

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.08.019

引用格式:姚渭箐,易本顺.喷泉码在认知无线网络中的应用[J].电讯技术,2015,55(8):935-941.[YAO Weiqing, YI Benshun. Application of Fountain Code in Cognitive Radio Network[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(8):935-941.]

喷泉码在认知无线网络中的应用*

姚渭箐**, 易本顺

(武汉大学 电子信息学院, 武汉 430072)

摘 要:认知无线网络被认为是实现动态频谱共享、缓解频谱资源紧缺的重要途径。喷泉码能有效抵抗认知无线网络中来自主用户的突发干扰,且无需反馈重传,从而为认知无线网络提供了一种有效的信道编码方案。首先简介了数字喷泉码以及认知无线网络基础知识,然后综述了数字喷泉码在认知无线网络的链路建立、认知通信以及在资源分配中的应用现状,最后指出了在这一研究领域需要解决的问题,并展望了发展前景。

关键词:认知无线网络;喷泉码;链路建立;认知通信;资源分配

中图分类号:TN915;TN911.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)08-0935-07

Application of Fountain Code in Cognitive Radio Network

YAO Weiqing, YI Benshun

(Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Cognitive radio technology has been recognized as an optimal solution to dynamic spectrum sharing and the low spectrum utilization. Fountain codes can effectively resist sudden interference from primary users (PUs) in cognitive radio network, without feedback retransmission, which provides an effective channel coding scheme for cognitive radio network. First, the principles of digital fountain codes and cognitive radio network are introduced. Then the applications of the digital fountain codes in link setup, cognitive communication and resource allocation for the cognitive radio network are surveyed. Finally, some unsolved problems in this research field are pointed out, and the future development is discussed.

Key words: cognitive radio network; fountain codes; link setup; cognitive communication; resource allocation

1 引 言

随着无线通信业务需求日益增加以及移动互联网的飞速发展,当前普遍采用的固定频谱分配方案已致使频谱资源匮乏,从而使新兴无线技术的应用出现新的瓶颈。在此背景下,可以对频谱进行重复利用的认知无线电技术应运而生。认知无线电是一个智能无线电通信系统,它通过与外界环境的交互而进行多维度频谱探测,在不对主用户(Primary User, PU)也即授权用户(Licensed User, LU)造成干

扰的情况下,通过自适应调整发射机参数而实现与主用户的频谱共享。

采用认知无线网络(Cognitive Radio Network, CRN),可以利用环境认知来获取环境信息,并对信息进行挖掘处理与学习,为智能决策提供依据,并通过网络重构实现对无线环境的动态适应^[1]。

认知无线网络中,可靠的数据传输是研究的重点。在点到多点传输、在严重损坏的信道上进行传输(质量很差的无线或卫星链路)或者在传输距

* 收稿日期:2015-01-22;修回日期:2015-05-18 Received date:2015-01-22;Revised date:2015-05-18
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61371125)
Foundation Item:The National Natural Science Foundation of China(No. 61371125)

** 通讯作者:ywq1005@whu.edu.cn Corresponding author:ywq1005@whu.edu.cn

离太长的时候,传统的协议很难保证传输的可靠性,因此,需要构造可靠的传输方案^[2-3]。

喷泉码是一种基于分组的信道编码方法。发送端通过编码算法,将原始分组序列转换为理论上无限长的编码分组序列,而接收端只需从中接收略大于原始分组数的分组,即能以很高的概率译码成功,几乎无需反馈重传,且适用于分组删除信道,特别适用于单点对多点通信^[4]。

将喷泉码用于认知无线网络链路建立和数据传输中,可有效缩短链路的时延,提高传输的可靠性,保证通信质量;喷泉码可用于认知无线网络中多个子信道间的可靠协同数据传输,有效弥补主用户的突然接入而引起的数据丢失,从而提高网络吞吐量。

针对该研究领域,本文首先简介了数字喷泉码和认知无线网络的基础知识,然后详细介绍数字喷泉码在认知无线网络链路建立、认知通信以及资源分配中的具体应用,并剖析了当前国内外在该领域的相关研究工作,最后讨论了喷泉码应用于认知无线网络的开放性问题,为未来的研究指出可能的方向和重点。

