

基于应急融合网络应用的多路径 Bandit 优化算法

伍 富¹, 郑 霖^{1,2}, 李晓记¹

(1. 桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004;

2. 通信网信息传输与分发技术国家重点实验室, 石家庄 050081)

摘 要: 传统的无线通信网络由于结构单一, 性能上诸多受限, 难以保障应急通信的质量。为此, 在认知无线自组织网络与移动蜂窝网络相融合的新背景下, 提出一种多路径 Bandit 算法。将通信中的选路过程分为多时隙路径选择子阶段, 通过对权衡网络时延和能效目标函数的计算进行路径优选, 从而合理地分布网络中各节点的能耗。仿真结果表明, 对比非应急业务应用和贪婪算法, 在融合网络应急业务应用下, 多路径 Bandit 算法的网络生存期提高了 3% ~ 20%。

关键词: 融合网络; 应急通信; Bandit 理论; 有限状态马尔科夫链; 多路径; 多网关

中文引用格式: 伍 富, 郑 霖, 李晓记. 基于应急融合网络应用的多路径 Bandit 优化算法[J]. 计算机工程, 2017, 43(3): 134-139.

英文引用格式: Wu Fu, Zheng Lin, Li Xiaoji. Multi-path Bandit Optimization Algorithm Based on Application of Emergency Convergence Network[J]. Computer Engineering, 2017, 43(3): 134-139.

Multi-path Bandit Optimization Algorithm Based on Application of Emergency Convergence Network

WU Fu¹, ZHENG Lin^{1,2}, LI Xiaoji¹

(1. School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

2. State Key Laboratory of Communication Network Information Transmission and Distribution Technology,
Shijiazhuang 050081, China)

【Abstract】 The traditional wireless communication networks with limited performance caused by its single structure cannot satisfy the quality requirement of emergency communication. To solve this problem, a multi-path Bandit algorithm based on the converged network, which consists of cognitive self-organization network and mobile cellular network, is proposed. The routing process in communication is divided into multi-slot path selecting stages. The trade-off between delay and energy efficiency for multi-path selecting is made to reasonably distribute energy consumption. Simulation results show that compared with the non-emergency business application and greedy algorithm, the network lifetime of multi-path Bandit algorithm are improved by 3% ~ 20% under the converged network emergency business application.

【Key words】 convergence network; emergency communication; Bandit theory; finite state Markov chain; multi-path; multi-gateway

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2017.03.024

0 概述

未来的移动通信系统本质上将是异构、融合的网络环境, 以及各类无线技术和接入系统以一种互补的形式存在, 将这些无线网络技术相融合, 发挥其各自的优势, 才能适应纷繁复杂的现实应用环境。异构无线网络技术融合问题的研究是当今应急应用

技术研究的核心^[1], 尤其是移动蜂窝网络 (Mobile Cellular Network, MCN) 和认知无线自组织网络相融合的技术^[2-3], 它不仅能够解决蜂窝网盲区的通信问题, 扩大网络的覆盖范围, 还能够针对性地保障应急通信业务的服务质量 (Quality of Service, QoS), 为灾难救援、指挥调度、公共安全等提供可靠、灵活的通信链路选择, 因而综合地提升一体化网络的整体

基金项目: 国家自然科学基金 (61362006); 广西自然科学基金 (2014GXNSFBA118288); 广西无线宽带通信和信号处理重点实验室主任基金 (GXKL061501); 通信网信息传输与分发技术国家重点实验室开放课题 (ITD-U14008/KX142600015)。

