

基于视频业务质量优化的认知无线电传输信道选择

刘金霞¹, 陈莲娜^{2*}, 刘延伟³, 王遵义¹, 彭光超³

(1. 浙江万里学院 基础学院, 浙江 宁波 315100; 2. 中国计量学院 信息工程学院, 杭州 310018; 3. 中国科学院 声学研究所, 北京 100190)
(* 通信作者电子邮箱 chenlianna@cjlu.edu.cn)

摘要: 认知无线网络中, 次级用户选择信道的传统技术基于信道特性对传输信道进行随机选择, 忽略了应用层视频业务对信道质量的要求。针对该问题提出了一种基于视频业务质量优化的信道选择技术, 优化视频业务端到端的传输质量。通过最小化端到端视频失真, 跨层优化综合选择物理层传输信道、自适应调制与编码模式以及应用层的编码量化参数。该方法在多信道认知无线网络下进行了大量的视频传输仿真模拟实验。实验结果表明该方法能够比不含信道选择的跨层优化方法提高认知无线网络下次级用户的视频传输业务客观质量 1.5 dB 以上。

关键词: 认知无线网络; 信道选择; 跨层优化; 视频传输业务

中图分类号: TN926; TP393 **文献标志码:** A

Transmission channel selection of cognitive radio networks based on quality optimization for video streaming

LIU Jinxia¹, CHEN Lianna^{2*}, LIU Yanwei³, WANG Zunyi¹, PENG Guangchao³

(1. Junior College, Zhejiang Wanli University, Ningbo Zhejiang 315100, China;
2. College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou Zhejiang 310018, China;
3. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The conventional channel selection approach in cognitive radio network is random selection of the transmission channel based on the channel characteristics while neglecting the channel quality requirement of the video streaming at the application layer. Aiming at solving this problem, a cross-layer optimized channel selection method targeting on the video streaming quality optimization was presented. Via minimizing the end-to-end video distortion, the video encoding quantization parameter at the application layer and the adaptive modulation and channel coding as well as the specific transmission channel at the physical layer were jointly selected. A large number of video transmission simulation experiments were made for the proposed algorithm over the multi-channel cognitive radio networks. The experimental results show that this kind of cross-layer optimized channel selection approach can efficiently improve the objective quality of second user video streaming more than 1.5 dB over the cross-layer optimization without channel-selection method over cognitive radio networks.

Key words: cognitive radio network; channel selection; cross-layer optimization; video streaming

0 引言

在认知无线网络中, 次级用户通过频谱感知和监测可用频段。得到空闲频段之后通过频谱分析估计其特性, 选择最合适的频段用于数据传输。在频谱感知之后, 在同一时刻能够被次级用户使用的信道可能有多个异构信道。它们具有不同的发送速率、不同的信道信噪比, 以及不同的主用户活跃程度。这些不同的信道特性对次级用户的数据传输具有很大的影响。在过去的研究中, 动态频谱接入 (Dynamic Spectrum Access, DSA) 的研究主要是为了解决在频谱感知信息不是特别完美的条件下, 在最小化对主用户信道干扰的同时, 最大化频谱资源的利用率^[1]。

在认知无线网络中, 接入信道的选择一般是由接入控制 (Medium Access Control, MAC) 层来完成的。近年来, 研究

人员已经提出了许多不同的认知无线电环境下的 MAC 协议。自组织网络次级接入控制协议 (Ad-hoc Secondary MAC, AS-MAC) 是文献[2]中提出的一种用于提高授权频段频谱利用率的共享带宽的算法。该算法限制次级用户系统只能使用主用户系统剩余资源, 在主用户系统和次级用户系统之间没有信息交互的条件下要求不能对主用户系统造成影响。文献[3]提出了一种与拓扑无关的动态预约方式的多信道 MAC 协议。文献[4-5]根据是否存在中心控制节点, 将认知无线网络中各种 MAC 层协议分为集中式和分布式。集中式频谱分配依赖于基站或者其他中心节点。而 Ad-Hoc 等网络中往往不存在中心节点, 这时则需要采用分布式 MAC 协议。