2 喷泉码介绍

所谓数字喷泉码,是指由 k 个原始数据分组可以编码产生无限数量的编码分组,而接收端只要接收其中的任意 n 个编码分组,即可通过译码以高概率成功地恢复出原始数据分组,其中 n 略大于 k ,且 $n = k(1+\varepsilon)$, ε 称为冗余开销。该编码过程如同喷泉(编码器)源源不断产生水滴(编码分组),而用户只需用杯子(译码器)接收到足够数量的水滴,便能达到饮用(成功译码)的目的,而不必关心是哪一滴水流入杯中。所以,这种编码被称为数字喷泉码(Digital Fountain Code)。

与 Turbo 码^[5]、低密度奇偶校验(LDPC)码^[6]或是 Reed-Solomon(RS)码^[7]等常用的编码方式相比,数字喷泉码的码率不受限,且编译码复杂度低,不需要任何反馈信道或信道估计来保证数据的可靠传输。因此,喷泉码更加适用于高宽带、长延时、高损耗的通信网络中。

目前,喷泉码的主流研究方向主要集中于 LT 码和 Raptor 码。2002 年,Michael Luby 提出了第一个喷泉码的具体实现方案——LT 码^[8]。2004 年,Amin Shokrollahi 提出 Raptor 码^[9],这是基于 LT 码的次优级联方案。随后,国内外研究学者又陆续提

出新型的喷泉码。Raptor 码中,最突出的是 Ratpor 10(R10)和 Raptor Q(RQ),其中 Ratpor 10 是第一种适用于不同标准的喷泉码;Raptor Q 码是一种伽罗华域 GF(256)上的 Raptor 码^[10]。2006 年,Jenkac 等人通过对 Turbo 码进行改造产生无限长的编码分组,构成 Turbo 喷泉码(Turbo-Fountain Code)^[11]。2009 年,黄诚以中国剩余定理的数学特性为基础,提出基于素数模运算分解的中国变换码——CT 码(Chinese Transform Codes)^[12]。2013 年,Mahyar 提出一种模拟喷泉码(Analog Fountain Code,AFC),与数字喷泉码不同的是,模拟喷泉码中每一个编码符号均为实数值,是 d 个随机选择的信息位的加权和,其中, d 和权重系数从预定义的概率质量函数随机选择^[13]。

3 认知无线网络介绍

为了解决频谱利用率不均衡的问题,认知无线电技术应运而生,其基本思想是次级用户(Secundary User,SU)也即认知用户(Cognitive User,CU),通过检测授权频段用户的使用情况,机会地接入授权频段,并且保证不影响主用户的通信。而这种认知能力要求次级用户通过学习、理解等方式,自适应地调整无线传输参数(如功率、载波调制和编码等)来适应外部无线环境,自主寻找和使用空闲频谱^[14]。

认知无线网络则是认知无线电的网络化,其本质是将认知特性纳入到无线通信网络的整体中去。认知无线网络是由多个具有认知无线电收发器的网络节点以自组织的形式组建而成的无线网络。认知无线网络能够从根本上改善无线频谱资源利用不均匀的现状,是未来无线通信产业的发展方向,正逐渐通过标准化进入产业领域^[15]。

4 数字喷泉码在认知无线网络中的应用

作为一种无码率信道编码技术,喷泉码能有效地抵抗认知无线电中来自主用户的突发干扰,且无需反馈重传,从而为认知无线网络提供了一种有效的信道编码方案,该方案能显著提高通信的吞吐量,而传统的信道编码和 ARQ 技术则无法比拟。

目前,国内外已有许多学者和研究机构开始尝试对喷泉码进行改进,研究其作为信道编码技术在认知无线网络中的应用,目的是提高系统的传输性能,保证通信质量,并进行了理论分析和相应的仿真实验。典型的研究工作可归纳如下:

(1)基于喷泉码的 CRN 链路建立与数据传输

机制。在不对授权用户造成干扰的同时,确保认知用户通信链路的稳定性,实现数据的连续、实时、可靠传输;

(2)有效地对现有的喷泉码进行改进和优化。将喷泉码的特性和 CRN 中认知用户通信有机结合起来,能够获得高质量的认知通信方案,提高网络可靠性和吞吐量;

