

一种基于频谱供需实时匹配的改进动态频谱分配机制

王凡¹ 张建照¹ 赵杭生² 姚富强² 冯少栋¹

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

摘要 无线电技术的发展对频谱的需求越来越迫切,从而促使频谱分配由传统的静态分配向动态分配发展。针对多网络通过中心频谱代理协商接入同一段频谱的应用场景,提出一种基于频谱供需实时匹配的改进动态频谱分配机制。与一般的顺序动态频谱分配方式不同,该机制不再在每一个分配周期重新对各网络进行频谱的重分配,而是根据各网络在前后两个分配周期内的频谱供需变化,进行网络间频谱供应与频谱需求之间的匹配。仿真结果表明,相比于顺序分配动态频谱分配,在牺牲较小的分配增益前提下,各网络频谱切换次数可减少75%以上。

关键词 动态频谱分配,频谱供需实时匹配,分配增益,频谱切换有效率

中图分类号 TN915.01 **文献标识码** A

Improved Dynamic Spectrum Allocation Mechanism Based on Real-time Spectrum Demand and Offer Mapping

WANG Fan¹ ZHANG Jian-zhao¹ ZHAO Hang-sheng² YAO Fu-qiang² FENG Shao-dong¹

(Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)¹

(The 63rd Institute of General Staff, Nanjing 210007, China)²

Abstract The rapid development of modern wireless communication technology requires more and more spectrum which renders the transaction from static spectrum allocation to dynamic spectrum allocation. Aimed at the question that multiple networks access an coordinated spectrum access spectrum(CSAB) through a central spectrum broker, an improved dynamic spectrum allocation mechanism was proposed based on real-time spectrum demand and offer mapping (RT-DOM). As contrast with general sequential dynamic spectrum allocation(S-DSA) mechanism, the RT-DOM focuses on the spectrum requirement change between two consecutive dynamic periods, and maps the released spectrum (spectrum offer) and the new spectrum demand, in order to make less the spectrum handover than S-DSA. And the simulation results show that the spectrum handover reduces at least 75% while allocation gain reduces very little.

Keywords Dynamic spectrum allocation, Real-time spectrum demand and offer mapping, Allocation gain, Spectrum handover efficiency

1 引言

随着无线电技术的飞速发展,频谱资源短缺的现象日益严重。但与此同时,美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)的报告《Spectrum Policy Task Force》^[1]指出,已分配的频谱利用率不高。报告说明,频谱短缺并不是资源的稀缺,而是频谱管理和分配的方式已不再适应当今无线电技术的发展。

为了提高频谱资源的利用效率,必须改革频谱分配的方式。一方面,获得授权频谱的运营商需要做好内部的频谱协调;另一方面,需要这些运营商开放空闲的频谱,使没有得到授权频谱的新的无线电服务能够在不对这些授权用户产生干扰的条件下接入空闲频谱(也称作频谱时机, spectrum opportunity)。前者主要是根据业务在时间和空间上的变化,动态

地分配频谱,使得频谱和业务达到合理的匹配;后者借助于认知无线电技术,感知到授权用户的空闲频谱时机,接入该频谱时机进行通信。

本文主要考虑前一个问题,位于不同地域的多个无线网络通过中心频谱代理共享同一段授权频谱。一般地,动态频谱分配机制在每一个频谱分配周期根据网络随时间变化的业务需求重新给网络分配频谱^[2],每个周期分配给网络的频谱是不同的,在此将其称为顺序动态频谱分配(Sequential Dynamic Spectrum Allocation, S-DSA)机制。S-DSA提高了频谱的利用率,但是由于每一个周期网络的频谱需求都会发生变化,流动性会产生较多的频谱切换开销。为了减少这些开销,本文给出一种基于频谱供需实时匹配的动态频谱分配机制(Real-Time spectrum Demand and Offer Mapping, RT-DOM)。该机制考虑前后两个分配周期内各网络的频谱需求

到稿日期:2010-05-04 返修日期:2010-08-05 本文受国家自然科学基金资助项目(60972061),江苏省自然科学基金资助项目(BK2009060),江苏省“333 高层次人才培养工程”项目资助。