作者简介: 伍 富 (1989—), 男, 硕士研究生, 主研方向为异构网络融合技术; 郑 霖, 教授; 李晓记, 副教授。

收稿日期: 2016-01-19 **修回日期:** 2016-03-22 **E-mail:** wufu890921@163.com

性能。

单路径路由协议算法相对简单,但并未能权衡网络的综合性能,无法并行或并发地发送数据,导致网络传输率较低,延迟增加,与此同时把过重的负载分布到某一条路径上,使得路径中过载的节点迅速耗尽能源,导致网络连接中断,大大降低网络的可靠性和资源的使用效率。因此,多路径路由选择算法的研究受到了极大的关注^[4-5]。目前已提出的多路径算法有很多,文献[6]提出一种多路径负载均衡路由算法,利用蚁群的自适应和动态寻优能力,在源节点和目的节点之间搜索建立多条传输路径,并将节点剩余能量引入启发因子,均衡节点能量消耗,延长整个无线传感器网络的生命期。文献[7]提出了一种新的能量均衡的非均匀分簇算法,在簇间路径搜寻上,将改进的量子遗传算法引入簇间路由算法中,能够有效均衡网络能量消耗,缓解网络“热区”问题。文献[8]提出一种考虑无线干扰和流平衡的多路径路由协议,使得整个网络整体能耗降低,同时平衡节点的能耗,延长网络生存期。文献[9]介绍了一种无环路链路不相交的 AOMDV (Ad Hoc On-demand Multi-path Distance Vector) 协议,通过设定广播的跳数保证无环路,并使用一个特殊的 flooding 流属性确保链路不相交,此协议有效降低了端到端时延。文献[10]提出一种“Neighbour Disjoint Multi-path (NDM)”相邻不相交多路径构架,此算法选择源节点到汇聚节点最短的一条路径作为初始高效路径,再选 k 条节点不相交路径作为备选路径以防止链路中断,保证了路径的可用性和网络的基本性能。

然而,由于没有考虑路径之间实际交叉或交叠的影响和在融合网络下的实际应用,上述算法均在一定程度上理想化了应用场景和算法模型,使得路径的可选性易于分析,从而简化了路径的优选问题。所谓的路径不相交或不交叠是指所选路径没用经过公共节点或互干扰区域。而这类算法不合理地减小了路径的可选集合,从而降低了算法的实用性,况且,即使路径交叉或交叠,在节点能量和网络延时等性能的允许范围内,依旧可以通过路径优化进一步改善网络性能。因此,在融合网络背景下,多路径的优化仅考虑理想化的路径是不够的,针对不同业务的应用,还需要根据网络资源的分配,网络延时容限和节点能耗等因素进行综合地考虑与优化。

文献[11]引入了一种新颖的多路径选择算法——Bandit 理论模型算法^[12],通过对实时信道可用性和节点资源建模,优化了多路径的选择,提升了网络时延及能耗性能。然而此算法只研究单网络下的一般应用,并未考虑异构网络相融合的背景以及针对应急通信的特殊应用,对于路径之间的交叉、交

叠的问题也未考虑。因此,本文在原 Bandit 理论基础上,进一步完善了路径可交叉、交叠的 Bandit 理论模型,并结合了多网关^[13]、多业务的特点,在自组织网络和蜂窝网络相融合的应用背景下,提出一种多路径 Bandit 模型算法。

1 系统模型

基于 Bandit 理论构建的系统模型,它是由多个具有认知无线电功能的路由节点构成。在自组织网络和蜂窝网共同覆盖的区域,多模网关作为具有特殊功能的路由节点用于连接 2 个异构网络,在源路由节点和网关节点之间,有 N 条用于信息传输的路径;频谱可用状态、信道状态和节点能量状态的变化通过马尔科夫链进行模拟;通信过程分为 T 个时隙,每个时隙即一个路径重选的子阶段,进行 M ($M < N$) 条路径的动态选择,通过以传输时延和节点的能耗作为联合的优化目标,实现对融合网络时延性能和生存期的改善。

1.1 信道状态

考虑到主网络用户对频谱的占用和当前用户可用的频谱资源情况,并根据路径数将可用的频段划分为 N 个块 (N 代表路径数) 即 $g = \{g_1, g_2, \dots, g_N\}$, 每个块再划分为 K 段 (K 表示路径的多跳数), 根据初始状态,可通过有限状态马尔科夫变化过程预测某时刻某路径某一跳的信道状态,即信噪比 (Signal-Noise Ratio, SNR) 来表征;矩阵 $C = \{C_h^k | k \in \{1, 2, \dots, K\}, h \in \{1, 2, \dots, N\}\}$ 用来表示可用频谱;某条路径路由中的某一跳可表示为矩阵 $R = \{R_h^k | k \in \{1, 2, \dots, K\}, h \in \{1, 2, \dots, N\}\}$;用有限状态马尔科夫链 FSMC 来描述衰落信道上接收的 SNR,把 SNR 分为离散个等级即 $\gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n\}$, 每个等级表示在某时隙中信噪比的平均值,并把 SNR 的变化简单地假设其状态仅在相邻的 2 个状态之间变化,SNR 状态依据马尔科夫状态转移规律,其概率矩阵为:

