

# 基于联合优先级调度的协作动态频谱分配机制设计

王凡<sup>1,2,3</sup> 姚富强<sup>2</sup> 赵杭生<sup>2</sup> 冯少栋<sup>1,4</sup> 张建照<sup>1,2</sup>

(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)<sup>1</sup> (总参第六十三研究所 南京 210007)<sup>2</sup>

(中国人民解放军 73682 部队 徐州 221006)<sup>3</sup> (中国人民解放军 96610 部队 北京 102208)<sup>4</sup>

**摘要** 在协作频谱接入过程中,共享频谱各网络中的频谱需求呈现高度动态性,现有机制难以兼顾分组传输时延和服务公平性。针对这一问题,提出一种基于联合优先级调度的协作动态频谱分配机制。将频谱分配问题建模为比例公平模型并联合网络的服务等级和用频请求的到达时间为各网络设定动态服务优先级,解得分配结果后,基于分配频谱的中心频率与需求频谱的中心频率最近的原则将频谱资源分配给各网络。仿真结果表明,与已有的基于网络固定优先级调度、基于网络动态优先级调度和基于用频请求动态优先级调度的协作频谱分配机制相比,本机制能够更好地保证网络获取频谱的公平性,并且在分组传输时延性能上有所改进。

**关键词** 动态频谱分配,协作频谱接入,调度,时延,公平

**中图分类号** TN915.01 **文献标识码** A

## Coordinated Dynamic Spectrum Allocation Mechanism Design Based on Combined Priority Scheduling

WANG Fan<sup>1,2,3</sup> YAO Fu-qiang<sup>2</sup> ZHAO Hang-sheng<sup>2</sup> FENG Shao-dong<sup>1,4</sup> ZHANG Jian-zhao<sup>1,2</sup>

(PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)<sup>1</sup>

(The 63rd Research Institute of the General Staff, Nanjing 210007, China)<sup>2</sup>

(Troop No. 73682 of PLA, Xuzhou 221006, China)<sup>3</sup> (Troop No. 96610 of PLA, Beijing 102208, China)<sup>4</sup>

**Abstract** In coordinated spectrum access, when the networks sharing the same spectrum have highly varying spectrum requirement, existing mechanisms cannot provide better performance of end-to-end time delay and fairness. To tackle this problem, a coordinated dynamic spectrum allocation mechanism based on combined priority scheduling was proposed. The mechanism models the spectrum allocation as proportional fairness and set dynamic priority to networks by combining the service grade of networks and the arrival time of spectrum requirement. After figuring out the results of the proportional fairness model, the mechanism allocates spectrum according to the results based on the criterion that the center frequency of allocated spectrum is close to the spectrum requirement. The simulation results show that the proposed mechanism can provide better fairness of spectrum allocation than existing mechanisms as network(or terminal) static priority, network(or terminal) dynamic priority and request dynamic priority based coordinated dynamic spectrum allocation, and also brings improvement in terms of performance of end-to-end time delay of packet transmission.

**Keywords** Dynamic spectrum allocation, Coordinated spectrum access, Scheduling, Time delay, Fairness

## 1 引言

联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)的 Spectrum Policy Task Force 报告指出,无论从空域还是从频域分析,大部分的已分配频谱没有使用<sup>[1]</sup>。空域上,无线局域通信的快速发展以及高频段新技术的出现使得传输距离缩短,导致大多数频谱在很多地域内处于空闲状态。时域上,新兴的无线业务(如:集图像、声音、视频、文本为一体的多媒体业务)呈现突发性,导致大多数频谱在很多时间段内处于空闲状态。在现行的静态频谱分配体制下,已分配的频谱禁止其他用户接入使用,可分配的频谱资源越来越少。频谱

资源利用率过低和频谱资源紧缺<sup>[1]</sup>这一对矛盾使得静态频谱分配体制面临着不可避免的改革。为了使频谱资源的管理能够与高速发展的无线业务相适应,动态频谱接入和动态频谱管理新技术成为近年来的研究热点。

