

基于信道状态感知的多信道认知多址接入协议

王亮, 盛敏, 张琰, 马骁

(西安电子科技大学 综合业务网理论与关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘 要: 针对多信道认知无线网络中预约信道与多个数据传输信道的状态不一致会降低认知多址协议性能的问题, 提出了基于数据信道状态感知的多信道认知多址协议——CAM-MAC 协议。该协议在预约信道上优化握手机制来减少平均成功预约时长; 而在 Nakagami 衰落数传信道上采用跨层方法设计了基于瞬时 SNR 的自适应传输机制来提高数据传输速率。通过上述机制, CAM-MAC 协议可以有效提升系统性能。分析与仿真均表明: 该协议在饱和吞吐量上有较大提升, 在特定场景下可提高约 50%。

关键词: 多信道 MAC 协议; 自适应传输; 认知无线网络; 动态频谱接入

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)04-0065-09

CAM-MAC: channel aware multi-channel MAC protocol in cognitive radio network

WANG Liang, SHENG Min, ZHANG Yan, MA Xiao

(State Key Lab of ISN & Information Science Institute, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: For multi-channel cognitive radio network (CRN), the inconsistent transmission conditions of common control channel (CCC) and data channels deteriorate the performance of cognitive MAC protocols. Focusing on this problem, a novel channel aware multi-channel cognitive MAC protocol (CAM-MAC) was proposed, which consists of two-level four-way handshaking mechanism. The first level two-way handshaking was optimized to reduce the mean successful reservation time on CCC. The other level two-way handshaking was implemented by a cross-layer approach to adopt the adaptive transmission based on instantaneous SNR on each Nakagami fading data channel to improve the data rate. These mechanisms improve the performance of CAM-MAC. Simulation results validate the throughput of CAM-MAC outperforms that of the existing one, about 50% improvement in the throughput under certain conditions.

Key words: multichannel MAC protocol; adaptive transmission; cognitive radio networks; dynamic spectrum access

1 引言

随着无线通信业务的激增, 可用的无线频谱越来越紧缺, 成为制约现代无线通信发展的瓶颈。然

而已分配的频谱利用率低下^[1], 为此, 认知无线电应运而生。该技术允许认知用户或者次级用户(SU, second user)在不干扰授权用户或主用户(PU, primary users)传输的情况下, 机会地利用频谱空洞进

收稿日期: 2012-07-30; 修回日期: 2013-02-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61172079, 61231008, 61201141, 61301176, 91338114); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2009CB320404); 教育部创新团队 111 基金资助项目(B08038); 国家重大专项基金资助项目(2010ZX03003-001); 国家重点实验室专项基金资助项目(ISN01080301); 陕西省科学技术研究发展计划基金资助项目(2011KJXX-40); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2014AA01A701)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(61172079, 61231008, 61201141, 61301176, 91338114); The National Key Basic Research Program of China(973 Program)(2009CB320404); The 111 Project (B08038); The National Science and Technology Major Project(2010ZX03003-001); The Special Research Fund of State Key Laboratory(ISN01080301); The Natural Science Basic Research Plan of Shaanxi Province(2011KJXX-40); The National High Technology R&D Program of China(863 Program) (2014AA01A701)

行通信^[2]。认知无线网络(CRN, cognitive radio network)以认知无线电为基础, 提供了一个解决无线频谱稀缺性与已分配频谱低效利用之间矛盾的有效途径。而认知多址接入协议是认知无线网络中一个重要研究方向。在限制 SU 对 PU 干扰的前提下, 它研究如何及时有效地发现频谱空洞并且动态公平地调度多个 SU 来最大化对空闲频谱的利用率。

目前, 关于认知多址接入协议的研究较多关注基于多信道的认知无线网络。针对该场景, 已有的研究提出一种包含公共控制信道(CCC, common control channel)(即预约信道)和数据传输信道(本文中不区分空闲信道, 数据传输信道、数据信道以及授权信道, 均指的是 PU 不占用时的空闲授权信道)的混合多址接入协议架构。Su 等人在文献[3]综合考虑了频谱感知和 MAC(media access control)层的数据分组调度, 提出了跨层的多址接入协议。其在控制信道上采用 p -persistent CSMA 预约, 在每个数据信道传输一个固定长度的数据分组。Hamdaoui 等人在文献[4]提出了 OS-MAC 协议。该方案在控制信道上基于预设窗口周期来传输控制信息协调 SU, 在数据信道上采用 IEEE 802.11 DCF basic access mode (无 RTS(request to send)/ CTS(clear to send))进行数据传输。Zhang 等人在文献[5]提出了 CREAM-MAC 协议。该协议在控制信道上采用了 4 次握手协议实现 SU 之间的信道预约, 在数据信道上 SU 在其所预约的每个空闲信道上均传输一个定长数据分组。

然而, 已有的工作大多数没有考虑或者忽略了控制信道和数据传输信道之间的不一致性。即控制信道具有好的传输条件并不能够保证数据信道也同时具有好的传输条件。而且已有的大多数认知多址协议都未曾考虑如何对抗空闲授权信道上的衰落特性以及如何充分利用多个空闲信道间异质化的传输速率。这些问题严重地制约了此类 MAC 协议的性能。

要高效地利用多个数据信道上差异化的传输能力, 自适应传输成为一个较好的解决途径。然而, 本文研究的分布式认知网络场景下所需的速率自适应方案应该适合以下特征: 1) 认知网络空闲频谱具有很强的时效性和较大的频域跨度; 2) SU 预约一次可使用多个信道进行传输, 故需要在多个不同信道上同时进行速率自适应; 3) 信道预约和数据传输是分离的, 故信道预约过程中采用的交互信息不能够获得数据传输信道的信噪比(SNR, sig-

nal-to-noise ratio); 4) SU 在所有数据信道上的传输时间是相同的, 即其他 SU 对该 SU 使用的数据信道设置相同的 NAV(network allocation vector)。

