

基于网络编码多维特征权重的无线 Mesh 网络 接入时间分配机制

黄 辰,王时绘,张 龔

(湖北大学计算机与信息工程学院,湖北武汉 430062;湖北省教育信息化工程技术研究中心,湖北武汉 430062)

摘 要: 本文分析影响系统接入时间分配决策的多种因素,提出基于网络编码多维终端特征权重模型的系统接入时间分配机制 FDMW. FDMW 构建终端编码集合信道多维特征权重模型,自适应调整系统接入时间分配决策. 理论和仿真证明, FDMW 能够动态优化接入时间,有效提升系统整体传输效率.

关键词: 网络编码; 接入时间; 权重

中图分类号: TP301

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2018)09-2207-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.09.023

Network Coding Multi-dimension Feature Definition Model of Weight Based Service Time Allocation Mechanism in Wireless Mesh Network

HUANG Chen, WANG Shi-hui, ZHANG Yan

(Hubei University, Institute of Computer and Information Engineering, Wuhan, Hubei 430062, China;

Hubei Educational Informationization Engineering Technology Research Center, Wuhan, Hubei 430062, China)

Abstract: In this paper we analyse multiple factors which affect system service time allocation decision, and propose a network coding multi-dimension feature definition model of weight based service time allocation mechanism (FDMW). FDMW construct multi-dimension feature definition model, and adjust system service time allocation decision adeptly. Simulation shows FDMW can optimize system service and promote system efficiency.

Key words: network coding; service time; weight

1 引言

无线 Mesh 网^[1]是典型的复合终端接入系统,具备大容量、高速率、覆盖范围广的特点,可为 4G、B4G、5G 无线宽带业务提供强大支持,在东京、台北、纽约等国际大都市智慧无线城市建设中广泛采用,是下一代异构移动互联网基础网络构架. 复合终端接入系统需要适当地分配无线信道资源,使得系统达到尽可能高的频谱效率和整体传输效率,研究如何保障终端接入时间,优化接入时间分配决策,提升系统整体效率.

1.1 接入时间分配决策影响因素

网络编码关注整体传输效率绝对值提高^[2],复合终端接入系统资源分配关注系统接入时间分配策略,可结合网络编码优化系统接入时间分配策略. 系统接入时间分配,需要考虑终端网络编码执行能力、节点缓存区域状态、无线信道干扰多样性、终端通信业务优先

级等多因素,提供差异性服务.

1.2 主要研究内容

影响系统接入时间分配策略的因素包括:网络可用信道^[3]、终端网络编码执行能力^[4]、节点缓存资源状态^[5]、终端多天线间距^[6]、网络可达性^[7]、编码中断概率^[8]、多载波系统用户业务级别^[9]等,将每种因素转化为特征维度,综合分析特征维度影响系统整体传输效率的权重,构建信道多维特征权重模型,自适应调整系统接入时间分配决策,建立资源分配决策优化函数精准定位编码集合成员,提出基于网络编码多维特征权重模型的接入时间稳定均衡分配机制 (Feature Definition Model of Weight, FDMW).

2 系统框架

2.1 系统接入时间度量指数

统计上的系统接入时间度量指数关注链路层窄带

可靠性^[10]. 如果采用归一化的吞吐率, 将使得信道质量差的终端, 获得不匹配的信道接入时间份额, 最终导致系统的整体传输效率下降. 信道接入时间稳定均衡可以保证终端相互独立性, 信道质量差的终端对于其它终端的影响是受控且可预测的.

2.2 信道资源分配多目标决策优化函数

在各个终端采用双向中继编码信道^[11]的基础上, 多目标决策优化函数为信道资源分配决策模块提供系统整体传输效率最大化的传输优化指标组合方案.

(1) 多目标决策优化函数模型

系统包括 N 个终端, 组合方案为 $C = (x_{1a}, \dots, x_{ia}, \dots, x_{Na})$. 终端 i 的组合方案 C 在 j 标准下的传输指标优化度表示为:

$$s_j(x_{ia}) = W(i, i) s_j^{\text{self}}(x_{ia}) + \sum_{t: A(t, i) = 1} W(t, i) s_j^{\text{other}}(x_{ia} | x_{ka}) \quad (1)$$

$s_j^{\text{self}}(x_{ia})$ 为决策方案 x_{ia} 在标准 j 下的传输指标优化度, $s_j^{\text{other}}(x_{ia} | x_{ka})$ 为终端 k 精准定位方案 x_{ka} 在标准 j 下的传输指标优化度, 可以得到多目标决策优化函数如下:

$$\max \sum_{j=1}^p \|a(j) s_j(C)\| \quad (2)$$

(2) 信道多维特征权重模型

多目标决策优化函数在半独立实时系统环境下^[12], 推导出信道多维特征权重模型形式公式. 信道多维特征权重维度包括: 终端网络编码执行能力、节点缓存区域状态、无线信道干扰多样性、终端与信源的距离、终端周边散射环境、终端移动情况、终端通信业务优先级, 总共七个维度.

