基于 QoS 的分布式认知无线电网络多信道 MAC 协议

孙 卫[1] 黄金科[2]

(西京学院应用统计与理学系 西安 710123)[1] (空军工程大学航空航天工程学院 西安 710038)[2]

摘 要 在分布式认知无线电网络中,动态资源利用不足和中心控制单元的缺失使其 MAC 层协议的设计面临很多挑战。针对认知无线电网络的特点,提出了一种新的 MAC 协议,该协议通过在信道预约阶段优先考虑对时延要求较高的应用,来保证网络对这类应用的 QoS;同时还解决了认知无线电网络中频谱的利用率低和隐藏终端两个热点问题。为分析研究该协议的性能,首先提出了一种新的分析模型。然后将这种新的 MAC 协议与两种典型的 MAC 协议进行了仿真对比,结果表明该协议提高了网络的吞吐量。最后通过数值分析和仿真证实了本协议设计简单高效,具有较高的频谱利用率,不但满足了时延敏感性应用的 QoS 需求,而且还能有效地解决多信道隐藏终端的问题。

关键词 接入控制,分布式认知无线电网络,分布式 MAC 协议,多信道 MAC 协议,服务质量

中图法分类号 TP393.2 **文献标识码** A

Multi-channel MAC with QoS Provisioning for Distributed Cognitive Radio Networks

SUN Wei[1] HUANG Jin-ke[2]

(Department of Applied Statistics and Science, Xijing University, Xi'an 710123, China)[1]

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)[2]

Abstract The insufficence of dynamic resource availability and the lack of central control unit offer many challenges when designing MAC protocol for a distributed cognitive radio network. In this paper, we proposed a novel MAC design for distributed cognitive radio network which provides an efficient approach to address quality of service (QoS) requirements of delay sensitive applications by defining higher priority to such applications during channel reservation. It also combats other major challenges such as low utilization of spectrum and multi-channel hidden terminal problem. We developed an analytical framework to study the performance of the proposed protocol. We then compared the performance of proposed protocol with those of two existing protocols. Comparison results show that the proposed MAC outperforms the existing protocols by providing better throughput. The results achieved from the analytical model and validated by simulations show that our simple yet efficient design identifies and fulfils the QoS requirements of delay sensitive applications, achieves excellent spectrum utilization and handles multi-channel hidden terminal problem effectively.

Keywords Admission control, Distributed CR network, Distributed MAC, Multi-channel MAC, Quality of service

传统的静态频谱分配技术对射频频谱的利用率很低,而且射频频谱作为授权频谱的重要组成部分,占用的比例很高[1]。授权频谱的利用不足和匮乏促使频谱分配由静态转向动态,这在很大程度上促进了认知无线电网络技术的发展。而且,动态频谱分配技术允许次用户可以"伺机"使用分配给主用户的授权频谱,这为提高频谱的利用率提供了可能。

由于无线信道中通信控制和通信协商主要集中在介质接入控制层(Media Access Control, MAC),因此设计一种快速、高效的 MAC 协议对认知无线电网络的成功组建非常关键。与其他类似的网络相比,分布式无线电认知网络非常实用,且部署简单、快速、系统复杂度和耗费低[2]。因此,本文就认知无线电网络 MAC 层设计中常见的一些问题进行分析研究。

认知无线电网络 MAC 层设计是一个热门的研究领域,文献[3-11]提出了一系列 MAC 协议的设计方法。在这些协议中,DOSS-MAC、感知 MAC 和 SYN-MAC 都要求次用户节点有多个收发器。多收发器的出现很好地解决了隐藏终端和分布式的信道协商效率问题[12]。然而,用户终端配备多个收发器增加了节点的复杂性和成本。为简化节点结构,许多协议假定每个节点只有一个收发器并使用公用控制信道,来避免多信道隐藏终端问题的出现。在这些协议中,基于冲突检测多路接入(Collision Sense Multiple Access, CSMA)的 MAC 协议,提出根据先前不同信道的传输历史,找到一条最有利于收发机通信的信道。但是,如果没有信道的感知信息,基于 CSMA 的 MAC 协议将会对主用户占用信道造成严重的干扰。

文献[7]中的 OSA-MAC 协议,在基于竞争的信道选择阶段后加入了一个感知阶段。由于信道选择在信道感知之前,节点有可能选择不可用的信道,从而浪费了很多的数据传输机会。文献[8]中的 HC-MAC 协议,在信道选择之前加入了信道感知,并充分考虑到了实际应用中次用户节点的硬件

本文受陕西省自然科学基础研究计划(2016JM1032),陕西省自然科学基金(2014JM2-6106)资助。

孙 卫(1964-),女,博士,副教授,主要研究方向为应用数学,E-mail:15829717886@163.com;黄金科(1988-),男,博士生,主要研究方向为无线通信、综合航电技术,E-mail:86297609@qq.com。

限制。HC-MAC 协议规定：在数据传输阶段，当一对收发机有数据传输时，即使有更多的可用信道没被其占用，其邻居节点仍需等待。虽然在协议设计时考虑硬件限制更能贴近实际应用，但其设计的数据传输阶段会使频谱的利用率降低。文献[9]提出了一种 C-MAC 协议，它虽采用单收发器结构，但没使用公用控制信道。与其他单收发器结构、无公用控制信道的协议相比，C-MAC 协议可在全部可用信道中选择一条最为可靠的数据传输信道，以确保不同信道上数据的并行传输。然而，复杂的信道交换机制和长时间的信道选择机制降低了该协议的效率，并且当某个用户重新使用信道时原来选择过的信道可能会变得不可用。