王凡(1984-),女,博士生,助理,主要研究方向为频谱管理、认知无线电等, E-mail: wangfan19841116@gmail.com; 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; 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; 姚富强(1957-),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为通信抗干扰; 冯少栋(1981-),男,博士生,主要研究方向为资源管理等。

变化,匹配频谱供应和频谱需求,从而降低各网络的频谱切换开销。

2 动态频谱分配机制

动态频谱分配系统架构如图1所示。多个网络通过协商接入同一段授权频谱(Coordinated Spectrum Access Band, CSAB),中心频谱代理负责频谱分配。频谱分配周期性进行,在一个分配周期内,各个网络预测下一个分配周期本网的频谱需求,或释放多余的频谱(称为频谱供应),或向频谱代理请求更多的频谱(称为频谱需求)。在动态频谱分配过程中关键的部分包括频谱需求计算和频谱分配机制。

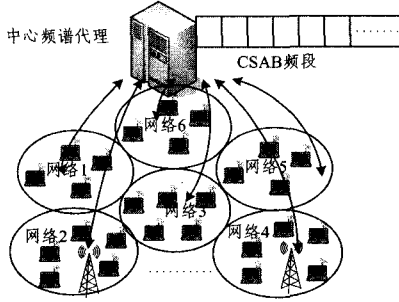


图1 动态频谱分配系统架构

为了便于分析,现假设CSAB的范围为 (b, e) ; M 个网络协商使用频谱。 t 时刻分配给第 m 个网络的频谱记为: $S_m(t) = (b_m(t), e_m(t))$;带宽记为 $l_m(t) = b_m(t) - e_m(t)$ 。

2.1 频谱需求计算

将用户的服务质量(QoS)转化为需要的信道容量,从而计算网络的容量需求。网络的频谱需求预测是指把对信道容量的需求转换为对频谱的需求。转换的过程考虑网络因素、环境因素等。定义频谱 l_m 和容量 C_m 之间满足关系式 $l_m = f(C_m)$ 。 $f(\cdot)$ 是一个比较复杂的函数。为了简便起见,根据文献[2],假设 $f(\cdot)$ 是一个线性函数,则频谱需求 $l_{m,req}$ 可表示为: $l_{m,req} = s_0 C_m$ 。

2.2 频谱分配机制

频谱代理根据各网络的需求预测完成频谱分配,生成分配矩阵:

$$S = (S_1, \dots, S_m, \dots, S_M)$$

S. t

$$\begin{aligned} S_m \subset CSAB, S_m \cap S_k = \emptyset, \forall m, k \\ S_G \leq b_{m+1} - e_m, \forall m(m \neq M) \\ l_m \geq f(C_m) \\ \sum_{m=1}^M l_m + (M-1)S_G \leq l_{CSAB} \end{aligned} \quad (1)$$

S_G 为保护频段, l_{CSAB} 为CSAB频段的总带宽。

值得注意的是, $f(\cdot)$ 与分配的频谱在CSAB中的位置也有一定的关系,一个更严格的约束条件定义为:

$$\begin{aligned} f(C_m, b_m, S_{-m}) = l_m, \forall m \\ S_{-m} = (S_1, \dots, S_{m-1}, S_{m+1}, \dots, S_M) \end{aligned} \quad (2)$$

上述分析只考虑了频谱分配的可行性,并不能满足频谱高效利用的要求。可行的方案可能有多种,需要进行进一步的优化。

2.3 频谱分配方案的评价与优化

这里,我们考虑频谱分配方案的两个评价参数:分配增益和频谱切换有效率。

2.3.1 分配增益

网络在“忙时”所需的频谱往往大于“闲时”的频谱,固定

分配频谱方式往往是根据忙时的频谱需求来划分频谱的^[2],而动态的频谱分配是根据频谱需求在时间上的变化来分配频谱。与固定频谱分配相比,动态频谱分配节省的频谱定义为动态频谱分配下的网络增益^[2,3],记作:

$$Ng_m(t) = 1 - \frac{l_m(t)}{\max_r(C_m(r)S_0)} \quad (3)$$

平均网络增益为:

$$Ng_m^{avg} = T^{-1} \int_0^T Ng_m(t) dt \quad (4)$$

由于多个网络在频谱代理处共享一段频谱,那么相对于固定频谱分配,在动态频谱分配下,中心频谱代理也会获得一定的增益,将其称为分配增益,记作:

$$Ag(t) = 1 - \frac{\sum_{m=1}^M l_m(t)}{\sum_{m=1}^M \max_r(C_m(r)S_0)} \quad (5)$$

平均分配增益为:

$$Ag^{avg} = T^{-1} \int_0^T Ag(t) dt \quad (6)$$

最小分配增益为:

$$Ag^{min} = \min_t(Ag(t)) \quad (7)$$

最小分配增益说明只要 $Ag^{min} > 0$,则CSAB的带宽就比固定频谱分配时需要的频谱带宽要小,即节省了频谱,提高了频谱的利用率。 Ag 越大,表明CSAB的频谱利用率越高。由式(5)可以看出,分配增益取决于所有网络业务之和在时间上的频谱需求最大值是多少,这是由网络业务的相关度决定的^[4,5]。

根据上面的分析,动态频谱分配优化的目标函数为:

$$\begin{aligned} \max_{S^*} (Ag(t)) \quad S^* = (S_1, \dots, S_m, \dots, S_M) \\ \text{S. t. } S_G \leq b_{m+1} - e_m, \forall m(m \neq M) \\ l_m \geq f(C_m) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\sum_{m=1}^M l_m + (M-1)S_G \leq l_{CSAB}$$

由于 $\sum_{m=1}^M \max_r(C_m(r)S_0)$ 是常数,则优化目标可简化为:

$$\begin{aligned} \min_{S^*} (\sum_{m=1}^M l_m + (M-1)S_G) \\ S^* = (S_1, \dots, S_m, \dots, S_M) \end{aligned} \quad (9)$$

以上分析只考虑了各网络需求随时间的变化,没有考虑各个网络在地域上的分布以及各网络使用频谱的特殊限制。考虑空间上的兼容性,定义两个网络之间的距离为 Δd ,则保护带宽 S_G 与 Δd 的关系为^[5]:

$$S_G = \Phi_{x/y}(\Delta d, H(T_y)) \quad (10)$$

式中, $\Phi_{x/y}$ 表示网络 x 和网络 y 之间没有干扰的最小频谱间隔, $H(T_y)$ 为网络 y 能接受的最大干扰。

可以看出,频谱分配的优化是一个多约束条件下的多目标决策问题。即使可以用启发式算法求解,在网络数目较多、参与计算的频谱数量较大时,计算复杂度也是一个具有挑战性的问题。

2.3.2 频谱切换有效率

每一次分配都会导致网络可用频谱的变化,这就使得动态频谱分配方案要考虑网络的频谱切换开销。采用S-DSA算法,所有网络都不可避免地要进行大量的频谱切换,造成了大的网络开销。本文提出一种改进的动态频谱分配机制RT-DOM。在每个分配周期(本文假设分配周期是固定的),根据网络在前后两个分配周期的频谱需求变化来进行频谱的重分配。频谱过剩的网络只是将多余的频谱释放,并不造成本网

的频谱切换;而频谱紧张的网络只是在获得新的频谱上进行频谱切换。为了便于与 S-DSA 机制进行比较,定义频谱切换有效率如下:

$$Hd_effi=1-\frac{T_{RT-DOM}}{T_{S-DSA}} \quad (11)$$

式中, T_{RT-DOM} 表示 RT-DOM 机制在每个分配周期的频谱切换次数, T_{S-DSA} 表示 S-DSA 机制中每个周期的频谱切换次数。

而且,由于只是对前后两个周期的频谱变化进行重分配,参与计算的频谱数量明显减少,也相应地降低了分配方案的计算复杂度。

3 RT-DOM 机制设计

我们将 CSAB 划分为不同的信道并计算其容量,然后将频谱的匹配转化为信道容量与网络容量的匹配,以避免复杂的频谱计算。同时,认为同一个网络可以接入不连续的频谱带^[6]。这样,在进行分配时,需求减少的网络只需要将空闲的信道释放,不改变正在使用的频谱,避免进行频谱切换。