网络的业务随时间和空间变化呈现异构性,使得网络间协作共享频谱能够提高频谱利用率。泛在移动网络动态智能频谱(Dynamic Intelligent Management of Spectrum for Ubiquitous Mobile Networks, DIMSUMNet)项目<sup>[2]</sup>就是利用业务的异构特征,提出协调式频谱分配,在不同网络和终端间共享频谱。无线通信城市规划(Urban Planning for Radio Communications, URC)项目<sup>[3]</sup>在业务随时间变化更加剧烈的城

到稿日期:2011-01-11 返修日期:2011-04-01 本文受国家自然科学基金(61072077)资助。

王凡(1984-),女,博士生,主要研究方向为认知无线电、频谱管理, E-mail: wangfan19841116@gmail.com; 姚富强(1957-),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为军事通信抗干扰、频谱管理; 赵杭生(1962-),男,博士后,研究员,主要研究方向为频谱管理、认知无线电; 冯少栋(1981-),男,博士生,主要研究方向为资源管理、卫星通信等; 张建照(1985-),男,博士生,主要研究方向为频谱管理、认知无线电路由协议。

区,提出动态规划频谱,以提高频谱利用率,在短时间周期内,预测不同无线应用的频谱需求,并根据需求重新规划频谱。将这种周期性地根据网络或终端随时间变化的业务需求重新给网络或终端分配频谱的过程称为动态频谱分配<sup>[4,5]</sup>。

每个分配周期内,有的网络或终端(为了表述简便,下面以“网络”代替“网络或终端”)由于业务量减少而释放部分频谱,而另外一些网络会因为业务量的增加要求更多的频谱资源。只要在释放频谱的网络和需求频谱的网络间进行频谱的重新分配,即可完成动态频谱分配。这种供需匹配的方式避免了重新对整段频谱进行分配,能够降低频谱分配过程的复杂度。然而,若网络的业务呈现高突发性,其用频需求将具有高度的动态性,在一些分配周期内,释放的频谱不能满足所有频谱需求。在这种“短时过载”情况下,简单的供需匹配不能兼顾网络的分组传输时延性能和用频的公平性。针对这一现象,本文提出一种基于联合优先级调度的协作动态频谱分配机制。在中心频谱代理处调度网络的用频请求,以保证网络中分组传输的端到端时延性能和频谱分配结果的公平性。

## 2 系统模型

系统架构如图1所示。多个网络(或终端)通过协商接入同一段频谱,称为协作频谱接入频段(Coordinated Spectrum Access Band, CSAB)。中心频谱代理进行周期性频谱分配。每一个分配周期,各个网络预测下一个分配周期本网络的频谱需求,或释放多余的频谱(称为频谱供应),或向中心频谱代理请求更多的频谱(称为频谱需求)。中心频谱代理将释放的频谱资源公平地、高效地分配给提出新的频谱需求的网络。在CSAB足够支撑当前所有网络的用频请求时,将频谱供应和频谱需求进行合适的匹配。当CSAB不足以支撑当前分配周期所有网络的用频请求时,中心频谱代理调度网络的需求<sup>[6-8]</sup>,以达到合理的频谱分配。一般地,中心频谱代理根据用频请求在需求队列中的顺序来进行频谱分配。

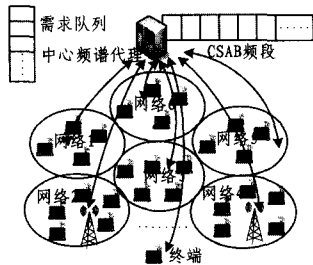


图1 网络架构

将CSAB分为带宽相同的 $C$ 个不重叠的信道,各信道具有相同的特性。 $M$ 个网络协商使用这些资源。分配周期内,网络预测在下一个分配周期的频谱需求。释放频谱形成频谱供应矢量,记为式(1)。需要获得更多频谱的网络的频谱需求形成频谱需求矢量,记为式(2)。