不管是何种类型的 MAC 协议都是侧重研究如何利用已经检测的某一信道, 防止在次级用户之间发生冲突, 而至于如何选择最佳信道接入则很少被提及。文献[6]提出一种基于

收稿日期: 2014-12-30; 修回日期: 2015-03-28。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61102077); 浙江省自然科学基金资助项目 (LY12H29012, LY13F010012); 浙江省公益技术研究工业项目 (2014C31072); 宁波市创新团队项目 (2012B82006); 浙江省高校访问学者教师专业发展项目 (FX2013118)。

作者简介: 刘金霞 (1969-), 女, 黑龙江克山人, 副教授, 硕士, 主要研究方向: 视频编码、无线通信; 陈莲娜 (1965-), 女, 甘肃兰州人, 副教授, 主要研究方向: 认知无线网络; 刘延伟 (1976-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 副研究员, 博士, CCF 会员, 主要研究方向: 视频处理、无线通信; 王遵义 (1962-), 男, 浙江宁波人, 教授, 硕士, 主要研究方向: 物联网、视频通信。

系统吞吐量和不同次级用户公平性折中的信道选择方法,能够在保证较好的公平性条件下提高30%以上的系统吞吐量。文献[7]提出一种基于基站信道分配方法,该方法通过将主用户占用可能性最小的信道分配给次级用户,同时相应限制次级用户的接入时间长度来减少次级用户和主用户的碰撞。文献[8]提出一种认知无线电自组网中信道选择方法,利用信道时隙划分的方式提高网络数据的传输成功率。文献[9]以次级用户的时延作为服务质量(Quality of Service, QoS)标准来进行信道的选择,忽略了信道选择对主用户的影响。除了MAC层的信道管理,还有一些方法从路由层进行信道的选择。文献[10]提出一种多接口多信道的条件下无线网状网络的路由协议,它根据不同信道的带宽等不同链路特性选择接入信道,增大了网络的吞吐量。

综上所述,当前有许多不同的方法从频谱感知、MAC层调度、路由层信道选择等不同的角度来选择接入信道,它们能够在一定条件下减小不同用户之间的碰撞概率和提高认知无线电网络的吞吐量。但是当前认知无线网络中信道选择仍然是一种局部的优化,没有综合考虑其他协议层次参数对传输效率的影响,最为重要的是没有考虑信道选择方法对应用层实时视频传输业务带来的影响。为了优化次级用户的视频传输质量,本文提出一种基于接收端视频质量为优化目标进行最佳信道选择的技术,支持跨层优化视频传输。

1 认知无线网络中的多信道模型

传统的认知无线网络模型基于信道检测和信道的实际状态等对单信道进行建模,但是没有考虑主用户到达的分布等因素。而且,当检测到信道忙碌的时候采用的是等待的状态,本文则考虑可以切换至其他不同的信道之上。为了在不同信道之间进行有效的选择,需要对认知无线电多信道模型进行进一步的详细描述。多信道模型的具体描述如图1所示。