针对上述问题, 本文提出了一种基于数据信道状态感知的多信道认知 MAC 协议(CAM-MAC, channel aware multi-channel MAC protocol)。在控制信道上, 该协议通过两次握手一方面使 SU 发送端和接收端交互了空闲信道信息, 另一方面完成了对二者公共空闲信道的预约, 与 CREAM MAC^[5]相比减少了两次握手, 提高了 SU 在控制信道上的预约效率(单位时间内能成功预约的 SU 传输对个数的均值)。在数据信道上, 针对本文场景下速率自适应问题的特殊性, 该协议提出了基于瞬时 SNR 的速率自适应机制, 通过在每个数据信道上引入了两次握手来获知各个信道的瞬时传输能力, 进而采用跨层设计思想将物理层(PHY 层)和 MAC 层进行联合调度, 根据信道的传输能力在其上传输对应数目的数据分组, 从而高效地利用了多个数据信道上异质化的传输速率。同时, 该机制解决了预约信道和数据信道传输条件不一致性问题。

2 系统模型和假设

考虑一个包含两类用户(PU 和 SU)的分布式多信道认知网络场景。假设 SU 采用交替使用方式(interweave paradigm), 即 SU 只能够利用空闲的授权信道进行数据传输^[6]。

2.1 PU 信道占用模型

假定系统中有 W 个相互正交且带宽相等的授权信道, 每个信道增益服从 Nakagami 衰落分布(该模型具有广泛的代表意义)。记 CH_{total} 为整个授权信道的集合。SU 的数目为 u 。每个 PU 使用一个授权信道进行数据传输。PU 的业务模型可以建模为一个 ON/OFF 更新过程, 其中 ON 状态是指 PU 使用该授权信道进行数据传输, 而 OFF 状态表示该授权信道未被 PU 占用。假设在所有授权信道上 PU 在 ON 状态和 OFF 状态的逗留时间服从独立同分布的指数分布。PU 在不同授权信道上 ON 状态的平均逗留时间相等, 记为 $\bar{\tau}_{1,i} = \bar{\tau}_{1,j} = \bar{\tau}_1, \forall i, j \in CH_{total}$ 。同样地, PU 在 OFF 状态逗留时间的均值相等, 记为 $\bar{\tau}_{0,i} = \bar{\tau}_{0,j} = \bar{\tau}_0, \forall i, j \in CH_{total}$ 。因此每个授权信道的利用率为 $\alpha = \bar{\tau}_1 / (\bar{\tau}_0 + \bar{\tau}_1)$ 。

2.2 频谱感知模型与协作感知

目前, 有很多方法能解决认知网络中的频谱感

知问题，如能量检测、小波检测、压缩感知以及匹配滤波器等^[7]。能量检测实现简单且不需 PU 的先验信息，故本文采用该方法进行频谱感知并且使用双阈值能量检测方案^[8]。

假定每个 SU 具备一个软件无线电(SDR, software defined radio)收发机和 n 个传感器。该 SDR 收发机能够切换到任意一个授权频段上进行通信。这 n 个传感器可以同时感知 n ($n \leq W$) 个授权信道。

此外，本文采用了协作频谱感知方法^[5]。该方法内嵌于预约信道的优化握手机制之中。一开始，每个 SU 从所有授权信道中随机选择 n 个信道进行感知，称这 n 个信道为一个信道组。同时，SU 可侦听控制信道并结合自身的感知和传输结果，不断更新 PU 在每个授权信道上使用信息从而选择合适的信道进行感知。

2.3 空闲信道最大接入持续时间

SU 的信道接入持续时间定义为从 SU 发端开始在空闲信道进行数据传输到其收到相应 ACK 之间的时间间隔。为了限制 SU 对 PU 传输的干扰，需保证 SU 和 PU 的碰撞概率小于某个预先给定的阈值 P_{th}^i 。当接入持续时间越长，则 SU 与 PU 碰撞的概率越大，故 SU 的接入持续时间应受到限制。

记 T_1 和 T_2 分别表示授权信道最近一次从 ON 状态转到 OFF 状态的时刻和 SU 最近一次感知该信道的时刻。SU 在第 i 个信道上的接入持续时间用 T_{acc}^i 来表示。给定第 i 个授权信道在 T_2 时刻空闲，则 SU 传输与 PU 传输发生碰撞的概率为

$$\begin{aligned} P_1(T_{acc}^i) &= \Pr\{\tau_{0,i} < T_2 - T_1 + T_{acc}^i \mid \tau_{0,i} > T_2 - T_1\} \\ &= \Pr\{\tau_{0,i} < T_{acc}^i \mid \tau_{0,i} > 0\} = 1 - e^{-T_{acc}^i/\tau_{0,i}} \end{aligned} \quad (1)$$

据此，给定 n 个授权信道均空闲，则可得 SU 接入这 n 个信道时，至少有一个信道被 PU 占用的概率为

$$P_n(T_{acc}^i) = 1 - (1 - P_1(T_{acc}^i))^n = 1 - e^{-nT_{acc}^i/\tau_{0,i}} \quad (2)$$

根据式(2)，可得 SU 的最大接入持续时间为

$$\begin{aligned} T_{acc}^{i,MAX} &= \max_{T_{acc}^i} (P_n(T_{acc}^i) < P_{th}^i) \\ &= \max_{T_{acc}^i} (1 - e^{-nT_{acc}^i/\tau_{0,i}} < P_{th}^i) \end{aligned} \quad (3)$$