$$\psi_{u_n u'_n}(t) = \Pr(\gamma_h^k(t+1) = u'_n | \gamma_h^k(t) = u_n) \\ u_n, u'_n \in \gamma \quad (1)$$

其中, γ_h^k 表示第 h 条路径第 k 跳的信噪比; u_n, u'_n 分别表示为当前状态和转变后的状态,如图 1 所示。

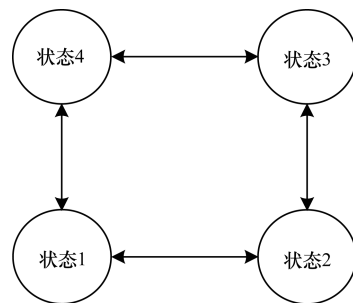


图 1 信噪比状态变化

1.2 信道占用状态

信道占用状态即频谱可用状态,当用户申请占用信道时,分为以下 2 种情况:应急与非应急业务。当属于非应急业务时,由于各个用户平等竞争可用信道的使用权,信道的占用状态服从两状态的离散时间马尔科夫过程,可表示为 $\theta_h^k(t) = 1$ 和 $\theta_h^k(t) = 0, \theta_h^k(t) \in \Theta = \{0, 1\}$ 即表示 t 时刻第 h 条路径的第 k 跳的信道占用状态,其中,“1”表示信道被占用;“0”表示信道空闲。信道状态的转移矩阵:

$$\begin{aligned} T_{g_n g'_n}(t) &= \Pr(\theta_h^k(t+1) = g'_n | \theta_h^k(t) = g_n) \\ g_n, g'_n &\in T \end{aligned} \quad (2)$$

其中, g_n, g'_n 表示变化前后的信道状态。对于应急业务来说,因其对通信质量的需求特殊,应当优先满足,因此,优先对应急业务进行信道分配而无需考虑信道竞争。

1.3 能量状态

根据马尔科夫有限状态变化理论预测的接收信噪比,根据式(1)可得各网关及路由节点的实时能量状态,能量状态变化矩阵:

$$\begin{aligned} E_{e_n e'_n}^a(t) &= \{E_h^k(t) = e'_n | E_h^k(t-1) = e_n, = a_h^k(t)\} \\ E_h^k(t) &\geq 0, t \geq 1 \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $a = a_h^k(t) \in \{0, 1\}$ 表示路径的实时激活状态, $a = 1$ 和 $a = 0$ 表示路径在 t 时刻是否被激活; e_n 和 e'_n 表示变化前后的节点能量状态; $E_h^k(t)$ 则用于描述第 h 条路径的第 k 跳节点的剩余能量状态。

然而,式(3)表示的是在不考虑路径之间互干扰的节点能量变化矩阵,当节点处在其他节点的通信范围内并且与其他节点同时进行信息接收或转发时,将导致接收节点信号收到干扰,即其他节点信号作为噪声影响接收节点的接收信噪比,而当信噪比低于门限值将导致信息重传。

$$SNR_{TH} = \frac{S}{\sum I + N_o} \quad (4)$$

其中, S 为接收节点的有用信号; $\sum I + N_o$ 表示接收节点噪声的总和。

根据文献[14]对路由节点传输能耗和接收能耗研究的结果,可知存在路径互干扰情况致使信息重传的能量状态变化如下:

$$E_h^k(t)' = E_h^k(t) - \frac{1}{1.4} E_T \quad (5)$$

其中, E_T 是传输能耗。

1.4 路径状态

在 $t \in T$ 时段内,路径的状态 $S_h(t)$ 是由 3 个因素相组合来决定,实时频谱占用状态、信道状态、路径中所有路由节点的能量状态决定,可表示为矩阵:

$$\begin{aligned} S_h(t) &= [\gamma_h^1(t), \dots, \gamma_h^k(t), \theta_h^1(t), \dots, \\ &\quad \theta_h^k(t), E_{e_n e'_n}^a(t)] \end{aligned} \quad (6)$$