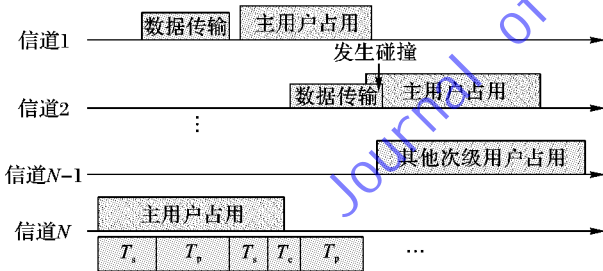


图1 一种典型的认知无线电多信道模型

图1中 T_s 、 T_p 和 T_c 表示次级用户有感知、发送和协商切换接入三种不同的状态。

信道 $i \in \{f_1, f_2, \dots, f_k\}$ 的状态可以用离散时间马尔可夫链描述^[11],其状态空间为 $\{0, 1\}$,转移概率为 $p_{ij}^i(f_i, f'_i)$,即根据次级用户检测结果可以分为繁忙和空闲两个状态,并在这两个状态之间转移。考虑到主用户到达之后对次级用户的影响,假设每条信道上主用户到达过程服从负指数分布^[11],其平均到达的速率为 α_i ,离开速率为 β_i ,则空闲状态和忙碌状态的平均持续时间分别为 $1/\alpha_i$ 和 $1/\beta_i$,从而信道 i 从空闲到忙碌的转移概率为:

$$p(i) = 1 - e^{-\alpha_i t} \quad (1)$$

依据认知无线网络的时间结构,次级用户有感知、发送和协商切换接入三种不同的状态,这三种状态持续的时间分别为 $T_s(i)$ 、 $T_p(i)$ 和 T_c 。协商切换接入时间是指次级用户因为某种原因选择了其他信道,比如主用户出现或者切换后可

以获得更好的传输质量,从而发送端和接收端需要通过公用控制信道或者其他方式来协商, T_c 的长短与物理层技术、通信协议等有关,这里假设它为常数,从而可以计算信道 i 的平均有效带宽为:

$$G(i) = \frac{B(i) \cdot R_m \cdot (1 - P_d(i)) \cdot T_p(i)}{T_p(i) + T_s(i) + u(i) \cdot T_c} \quad (2)$$

其中: $B(i)$ 为信道每秒发送的符号数, R_m 是所选的自适应调制编码模式的编码速率, $P_d(i)$ 是在一个周期之内与主用户发送生碰撞的概率。考虑到状态转移,由式(1)可以得到:

$$P_d(i) = 1 - e^{-\alpha_i \cdot (T_p(i) + T_s(i))} \quad (3)$$

$$u(i) = \begin{cases} 1, & i \neq j \\ 0, & i = j \end{cases} \quad (4)$$

其中: i 表示某一信道收发器当前处于的信道号; j 表示前一状态处于的信道号。如果一直使用某一信道则不需要进行切换;否则切换就将带来切换时延,降低信道的有效带宽。

2 基于视频质量优化的信道选择算法

根据认知无线网络下的跨层优化视频传输技术^[12],本文提出一种基于视频质量优化的认知无线电信道选择技术。在跨层优化架构中主要包括应用层的视频编码、物理层的自适应调制编码模式,以及一个跨层优化控制器^[13],如图2所示。在传统的网络分层结构中,不同的协议层负责不同的功能,其协议参数由各自协议层自行配置。在视频传输过程中,这些不同的协议层参数经过跨层优化控制器进行了全局优化,再进行统一配置,这样可以从系统层面实现资源的优化配置。跨层优化控制器是整个架构的核心,它主要负责采集了不同协议层的信息,比如原始视频序列信息和链路信息等。在特定的时延限制条件下,以最小化期望失真为目标,为各个不同协议层优化选择相关参数,实现网络参数配置的最优化,最后实现接收端的视频质量最优化。

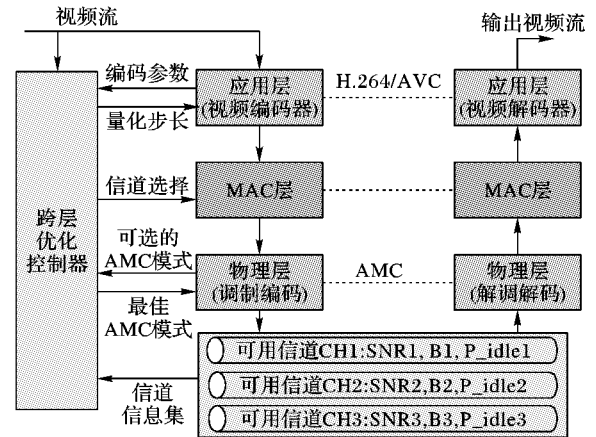


图2 认知无线网络下跨层优化视频传输框架

图2中:SNR表示信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR); B 表示带宽; P_{idle} 表示空闲状态。

