

认知无线网络中一种新的反压式传输控制机制

孙杰* 郭伟

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 611731)

摘要: 认知无线网络中资源动态变化, 必须制定特别的传输控制机制来协调各节点间的传输。该文提出一种新的反压式传输控制机制, 充分利用局部节点间的调整能力, 将端到端传输中出现的不良网络状况尽量解决在局部, 使得源节点可以较温和地做出端到端控制, 从而保证端到端传输的高效与平稳。大量仿真证明, 该文控制机制能有效适应认知无线网络的动态环境, 保证较高效且平稳的端到端传输。

关键词: 认知无线网络; 动态网络环境; 端到端传输; 传输控制; 反压式

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)02-0320-08

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00795

A Novel Backpressure Transmission Control Mechanism for Cognitive Wireless Networks

Sun Jie Guo Wei

(National Key Laboratory of Science and Technology on Communications,
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Because the resources in cognitive wireless networks are high dynamic, there must be a special transmission control mechanism to coordinate the transmission of each node. A novel backpressure transmission control mechanism is proposed to supply an efficient and stable end to end transmission. The novel control mechanism takes full advantage of the adjustment ability of the local nodes to solve the undesirable network conditions in a local area and make the source node making the end to end control measures softly. An extensive simulations show that the transmission control mechanism is suitable for the dynamic cognitive wireless networks, and is capable of making the end to end transmission efficient and stable.

Key words: Cognitive wireless networks; Dynamic network environment; End-to-end transmission; Transmission control; Backpressure

1 引言

认知无线网络是以认知无线电技术^[1]为基础的一种新型网络。它针对现有授权用户频谱利用率低下^[2]的特点, 利用授权用户占用频谱的空闲时段, 择机使用授权频谱进行通信。一般将授权用户称为主用户(Primary User, PU), 将认知用户称为次级用户(Secondary User, SU)。次级用户在主用户活跃时必须停止通信或者减小发射功率, 不能干扰主用户的通信。

目前对认知无线网络的研究主要集中在底层技术, 如频谱检测、频谱分配、接入控制等, 业已有不少研究成果^[3,4]。但实际端到端传输的性能并不仅取决于底层技术。底层协议主要负责节点自身的传

输性能, 若没有一个良好的高层传输控制机制来协调各节点间的传输, 则无法仍实现高效的端到端传输。经查阅大量文献, 目前对认知网络传输控制机制的研究还较少^[5]。为此, 本文将针对认知无线网络频谱资源动态易变的特性, 制定合适的传输控制机制。

国内外对认知无线网络传输控制机制的研究十分有限。文献[6]扩展了NS2使之支持认知无线网络, 并通过大量仿真发现, 频谱检测时间和主用户干扰是影响次级用户端到端传输性能的最大因素。文献[7]在假设主用户活动服从泊松分布的条件下, 设计了一种认知 Ad hoc 网络的传输层协议 TCP CRAHN。该协议主要通过下层协议向上层反馈大量信息来区分频谱检测、主用户活动等不同网络状况。但该协议需要中间节点向源节点反馈大量信息, 开销太大; 且对主用户活动进行完美预测的假设条件也不符合现实情况。文献[8]将 TCP 跨层优化问题

2012-06-21 收到, 2012-10-22 改回

国家 973 计划项目(2009CB320405)和国家自然科学基金(61271168, 61001085)资助课题

*通信作者: 孙杰 sun.jie.sc@163.com

建模成部分可观察马尔可夫链, 通过仿真得出可通过优化下层参数来提高 TCP 性能的结论。

已有文献要么假设主用户行为是可以完全预测的^[7], 要么仅分析了单跳网络中的传输性能^[6,8]。针对分布式无线多跳环境下认知网络传输控制机制的研究非常缺乏。本文针对频谱资源动态易变的特性, 首次在多跳认知无线网络中提出“反压”式控制机制, 尽量利用局部节点的调整能力来适应快速动态变化的网络环境。并针对影响认知无线网络端到端传输性能的各个因素, 制定了一套较为完整的认知无线网络传输控制机制。

本文章节安排如下: 第2节首先给出网络场景和系统模型; 第3节介绍影响次级用户端到端传输的主要因素; 第4节针对以上因素分别制定有效的传输控制机制; 第5节通过大量仿真验证本文所提控制机制的有效性, 最后是全文总结。

2 网络场景和系统模型

本文主要考察次级用户以无线多跳方式所构成的认知无线网络。各次级用户随机分布在不同主用户覆盖下, 所能获得的频谱资源可能不同。对网络做如下基本假设:

