

基于粒子群算法的无线信道资源分配算法研究

王晓楠¹ 巨永锋¹ 高婷¹ 张福泉²

(长安大学电子与控制工程学院 西安 710064)¹ (北京理工大学软件学院 北京 100082)²

摘要 为了最大化多媒体无线信道资源分配的网络效用,提出了一种新的基于粒子群算法的信道时间分配算法。该算法能够优化分配给网络内每个设备的时间,以便为每位网络用户提供最优化的服务质量(QoS)。所提算法结合了多样性增加函数以及基于个体最优值的学习方法,并基于自适应粒子群算法进行了改进,在持续增强 QoS 的同时加快了收敛速度。在多达 40 个设备的千兆网络环境内对所提算法进行了测试。实验结果表明,提出的算法能够大大提升资源分配能力,尤其是在网络规模较大的情况下。

关键词 无线信道,粒子群算法,资源分配,自适应 QoS

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.10.021

Research on Wireless Channel Resource Allocation Algorithm Based on Particle Swarm Optimization Algorithm

WANG Xiao-nan¹ JU Yong-feng¹ GAO Ting¹ ZHANG Fu-quan²

(School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)¹

(School of Software, Beijing Institute of Technology, Beijing 100082, China)²

Abstract In order to maximize the network utility of multimedia wireless channel resource allocation, a new channel time allocation algorithm based on particle swarm optimization algorithm was proposed. The algorithm can optimize the time allocated to each device in the network so as to maximize the quality of service (QoS) for each network user. The proposed algorithm combines the diversity increasing function and the learning method based on the individual optimal value, and improves the algorithm based on adaptive particle swarm optimization algorithm. The convergence speed of the algorithm increases at the same time of the continuous enhancement of QoS. The proposed algorithm is tested in a gigabit network environment of up to 40 devices. Experimental results show that the proposed algorithm can greatly improve the resource allocation capability, especially in the case of large network size.

Keywords Wireless channel, Particle swarm optimization algorithm, Resource allocation, Adaptive QoS

1 引言

随着互联网带宽的不断增加,互联网视频业务得到了飞速发展。有研究机构预测:1)到 2016 年,各种形式的视频流量总数约占全球互联网用户消费流量的 86%;2)到 2016 年,高清互联网视频将占视频点播的 79%^[1-2]。但资源分配问题随之出现,尤其在未来的无线网络中。一方面,对带宽的需求不断增加,另一方面,无线网络中可用的带宽有限,二者发生严重冲突,在多用户混合应用网络中的无线资源分配问题尤为问题。目前,有一种方法能够解决多用户网络中的无线资源分配问题,即网络效用最大化(Network Utility Maximization, NUM)^[4-5]。在 NUM 中,效用函数用来表示特定应用程序如何根据资源分配量推测质量的好坏。

文献[6]提出利用粒子群算法(PSO)来解决无线视频网络资源的混合规划问题。文献[7]提出最大限度地提升竞争

视频源的加权质量,使用粒子群算法来优化带宽分配,缓解网络拥塞。但是该算法是基于两个竞争的网络设备,无法在大规模网络设备环境下实现。

因此,本文提出了信道时间分配(Channel Time Allocation, CTA)粒子群算法,解决了大规模网络无线资源分配问题。为了寻找最佳设置参数,对群体大小、最大速度、惩罚函数数值以及停止准则等 PSO 关键要素进行了全面研究。由于多样性增加,向 PSO 中的群体引进了多样性,以免在局部最大值处出现收敛。考虑到应用程序类型多样,采用 Pbest 学习方法,其大大缩短了 PSO 的收敛时间。该资源分配方法支持将实时流量精确描述为非凸函数。其次,该方法也支持多应用程序同时分配资源,打破了只能将固定带宽分配给个体服务或者为特定应用程序设置任意优先顺序的限制。因此,提出的方法无需预先规划网络资源。为了证明所提算法的性能,在多达 40 个设备的网络规模内进行了测试。

到稿日期:2016-09-27 返修日期:2016-10-20 本文受国家教育部博士点基金(20121101110037, 9140A04010114BQ010xx),国家自然科学基金(60806043)资助。