在认知无线电环境下传输视频过程中,次级用户传输信道的选择将影响接收端的视频质量。首先,信道的瞬时信噪比影响视频传输的成功率。在采用自适应调制和编码(Adaptive Modulation and Channel coding, AMC)模式和数据包长度一定的条件下,瞬时信噪比越高,成功传输可能性越大,从而导致视频失真越小。但是不能只单一地考虑信噪比,因为如果选择了信噪比高而带宽较小的信道,则有可能导致数据包无法按时到达。此外,在传输的过程中,主用户也有可

能来占用信道,此时次级用户和主用户发生碰撞,在这种碰撞中次级用户的数据包丢失概率为 100%。因此,一个数据包因碰撞发生丢包的概率等于在其传输时间内主用户到达的概率,假设某一数据包的传输时长为 t ,具体可以通过包长 L 和信道 i 的平均有效带宽得到:

$$t = L/G(i) \quad (5)$$

信道 i 的平均有效带宽 $G(i)$ 需要通过式(2) 根据所采用的调制与编码模式 m 和所使用信道每秒发送的符号数得到。根据传输时长,进一步可以得到数据包因为碰撞而丢失的概率为:

$$p_c = 1 - e^{-\alpha t} \quad (6)$$

由此可见,主用户平均到达速率越快,碰撞可能性越高,因此,在视频传输过程中丢包率将由两个部分组成:其中一个信道衰落引起的视频数据丢包率;另一个是由主用户碰撞引起的数据丢包率。在计算端到端视频失真时需要将碰撞丢包率和无线衰落丢包率相加,即:

$$p' = p + p_c \quad (7)$$

其中: p 表示信道衰落丢包,其可以通过相应的公式^[12] 计算得到。

假设备选信道集合为 \tilde{C} ,以及视频数据包 x 最大传输时限限制为 T_{\max} ,则次级用户视频传输的跨层优化问题可以描述成为:

$$\begin{aligned} \min_{\tilde{M}, \tilde{Q}, \tilde{C}} E[D_x] \\ \text{s.t. } t \leq T_{\max} \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $E[D_x]$ 表示数据包 x 对应的端到端视频失真的期望,其可以通过估计传输差错以及差错传递的影响进而估计得到,即:

$$E[D_x] = (1 - \rho_x)E[\hat{D}_x] + \rho_x(1 - \rho_{x-1})E[\bar{D}_{x,r}] + \rho_x\rho_{x-1}E[\bar{D}_{x,l}] \quad (9)$$

其中: $E[\hat{D}_x]$ 表示数据包正常收到时的视频失真,其主要取决于编码所采用的量化参数; $E[\bar{D}_{x,r}]$ 和 $E[\bar{D}_{x,l}]$ 分别是解码端收到和丢失数据包后经过差错隐藏的失真期望,可以通过前一帧的视频失真期望进行递归计算得到^[12]; ρ_x 和 ρ_{x-1} 是当前包和前一个包的丢包概率,可以通过式(7) 得到,和所选用的调制编码模式和采用的信道直接相关。

式(8) 中: \tilde{M} 为备选的调制和编码模式集合,其备选模式种类由文献[12] 可以得到; \tilde{Q} 是备选的的视频编码的量化参数集合,其范围为 0~50,可以用来控制视频的编码码率。由约束条件来看,式(8) 是一个典型的非线性优化问题,其可以通过拉格朗日松弛算法或者全局迭代搜索算法求解^[14]。由于本文问题在实际应用中的参数组合数量有限,所以式(8) 可以通过遍历相应的参数组合,比较视频失真的大小,然后得到最优的视频编码量化参数、自适应调制和编码模式以及传输信道。