(1)各主用户频谱相互正交。即对次级用户而言所有可用信道相互独立。

(2)存在独立于所有主用户信道的公共控制信道。次级用户在该信道上不受主用户时间、功率等条件上的约束。

(3)不要求各次级用户节点时间同步。

(4)相对于算法运行时间, 节点移动性可以忽略。

研究表明, 频谱检测是影响次级用户端到端传输的重要原因^[5-7]。目前频谱检测的研究成果主要可分为两类: 单点检测和协作检测。前者依靠节点自身单独判断主用户是否出现^[9]; 后者通过次级用户间交互单独检测结果后综合判断主用户行为, 可以有效提高频谱检测的准确性^[10]。但无论哪种检测方式, 一般都采用周期性“频谱检测-信道协商-数据传输”的执行顺序。为保证控制的统一性, 本文对该模式做一定限制如下。但不区别对待单点检测或协作检测, 也不对具体检测算法做任何要求。

(1)考虑到节点的异构性及及时变性。节点须在每次频谱检测结束后, 确定自身下一次的频谱检测周期 T_s 及频谱检测时长 τ 。不同节点的 T 和 τ 可不相同, 同一节点在不同时间的 T 和 τ 也可不同。

(2)节点在公共控制信道上进行“信道协商”, 在主用户信道(称之数据信道)上进行“数据传输”。收、发节点对先使用 RTS/CTS(Require To Send/

Clear To Send, 请求传输/允许传输)^[11], 在公共控制信道上以 CSMA/CA 方式交换数据信道信息, 协商选择数据传输所使用的信道, 之后切换到所选数据信道上传输。

(3)“数据传输”阶段使用 ARQ(Automatic Repeat reQuest, 自动请求重传)来保证数据传输的正确性, 即存在 MAC 层确认帧 MAC_ACK。

3 影响认知无线网络端到端传输的主要因素

认知无线网络继承了有线网、无线多跳网络影响端到端传输性能的所有因素^[5]。总结起来, 主要有以下几点:

(1)拥塞。当节点的发送速率不足以满足数据转发需求时, 即发生拥塞。一般而言, 当某节点处于多个数据流交汇处时易发生拥塞。

(2)信道误码率。无线网络的固有特点。

(3)信道冲突。无线网络由于信道共享, 当同一信道内多个节点同时发送时发生信道冲突。

(4)频谱检测。次级用户在频谱检测时无法进行发送/接收, 传输控制层若没有相应机制则必然带来问题。

(5)主用户干扰。由于频谱检测不准确或者主用户在次级用户传输期间突然出现, 则主用户会对次级用户传输带来严重干扰。

以上第(1)点为有线网、无线多跳网络、认知无线网络共有问题, 第(2), (3)点为无线多跳网络、认知无线网络共有问题, (4), (5)点为认知无线网络独有问题。

4 认知无线网络端到端传输控制机制

4.1 拥塞控制机制

端到端拥塞控制的实质是源节点的发送速率与转发节点实际可用传输速率间的匹配。这一问题在认知无线网中尤为突出。认知无线网中节点的传输速率因网络资源的动态性随时可能发生变化, 如果采用传统拥塞控制机制, 如 TCP 协议^[12], 所使用的丢包策略, 则不但会浪费匮乏的网络资源, 还会造成控制措施的严重滞后, 使所做出的控制不符合当时的网络状况。

本文采用“反压(back pressure)”技术^[13,14]来实现拥塞控制: 包括源节点在内, 各节点只负责与下一跳节点进行传输速率匹配, 自拥塞节点到源节点的所有中间节点帮助缓存因拥塞带来的数据包。算法流程图如图1所示。

