

基于认知的多信道无线 mesh 网络路由协议研究

王靖¹ 李芳芳² 于全¹

(解放军理工大学研究生队 南京 210007)¹ (兰州工业学院 兰州 730050)²

摘要 在多信道无线 mesh 网络中,路由选择与频谱可用性之间的相互依赖性很强,这就要求设计路由协议时要充分考虑信道的选择。传统的路由协议不能很好地适用于多信道无线 mesh 网络,因此提出了一种基于认知无线电的无线 mesh 网络路由协议,其中每个节点配置两个网络接口,路由选择与信道选择同时进行,通过冲突避免的设计,充分利用了多信道的优势。仿真结果表明,相对于传统路由协议,提出的路由协议能大大提高网络的吞吐量。

关键词 认知无线电,多信道无线 mesh 网络,路由协议,冲突避免

中图分类号 TN919.72 **文献标识码** A

Cognitive Radio Based Routing Protocol for Multi-channel Wireless Mesh Networks

WANG Jing¹ LI Fang-fang² YU Quan¹

(P. L. A University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)¹ (Lanzhou Polytechnical College, Lanzhou 730050, China)²

Abstract In multi-channel wireless mesh network, there is tight inter-dependence between route selection and availability of spectrum, so selection of channel is required to be fully considered when designing routing protocol. Traditional routing protocol can't be well applied to cognitive radio network. The proposed routing protocol, in which each node is equipped with dual network interface, achieves routing selection and channel selection simultaneously, and takes advantage of multiple channels with collision avoidance design. Simulation shows that the proposed protocol, compared to traditional routing protocol, can significantly improve throughput of the network.

Keywords Cognitive radio, Multi-channel wireless mesh networks, Routing protocol, Collision avoidance

1 引言

无线网状网(Wireless Mesh Network, WMN)是一种新型的分布式宽带无线网络架构,其核心思想是让网络中的每个节点都可以同时作为接入点和路由器^[1]。WMN具有优良的可扩展性、健壮性和自组织性,能够支持快速部署和安装,能实现高带宽高速率的路由传输,可应用于宽带局域网、交通医疗系统网络及城域网等各种场景。

传统的WMN在建立路由时,可用信道是确定不变的,路由考虑更多的是网络拓扑建立和优化问题。在基于认知的WMN中,节点通过感知频谱空洞来获得更多可用频谱,使网络的传输资源得以增加,从而提升网络容量^[2]。当主用户在授权频段出现时,作为次用户的WMN必须让出占用的信道。在这种情况下,WMN节点(认知无线电终端)的可用信道集随时间和空间位置的不同而改变,各节点的可用信道集在同一时刻相异。这种可用信道集的动态变化,带来了传输链路的动态变化,从而使得在其基础上建立的路由也具有高度的动态性。当节点具有多种无线接口时,情况将变得更加复杂,路由问题常伴随着信道选择问题^[3]、耳聋问题^[4]。“耳聋”问题引起邻居节点通信中断,表现为邻居节点消失,在路由

由建立过程中和建立后,将引起路由的重构,进而影响着网络性能。因此,在基于认知的多信道WMN路由设计中,路由选择问题和信道选择问题相互耦合。在路由选择中选择下一跳节点的同时,需要决定相应链路应使用哪个信道;在节点进行信道分配的同时,也确定了其可达的下一跳节点。对于这两个耦合问题的解决,比较有效的思路是跨网络层和MAC层联合解决,即在进行路由选择的同时,决定路径上的每条链路使用哪个信道以及何时使用,这需要对路由中各节点的信道选择有更多了解。

路由与信道同时选择是有效提高多信道WMN吞吐量性能的重要设计方法^[5]。文献[6,7]对路由和频谱管理的跨层设计和独立设计用仿真进行了比较,两篇文献的结果都表明,对每一跳进行路由构建和频谱分配相结合的跨层设计比相继进行独立的路由选择和频谱分配要好。文献[6]提出了一种联合进行路由选择和频谱管理的跨层设计方案。在这种方法中,每个源节点使用DSR发现备选的路径,为每一跳确定时间和信道。文献[7]使用一种新的图形建模技术进行了类似的对比。两种方法都要求事先了解整个网络的信息,而且算法复杂度较高。

本文提出了一种基于认知无线电的WMN路由协议,在

到稿日期:2011-12-24 返修日期:2012-07-30 本文受国家“973”计划项目(2009CB320403),国家自然科学基金项目(60832008)资助。