王晓楠(1980—),男,博士生,主要研究方向为智能交通信息系统、图像处理、粒子群算法, E-mail: 34610637@qq.com; 巨永锋(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为交通控制与管理、智能测控技术及应用、通信处理; 高婷(1979—),女,博士生,讲师,主要研究方向为图像增强技术、智能交通系统及算法应用; 张福泉(1975—),男,博士,副教授,主要研究方向为创意计算、粒子群算法。

2 多媒体信道时间分配问题

资源分配问题包括优化分配给每个网络设备的时间,以便为每位网络用户提供最优化的服务质量(QoS)^[8-9]。本节介绍了两种应用:1)VoD,点播流存储在服务器内,根据要求传输内容;2)实时IPTV,只能在某一特定时间(事件实时出现时)获得视频流。

2.1 IPTV 效用函数

将音频/视频应用描述为延迟自适应,并且采用逻辑模型描述IPTV效用函数^[10-11],如式(1)所示。

$$f_i^{iptv}(R_i) = \frac{1}{1 + (\frac{1}{\epsilon} - 1)e^{xR_i}}, x = \frac{2\log[\frac{1}{\epsilon} - 1]}{RH_i} \quad (1)$$

其中, ϵ 表示分配带宽为下限 RL_i 时的小IPTV用户效用。上限与下限(分别为 RH_i 和 RL_i)均由应用要求确定。例如,下限是由IPTV最小可接受质量确定,上限是由最大要求质量确定。根据最大数据速率要求 RH_i 对IPTV效用函数(1)进行归一化,从而使效用处于 $[0,1]$ 范围内。对每个效用函数进行归一化后,在NUM问题上每个设备(VoD/IPTV)应该受到同等重视。

2.2 VoD 效用函数

文献[12]提出的失真率(Distortion Rate, DR)模型描述了视频传输过程。根据模型的精确度逼近视频编码器的DR性能,如式(2)所示。

$$D(R) = \frac{\theta}{R - R_0} + D_0, R \geq R_0, D_0 \geq 0, \theta > 0 \quad (2)$$

其中, D 表示视频序列失真,经测量为均方误差; R 表示序列数据速率; θ, R_0 和 D_0 均是单独视频序列特征相关的模型参数。

为了解决多媒体网络资源分配问题,本文提出的视频DR模型以峰值信噪比(PSNR)的形式出现,用于解决最大化问题。视频点播的效用函数如式(3)所示。

$$f_i^{vod}(R_i) = 10 \log_{10} \left(\frac{255^2 (R_i - R_0)}{D_0 (R_i - R_0) + \theta} \right) \quad (3)$$

对式(3)归一化后,IPTV和VoD的效用范围均为 $[0,1]$ 。利用式(4)对VoD效用值 $\tilde{f}_i^{vod}(R_i)$ 进行归一化。

$$\tilde{f}_i^{vod}(R_i) = \frac{f_i^{vod}(R_i) - f_i^{vod}(R_i L_i)}{f_i^{vod}(R_i H_i) - f_i^{vod}(R_i L_i)} \quad (4)$$

2.3 信道时间分配 NUM 问题

NUM问题可被描述为:

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } \sum_{i=1}^{nv} \tilde{f}_i^{vod}(R_i) + \sum_{j=1}^{nt} f_j^{iptv}(R_j) \\ & \text{subject to } \sum_{k=1}^N R_k \leq C, N = nv + nt \\ & \quad CL_k \leq R_k \leq CH_k, \forall k = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (5)$$

其中, N 表示设备总数, nv 表示VoD设备数量, nt 表示IPTV设备数量, C 表示网络和容量。

式(5)中的NUM问题是速率分配问题。将此问题转换为信道时间分配问题,能够对MAC层内的资源分配进行计算。其中, CL 和 CH 分别表示信道时间分配较低要求和信道时间分配较高要求,设CTAP表示信道时间分配周期。数据速率与CTA之间的关系可表示如下:

$$R_i = \frac{CTA_i * R_{mac_i}}{sf} \quad (6)$$

其中, sf 表示超帧持续时间。根据传输链路上的有效带宽生成了 R_{mac_i} 。

$$R_{mac_i} = \frac{l_{data}(1 - per_i)}{\frac{l_{data}}{C_i} + \frac{l_{ack}}{R_b} + 2(\frac{l_{oh}}{R_b} + t_{sfs})} \quad (7)$$