(3)基于喷泉码特性的认知无线电系统资源分配算法,以便提高系统的资源利用效率。

4.1 在认知无线网络链路建立中的应用

喷泉码是一类现代误差控制编码,由于喷泉码具有低复杂度和能够渐进达到信道容量的特点,则可适用于认知无线网络链路建立。

4.1.1 在分组接入机制中的应用

在认知无线网络通信链路建立之初,由于各种原因,发射机发送的数据分组无法到达接收机的可能性较大,存在比较严重的分组丢失现象。不同于以往采用 ARQ 机制实现链路差错控制的方法,可利用喷泉码自适应干扰避免的特性来对抗认知建链中难以避免的分组丢失。

基于喷泉码的分组接入中,发射机不停发送数据分组,当接收机成功译码时,最终回复一个简单的反馈信号告知发射机译码成功,则发射机结束传输。这种方式将反馈的需求量降到了极限,亦可称为无反馈的方式。

在实际认知链路建立过程中,仍有采用反馈的必要。这是由于建链之初收发双方没有或只有很少的先验知识,在这种情况下,发射机的接入策略必然不够理想,若发射机不管接收机接收的情况盲目一味发送,将导致冲突频繁,不仅资源利用效率低下,最终的建链时延也必然增大。考虑采用 DATA-ACK 的握手机制^[16],通过 ACK 为发射机提供当前信道状态及用户竞争情况信息,从而优化接入策略,如图 1 所示。

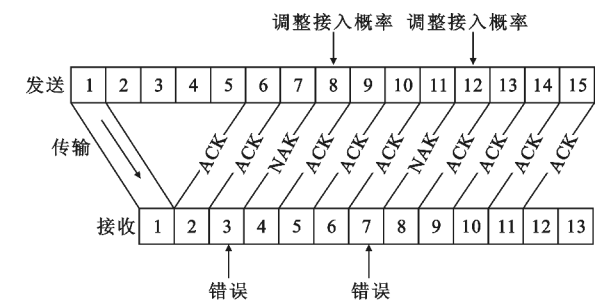


图 1 基于喷泉码分组接入 DATA-ACK 握手工作机制
Fig.1 DATA-ACK handshake mechanism based on fountain code packet access

基于喷泉码的分组接入中,ACK 消息的可靠性只影响接入控制的有效性,而不会对译码造成致命影响,因而采用这种方法降低了对于公共控制信道的依赖性,相较于 ARQ 机制更适合于在认知无线网络中实施。

4.1.2 在通信链路建立及维护中的应用

利用喷泉码的自适应速率适配能力可以有效解决链路删除和数据包丢失问题,实现通信链路的建立和维护,并充分利用喷泉码所需的反馈应答时隙。应用该方法不需要主从用户之间存在额外的公共控制信道进行“谱图交换”。

基于喷泉码的认知无线电通信链路的建立和维护方法包括认知用户发送端链路的建立方法、认知用户发送端链路的维护方法、认知用户接收端链路的建立方法以及认知用户接收端链路的维护方法^[17-18]。

在通信链路建立之前,认知用户的收发两端对彼此的频谱感知情况以及要采用的信道编码、调制映射方式等必要的信息均一无所知,必须在通信链路建立的过程中将这些信息传递给对方。认知用户发送端链路的建立以及维护方法中按照喷泉码的编码方式对信息包进行编码并组帧。

当频谱共享无线通信环境下收发两端并不完全确知对方的信道状态而造成发送包丢失或者由于频谱感知不够准确而受主用户信号干扰时,不仅可以利用喷泉码编译码技术完成链路的建立,而且也可以基于喷泉码自适应地逼近认知信道容量的特性来获得较大的编码增益。

利用喷泉码自适应干扰避免的特性来对抗认知建链中分组丢失、链路删除和数据包丢失问题,降低了对于公共控制信道的依赖性,能有效缩短链路的时延,提高传输的可靠性,相对于 ARQ 机制更适合于在认知无线网络中实施。

4.2 在认知通信中的应用

将喷泉码的特性和 CRN 中认知用户通信有机结合起来,可实现可靠高效的认知通信。将喷泉码差错控制机制应用到认知无线网络中继协同中,则基于喷泉码的协助机制可获得与高复杂度、高代价的重传机制类似的性能;通过基于前向映射算法(Map and Forward, MF)的喷泉码网络编码,能降低差错传输的概率;利用喷泉码灵活的度分布来调节认知无线网络中继节点译码延时的长短,可以平衡在多跳中继节点之间处理数据包速度之间的差异。