王靖(1981-),男,博士生,主要研究方向为无线 mesh 网络技术、认知无线电技术, E-mail: wangjing0911918039@126.com; 李芳芳(1981-),女,硕士生,讲师,主要研究方向为无线网络技术方面; 于全(1961-),男,教授,工程院院士,主要研究方向为无线网络仿真技术、认知无线电技术。

标准的 AODV^[8]路由协议机制基础上,采用分布式方式同时进行信道选择与路由选择,信道选择在节点本地完成,并避免信道干扰和冲突,以最大化地提高网络吞吐量。

2 系统模型

为便于分析,做出如下假设:

- 1) 每个认知设备已实现频谱感知功能,监测附近的频谱使用情况并识别可用频谱;
- 2) 频谱感知机制完成对可用频谱的感知,并保持一张信道状态列表,用 1、0 状态表示当前是否可用,其中 1 表示可用,0 表示不可用;
- 3) 每个无线收发设备都是频率敏捷的,可以在所选择的可用信道之间快速切换;
- 4) 采用通用的 802.11DCF 协议;
- 5) 每个节点配备两个无线网络接口,分别作为驻留信道接口和发送信道接口。节点经过信道选择过程选择一个信道作为其驻留信道,通过监听驻留信道接收发送给它的数,直到下一次信道选择过程选择了一个新的驻留信道。其它节点可以任何时候通过节点的驻留信道找到该节点并与之通信。发送信道接口用来发送数据,当节点有数据要发送时,根据路由表的信息切换到下一跳节点所处的信道上发送数据;
- 6) 假设在网络初始化或可用信道集发生改变时,每个节点可以通过交互控制消息知道其两跳邻居节点的状态信息,一个节点发出的消息能够被其所有的邻居节点在很短的时间内正确收到;
- 7) 假设在节点执行驻留信道选择算法期间,节点的邻居关系及邻居状态不发生改变。

3 多信道冲突避免

在多信道认知 WMN 中,为了充分利用多个信道的优势,邻近节点应该尽量选择不同的信道,以避免相互干扰和冲突。如果两对节点因为干扰或者握手无法顺利进行而不能同时通信时,则两组通信发生相互冲突。

如图 1 所示(X:1 表示节点 X 处在信道 1 上),节点 A 和 B 为网络中已分配好信道的节点,节点 A 在信道 1 上,节点 B 在信道 2 上。考虑节点 C 和 D 的信道选择以及 C 和 D 的通信对节点 A 和 B 产生的影响。

如图 1(a)所示,由于 B 的驻留信道为 2,因此 A 在信道 2 上给 B 发送数据。这时,如果 D 选择了信道 2 作为其驻留信道,则 C 在信道 2 上给 D 发送数据。由于 C 是隐藏终端,C 不能发送 RTS 帧,因此,C 与 D 间的通信和 A 与 B 间的通信产生冲突。

如图 1(b)所示,A 在信道 2 上给 B 发送数据,假设 C 选择了信道 2,如果 D 想与 C 通信,D 向 C 发送 RTS 帧,C 由于是隐藏终端而不能回复 CTS 帧,握手无法进行,因此 C 与 D 间的通信和 A 与 B 间的通信产生冲突。

如图 1(c)所示,A 的驻留信道为 1,B 向 A 发送数据。假设 D 选择了信道 1 作为其驻留信道,如果 C 欲与 D 通信,则 C 在信道 1 上向 D 发送 RTS 帧。但是,C 收不到 D 的 CTS 帧,握手无法进行。因此,C 与 D 间的通信和 A 与 B 的通信产生冲突。

如图 1(d)所示,B 在信道 1 上向 A 发送数据。假设 C 选择了信道 1 作为其驻留信道,如果 D 想与 C 通信,D 将在信

道 1 上向 C 发送 RTS 帧。但是,C 收不到 D 的 RTS 帧,握手无法进行。因此,C 与 D 间的通信和 A 与 B 间的通信产生冲突。

在图 1(a)和图 1(b)所示的情况下,A 在信道 2 上向 B 发送数据时,C 在信道 2 上向 D 发送数据和 D 在信道 2 上向 C 发送数据都无法进行,因此 C 和 D 都不能选择信道 2。在图 1(c)和图 1(d)的情况中,B 在信道 1 上向 A 发送数据时,C 在信道 1 上向 D 发送数据和 D 在信道 1 上向 C 发送数据都无法进行,因此 C 和 D 都不能选择信道 1。