根据香农定理,第 h 条路径的端到端时延可由信息的传输时延表示为:

$$D_h = \sum_{k \in (1, K)} D_h^k = \sum_{k \in (1, K)} \frac{1}{B \times 0.51b(1 + p_h^k g_h^k / N_o)} \quad (7)$$

其中, p_h^k ($k \in \{1, 2, \dots, K\}, h \in \{1, 2, \dots, N\}$) 是第 h 条路径的第 k 跳节点的功率; g_h^k 是其信道增益; B 为信道带宽; N_o 表示噪声功率。当考虑到路径互干扰时,由于节点之间信道竞争与信息重传所导致的额外传输时延为 D_{cross} , 时延表达式则表示如下:

$$D_h^k = \frac{1}{B \times 0.51b(1 + p_h^k g_h^k / N_o)} + D_{cross} \quad (8)$$

1.5 多网关选择

网关节点作为路径中特殊的路由节点,它的优选是融合网络多路径优化中的一个关键环节,必须综合考虑自组织网络和蜂窝网各自的特点,所以,引入网关能量(Energy)、网关到源节点跳数(Hop)、网关负载(Load)和网关到基站的距离(Distance)这 4 个参量作为网关选择的影响参数,如表 1 所示。网关能量作为考虑网络生存期的参量用于保证通信时长;由于源节点到网关跳数越少,所产生的时延越小,因此网关到源节点的跳数是影响网关选择的重要参量;为了平衡实时通信负载,提高互通容量,引入网关负载参量用于网关选择;网关节点至基站的距离将影响蜂窝网络侧的网关带宽资源和能耗。

表 1 网关选择参数

备选网关	Hop	Load	Energy	Distance
G_1	d_{11}	d_{12}	d_{13}	d_{14}
G_2	d_{21}	d_{22}	d_{23}	d_{24}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
G_m	d_{m1}	d_{m2}	d_{m3}	d_{m4}

由于不同的参数具有不同的量纲,为了将其整合在一起用于网关选择,必须先对其进行归一化,即除量纲化,公式如下:

$$x_{ij} = \frac{d_j^{\max} - d_{ij}}{d_j^{\max} - d_j^{\min}}, 0 < i \leq m, 0 < j \leq 4 \quad (9)$$

其中, m 是备选网关数; $d_j^{\max}$ 和 $d_j^{\min}$ 分别为网关参数中的最大和最小值。

把参数标准化之后,为了描述网关能量、网关到源节点跳数、网关负载和网关到基站的距离这 4 个参量对选择网关时的影响程度,用 w_1, w_2, w_3, w_4 作为 4 个参量的权重系数,通过权重系数和各参量的值可以计算每个路由的性能值,然后再通过式(10),从 m 个备选网关中选择最优的几个网关用于自组织网络和蜂窝网络之间的通信:

$$I_G = \max_{i \in [1, m]} \left(\sum_{j=1}^4 w_j x_{ij} \right), \sum_{i=1}^4 w_i = 1 \quad (10)$$

1.6 系统收益

结合 Bandit 理论和本文的优化目标,并根据上述各公式对网络参数的计算,引入时延和能耗的权重表达式用于对路径的收益进行描述:

$$R_{S_h(t)}^{a_h(t)} = \alpha_1 C_D(D_h) + \alpha_2 C_E(E(t))$$

$$|\alpha_1| + |\alpha_2| = 1 \quad (11)$$

其中, $a_h^k(t) \in \{0, 1\}$ 是路径的选择状态,也称为激活状态,若 $a_h^k(t) = 0$ 则 $R_{S_h(t)}^{a_h(t)} = 0$; α_1 和 α_2 则分别代表端到端延时和能量的权重系数; C_D, C_E 分别为路径总时延和能耗的累积函数,并随着时间的推移不断增加和减少;根据上式,可以将目标函数表达为在整个 T 时隙内,最大化包含折扣因子 β 的系统回报函数,其表达式如下:

$$Z = \sum_{t=0}^{T-1} \sum_{h=1}^N R_{S_h(t)}^{a_h(t)} \beta^t, 0 < \beta \leq 1 \quad (12)$$