3 实验结果与分析

基于 H. 264/AVC 视频编码、Matlab 认知无线电信道仿真和 NS2 网络模拟,本文实现了基于信道选择的认知无线网络跨层优化视频传输实验。在实验中,假设次级用户的无线收发器可以使用每一个传输期间内任意一条可用的信道,而且假设在一个感知周期内切换时不需要重新对信道进行检测,这种假设可以采用多接口多信道模型来实现,如图 3 所示。这些信道可以通过频谱池分配的方法^[15] 得到。

实验中采用的视频序列有 Foreman 和 Highway,其图像大小均为 CIF(352×288)。由于目前的视频业务传输网络大多在最后一跳采用无线网络,在实验中采用点对点无线网络拓扑结构。在实验中,为了突出时延等网络因素的影响,在有线网络部分模拟了多节点构成的多链路环境。为了模拟不同业务流之间的竞争关系,在实验中设置了动态随机的背景流量。应用层和传输层的相关参数设置参考表 1。实验中备选的 8 个信道相关参数如表 2 所示。为了验证提出的跨层优化信道选择技术的先进性,不包含信道选择的常规跨层优化和非跨层优化作为对比算法和所提出的算法进行了效果比较。在不包含信道选择的常规跨层优化算法中,发送时的信道选择是完全随机的。在非跨层优化算法中,发送信道也是随机选择,而且自适应调制和编码模式(AMC) 模式和编码量化参数(Quantization Parameter, QP) 也均采用固定的模式。

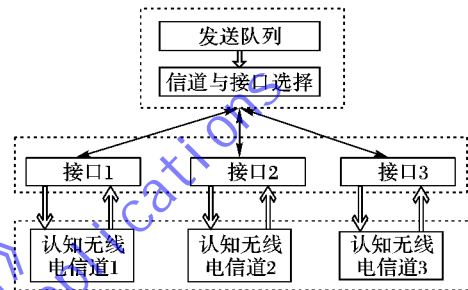


图3 多接口多信道模型

表1 实验中不同协议层参数

协议层次	类数名字	参数值
应用层	编码器	JM v16.1
	GOP 结构	IPPP
	Slice	11 个宏块
	错误隐藏算法	时域隐藏
	备选 QP	10~45
	帧内更新编码宏块数	11
传输层	协议类型	UDP
	最大荷载	1 500 B
物理层	符号发送速率	500 000 symbol/s
	备选 AMC 模式	参考文献[12]
	无线收发器数目	1
信道条件	信道数目	8
	虚警概率	1%
	漏检概率	1%

表2 备选信道参数表

信道号	平均 SNR/dB	发送速率/(10^3 symbol·s ⁻¹)	主用户对信道平均占用时长/s	主用户信道占用比例/%
1	20	400	1.0	30
2	20	500	1.5	50
3	25	400	1.0	30
4	25	500	1.5	50
5	30	400	1.0	30
6	30	500	1.5	50
7	35	400	1.0	30
8	35	500	1.5	50

根据节点同时可用最大的信道数目不同,两个序列的峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR) 对比结果如图 4 所示。从图 4 可见,所提出的包含信道选择的跨层优化方法

比常规跨层优化方法可以提高 PSNR 1.5 dB 左右。随着最大可用信道的数目增加,经过包含信道优化选择的跨层优化 (Cross Layer Optimization, CLO) 算法执行后的视频客观质量也随着提高,而不包含信道选择的常规跨层优化和非跨层优化的视频质量变化没有规律。这主要是因为包含信道选择优化的跨层优化算法中,当有多个信道选择时,一方面为了保证视频数据的准时到达跨层优化控制器会发送速率较快的信道;另外为了保证视频传输的可靠性,减少丢包产生的失真,跨层优化算法选择瞬时信噪比更高的信道,并且根据当时信道实际情况自适应地调整了编码的量化参数以及物理层的自适应调制编码模式,从而能够获得最好的视频质量。尤其从 Highway 序列中可以看出,随着最大可选信道的增加,包含信道选择优化的跨层优化视频质量提高幅度逐步加大,这是因为可选信道的增加使得选到信道的平均质量会更好,选到的信道更适合当前的传输。