4.2.1 在中继选择机制中的应用

2011 年,Shahrashbi B 等学者研究了喷泉码差错

控制机制在认知无线网络中继协同中的作用,认为基于喷泉码的协助机制可获得与高复杂度、高代价的重传机制类似的性能^[19]。

由于喷泉码拥有不同于传统的差错控制编码的特性,十分适用于协作方案。建立一个由主用户对 (PU Pair) 和次级用户对 (SU Pair) 组成的认知无线网络模型,包括主发射机 (P_T)、主接收机 (P_R)、次级发射机 (S_T) 和次级接收机 (S_R)。当 P_T “闲” 时, S_T 有机会进入信道。假设主用户活动时, S_T 可作为一个中继, 参与 PU 的传输。通常, 在一对 P_T 和 P_R 的附近, 可能存在不止一个次级用户对, 需要利用一个最佳中继选择方案选择最佳中继节点, 并且, 采用排队论模型来描述系统参数, 如图 2 所示。

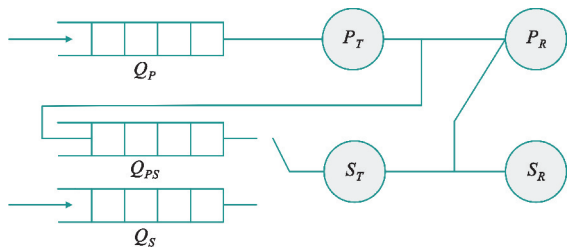


图 2 次级发射机的协作中继认知无线网络模型

Fig. 2 Cognitive radio network with cooperative relaying at the secondary transmitter

下面采用喷泉码差错控制机制, 分析认知无线网络中协作中继的性能。主发射机 (P_T) 信息的平均延时 D_t 可表达为

$$D_t = E[N_{PS}] + D_{Pq} + E[N_{SP}] + D_{PSq}。$$

式中, D_{Pq} 和 D_{PSq} 分别为在 Q_P 和 Q_{PS} 数据包排队接受服务的时间, N_{PS} 和 N_{SP} 分别为从 P_T 传输到 S_T 和从 S_T 传输到 P_R 所需数据包的数量。应用喷泉码的编码协作, 可得到 $E[N_{PS}]$ 和 $E[N_{SP}]$ 计算公式, 并能在忽略误差的情况下对该式进行近似计算。

同时, 基于喷泉码差错控制机制, 使用一种低复杂度分布式中继选择算法, 可找到最佳中继节点, 实现 SU 节点间的最短距离通信。喷泉码的特性则可保证, 一个拥有到 P_T 最佳信道的 SU 在其他节点前接收数据包。通过这种方法, SU 节点可作出决定是否能在 PU 传输中进行协作。定义一个“期望集” (位于期望区域里的一个 SUs 的集合), 在每个 SU 中, 可通过偷听到 PUs 的 RTS/CTS 信号估计, 一个中继能通过到 P_T 和 P_R 的相关距离来判断其是否属于期望集^[20]。如果一个 SU 节点不属于一个特定的 PU “发射机-接收机” 对的期望集, 它将丢弃从 P_T 接收到的数据包。因此, 位于期望集里的某个 SU

将第一个完全接收喷泉码包, 并发送一个 ACK 信息。所以, 其他 SUs 和 P_T 实现了信息在期望的中继或在 P_R 上的传输。

4.2.2 基于喷泉码的机会多播的原子碎片法

CR 网络由一个基站 (BS) 和若干移动的 SU 组成, 并且 SU 在网络中均匀分布。

Polacek P 等人指出, 由于一个用于碎片传输的 tiles 的容量 (tile 表示一个时隙中的一个次级信道 SC) 和被浪费碎片的大小之间的矛盾, 碎片大小直接影响资源使用率。结合喷泉码前向差错控制 (FEC) 保护, 应用一种数据分裂算法将数据分裂为原子级单位, 达到资源利用最大化^[21]。通过分裂算法和使用喷泉码向前差错控制, BS 在传输前对输入的数据进行处理。