1.7 多路径选择

多路径的选择改进为以下 4 步:1) 进行用户业务类型的判断,如果是非应急业务,由于存在信道竞争,根据式(2)进行信道占用状态的判断,如果是应急业务,由于需要优先满足此业务的需求,不论信道占用与否,都将信道置为空闲并分配给其使用;2) 考虑到 Bandit 理论中的动态规划思想,利用每个时隙参数的迭代关系来进行路径选择,在第一个时隙开始,先通过多网关算法从优选的网关中随机选择一个网关节点,再从此网关节点到源节点的 N 条路径中随机激活 M ($M < N$) 条路径用于模拟通信,并通过以上表达式计算其能耗、时延和路径收益,同时记录路径的激活子集,在下一个时隙开始重复这一过程,直到 T 时隙结束,获得整个 T 时隙的路劲随机激活集,同时计算此时的路径质量的累积和,即系统收益值;3) 通过重复第 2 步可以获得 T 时隙下的所有随机激活集,并且得到不同的系统收益值,再通过式(13)可以在能耗和延时折中后的最优系统收益值中获得系统最优的路径激活集,即在每个时隙中路径的最优选择策略;4) 通过执行在模拟通信过程中所获得的各个时隙中的最优路径激活策略,可以使系统延时在延时和能效性上得到改善。

$$Z^* = \max_{u \in U(a_h, S_h)} \sum R_{S_h(t)}^{a_h(t)}(u) \beta^t \quad (13)$$

其中, U 是路径激活集; u 则是其中的一种随机激活策略; β 是折扣因子; $R_{S_h(t)}^{a_h(t)}$ 是路径质量; $a_h(t)$ 是路径激活状态。

2 仿真结果与分析

2.1 仿真设置

本文的多路径选择机制是通过 Matlab 仿真软件实现的。假设接收信噪比被分为 7 种状态,每种状

态的值表示的是某时隙内信噪比的平均值,其状态集合为 $\gamma = (19.2, 19.6, 19.7, 19.9, 20.2, 20.3, 20.8)$ dB, 根据信噪比在相邻状态之间变化的原则,假定状态转移矩阵:

$$P = \begin{pmatrix} 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9 \\ 0.77 & 0 & 0.23 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.65 & 0 & 0.35 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.45 & 0 & 0.55 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.25 & 0 & 0.75 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.33 & 0 & 0.67 \\ 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 \end{pmatrix}$$

频谱占用状态集 $\Phi = \{0, 1\}$, 其状态转移矩阵

$$Pr = \begin{pmatrix} 0.2 & 0.8 \\ 0.1 & 0.9 \end{pmatrix};$$

在网关优选算法中,权重因子为 $w = (w_1, w_2, w_3, w_4) = (0.2, 0.3, 0.1, 0.4)$; 在系统总收益的计算中时延性能和能效的权重因子 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$; 信道增益值为 0.9 ~ 1.0 之间的随机数; 由信道竞争而导致的时延服从 $N(0.0015, 0.0005)$ 的正态分布; 折扣因子 $\beta = 1$; 其他仿真参数由表 2 列出。

表 2 仿真参数设置

参数	值
路由协议	AOMDV
网关工作频率/MHz	800
网关数	8
优选网关中路径条数	10, 9, 6, 14
路径中路由节点个数	5 ~ 10
策略总数	100
仿真时间/时隙	200
基站个数	1
网关与基站距离/m	500 ~ 3 500
网关负载	300 ~ 500