其中, l_{data} 表示帧有效载荷大小, per_i 表示由于链路内信噪比(snr_i)的变化导致出现的误包率, C_i 表示根据文献[12-13]室内环境衰落得出的毫米波信道容量, l_{ack} 表示确认帧大小, R_b 表示基本/控制数据速率, l_{oh} 表示帧开销, t_{sfs} 表示短帧间间隔持续时间。式(7)中的分母表示输出帧所需时间。

$$N_0 = -174 + 10\log_{10}[B] + F \quad (8)$$

$$PL = A + 20\log_{10}[f] + 10n\log_{10}[d] \quad (9)$$

$$snr_i = P_R - L_I - N_0 \quad (10)$$

信道容量 C_i 由式(11)描述的标准链路预算分析确定。

$$C_i = B\log_2[1 + snr_i] \quad (11)$$

$$P_R = P_T + G_T + G_R - PL \quad (12)$$

其中, B 表示系统带宽, snr_i 表示信噪比(SNR)。SNR是在17°C标准温度、带宽 B (用Hz表示)和噪声因数 F 等条件下根据接收信号功率 P_R 、收发器实现损耗 L_I 以及热噪声水平 N_0 得到的。 P_T 表示传输功率, G_R 和 G_T 分别表示接收器和发射器的天线增益。 PL 是根据阴影衰落^[12]得出的60GHz室内环境路径损耗模型,其中, f 表示载波频率(用GHz表示), d 表示发射器与接收器之间的距离(用m表示), A 表示衰减值, n 表示路径损耗指数。

确定物理层链路质量能够确保在优化范围内公平地为设备分配资源,即,如果由于链路较弱导致设备在较低数据速率条件下进行传输,则需要使用较长的CTA才能够获得与使用较好链路设备相同的QoS。此外,提出了一个代表典型毫米波无线电链路的模型。在带有 CL_k 和 CH_k 的式(13)中,根据式(6)计算出CTA的NUM。

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } \sum_{i=1}^{nv} NU_i^{vod}(CTA_i) + \sum_{j=1}^{nt} U_j^{iptv}(CTA_j) \\ & \text{subject to } \sum_{k=1}^N CTA_k \leq CTAP, N = nv + nt \\ & \quad CL_k \leq CTA_k \leq CH_k, \forall k = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (13)$$

3 提出的算法

式(13)属于非凸优化问题,通过PSO能够得到解决。就利用PSO解决资源分配问题而言,搜索空间维数表示无线网络中设备的数量。因此,CTAs向量表示每个群粒子,群粒子大小表示网络中传输设备的数量。在每次迭代过程中,根据下式对每个粒子的速度 V_i 以及位置 X_i (X_i 表示CTA向量)进行更新。

$$V_i^{t+1} = \omega V_i^t + c_1 r_1 (Pbest_i^t - X_i^t) + c_2 r_2 (Gbest_i^t - X_i^t) \quad (14)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (15)$$

其中, t 表示迭代次数, ω 表示惯性权重因数, c_1 和 c_2 表示加速常数, r_1 和 r_2 表示均匀分布随机数。惯性权重 ω 用于控制之前速度对速度更新的贡献。 c_1 和 c_2 表示粒子最佳位置与群最佳位置的权重。 $Pbest$ 表示单个粒子的最佳位置。 $Gbest$ 表示搜索空间内的最佳粒子位置。

粒子一直跟踪搜索空间内的坐标,最终目标是到达

Gbest。根据适应函数值 F 可以确定最佳解决方案。CTA 问题中的 PSO 适应函数 F 如式(16)所示:

$$F = \begin{cases} \sum_{i=1}^N U_i(CTA_i), & \text{if } \sum_{i=1}^N CTA_i \leq CTAP \\ \sum_{i=1}^N U_i(CTA_i) + \gamma(CTAP - CTA_i), & \text{否则} \end{cases} \quad (16)$$

其中, $\gamma(\gamma > 0)$ 表示惩罚值。惩罚值必须满足下列约束条件: 总分配时间不得超过可用资源(即 CTAP)的分配时间。

对于资源分配问题, 必须集中实现 PSO。将 n 个粒子初始为随机位置, 以满足每个设备上 CTA 边界的约束条件。确定每个粒子的适应值, 并设置 $Pbest$ 和 $Gbest$ 。对每个粒子的速度以及位置进行迭代更新, 直至满足约定的停止准则。然后, 将信道时间分配给网络中的设备。

