

基于贝叶斯博弈的 WLAN 节能机制研究

韩珍珍, 徐 川, 王倩云, 王新恒, 赵国锋

(重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘 要: 针对无线局域网(Wireless Local Area Networks, WLAN)中密集部署无线接入点(Access Point, AP)导致的能耗和同频干扰问题,提出了一种基于贝叶斯博弈的节能机制(BaYesian Game based Energy Saving scheme, BYG-ES). 首先,对通用 AP 设备的能耗进行测量与分析,构建 AP 发射功率-负载-能耗的关系模型;然后,基于该关系模型及软件定义网络控制器实时收集的网络状态信息,设计基于贝叶斯博弈的能耗优化模型;最后,利用社会选择函数求解能耗优化模型,获得干扰限制下最优的休眠 AP 集合和发射功率配置规则,完成用户流量卸载和 AP 发射功率的调整,同时保证 AP 参与博弈的诚实性. 实验结果表明,BYG-ES 节能机制能在减小系统能耗的同时提高网络性能.

关键词: 无线局域网; 软件定义网络; 贝叶斯博弈; 同频干扰; 流量卸载; 发射功率配置

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)10-2083-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.10.009

The Energy Saving Scheme of WLAN Based on Bayesian Game

HAN Zhen-zhen, XU Chuan, WANG Qian-yun, WANG Xin-heng, ZHAO Guo-feng

(College of Information Science and Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Aiming at the problem of energy consumption and co-channel interference caused by dense deployment of access points (APs) in wireless local area networks (WLANs), we propose a Bayesian game-based energy saving scheme (BYG-ES). Firstly, we measure energy consumption on the different real AP devices, and model the relationship among AP transmission power, forwarding load and energy consumption. Then, based on the mathematical relationship model and network status information collected by controller of software-defined network in real time, a Bayesian game based energy optimization design is proposed. Finally, the social selection function is used to solve the energy optimization model, and then the sets of sleeping APs and transmit power configuration rules under the interference constraints are obtained to complete user traffic offloading and AP transmit power configuration. Meanwhile, the BYG-ES can guarantee honesty of all participants during the Bayesian game. Simulation results demonstrate that the BYG-ES can minimize system energy consumption and improve network performances simultaneously.

Key words: software defined wireless networks; software defined network; Bayesian game; co-channel interference; traffic offloading; transmission power configuration

1 引言

随着智能终端的快速普及,移动数据流量呈现出指数增长趋势^[1,2]. 为了满足用户日益增长的流量需求,运营商在校园、企业等公共区域计划部署了越来越多的无线接入设备(Access Point, AP). 然而无线局域网(Wireless Local Area Networks, WLAN)中 AP 设备多是根据系统峰值时段流量需求进行规划,但是峰值时段

很少发生^[3]. 当系统中流量业务较少时,大部分 AP 处于空闲且开启的状态^[4],产生了严重的能耗问题.

系统处于非峰值流量时,休眠部分 AP 并均衡网络负载,能够实现系统能耗的优化^[5,6]. 文献[7]根据系统历史数据流量呈现的特性设定休眠阈值,在不同时段动态地调整 AP 开启数以满足网络需求. 但该类方案缺乏对网络状态实时变化的考虑. 为此,研究者们引入了基于网络状态实时感知的节能机制^[8,9]. 文献[9]通过

收稿日期:2017-09-17;修回日期:2019-06-28;责任编辑:蓝红杰

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61402065);重庆市研究生创新项目(No. CYB18167, NO. BYJS201803);重庆市技术创新与应用示范项目(No. cstc2018jszx-cyzdX0120)

实测数据并结合边际成本模型确定上下限负载阈值,在兼顾网络性能的同时,实现系统能耗最优化.但这种根据历史数据分析设置固定的上下限负载阈值,无法随系统负载变化进行相应地调整,从而存在能耗优化不彻底的问题.

此外,在密集部署的 WLAN 中,由于正交信道较少,不可避免地会使信号相互重叠的 AP 间产生同频干扰,严重影响用户体验(Quality of Experience, QoE)与系统能耗^[10,11].针对能耗干扰协调优化问题,文献[12]提出基于软件定义网络(Software Defined Network, SDN)架构的节能抗干扰方法.当系统处于非峰值流量时期,控制器根据当前网络状态建立虚拟 AP 间的干扰加权图,利用贪婪算法求解最大加权独立集和最小集合覆盖,实现系统节能及干扰协调,但该方案并未考虑 AP 发射功率对干扰以及能耗的影响.