在仿真设置中,融合网络的系统模型是由 8 个网关和若干个路由构成,通过优选 4 条网关,并获得源节点到相应网关节点的多条路径,路径数 6 条 ~ 14 条不等,每条路径设置 5 个 ~ 10 个路由节点,并且按表 2 初始化各个网关路由参数。

2.2 结果分析

首先,在图 2 中比较了应急业务中多路径 Bandit 算法与贪婪算法所得网络生存期。每次仿真中,仅改变节点初始化的能量状态,每个点表示每次在 200 个时隙的仿真中获得的网络生存期。由图 2 可以看出,在应急业务应用下,网络生存期的改善相比非应急业务超过 20%,而相比贪婪算法在每个时隙均获取收益最优的路径而言,多路径 Bandit 算法仍然能够在网络生存期性能上提升 3% ~ 5%,其优化的效果则更佳。

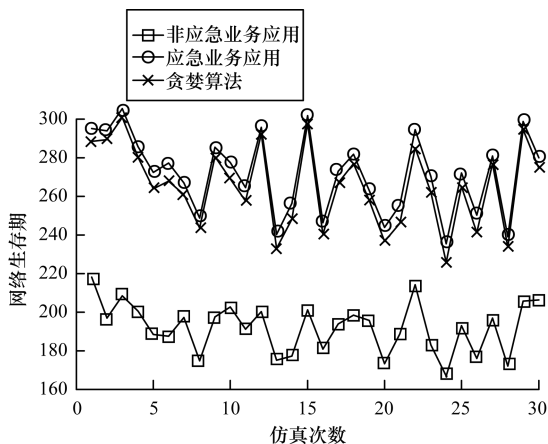


图2 网络生存期的比较

不同算法及业务应用所得到的网络时延的比较如图3所示。虽然贪婪算法使得网络时延维持在较低水平,并且在单次仿真中也会偶尔优于本文所提的算法,但就多次仿真中网络整体平均时延的角度上来看,多路径 Bandit 算法对于网络时延性能的提升相比贪婪算法高出 3% ~ 4%。图中又区别于延时较高的非应急业务的应用,不难看出,Bandit 算法相对于在应急业务应用中整体时延性能上的改善更为明显。

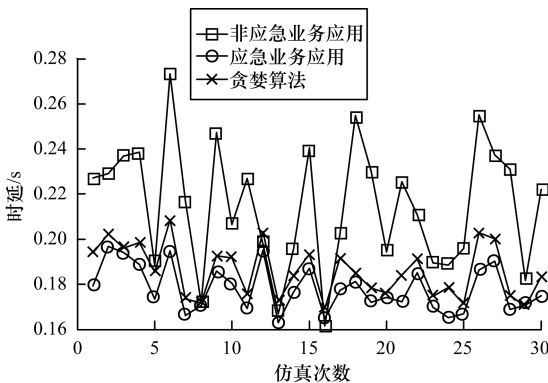


图3 网络时延的比较

如图4所示,为了验证引入路径互干扰对网络整体性能的提升,进行了仿真验证。首先,就引入路径互干扰间与理想无干扰路径做了比较,从图中每次仿真所得到的系统收益值可知,引入路径干扰确实降低了系统收益,因为其可能导致了接收节点信噪比低于门限值,致使信息重传,从而带来能耗和时延的增加。然而,引入路径互干扰实际上放宽了在构建路径时节点选择的限制,增大了可选的网关和路由数,从而扩展了可选路径数,使路径数从 10 条增加到 11 条,尽管随着路径数的增加存在的路径交叉、交叠影响也会以概率增大,但从系统收益上来看已经使其有了明显的提升,即在能耗和时延的整体性能上有了大幅改善。由此可知,对于融合网络下的应急业务,引入路径互干扰对于寻找更多可用路径来提升网络整体 QoS 更为有利。