首先, 各节点按转发地址将自身缓存数据包分为不同队列, 每个队列对应不同转发地址。设各队

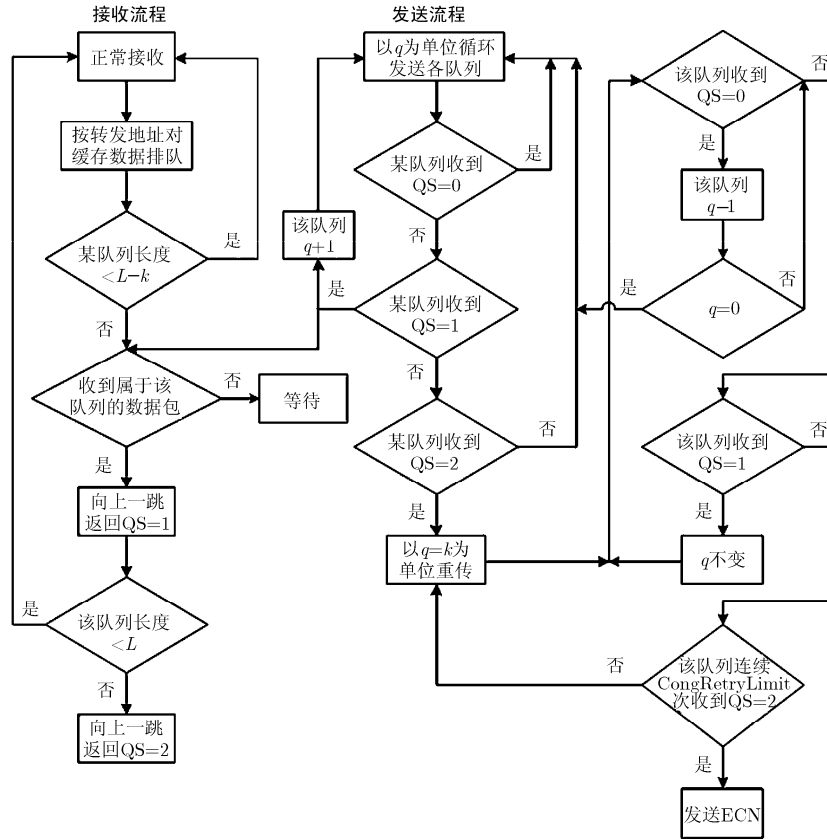


图 1 反压式拥塞控制算法流程图

列的最大长度为 L 。然后修改 MAC_ACK ，增加表明队列状态的字段—— QS (Queue State)字段，占 2 bit。 QS 默认为 0，表示队列未滿。设定“反压阈值” k ，规定当某队列长度达到 $L-k$ 后，该节点在收到的属于该队列的数据包时，立即回复 $QS=1$ 的 MAC_ACK ，告知上一跳节点暂停发送。

节点对自身各队列进行循环发送。当对某队列发送后收到 $QS=1$ 的 MAC_ACK ，立即减缓对此队列的发送，每 q ($q \geq 1$) 次循环才对该队列发送一次，直到收到 $QS=0$ 的 MAC_ACK 。 q 的算法：初始为 1，每收到一个 $QS=1$ 的 MAC_ACK ，加 1，直到最大值 k (即反压阈值)；若收到 $QS=0$ 的 MAC_ACK ，则 q 重置为 0。另一方面，当节点收到 $QS=1$ 的 MAC_ACK 后，无论自身队列是否达到 $L-k$ ，该节点对新收到的属于该队列的数据包也回复 $QS=1$ 的 MAC_ACK ，使该拥塞信息逐跳回传至源节点。若没有新收到数据包，则没有溢出的危险，无需传递此拥塞信息。

当某队列持续增长至溢出时。节点对被丢弃的数据包回复 $QS=2$ 的 MAC_ACK ，告知上一跳节点。上一跳节点收到该 MAC_ACK 后，直接设置 $q=k$ ，然后每 q 次循环重传一次。重传后，若收到

$QS=0$ 的 MAC_ACK ， q 减 1，然后传输下一数据包，直到 $q=0$ ；若收到 $QS=1$ 的 MAC_ACK ，保持 q 值不变，传输下一数据包；若连续 $CongRetryLimit$ 次收到 $QS=2$ 的 MAC_ACK ，认为该拥塞节点不可用，丢弃缓存数据包，向源节点发出显式拥塞通知(Explicit Congestion Notification, ECN)。

在本文算法中，源节点拥塞窗口依然是有效的，慢启动^[12]等算法也依然保留。但拥塞窗口的计算不再由丢包决定，而仅由反压算法中节点回复的 QS 信息决定。若源节点一直收到 $QS=0$ 的信息时，表明传输通畅，则按慢启动等算法继续增大拥塞窗口提高发送速率。当收到 $QS=1$ 的信息时，表明已经发生拥塞但情况不严重，只需逐渐减小发送速率即可。因此，规定此时以步长 w 线性减小拥塞窗口直到最小值(一般为 2)， w 暂定为 5。若收到 ECN(对应 $QS=2$ 的情况)，则表明路径某节点出现严重问题已不可用，重新选择其他路由。

4.2 针对信道误码率的控制机制

针对信道误码率，采用 ARQ 技术予以解决。不同 ARQ 算法对传输性能的影响将另文研究，本文采用停等式 ARQ。对控制信道设最大重传次数 $ControlRetryLimit1$ 和 $ControlRetryLimit2$ ，对数

据信道设最大重传次数 DATARetryLimit。

当控制信道发生 RTS/CTS 重传时,按 CSMA/CA 相关算法增大回退窗口(backoff window)^[15],各队列使用独立的回退窗口,新队列使用最小回退窗口开始发送。当 RTS/CTS 重传次数达到 ControlRetryLimit1 时,认为目标节点繁忙,缓存而不丢弃对应数据包,转而发送下一数据队列。当循环至该重传队列时,持续使用最大回退窗口重传 RTS/CTS,直到达到 ControlRetryLimit2,认为目标节点不可用,丢弃该 RTS/CTS 及对应队列的数据包,并向源节点发出 ECN。