本文提出一种基于贝叶斯博弈的 WLAN 系统节能机制.采用基于 SDN 的集中控制架构,实时获取全网 AP 节点负载、发射功率及用户关联关系等信息,量化 AP 负载、功率和能耗的关系,构建基于贝叶斯博弈的能耗优化模型.在保证用户 QoE 的前提下,将低负载 AP 的关联用户分别切换至相邻各用户可接入的高负载 AP,休眠低负载和干扰大的 AP;并根据实时流量调整 AP 发射功率,减少 AP 间干扰,在提升网络性能同时,实现系统能耗的最优化.

2 能耗问题分析

2.1 密集部署 WLAN 系统能耗问题

密集部署 WLAN 系统基于 SDN 的集中式管理架构拓扑^[13,14]如图 1 所示.

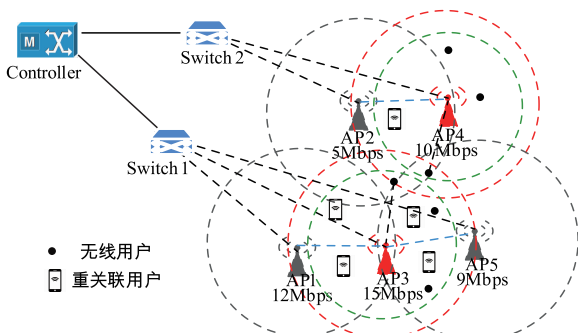


图1 密集WLAN系统集中控制网络架构

图中 AP1, AP2 和 AP5 流量需求远低于单 AP 的转发能力上限,根据当前网络状态将低负载 AP 的关联用户分别切换到相邻各用户可接入的高负载 AP 上,完成流量卸载后休眠空载 AP,可有效提高系统单位能耗的利用率,从而降低网络成本.此外,在休眠 AP 实现节能的基础上,动态地调节 AP 发射功率可以使系统能耗得

到进一步优化,同时能减少 AP 间因覆盖范围相互重叠带来的同频干扰.因此,在保证用户 QoE 的前提下,实现系统能耗优化要解决的关键问题为休眠 AP 选择问题和 AP 发射功率配置规则问题.

2.2 研究思路

针对上述关键能耗问题,本文提出了基于贝叶斯博弈的系统节能方法.首先,通过对实测数据进行回归分析,建立 AP 能耗-发射功率-负载的关系模型;然后,根据控制器实时获取的各 AP 节点信息及相邻 AP 间的干扰关系,结合实测所得能耗关系模型,以最大化各 AP 期望效益为目标,建立基于贝叶斯博弈的能耗优化模型.最后,利用社会选择函数求解系统能耗优化模型,获得干扰限制下系统能耗最优的休眠 AP 集合及发射功率配置规则.

3 基于贝叶斯博弈的能耗优化建模

3.1 能耗模型

根据文献[9]的测试方法,增加发射功率作为影响 AP 能耗的新变量,其变化范围为 $[0, 30]$ dBm,获得不同负载条件下,AP 发射功率与传输能耗的变化关系,具体如图 2 所示.

为取得更加精确的拟合关系式,采取数学分析软件 1stOpt 6.0 对实际测量得到的数据进行快速式自动拟合搜索,确定 AP 能耗-负载-发射功率关系模型,具体拟合所得最优函数关系式如下:

$$P(p, l) = a_1 + a_2 \cdot p + a_3 \cdot l + a_4 \cdot p^2 + a_5 \cdot p \cdot l + a_6 \cdot l^2 \quad (1)$$

其中, l 表示 AP 的有效负载, p 表示 AP 的实际发射功率, $P(p, l)$ 表示 AP 的功率消耗.对实验测得的数据进行最小二乘多项式拟合可以获得多项式的参数 a_i .