为了寻找最佳设置参数, 需要对群体大小、最大速度、惩罚函数值以及停止准则等 PSO 关键要素进行全面研究。由于篇幅有限, 此处仅对结果作出说明。

1) 群体大小: 群体大小会根据对获得最优解所需函数的求值次数所做的贡献对算法收敛速度产生影响。函数求值 = 群体大小 \times 迭代次数。对每个规模条件下的群体大小范围进行估计, 结果表明与网络相关的群体大小直接影响总效用。表 1 列出了上述数值。

表 1 自适应群体大小

网络设备数量	群体大小
2~10	40
11~20	60
21~30	80
31~40	100

2) 最大速度: V_{max} 可以设置为每个维度内变量动态范围的 10%~20%。对于 CTA 问题而言, V_{max} 与所需最大 CTA 值和最小 CTA 值(分别为 CAT_{max}^d 和 CAT_{min}^d) 有关。根据式(17)能够计算出 V_{max} 值。最优设置比例 σ 为 0.1 或者 10%。

$$V_{max}^d = \sigma(CAT_{max}^d - CAT_{min}^d) \quad (17)$$

3) 惩罚函数: 惩罚函数的设定十分关键, 能够确保不会违背 CTAP 约束条件。在 CTA 的 NUM 中, 惩罚因数((式(16)))与 CTAP 总容量约束条件以及单个 CTA 极限值(CTA_{min} 和 CTA_{max}) 有关。根据 CTA 范围[0ms, 15ms] 对数值的范围进行了测试。在 CTA 的 NUM 测试范围内, 惩罚因数产生了最优总效用。

4) 停止准则: 采用基于分布的停止准则方法, 该方法使用距离测量技术, 能够确定搜索空间内群体的扩展。本文迭代 1000 次, 在每次算法迭代时执行停止准则方法。

4 基于自适应粒子群算法的改进

基于网络应用实际, 需要制定信道时间分配 NUM 问题的方案, 用于较大规模网络中(如 30/40 个设备)如何在紧凑的时间尺度内解决动态资源分配的问题。

因此, 为了制定完整的解决方案, 除了上一节介绍的 PSO 参数设置以外, 本节进一步扩展 PSO。相较于其他若干 PSO 方法, 自适应粒子群算法(APSO)^[7] 具有收敛效果较好和执行时间最短的优势。因此, 本文将 APSO 作为进一步优

化所提算法的基础。此处对两个特定算法进行定义: 1) 多样性增加函数, 即向 PSO 中的群体引进多样性, 以免在局部最大值处出现收敛; 2) Pbest 学习方法, 即采用了与无线网络流量相关的学习, 大大缩短了 PSO 收敛时间。为了方便分析, 对拥有 40 个带有 50% VoD 流量和 50% IPTV 流量的设备网络进行了模拟。

4.1 多样性增加函数

通过对所提算法进行测量来观测群体性能。根据观测结果可知, 当粒子向 Gbest 移动时, 在一段时间内群体内的粒子会越来越相似。相似性是指在任何维度内某一粒子的数值与群体内另一个粒子的数值几乎一样。移除群粒子不会持续提升收敛速度。

多样性描述的是群体内粒子的差异或者变体。此处对相似性与多样性进行区分: 相似性是指两两对比差异, 而多样性是指整个群体的多样化。我们利用粒子与群体内其他粒子之间的平均 Hamming 距离来量化群体多样性。

平均 Hamming 距离如式(18)所示:

$$\bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^{NP-1} \sum_{j=i+1}^{NP} H(a_i, b_j)}{\sum_{i=1}^{NP-1} (NP-i)} \quad (18)$$

其中, NP 表示群体大小。

群体如果多样性水平较低, 则可能会在局部最大值附近进行收敛。粒子 a_i 与粒子 b_j 之间的 Hamming 距离可表示为:

$$H(a_i, b_j) = \sum_{k=1}^D |a_{ik} - b_{jk}| \quad (19)$$

其中, D 表示粒子维度。

图 1 给出了根据 APSO 得出的 40 个设备的群体多样性收敛曲线。从图 1 可以看出, 开始时群体多样性水平较高, 但在前 150 次迭代内迅速降低, 随后一直处于较低水平, 这表示其正在探索局部最大值。