当数据信道发生重传时,不设置回退窗口也不重新发送 RTS,直接重传。当重传次数达到 DATARetryLimit 后,认为当前信道质量不满足传输要求,缓存而不丢弃数据包,转而发送其他队列。当循环至该队列时,重新发送 RTS,与接收节点协商新的信道后重传。若在所有信道上都无法实现对某队列的传输时,认为下一跳节点不可用,丢弃整个队列的数据包,并向源节点发出 ECN。

4.3 针对信道冲突的控制机制

如前文假设,正式数据传输前需在控制信道上经 RTS-CTS 过程交换数据信道信息。因此,会发生冲突的仅是 RTS 和 CTS。对 RTS/CTS 冲突情况的分析已有很多^[16],具体计算本文不再重复。一般而言,由于体积很小,RTS/CTS 冲突的概率较低。

当 RTS/CTS 重传次数超过限制时,处理方法同上节。

4.4 针对频谱检测的控制机制

频谱检测会造成节点较长时间暂停收发,严重影响端到端传输性能^[17]。同时频谱检测时间长度与主用户检测概率是一对矛盾。越长的检测时间,对主用户检测越准确,反之越不准确^[18]。已有的频谱检测算法大都在不同条件下寻找这二者之间的平衡,得出一个优化的检测时间长度 $\tau^{[18-20]}$ 。本文不限制各节点使用的频谱检测算法,各节点确定自身的 τ_i 。

为保证传输控制的及时性,并与上文“反压”式控制机制相配合。本文不采用源节点收集所有信息的做法,而采用本地处理的方法。规定节点在两次频谱检测之间在公共控制信道上在一跳邻居范围内,广播距离自身执行频谱检测的剩余时间 u_i 和下一次频谱检测时间长度 τ_i 。为避免冲突,广播时间在两次频谱检测间隔之间随机进行选择,如图 2 所示。这里忽略传播时延。

这样,任意节点在转发数据包时都已知其下一跳节点何时会进行频谱检测,从而主动暂停发送,

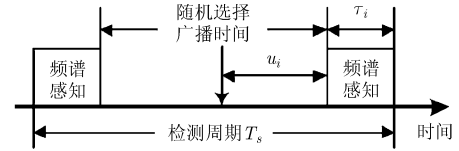


图 2 频谱检测时间信息广播示意图

等待下一跳节点可用。暂停时间的数据包堆积问题,由 4.1 节拥塞控制机制解决。当 u_i 满足式(1)时,即不足以再完成一次完整数据传输时,就应当立刻暂停发送。暂停发送时间为 $u_i + \tau_i$ 。如图 3 所示。

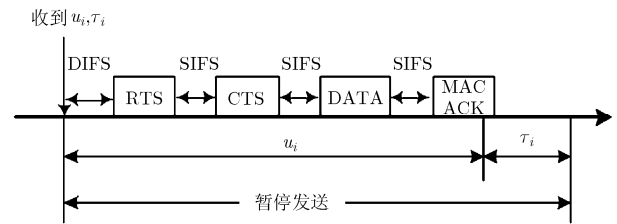


图 3 频谱检测时间信息广播示意图

$$u_i < \text{RTS} + \text{CTS} + \text{DATA} + \text{MAC_ACK} + 3\text{SIFS} + \text{DIFS} \tag{1}$$

式(1)中 RTS, CTS, DATA, ACK 均为对应报文的传输时间。

通过以上机制,频谱检测的影响在本地就得以解决,而不需要耗费大量网络资源传递至源节点处理。同时也避免了因控制报文的传输时延带来的控制措施滞后问题。

源节点重传超时计时器(Retransmission TimeOut, RTO)是另一个受到频谱检测时间严重影响的参数。研究表明,频谱检测会造成端到端往返时延(Round Trip Time, RTT)增大且波动幅度增大^[6]。因传统 RTO 算法^[21]已考虑了 RTT 的波动,目前尚未有文献报告指出传统 RTO 算法不适用认知无线网络,因此本文沿用传统 RTO 算法。但根据大量仿真结果,本文增大相关计算系数,采用更保守的 RTO 取值。如式(2)所示,传统算法 $\lambda=4$,本文 $\lambda=8$ 。式中 EstimatedRTT 表示 RTT 估计值,DevRTT 表示 RTT 距离 EstimatedRTT 的偏差。具体算法可查考文献^[21]。

$$\text{RTO} = \text{EstimatedRTT} + \lambda\text{DevRTT} \tag{2}$$

4.5 针对主用户干扰的控制机制

无论是已有的频谱检测算法^[9,10],还是针对认知无线网络的传输控制改进算法^[7],无一例外地假设在两次频谱检测间隔之间(即次级用户传输期间),主用户要么一定出现,要么一定不出现。没有考虑在次级用户传输期间,主用户突然出现的情况。