当调度数据碎片到备选的 tiles 中, 任何 tile 都能够完全填满, 不会浪费容量。当碎片大小时不变且依赖于系统设置, 碎片的数量以及 FEC 开销都是固定的。相对于可能的 tile 容量, 碎片越小, 用作 FEC 开销的数据量也同样降低, 原子分裂法的零损耗特性越显著。

基于 tiles 的传输效率, 对 tiles 进行排序, 其中容量较高的 tiles 将被优先选出, 再通过选择碰撞概率较低的 tiles 进一步优化。

每个 FEC 块中的用户设置都取决于单个用户的碎片传输接收率, 该接收率通过一个基于指数加权递推的公式定义, 具有一个平均窗, 即用于最后一个 FEC 块的 tiles 的数量, 通过接收率能轻松发现瓶颈用户^[22]。

4.2.3 基于喷泉码的 MF 算法

图 3 所示是一个由两个 PU、一个 BS 和若干个 SU 组成的认知网络模型, 通过次级用户和主用户间协作传输的方法引入中继技术来提高认知无线网络的性能^[23], 并采用喷泉码网络编码策略来保证主网络可靠通信。

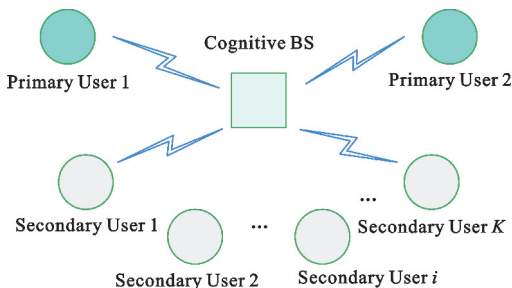


图 3 认知无线网络协作传输模型

Fig. 3 A cooperative transmission model in cognitive networks

Chen X 等人针对中继处单纯采用放大前传 (Amplify and Forward, AF) 和译码前传 (Decode and Forward, DF) 的不足,结合 AF 和 DF 的优势,在一个认知 BS 中,采用一种基于向前映射算法 (Map and Forward, MF) 的喷泉码网络编码,帮助 PU1 和 PU2 之间进行信息交换。特别是,在第一个时隙中,PU1 和 PU2 同时传输喷泉码符号给一个认知 BS。接收到混合的编码符号并使用空间自由度之后,根据给定的标准,例如逻辑 OR 或 AND 标准,认知 BS 映射混合信号到映射表中一个特殊的符号。在第二个时隙中,认知 BS 广播映射符号。每个主用户检测它接收的符号,然后从另一边根据同样的映射标准,恢复它想要的喷泉码符号。一旦一个用户接收足够多的编码符号,它就能够成功解码源信号。基于喷泉码的 MF 算法有双重优点:无需上行链路信道状态信息,简化了自干扰消除过程;认知 BS 采用 MF 模式,MF 是一个软判决方式,能降低差错传输概率。

4.2.4 基于喷泉码的度分布的中继方案

2011 年,Wang X 等人针对认知无线网络中机会频谱不稳定、频谱环境异质、信号能量受限等恶劣的网络环境,就如何解决获得可靠和有效的传输这一问题,提出了一种灵活喷泉码中继 (Agile Rateless Coded Relaying, ARCOR) 方案,该方案利用喷泉码灵活的度分布来调节中继节点译码延时的长短,以平衡在多跳中继节点之间处理数据包速度之间的差异^[24]。

考虑一个由一个信源、一个信宿和一组 DF (Decode-and-Forward) 中继组成的认知无线网络。异构频谱环境下,使用分频双工 (Frequency-Division Duplex, FDD) 中继,以便“信源-中继”以及“中继-信宿”链路能够在不同频带接入频谱空穴,并利用离散时间的马尔科夫链对 PU 信道占用状态进行建模。

一个中继解码一个信息所需的时间为,用于传输足够编码包的整个“闲”时隙与解码前经历的整个“忙”时隙之和。

为得到用于传输足够编码包的整个“闲”时隙的表达式,首先需要对喷泉码的译码开销 ε 进行估计分析。 ε 服从泊松分布,其概率质量函数的参数通过期望最大化算法 (Expectation - Maximization, EM)^[25-26] 给出。通过仿真,为喷泉码选取合适的原始分组数量和度分布参数。当授权信道“闲”时,由于一个误报将限制信源传输,因此,会忽略一个频谱机会。接着,根据误报概率以及在无 PU 下一个