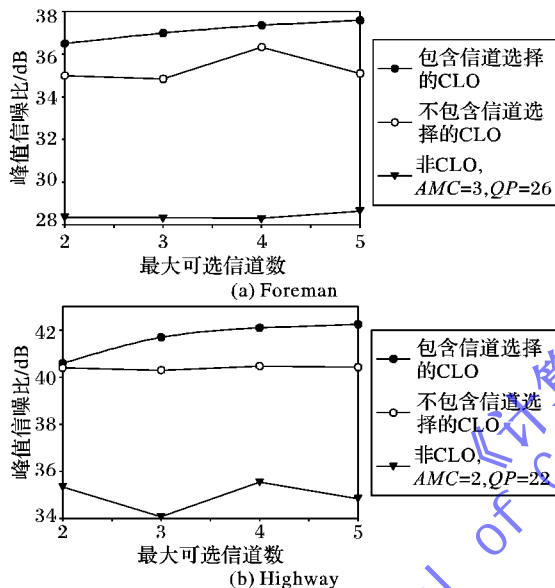


图4 Foreman 和 Highway 序列的客观质量图

图5展示的是 Highway 视频序列的视频质量随时间变化的效果。从图5可见,包含信道选择的跨层优化以及无信道选择的常规跨层优化都能自适应地调节视频质量满足不同的信道条件;并且由于包含信道选择的跨层优化选择后的信道条件更好,所以基本上所有时刻都可以获得比常规跨层优化以及非跨层优化更好的视频质量。

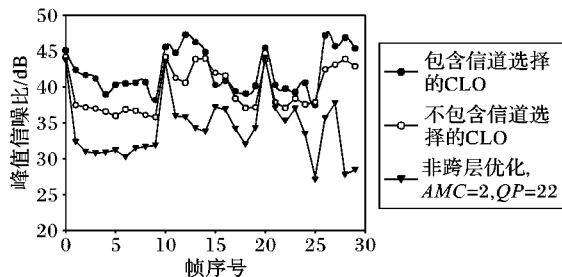


图5 Highway 序列 PSNR 随帧号变化

图6展示了 Highway 视频序列第23帧的主观质量图。从图6可以看出,包含信道选择优化的跨层优化获得了最佳的视频质量,而常规跨层优化质量比不包含跨层优化的质量也要好一些。这一点进一步从主观质量的角度证明了提出的算法的先进性。

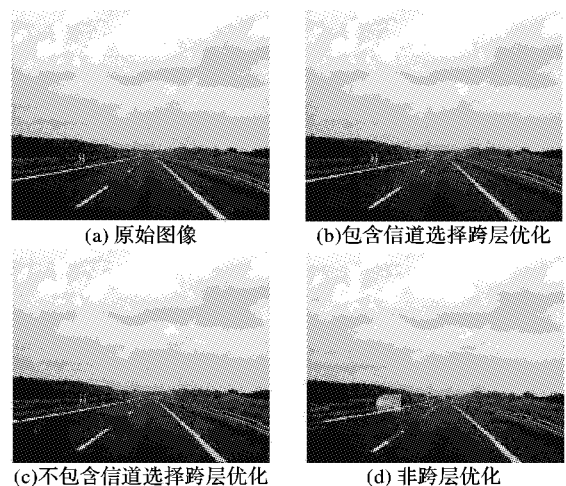


图6 主观质量对比

基于视频业务质量优化的信道选择算法以跨层优化为基础,通过控制视频业务质量对信道进行选择,在算法复杂度方面只增加了最优信道的搜索过程,并没有带来过多的计算代价。表3给出了带有信道选择的跨层优化和传统跨层优化(没有信道选择)的计算时间对比。在传统跨层优化方法中,采用了局部贪心算法的低复杂度优化策略^[16]。实验在一台装有 federal13 的计算机(Intel 处理器 2.93 GHz 和 1.9 GB 内存)上分别对三个视频序列进行了 300 帧的传输测试。从表3可以看出,提出的信道选择算法比传统跨层优化算法平均增加了 2.6% 的计算时间,但是提高了 3.6% 的 PSNR 数值。