在多信道且每个节点配置两个网络接口的情况下,节点可能同时进行收发工作,如 A 在信道 1 上向 B 发送数据,同时接收 B 在信道 1 上发送给它的数。如前所述,此时 C 和 D 在信道 1、信道 2 上都不能通信,否则将产生冲突。因此,在所有节点同时进行收发工作的情况下,节点应该避免选择与三跳范围内节点相同的信道。

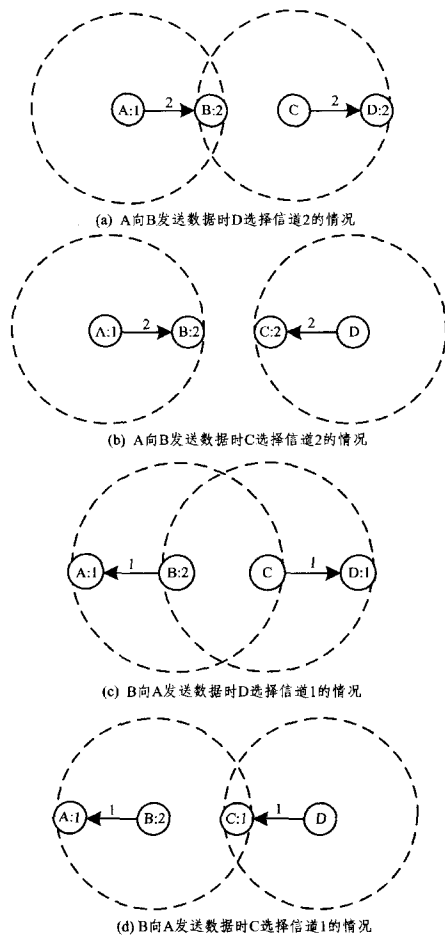


图 1 多信道冲突避免示意图

要达到理想情况下的冲突避免,网络中就要有足够多的可用信道,这在实际情况不一定能达到。考虑次优的情况,即一条数据流中的冲突避免,如图 2 所示。图中,X:1 表示节点 X 处在信道 1 上。对于从源节点 S 到目的节点 D 的一条数据流,为避免隐藏终端和暴露终端^[6]引入的通信冲突,N3 不可以选择信道 1、2,可以选择信道 0。可见,节点应避免选择与两跳范围内节点相同的信道作为驻留信道。



图 2 一条数据流中的冲突避免

4 路由协议

基于认知的双网络接口多信道 WMN 路由协议 CRRP-DNI(Cognitive Radio based Routing Protocol for multi-channel WMN with Dual Network Interfaces)在 AODV 路由协议已有的路由发现、路由选择、路由维护机制上,增加如下内容及机制:

1)在路由表条目和每种路由报文中加入节点信道信息,以支持多信道操作。路由表条目如表 1 所列。

表 1 CRRP-DNI 路由表条目

目的节点 IP 地址	目的节点 序列号	跳数	下一跳 节点	预发送 节点列表	预发送节点 信道列表	寿命	标识
---------------	-------------	----	-----------	-------------	---------------	----	----

表 1 中,“预发送节点信道列表”用于将路由错误(RERR)报文正确地发送给预发送节点。

2)在路由应答报文(RREP)中包含路径中所有节点的信道信息,以便获得路径中所有节点的信道信息,支持路由和信道选择同时进行。RREP 报文格式如表 2 所列。

表 2 CRRP-DNI RREP 报文

转发 跳数	路由请求 节点 IP 地址	路由请求目的 节点序列号	路由请求源 节点 IP 地址	路由请求源 节点序列号	节点 信息表
----------	------------------	-----------------	-------------------	----------------	-----------

3)增加一种包含了所有节点驻留信道选择结果的路由信通通知报文(RCNP),用于信道选择完成后进行结果通告。RCNP 报文如表 3 所列。

表 3 CRRP-DNI RCNP 报文

路由请求目的 节点 IP 地址	路由请求目的 节点序列号	路由请求源 节点 IP 地址	路由请求源 节点序列号	节点 信息表
--------------------	-----------------	-------------------	----------------	-----------