本文由于假设存在独立于主用户信道的公共控制信道,因此主用户活动只能干扰到业务数据包和 MAC_ACK 的传输,对 RTS,CTS 的传输没有影响。

主用户对次级用户传输的干扰,一方面在频谱检测结果为主用户存在时,次级用户必须让出当前信道避让主用户。本文对此的策略是:将对应信道标记为不可用,重新发送 RTS/CTS 协商其他信道通信。另一方面,当检测结果错误或者在次级用户传输期间主用户突然出现,此时主用户对次级用户的干扰可等效为信道误码率上升。因此具体控制措施同 4.2 节。若干扰不严重未引起次级用户丢包,则无需采取任何措施。若干扰严重引起丢包,采用直接重传的策略,应对主用户短时间出现的情况。当重传次数达到 DATARetryLimit 限制时,即认为主用户长时间占用该信道,重新发送 RTS/CTS 协商其他信道进行传输。

5 仿真与性能分析

本节使用 NS2(Network Simulator version 2)将本文所提控制机制与 TCP newReno^[22]和 TCP CRAHN^[7]进行性能比较。TCP newReno 是实际应用最多的传输控制协议,TCP CRAHN 是使用源节点收集并处理一切路径信息的典型代表。所有仿真结果均为多次仿真的平均值。

5.1 仿真参数及性能参数

网络场景中有 10 个主用户,100 个次级用户随机分布。在次级用户中随机选择 5 对用户进行端到端传输。主用户、次级用户间使用 overlay 频谱共享模式^[3]。主用户活动使用典型的 ON-OFF 指数分布模型。次级用户频谱检测算法使用文献[18]中的单节点能量检测。为避免同步,次级用户在仿真开始前 5 s 内随机加入网络。其他仿真参数如表 1 所示。

仿真实验所使用的主要性能指标如下:

(1)丢包率:丢包率是反映认知无线网络传输控制机制有效性的重要指标。因为在认知无线环境下,丢包一方面是浪费大量网络资源,另一方面还会带来传输效率的降低。

(2)节点队列平均长度:节点队列若长时间为 0 则表明其传输能力未得到充分利用,队列过长又容易发生丢包。因此合理控制队列长度是传输控制协议的重要考虑因素。

(3)控制开销比:传输一定数量业务数据包,所必要的控制报文大小之和与业务数据包大小之和的比例。包括 MAC 层和传输层的所有控制报文。

(4)端到端平均吞吐量:单位时间内,平均被目的节点接收的业务数据包大小之和。不重复计算重传部分。

(5)端到端平均时延:平均每传输一个业务数据包所需要的时间。

5.2 仿真实验与分析

本文与其他两种协议的拥塞窗口对比如图 4 所示。TCP 协议的拥塞窗口始终较小且波动剧烈;TCP CRAHN 协议可以达到较大的拥塞窗口,但波动依然较大;本文所提拥塞控制机制能在达到较高拥塞窗口的同时保证拥塞窗口的相对平稳。TCP 协议错误地将所有网络状况当作拥塞处理,频繁执行慢启动必然导致拥塞窗口始终较小。TCP CRAHN 协议在 TCP 协议之上做了改进。该协议通过传输层 ACK 捎带各节点的状态信息至源节点,源节点根据这些信息来调整自己的发送,避免频谱检测、主用户干扰等影响,因而具有较高的拥塞窗口。但该协议也采用了丢包的拥塞控制策略,因此依然会较多执行慢启动,拥塞窗口波动也依然较大。本文采用“反压”的控制机制,使得短时的拥塞在局部节点

表 1 仿真参数

PU 活跃时间(ON 状态)	1 s	最大队列长度	50
PU 非活跃时间(OFF 状态)	5 s	反压阈值(k 值)	10
频谱检测时间	200 ms	DIFS	50 μ s
检测周期	1 s	SIFS	10 μ s
公共控制信道传输速率	1 Mbps	PHY_h	192 bit
数据信道传输速率	1 Mbps	MAC_h	288 bit
CongRetryLimit	4	RTS	160 bit+PHY_h
DATARetryLimit	4	CTS	112 bit+PHY_h
ControlRetryLimit1	5	MAC_ACK	112 bit+PHY_h
ControlRetryLimit2	7	业务数据包大小	1000 Byte +MAC_h + PHY_h
最小回退窗口	32		