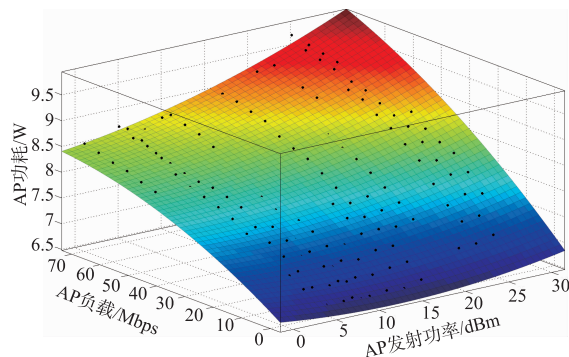


图2 AP发射功率-负载-传输能耗关系拟合图

3.2 基于贝叶斯博弈的能耗优化模型

设 WLAN 系统中部署有 N 个覆盖范围重叠的 AP 设备,且每个 AP 只对自己的私有信息完全了解,即有效负载和实际发射功率.对于任意 AP,系统中其他 AP 的私有信息是 $(N-1)^2$ 个随机组合.将时间划分成时

隙,每个时隙 d 内各 AP 私有信息服从固定的独立同分布. 当网络中接入终端数量较少时, AP 效益不再由用户的实时支付决定,而是以 AP 设备运行能耗为主要影响部分. 结合实测数据分析所得的能耗函数, AP 效益表示为收到来自其他 AP 的支付减去自身运行成本及因负载转移与发射功率调整造成的成本. 当 AP 容量充足且其他 AP 将为自身流量卸载及相应的发射功率配置支付费用时,则所有 AP 都愿为其他 AP 的关联用户服务. 主要符号定义如表 1 所示.

表 1 符号定义

符号	说明
V	用户集合
l_i	AP _{i} 真实负载
l'_i	AP _{i} 声明负载
p_i	AP _{i} 实际发射功率
p'_i	AP _{i} 声明发射功率
S_i	AP _{i} 信道容量
l'_i	AP _{i} 转移负载(转入或转出)
l^{\max}	AP _{i} 负载上限阈值
p'_i	AP _{i} 发射功率变化量
P_i	AP _{i} 功耗
P_i^s	AP _{i} 休眠时功耗
δ_e	运行 AP 设备耗电单价
δ_i	转移单位负载及单位功率配置的耗时成本
y_i	二进制变量, 1 表示 AP _{i} 开启
x_{iv}	二进制变量, 1 表示 AP _{i} 与用户 v 关联

若下一时隙 AP _{i} 选择关闭,则需要转移自身负载到相邻 AP 上, AP _{i} 效益为:

$$\begin{aligned} U_i(l_i, p_i) &= -\delta_e P_i(0, 0)d - \delta_i l_i p_i + r_i \\ &= -\delta_i l_i p_i + r_i \end{aligned} \quad (2)$$

其中, r_i 表示收到其他 AP 支付的费用, $\delta_i l_i p_i$ 表示自身流量卸载到开启 AP 期间的耗电成本.

若下一时隙 AP _{i} 保持开启状态,为接入尽量多的待切换用户,首先调节自身发射功率至最大,结合其关联用户分布及相邻 AP 间的干扰情况,进行功率调节,其效益表示为:

$$U_i(l_i, l'_i, p_i, p'_i) = -\delta_e P_i(l_i + l'_i, p_i + p'_i)d - \delta_i l'_i p'_i + r_i \quad (3)$$

其中,

$$0 < l_i + l'_i \leq \min\{l_i^{\max}, S_i\} \quad (4)$$

$$p_{\min} \leq p_i + p'_i \leq p_{\max}, \forall i \in N \quad (5)$$

式(4)表示转移到开启 AP 上的负载与自身负载之和不能超过单 AP 负载上限与 AP 信道容量两者间的较小值. 否则,会产生大量丢包,降低用户体验质量. 式(5)

为 AP 保持通信的最低发射功率.

为确定能耗干扰协调最优的 AP 开关集合、负载转移集合及发射功率集合. 引入社会选择函数 $x(L', P')$ ^[15], 以求快速的获得系统能耗干扰最优解. 给定一个 AP 集合及它们的声明信息, 根据社会选择函数, 求解获得干扰限制下的能耗最优解, 并将选择函数 $x(L', P')$ 作为影响 AP 效益的变量. AP _{i} 在参与博弈过程中的目标效益函数 U_i 定义为:

$$U_i(x(L', P'), l_i, p_i) = r_i(L', P') - C_i(x(L', P'), l', p') \quad (6)$$

其中, AP 成本函数为:

$$C_i(x(L', P'), l', p') = -\delta_e P_i(l_i + l'_i, p_i + p'_i)d - \delta_i |l'_i| |p'_i| \quad (7)$$