4)改进了路由维护机制,快速感知并处理网络中频谱可用性变化引起的链路中断,以避免造成大量 MAC 开销。

4.1 协议操作流程

路由协议操作流程示意图如图 3 所示。

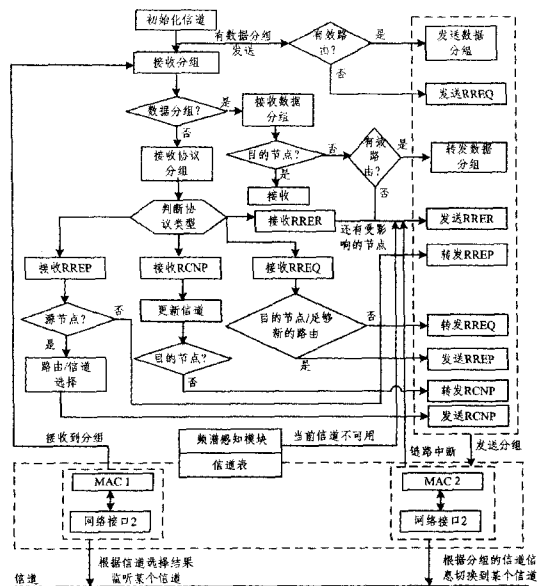


图 3 CRRP-DNI 路由协议操作流程

4.2 协议实现机制

以下描述 CRRP-DNI 与 AODV 不同的实现机制部分。

4.2.1 初始化信道

网络初始化阶段,各个节点首先通过频谱感知模块获得

网络中可用信道集合。如果节点没有收到来自其它节点的驻留信道占用信息,则在可用信道中,随机选择一个信道作为本节点的驻留信道。若收到其它节点驻留信道占用信息的节点,则在节点驻留信道状态表中记录下邻居节点的 ID 号及所在驻留信道,并根据当前两跳邻居节点驻留信道状态表,在剩余的可用信道中,尽量选择一个与所有两跳内邻居节点驻留信道不同的信道作为本节点的驻留信道。如果节点无法选择到与两跳范围内所有邻居节点驻留信道完全不同的信道,则尽量使得相邻节点不使用同一个信道作为驻留信道。完成了驻留信道选择的节点将本节点所在驻留信道及本节点当前所记录的一跳邻居节点驻留信道状态表,通过广播的方式告诉其邻居节点。

4.2.2 路由发现机制

当一个节点有数据分组要发送时,同 AODV 协议一样,它通过广播路由请求(RREQ)报文触发路由发现过程。由于邻居节点可能处在不同的信道上,RREQ 报文必须在已知所有邻居节点的驻留信道上广播。如果 RREQ 报文经过中间节点的洪泛,最终能到达目的节点,则路由发现成功。否则,路由发现失败。RREQ 中转发节点所处信息域包含了各节点的驻留信道和当前可用信道信息,其报文主要结构如表 4 所列。

表 4 CRRP-DNI RREQ 报文

转发 跳数	路由请 求识别码	路由请求 目的节点 IP 地址	路由请求 目的节点 序列号	路由请求 源节点 IP 地址	路由请求 源节点 序列号	转发节点 所处信息
----------	-------------	-----------------------	---------------------	----------------------	--------------------	--------------

路由发现过程示例如图 4 所示。源节点 S 想发现到目的节点 D 的路由,假设节点 S 驻留信道为 0,周围邻居节点的驻留信道分别为信道 1、2、4。S 在已知所有邻居节点的驻留信道上以轮循方式广播 RREQ,并在广播结束之后返回到其驻留信道上。中间节点接收到 RREQ 后,也在除上游节点之外的已知所有邻居节点的驻留信道上转发 RREQ 报文,结束后也将回到其驻留信道上。像 AODV 中的一样,当 RREQ 向前传递时,也建立了一个到转发节点的反向路径。RREP 报文产生和传递的基本机制与 AODV 协议一样。

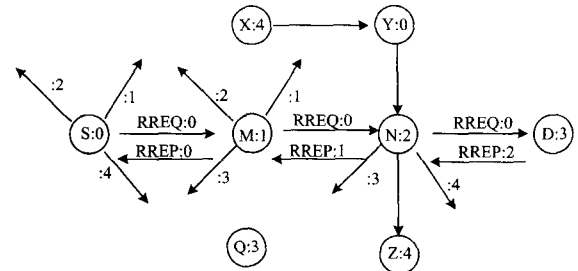


图 4 CRRP-DNI 路由发现过程示例

4.2.3 冲突避免信道选择机制

当 RREP 报文回到路由请求源节点时,源节点获得了路径中所有节点驻留信道和可用信道状态,来进行信道选择。如果一个节点有正在进行的传输任务,改变信道会产生路由中断。因此,为了不对正在进行的数据流产生影响,只有没有传输任务的节点才需要执行冲突避免信道选择算法来选择驻留信道,而有传输任务的节点不改变原信道。