范围内得到解决, 避免了丢包, 也就避免了频繁的慢启动。另一方面, 使用线性减少拥塞窗口的方法, 又使得拥塞窗口的变化变得平稳, 能够保证较高的吞吐量。图中唯一一次拥塞窗口下降是因为遭遇中间节点不可用, 源节点重置拥塞窗口并重新开始路由。

图 5 所示为 3 种协议丢包率的对比图。如图所示, 本文的控制机制具有最低的丢包率, TCP CRAHN 次之, TCP 最差。分析其原因, 主要在于拥塞控制机制的不同。TCP 协议将所有网络状况当作拥塞处理, 并直接采取丢包的策略, 其丢包率必然较高。TCP CRAHN 协议虽然通过收集各节点信息对发送做出了调整, 但依然采用丢包的策略, 使得其丢包率也较高。并且这种源节点统一做出调整的方法会带来另一个问题: 中间节点实际可用的传输速率可能在源节点做出调整之后又发生了变化, 使得控制措施失效。本文采用“反压”式的控制机制, 充分利用中间节点的缓存能力。当某节点即将溢出时, 即通知上一跳节点减缓发送, 并使其帮助缓存来自源节点的数据包。若之后此拥塞节点可用的传输速率增大, 则局部缓存的数据包即可通过转发; 若该节点长时间拥塞, 则自拥塞节点至源节点所有的中间节点都会帮助缓存, 避免丢包。因此本文机制可以将丢包率控制在很低的范围内。

图 6 所示为节点平均队列长度的对比图。本文控制机制充分利用节点的缓存能力, 在实现拥塞控制的同时尽可能避免丢包, 因而具有较高的队列长度。但本文的队列长度是严格可控的。“反压阈值”—— k 的设置, 使得节点队列长度一旦触及阈值 $L-k$ 就会有下降的趋势。在本文仿真设置中, 队列长度阈值是 40, 因此在图 6 中, 本文机制队列长度基本都在 40 以下。而 TCP 和 TCP CRAHN 协议没有充分利用节点的缓存能力, 采用丢包的策略, 虽然具有较低的队列长度, 但同时带来较高的丢包率(图 5)。

图 7 所示为 3 种协议在不同频谱检测时间长度下的性能对比。仿真中仅改变频谱检测时间长度, 而检测周期(1 s)不变。总体来讲, 因为在频谱检测期间节点无法进行收发, 因此检测时间越长, 端到端传输的吞吐量必然越低^[6]。不同控制机制对频谱检测的反应速度是影响该项指标的关键原因。TCP 协议没有针对频谱检测的控制措施, 只有当丢包或者超时重传时才会对频谱检测状况做出反应, 反应迟钝且严重影响传输效率。TCP CRAHN 收集节点频谱检测信息, 通过在频谱检测期间降低发送速率来避免丢包, 因而较好地保证了端到端传输的整体效

率。本文控制机制, 在一跳范围内传播频谱检测信息, 使节点获知上、下一跳节点精确的频谱检测开始及持续时间, 以便准确调整自身传输速率。该机制对频谱检测的控制具有最好的及时性, 能够在频谱检测过后立刻恢复较高传输速率。同时与“反压”机制相结合, 该机制能将频谱检测的影响限制在局部范围内, 尽可能的减少频谱检测对传输效率的不良影响。

图 8 所示为 3 种协议对主用户干扰的控制性能。图中仅改变主用户活跃(ON 状态)的平均时间长度, 不活跃状态(OFF 状态)的长度不变(如表 1 设定, 固定 5 s)。主用户越活跃, 必然使得次级用户能够传输的时间减少, 传输性能降低。因此图 8 中曲线基本成下降趋势。但次级用户可以制定相应策略规避主用户干扰。除频谱检测外, 传输控制机制还应考虑频谱检测结果错误及在次级用户传输期间内主用户突然出现的可能。TCP 协议没有针对主用户活动干扰的机制, 因此其性能最差, 端到端吞吐量随主用活跃时间增大而急剧下降。TCP CRAHN 假设次级用户完全掌握主用户活动规律, 没有考虑频谱检测错误和主用户意外出现的情况, 因此其吞吐量随着主用户活跃时间的增加而加速下降。本文控制机制虽然将频谱检测错误和主用户意外出现当作信道质量下降处理, 但没有采取轻易丢包的策略, 而采取了与下一跳节点协商其他信道进行重传的方法, 充分利用了认知无线网络频谱动态性的特点来保证了吞吐量。