为保证贝叶斯博弈机制的激励兼容和预算均衡性质, 收益函数设计为:

$$\begin{aligned} r_i(L', P') &= E_{L_{-i}, P_{-i}} \left[\sum_{j \neq i} C_j(x(l'_i, \bar{L}_{-i}, p'_i, \bar{P}_{-i}), \bar{l}_j, \bar{p}_j) \right] - \\ &\quad \frac{1}{N-1} \sum_{k \neq i} E_{L_{-i}, P_{-i}} \left[\sum_{j \neq k} C_j(x(l'_k, \bar{L}_{-k}, p'_k, \bar{P}_{-k}), \bar{l}_j, \bar{p}_j) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

4 基于贝叶斯博弈的节能优化算法

输入所有 AP 的声明信息到社会选择函数 x 中, 根据限制条件, 计算能耗最优解:

$$\operatorname{argmin}_{(Y, P^*)} \sum_i \delta_e [y_i (P_i(l'_i + l'_i, p'_i + p'_i)) + (1 - y_i) P_i^s] d + \delta_i |l'_i| |p'_i| \quad (9)$$

$$\text{s. t. } 0 \leq l'_i + l'_i \leq \min\{l_i^{\max}, S_i\};$$

$$0 \leq p'_i + p'_i \leq p_{\max};$$

$$(1 - y_i)(l'_i + l'_i) = 0;$$

$$y_i y_j \big|_{i, j \neq i} = 0; \quad (10)$$

$$\text{SINR}_v \geq \text{SINR}^{\text{th}}, \forall v \in V \quad (11)$$

其中,

$$\text{SINR}_v = \frac{p_i l_{iv}^{-r}}{\sum_{j \neq i} p_j l_{jv}^{-r} + N_0} x_{iv} \quad (12)$$

$$S_i = B \log_2 \left(1 + \sum_v \text{SINR}_v \right) \quad (13)$$

式(9)表示通过求解社会选择函数 $x(L', P')$, 得到系统整体成本最优时的 AP 开关集合 Y 、转移负载集合 L' 及 AP 发射功率集合 P^* . 式(10)表示 AP 自身声明负载与其他 AP 的转移负载之和不能高于单 AP 转发能力上限与 AP 容量两者间的较小值. 且 AP 发射功率的调节必须在一定范围内, 保证 AP 的正常通信. 式(11)为保证用户正常通信的信干噪比 (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR) 条件. 式(12)中, l_{iv} 表示 AP _{i} 与其关联用户 v 的距离, r 表示衰减系数, N_0 表示系统噪声功

率谱密度. 式(13)中, B 表示用户占用带宽.

然而,随着节点的增多,目标函数(9)求解的计算量急剧增加,难以在有效时间内得到一个最优的资源配置方案. 因此,本文提出根据控制器发布的信息对所有 AP 进行预处理,再通过迭代博弈的方式获得一个近似系统能耗最优的资源配置方案. 首先根据各 AP 的声明负载进行分组处理,选中声明负载最大的 AP_{*i*},再从剩余 AP 中选择与 AP_{*i*}的部署距离小于覆盖半径的所有相邻 AP 集成组. 若集合内所有 AP 声明负载总量超过单 AP 转发能力上限与其当前信道容量两者间的较小值时,那么按降序排列,依次移除集合中负载最小的 AP,直到满足该条件. 为了减少开启 AP 数,只需保证负载较大的 AP 在剩下的 AP 中尽量少. 将一组 AP 的声明信息输入到社会选择函数中,并根据式(9)~(13),获得最优解(Y, L^i, P^*):

$$I_a = \operatorname{argmax}_i l'_i, \forall i \in N \quad (14)$$

$$y_i^* = \begin{cases} 1, & i = I_a \\ 0, & i \neq I_a \end{cases} \quad (15)$$

$$l'_i{}^* = \begin{cases} -l'_i, & i \neq I_a \\ \sum_{j \neq I_a} l'_j, & i = I_a \end{cases} \quad (16)$$

$$p_i^* = \min P_i y_i, \operatorname{SINR}_v \geq \operatorname{SINR}^{\text{th}} \quad (17)$$

式(14)~(17)为求解社会选择函数所得最优解. 每组 AP 博弈完成后,排除已处理的 AP,再对剩下的开启 AP 以同样的方式进行预处理,并执行新的博弈. 若某一组 AP 的博弈结果存在其中一个 AP 的部分关联用户不能切换到这组的开启 AP 上. 首先,保持该 AP 为开启状态;然后,根据其未切换用户的分布情况及干扰限制进行发射功率调节,以获得该组的能耗最优解;最后,以其剩余负载及当前最优的发射功率作为新的声明信息加入到下一次的博弈中. 若发现其负载为剩余 AP 中最大值,则调节自身发射功率至最大发射功率,以保证最大覆盖半径从而接入尽量多的待切换用户.