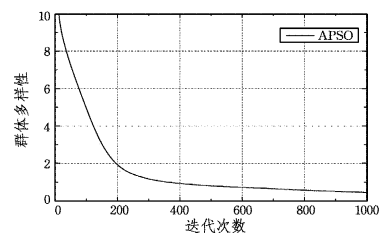


图 1 自适应粒子群算法群体多样性收敛曲线

通过向 PSO 引进新函数来增加群体多样性, 以免在局部最大值处出现收敛和停滞。

在设置的时间间隔内, 利用平均 Hamming 距离测量式(19)对群体多样性进行测量。为了避免不必要的函数计算, 将时间间隔(int)设置为 100 次迭代。如果群体多样性低于给定的阈值, 则需要执行多样性函数。根据实验观测结果, 将阈值设置为 1。为了获得最佳适应值, 根据 Pbest 对粒子进行分类。去除 50% 适应度较低的粒子, 同时保留剩余 50% 的适应度较佳的粒子以便更好地了解样本群体。事实上, 如果在全局最大值处获得群体, 将不会中断收敛进程。然后, 再引进新粒子, 以弥补去除的 50% 的粒子, 使群体又获得了多样性。

图 2 给出了在 40 个设备上执行多样性函数之后群体多样性变化的效用曲线, 其表明利用 APSO 提升了总效用。

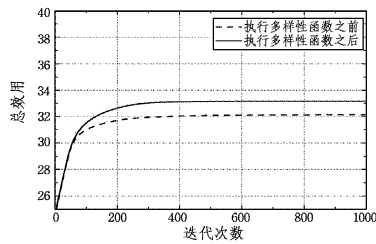


图2 多样性函数响应

4.2 Pbest 学习方法

在视频序列中,帧大小以及图像组(GoP)大小都能够反映出视频场景内容的本质。对于动态资源分配问题,本文采用了Pbest学习单元,又称PBL。在初次执行算法之后,网络设备数量保持不变,且使用之前的最佳粒子位置,而不是在每次执行算法时随机化群体的粒子位置。在考虑了GoP的Pbest位置之后,算法能够缩短当前GoP的收敛时间,通过平均迭代次数(见表2)可以看出迭代有所提升。

表2 采用Pbest学习方法(PBL)得出的算法收敛

	随机	25% PBL	50% PBL	75% PBL	100% PBL
平均迭代次数	787	728	726	708	729

从表2中可以看出,75%的Pbest粒子的收敛速度得到了极大提升。学习方法必须考虑到多个场景同时变化时设备要求的突变影响以及进入/离开网络的设备影响。为此,设置了范围变化阈值 rng ,如果超过该阈值,PBL会遭到抑制,从而生成整个随机群体。同理,如果请求CTA的设备数量 N 发生变化,则采用随机群体生成算法。

所提算法结合了多样性增加算法、Pbest学习方法以及PSO关键要素等3个方面,相较于其他PSO方法,能够在更短的收敛时间内实现全面优化资源分配。

本文对实现全面探索搜索空间的整个过程进行了探讨。在接下来的探索中,所提算法显示出了实现最大总效用的能力,从而有助于制定网络最佳资源配置的解决方案。在证实了所提算法的性能之后,继续执行PSO,迭代次数设为1000。图3给出了算法的收敛结果。

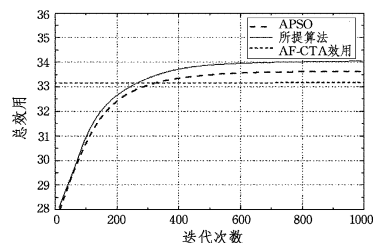


图3 在1000次迭代条件下,所提算法与APSO的收敛结果比较

从图3可以看出,采用了本文算法之后效用逐步增加,但是从大约850次迭代开始趋于稳定,增加幅度可忽略不计。相比之下,采用未使用多样性增加函数的APSO方法之后,在大约200次迭代时达到局部最大值,直到1500次迭代之后才开始增加。图4同样也显示了CTA绝对公平性(AF-CTA)的结果,证明了NUM方法的优势。采用AF-CTA之后,所有设备平均分配信道时间,除非分配超过设备要求(在该情况下,剩余设备平均分配额外时间)。

5 性能结果

通过模拟实验对所提算法的性能进行了分析。表3列出了模拟实验中使用的各项参数。IEEE 802.15.3c信道模型参数是根据文献[12]中的测量结果选取的。7个H.264/SVC单层HD视频轨迹^[7]用作随机起始点,表示每个设备中的不同视频。