根据冲突避免分析,驻留信道的选择需要进行冲突避免优化,尽量使两跳范围内的节点不使用相同的信道;如果做不

到,尽量使相邻节点不使用同一个信道。结合各 RREP 消息中所包含的各可选路由的信道信息,优先选择能满足上述冲突避免信道优化条件的路径,作为后续数据分组发送到路由。冲突避免驻留信道选择算法参考文献[9]。当网络中节点的可用信道集发生变化时,节点重新按照上述两跳内不冲突的原则确定新的驻留信道,并及时通过控制信息向邻居节点发送状态更新消息(在邻居节点的驻留信道上完成控制信息传递)。

源节点执行完信道选择后,将沿着建立好的路由发送 RCNP。节点接收到 RCNP 报文后,更改其信道。

4.2.4 路由维护机制

由于节点损坏和移动性导致一条路由可能在使用时中断,CRRP-DNI 协议采用和 AODV 协议相同的机制进行处理。在多跳 WMN 中,当具有相同驻留信道的节点移动到彼此无线覆盖范围交叠的区域时,相关节点的当前信道将变得不可用,造成路由中断。在这种情况下,节点直接根据频谱感知结果,发送 RERR 报文,通知所有预发送节点发生了路由中断,而不需要根据 MAC 层的链路来中断判断机制,从而避免了大量的 MAC 层开销。

RRER 报文的发送需要考虑以下两个方面:

- 1)由于节点失去信道,无法接收分组,其它节点路由表中所有下一跳为本节点的条目都将失效。
- 2)预发送节点可能处在不同的信道上,因此,RRER 报文依次在所有预发送节点的信道上广播。

5 仿真结果及分析

假设网络中每个节点有 5 个信道,通过定期改变节点所维护信道状态表中 5 个信道是否为可用的状态,模拟多信道 WMN 环境。由于信道状态具有地域特征,处在一定区域范围内的所有节点共享相同的信道状态。例如,仿真开始时设置某个区域内 5 个信道的状态分别为 1、1、0、0、0,而相邻区域内 5 个信道的状态标志为 1、0、1、0、0,其它区域内为其它的信道状态。仿真中,还可通过调整信道状态改变的频率,考察其对网络吞吐量的影响。

为了考察 CRRP-DNI 协议中配置两个接收机对路由协议性能的影响,将其与只有一个网络接口情况下基于 AODV 协议的 WMN 性能进行对比,后者记为 CR-AODV。

本文采用 NS2 作为网络性能仿真评估工具^[10]。通过改变总的传输负载、信道切换频率、平均可用信道数参数,获得不同的网络仿真场景,测量各场景中所有数据流的综合吞吐量,获得两种路由协议的性能评估结果。主要仿真参数设置为:采用 CBR 数据流,传输协议为 UDP;数据分组大小为 512 字节;网络环境为 2000m×1000m 的矩形区域;节点数为 50 个,源节点数为 10 个;每个节点的无线覆盖范围为 250m。为了排除节点移动性造成的链路中断,并考虑到 WMN 节点移动性小的特点,设定节点位置为固定;MAC 协议采用 IEEE802.11DCF 协议。

设定信道改变频率为 1 次/秒,平均可用信道数为 2 个,总传输负载变化范围为 80Kbps 到 960Kbps,仿真结果如图 5 所示。可见,随着总数据流流量的增加,CRRP-DNI 比 CR-AODV 的性能有明显改善。由于 CR-AODV 只有一个网络接口,每个分组的传输都可能遇到耳聋问题,引入大量 MAC 控制开销,可使网络吞吐量很快达到饱和。而 CRRP-DNI 中

节点有两个网络接口,其中一个一直监听其驻留信道,避免了耳聋问题,因此,吞吐量远远超过了 CR-AODV 的两倍。当然,网络中频繁的信道切换会带来路由中断,导致不断触发路由发现,对两者的性能都造成了恶化。