5 实验方法及结果分析

5.1 实验设置

参考文献[9]和[16]中的实验设置,在长宽均为 300m 的实验区域内部署 100 个 AP,单用户流量大小为 2~4Mbit/s 内的随机数值,用户数目从 50 到 800 以 50 为单位增加,表示不同的系统负载. 具体仿真参数如表 2 所示.

5.2 系统节能及性能效果分析

5.2.1 节能效果分析

该部分主要将本文算法与文献[3]中的经典聚簇算法、文献[9]中基于负载阈值的节能算法及文献[11]

中的基于实时感知的节能干扰联合优化 JIT 算法实现的节能效果进行对比.

表 2 仿真参数

参数	数值
δ_c	1 ¥/J
δ_i	0.1s/Mb/dBm
l^{\max}	70Mb/s
d	1s
带宽 B	20MHz
AP 发射功率限制	[0dBm, 30dBm]
AP 最大覆盖半径	40m
热噪声密度	-174dBm/Hz
SINR 阈值	-10dB
总信道数量	3
衰减系数 r	2

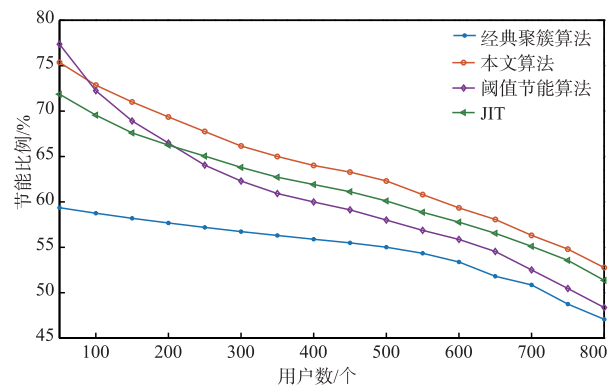


图3 节能效果对比图

由图 3 可得,本文算法在不同系统负载场景下优于文献[3]中的经典聚簇算法,且相较于 JIT 算法最高可提升 4%,最低提升 1%. 当系统负载相对较低时,阈值节能算法的节能效果优于本文算法和 JIT 算法,即后两种算法牺牲了部分节能效果,但系统性能得到提升;随着系统负载的增加,本文算法和 JIT 算法的节能效果逐渐优于阈值节能算法,且差距越来越大,因为 AP 负载不断增加时,系统中不满足阈值条件的 AP 增多,固定阈值节能算法产生的可休眠 AP 数量减少;当系统负载增加到一定程度时,四种算法的节能比例差距逐渐固定,此时为保证用户通信需求,系统中的可休眠 AP 数趋于稳定. 因此,本文算法能更好地适应系统状态的不断变化,实现系统能耗的优化.

5.2.2 性能效果分析

本实验主要验证本文算法能在保证用户 QoE 的前提下,降低网络冗余能耗的同时提升单 AP 的平均信道容量.