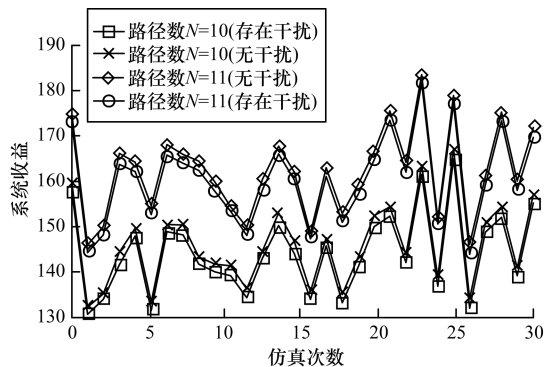


图4 引入路径互干扰的系统收益对比

如图5所示,仿真对本文算法中分时隙路径选择机制与不分时隙路径选择机制进行了对比。不分时隙的多路径选择机制在一次路径选择过后,直到路径失效或者使用完毕再进行路径重选。而分时隙路径选择机制则是在每个时隙都进行路径重选,合理地分布了网络中节点的能耗,避免了由于能耗过于集中于某些路径从而导致的过快失效,从而延长了路径的使用寿命,减少了因路径失效而导致的网络时延,为整个网络中业务的应用提供更多的路径支持。

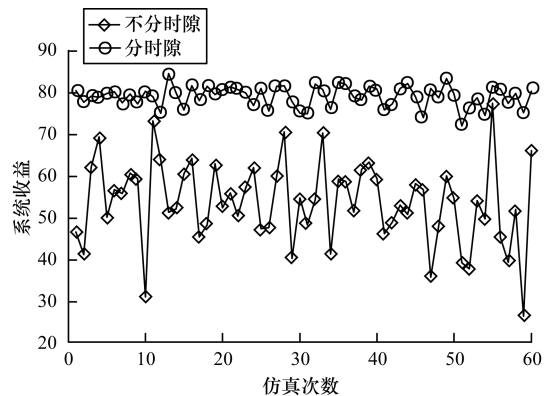


图5 不同路径选择机制的系统收益对比

如图6所示,多路径 Bandit 算法通过对业务类型的区分、频谱资源的优化分配、融合网络中的多参数的综合考虑以及分时隙的多路径重选机制,完成了在融合网络中应急应用的多路径优化选择,模拟随机的路径激活策略获得系统收益,并通过对比得到包含每一个时隙下最优的路径激活集。

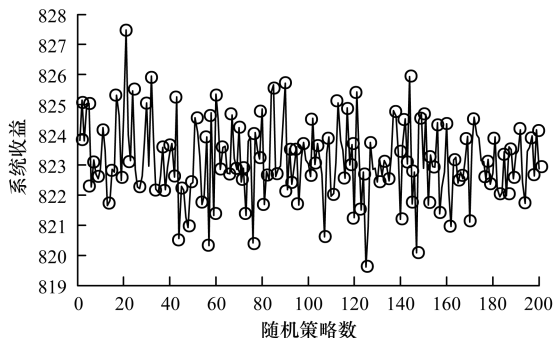


图6 多路径 Bandit 算法的系统收益

3 结束语

本文提出一种多路径 Bandit 优化算法,把多路径选择问题建模为一个 Bandit 理论模型,基于分时隙路径重选的思想,融入了多网关算法,同时也分析了实际存在的路径交叉、交叠问题,并通过计算整个网络时延和能耗的权值目标函数,完成对网络延时和能效性能的优化。通过对比仿真可知,分时隙多路径 Bandit 理论算法在应急网络系统整体时延和能效性能上改善了 3%~20%,从而提高了融合网络中应急保障通信的可靠性和业务质量,在一定程度上为融合网络应急应用的解决方案提供理论支持。下一步研究方向主要是在网络相融合的背景下对网络资源优化分配,以及在多用户情况下保证通信质量。