$$\vec{S} = \{\vec{S}_1, \dots, \vec{S}_i, \dots, \vec{S}_M\} \quad (1)$$

$$\vec{D} = \{\vec{D}_1, \dots, \vec{D}_j, \dots, \vec{D}_{M2}\} \quad (2)$$

式中, $M1+M2=M$ 。而且, $\vec{S}_i$ 表示第 $i$ 个网络释放的信道及其中心频率; $\vec{D}_j$ 表示第 $j$ 个网络需要的信道及第 $j$ 个网络当前所使用频谱的中心频率。具体表示如下

$$\vec{S}_i = \{\dots\{m, f_m\}, \dots\} \quad (3)$$

$$\vec{D}_j = \{D_j, f_j\}$$

式中, $\{m, f_m\}$ 表示第 $m$ 个信道在当前周期属于网络 $i$ ,在下一个周期将被释放,可分配给其他需要更多信道的网络; $f_m$ 为信道 $m$ 的中心频率。 $D_j$ 为网络 $j$ 在下一个周期所需的信道数, $f_j$ 为网络 $j$ 当前所使用频谱的中心频率。

在 $C$ 个信道能够充分满足 $M$ 个网络的信道需求时,不需要考虑公平性和频谱分配时的调度问题。但是,随着无线业务的飞速发展,网络对频谱的需求越来越大,且网络的业务越来越呈现突发性,其对频谱的需求会在某一时段很高、在另外一些时段较低。提出在中心频谱代理处对用频请求进行调度的频谱分配方式,以解决在 $C$ 个信道无法满足 $M$ 个网络的信道需求时保证网络间用频的高效和公平问题。

## 3 已有的基于调度的协作动态频谱分配机制

每一个分配周期前,中心频谱代理将供应频谱的网络释放的信道作为待分配资源。将需求频谱的网络的用频请求进行排序,依序满足网络的信道需求。根据排队的顺序对需求频谱的网络进行服务的过程称之为调度。已有的基于调度的协作动态频谱分配机制分以下几类:

(1)根据各网络的服务等级对需求频谱的网络进行排序,依序将需要的频谱分配给这些网络,直到频谱资源分配完毕。没有得到满足的需求等待下一个分配周期。将这种方式称为基于网络固定优先级调度的协作频谱分配机制(network(or Terminal) Static Priority Based Coordinated Dynamic Spectrum Allocation, TSP-CDSA),如图2(a)所示。

(2)初始分配时,每个需求网络按照服务等级进行排序,服务等级相同的网络根据用频请求到达时间的先后进行排序。对于此次没有得到信道的网络,更新其优先级,使其在下一个分配周期优先获得服务。将这种方式称为基于网络动态优先级调度的协作频谱分配机制(network(or Terminal) Dynamic Priority Based Coordinated Dynamic Spectrum Allocation, TDP-CDSA),如图2(b)所示。

(3)不考虑用频请求来自于哪个网络,根据用频请求的到达时间,为每个用频请求设定优先级并逐次分配频谱。没有得到频谱的请求继续保留在队列中,等待下一次分配周期。将这种方式称为基于用频请求动态优先级调度的协作频谱分配机制(Request Dynamic Priority Based Coordinated Dynamic Spectrum Allocation, RDP-CDSA),如图2(c)所示。

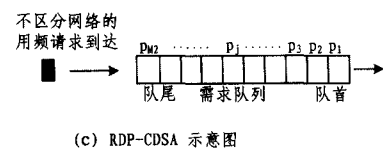
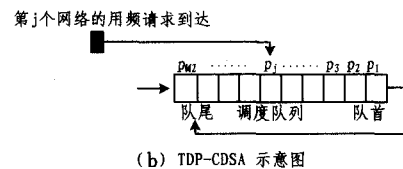
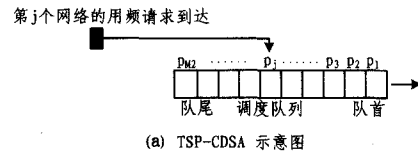


图2 需求调度示意图

在 TSP-CDSA 和 TDP\_CDSA 方式下,需求队列的长度与请求频谱的网络个数相等。而在 RDP-CDSA 方式下,需求队列的长度与当前需要分配频谱的请求多少有关。