RT-DOM 机制的流程如图 2 所示。其思想主要是:在符合空间和时间上频谱兼容性的前提下,实现频谱需求与释放的最佳匹配。

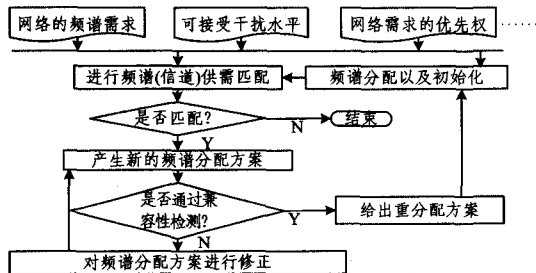


图 2 RT-DOM 示意图

频谱代理根据上一次的频谱分配结果以及当前各个网络的频谱预测,将该周期内释放的频谱分配给请求频谱的网络,实现频谱供应和频谱需求的最佳匹配;避免在每个周期对所有的网络在整个 CSAB 频段上进行频谱重分配,从而提高机制的时间有效性,同时有效降低各个网络的频谱切换。

主要步骤如下:

- (1) 根据 CSAB 频带内各个信道的特性计算信道容量;
- (2) 在每一个 DSA 周期,各网络预测本周期的信道需求,与上一个周期实际使用的信道做比较,释放空闲的信道,或向频谱代理申请更多的信道;
- (3) 匹配频谱需求和频谱供应;
- (4) 检查新的频谱分配方案是否满足频谱兼容要求(式(10)中 S_G 与 Δd 的关系);
- (5) 修改不满足频谱兼容要求的方案,给出最终的分配方案。

假设 CSAB 的带宽为 l_{CSAB} ,包括 N 个信道。单位信道(/Hz)容量理论上的最大值为 η_{max} ,考虑信道的衰落特性,加入衰落因子 f 。单位信道容量为: $C_c = \frac{l_{CSAB}}{N} \cdot \frac{\eta_{max}}{f}$ 。

将每个网络所需的频谱根据业务量转化为各网络所需的信道数 $Num_m = \min(N, \max(1, \lceil \frac{U_m Th}{C_c} \rceil))$,其中 U_m 为第 m 个网络内的用户数, Th 为每个用户的容量需求。

在每一个 DSA 周期,每个网络给出自己的需求 $\Delta r_m =$

$\begin{cases} >0 \\ <0 \end{cases}$,大于 0 表示需要更多的信道,小于 0 表示释放信道。

R_m 为 $1 * \Delta r_m$ 的向量。用 $R=(R_1, \dots, R_M)$ 表示频谱代理处的供需表。如果释放的频谱满足了新的需求,就在释放的频谱中完成下一轮的分配。如果仍有剩余,则释放允许次级用户感知并接入。如果释放的频谱达不到新的频谱的需求,则可以向频谱代理申请新的频谱,流程如图 3 所示。

1. Initialization: $Num_m^{(0)} = \frac{N}{M}, \forall m$
2. for all m
 - if $\Delta r_m^{(n+1)} > 0$

$$\vec{T}_{em} \leftarrow R_m^{(n+1)}$$
3. for all m
 - if $\Delta r_m^{(n+1)} < 0$
4. if $\vec{T}_{em} \neq \emptyset$

$$R_m^{(n+1)} \leftarrow \vec{T}_{em}$$
 - else
$$\vec{R}_m \leftarrow \text{New channel from spectrum broker}$$
5. if $\vec{T}_{em} \neq \emptyset$
 - release the residual spectrum for second users
6. update new assignment set:
$$\{R_m^{n+1}, m=1, 2, \dots, M\}$$
7. Calculate allocation gain $A_g(n+1)$

