算法优化的网络在节点数量增加的情况下,分组到达率不稳定

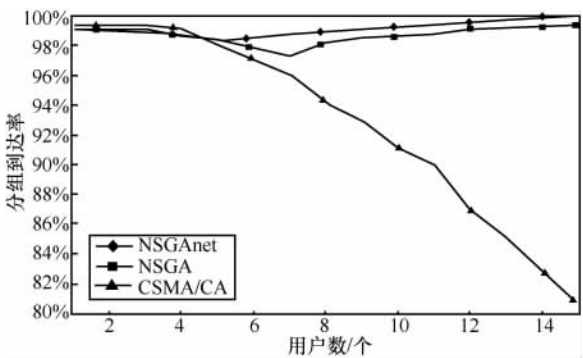


图10 不同无线传输协议与分组到达率的对比

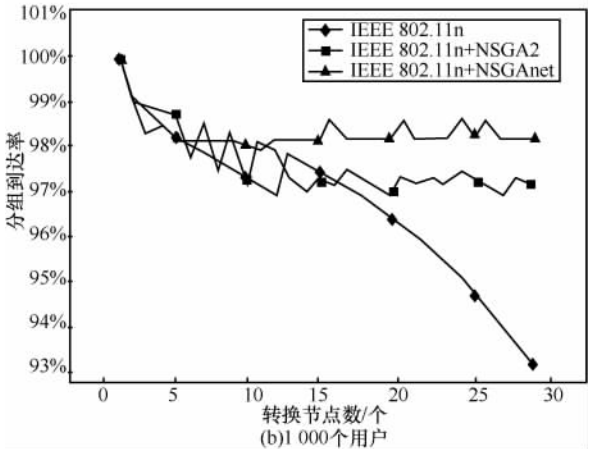
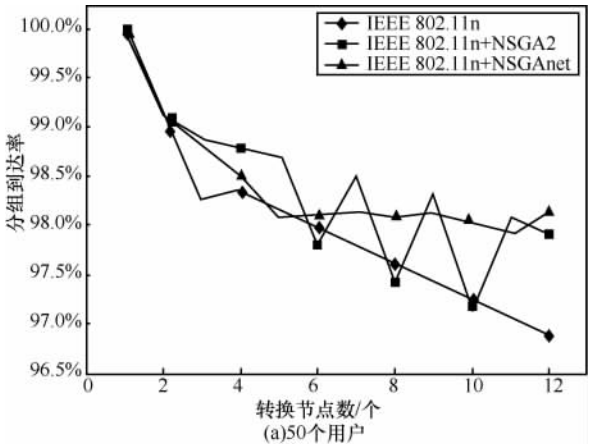


图11 用户数量与分组到达率

且具有随机性,这将影响无线 mesh 网络内容分发质量和效率。

实验结果表明,数据分组到达客户节点的到达率随着传输节点的增加而有所下降,而 NSGAnet 算法对信道和拓扑的优化有效地降低了分组丢失率,使分组到达率保持在较高水平,通过 1 000 个节点仿真测试数据可以看到,在大规模分发时也具有较好的可靠性,保证了网络的正常运行。

4 结束语

基于近些年新提出的无线网络标准,利用其本身支持的基于 MIMO 的多信道复用方法和新标准所带来的全新特性,将 NSGA 算法应用于降低干扰策略和信道分配策略中,对基于 MIMO 的无线 mesh 网络拓扑结构进行优化,充分利用 MIMO 技术的技术特点和优势,尽可能降低邻居节点间的信道干扰并提高并行传输的效率,同时根据无线 mesh 网络的特性设计了多层分发机制,一定程度上降低了无线网络接入点的压力,提高无线 mesh 网络节点的利用率、网络容量和服务质量。针对无线网络用户拓扑结构的复杂性和位置的动态变化性,采用链路质量感知的方法动态地调整优化算法参数,使网络可以自适应地调整其传输链路,提升系统传输性能和可靠性。在与先前算法仿真对比中,吞吐量在不同用户数下提高了 0.5%~21.4%,数据分组到达时延最多降低了 47.6%,1~15 个用户分组到达率均在 97%以上。在未来的工作中,将进一步开展如何简化分发流程、提高无线 mesh 网络服务质量的研究。

参考文献:

- [1] XIE K, WANG X, WEN J, et al. Cooperative routing with relay assignment in multi-radio multihop wireless networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2016, 24(2): 859-872.
- [2] XIE K, WANG X, LIU X, et al. Interference-aware cooperative communication in multi-radio multi-channel wireless networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2016, 65(5): 1528-1542.
- [3] TAROKH V, JAFARKHANI H, CALDERBANK A R. Space-time block codes from orthogonal designs [J]. IEEE Transactionson Information Theory, 1999, 45(5): 1456-1467.
- [4] NARASIMHAN T L, RAVITEJA P, CHOCKALINGAM A. Generalized spatial modulation in large-scale multiuser MIMO systems [J]. IEEE Transactionson Wireless Communications, 2015, 14(7): 3764-3779.
- [5] CHOI J, LOVE D J, BROWN D R, et al. Quantized distributed reception for MIMO wireless systems using spatial multiplexing [J]. IEEE Transactionson Signal Processing, 2015, 63(13): 3537-3548.
- [6] WOLNIANSKY P W, FOSCHINI G J, GOLDEN G D, et al. V-BLAST: an architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel [C]//URSI International Symposium on Signals, Systems, and Electronics, Oct 2-5, 1998, Pisa, Italy. New Jersey: IEEE Press, 1998: 295-300.
- [7] CHAKRABORTY D. I-QCA: an intelligent framework for quality of service multicast routing in multichannel multiradio wireless mesh networks [J]. Ad Hoc Networks, 2015(33): 221-232.
- [8] ZHENG L, TSE D. Diversity and multiplexing: a fundamental tradeoff in multiple antenna channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(5): 1073-1096.
- [9] YANG H H, LI Z J, HU H, et al. Cooperative contents distribution in mobile social network [J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 3(36): 613-625.
- [10] SATO H. Analysis of inverted PBI and comparison with other scalarizing functions in decomposition based MOEAs[J]. Journal of Heuristics, 2015, 21(6): 819-849.
- [11] TRIPATHI P K, BANDYOPADHYAY S, PAL S K. Adaptive multi-objective particle swarm optimization algorithm [J]. IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2007, 390 (2): 2281-2288.
- [12] CHANG P C, CHEN S H, LIU C H. Sub-population genetic algorithm with mining gene structures for multiobjective flowshop scheduling problems [J]. Expert Systems with Applications, 2007, 3(33): 762-771.
- [13] BREIMAN L M, FRIEDMAN J H, OLSHEN R A, et al. CART: classification and regression trees [EB/OL]. (1983-01-20) [2016-08-01]. https://www.researchgate.net/publication/275270590_CART_Classification_and_Regression_Trees.

[作者简介]



乐光学(1963-),男,博士,嘉兴学院教授,主要研究方向为无线网络与分布式系统。



宋昊(1990-),男,嘉兴学院、江西理工大学联合培养硕士生,主要研究方向为无线网络。

熊小峰(1965-),男,江西理工大学教授,主要研究方向为概率统计与计算机建模。

刘建生(1959-),男,江西理工大学副教授,主要研究方向为计算机网络、智能计算。

马柏林(1961-),男,博士,嘉兴学院教授,主要研究方向为数据分析与处理。