在进行认知无线电网络 MAC 协议设计时，已有文献较少考虑服务质量(Quality of Service，QoS)。文献[10]分析了当每个节点有两个收发器时，O-MAC 在两种不同的感知机制下网络的吞吐量和平均传输时延。尽管文献[10]宣称自己的研究可为保障 QoS 需求提供参考依据，但没有进行进一步的讨论和数值分析。此外，由于节点的硬件限制，文献[10]假定的节点可以在任意时刻在所有的信道上传输数据，在实际中是不可行的，并且这种做法有可能导致频谱利用率的降低。文献[11]中的 GB-MAC 协议提出了一种基于簇的拓扑结构，这种结构将用户分为两个不同的组，并根据各组的带宽需求给它们分配可用信道，但是由于在某个特定时刻只有一对用户可以进行通信，因此分配给某个组的信道可能不会全部被利用。文献[11]虽然也讨论了关于次用户 QoS 的问题，但是 GB-MAC 没有设计特定的模块去保证次用户的 QoS。

基于以上认识，本文提出一种新的 MAC 协议，即 Q-MAC，该协议通过以下 3 种方法来提升网络的性能。

1)从次用户只能工作在半双工模式的角度，解释了多信道中隐藏终端的问题，并在信道协商阶段设计了一种快速的信息交换机制来解决该问题。

2)在数据传输阶段设计了一种新的数据传输结构，使次用户的数据传输不会发生任何冲突，从而提高空闲无线电频谱资源的利用率。

3)对于时延敏感性应用，设计了一个 QoS 预留模块，以此来降低网络的平均时延。并且，还对接入控制理论进行了分析，以满足此类应用在最大可接受时延方面的要求。

1　Q-MAC 协议

为简化次用户的节点模型，本文假定每个次用户节点均工作在半双工模式下。此外，网络中的节点只能使用公共控制信道交换控制信息(公共控制信道是为每个节点固定配置)。Q-MAC 协议将时帧划分成周期性的信标时间间隔，并且次用户通过一个周期性的信标信号来实现同步。当次用户加入网络时，必须首先在公共控制信道上至少侦听到一个信标信号，以确保它与网络中的其他节点同步。如果次用户没有侦听到任何信标信号，它就作为网络中的第一个节点开始周期性地发送一个信标信号。

信标周期分为 3 个阶段：感知、竞争和数据传输阶段。感知阶段又可以分为两个部分，其中第一个部分专门为时延敏感性应用提供优先权而设立(见图 1)，该部分中各种应用的地位是平等的[12-13]。

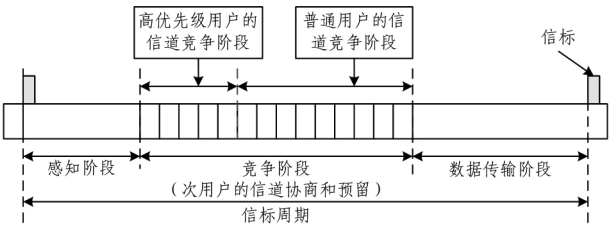

图 1　时帧结构

1.1　信道感知阶段

Q-MAC 协议规定：用户在选择信道之前，要对每条信道进行感知。因此在数据传输阶段，用户可以有效利用感知阶段对信道的感知信息。在感知阶段，次用户不能发送数据。因此感知的结果不会受到临近次用户的干扰。每个次用户独立地感知信道，并确保在感知阶段结束后，每个次用户能够拥有一组可用信道。但是由于次用户节点的硬件限制，使其不能在有限的感知阶段去感知所有的可用信道，因此次用户只能感知一部分数据传输信道。

本文假定在信道感知阶段，每个次用户节点均可感知已授权给所有主用户的频段，即可以“伺机随机”利用频谱空洞(频谱空洞指分配给主用户的一个频段，但是在特定的时间和特定的地理位置条件下，这个频段未被主用户使用)。

1.2　信道竞争阶段

此阶段，为了参与信道协商和预留机制，每个要发送数据的次用户都要去竞争公共控制信道的使用权，竞争采用的退避机制与传统的 IEEE802.11 DCF 协议的退避算法相同。信道的协商和预留机制如图 2 所示。例如，节点 Q 和 R 分别给节点 U 和 S 发送数据，在此假定节点 Q 成功地争取到了公共控制信道的使用权并向节点 U 发送 RTS(Request To Send，请求发送)。RTS 数据包主要包含节点 Q 可用的一系列信道。当节点 U 成功接收到 RTS 时，节点 U 就选择一条和 Q 共同的普通信道 X1，并经一个短时间帧间间隔(Short Inter-Frame Space，SIFS)后，向节点 Q 发送 CTS(Clear to Send，清除发送)，CTS 包含了对信道 X1 的预留信息。如果节点 U 和 Q 之间没有可用的普通信道，节点 U 就会忽略 RTS，并经过一个分布式帧间间隔(Distribute Inter-Frame Space，DIFS)后，公用控制信道就将处于空闲状态。当节点 Q 收到 CTS 后，经过一个 SIFS，就会向节点 U 发送 CRTS(Confirm Request To Send，确认请求发送)信息，以确认对信道 X1 的预约。因此，在接下来的数据发送阶段，信道 X1 就会为节点 Q 和 U 的数据发送服务。网络中的每对收发节点，最多只能拥有一条数据传输信道。节点 U 的所有邻居节点 R，S 和 T，在接收到 CTS 后都会为已被预约的信道 X1 自动设置 NAV(Network Allocation Vector，网络分配向量)[14]。此外，当节点 Q 的邻居节点 R 和 T 接收到 CRTS 后，也将设置各自的 NAV。如果握手信息丢失了，信道经过一个 DIFS 后就会处于空闲状态。在这个例子中，本文假定节点 R 执行退避后，也将成功获得信道 X2 的预留权。但节点 R 和 S 在信道协商阶段不会考虑信道 X1，这是由于它已经设置了有关信道 X1 的 NAV 的缘故。所有的节点将在下一个信标周期的起始阶段，清空各自的 NAV。如果一对收发机在信道竞争阶段即将结束之前还未获得某条信道的预留权，则该次预约进程就将结束，然后等待下一次竞争阶段的到来后继续参与竞争。