表3 性能分析参数

参数	数值
信道频率 f	62.5GHz
传输功率 P_T	10dBm
天线增益 G_T, G_R	9dBi
实施损耗 L_i	5dB
衰减值 A	32.5
路径损耗指数 n	2.0
MAC有效载荷 l_{data}	1500bytes
PHY/MAC标头 l_{oh}	34bytes
带宽 B	1.782GHz
噪声因数 F	10dB
l_{sfs}	2.5μs
基本速率 R_b	12.5Mbps
ACK l_{ack}	34bytes

对于VoD服务而言,网络中的每个设备都会随机选择视频,用于显示CTA请求信息。每个IPTV设备也发送CTA请求信息,以便获得随机选择的视频(TV信道)。根据图像群组(GoP)要求设定了较高和较低CTA要求,较高CTA要求是指传输所有GoP帧所需的时间;较低CTA要求是指仅传输GoP I帧所需的时间。然后,执行提出的算法,并且每个设备都具备最佳CTA。

图4给出了在带有50%VoD和50%IPTV流量的网络规模条件下的性能结果。将提出的算法与AF-CTA的资源分配结果进行了比较,每次在100个时间间隔内计算平均性能值。图4中平均PSNR值和平均效用值表明:如果根据所提算法向接收设备传输VoD和IPTV流,可以看出在实际网络中实现了PSNR值的增加,相较于AF-CTA,所提算法大大提升了所有网络规模条件下的资源分配能力。

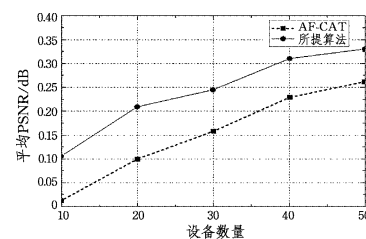


图4 所提算法与AF-CTA在收敛行为方面的对比(50%VoD和50%IPTV)

结束语 本文提出了一种基于粒子群算法的信道时间分配算法,该算法能够解决混合无线媒体信道资源分配问题,实用性较强;适用于实际操作,直接满足描述了应用程序的QoS要求。实验结果表明,在采用了CTA绝对公平性的标准资源分配方法之后,资源分配能力得到大大提升,尤其是在网络规模较大的情况下。此外,相较于APSO,所提算法的收敛速度更快,同时在QoS方面也有所提升。

参考文献

- [1] FENG W, FENG S L, DING Y H, et al. Cross layer resource al-
(下转第141页)