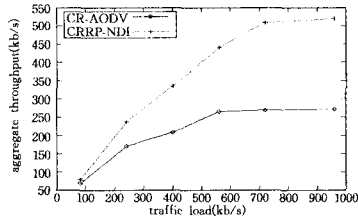


图 5 不同协议情况下传输负载对吞吐量性能的影响

设定源节点数为 10,总的传输负载为 800Kbps,平均信道数为 2 个,信道改变频率从 0.01 次/秒到 100 次/秒,仿真结果如图 6 所示。图中,为表示方便,横坐标对信道改变频率采取对数运算,对应坐标见表 5。可见,随着信道改变频率的增加,路由频繁中断,需要不断进行新的路由发现过程,导致吞吐量大幅度下降。

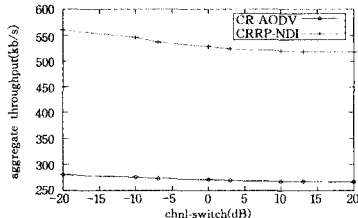


图 6 不同协议情况下信道切换频率对吞吐量性能的影响

表 5 坐标转换对照表

信道改变频率 (次/秒)	0.01	0.1	0.5	1	2	10	20	100
横坐标 (dB)	-20	-10	-7	0	3	10	10	20

设定信道改变频率为 1 次/秒,可用信道数从 2 变化到 5,仿真结果见图 7。可见,信道数为 3 时网络的吞吐量相对信道数为 2 时得到了大幅度的提升。这是由于数据流内冲突避免的优化措施使得周围节点可以尽可能地选择不同的信道,减少了数据流中相邻节点的冲突和数据流之间的冲突,从而大大提高了网络的吞吐量。不过,在信道数为 4、5 时,网络吞吐量并没有很大提升,这是由多个数据流之间的相互干扰造成的。

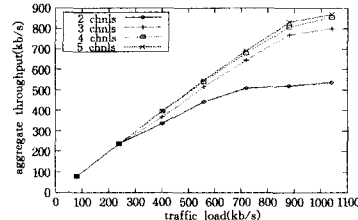


图 7 不同协议情况下平均可用信道数对吞吐量性能的影响

结束语 本文对认知无线网络中的路由协议和信道选择采取了协同设计,路由选择与信道选择同时完成。在协议中,每个节点配置 2 个网络接口,从而避免了耳聋问题的发生,大大提高了网络的吞吐量。协议还采取了数据流内冲突避免设计。仿真表明,这项策略能较好地提高协议的性能。下一步的研究方向是研究信道切换延迟给网络时延性能带来的影响,设计一种数据分组队列管理方案来降低网络的时延。

参考文献

- [1] 任娟. 无线 Mesh 网络的资源分配及拥塞控制算法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010
- [2] 郑相全. 基于认知无线电的移动自组网关键技术研究[J]. 重庆通信学院学报, 2006, 25(6): 4-7
- [3] 郑相全, 郭伟, 葛利嘉. 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
- [4] So J, Vaidya N H. A routing protocol for utilizing multiple channels in multi-hop wireless networks with a single transceiver [R]. Tech. rep., UIUC, October 2004
- [5] Akyildiz I F, Lee W Y, Vuran M C, et al. NeXt Generation Dynamic Spectrum Access Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey[J]. Computer Networks Journal (Elsevier), 2006, 1(50): 2127-2159

(上接第 14 页)

某些技术也已经趋于成熟。在具体研究过程中, 可以不拘泥于多生物特征融合。目前的研究总体上从单一生物特征识别向多生物特征识别发展, 从平面静止图像向活动视频和三维立体方向发展, 从生物特征向与软生物特征、密码等传统识别方式相结合的方向发展。