可见，随着 SU 感知的信道组中最大空闲信道数目 n 的增加，最大接入持续时间应相应减小，以保证 SU 接入 n 个空闲信道时与 PU 碰撞的概率均

小于给定阈值。

假定 SU 使用 n 个感知信道中所有空闲信道，且所有信道的接入持续时间相同。由于所有的授权信道被 PU 均等占用，故可用 $T_{acc}^{MAX} = T_{acc}^{i,MAX} = T_{acc}^{j,MAX}$ ， $\forall i, j \in CH_{total}$ 在后续文中表示 SU 的最大接入持续时间。该持续时间的取值仅与 SU 感知的信道数目 n 有关。但是当 n 给定时，根据式(3)可确定对应的 T_{acc}^{MAX} 。SU 可根据该值来确定相应空闲信道上 NAV 的取值。

2.4 空闲信道上数据传输

通过协作感知，SU 可获得当前空闲信道数目，进而机会地接入这些频谱空洞进行数据传输。一般来说，空闲信道在频域上是不连续的。然而，通过采用 D-OFDM 技术^[9]，每个 SU 能够在多个不连续的空闲信道上同时发送多个数据分组。此外，由于每个信道存在 Nakagami 衰落，SU 能够在特定空闲信道上成功发送数据分组的个数取决于该信道上 SU 收发端之间的信道状态信息(CSI, channel state information)。

3 CAM-MAC 协议介绍

CAM-MAC 协议采用混合多址接入协议架构，设计了两层 4 次握手机制。图 1 描述了 CAM-MAC 协议的具体传输流程。第一层为控制信道上优化的 RTS/CTS 握手机制，用于协调 SU 对数据信道进行预约。第二层是在空闲数据信道上基于 CT(channel training)/TP(transmission parameter)的交互，用于对抗数据信道的 Nakagami 衰落且高效利用这些信道上差异化的传输速率。

3.1 控制信道上优化的握手机制

公共控制信道可采用 ISM(industrial scientific medical)频段，如 IEEE 802.11 a/b/g 所占用的频段，或者信道利用率最低的授权信道。本文不深入研究如何设计和选择哪个信道作为公共控制信道，只是假定总存在一个可靠的控制信道。

控制信道上的预约机制不仅要保证 SU 发端与 SU 收端成功交互空闲信道信息，还要对数据信道进行预约，使其他侦听控制信道的 SU 能在相关空闲信道上正常设定 NAV 的数值。此处只有需在 SU 发端所预约的数据信道上进行传输的 SU 设置相应 NAV。如图 1 所示，所有 SU 预约数据传输信道的传输时间均固定为 T_{acc}^{MAX} ，即所有侦听预约信道且需要设置 NAV 的 SU 的 NAV 值均相等。固定长度的

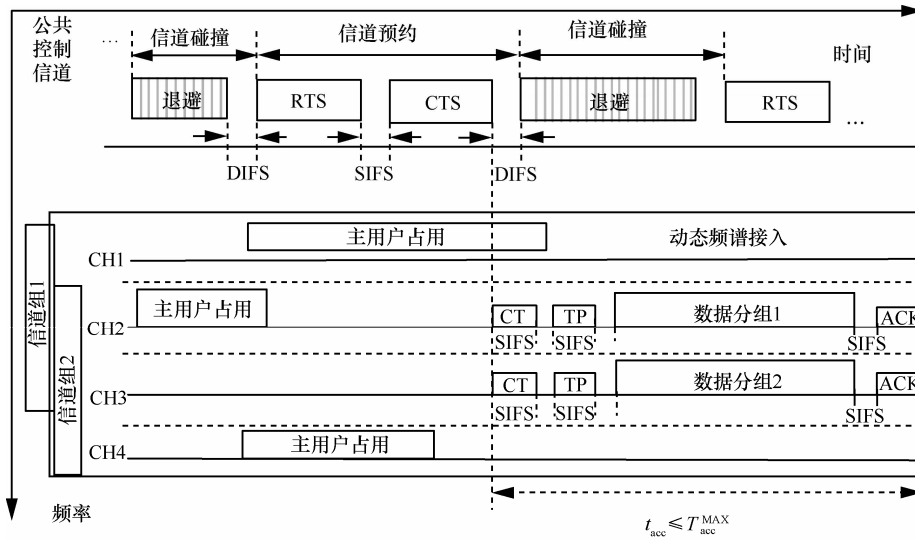


图 1 CAM-MAC 协议发送流程

NAV 易于实现而且体现了 SU 之间的公平性。但 SU 在预约时间内具体传输数据分组的个数取决于当时该信道的 CSI。

CAM-MAC 协议采用优化的 RTS/CTS 机制来预约空闲信道和避免隐藏终端问题。该协议扩展了传统 IEEE 802.11 DCF 中的控制帧长度以填充 SU 收发端的空闲授权信道信息。具体来讲, RTS 中承载 SU 发端感知信道列表信息, 而 CTS 中包含 SU 收发端的公共空闲信道信息。与 CREAM MAC 相比, 本协议在预约信道上减少了两次握手从而降低了控制信道的预约时长即提升了预约效率。具体分析将在 4.2 节中给出。

当 SU 发端有数据要发送且 n 个感知信道中至少有一个空闲且预约信道空闲时, SU 发端先随机初始化一个退避值。当在一个时隙内控制信道空闲且 SU 的信道组中至少有一个信道空闲时, 该退避计数器减 1。当退避计数器为 0 且控制信道空闲时, SU 在其上发送 RTS 帧(该 RTS 中包含 SU 发端感知信道列表信息)。SU 收端成功接收 RTS 帧后, 如果其感知的信道中至少有一个和 SU 发端相同的空闲信道, 则该 SU 收端在等待一个短帧间隔 SIFS (short interframe space) 后向 SU 发端回复 CTS 帧(该 CTS 帧内嵌 SU 收发端的公共空闲信道列表); 否则, SU 收端不回复任何信息。如果 SU 发端在发送 RTS 之后的 DIFS(DCF interframe space)时间内未收到 CTS, 则 SU 发端认为发生碰撞。当完成 RTS/CTS 交互后, SU 收发端不仅获得了其公共空闲信道列表也预约了空闲授权信道。