- Role Based Access Control. ACM, 1998.
- [8] WEI M L, ZHANG M Q, TANG J, et al. Formal Modeling of Complex Network Security Based on MAS[J]. *Computer Science*, 2015, 42(3): 102-105. (in Chinese)
危美林, 张明清, 唐俊, 等. 基于 MAS 的复杂网络安全形式化建模[J]. *计算机科学*, 2015, 42(3): 102-105.
- [9] QIAN Z J, LIU W, HUANG H. OSOSM: Operating System Object Semantics Model and Formal Verification[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2012, 49(12): 2702-2712. (in Chinese)
钱振江, 刘苇, 黄皓. 操作系统对象语义模型(OSOSM)及形式化验证[J]. *计算机研究与发展*, 2012, 49(12): 2702-2712.
- [10] 屈延文. 形式语义学基础与形式说明[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [11] KUNČAR O, POPESCU A. A Consistent Foundation for Isabelle/HOL[C]// ITP. 2015: 234-252.
- [12] ELPHINSTONE K, HEIESER G. From L3 to seL4 what have we learnt in 20 years of L4 microkernels? [C]// Twenty-Fourth ACM Symposium on Operating Systems Principles. 2013: 133-150.
- [13] NIPKOW T, PAULSON L C, WENZEL M. Isabelle/HOL: a proof assistant for higher-order logic[M]. Springer Science & Business Media, 2002.
- [14] KINGHT G. LinSec-Linux Security Protection System [EB/OL]. <http://www.linsec.org/doc/final.pdf>.
- [15] 佩莱德. 软件可靠性方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [16] CALZAVARA S, RABITTI A, BUGLIESI M. Formal Verification of Liferay RBAC[M]// Engineering Secure Software and Systems. Springer International Publishing, 2015: 1-16.
- (上接第 112 页)
- location based on outdated channel state information in wireless multi hop networks [J]. *Journal of Electronics and Information Science*, 2014, 36(11): 2750-2755. (in Chinese)
冯维, 冯穗力, 丁跃华, 等. 无线多跳网络下基于过时信道状态信息的跨层资源分配[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(11): 2750-2755.
- [2] ZHAO N, WU M H, XIONG W, et al. Research and Simulation of Multi-channel spectrum resource allocation and optimization [J]. *Computer Simulation*, 2016, 33(1): 209-213. (in Chinese)
赵楠, 武明虎, 熊炜, 等. 多信道频谱资源优化分配仿真研究[J]. *计算机仿真*, 2016, 33(1): 209-213.
- [3] SHAO J J. Research on Key Technologies of channel access and resource allocation in wireless body area network [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2015. (in Chinese)
邵剑集. 无线体域网的信道接入和资源分配关键技术研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
- [4] LIAO S B, TAN Y M. The convergence analysis of the algorithm for maximizing the utility of wireless networks [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2014, 34(8): 807-812. (in Chinese)
廖盛斌, 谭运猛. 无线网络效用最大化算法的收敛性分析[J]. *北京理工大学学报*, 2014, 34(8): 807-812.
- [5] LI Q, HE D Z, GUAN Y F, et al. A suitable resource allocation method for digital television channel uplink[J]. *TV Technology*, 2015, 39(11): 94-98. (in Chinese)
李青, 何大治, 管云峰, 等. 一种适合数字电视上行信道的资源分配方法[J]. *电视技术*, 2015, 39(11): 94-98.
- [6] LIU Q, NIU H, XU W, et al. A service-oriented spectrum allocation algorithm using enhanced PSO for cognitive wireless networks[J]. *Computer Networks*, 2014, 74: 81-91.
- [7] GOUDARZI P. Scalable video transmission over multi-hop wireless networks with enhanced quality of experience using swarm intelligence[J]. *Signal Processing Image Communication*, 2012, 27(7): 722-736.
- [8] XU J C. Multi period mobile communication channel assignment equilibrium model [J]. *Science Bulletin*, 2015, 31(10): 145-147. (in Chinese)
许健才. 移动通信中多时段信道分配均衡模型[J]. *科技通报*, 2015, 31(10): 145-147.
- [9] FENG W J, LI J J, WANG P. Parameter optimization and sensitivity analysis of cognitive radio based on particle swarm optimization [J]. *Computer Science*, 2011, 38(10): 87-90. (in Chinese)
冯文江, 李俊建, 王品. 基于粒子群算法的认知无线电参数优化及敏感度分析[J]. *计算机科学*, 2011, 38(10): 87-90.
- [10] OUYANG D T, HE J S, BAI H T. A constrained particle swarm optimization algorithm for wireless sensor network node localization algorithm [J]. *Computer Science*, 2011, 38(7): 46-50. (in Chinese)
欧阳丹彤, 何金胜, 白洪涛. 一种约束粒子群优化的无线传感器网络节点定位算法[J]. *计算机科学*, 2011, 38(7): 46-50.
- [11] LIU L, JIN T, FU L, et al. An improved call admission control and resource allocation for multimedia in wireless networks[J]. *Signal Processing*, 2007, 23(3): 343-347. (in Chinese)
刘莉, 荆涛, 付立, 等. 一种优化无线多媒体业务接入允许控制和资源分配算法[J]. *信号处理*, 2007, 23(3): 343-347.
- [12] ZHU Y, TANG C, SONG L, et al. Analytical and comparative investigation of 60 GHz wireless channels[J]. *Telecommunication Systems*, 2015, 60(1): 179-186.
- [13] ZHAO C X, CHEN F L, WANG R C, et al. Research and development of multi objective gateway deployment of wireless Mesh network with integrated channel assignment [J]. *Computer Research and Development*, 2015, 52(8): 1831-1841. (in Chinese)
赵传信, 陈付龙, 王汝传, 等. 融合信道分配的无线 Mesh 网络多目标网关部署[J]. *计算机研究与发展*, 2015, 52(8): 1831-1841.
- [14] ZHENG P Y, HE S B, ZHANG X Y, et al. A Game-based Channel Assignment for Wireless Mesh Networks [J]. *Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science)*, 2013, 27(4): 90-95. (in Chinese)
郑鹏宇, 何世彪, 张馨月, 等. 一种基于博弈论的无线网状网络信道分配算法[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2013, 27(4): 90-95.