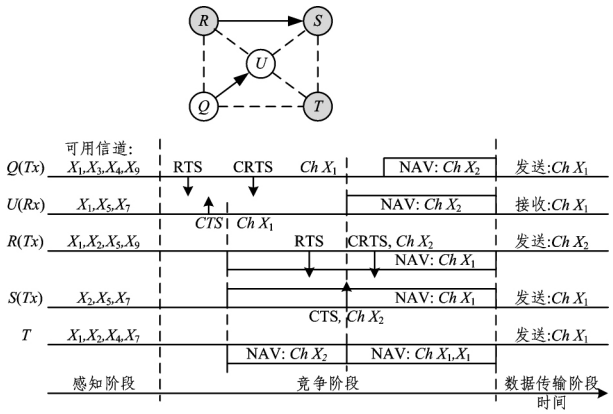

图 2 信道协商和预留进程

当一对收发机之间有多条可用的普通数据传输信道时，本文假定接收机在信道协商阶段从中随机选择一条。不管采用何种选择策略，Q-MAC 协议都可以很好地与之“配合”。

特别地，本文设计的信道竞争阶段还可以有效地解决隐藏终端的问题，这是因为在信道预约进程中，它可以使邻居节点协调有序地进行预约。即当一对收发机获得某条信道的预约权时，其它和该接收机或发射机相邻的节点就会调整与该信道有关的 NAV。当这些邻居节点需要预约信道时，前面标记过的信道将不会参与到这些邻居节点的协商预约阶段中。因此在整个信道协商阶段，当所有的次用户节点和公用控制信道匹配过后，每个节点就能为其邻居节点预留所有的信道设置 NAV。从而，任何一条信道不能再被另外的收发机预约到，相应地，隐藏终端问题也得以解决。

1.3 无竞争的数据传输阶段

在此阶段，每个在信道竞争阶段成功预约到信道的发射机，就开始利用各自预约的信道向配对的接收机发送数据。本文假定 MAC 层数据包的大小是固定的，并且在数据传输阶段用户可发送一个或多个数据包。每个数据包发送完毕后，紧接着等待接收接收机发送的一个短的确认（ACKnowledge，ACK）数据包。若发射机没有收到 ACK，则数据传输未成功。

数据传输阶段的总时长可以用发送多个数据包和 ACK 消息所耗时间的总和来表示。不同收发机对的数据传输是并行的，并且数据传输不会与其他次用户节点发生竞争。如果一对收发节点在感知阶段均发生感知错误，那么主用户在数据传输阶段也将发生错误。然而，这种情况在现实中发生的概率很小，一旦发生，该发射机就需要在下一个信标周期继续进行信道感知和竞争。

2 Q-MAC 协议性能分析

假定所有的次用户节点均匀分布在认知无线电网络中，并且次用户可以“伺机”利用频谱空洞。为简化仿真，所有主用户占有的信道以相同的概率独立地分布在整个网络中。随着时间的推移，主用户占有的信道可以服从多种其他分布，如几何分布和指数分布等。同时，本文假定主用户对信道 j 的平均占有率是已知的，为 $1-P_j$（P_j 为主用户不使用信道 j 的平均概率）。在每个传输时隙，主用户对信道 j 的占有率服从参数为 P_j 的贝努力分布。每个次用户节点的传输范围均相同，且次用户节点的邻居节点如果不传输数据，将会不失一般性地忽略这些邻居节点。依据假定的传输范围和节点密度，可以得出和次用户节点竞争信道资源的邻居节点的平均数目为 N_f。此外，本文还假定每个节点可以最大限度地处理要传输的数据流量。

特别地，Q-MAC 协议不要求可用信道均匀，且数据传输率可以根据具体的业务确定。需要申明的是，本文做出该假定仅仅是为了简化模型并可以用数学的方法对提出的协议进行分析。而且，相似的分析方法适用于以下几种情形：如主用户对信道利用率不同；平均信道利用率依地点和时间而变化；信道在不同的频段支持不同的数据传输范围和数据传输率等。Q-MAC 协议规定：在每帧的起始阶段节点都要对信道的状态进行感知，配对的收发节点通过协商选定它们双方都“满意”的信道来传输数据（即满足 1.2 节要求的信道），且不论是相同或不同的信道利用率、数据传输范围和数据传输率，节点都能很好地传输数据。

2.1 竞争阶段的时长和可预约信道的数目

次用户在竞争阶段，通过利用公用控制信道和 IEEE802.11 DCF类似的接入机制来交换控制信息。参与竞争的次用户在竞争阶段可能遇到以下几种情况：遭遇一次或多次信道忙碌状态、一个或多个空闲时隙、一次或多次未成功的信息交换和一次成功的信息交换[15]。忙碌状态表示信道在侦听时刻被邻居节点所占用，次用户在忙碌状态需冻结自身的退避计数器。特别地，当公用控制信道空闲时，时间就被划分为若干时隙，每个时隙的长度为 σ。如果在每个时隙的起始阶段没有侦听到节点发送数据的请求，该时隙就置为空闲状态；否则，在时隙的起始阶段就开始一次时长为 T_s 的成功的信息交换（仅有一个节点申请发送数据时）或一次时长为 T_c 的不成功的信息交换（有多个节点申请发送数据时）。假定在一个随机选择的时隙内，某个节点尝试发送控制信息的概率为 P_t，竞争阶段控制信息发生碰撞的概率为 P_{cm}，信道处于忙碌状态的概率为 P_b。根据文献[16]中提出的二阶马尔科夫模型，P_t 可以表示为：

$$P_t=\frac{\psi_1}{(1-P_b)(1-P_{cm})\psi_1+(1-2P_{cm})(\breve{W}+1)\psi_2+P_{cm}\breve{W}(1-(2P_{cm})^m)\psi_2} \tag{1}$$