在侦听控制信道的 RTS/CTS 交互后, 其他 SU 不仅可以获知当前空闲授权信道的信息, 而且能够确定预约空闲信道上相应的 NAV 值(即给定 n 时, 相应的最大接入持续时间固定)。此场景下存在多信道隐藏终端问题, 故本协议规定 SU 在其空闲信道组上传输完毕后, 仍需在 T_{acc}^{MAX} 内保持感知该信道组。之后, 该 SU 可以选择其他信道进行感知。这样, 刚进行完数据传输的 SU 不会由于没有侦听到控制信道预约信息而再次预约已被其他 SU 预约的空闲信道。

此外, 本协议中所有 SU 在控制信道上进行预约的机会均等而且预约的传输时间也相等, 故 SU 之间的公平性是可以得到保障的。

3.2 空闲信道上的自适应传输

针对多信道认知网络场景下的特点, 本文设计的数据信道上基于 CT/TP 的握手流程如图 1 所示。该握手机制是为了对数据信道进行估计以便 SU 发端确定各个空闲信道上合适的调制方式从而充分利用多个信道上异质化的传输速率进而提高 SU 数据传输速率。假定 SU 的信道估计是准确的。为了保证其他 SU 在该 SU 预约的每个数据传输信道上设定相同的 NAV, 本协议中通过物理层和 MAC 层的跨层设计来实现上述所述目标。SU 的具体操作流程如下。

在控制信道上预约成功之后, SU 发端在每个预约的数据信道上以基本传输速率 R_{basic} 均发送一个 CT 帧。当成功接收到 CT 后, SU 收端的物理层根据 CT 中信息(假定 SU 收发端在发送之前均已知

CT 中的内容)估计各个空闲授权信道上的 CSI 进而获得瞬时的 SNR, 并根据该值确定每个信道上的发送参数(即每个空闲信道上适合采用的调制方式类型)。之后, SU 收端的物理层将该参数传递给 MAC 层, MAC 层将该发送参数写入不同信道对应的 TP 帧中, 且由物理层在对应的信道上以 R_{basic} 回复 TP 帧。如果 SU 收端在某个预约空闲信道上没有收到 CT 帧, 则认为该信道处于中断状态, 故不在其上向 SU 发端回复 TP 帧。

随后, 当接收到 TP 帧后, SU 发端 MAC 层将各个空闲信道的发送参数传递给物理层, 物理层根据该信息确定每个信道上对应的调制方式。同时, SU 发端 MAC 层将对应数目的数据分组传递给物理层。物理层根据对应的调制方式将在相应的空闲信道上发送对应数目的数据分组。

最后, SU 收端的物理层根据对应的解调方式在各个空闲信道上接收这些数据分组, 将这些数据传给 MAC 层之后在各个接收信道上回复 ACK。

当 SU 发端缓存中分组的个数小于所预约的数据信道能够传输的最大期望个数时, SU 发端在 CT 特定区域填充缓存中分组的个数。之后, SU 收端根据 CT 中 SU 发端缓存中分组的个数和当前 CSI 下所有数据信道能够发送的数据分组的最大数目, 确定每个信道应该使用的调制方式。原则是如果此时要传的分组个数小于当前数据信道能够传输的分组个数, 则选择合适的低阶调制使得 SU 发端恰好一次可将其缓存中数据分组传完, 否则仅根据 CSI 确定每个信道的调制方式。采用低阶调制是为了在非饱和场景下降低 SU 发端的功率消耗。

4 CAM-MAC 协议性能分析

CAM-MAC 协议一方面在 CCC 上采用优化的 RTS/CTS 来降低平均成功预约时长来提升预约效率, 另一方面在预约的数据信道上引入 CT/TP 交互以便采用基于瞬时 SNR 的自适应传输来提升 SU 传输速率, 同时解决了预约信道与数据信道的不一致性。此二者共同提升了 CAM-MAC 协议的性能。此节在理论上分析 CAM-MAC 协议的饱和吞吐量。

4.1 数据信道等效传输速率分析

假定所有授权信道的带宽均为 1 MHz。假定每个授权信道是块 Nakagami 衰落, 换言之, 每个空闲信道的 CSI 在一次数据传输过程中保持不变, 但是在不同的数据传输过程中随机变化。假定 SU 采

用 M-QAM ($M = 2^i, i = 1, \dots, 6$) 调制方式, 其中, M 表示 QAM 调制星座点的个数。 $M=0$ 表示信道中断即没有数据传输。定义基本速率 $R_{\text{basic}} = 1 \text{ Mbit/s}$ 为当 SU 在空闲信道上采用 2-QAM (即 BPSK) 调制时对应的传输速率, 则 $M = 2^i, i = 1, \dots, 6$ 对应的传输速率为 $R_i = i \times R_{\text{basic}} \text{ Mbit/s}$ 。

SU 数据分组的长度相等且固定。其长度为当 SU 采用基本信道速率 R_{basic} 在最大接入持续时间内能够传输的净比特数, 表示为 $L = [T_{\text{acc}}^{\text{MAX}} - (CT + TP) / R_{\text{basic}} - 3SIFS - ACK/R_E] R_{\text{basic}}$, 其中, $T_{\text{acc}}^{\text{MAX}}$ 当感知信道数目 n 给定时最大信道接入持续时间。故当采用 M-QAM ($M = 2^i, i = 1, \dots, 7$) 调制方式时, SU 可一次在单个信道上传输 i 个数据分组, 且 SU 收端仅用一个 ACK 来确认这 i 个数据分组。

当采用基于瞬时 SNR 的自适应传输时, 需计算 SU 在每个 Nakagami 衰落信道上的等效传输速率。首先要根据 SU 的误码率(BER, bit error rate)要求确定在空闲信道上每种调制方式适用的信噪比 SNR 范围。为此, 需计算不同的调制方式在 Nakagami 衰落信道下 BER 随 SNR 变化的性能曲线。