认知无线网中, 由于使用了 RTS/CTS 模式, 以及 MAC_ACK 的存在, 都使得控制开销总体较高。这是认知无线网络在匮乏网络资源条件下保证端到端可靠传输的必然代价。协议开销比的对比如图 9 所示。其中, TCP 协议的控制开销最小, 但这是因为它没有针对各种不同网络状况的相关控制机制。一般仅将 TCP 协议的控制开销比作为其他协议对比的基础。TCP CRAHN 大量收集路径上所有节点的各种状态信息, 包括: 频谱检测时间、剩余缓存空间、节点可用传输速率、总的链路延迟等等。尽管这让该协议在传输性能上有所改进, 但也使其具有很高的协议开销比。本文要求节点广播自身频谱检测信息, 及对 MAC_ACK 的修改等使得控制开销有所上升。但与 TCP CRAHN 大量收集所有节点状态信息相比, 本文控制机制在该项指标上仍有较好性能。

3 种协议的平均端到端吞吐量及时延的对比分别如图 10 和图 11 所示。TCP 协议的传输控制机制有限, 无法适应认知无线网络复杂的网络环境, 因

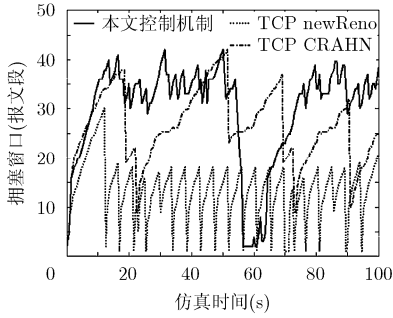


图4 拥塞窗口对比图

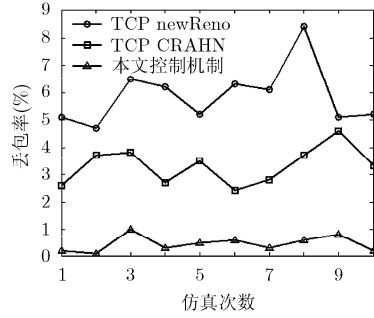


图5 丢包率对比图

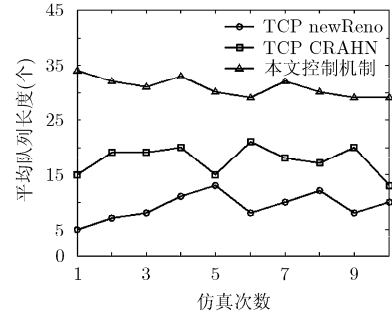


图6 节点平均队列长度对比图

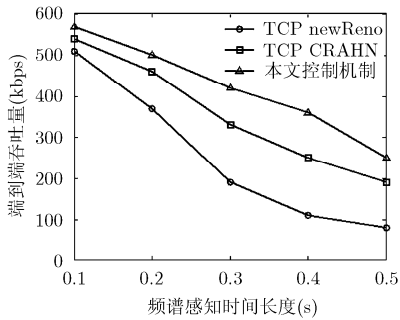


图7 频谱检测时间影响对比图

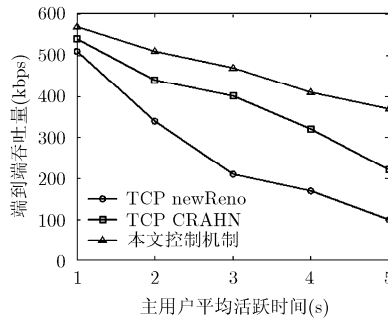


图8 主用户干扰影响对比图

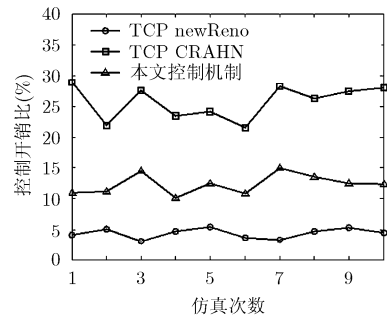


图9 控制开销对比图

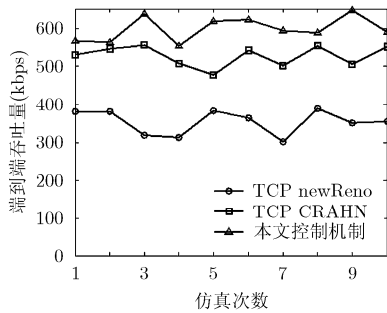


图10 平均端到端吞吐量对比图

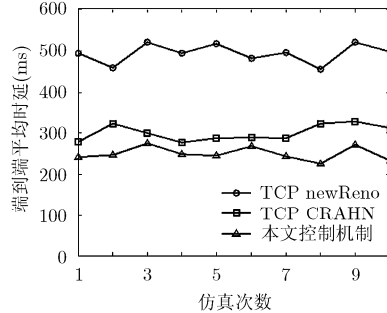


图11 平均端到端时延对比图

此其在端到端吞吐量和时延指标上的性能都较差。TCP CRAHN 协议通过收集节点状态信息来针对不同网络状况进行控制，具有较好的端到端传输性能。但其采用源节点统一做出控制的方法，使得控制措施有一定的延迟性，最终导致其在吞吐量和时延指标上的提高有限。本文针对影响认知无线网络端到端传输的各个因素分别制定策略，并创新性提出“反压”式的控制机制，使频谱检测、主用户干扰等影响端到端传输效率的因素尽可能在相关节点局部范围内得到解决，提高了传输控制的及时性，并保证了高效、平稳的端到端传输性能。