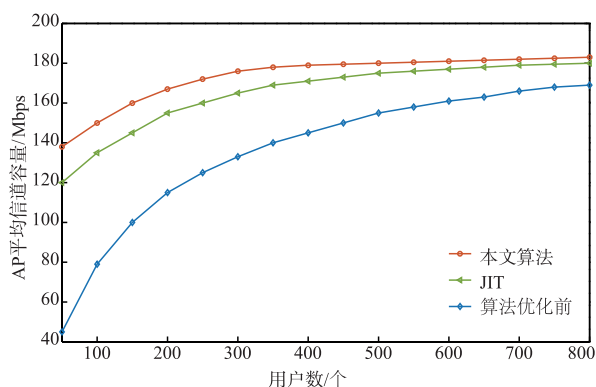


图4 单AP平均信道容量对比图

图4展示了本文算法在执行前后,单AP平均信道容量随系统负载变化的关系图.算法执行前,单AP平均信道容量远低于单AP的最大转发能力,网络设备的资源利用率较低.本文算法与JIT算法相比,在不同负载场景下,单AP的平均信道容量最高提升17%,最低提升2%.单AP平均信道容量高于单AP的最大承载能力,在不受设备限制时可以有效减小开启AP数,从而最大化设备利用率.当系统中的接入用户数较少时,冗余AP会造成不必要AP间干扰,此时,单AP平均信道容量的可提升空间较大.随着用户数的增加,可休眠AP数减少,单AP平均信道容量的提升空间逐渐减小,但仍优于JIT算法,最终AP信道容量逐渐趋于稳定.因此,本文算法能在进一步降低系统冗余能耗的同时提升网络性能.

5.3 各AP效益分析

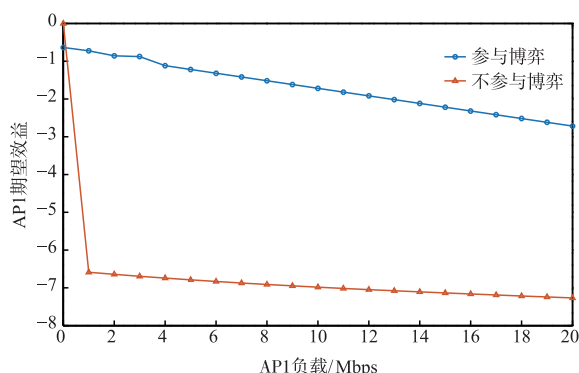
本实验对比分析AP参与协作前后效益变化.以图1中的AP1,AP3,AP5为范例,设负载及发射功率分布如表3所示.

表3 AP负载及发射功率分布

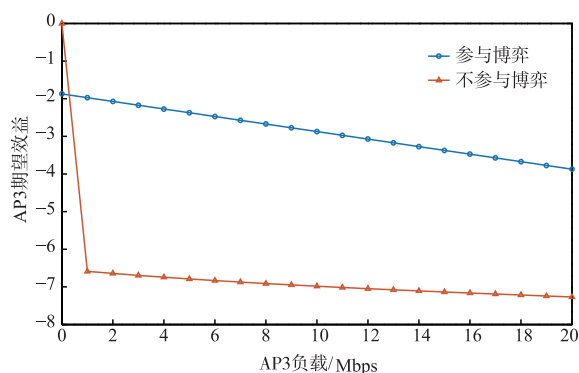
AP	负载/发射功率
AP1	$[0, 20]$ Mbps/ $[0, 20]$ dBm
AP3	$[0, 20]$ Mbps/ $[20, 30]$ dBm
AP5	$[0, 10]$ Mbps/ $[0, 17]$ dBm

图5表示加入与不加入博弈时,AP1和AP3的效益随负载变化的关系图.首先,当AP负载为0Mbps时,不加入博弈时的效益高于加入博弈的效益.因此,空载AP都不愿意加入博弈,针对此类情况,集中控制器将会对该AP直接下发休眠指令.其次,对比图5(a)和图5(b)可以发现,当AP1,AP3负载分别为0Mbps时,AP1的期望效益明显高于AP3,声明发射功率越大,其完成负载转移期间耗损的功耗成本越高,对应的AP效益将越低.最后,随着AP负载的增加,参与协作时的单AP效益高于不参与协作时的效益.因此,除空载AP外,系统

中其他AP都愿意积极加入博弈以相互协作.



(a) AP1期望效益随声明负载变化曲线



(b) AP3效益随负载变化曲线

图5 AP效益随声明负载变化曲线

5.4 激励兼容

本节主要验证贝叶斯博弈机制的激励兼容性质,即AP只有在揭露自身真实信息时,才能获得最大效益.

在博弈过程中,AP1完全了解自身真实负载及发射功率信息,同时能对AP3,AP5的负载分布进行推测,AP1将根据获取到的信息进行信息声明.如图6所示,当AP在揭露自身真实负载信息时,其期望效益实现最大化,如正对角线所示,同时证明本文节能机制满足激励兼容,保证了AP参与博弈的诚实性.