参考文献

- [1] Wang Jinchun, Du Yang, Ouyang Yuling, et al. An Adaptive Transmission Scheme Based on Emergency for Heterogeneous Network Convergence[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2011: 1-4.
- [2] Ansari N, Zhang C, Rojas-Cessa R, et al. Networking for Critical Conditions[J]. IEEE Wireless Communications, 2008, 15(2): 73-81.
- [3] Zhang Jian, Shan Lianhai, Hu Honglin, et al. Mobile Cellular Networks and Wireless Sensor Networks: Toward Convergence[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(3): 164-169.
- [4] Sha K, Gehlot J, Greve R. Multipath Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey[J]. Wireless Personal Communications, 2013, 70(2): 807-829.
- [5] Radi M, Dezfouli B, Abu B K, et al. Multipath Routing in Wireless Sensor Networks: Survey and Research Challenges[J]. Sensors, 2012, 12(1): 650-685.
- [6] 王敏,李士宁,李志刚. 基于蚁群算法的 WSN 多路径负载均衡路由[J]. 计算机工程, 2011, 37(14): 1-4.
- [7] 王猛. 基于分簇的无线传感器网络多路径路由优化算法的研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2014.
- [8] Tan Minghao, Yu Renlai. Multipath Routing Protocol with Load Balancing in WSN Considering Interference[C]//Proceedings of the 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2011: 1062-1067.
- [9] Marina M K, Das S R. On-demand Multipath Distance Vector Routing in Ad Hoc Networks[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Network Protocols. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2001: 14-23.
- [10] Challal Y, Ouadjaout A, Lasla N, et al. Secure and Efficient Disjoint Multipath Construction for Fault Tolerant Routing in Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Network & Computer Applications, 2011, 34(4): 1380-1397.
- [11] Gui L, Zou S, Zhong X. Distributed Best-route Selection for Multipath Routing in Cognitive Radio Ad Hoc Networks[J]. Electronics Letters, 2012, 48(25): 1630-1632.
- [12] 桂丽. 认知无线自组织网络若干关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.
- [13] Feng Jian, Zheng Lin, Fu Jieliang, et al. An Optimum Gateway Discovery and Selection Mechanism in WSN and Mobile Cellular Network Integration[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Communications and Networking in China. Washington D. C., USA: IEEE Computer Society, 2013: 483-487.
- [14] 梁友. Erlang(k) Bandit 抽样过程[D]. 长沙: 中南大学, 2006.
- [15] Chen Benjie, Jamieson K, Balakrishnan H, et al. Span: An Energy-efficient Coordination Algorithm for Topology Maintenance in Ad Hoc Wireless Networks[J]. ACM Wireless Networks, 2002, 8(5): 481-494.
- [10] 储钟圻. 数字卫星通信[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [11] Spring N T, Wetherall D. A Protocol-independent Technique for Eliminating Redundant Network Traffic[J]. SIGCOMM Computer Communication Review, 2000, 30(4): 87-95.
- [12] Lumezanu C, Guo K, Spring N T, et al. The Effect of Packet Loss on Redundancy Elimination in Cellular Wireless Networks[C]//Proceedings of the 10th SIGCOMM Conference on Internet Measurement. New York, USA: ACM Press, 2010: 294-300.
- [13] Anand A, Gupta A, Akella A, et al. Packet Caches on Routers: The Implications of Universal Redundant Traffic Elimination[J]. SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(4): 219-230.
- [14] Anand A, Sekar V, Akella A. SmartRE: An Architecture for Coordinated Network-wide Redundancy Elimination[J]. SIGCOMM Computer Communication Review, 2009, 39(4): 87-98.
- [15] Anand A, Muthukrishnan C, Akella A, et al. Redundancy in Network Traffic: Findings and Implications[J]. SIGMETRICS Performance Evaluation Review, 2009, 37(1): 37-48.
- [16] Aggarwal B, Akella A, Anand A, et al. EndRE: An End-system Redundancy Elimination Service for Enterprises[C]//Proceedings of the 7th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation. San Jose, USA: USENIX, 2010: 419-432.
- [17] Singh A. System and Method for Incremental and Continuous Data Compression: US7760954[P]. (2010-07-20).
- [18] Linux Foundation. Netem[EB/OL]. [2015-11-25]. <http://www.linuxfoundation.org/collaborate/workgroups/netem>.
- [19] Powell M. The Canterbury Corpus[EB/OL]. [2015-11-25]. <http://www.corpus.canterbury.ac.nz/>.

编辑 陆燕菲

(上接第 133 页)