参考文献

- [1] 孙冬梅, 裘正定. 生物特征识别技术综述[J]. 电子学报, 2001, 29(12A): 1744-1748
- [2] 祝恩, 殷建平, 张国敏, 等. 自动指纹识别技术[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2006: 1-190
- [3] Ho T K, Hull J J, Srihari S N. Decision Combination in Multiple Classifier Systems[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(1): 66-75
- [4] Vatsa M, Singh R, Noore A, et al. On the Dynamic Selection of Biometric Fusion Algorithms[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2010, 5(3): 470-479
- [5] 刘红毅, 王蕴红, 谭铁牛. 基于改进 ENN 算法的多生物特征融合的身份验证[J]. 自动化学报, 2004, 30(1): 78-85
- [6] Brunelli R, Falavigna D. Person Identification Using Multiple Cues[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence, 1995, 17(10): 955-966
- [7] Kittler J, Hatef M, Duin R P, et al. On Combining Classifiers [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20: 13
- [8] Nandakumar K, Chen Y, Dass S C, et al. Likelihood Ratio-Based Biometric Score Fusion[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(2): 342-347
- [9] Outa R D, Hart P E, Strok D G. Pattern Classification[M]. John Wiley & Sons, 2001
- [10] Wang Y H, Tan T N, Jain A K. Combining Face and Iris Biometrics for Identity Verification[C]// Audio and Video-Based Biometric Person Authentication. Heidelberg: Springer-Verlag, 2003: 805-813
- [11] M I U. Multimodal Biometric Authentication Methods: A Cots Approach[C]// Proceedings of Multi-Modal User Authentication (MMUA). Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2003: 99-106
- [12] He M X, Horng S J, Fan P Z, et al. Performance Evaluation of Score Level Fusion in Multimodal Biometric Systems[J]. Pattern Recognition, 2010, 43(5): 1789-1800

- [6] Wang Q, Zheng H. Route and spectrum selection in dynamic spectrum networks[C]// IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CNCC). January 2006: 342-346
- [7] Xin C. A novel layered graph model for topology formation and routing in dynamic spectrum access networks[C]// Proc. of IEEE DySPAN 2005. November 2005: 308-317
- [8] 郑相全. 无线自组网技术实用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 51-98
- [9] Zheng Xiang-quan, Li Ying, Zhang Hai-cheng. A Collision-Free Resident Channel Selection Based Solution for Deafness Problem in the Cognitive Radio Networks[C]// 2010 IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systmes. Honolulu, Hawaii, USA, 2010: 291-294
- [10] UCB/LBNL/VINT. Network Simulator-Ns (version 2) [EB/OL]. <http://www.mash.cs.berkeley.edu/ns>, November 2010
- [13] Snelick R, Indovina M, Yen J, et al. Multimodal Biometrics: Issues in Design and Testing[C]// 5th International Conference on Multimodal Interfaces. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2003: 68-72
- [14] Jain A, Nandakumar K, Ross A. Score Normalization in Multimodal Biometric Systems [J]. Pattern Recognition, 2005, 38(12): 2270-2285
- [15] Dass S C, Nandakumar K, Jain A K. A Principled Approach to Score Level Fusion in Multimodal Biometric Systems[C]// Kanade T, Jain A, Ratha N K, eds. Audio and Video Based Biometric Person Authentication. Heidelberg: Springer-Verlag, 2005: 1049-1058
- [16] Nandakumar K, Chen Y, Dass S C, et al. Likelihood Ratio-Based Biometric Score Fusion[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(2): 342-347
- [17] Prabhakar S, Jain A K. Decision-Level Fusion in Fingerprint Verification[J]. Pattern Recognition, 2002, 35(4): 861-874
- [18] 刘明, 袁保宗, 苗振江. 一种双目标排序层分类器融合方法[J]. 自动化学报, 2007, 33(12): 1276-1282
- [19] Wang F, Han J. Multimodal Biometric Authentication Based On Score Level Fusion Using Support Vector Machine[J]. Opto-Electronics Review, 2009, 17(1): 59-64
- [20] Kumar A, Kanhangad V, Zhang D. A New Framework for Adaptive Multimodal Biometrics Management[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2010, 5(1): 92-102
- [21] Tronci R, Giacinto G, Roli F. Dynamic Score Combination of Binary Experts [C]// 19th International Conference on Pattern Recognition. Vols 1-6, Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2008: 2420-2423
- [22] Poh N, Bourlai T, Kittler J, et al. Benchmarking Quality-Dependent and Cost-Sensitive Score-Level Multimodal Biometric Fusion Algorithms[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2009, 4(4): 849-866
- [23] Poh N, Windridge D, Mottl V, et al. Addressing Missing Values in Kernel-Based Multimodal Biometric Fusion Using Neutral Point Substitution[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2010, 5(3): 461-469
- [24] Toh K A, Kim J, Lee S. Biometric Scores Fusion Based On Total Error Rate Minimization[J]. Pattern Recognition, 2008, 41(3): 1066-1082
- [25] Toh K A, Kim J, Lee S. Maximizing Area Under Roc Curve for Biometric Scores Fusion[J]. Pattern Recognition, 2008, 41(11): 3373-3392