表3 算法复杂度对比

序列	Time/s		$\Delta T/\%$	$\Delta PSNR/\%$
	信道选择 CLO	传统 CLO		
Foreman	4 639	4 524	3.3	3.2
Highway	3 968	3 839	3.2	2.9
Bus	4 346	4 287	1.4	4.6
平均	—	—	2.6	3.6

4 结语

本文提出了一种基于视频业务质量优化的认知无线电传输信道选择技术。通过在跨层优化架构下对视频失真的统一描述,综合调节编码量化参数和自适应调制编码模式的条件下,以最优化视频质量为目标,选择能让接收端获得最佳视频质量的信道进行通信。这种信道选择技术能够有效地提高频谱利用率,进而提高接收端的视频业务主观质量。

参考文献:

- [1] TOBE Y, TAMURA Y, MOLANO A, *et al.* Achieving moderate fairness for UDP flows by path status classification [C]// LCN 2000: Proceedings of the 25th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks. Piscataway: IEEE, 2000: 252-261.
- [2] XING Y, MATHUR C, HALEEM M, *et al.* Dynamic spectrum access with QoS and interference temperature constraints [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(4): 423-433.
- [3] SANKARANARAYANAN S, PAPADIMITRATOS P, MISHRA A, *et al.* A bandwidth sharing approach to improve licensed spectrum utilization [C]// DySPAN 2005: Proceedings of the 2005 First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks. Piscataway: IEEE, 2005: 279-288.

(下转第 1536 页)