图 3 DSA 算法流程

在分配过程中,要求尽量将一个网络释放的频谱分配到一个网络中,以避免一个网络中得到的频谱过于离散。

首先初始化分配方案, $\{Num_m^{(0)}, m=1, \dots, M\}$,计算第 $n+1$ 次的分配与第 n 次的分配之间新产生的频谱需求有关:

$$\Delta r_m^{(n+1)} = Num_req_m^{(n+1)} - Num_m^{(n)} \quad (12)$$

假设 M 个网络释放频谱,根据释放信道的数目进行降序排列:

$$H(1) \geq \dots \geq H(k) \geq \dots \geq H(M) \quad (13)$$

N 个网络需要更多的频谱,根据需求信道的数目进行降序排列:

$$B(1) \geq \dots \geq B(k) \geq \dots \geq B(M) \quad (14)$$

如果 $H(k) \geq B(i)$,而且 $H(k+1) < B(i)$,则将第 k 个网络的 $|B(i)|$ 个信道分配给第 i 个网络,然后将第 k 个网络的释放信道更新为 $H(k) = H(k) - B(i)$ 重新排序。同时,在分配时考虑相邻频谱块之间的保护带宽。本机制中将相邻频谱带中较宽频谱带的 $1/20$ 设为保护带宽的大小,直到所有的网络频谱需求得到满足,并计算分配增益:

$$A_g(n) = 1 - \frac{\sum_{m=1}^M Num_m^{(n)}}{\sum_{m=1}^M \max_n(C_m^* S_0)} \quad (15)$$

4 仿真分析

为了比较两种分配机制的性能,根据图 1 设计仿真场景。假设系统中存在 GSM,UMTS 以及 DVB-T 3 种网络,分别承载话音、数据和视频广播业务。这些网络的业务到达密度和特性各不相同,文献[5,6]给出 3 种网络在一天的业务到达密度,如图 4 所示,各网络业务特性如表 1 所列。根据业务到达密度和业务特性,综合第 2 节的分析,由网络仿真软件 OP-NET 可生成各网络随时间的变化,如图 5 所示。

表 1 网络业务特性

用户类型	用户数	业务类型	业务源模型	基本包大小 (bits)
网络 A 语音	50	G. 729; 9.3kbps;	间歇的确定性过程 (IDP)	528
网络 B Internet	25	LAN 聚合型业务; 15kbps;	间歇的泊松过程 (IPP)	1536
网络 C 视频流	5	MPEG 类视频流; 1.9Mbps;	二阶间歇更新过程 (2IRP)	1504

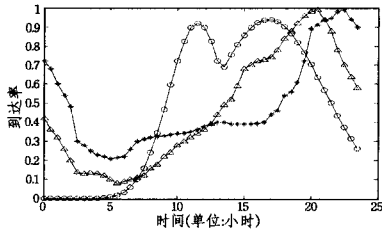


图 4 3 个网络的业务到达率

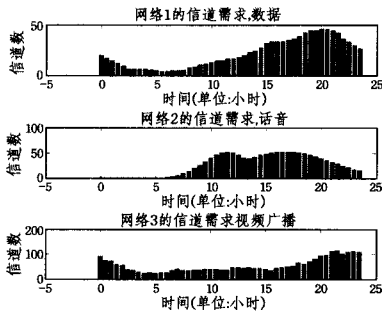


图 5 各网络所需信道数随时间的变化

仿真给出分配增益的曲线,如图 6 所示。将 S-DSA 的分配增益作为参考曲线。RT-DOM 机制由于考虑了网络间的保护带宽,增益值比 S-DSA 机制的增益值稍低。但仍然可以看出,分配增益在一些时刻高达 0.8,表示在这些时刻将有 80%的空闲频谱可以释放给二级用户。即使在最忙时,由于网络间频谱的相互协调,也可以获得一些增益,这是各网络出现业务峰值的时刻不同造成的。因此在适当的时间尺度下,动态频谱分配的分配增益一直存在。而且,如果考虑将 CS-AB 划分为正交信道^[7-13],则不需考虑保护带宽,那么 RT-DOM 和 S-DSA 的分配增益曲线将是重合的。