设定 $W = \{W_t = (W_t^{(1)}, \dots, W_t^{(d)}); 0 \leq t \leq T\}$ 为在 (Ω, F, P) 上 d 维 Brown 自由运动. 设定 $\{b(t) = (b_1(t), \dots, b_d(t))^T; 0 \leq t \leq T\}$ 为传输向量方程. 设定 $\{\sigma(t) = (\sigma_{ij}); 0 \leq t \leq T; 1 \leq i, j \leq d\}$ 为传输过程的特征矩阵. d 种传输指标的优化度 $P_i(t) (i=1, \dots, d)$ 满足随机微分 $(0 \leq t \leq T)$:

$$\begin{aligned} dP_i(t) &= b_i(t) P_i(t) dt + P_i(t) \sum_{j=1}^d \sigma_{ij}(t) dW_t^{(j)}, \\ P_i(0) &= p_i \end{aligned} \quad (3)$$

单个终端的最初系统接入能力为 x , $N_i(t)$ 表示终端 i 在时刻 t 的传输指标优化度. 传输决策在时刻 t 的系统接入能力为 $C(t)$, 单个终端的系统接入能力为 $X(t)$ 满足

$$dX(t) = \sum_{i=0}^d N_i(t) dP_i(t) - C(t) dt \quad (4)$$

记 $\pi_i(t) \equiv N_i(t) P_i(t)$ 表示传输决策满足第 i 种指标的耗费代价 $(1 \leq i \leq d)$. 上式可写成

$$\begin{aligned} dX(t) &= (r(t) X(t) - C(t)) dt + \sum_{i=1}^d b_i(t) \pi_i(t) dt \\ &+ \sum_{i=1}^d \sum_{j=1}^d \pi_i(t) \sigma_{ij}(t) dW_t^{(j)} \end{aligned} \quad (5)$$

单个终端耗费代价是可测的, 同理系统接入能力 $C = \{c(t); 0 \leq t \leq T\}$ 可测且具有有限值, 确保了随机方程有唯一解, 可得编码集合信道多维特征权重模型.

3 编码优化集合组成策略

编码集合组成与编码集合终端精准定位, 以及编码帧组成有关. 编码算法需要虑编码集合生成的关键帧能否被终端解码, 或者能否提高终端编码空间维度, 终端接收到编码帧不代表终端可以解码.

3.1 主动混合编码关联管理策略

信源维护一个常规显式区域关联数据帧. 与常规显式区域相对应的是代表终端编码空间的隐式区域. 存在一个常规显式区域, 多个隐式区域, 由信源统一管理.

主动混合编码关联管理策略的原则: 只要终端嗅探到数据帧 P , 便主动执行混合编码操作, 该数据帧 P 就从信源缓存中删除. 这种关联管理策略, 只要终端正确接收到编码帧, 终端就能知道下一个嗅探的数据帧的线性组合, 从而大大降低缓存区域长度, 减少区域维护的开销, 以及网络拥塞的可能.

3.2 编码优化集合关键帧搜索策略

(1) 编码优化集合

传输效率期望值指单位时间数据传输量的期望. L_i 是终端 $i (i \in g)$ 的原始数据帧 p_i 的长度, γ_i 是终端 i 正确接收原始数据帧的概率, T_g 是编码集合 g 的系统接入时间指标. 终端 i 的传输效率期望 χ_i^g 为 $\chi_i^g = L_i \cdot \gamma_i / T_g$.

编码集合 g 整体传输效率期望定义为内部所有终端传输效率期望之和, 即 $\chi_g = \sum_{i \in g} \chi_i^g$. 编码优化集构造原则是提高终端编码空间维度, 使编码集合整体传输效率, 高于在没有采用网络编码的情况下任何一个终端的传输效率, 即 $\chi_g \geq r_i \cdot \gamma_i$.