- versity, 2011: 2-4. (刘辉. 分布式 MIMO-OFDM 系统的多载波频偏估计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011: 2-4.)
- [2] ZHANG Y, JIA D, TANG L, *et al.* Multiple carrier frequency offsets estimation in cooperative OFDM systems [C]// Proceedings of 2010 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing. Piscataway: IEEE, 2010: 1-5.
- [3] YAO Y, NG T-S. Correlation-based frequency offset estimation in MIMO system [C]// VTC 2003-Fall: Proceedings of the 2003 IEEE 58th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE, 2003, 1: 438-442.
- [4] LIU G, GE J H, GUO Y. Time and frequency offset estimation for distributed multiple-input multiple-output orthogonal frequency division multiplexing systems [J]. IET Communications, 2010, 4(6): 708-715.
- [5] MORELLI M, IMBARLINA G, MORETTI M. Estimation of residual carrier and sampling frequency offsets in OFDM-SDMA uplink transmissions [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(2): 734-744.
- [6] BESSON O, STOICA P. On parameter estimation of MIMO flat-fading channels with frequency offsets [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(3): 602-613.
- [7] PHAM T-H, NALLANATHAN A, LIANG Y-C. Joint channel and frequency offset estimation in distributed MIMO flat-fading channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(2): 648-656.
- [8] TIAN Y, LEI X, XIAO Y, *et al.* SAGE based joint timing-frequency offsets and channel estimation in distributed MIMO systems [J]. Computer Communications, 2010, 33(17): 2125-2131.
- [9] ZENG Y H, LEYMAN A A, NG T-S. Joint semiblind frequency offset and channel estimation for multiuser MIMO-OFDM uplink [J]. IEEE Transactions on Communications, 2007, 55(12): 2270-2278.
- [10] XU P. Convolution blind source separation applied to the digital communication signals [D]. Xi'an: Xidian University, 2010. (许鹏飞. 卷积混合数字通信信号的盲源分离[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.)
- [11] ZHANG Y. Study on blind source separation of linear mixture [D]. Xi'an: Xidian University, 2011: 11-15. (张延良. 线性混合盲信源分离的算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011: 11-15.)
- [12] WANG E. Theory of blind source separation and its application in communication systems [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (王尔馥. 盲源分离理论及其在通信系统中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.)
- [13] WANG Y, SERPEDIN E, CIBLAT P. Optimal blind carrier recovery for MPSK burst transmissions [J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(9): 1571-1581.
- [14] ZHANG Z. Research on blind channel estimation for MIMO-OFDM system [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010. (张志勇. MIMO-OFDM 系统盲信道估计技术的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.)
- [15] NASIR A A, DURRANI S, KENNEDY R A. Blind timing and carrier synchronization in distributed multiple input multiple output communication systems [J]. IET Communications, 2011, 5(7): 1028-1037.
- (上接第 1530 页)
- [4] ZHENG X, GUO W, HUANG L. A novel topology-independent MAC protocol with on-demand channel assignment for multi-channel Ad-Hoc network [J]. Computer Science, 2005, 32(5): 34-40. (郑相全, 郭伟, 黄磊. 一种新的拓扑无关的按需分配多信道自组网 MAC 协议[J]. 计算机科学, 2005, 32(5): 34-40.)
- [5] CORMIO C, CHOWDHURY K R. A survey on MAC protocols for cognitive radio networks [J]. Ad Hoc Networks, 2009, 7(7): 1315-1329.
- [6] WANG H, QIN H, ZHU L. A survey on MAC protocols for opportunistic spectrum access in cognitive radio networks [C]// CSSE 2008: Proceedings of the 2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering. Piscataway: IEEE, 2008, 1: 214-218.
- [7] BENNAI M, SYDOR J, RAHMAN M. Automatic channel selection for cognitive radio systems [C]// PIMRC 2010: Proceedings of the 2010 IEEE 21st International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway: IEEE, 2010: 1831-1835.
- [8] LEE G, NA W, PARK L, *et al.* Channel allocation scheme for cognitive radio systems [C]// ICUFN 2010: Proceedings of the Second International Conference on Ubiquitous and Future Networks. Piscataway: IEEE, 2010: 243-246.
- [9] ZAPPATERRA L. QoS-driven channel selection for heterogeneous cognitive radio networks [C] // ACM CoNEXT 2012: Proceedings of the 8th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies. New York: ACM, 2012: 7-8.
- [10] DRAVES R, PADHYE J, ZILL B. Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks [C]// ACM MobiCom 2004: Proceedings of the Tenth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2004: 114-128.
- [11] LEE W, AKYILDIZ I. Optimal spectrum sensing framework for cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(10): 3845-3857.
- [12] PENG G, LIU Y, HU Y, *et al.* End-to-end distortion optimized error control for real-time wireless video streaming [C]// MMSP 2011: Proceedings of the 2011 IEEE 13th International Workshop on Multimedia Signal Processing. Piscataway: IEEE, 2011: 1-5.
- [13] PENG G, LIU Y, HU Y, *et al.* Simulation framework for real-time video transmission in dynamic spectrum environment [J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(16): 1-3. (彭光超, 刘延伟, 胡亚辉, 等. 一种动态频谱下的实时视频传输仿真框架[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(16): 1-3.)
- [14] WU D, CI S, WANG H. Cross-layer optimization for video summary transmission over wireless networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(4): 841-850.
- [15] LIU H. Dynamic spectrum management in cognitive radio network [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009. (刘红杰. 基于认知无线电的动态频谱管理理论及相关关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2009.)
- [16] CHEN L, LIU J, ZHAO P, *et al.* SSIM-based low-complexity cross-layer optimization for wireless video streaming [J]. Application Research of Computers, 2014, 31(8): 2245-2249. (陈莲娜, 刘金霞, 赵平华, 等. 基于 SSIM 的低复杂度跨层优化无线视频传输方法[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(8): 2245-2249.)