6 结束语

本文针对次级用户以无线多跳方式组网的认知无线网络，制定了一套完整的传输控制机制。认知

无线网络的最大特点是网络资源动态变化，正在进行的传输可能随时中断。因此，过去那种隐式拥塞控制方式不再适用，而显式拥塞控制又会带来控制措施的延迟等问题。本文首次在多跳认知无线网中提出一种“反压”式控制机制，充分利用节点间的交互及调整能力，尽量使不良网络状况在问题节点的局部得到解决，而源节点只需“温和地”做出调整。大量仿真证明，本文控制机制能够很好地适应认知无线网络这样一种动态变化的网络环境，能保证高效、平稳的端到端传输性能。

参考文献

[1] Mitola J. Cognitive radio: an integrated agent architecture for software defined radio[D]. [Ph.D. dissertation], Royal Institute of Technology, 2000.

- [2] Federal Communications Commission. ET Docket No. 03-322. Notice of Proposed Rule Making and Order[S]. 2003.
- [3] Domenico A, Strinati E C, and Benedetto M G D. A survey on MAC strategies for cognitive radio networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2012, 14(1): 21-44.
- [4] Yucek T and Arslan H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2009, 11(1): 116-130.
- [5] Sarkar D and Narayan H. Transport layer protocols for cognitive networks[C]. INFOCOM IEEE Conference on Computer Communications Workshops, San Deigo, USA, March 15-19, 2010: 1-6.
- [6] Marco D F, Kaushik R C, and Luciano B. Modeling and performance evaluation of transmission control protocol over cognitive radio ad hoc networks[C]. Proceedings of the 12th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM'09), Tenerife, Canary Islands, Spain, Oct. 26-30, 2009: 4-12.
- [7] Chowdhury K, Di F M, and Akyldiz I. TCP CRAHN: a transport control protocol for cognitive radio Ad hoc networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2012, 99: 1-14.
- [8] Changqing L, Yu F R, Hong J, *et al.* Cross-layer design for TCP performance improvement in cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(5): 2485-2495.
- [9] Wu Y, Lau V K N, Tsang D, *et al.* Energy-efficient delay-constrained transmission and sensing for cognitive radio systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 61(7): 3100-3113.
- [10] Li S, Zheng, Z, Ekici E, *et al.* Maximizing system throughput by cooperative sensing in cognitive radio networks[C]. IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2012), Orlando, Florida USA, March 25-30, 2012: 1575-1583.
- [11] Lien S Y, Tseng C C, and Chen K C. Carrier sensing based multiple access protocols for cognitive radio networks[C]. IEEE International Communications (ICC'08), Beijing, China, May 2008: 3208-3214.
- [12] Internet Engineering Task Force. RFC 2581-1999. TCP Congestion Control [S]. April 1999.
- [13] Tassiulas L and Ephremides A. Stability properties of constrained queueing systems and scheduling policies for maximum throughput in multihop radio networks[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1992, 37(12): 1936-1948.
- [14] Athanasopoulou E, Bui L X, Ji T, *et al.* Back-pressure-based packet-by-packet adaptive routing in communication networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2012, 99: 1-14.
- [15] IEEE 802.11-2007. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specification[S]. 2007.
- [16] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 18(3): 535-547.
- [17] Slingerland A M R, Pawelczak P, Prasad R V, *et al.* Performance of transport control protocol over dynamic spectrum access links[C]. New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007(DySPAN 2007), Dublin, Ireland, April 17-21, 2007: 486-495.
- [18] Liang Y, Zeng Y, Peh E, *et al.* Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(4): 1326-1337.
- [19] Peh E C Y and Liang Y C. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks with weighted decision fusion schemes[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(12): 3838-3847.
- [20] Rao R and Cheng Q. Subspace-based cooperative spectrum sensing for cognitive radios[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 11(3): 611-620.
- [21] Internet Engineering Task Force. RFC 2988-2000. Computing TCP's Retransmission Timer[S]. 2000.
- [22] Internet Engineering Task. RFC 3782-2004. The NewReno modification to TCP's fast recovery algorithm[S]. 2004.
- 孙 杰: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为认知无线网络协议、跨层协同通信。
- 郭 伟: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为移动通信网、信号与信息处理。