在完美的时钟和载波恢复机制下, 采用二维格雷码的相干 M-QAM 在加性高斯白噪声(AWGN, additive white Gaussian noise)信道下无信道编码的 BER 性能可近似为^[10]

$$BER_{\text{AWGN}}(M, \gamma) \approx (1/5) \exp\{-(3\gamma)/[2(M-1)]\} \quad (4)$$

其中, γ 表示接收 SNR。

此外, 衰落信道下 BER 性能可以通过对其在 AWGN 信道下 BER 性能表达式在相应的衰落分布下进行积分而得到^[11], 则有

$$\bar{P}_b = \int_0^{\infty} BER_{\text{AWGN}}(\gamma) p_\gamma(\gamma) d\gamma \quad (5)$$

其中, $p_\gamma(\gamma)$ 为接收 SNR 的概率密度函数。

当信道增益服从 Nakagami 衰落时, 接收 SNR 服从 gamma 分布, 可表示为^[12]

$$p_\gamma(\gamma) = (m/\bar{\gamma})^m [\gamma^{m-1}/\Gamma(m)] \exp[-(m\gamma)/\bar{\gamma}], \gamma \geq 0 \quad (6)$$

其中, m 是 Nakagami 分布参数($m \geq 1/2$), $\Gamma(\cdot)$ 是 gamma 函数。此外, 当 $m=1$ 时, Nakagami 分布也是 Rayleigh 分布。

将式(4)和式(6)代入式(5)可得, 在 Nakagami 衰落信道中 BER 性能曲线。之后, 可根据 SU 的 BER

要求计算各种调制方式的 SNR 阈值从而确定每种调制方式适合发送的 SNR 范围。定义 $\gamma_0=0$ 和 $\gamma_8=+\infty$ 。当 SU 的接收 SNR $\gamma \in (\gamma_i, \gamma_{i+1})$, $i=0,1,\dots,7$ 时, 则 SU 在 M-QAM 调制方式中选择 $M=2^{i-1}$, $i=2,\dots,7$ 对应的调制方式进行传输。当 $\gamma < \gamma_1$ 时, 信道处于中断状态, 故没有数据传输。将式(5)在每种调制方式对应的 SNR 区间内进行积分, 可得使用该调制方式的概率 $p_i = \Pr\{\gamma | \gamma \in (\gamma_i, \gamma_{i+1}), i=0,1,\dots,7\}$ 。故当采用自适应传输时, 每个 Nakagami 衰落信道上的等效传输速率为

$$R_E = \sum_{l=1}^6 p_l R_l \quad (7)$$

当 SU 发端不知瞬时 CSI 时, SU 不知瞬时的接收 SNR 如何变化故只能仅根据 SNR 的均值采用自适应传输, 此时 SU 只能根据该平均接收 SNR $\bar{\gamma}$ 来选择一种最佳的调制方式, 其为 $M=2^k, k = \arg(\bar{\gamma} \in (\gamma_i, \gamma_{i+1})) - 1, i \geq 2$ 。此时平均传输速率为

$$R_{ave} = R_k \sum_{l=k}^6 p_l \quad (8)$$

4.2 平均成功预约时长分析

不同的预约机制将会引入不同的开销, 从而影响多址接入协议的性能。认知多址协议的预约机制需要完成 2 个任务: 1)使 SU 收发端成功交互空闲信道信息; 2)预约空闲数据信道来解决隐藏终端问题。一般来说, 一种握手机制所引入的交互次数越少且控制帧长度越短, 则该握手机制的预约效率越高即平均成功预约时间越短。考虑到预约机制的开销与性能提升的折中, CAM-MAC 协议采用一种长度扩展的 RTS/CTS 机制, 而不是采用 3 次或者 4 次握手。

让 τ 和 p 分别表示在任意选定的时隙给定 SU 在控制信道上发送控制帧的概率和一个已发送的控制帧在预约信道上碰撞的概率, 则有^[13]

$$\begin{cases} \tau = \frac{2(1-2p)}{(1-2p)(CW_{min} + 1) + CW_{min} p [1 - (2p)^m]} \\ p = 1 - (1 - \tau)^{u-1} \end{cases} \quad (9)$$

其中, CW_{min} 和 m 分别表示最小退避窗数值和最大退避次数。

据式(9), 可得在一个时隙给定至少有一个节点在传输时, 一个成功预约出现的概率 PS 为

$$P_S = (u\tau(1-\tau)^{u-1}) / [1 - (1-\tau)^u] \quad (10)$$

假定一个时隙的长度为 σ 。在该场景下, 只有当预约信道空闲且 SU 所感知的 n 个授权信道中至少有一个空闲时, SU 的退避计数器减去 1。用 σ' 表示该场景下新的时隙长度, 其表达式为

$$\sigma' = \sigma(1 + E(N_{busy})) \quad (11)$$

其中, N_{busy} 是在 SU 退避计数器两次减少之间该 SU 所感知的所有授权信道都处于 ON 状态所持续的随机时隙数目。

根据文献[5]中的分析, 可得

$$E(N_{busy}) = \left[\alpha(1 - P_{fa})^2 \right]^n / \left(1 - \left[\alpha(1 - P_{fa})^2 \right]^n \right) \quad (12)$$

其中, P_{fa} 为虚警率, 即当 PU 未占用信道时 SU 感知结果表明信道繁忙。将式(12)代入式(11)中, 可计算在 CAM-MAC 协议中新生的时隙长度。

用 T_{coll} 和 T_{succ} 分别表示 SU 在控制信道上一次碰撞所持续的时间和一次成功传输所持续的时间。根据图 1, 可得

$$\begin{cases} T_{succ} = (RTS + CTS) / R_c + SIFS + DIFS \\ T_{coll} = RTS / R_c + DIFS \end{cases} \quad (13)$$