其中，$\breve{W}$是退避算法中最小竞争窗口的大小，m 是节点执行退避的次数，从而最大竞争窗口的大小为 $2^m\breve{W}$。

在一个时隙内，至少进行一次数据传输的概率（即信道忙碌的概率）为：

$$P_b=1-(1-P_t)^{N_f} \tag{2}$$

假定在一个时隙内仅有一个次用户节点成功传输数据的条件概率为 P_{cs}，如式(3)所示：

$$P_{cs}=\frac{N_fP_t(1-P_t)^{N_f-1}}{P_b} \tag{3}$$

因此，在信道预约阶段成功完成一个周期的数据交换需要的平均时长为：

$$T_{si}=\frac{P_{empty}\sigma+P_sT_s+P_cT_c}{P_s} \tag{4}$$

其中,$P_s=P_bP_{cs}$,$P_c=P_b(1-P_{cs})$,它们分别是在一个时隙内成功或未成功完成一次数据交换的概率,相应地,$P_{empty}=1-P_b$,$T_c=t_{DIFS}+t_{RTS}$,$T_s=T_c+2t_{SIFS}+t_{CTS}+t_{CRTS}$。其中,$t_{DIFS}$,$t_{RTS}$,$t_{SIFS}$,$t_{CTS}$ 和 t_{CRTS} 分别是 DIFS,RTS,SIFS,CTS 和 CRTS 的时间长度。

如果假定竞争阶段的时间长度为 T_{con},那么成功竞争到信道的期望值可以近似为 T_{con}/T_{si}。因此,由式(4)可得,每个信标周期内成功交换数据的最大值为:

$$N_{succ}=\left\lfloor\frac{T_{con}}{T_{si}}\right\rfloor=\left\lfloor\frac{T_{con}P_s}{P_{empty}\sigma+P_sT_s+P_cT_c}\right\rfloor \tag{5}$$

假定主用户均匀地占用不同的数据传输信道,并且任何一条信道不被主用户占用进行数据传输的平均概率为 P。如果数据传输信道的总数为 N_{ch},那么可用数据传输信道的平均数量为 $N_{ch}P$,竞争阶段成功预约到可用信道的平均时间长度可以近似表示为 $T_{si}N_{ch}P$。

2.2　吞吐量

吞吐量作为评价 MAC 协议性能的主要指标之一,本文假定次用户的发送队列里一直有数据发送的条件下,对网络的吞吐量进行分析。当可用信道的数目充足时,式(5)表示的数据成功交换的次数等于网络预约信道的数目。但实际上,当可用信道的数量较少时,经过最初几次成功的预约后,由于没有足够的信道可以进行预约,信道预约阶段将处于空闲状态。当信标周期到来时,原预约信息都会被清空,信道需要进行重新分配和竞争。如果可用信道的数量过多,在固定时长的信道预约阶段内,所有的可用信道可能不会都被预约。在估算网络的吞吐量时,应该充分考虑此情形。因此,在 T_{con} 时间段内可被预约的信道的平均数量为:

$$\overline{N}=\sum_{i=0}^{N_{ch}}\min(i,N_{succ})\binom{N_{ch}}{i}P_i(1-P)^{N_{ch}-i} \tag{6}$$

在若干信标周期内,网络的平均吞吐量可以用每条信道的数据传输率来表示,即:

$$\overline{S}=\overline{N}T_{DT}/T_{BI} \tag{7}$$

其中,T_{DT} 和 T_{BI} 分别是数据传输阶段和信标周期的时间长度,由图 1 可得:

$$T_{DT}=T_{BI}-T_{sensing}-T_{con} \tag{8}$$

其中,$T_{sensing}$ 表示信道感知阶段的时长。需要指出的是,每个 ACK 数据包的持续时间和普通数据包的持续时间相比都很短。因此,在估算 $\overline{S}$ 时,数据传输阶段的 ACK 数据包所耗流量可以忽略不计。

本文假定只有在竞争阶段过后才能进行数据传输。但是一旦有一对数据收发机预约到一条信道,发射机便可以立即通过预约到的信道发送数据而不会影响本文提出机制的正常运行。由于 MAC 层数据包的大小是可变的,因此发射机可以在数据传输阶段结束前发送一个或多个数据包。在该假定下,一个信标周期内每条信道的平均传输时间的增量为:

$$\begin{aligned}\Delta T_{DT}&=\frac{1}{\overline{N}}((T_{con}-T_{si})+(T_{con}-2T_{si})+\cdots+(T_{con}-\overline{N}T_{si}))\\&=T_{con}-\frac{(\overline{N}+1)T_{si}}{2}\end{aligned} \tag{9}$$

由式(7)和式(9)可得,网络的平均吞吐量增量为:

$$\overline{S_{im}}=\overline{S}+\overline{N}\frac{\Delta T_{DT}}{T_{BI}}=\frac{\overline{N}}{T_{BI}}\left[T_{DT}+\left(T_{CON}-\frac{(\overline{N}+1)T_{si}}{2}\right)\right] \tag{10}$$

其中,$\overline{N}T_{si}\leqslant T_{CON}<(\overline{N}+1)T_{si}$。如果 T_{CON} 是 T_{si} 的整数倍,T_{CON} 可以用 $\overline{N}T_{si}$ 近似表示,进而式(10)可以简化为:

$$\overline{S_{im}}=\frac{1}{T_{BI}}[\overline{N}T_{DT}+\frac{T_{CON}}{2}(\overline{N}-1)] \tag{11}$$

2.3　竞争阶段的最佳长度

竞争阶段的平均长度取决于多个参数,例如网络中有数据发送需求的次用户的数目和可用信道的平均数目等。在 P_t 和 N_f 给定的条件下,预约到一条信道的平均时间 T_{si} 可通过式(4)得到。在给定 N_{ch} 和 P 的条件下,分析竞争阶段长度对网络吞吐量的影响。由式(6)可知,当 T_{con} 很小时,随着 T_{con} 的增加,越来越多的信道被成功预约,从而网络的吞吐量增加。当 T_{con} 达到最大值时,随着 T_{con} 的增加,网络的吞吐量开始下降,这可由式(8)推出,对于给定的 $T_{sensing}$,随着 T_{con} 增加,T_{DT} 减小。假定其他一些参数,如 N_f,P_t,N_{ch} 和 P 已知时,可以在 N 已知的条件下通过解式(12)得到最优的 T_{con},使得网络的吞吐量最大。

$$\begin{aligned}&\max\ imuze\ \overline{S_{im}}=\frac{1}{T_{BI}}[\overline{N}T_{DT}+\frac{T_{CON}}{2}(\overline{N}-1)]\\&\text{subject to } T_{CON}\geqslant 0\end{aligned} \tag{12}$$