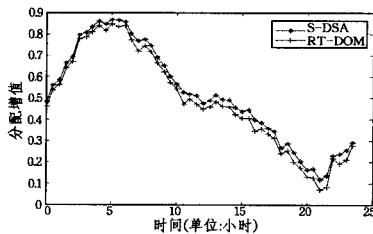


图 6 分配增益

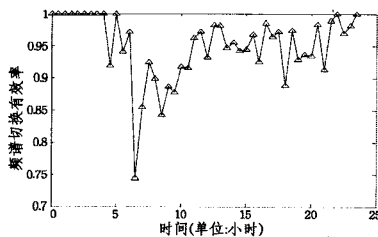


图 7 频谱切换有效率

仿真给出 RT-DOM 机制的频谱切换有效率,如图 7 所示。从图中可以看出,与 S-DSA 相比,RT-DOM 可将切换次数减少 75% 以上,在付出较小的分配增益的代价下,RT-DOM 机制大大降低了网络的切换开销。

结束语 本文提出了一种减少计算复杂度和频谱切换的动态频谱分配机制 RT-DOM,它在牺牲较小的分配增益情况下,大大降低了频谱切换开销,也降低了频谱分配方案的计算复杂度。但 RT-DOM 机制将频谱简化为相同的信道进行考虑,忽略了频谱的特性以及网络对频谱的不同要求。下一步的工作将考虑网络对频谱特性的要求,并且将固定的分配周期根据业务的变化和网络的满意度进行自适应的设定,使得频谱的分配更加合理有效。而且,RT-DOM 机制假设 CSAB 的频段足够大,能够满足各网络的频谱需求,没有考虑各网络竞争使用频谱的情况,这也将是下一步的研究方向。

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] 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. Vol. 222, Boston, Massachusetts, ACM, 2006
- [3] L'aszl'o T, Attila K, Attila V. On Distributed Dynamic Spectrum Allocation for Sequential Arrivals [C] // IEEE DySpan. 2010; 1-12
- [4] Kovacs L, Vidacs A, Tapolcai J. Spatio-Temporal Dynamic Spectrum Allocation with Interference Handling [C] // ICC. 2007; 5575-5580
- [5] Almeida S, Queijo J, Correia L M. Spatial and temporal traffic distribution models for GSM [C] // Vehicular Technology Conference (VTC 1999). Volume 1, 1999; 131-135
- [6] Kiefl B. What Will We Watch? A Forecast of TV Viewing Habits in 10 Years [R]. The Advertising Research Foundation, New York, USA, 1998
- [7] Le M, Fijalkow I, Buljore S. Urban Planning for Radio Communications (URC): A solution to the spectrum management challenge [C] // PIMRC. 2008; 1-6
- [8] Chittabrata G, Si C, Dharma P, et al. Priority-based Spectrum Allocation for Cognitive Radio Networks Employing NC-OFDM Transmission [C] // MILCOM. 2009; 1-5
- [9] Francisco B, Romón A, Jordi P, et al. Dynamic Spectrum Assignment in Multicell OFDMA Networks Enabling by a Secondary Spectrum Usage [J]. Wireless Communications & Mobile Computing, 2009, 9(11): 1502-1519
- [10] Takefumi Y, Dennis B, Ivan C, et al. Resources distribution approaches in spectrum sharing systems [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, January 2008
- [11] Yuedong X, Lui J C S, Chiu Dah-ming, et al. On Oligopoly Allocation Game in Cognitive Radio Networks with Capacity Constraints [J]. Computer Networks, 2010, 54(6): 925-943
- [12] 程军, 李鸥, 来卫国, 等. 无线网络信道队列状态感知资源算法 [J]. 计算机科学, 2009, 36(4): 1165-1169
- [13] 周健, 蒋铃鸽, 何晨. 基于自适应 OFDM 技术的认知无线电频谱分配策略 [J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2009, 45(专辑): 141-144