中继解码一个信息所需时间,得到解码一个信息所需的平均“闲”时隙。最后,基于离散时间的马尔科夫链信道模型,推广到第一跳所需的平均传输时间 (信源-中继)。

类似地,可得到信宿解码一个来自 L 个解码中继的信息所需的时间,即第二跳传输时间 (中继-信宿)。第一跳和第二跳的平均传输时间都取决于解码中继阈值,一个合适的阈值可用来平衡第一跳和第二跳,提高端到端的吞吐量,可通过一种低复杂度块搜索优化算法来搜索最佳的解码中继阈值。

4.2.5 其他应用

许多学者针对喷泉码在认知无线网络中的具体应用也作了如下一些探索。

在一个频谱共享广播信道中,BS 使用喷泉码编码数据包,广播给所有用户,并采用 S_r 协助 BS 广播的策略,实现能量-延时-吞吐量的平衡^[27]。Aziz A 等人考虑认知无线网络的协作频谱感知,采用一种高效的喷泉码编码中继与用户选择机制相结合的协作感知方案,以便减少能量和延时的开销^[28]。

在多中继认知无线网络中,Chaoub A 等人利用喷泉码将传输数据分布于两跳,并使用 CORVUS 方法建立次级链接。信源节点广播编码流到一组中继节点,每个节点负责从同一喷泉传送不同的数据包到共同的目的地。认知中继之间无需协调,并且避免信宿接收重复数据包^[29]。

而在瑞利衰落信道中,Duy T T 等人基于喷泉码采用次级中继方法实现次级频谱接入认知无线网络。主发射机使用喷泉码传输数据到主接收机,而在次级网络中,次级发射机协助主发射机向前传输数据到主接收机,以便能找到机会传输它们自己的数据^[30]。

综上所述,数字喷泉码差错控制机制、优化度分布以及算法结合等方法应用于认知用户通信,尤其是基于多跳、多用户、中继协同的认知无线网络模型中,能够有效弥补授权用户的突然接入而引起的数据丢失,从而提高网络吞吐量。

4.3 在资源分配中的应用

Chen X 等人提出,在有限反馈的多用户多输入多输出 (MU-MIMO) 认知无线网络中,基于喷泉码特性,可得到网络参数和延迟要求之间的内在联系,并采用一种启发式算法最小化反馈,同时满足干扰约束和 QoS 需求,来实现高效的资源分配^[31]。引入喷泉码具有双重优点:一是为无线服务提供延迟保障;二是能够反映出延迟约束和反馈量之间的关系,以便对于一个给定的延迟约束,可以获得其所需

的最小反馈需求。

文献[32]中,为最大化认知系统能量利用率,利用信道的马尔可夫特性限制从用户对主用户通信的干扰,引入具有优异特性的喷泉码和周期频谱感知模型,提出可以快速实现的能量分配算法,显著降低了多信道认知无线电环境下从用户发送端的能量消耗,为无速率编码在认知无线电的应用提供了新的研究角度。

可以看出,通过算法实现高效的资源分配,能够显著降低基于喷泉码的认知无线电系统的能耗,提高能量利用率。

5 结束语

尽管数字喷泉码应用于认知无线网络中的研究已取得一些可喜成果,但是目前所进行的研究大部分停留在理论研究和工程应用仿真方面,很少通过实际硬件平台验证。与此同时,国内将喷泉码引入到认知无线网络中的研究才刚刚开始,如何有效地对现有的喷泉码进行改进和优化,将喷泉码的特性和认知无线网络的特性有机结合起来,以便提高认知无线网络的通信可靠性和网络吞吐量,还需要做大量深入的研究工作,可从以下几个方面着手:

(1)从构造新型喷泉码的途径来进一步提高认知无线网络中的频谱利用率,建立新型喷泉码的具体编译码实现算法,提高认知无线网络的数据吞吐量;

(2)链路建立主要完成次级用户之间基本信息的协商,传输数据量较小,可利用短码长喷泉码提高认知无线网络数据链路建立的效率,同时可结合一些算法优化短码长喷泉码的度分布,构建具有最短时延特性的喷泉码实现算法;