由于单个信道的预约是在时段 T_{si} 内发生的,因此在有限连续的信道预约时段内,式(12)中的目标函数缓慢下降。并且,式(12)中的目标函数是凸函数,且当 T_{con} 是 T_{si} 的整数倍即 $T_{con}=nT_{si}$ 时,网络的吞吐量才能达到最大值。由于 T_{BI} 是一常量,因此式(12)的问题可以转化为求解以下整数方程:

$$\begin{aligned}&\max\ imuze\ f(n)=\overline{N}(T_{BI}-T_{sensing}-\frac{nT_{si}}{2})-\frac{nT_{si}}{2}\\&\text{subject to } n\in \mathrm{N}^+\end{aligned} \tag{13}$$

其中,N^+ 为非负整数。记 n^* 为 n 的最优值,那么 $n^*\leqslant N_{ch}$。因此,利用大量的搜索算法可以解决该问题。

2.4　Q-MAC 协议的 QoS

对 QoS 需求较高的应用和一般的应用不同,一个高 QoS 需求的应用可能需要满足若干 QoS 指标,如最大可接受时延、最小数据传输率和最大可接受丢包率等。本文主要讨论对时延需求较高的一些应用(即时延敏感性应用),且文中提到的时延敏感性应用和具有这种应用的用户都具有较高的优先级,因此可分别简称为高优先级应用和高优先级用户,其它的一些应用和用户分别称为普通应用和普通用户。信道的竞争阶段可以分为两部分:1)针对高优先级用户;2)针对普通用户。假定本文以后提到分析高优先级用户的 QoS 性能时,均特指对其最大可接受端到端时延进行分析,而普通用户则没有任何限定,并假定每个高优先级用户在任意时刻至多有一个高优先级的数据包。在以上假定的前提下,高优先级用户的端到端时延可以简单近似为信道的接入时延和数据传输时长 T_{DT} 之和。因此,本文在研究网络的 QoS 性能时只需分析信道的接入时延即可。本文提出的协议还规定,在信道竞争的起始阶段,高优先级用户可以优先获得信道的预约权,并规定在此起始阶段,如果没有其他更多的高优先级用户使用信道,普通用户便可以使用公用控制信道(这种做法是完全可行的,例如通过对普通用户设定较长的 DIFS 即可)。

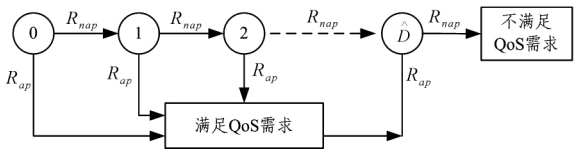

图 3 等待接入信道的数据包的状态图

本文借助图 3 所示的状态图，分析节点有一个优先级数据包的情况下的时延。图 3 中每个状态代表在队列中排队的数据包需要等待的信标周期的数量。状态 k 的概率可表示为 P_k，$\hat{D}$表示确保 QoS 一个高优先级的数据包所能接受的最大信道接入时延。当一个数据包到达某个用户的传输队列时，记此状态为初始状态(记为状态 0)。假定用户在每个信标周期可发送数据的概率为 P_{ap}，需要等到下一个信标阶段的概率为：

$$P_{nap}=1-P_{ap} \tag{14}$$

结合图 3，可以得到 $P_n=P_0P_{nap}^n$。

在到达状态$\hat{D}+1$时，一个数据包还没有得到发送数据的机会的概率 P_{us}(即未满足 QoS 需求的概率)为：

$$P_{us}=P_{\hat{D}}-P_{nap}=P_0P_{nap}^{\hat{D}+1} \tag{15}$$

相应地，满足 QoS 需求的概率为 $P_{sat}=P_0-P_{us}$。在若干信标周期内，满足 QoS 需求的数据包的平均时延为：

$$D_s=\sum_{k=0}^{\hat{D}}kP_0P_{ap}P_{nap}^k=\frac{P_0P_{nap}}{P_{ap}}(1-P_{nap}^{\hat{D}}(1+P_{ap}\hat{D})) \tag{16}$$

普通用户的平均时延为：

$$D_g=\sum_{k=0}^{\infty}kP_0P_{ag}P_{nag}^k=\frac{P_0P_{nag}}{P_{ag}} \tag{17}$$

其中，P_{ag}是普通用户的信道接入概率($P_{ag}=1-P_{nag}$)。因此，在若干信标周期内，所有满足 QoS 需求的高优先级用户和普通用户的平均时延为：

$$D_{QoS}=\frac{P_{sat}N_{fp}D_s+N_{fg}D_g}{P_{sat}N_{fp}+N_{fg}} \tag{18}$$

当网络没有规定要确保 QoS 时，假定每个信标周期任意用户的信道接入概率为 P_a($P_a=1-P_{na}$)。信道的平均接入时延为：

$$D_{no-QoS}=\frac{P_0P_{nz}}{P_a} \tag{19}$$

假定有 N_f 个用户需要发送数据包，其中有 N_{fp} 个用户发送的数据包有 QoS 需求，那么其余的 $N_{fg}=N_f-N_{fp}$ 个用户则为普通用户。当网络没有 QoS 需求时，N_f 个用户使用全部的竞争阶段，时长记为 T_{con}；当有 QoS 需求时，高优先级用户使用特定的竞争阶段，时长记为 T_{conp}，从而普通用户使用竞争阶段的时长为 $T_{cong}=T_{con}-T_{conp}$。特别地，当没有高优先级的用户竞争信道时，指定给高优先级的特定竞争阶段可被普通用户使用。高优先级用户、普通用户和没有 QoS 需求用户的信道的接入概率可以分别近似表示为：

$$P_{az}=\overline{N_p}/N_{fp} \tag{20}$$

$$P_{ag}=\overline{N_g}/N_{fg} \tag{21}$$

$$P_a=\overline{N}/N_f \tag{22}$$

其中，$\overline{N_p}$和$\overline{N_g}$分别是在时长为 T_{conp} 和 T_{cong} 的竞争阶段，分别被 N_{fp} 和 N_{fg} 个用户预约的信道的平均数量。$\overline{N}$ 可以通过求解式(6)得到，$\overline{N_p}$和$\overline{N_g}$也可以通过类似的方法得到。