其中, R_c 表示 SU 在控制信道上的传输速率。

最终, SU 在控制信道上一次成功预约的平均时长为

$$E(T_S) = [P_{idle} \sigma' + P_S T_{succ} + (1 - P_{idle} - P_S) T_{coll}] / P_S \quad (14)$$

将式(13)代入式(14)中, 可得 CAM-MAC 协议的平均成功预约时长。

4.3 最大吞吐量分析

由于总的授权信道数目为 W 而每个 SU 最多能够感知 n 个授权信道, 故在不考虑控制信道限制时, 能够同时传输的 SU 传输对的数目最大为 $N_d = \lfloor W/n \rfloor$, 其中, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整运算。

另一方面, 控制信道也会对能同时通信的 SU 传输对的最大数目产生约束。在一个 SU 的传输期内, 控制信道上能够成功预约的 SU 数目最多为

$$N_c = \lfloor T_{acc}^{MAX} / E(T_S) \rfloor + 1 \quad (15)$$

而 CAM-MAC 协议吞吐量取决于能同时进行传输的 SU 传输对数目以及每个 SU 传输对所能使用的空闲信道数目。

故需计算在 SU 一个信道组中平均空闲的信道

数目。记 S 为 SU 所感知的 n 个授权信道中空闲的信道数目，其服从参数为 $1 - \alpha(1 - P_{fa})^2$ 的二项分布。则 n 个感知信道中有 j 个信道空闲的概率为 $\Pr\{S = j\} = C_n^j (1 - \alpha(1 - P_{fa})^2)^j (\alpha(1 - P_{fa})^2)^{n-j}$ ，故 S 的平均值为 $E(S) = n(1 - \alpha(1 - P_{fa})^2)$ 。

当数据信道饱和时，SU 接入空闲授权信道的时间为 T_{acc}^{MAX} 。而传输数据分组的时间为

$$T_{succ}^{data} = T_{acc}^{MAX} - ((CT + TP)/R_{basic} + 3 \times SIFS + ACK/R_E) \quad (16)$$

在此场景下，最大吞吐量可以表示为

$$\eta_d = (\lfloor M/n \rfloor T_{succ}^{data} E(S) R_E) / (E(T_S) + T_{acc}^{MAX}) \quad (17)$$

当预约信道饱和时，此时传输数据分组的时间也可由式(16)确定。故可得该场景下的最大吞吐量为

$$\eta_c = (N_c T_{succ}^{data} E(S) R_E) / (E(T_S) + T_{acc}^{MAX}) \quad (18)$$

结合式(17)和式(18)，最终可以计算 CAM-MAC 协议的最大吞吐量为

$$\eta = \min(\eta_c, \eta_d) = (N_T T_{succ}^{data} E(S) R_E) / (E(T_S) + T_{acc}^{MAX}) \quad (19)$$

其中， $N_T = \min(N_c, N_d)$ 表示在 2 种场景下能并行传输的 SU 节点对最大数目的最小值。

5 仿真结果

本节通过数值分析和相关仿真来验证 CAM-MAC 协议的性能。其中，仿真参数如表 1 所示。漏检率 P_{md} 和虚警率 P_{fa} 均设置为 0.001。

表 1 相关仿真参数

参数名称	取值	解释
RTS	30 byte	RTS 帧长
CTS	30 byte	CTS 帧长
CT	20 byte	CT 帧长
TP	20 byte	TP 帧长
ACK	20 byte	ACK 帧长
SIFS	16 μ s	短帧间隔
DIFS	34 μ s	DCF 帧间隔
σ	9 μ s	时隙长度
RC	1 Mbit/s	控制信道速率
CW _{max}	1 024	最大退避窗值

首先，计算仿真中每个 Nakagami 衰落信道上的等效传输速率。假定 SU 的平均接收 SNR $\bar{\gamma} = 30$ dB 且 BER 要求为 10^{-3} 。在 Nakagami 衰落分布中取 $m=1$ 即为 Rayleigh 衰落，此时根据 4.1 节分析，可计算采用各种调制方式的概率和 SNR 范围如表 2 所示。

表 2 选择调制方式的参数

M-QAM	使用概率	信噪比范围/dB
信道中断	0.118 3	$0 \leq \gamma < 21$
BPSK	0.210 1	$21 \leq \gamma < 26$
4-QAM	0.303 7	$26 \leq \gamma < 30.2$
8-QAM	0.231 9	$30.2 \leq \gamma < 33$
16-QAM	0.136 0	$\gamma \geq 33$

在此情况下，一些高阶调制方式(如 64-QAM)的使用概率很小，故没有采用。此外，式(4)是节点未采用信道编码时的性能曲线，故各种调制方式对应的 SNR 门限值比较大。如果收发端物理层均采用复杂的信道编码如 LDPC 等，则每种调制对应的 SNR 门限会降低很多，此情况不是本文关注的重点，故未考虑。

当采用基于瞬时 SNR 的自适应传输时，SU 可根据瞬时接收 SNR 值选择使用表 2 中对应的调制方式。根据表 2、式(7)和式(8)，可得等效传输速率为 $R_E = 2.0572 \times R_{basic}$ ，中断概率为 0.118 3。而当 SU 不知瞬时 CSI 仅知道 SNR 的均值时，即 SU 根据 SNR 均值采用自适应传输，此时 SU 选择一直采用 4-QAM 进行传输，此时平均速率为 $R_{ave} = 1.3434 \times R_{basic}$ ，信道中断概率为 0.3283。比较 R_E 和 R_{ave} ，可知基于瞬时 SNR 的自适应传输与基于统计信息的速率自适应相比，信道传输速率约有 53%的提升且信道中断概率明显减小。