#### 4 联合网络服务等级和用频请求等待时间的调度

以上 3 种协作动态频谱在每一次分配时,对用频请求先排序再分配,没有从全局考虑参与本次频谱分配的所有网络或是用频请求之间的公平性。对于优先级小、排在队尾的网络,可能在连续的几个分配周期内都得不到信道。为了解决这一问题,提出基于联合优先级调度的协作动态频谱分配机制。该机制联合网络服务等级和用频请求到达时间为各用频请求设定服务优先级,并将调度过程和分配过程进行联合优化。

联合优先级调度在中心频谱代理处为每个用频网络存储  $N$  次分配周期内到达的用频请求,并为存储的用频请求设定优先级,分配频谱资源,如图 3 所示。将这种方式称为基于联合网络服务等级和用频请求等待时间的动态优先级调度的协作动态频谱分配(Combined neTwork(or Terminal) and Requirement Dynamic Priority scheduling Based Coordinated Dynamic Spectrum Allocation, CTRDP-CDSA)。

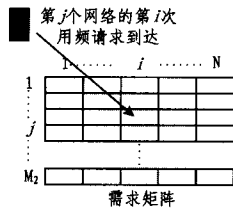


图 3 CTRDP-CDSA 示意图

##### 4.1 CTRDP-CDSA 建模

记第  $j$  个网络的第  $i$  个用频请求的优先级为  $p_{j,i}$ ,分配给它的信道数为  $x_{j,i}$ 。参与分配的需求网络为  $M2$  个。可供分配的信道为  $N'$  个。为了达到公平性,构建频谱分配的目标函数为

$$\begin{aligned} & \max \prod_{j,i=1}^{N \cdot M2} x_{j,i}^{p_{j,i}} \\ & s. t. \sum_{j,i=1}^{N \cdot M2} x_{j,i} = N' \\ & \quad x_{j,i} \leq D_{j,i} \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $p_{j,i}$  与用频请求的到达时间有关。

##### 4.2 最优化问题求解

由于  $x_{j,i}$  为整数,因此式(4)是一个整数非线性规划问题。整数非线性规划是 NP-难问题。为了解决这一问题,将  $x_{j,i}$  的取值松弛为连续的实数值。将目标函数的连乘形式转换为对数累加的形式,则式(4)转换为

$$\begin{aligned} & \max \sum_{j,i=1}^{N \cdot M2} p_{j,i} \log x_{j,i} \\ & s. t. \sum_{j,i=1}^{N \cdot M2} x_{j,i} \leq N' \\ & \quad 0 < x_{j,i} \leq D_{j,i} \end{aligned} \quad (5)$$

CTRDP-CDSA 的关键之一是每一个分配周期内优先级的计算。记录用频请求的到达时间,计算其等待时间,记为  $t_{j,i}$ ,则  $p_{j,i}$  由式(6)给出。

$$p_{j,i} = t_{j,i} \cdot p_j \quad (6)$$

式中,  $p_j$  为第  $j$  个网络的服务等级。对于上一个分配周期没有分配到资源的用户,如果当前分配周期内又有新的用频请求,则将两次的请求区别对待,分别用式(6)计算两次用频请

求的优先级。这样,就相当于在计算分配时把一个网络作为多个网络来分配资源。由图 3 可以看出,中心频谱代理最多为每个网络保留  $N$  次用频请求。

记  $Y = \sum_{j,i=1}^{N \cdot M2} p_{j,i} \log x_{j,i}$ 。由于  $\frac{\partial^2 Y}{\partial x_{j,i}^2} = -\frac{p_{j,i}}{x_{j,i}^2} < 0$ ,且式

(5)的约束条件为线性函数,因此  $Y$  的可行域为凸集。式(5)是一个凸规划问题。采用拉格朗日乘子法,其库恩-塔克条件为式(7)。

$$\begin{cases} \frac{p_{j,i}}{x_{j,i}} - \alpha - \beta_{j,i} = 0 \\ \alpha \left( \sum_{j,i=1}^{N \cdot M2} x_{j,i} - N' \right) = 0 \\ \beta_{j,i} (x_{j,i} - D_{j,i}) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