(3)将喷泉码用于认知无线网络的实际应用,例如多媒体传输,能有效地提高认知无线网络中的多媒体服务质量;

(4)由于软件无线电可以通过增加软件模块来增加新的功能,而且硬件也可以随着器件的发展而不断地升级,可以基于一个具有开放性、标准化、模块化的通用软件无线电平台,将数字喷泉码在认知无线网络中的各种应用效果通过软件模块化来进行验证。

参考文献:

[1] 王金龙,吴启晖,龚玉萍,等. 认知无线网络[M]. 北京:机械工业出版社,2010.

- WANG Jinlong, WU Qihui, GONG Yuping, et al. Cognitive Wireless Networks [M]. Beijing: China Machine Press, 2010. (in Chinese)
- [2] 赵勇. 认知无线电的发展与应用[J]. 电讯技术, 2009, 49(6): 93-101.
- ZHAO Yong. Development Progress and Applications of Cognitive Radio [J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(6): 93-101. (in Chinese)
- [3] 周贤伟, 孟潭, 王丽娜, 等. 认知无线电研究综述[J]. 电讯技术, 2006, 46(6): 1-6.
- ZHOU Xianwei, MENG Tan, WANG Lina, et al. Summary of the Research on Cognitive Radio [J]. Telecommunication Engineering, 2006, 46(6): 1-6. (in Chinese)
- [4] MacKay D J C. Fountain codes [J]. IEE Proceedings - Communications, 2005, 152(6): 1062-1068.
- [5] Berrou C, Glavieux A, Thitimajshima P. Near Shannon limit error - correcting coding and decoding: Turbo - codes. 1 [C] // Proceedings of 1993 IEEE International Conference on Communications. Geneva: IEEE, 1993: 1064-1070.
- [6] Gallager R G. Low-density parity-check codes [J]. IRE Transactions on Information Theory, 1962, 8(1): 21-28.
- [7] Reed I S, Solomon G. Polynomial codes over certain finite fields [J]. Journal of the Society for Industrial & Applied Mathematics, 1960, 8(2): 300-304.
- [8] Luby M. LT codes [C] // Proceedings of FOCS 2002. Vancouver: IEEE, 2002: 271-282.
- [9] Shokrollah A. Raptor codes [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(6): 2551-2567.
- [10] Shokrollahi A, Luby M. Raptor codes [M]. Boston: Now Publishers Inc., 2011.
- [11] Jenkac H, Hagenauer J, Mayer T. The turbo-fountain [J]. European Transactions on Telecommunications, 2006, 17(3): 337-349.
- [12] 黄诚, 易本顺. 基于中国变换码的信道编解码方法: 中国, CN101969354A [P]. 2011-02-09.
- HUANG Cheng, YI Benshun. Channel coding and decoding method based on Chinese conversion codes: China, CN101969354A [P]. 2011-02-09. (in Chinese)
- [13] Shirvanimoghaddam M, Li Y, Vucetic B. Near-Capacity Adaptive Analog Fountain Codes for Wireless Channels [J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(12): 2241-2244.
- [14] Doyle L. 认知无线基础 [M]. 任品毅, 张超, 译. 西安: 西安交通大学出版社, 2012.
- Doyle L. Essentials of cognitiveradio [M]. Translated by REN Pinyi, ZHANG Chao. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2012. (in Chinese)
- [15] 张勇, 滕颖蕾, 宋梅. 认知无线电与认知网络 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2012.
- ZHANG Yong, TENG Yinglei, SONG Mei. Cognitive Radio and Cognitive Network [M]. Beijing: Beijing Uni-