(2) 编码优化集关键帧搜索算法

编码优化集中搜索解码关键帧, 采用具有群特征的闭环控制搜索算法, 以编码优化集的信道多维特征权重为反馈量, 以编码优化集整体传输效率期望为参考量, 对于搜索算法的步长因子, 确定 3 种情况的调整策略: (a) 搜索匹配率大于临界值 α . 搜索空间相对平滑和单调, 算法以较大概率找到更优解; 适当增大步长, 减少目标函数计算次数, 增加编码优化集的探索性和搜索范围; (b) 搜索匹配率小于临界值 α . 搜索空间相对复杂, 搜索更优解概率降低; 减小步长, 增加搜索空间开放性, 提高搜索精度; (c) 搜索匹配率等于临界值 α . 编码优化集搜索匹配率在最佳值, 无需调整.

为了参数稳定性, 范围扩展到 [临界值 α , 临界值 β] 区间, 步长因子调整策略:

$$\alpha^{i+1} = \begin{cases} \alpha^i \cdot f_\alpha, & R > \text{临界值 } \beta \\ \alpha^i, & \text{临界值 } \alpha \leq R \leq \text{临界值 } \beta \\ \alpha^i / f_\alpha, & R < \text{临界值 } \alpha \end{cases} \quad (6)$$

其中, R 为搜索匹配幅度的比例, f_α 为步长因子的学习因子, 用来控制算法的适应度, 同时修正发现概率的学习因子 f_p

$$p_\alpha^{i+1} = \begin{cases} p_\alpha^i \cdot f_p, & R > \text{临界值 } \beta \\ p_\alpha^i, & \text{临界值 } \alpha \leq R \leq \text{临界值 } \beta \\ p_\alpha^i / f_p, & R < \text{临界值 } \alpha \end{cases} \quad (7)$$

确定 α 和 p_α 的上下限以防止参数过调, 动态执行以下关键帧搜索算法:

Step 1 初始化编码优化集, 计算所有编码集合成员的适应度;

Step 2 编码集合成员迭代计算产生新解, 新解优于旧解, 替换旧解, 迭代次数 + 1;

Step 3 编码集合成员按照相似度和发现概率产生新解, 新解较优, 则替换旧解, 迭代次数 + 1, 已经匹配的解不再重复计数;

Step 4 计算编码优化集中搜索匹配编码集合成员的比例;

Step 5 记录最优解. 若终止条件不满足, 则重复 Step 2 ~ Step 4.

完成编码集合成员精准定位, 根据终端编码空间, 通过编码算法计算出关键帧.

3.3 优化编码集合的缓存开销

信源的缓存区域稳态分布为 $\pi_k = (1 - \alpha) \alpha^k, k \geq 0$,

其中 $\alpha = \frac{\lambda(1 - \gamma)}{\gamma(1 - \lambda)}$.

任意隐式区域的稳态期望长度为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E[Q_j(t)] = \sum_{j=0}^{\infty} j \pi_j = (1 - \gamma) \cdot \frac{\rho}{1 - \rho} \quad (8)$$

计算常规显式区域长度. T 为稳态下数据帧从进入常规显式区域到脱离区域所经历的时间长度. D_j 为清空第 j 个隐式区域经历时间长度. 显然 $T = \max_j D_j$, $E[T] \geq E[D_j]$.

设数据帧进入常规显式区域, 第 j 个隐式区域的状态为 $Q_j = k$; 由状态 u 转换到 0 所经历的时间期望为 $\Gamma_{u,0} = u/(\mu - \lambda)$, Q_j 同 D_j 的稳态分布一样

$$\begin{aligned} E[D_j] &= \sum_{k=0}^{\infty} E[D_j | \text{State } k] \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \pi_k [\mu \Gamma_{k,0} + (1 - \mu) \Gamma_{k+1,0}] \\ &= \frac{1 - \mu}{\mu} \cdot \frac{\rho}{(1 - \rho)^2} \end{aligned} \quad (9)$$

稳态下常规显式区域的缓存开销为 $E[Q] = \lambda E[T] \geq \lambda E[D_j]$, 即基于主动混合编码关联管理策略思想的信

源物理缓存开销, 在稳态下的复杂度为 $O(1/(1 - \rho)^2)$.