由于频谱资源紧缺,因此每个待分配信道的网络并不能获得其需求的信道数  $D_{j,i}$ 。这里得出  $\beta_{j,i} = 0$ 。可知,  $x_{j,i} = \frac{p_{j,i}}{\alpha}$  为式(5)的极值点。

$\frac{\partial Y}{\partial x_{j,i}} = \frac{p_{j,i}}{x_{j,i}} > 0$ ,因此  $Y$  为单调增函数。所以  $x_{j,i} = \frac{p_{j,i}}{\alpha}$  也是式(5)的全局最优解。

根据式(8)得出分配结果  $x_{j,i}$  为

$$x_{j,i} = \lceil x_{j,i} \rceil = \left\lceil \frac{p_{j,i}}{\alpha} \right\rceil \quad (8)$$

如果  $x_{j,i}$  大于请求的信道数,则取  $x_{j,i} = D_{j,i}$ ,见式(9)

$$x_{j,i} = \begin{cases} \lceil x_{j,i} \rceil, & \lceil x_{j,i} \rceil \leq D_{j,i} \\ D_{j,i}, & \lceil x_{j,i} \rceil > D_{j,i} \end{cases} \quad (9)$$

采用二分法求解拉格朗日乘子  $\alpha$ ,流程如图 4 所示。

- 1: Initialization  $\alpha_{\max}, \alpha_{\min}$ ;
- 2: Repeat Until  $\alpha_{\max} - \alpha_{\min} \leq \epsilon$ ;
- 3:  $\alpha = \alpha_{\max} + \alpha_{\min}$ ;
- 4: Compute  $x_{j,i} = \frac{p_{j,i}}{\alpha}$ ;
- 5: Compute  $M = \sum_{j,i=1}^{M2} x_{j,i}$   
if  $M > N'$ ,  $\alpha_{\min} = \alpha$ ;  
if  $M < N'$ ,  $\alpha_{\max} = \alpha$ ;
- Return to 2.

图 4  $\alpha$  的计算过程

#### 5 基于联合优先级调度的协作动态频谱机制

CTRDP-CDSA 机制如图 5 所示。具体步骤如下。

步骤 1 初始化分配,将  $C$  个信道平均分给各个网络。

步骤 2 在每个分配周期根据各网络报告的频谱供应和频谱需求,统计频谱供应矢量  $\vec{S}$  和频谱需求矢量  $\vec{D}$ 。记录每个用频请求的到达时间。

步骤 3 计算每个用频请求的等待时间,并依据 CTRDP 调度机制对需求频谱的网络进行协调式动态频谱分配。

步骤 4 将中心频率与需求网络中心频率最近的信道按照步骤 3 给出的信道分配结果分配给需求网络。

步骤 5 由于 CTRDP-CDSA 中的向下取整(如式(8)所示)会导致剩余信道,为了不造成信道资源的浪费,将这些剩余信道依照优先级的比例分配给仍然需要信道的网络。需求没有得到满足或没有得到完全满足的网络等待下一个分配周期的到来。