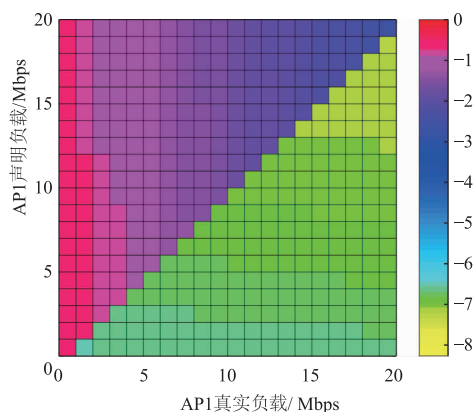


图6 AP1效益随声明负载与真实负载变化曲线

6 结论

针对密集部署 WLAN 系统因冗余 AP 造成的能源浪费及同频干扰问题,本文以实测数据分析所得的 AP 负载、发射功率、能耗模型为基础,以最大化各 AP 效益为目标设计基于贝叶斯博弈的节能抗干扰方案.在保证用户 QoE 的前提下,实现系统能耗优化的同时有效提升网络性能.

参考文献

- [1] 中国互联网络信息中心. 第 43 次中国互联网络发展状况统计报告 [R/OL]. https://cnnic.cn/hlwfzyj/hlwxzbg/hlwtjbg/201902/t20190228_70645.htm, 2019-02-28.
- [2] Cisco. Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2017 - 2022 [EB/OL]. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-738429.html>, 2019-02-18.
- [3] Jardosh A P, Papagiannaki K. Green WLANs: on-demand WLAN infrastructures [J]. *Mobile Networks and Applications*, 2009, 14(6): 798 - 814.
- [4] Feng D, Jiang C, Lim G, et al. A survey of energy-efficient wireless communications [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(1): 167 - 178.
- [5] Xu C, W Jia, Zhu Zu, et al. Energy-efficient WLANs with resource and re-association scheduling optimization [J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2019, 16(2): 563 - 577.
- [6] Li F, Wang X, Cao J, et al. A state transition-aware energy-saving mechanism for dense WLANs in buildings [J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 25671 - 25681.
- [7] Shehadeh D, Montavont N, Kerdoncuff T, et al. Minimal access point set in urban area WiFi networks [A]. *International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks [C]*. Mumbai, India: IEEE, 2015. 221 - 228.
- [8] Rossi C, Casetti C, Chiasserini C F, et al. Cooperative energy-efficient management of federated WiFi networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2015, 14(11): 2201 - 2215.
- [9] Xu C, Han Z, Zhao G, et al. A sleeping and offloading optimization scheme for energy-efficient WLANs [J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(4): 877 - 880.
- [10] Zhang Y, Jiang C, Wang J, et al. Green WiFi management: Implementation on partially overlapped channels [J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2018, 2(2): 346 - 359.
- [11] Lee K, Kim Y, Kim S, et al. Just-in-time WLANs: on-demand interference-managed WLAN infrastructures [A]. *IEEE INFOCOM 2016-The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications [C]*. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2016. 1 - 9.
- [12] Zhao G, Wang Q, Xu C, et al. Analyzing and modelling the interference impact on energy efficiency of WLANs [A]. *2018 IEEE International Conference on Communications [C]*. Kansas, MO, USA: IEEE, 2018. 1 - 6.
- [13] Dezfooli B, Esmaelzadeh V, Sheth J, et al. A review of software-defined WLANs: Architectures and central control mechanisms [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 21(1): 431 - 463.
- [14] Xu C, Jin W, Zhao G, et al. A novel multipath-transmission supported software defined wireless network architecture [J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 2111 - 2125.
- [15] Doron G, Kronick R. Single transferrable vote: An example of a perverse social choice function [J]. *American Journal of Political Science*, 1977, 21(2): 303 - 311.
- [16] Martignon F, Paris S, Filippini I, et al. Efficient and truthful bandwidth allocation in wireless mesh community networks [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking (ToN)*, 2015, 23(1): 161 - 174.

作者简介



韩珍珍 女, 1989 年生于河南商丘. 现为重庆邮电大学通信与信息工程学院博士研究生. 主要研究方向无线局域网优化节能、无线网络测量和无线网络路由.
E-mail: 952139237@qq.com



徐川 男, 1980 年生于重庆. 现为重庆邮电大学教授、硕士生导师. 主要研究方向为未来网络、工业互联网、软件定义网络和网络测量.
E-mail: xuchuan@cqupt.edu.cn



王倩云 女, 1992 年生于四川渠县. 重庆邮电大学研究生. 主要研究方向为无线局域网节能干扰联合优化、无线网络测量.
E-mail: 543580987@qq.com