4 系统整体传输效率分析

针对主动混合编码关联管理策略和一般编码关联管理策略, 给定两个实现时间稳定均衡性的资源分配机 L 与 N , 分配的接入时间差异都有界, 分别是 θ^L 与 θ^N . 对于在持续服务跨度 $[t_1, t_2]$ 的任何一组终端, 满足:

$\alpha_i^N(t_1, t_2) - (\theta^L + \theta^N) \leq \alpha_i^L(t_1, t_2) \leq \alpha_i^N(t_1, t_2) + (\theta^L + \theta^N)$
 设 Q_i^L 与 Q_i^N 分别是终端 u_i 在持续服务跨度 $[t_1, t_2]$ 得到的接入时间的集合.

对于资源分配机 L 有

$$\begin{aligned} E[\lambda_i^L(t_1, t_2)] &= \frac{\sum_{t \in Q_i^L} E[\chi_i^g(t) \cdot T_g^t]}{t_2 - t_1} \\ &= \frac{E[L_i] \cdot E[\gamma_i] \cdot \sum_{t \in Q_i^L} E[A_i^g(t)]}{t_2 - t_1} \end{aligned} \quad (10)$$

对于资源分配机 N 有

$$E[\lambda_i^N(t_1, t_2)] = \left(\sum_{t \in Q_i^N} E[\gamma_i^t \cdot L_i^t] \right) / (t_2 - t_1) \quad (11)$$

基于假设条件 $(\chi_j^g T_g) / \delta_i \geq \gamma_i r_i$, 可得

$$\alpha_i^L(t_1, t_2) = E \left[\sum_{t \in Q_i^L} \delta_i^t \right] \leq \frac{E[L_i]}{E[r_i]} * \sum_{t \in Q_i^N} E[A_i^g(t)] \quad (12)$$

又因为 $\alpha_i^N(t_1, t_2) = \sum_{t \in Q_i^N} E[L_i^t / r_i^t]$, 从而有

$$\begin{aligned} E[L_i] \cdot E[\gamma_i] \sum_{t \in Q_i^L} E[A_i^g(t)] &\geq \\ \sum_{t \in Q_i^N} E[\gamma_i^t \cdot L_i^t] - E[\gamma_i] \cdot E[\gamma_i] (\theta^L + \theta^N) \end{aligned} \quad (13)$$

因此, 当给定可以达到时间稳定均衡性的资源分配机 L , 定义 λ_i^{FDMW} 和 λ_i^L 为系统采用及没有采用 FDMW 时, 采用 FDMW 的实际整体传输效率满足 $E(\lambda_i^{\text{FDMW}}) \geq E(\lambda_i^L)$.

5 仿真及试验分析

5.1 仿真环境和目标

在 NS2 平台上检验 FDMW 性能和有效性, 与经典的 COPE^[13] 协议对比, 前期已经在实验室搭建了完整的 COPE 协议仿真环境, 经过多轮测试, 能够完整反映协议细节全貌, 根据国内外最新研究成果及信道资源分配多目标决策优化函数, 调整仿真参数.

5.2 仿真实验

图 1 比较 FDMW 和 COPE 重传降低率同链路丢包率之间的关系. 当链路可靠性较高, 网络编码纠错必要性不大; 而当链路丢包率高达 90% 的时候, FDMW 可以减少超过 80% 的数据帧重传. COPE 由于在构成编码帧的时候没有考虑到终端的网络编码执行能力, 因此终端收到编码帧之后的解码效率较低, 需要多次生成并传输编码帧.

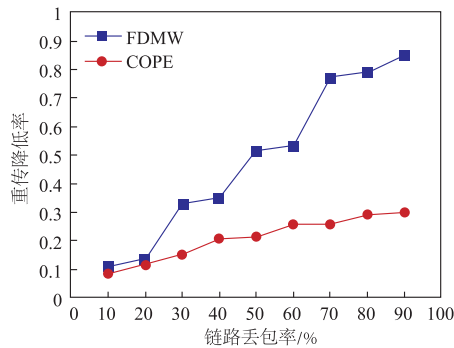


图1 重传降低率同链路可靠性的关系

图2 比较链路丢包率30%, FDMW 和 COPE 重传降低率同终端数量关系. 随着终端数量增加, 形成编码集合机会相应提高, FDMW 和 COPE 的重传率持续降低. 当终端数量增加到 15, 重传率下降幅度放缓. 这表示终端同构环境下, 当编码集合成员数目达到上限值, 编码集合规模不会继续上升, 但 FDMW 系统整体传输效率仍在 COPE 之上.