步骤 6 各网络根据分配结果进行通信。并在下一次分

配周期到来时,根据业务的到达提出新的频谱需求,或是释放频谱。

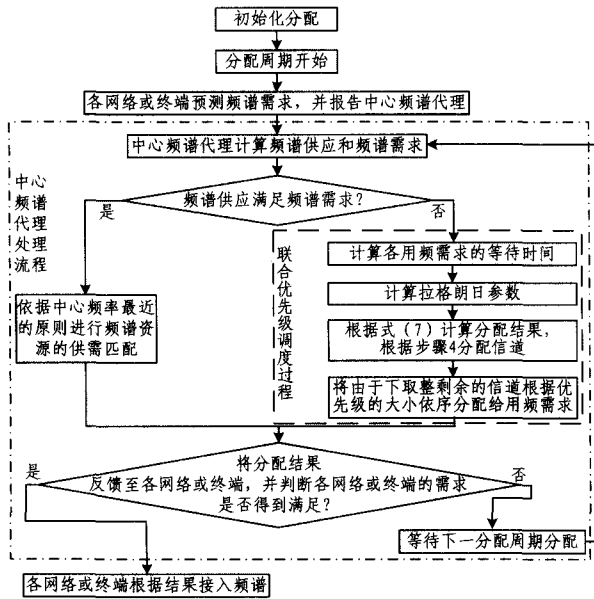


图5 基于联合优先级调度的协作动态频谱分配机制流程

## 6 仿真分析

在  $100 \times 100 \text{m}^2$  区域内若干网络共享  $C$  个信道,中心频谱代理为各终端分配频谱资源。为了评价本文给出的基于联合优先级调度的协作动态频谱分配机制在频谱资源紧张情况下的性能,采用突发业务源作为网络的业务输出。仿真采用 PMPP(Pareto Modulated Poisson Process)建模业务源,CSAB 有时满足所有网络的用频请求,有时无法满足所有网络的用频请求。

采取以下性能指标作为评价标准:

- (1)网络队列长度:每个网络未分配到的累计请求个数。
- (2)端到端时延:分组产生到传输成功之间的时间差。
- (3)公平指数:采用 Jain's fairness<sup>[11]</sup>来度量分配结果的公平性。

$$FI = \frac{(\sum_{j,i} x_{j,i})^2}{(n \sum_{j,i} x_{j,i}^2)} \quad (10)$$

仿真结果如图6—图10所示。

图6给出了某一个网络的队列长度。从图中可以看出,随着时间的增加,TSP-CDSA方式下,网络内累积的请求会急剧增加,在时延性能上对这些网络是不公平的。TDP-CDSA的性能要好于TSP-CDSA。CTRDP-CDSA性能好于TDP-CDSA,是因为每次分配周期,CTRDP-CDSA考虑对该周期内所有的用频请求分配信道。RDP-CDSA将等待时间最长的请求设最高的服务优先级,因此其时延性能最好。

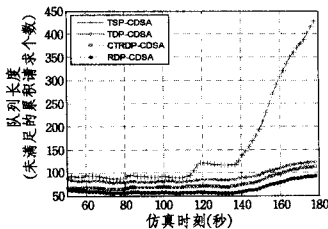


图6 某网络的队列长度

图7和图8给出了在不同网络负载和不同调度下协作动态频谱分配导致的端到端分组传输时延的累积概率分布。可

以看出,时延性能依据TSP-CDSA、TDP-CDSA、CTRDP-CDSA、RDP-CDSA的顺序越来越好。这是由于TDP-CDSA考虑对等待时间较长的网络优先提供服务。CTRDP-CDSA在设定服务优先级时也考虑了用户请求的到达时间,所以分组传输的端到端时延性能较TSP-CDSA好。而RDP-CDSA完全以用频请求的到达先后为其分配频谱,所以时延性能最好。

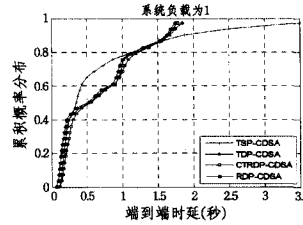


图7 网络负载为1时的端到端时延累积概率分布

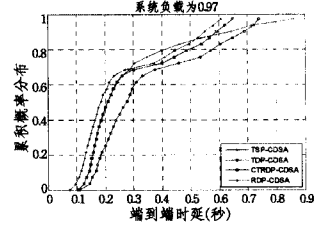


图8 网络负载为0.97时的端到端时延累积概率分布

图9和图10分别给出了不同调度下协作动态频谱分配的公平因子时间平均值和累积概率分布。从图中可以看出,CTRDP-CDSA由于使用比例公平模型为用频请求分配频谱,因此其公平性最好。