下面举例说明在 CAM-AMC 协议中采用基于瞬时 SNR 的自适应传输带来的增益。假设一个空闲授权信道的最大接入持续时间为 5 ms 且信道基本速率为 1 Mbit/s。根据图 1 所示交互过程和表 1 中相关仿真参数，先计算此情况下所引入的额外开销为 $CT + TP + 2SIFS \times R_{basic} = 352$ bit。之后，计算在一次数据传输过程中，SU 发端采用基于瞬时 SNR 的自适应传输与 SU 发端仅根据 SNR 的均值采用固定调制方式传输相比，能够增加数据比特为 $[t_{acc} - (CT + TP)] / (R_{basic} - 3SIFS - ACK/R_E) (R_E - R_{ave}) = 3 250$ bit。

可见在数据信道上采用基于瞬时 SNR 的自适

应传输引入的开销较小而获得的额外增益很大。而且当信道接入持续时间在合理的范围内增加时，相应的增益也随之线性增加。总之，即使考虑到开销，在数据信道上引入基于瞬时 SNR 的速率自适应是十分必要的。

为了说明控制信道上预约效率的提升，图 2 比较了当退避窗口大小给定时，在不同 SU 数目下，CAM-MAC 2 次握手预约机制和 CREAM MAC 中 4 次握手预约机制的平均成功预约时长。以此来衡量，可得 CAM-MAC 的预约方式在所有情况下都比 CREAM MAC 的预约方式有增益。可见，CAM-MAC 在控制信道上降低了平均成功预约时长即提升了预约效率，这也将提升该协议的整体性能。

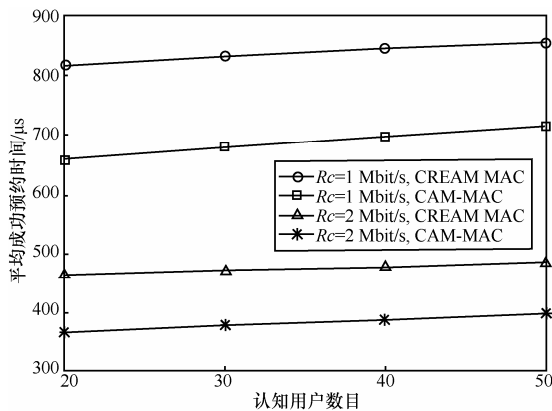


图 2 预约信道上平均成功预约时间对比($CW_{min}=16$ 和 $n=4$)

图 3 给出了本协议饱和吞吐量随 SU 传感器数目变化关系。仿真结果与分析结果基本吻合，验证了理论分析的正确性。饱和吞吐量先随 SU 传感器数目的增加而线性增加，此时控制信道是制约吞吐量提升的主要因素。当传感器数目增加到一定程度时，吞吐量保持不变，此时数据信道总数是制约吞吐量提升的主要因素。此外，控制信道传输速率的增加可进一步提升饱和吞吐量。特别地，当传感器数目较少时，吞吐量提升的幅度较大。

图 4 给出了 CAM-MAC 和在 2 种情况下 CREAM MAC 的吞吐量的分析比较。其中，“CREAM-ave”表示在衰落信道上 SU 采用基于 SNR 均值的自适应传输；“CREAM-org”表示 SU 在每个信道上采用 1 Mbit/s 的固定速率进行传输，即与文献[5]相同。可见三者的饱和吞吐量均随着退避窗的增加先增加之后减小。而且当 SU 数目给定时，存在一个最优的退避窗大小。此外，CAM-MAC 的吞吐量与其他二者相比，均有大幅提高。特别地，

与采用基于 SNR 均值的自适应传输的 CREAM MAC 的吞吐量相比也有大幅提升，最高约有 50% 的提升。一方面由于预约信道上提升了预约效率；另一方面由于空闲信道上采用了基于瞬时 SNR 的自适应传输提升了 SU 的传输速率。二者共同提升了 CAM-MAC 的吞吐量。

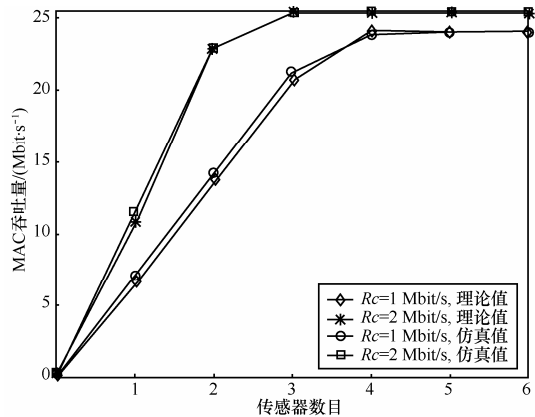


图 3 CAM-MAC 吞吐量随传感器数目变化曲线 ($CW_{min} = 256, W = u = 30$ 且 $\alpha = 0.5$)

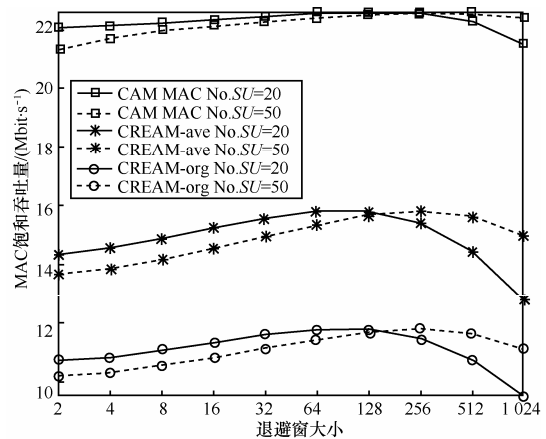


图 4 饱和吞吐量比较 ($n = 4, \alpha = 0.5, R_E = 2.057 2 \text{ Mbit/s}, R_{ave} = 1.343 4 \text{ Mbit/s}$ 和 $R_{org} = 1.00 \text{ Mbit/s}$)