2.5 与满足 QoS 需求相对应特定高优先级竞争阶段的长度

假定可用信道的平均数量 $N_{ch}P$ 大于$\overline{N_p}$，$\overline{N_p}$可用在 T_{conp} 时段内数据成功交换的概率来近似表示，即：

$$\overline{N_p}=T_{conp}/T_{sip} \tag{23}$$

其中，T_{sip}是高优先级用户预约一条信道的平均时间，T_{sip} 可用与式(4)类似的方法求解。由式(14)、式(15)、式(20)和式(23)可得：

$$T_{conp}\geqslant N_{fp}(1-(\hat{P}_{us}/P_0)^{\frac{1}{\hat{D}+1}}) \tag{24}$$

其中，$\hat{P}_{us}$是预先指定的未满足 QoS 需求的概率的上界。

2.6 接入控制

已知 P_t，由式(2)－式(4)可以看出，T_{sip} 可用 N_{fp} 表示，即：

$$\begin{aligned}T_{sip}&=-\frac{(1-P_t)(T_c-\sigma)}{N_{fp}P_t}+T_s-T_c+\frac{T_c}{N_{fp}P_t(1-P_t)^{N_{fp}-1}}\\&=-\frac{A}{N_{fp}}+B+\frac{C}{N_{fp}E^{N_{fp}-1}}\end{aligned} \tag{25}$$

其中，$A=(1-P_t)(T_c-\sigma)P_t$，$B=T_s-T_c$，$C=\frac{T_c}{P_t}$，$E=1-P_t$。由于高优先级用户仅在 T_{conp} 时段内预约信道，由式(24)和式(25)可得：

$$T_{conp}\geqslant(-A+BN_{fp}+\frac{C}{E^{N_{fp}-1}})\times(1-(\hat{P}_{us}/P_0)^{\frac{1}{\hat{D}+1}}) \tag{26}$$

由式(26)可知，网络可接受的高优先级用户数量的最大值可以通过求解：

$$\hat{N}_{fp}=\left\lfloor\frac{1}{\log E}\zeta(0,-\frac{C\log E}{BE^{F-1}})+F\right\rfloor \tag{27}$$

得到。其中，$\zeta(\cdot)$是郎伯 W 函数[21]，F 可由式(28)得到。

$$F=\frac{1}{B}(A+\frac{T_{conp}}{1-(\hat{P}_{us}/P_0)^{\frac{1}{\hat{D}+1}}}) \tag{28}$$

这个结果可以用于系统接入控制模块的设计。例如，当高优先级用户的数量已知时，每个用户的高优先级数据包的最大到达率就被决定了。每个用户的分布式接入控制模块，可以根据每个用户的最大平均到达率，来决定接受或拒绝新的高优先级数据包。

本文提出的协议在数据传输阶段中，公用控制信道不能用于传输控制信息。因此，在该阶段还可对本协议进行改进，以提高公用控制信道的数据传输效率。这将有助于 QoS 需求较高的次用户节点较好地完成它们的传输任务。

3 仿真结果及分析

本文利用 Matlab 仿真器，将 Q-MAC 协议和一些类似 MAC 协议的性能进行仿真对比。仿真时，选取信标周期时长 $T_{BI}=100ms$，每条数据传输信道的数据传输率 $R=1$mbps，公用控制信道的数据传输率也为 1mbps，$t_{DIFS}=128\mu s$，$t_{SIFS}=28\mu s$，$\sigma=50\mu s$。

当 $P=0.7$，$N_f=70$，$T_{sensing}=10$ms 和 $P_t=0.015$ 时，吞吐量和竞争阶段时长、信道数量的关系如图 4 所示。

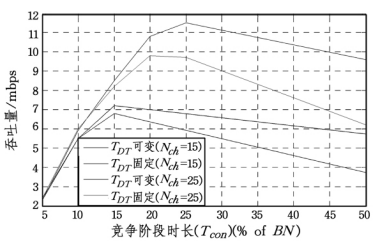

图 4 吞吐量与竞争阶段时长的关系图

如图 4 所示，当参数 N_{ch}，P，N_f 和 P_t 固定时，随着 T_{con} 的增加，网络的吞吐量开始上升并达到最大值，随着 T_{con} 的继续增加，吞吐量则开始下降。吞吐量的最大值是在刚好足够预约所有的可用信道的时刻取得。随着 T_{con} 的增加，T_{DT} 下降但可被预约的信道的平均数量 $N_{ch}P$ 未变，从而使吞吐量开始下降。从图 4 可以清晰地看到，对于给定的 N_{ch}，存在一个最优的 T_{con}，使得吞吐量最大，这与 2.3 节的分析一致。

可以预想，随着 N_{ch} 和 P 增加，最大可实现的吞吐量随之增加。并且，T_{DT} 可变时 Q-MAC 的性能优于固定 T_{DT} 时的性能，这是由于前者利用了一部分竞争信道进行数据传输的结果。从图 4 可以清楚地看到，Q-MAC 可以高效利用主用户的空闲频谱。例如，当 $N_{ch}=15$，$P=0.7$ 时，除去前面不可避免的感知阶段（假设等于 $10\%\,T_{BI}$），预期的次用户的最大数据传输率为 $\hat{R}_{\exp}=0.9RN_{ch}P=9.45$mbps。图 4 中，对于相同的参数值，Q-MAC 在 T_{DT} 可变和 T_{DT} 固定时的平均吞吐量分别为 7.31mbps 和 6.75mbps，与 $\hat{R}_{\exp}$ 非常接近。