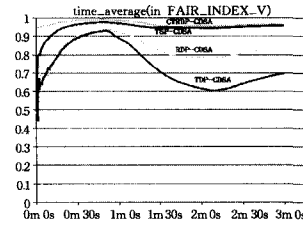


图9 FI时间平均值

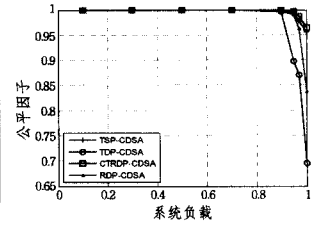


图10 FI的累积概率分布

由以上的仿真结果可知4种调度方案各有优缺点,适用于不同的场景。TSP-CDSA实现简单,在低负载时可以满足性能需求。TDP-CDSA避免了某些网络长时间得不到服务导致严重拥塞的情况,在高负载时端到端时延性能好于TSP-CDSA。RDP-CDSA增加了需求队列的长度,且需求队列的长度是变化的,但是RDP-CDSA使得各用频请求的等待时间最短,所以其端到端的时延性能最好。CTRDP-CDSA在中心频谱代理处用矩阵存储各网络在不同分配周期的用频请求,引入优化算法,增加了计算复杂度和实现复杂度,但是CTRDP-CDSA下的分配结果公平性最好,且避免了某个网络出现严重拥塞的情况,达到较好的端到端时延性能(较RDP-CDSA较差,但是与TDP-CDSA不相上下)。各性能参数比较见表1。

表1 性能比较

	网络队列长度	端到端时延	公平性	实现复杂度
TSP-CDSA	差	差	差	简单
TDP-CDSA	较好	较好	差	较复杂
RDP-CDSA	好	好	较好	较复杂
CTRDP-CDSA	较好	较好	好	复杂

**结束语** 网络用频需求高度动态变化,导致频谱资源不足以支持所有用频网络。针对这一问题,本文提出基于联合优先级调度的协作动态频谱分配机制。本机制下,联合网络服务等级和用频请求的到达时间为各网络的用频请求设定优先级,依据设定的优先级为网络或终端提供公平且有效的频谱分配,并且提供较好的端到端时延性能。仿真结果显示,与3种已有的机制相比,CTRDP-CDSA能够提供较好的公平

性。仿真结果表明,4种调度机制 TSP-CDSA、TDP-CDSA、RDP-CDSA、CTRPD-CDSA 适用于不同的场景,各有优缺点,对实现协调式动态频谱分配时选用何种调度机制具有指导意义。

### 参考文献

[1] FCC Spectrum policy task force. Report of the spectrum efficiency working group [EB/OL]. <http://www.fcc.gov/sptf/reports.html>, 2002

[2] Buddhikot M, Kolodzy P, Miller S, et al. DIMSUMNet: New Directions in Wireless Networking Using Coordinated Dynamic Spectrum Access[C]//IEEE WoWMoM. 2005; 1-8

[3] Le M, Fijalkow I, Buljore S. Urban Planning for Radio Communications(URC): A Solution to the Spectrum Management Challenge[C]//Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). 2008; 1-6

[4] Kovács L, Vidács A. Spatio-Temporal Spectrum Management Model for Dynamic Spectrum Access Networks[C]//Proceedings of the First International Workshop on Technology and Policy for Accessing Spectrum. Boston, Massachusetts: ACM, Vol. 222, 2006

[5] Yuan Yuan, Bahl P, Chandra R, et al. Allocating Dynamic Time-Spectrum Blocks in Cognitive Radio Networks[C]//Proceedings

of the 8th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. 2007; 130-139

[6] Roh J, Kim J, Han Y. Dynamic spectrum allocation using arrival rate ratio in CDMA networks[C]//Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. 2005; 1870-1874

[7] Wang Peng, Matyjas J, Medley M. Joint spectrum allocation and scheduling in multi-radio multi-channel cognitive radio wireless networks[C]//Sarnoff Symposium. Princeton, NJ: IEEE, 2010; 1-6

[8] Rashid M, Hossain M, Hossain E, et al. Opportunistic spectrum scheduling for multiuser cognitive radio: a queueing analysis[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8; 5259-5269

[9] Bao Li-chun, Liao Sheng-hui. Scheduling Heterogeneous Wireless Systems for Efficient Spectrum Access[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2010; 1-14

[10] Uddin M F, Nurujjaman M, et al. Joint Scheduling and Spectrum Allocation in Wireless Networks with Frequency-Agile Radios [J]. Ad-Hoc, Mobile and Wireless Networks, Lecture Notes in Computer Science, 2010, 6288; 95-108