- versity of Posts and Telecommunications Press, 2012. (in Chinese)
- [16] 陈淑保. 认知无线链路建立过程的研究与设计[D]. 杭州:浙江大学,2010.
CHEN Shubao. Research on the link setup procedure in cognitive radio systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese)
- [17] 吴可镒,张朝阳,黄慧,等. 一种基于无速率码的认知无线电通信链路的建立和维护方法: 中国, CN102026247A[P]. 2011-04-20.
WU Kedi, ZHANG Chaoyang, HUANG Hui, et al. Establishment and maintenance method of cognitive radio communication link based on non-rate code: China, CN102026247A[P]. 2011-04-20. (in Chinese)
- [18] 吴可镒,张朝阳,黄慧,等. 基于无速率码的认知无线电通信链路的建立和维护方法: 中国, CN101325461[P]. 2008-12-17.
WU Kedi, ZHANG Chaoyang, HUANG Hui, et al. Method for establishing and maintaining cognition radio communication link based on non-speed code: China, CN101325461[P]. 2008-12-17. (in Chinese)
- [19] Shahrashi B, Rahnavard N. Rateless-coding-based cooperative cognitive radio networks: Design and analysis [C]//Proceedings of 2011 8th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks. Salt Lake City, UT: IEEE, 2011: 224-232.
- [20] Bletsas A, Khisti A, Reed D P, et al. A simple cooperative diversity method based on network path selection [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(3): 659-672.
- [21] Polacek P, Huang C W. Atomic fragmentation for efficient opportunistic multicasting over cognitive radio networks [C]//Proceedings of 2012 IEEE 1st Global Conference on Consumer Electronics. Tokyo: IEEE, 2012: 364-365.
- [22] Huang C W, Huang S M, Wu P H, et al. OLM: opportunistic layered multicasting for scalable IPTV over mobile WiMAX[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(3): 453-463.
- [23] Chen X, Chen H, Meng W. Cooperative communications for cognitive radio networks—from theory to applications [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(3): 1180-1192.
- [24] Wang X, Chen W, Cao Z. ARCOR: agilerateless coded relaying for cognitive radios[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(6): 2777-2789.
- [25] Dempster A P, Laird N M, Rubin D B. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm[J]. Journal of the Royal Statistical Society (Series B), 1977, 39(1): 1-38.
- [26] Karlis D. An EM algorithm for multivariate Poisson distribution and related models[J]. Journal of Applied Statistics, 2003, 30(1): 63-77.
- [27] Yang Y, Aissa S. Spectrum-sharing broadcast channels using fountain codes: energy, delay and throughput[J]. IET Communications, 2014, 8(14): 2574-2583.
- [28] Aziz A, Uppal M. Energy-efficient cooperative spectrum sensing using rateless coded relaying[C]// Proceedings of 2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Istanbul: IEEE, 2014: 827-832.
- [29] Chaoub A, Ibn-Elhaj E. Multimedia transmission over cognitive radio networks using decode-and-forward multi-relays and rateless coding[C]// Proceedings of 2014 International Conference on Communications and Networking. Hammamet: IEEE, 2014: 1-5.
- [30] Duy T T, Kong H Y. Secondary Spectrum Access in Cognitive Radio Networks Using Rateless Codes over Rayleigh Fading Channels[J]. Wireless Personal Communications, 2014, 77(2): 963-978.
- [31] Chen X, Yuen C. Efficient Resource Allocation in a Rateless-Coded MU-MIMO Cognitive Radio Network With QoS Provisioning and Limited Feedback[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(1): 395-399.
- [32] 楼文涛,张朝阳,陈少磊,等. 基于无速率编码的认知无线电系统能量分配算法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(10): 1816-1821.
LOU Wentao, ZHANG Chaoyang, CHEN Shaolei, et al. Energy allocation in rateless coded cognitive radio system [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(10): 1816-1821. (in Chinese)

作者简介:



姚渭箐(1983—),女,湖北武汉人,2011年于武汉理工大学获通信与信息系统专业硕士学位,现为武汉大学电子信息学院博士研究生,主要研究方向为无线通信和编码;

YAO Weiqing was born in Wuhan, Hubei Province, in 1983. She received the M. S. degree from Wuhan University of Technology in 2011. She is currently working toward the Ph. D. degree. Her research concerns wireless communications and coding.

Email: ywq1005@whu.edu.cn

易本顺(1965—),男,湖北武汉人,1996年于华中科技大学获博士学位,现为武汉大学电子信息学院教授、博士生导师,主要研究方向为多媒体通信、信道编码、无线网络和光电信息系统。

YI Benshun was born in Wuhan, Hubei Province, in 1965. He received the Ph. D. degree from Huazhong University of Science and Technology in 1996. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns multimedia communication, channel coding, wireless network and photoelectric information system.