为验证本文的分析方法，使用离散事件仿真器对Q-MAC进行仿真分析时[22]，采用和数值分析时一样的系统参数。仿真结果和数学分析的结果非常相近，验证了评估Q-MAC性能的分析方法是有效的。

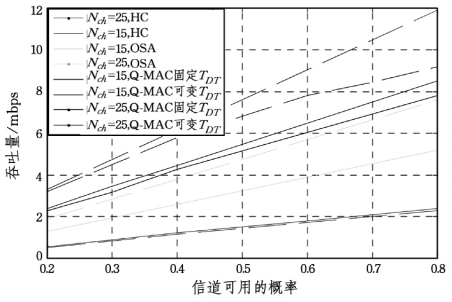

图 5　吞吐量比较图

图 5 示出了将 Q-MAC 与参考文献[7]中的 OSA-MAC 和文献[8]中的 HC-MAC 的性能进行对比的仿真结果，这 3 种 MAC 协议都是有一个专门的公用控制信道，每个次用户只有一个半双工的收发器。在基于竞争的信道接入阶段，每种 MAC 协议预约信道的时间都是一样的，并设定竞争窗口的大小为 128，信道感知阶段的时长为 1ms。为保证比较的公平性，在信道感知阶段，Q-MAC 协议规定用户可感知所有的信道。对于 FH-MAC 协议，本文采用和文献[8]一样的假定，例如最大带宽为 6MHz，最大分组为 2，数据传输率为 10mbps。对于 OSA-MAC 协议，数据传输阶段退避竞争窗口的大小设为 64。

对于 Q-MAC 协议，式(12)给定的 T_{con} 的最优值适用于 T_{DT} 可变和固定这两种情况。从图 5 中可以看出，Q-MAC 协议和其他两种协议相比，能够提供较高的吞吐量和频谱利用率。HC-MAC 协议规定，当可用数据传输信道没有被别的用户占用时，允许别的某个用户传输数据，并且随着可用信道数量的增加，HC-MAC 网络的吞吐量低于 Q-MAC。OSA-MAC 协议规定，在信道感知阶段之前，多个用户可以选择同一信道。这样做的后果是如果该信道被主用户占用，这些用户就要在数据传输阶段进行竞争，否则就只能等待下一个信标周期。Q-MAC 协议中，数据传输阶段没有竞争，使得用户可以更加高效地利用频谱空洞。由于 Q-MAC 协议可以感知所有的信道，因此总的感知时间可能很长，从而会降低全局的吞吐量。通过采用更为快捷的感知策略去扫描一部分信道的方法，还可以使 Q-MAC 的吞吐量得到进一步的提升，具体的细节本文将不再涉及。

经过一个特定的高优先级竞争阶段后，主用户的信道接入时延如图 6 所示。满足 QoS 需求的高优先级用户的平均信道接入时延应小于一个信标周期，当网络有 QoS 需求时，这是评估高优先级用户时延的一个参考量。但是，当网络中可用信道的数量较少且用户有 QoS 需求时，普通用户的时延会增加。Q-MAC 协议降低了时延敏感性应用的传输时延，但当数据传输信道很多或数据传输信道的利用率很高时，增加了普通用户的时延。图 7 描述了高优先级用户中，未满足 QoS 需求的用户所占的百分比。从图 7 中可以看出，当可用信道的数量很高时，本文提出的 QoS 保障机制确保了 95% 的用户能够满足 QoS 需求。

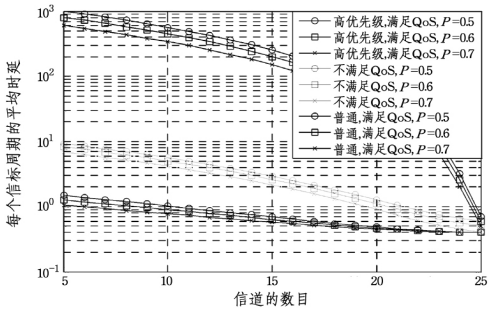

图 6　平均信道接入时延

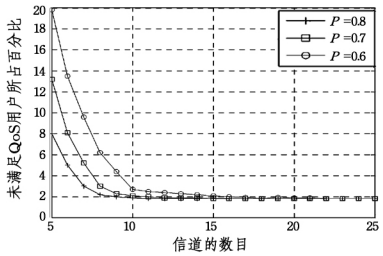

图 7　不满足 QoS 的用户百分比图

高优先级竞争阶段的最小长度的变化量与可接受的未满足 QoS 需求的用户占总用户百分比的上界以及主用户可接受的时延上界的关系如图 8 所示。它们二者的上界降低，会使 T_{conp} 减小。当 T_{conp} 一定时，如果 $\hat{D}$ 和 $\hat{P}_{us}$ 二者中的一个要求提高，另一个的要求则必须下降。例如，当 $T_{conp}=7$ms 时，如果 $\hat{P}_{us}\leqslant 2\%$，则 $\hat{D}$ 只能取 4，不能取 3 或 2。图 9 描绘了当 $T_{conp}=10$ms 并限定 $\hat{D}$ 和 $\hat{P}_{us}$ 时，网络可接受高优先级数据流量的最大值的变化趋势。从图 9 中可以看出，当 $\hat{D}$ 和 $\hat{P}_{us}$ 下降时，可被传输的高优先级数据流量增加，这可以作为设计高效接入控制的标准。