[11] Jain R, Chin D, Hawe W. A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared systems[R]. DEC-TR-301. Digital Equipment Corp, 1984

(上接第 19 页)

次(加减、求梯度、求差分、平方)运算,检测效果特别慢。而本文提出的改进算法,每次只需  $(N/k * N/k)$  次演化,通过迭代得到低分辨率的图像的分割边缘,其时间复杂度降低了  $k^2$ 。然后在高分辨率图像上的边缘的一个窄带内做检测,每次的时间复杂度为  $L * 2 * R$ ,  $L$  是边缘的长度,  $R$  是窄带的半径(一般为 3 至 8)。一般地,  $L * 2 * R$  相对  $N * N$  来说,是一个比较小的值。我们从中国科学院对地观测与数字地球科学中心网站的共享数据中随机选取 5 幅图像做了实验,其检测时间的对比如表 2 所列。从表中可以看出,检测时间有了很大的提高。

表 2 两种检测算法的时间比较

	图 1	图 2	图 3	图 4	图 5
普通	909	818	1002	925	1102
改进	121	122	133	142	138

**结束语** 基于区域的水平集方法在分割一些比较小的图像时取得了较好的效果,在各个领域都有着广泛的应用。该方法在图像分割与目标跟踪领域尤其受到学者的关注,并且取得了一些研究成果。但是其演化时间特别长,检测效率不高,因而限制了在实际工程中的应用。在大型图像分割与大型目标跟踪方面,其分割和检测时间过长,因而没有发挥出应有的作用。本文提出的基于区域的水平集窄带快速演化算法在一定程度上解决了这个问题,检测出边缘所用的时间有了大幅的缩短,同时没有降低检测精度,在实际工程中有一定的实际价值。但是对于一些图像的小目标的点,如果生成的低分辨率图像的采样跨度过大的话,会漏掉这些小的目标点,这是本文水平集演化算法的一个缺点,也是下一步需要研究解决的方向。

### 参考文献

[1] 瞿继双,王超.一种基于多阈值的形态学提取遥感图象海岸线特

征方法[J].中国图形学报,2003,8(7):805-809

[2] 荆浩,陈学俭,顾志伟.一种基于边缘特征的海岸线检测方法[J].计算机仿真,2003,23(8):89-93

[3] 谢明鸿.基于种子点的增长 SAR 图像海岸线提取算法[J].电脑开发与应用,2006,19(6):2-4

[4] 张永继,闫冬梅.基于邻域相关信息的海岸线提取方法[J].装备指挥技术学院学报,2005,16(6):88-93

[5] Osher S, Sethian J A. Fronts propagating with curvature dependent speed; algorithms based on Hamilton-Jacobi formulation [J]. Journal of Computational Physics, 1988, 79(1): 12-50

[6] Chan F, Vese L. Active contour without edges [J]. IEEE Trans on Image Processing, 2001, 10(2): 266-277

[7] Mumford D, Shan J. Optimal approximations by piecewise smooth functions and associated variational problems[J]. Communication of Pure Applied Mathematics, 1989, 42(5): 67-99

[8] Kassm, Witkin A, Terzopoulos D. Snake: active contour models [J]. International Journal of Computer Vision, 1987, 1(4): 321-331

[9] Malladr, Sethianj A, Vemurib C. Shape modeling with front propagating; a level set approach [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17(2): 158-175

[10] 杨新,李俊,等.图像偏微分方程的原理与应用[M].上海:上海交通大学出版社,2003;145-146

[11] 李俊,杨新,施鹏飞.基于 Mumford-Shah 模型的快速水平集图像分割方法[J].计算机学报,2002,25(11):1175-1183

[12] Li C, Xu C, Gui C, et al. Level set evolution without re-initialization; a new variational formulation [C] // IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). San Diego: IEEE, 2005, 1: 430-436

[13] Adalsteinsson D, Sethian J A. The fast construction of extension velocities in level set methods[J]. Journal of Computation Physics, 1999, 148(1): 2-22