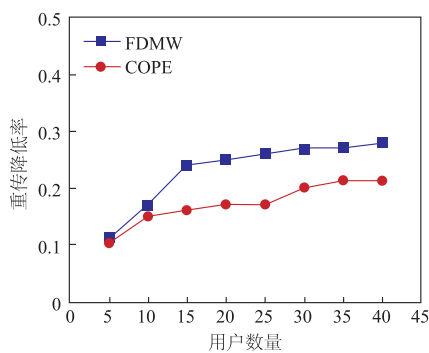


图2 重传降低率与终端数量之间的关系

6 结束语

FDMW 嗅探终端当前的网络编码执行能力和无线信道干扰, 精准定位合适的终端加入编码集合, 以编码集合为单位获取系统接入时间, 再在编码集合内部制定分配原则, 分配系统接入时间. 理论和仿真证明, FDMW 能够有效提高整体传输效率.

参考文献

- [1] 乐光学, 李明明, 丁辉, 刘建生, 骆丹, 马伯林. 无线 Mesh 网络中基于演化博弈的抗振荡信道分配策略[J]. 电子学报, 2016, 44(1): 176 – 185.
- [2] Yue Guangxue, Li Mingming, et al. The anti-channel oscillation channel assignment scheme based on evolutionary game in wireless mesh network[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(1): 176 – 185. (in Chinese)
- [3] Nikolaos Papanikos, Evangelos Papapetrou. Deterministic broadcasting and random linear network coding in mobile

- Ad Hoc networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2017, 25(3): 1540 – 1554.
- [3] 乔宏, 张大方, 谢鲲, 何施茗, 张继. 多射频无线 mesh 网中的联合协作路由与信道分配算法[J]. 电子学报, 2016, 44(6): 1400 – 1405.
- Qiao Hong, Zhang Dafang, et al. Joint cooperative routing and channel assignment in multi-radio wireless mesh network[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(6): 1400 – 1405. (in Chinese)
- [4] Lei Guo, Zhaolong Ning, et al. Joint encoding and grouping multiple node pairs for physical-layer network coding with low-complexity algorithm[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(10): 9275 – 9286.
- [5] Rongqing Zhang, Xiang Cheng, Liuqing Yang, Bingli Jiao. Interference graph-based resource allocation (InGRA) for D2D communications underlying cellular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(8): 3844 – 3850.
- [6] Xiaoming Chen, Derrick Wing Kwan Ng, Wolfgang H Gerstacker, Hsiao-Hwa Chen, A survey on multiple-antenna techniques for physical layer security[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(2): 1027 – 1053.
- [7] 钱俊彦, 徐力, 古天龙, 赵岭忠, 蔡国永. 基于时间动态下推网络可达性分析[J]. 电子学报, 2017, 45(9): 2241 – 2249.
- Qian Junyan, Xu Li, et al. Reachability analysis for time dynamic pushdown networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(9): 2241 – 2249. (in Chinese)
- [8] 唐震洲, 李昌, 阮秀凯, 胡倩. 双时隙多用户线性网络编码协作的中断概率分析[J]. 电子学报, 2016, 44(2): 289 – 294.
- Tang Zhenzhou, Li Chang, et al. Outage probability of two-slots multiuser linear network coded cooperation[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(2): 289 – 294. (in Chinese)
- [9] Mirza Golam Kibria, Lin Shan. Resource allocation optimization for users with different levels of service in multi carrier systems[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2015, 22(11): 1869 – 1873.
- [10] Josu Bilbao, Pedro M. Crespo, Igor Armendariz, Muriel Médard. Network coding in the link layer for reliable narrowband powerline communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(7): 1965 – 1977.
- [11] Dai Jia, Zesong Fei, Jinhong Yuan, Shuang Tian, Jingming Kuang. A hybrid ef/df protocol with rateless coded network code for two-way relay channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(8): 3133 – 3147.
- [12] Moris Behnam, Thomas Nolte, Mikael Sjödin, Insik Shin. Overrun methods and resource holding times for hierarchi-

cal scheduling of semi-independent real-time systems[J].
Industrial Informatics IEEE Transactions on, 2010, 6(1): 93
– 104.

- [13] S Katti, H Rahul, W Hu, D Katabi, M Medard, J
Crowcroft. XORs in the air: Practical wireless network
coding[J]. AIEEE/ACM Transactions on Networking,
2008, 16(3): 497 – 510.

作者简介



黄 辰 男, 福建龙岩人, 1983 年出生, 博士, 硕士生导师, 湖北大学副教授, 研究方向: 物联网、云计算、大数据.

E-mail: huangchen@189.cn