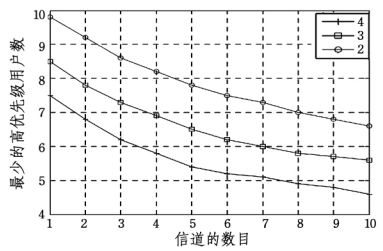

图 8　最少的高优先级用户数图

（下转第 332 页）

neering and Electronics,2008,19(4):851-859.
[4] LIAO H J,LIN C H R,LIN Y C,et al. Intrusion detection system:A comprehensive review[J]. Journal of Network and Computer Applications,2013,36(1):16-24.
[5] KAVITHA T,SRIDHARAN D. Security vulnerabilities in wireless sensor networks:A survey[J]. Journal of information Assurance and Security,2010,5(1):31-44.
[6] YAN K Q,WANG S C,LIU C W. A hybrid intrusion detection system of cluster based wireless sensor networks[C]// Proceeding of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists. 2009,1:18-20.
[7] ALRAJEH N A,KHAN S,SHAMS B. Intrusion detection systems in wireless sensor networks:a review[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks,2013,2013(1):113-120.
[8] GUTIERREZ J A,NAEVE M,CALLAWAY E,et al. IEEE 802.15.4:a developing standard for low-power low-cost wireless personal area networks[J]. Network,IEEE,2001,15(5):12-19.
[9] YICK J,MUKHERJEE B,GHOSAL D. Wireless sensor network survey[J]. Computer Networks,2008,52(12):2292-2330.
[10] AKYILDIZ I F,SU W,SANKARASUBRAMANIAM Y,et al. Wireless sensor networks:a survey[J]. Computer Networks,2002,38(4):393-422.
[11] AL-KARAKI J N,KAMAL A E. Routing techniques in wireless sensor networks:a survey[J]. Wireless communications,IEEE,2004,11(6):6-28.
[12] **李慧芳,姜胜明,韦刚. 无线传感器网络中基于博弈论的路由建模[J]. 传感器技术学报**,2007,20(9):1-3.

(**上接第** 293 **页**)

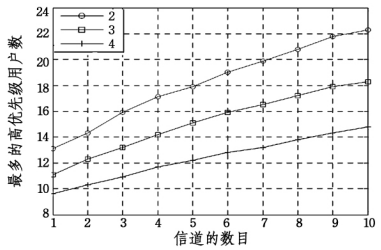

图 9 **最多的高优先级用户数图**

结束语 **本文提出了一种针对分布式认知无线电网络的** MAC **协议,该协议确保了时延敏感性应用的优先级高于普通用户。通过仿真分析表明,该协议降低了信道的接入时延,满足时延敏感性应用的** QoS **需求。本文还根据高优先级应用的** QoS **需求,提出了一种计算此类用户最大数量的方法,这可以用来改进信道的接入控制模块。通过数值分析进一步表明,本文提出的协议较其他同类协议具有较高的吞吐量。本文提出的** Q-MAC **协议还确保在数据传输阶段,次用户间不会发生冲突,这有效地提高了频谱空洞的利用率。并且,该协议不是通过增加次用户节点的复杂度,而是采用一种快速的控制信息交换机制,解决了隐藏终端的问题。因此,网络的初始化、重构和协调,甚至在不同频谱的可用性方面,**Q-MAC **协议均是易于实现且可信的。**

参 考 文 献

[1] CHENG Y C,WU E H,CHEN G H. A Decentralized MAC Protocol for Unfairness Problems in Coexistent Heterogeneous Cognitive Radio Networks Scenarios with Collision-Based Primary Users[J]. IEEE System Journal,2016,10(1):346-357.
[2] **杨劲松,曾碧卿,胡翩翩. 认知无线电网络中基于和声搜索的频谱分配与功率控制[J]. 计算机科学**,2015,42(11A):258-262.
[3] JOSHI G P,NAM S Y,KIM S W. Decentralized Predictive MAC Protocol for Ad Hoc Cognitive Radio Networks[J]. Wireless Personal Communications,2014,74(2):803-821.
[4] YUAN Y,BAHL P,CHANDRA R,et al. Allocating dynamic time-spectrum blocks in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2014,13(2),630-645.
[5] ZHU L,ZHOU H. Two Types of Attacks against Cognitive Radio Network MAC Protocols[C]// 2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering. Wuhan:IEEE Press,2008:1110-1113.
[6] **夏海轮,许航天,丁炜. 移动** Ad hoc **网络中的** QoS **技术[J]. 中国科技论文在线**,2006,1(3):212-216.
[7] HU J,SHEN L F,SONG T C. QoS-based MAC protocol for cognitive radio networks[J]. Journal of Southeast Unicersity,2012,4(28):375-379.
[8] DE DOMENICO A,STRINATI E C,DI BENEDETTO M G. A survey on MAC strategies for cognitive radio networks[J]. IEEE Commun. Surveys & Tutorials,2012,14(1):21-44.
[9] SU H,ZHANG X. Cross-layer based opportunistic MAC protocols for QoS provisionings over cognitive radio wireless networks[J]. IEEE J. Sel. Areas Commun,2008,26(1):118-129.
[10] SONG H,LIN X. A group based MAC protocol for QoS provisioning in cognitive radio networks[C]// 11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems. Guangzhou:IEEE Press,2008:1489-1493.
[11] ZHAO Q,TONG L,SWAMI A,et al. Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks:a POMDP framework[J]. IEEE J. Sel. Areas Commun,2007,25(3):589-600.
[12] ZHANG Y,LAZOS L,CHEN K. FD-MMAC:Combating multi-channel hidden and exposed terminals using a single transceiver[C]// 2014 Proceedings IEEE INFOCOM. Toronto:IEEE Press,2014:2742-2750.
[13] JHA S C,RASHID M M,BHARGAVA V K,et al. Q-MAC:an opportunistic multichannel MAC for cognitive radio networks[C]// IEEE 70th Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2009-Fall). Anchorage:IEEE Press,2009:1-5.
[14] BIANCHI G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function[J]. IEEE J. Sel. Areas Commun,2000,18(3):535-547.
[15] ZIOUVA E,ANTONAKOPOULOS T. CSMA/CA performance under high traffic conditions:throughput and delay analysis[J]. Comput. Commun.,2002,25(3):313-321.
[16] MO J,SO H S,WALRAND J. Comparison of multichannel MAC protocols[J]. IEEE Trans. Mobile Comput.,2008,7(1):50-65.