图 5 表明 CAM-MAC 协议的吞吐量随 PU 信道利用率增加而线性递减。因为随着 PU 占用信道更加频繁，SU 的传输机会相应减小。此外控制信道传输速率的提升以及 SU 传感器数目的增加均能提升吞吐量。

图 6 给出了 CAM-MAC 和 CREAM MAC 的平均数据分组时延的仿真比较，其中，平均数据分组时延包括在接入时延和排队时延。图中 3 条曲线代表的意义与图 4 相同。由于控制信道上平均成功预约时长的降低和数据信道上的数据传输速率的提升，CAM-MAC 的平均数据分组时延比采用基于平均

SNR 的速率自适应传输的 CREAM MAC (即图中 CREAM-ave 对应的曲线) 的平均数据分组时延低很多。同时由信道衰落引起的信道中断概率对数据分组的平均时延有很大影响。CREAM-ave 方案由于信道中断概率高达 0.328 3 且平均信道速率较低, 故平均分组时延最大。而 CREAM-org 方案中由于信道不存在衰落, 故当 SU 的数据分组到达率较小时, 其时延最小; 但是随着数据分组到达率的增加, 其时延开始增加。然而在数据分组到达率较大时, CAM-MAC 的时延最小, 因为该方案虽然存在信道中断但其等效传输速率比 CREAM-org 的传输速率大很多。

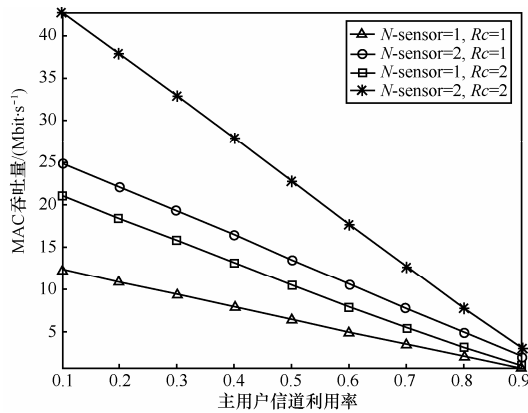


图 5 CAM-MAC 吞吐量随信道利用率变化关系 ($CW_{min} = 256, W = u = 30$)

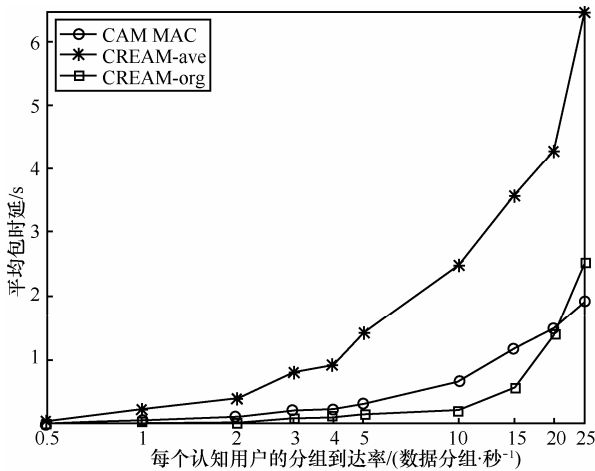


图 6 平均分组时延比较 ($CW_{min} = 64, u = 10, \alpha = 0.5$ 且 $W = n = 4$)

6 结束语

本文在多信道分布式 CRN 中针对预约信道与数据信道的不一致性会降低此类协议性能的问题, 提出了一种新型的 CAM-MAC 协议。该协议在数据信道上采用基于瞬时 SNR 值的自适应传输充分利

用了多个信道间异质化的传输速率并优化了控制信道上的预约过程从而减轻了控制信道和数据信道不一致性对多信道 MAC 协议性能的影响。分析该协议的饱和吞吐量同时仿真验证分析的正确性。分析表明, 与已有相关协议相比, CAM-MAC 协议的性能有显著的提升。同时基于瞬时 SNR 的速率自适应机制更加适合认知网络场景。

在下一步的研究中, 将关注控制信道上退避机制的调整并引入协作传输来进一步提升此类认知 MAC 协议的性能。

参考文献:

- [1] Report of the spectrum efficiency working group[EB/OL]. <http://www.ictregulationtoolkit.org/en/Document.2831.pdf>, 2002.
- [2] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.
- [3] SU H, ZHANG X. Cross-layer based opportunistic MAC protocols for QoS provisioning over cognitive radio wireless networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(1):118-129.
- [4] HAMDIOU B, SHIN K G. OS-MAC: an efficient MAC protocol for spectrum-agile wireless networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(8): 915-930.
- [5] ZHANG X, SU H. CREAM-MAC: cognitive radio-enabled multi-channel MAC protocol over dynamic spectrum access networks[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2011, 5(1): 110-123.
- [6] GOLDSMITH A J, JAFAR S A, MARIC I, et al. Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: an information theoretic perspective[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(5): 894-914.
- [7] AKYILDIZ I F, LO B F, BALAKRISHNAN R B. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: a survey[J]. Physical Communication, 2011, 4(1): 40-62.
- [8] SU H, ZHANG X. Energy-efficient spectrum sensing for cognitive radio networks[A]. 2010 IEEE International Conference on Communications[C]. Cape Town, South Africa, 2010.1-5.
- [9] POSTON J D, HORNE W D. Discontiguous OFDM considerations for dynamic spectrum access in idle TV channels[A]. 2005 First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks[C]. Baltimore, MD, USA, 2005. 607-610.
- [10] GOLDSMITH A J, CHUA G. Variable-rate variable-power M-QAM for fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45: 1218-1230.
- [11] GOLDSMITH A J. Wireless Communications[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [12] ALOUINI M S, GOLDSMITH A J. Adaptive modulation over Nakagami fading channels[J]. Wireless Personal Communications, 2000, 13(1-2):119-143.
- [13] 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.

(下转第 80 页)