

多信道认知无线网络时延性能分析与接入策略设计

李潇^①, 王军^{①*}, 李虎生^②, 李少谦^①

① 电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室, 成都 611731;

② The Department of Electrical Engineering and Computer Science, the University of Tennessee, Knoxville 37996, USA

* 联系人, E-mail: junwang@uestc.edu.cn

2012-03-05 收稿, 2012-06-15 接受

国家重点基础研究发展计划(2009CB320405)、国家自然科学基金(61071102)、国家科技重大专项(2010ZX03006-002-02, 2010ZX03005-003)和国家级重点实验室基金(9140C0202061004)资助

摘要 在分级认知无线网络中, 无论何时当授权频段未被主用户占用时, 次用户都可以采取机会式的方式进行接入. 如何保证次用户在整个数据包传输过程中的服务质量, 分析其相应传输时延性能, 是目前对此类认知无线网络的研究中, 一个非常值得关注的话题. 集中分析了次用户系统的传输时延性能, 并设计了共享多个授权信道情况下的最优接入策略. 主用户和次用户系统首先各自被建模成为 $M/G/1$ 排队模型. 然后, 将每个授权信道上主用户数据包和次用户数据包传输融合在一起进行讨论, 提出一种虚拟的优先级队列模型. 基于 $M/G/1$ 抢占重传优先级排队理论, 获得了次用户数据包传输的系统时延均值表达式. 同时, 基于该系统时延性能均值, 讨论了共享多个授权信道的条件下的多信道接入策略设计. 其被等效为一个非线性规划问题, 通过经典的遗传算法, 可以得到相应全局最优解. 数值结果验证了我们理论分析和接入策略设计的正确性. 考虑到遗传算法的时间复杂度过高, 并为了降低相应的时间开销, 在实际应用中也可以采用反比例接入策略得到其近似最优解.

关键词

认知无线网络
抢占重传优
优先级排队
非线性规划
最优接入策略

目前, 大部分无线频谱资源都是采用独占的方式分配给授权的无线电服务使用. 近年来随着无线频谱资源需求量的快速增长, 大家普遍认为在不远的将来频谱资源将被使用殆尽. 但是, 通过美国联邦电信委员会频谱政策任务小组对频谱使用的测量报告显示^[1], 在大多数时间点和地点, 许多授权频谱资源都未被得到有效充分的利用. 为了有效地利用这些未被充分使用的频谱资源, 认知无线电技术及其认知无线网络应运而生. 其能够让次用户采取机会式的方式使用和共享这些未被充分利用的授权频谱资源^[2,3].

在认知无线网络的应用中, 为了达到更高效的频谱使用率, 其也为相应的监管机构提供了高度的灵活性. 对于认知无线网络而言, 文献[3]中作者将动态频谱接入的模式划分为3种基本模型, 其中机会

式频谱接入归属于混合接入模型下的覆盖式接入. 在本论文中, 将集中讨论这种机会式的频谱接入. 在机会式频谱接入模式下, 无线网络中的一组授权信道被固定的分配给一些主用户独占使用, 而次用户则采取机会式的方式使用这些暂时未被主用户占用的信道. 在这里, 我们假定次用户具有频谱感知的功能, 能够检测到该授权信道当前是否正被主用户占用.

考虑时域上的频谱共享, 在最近的研究文献中已经出现了一些新的成果. 文献[4]中, 作者将主用户系统和次用户系统同时假定为相同的时隙共享结构, 并基于部分观测马尔科夫决策过程体系, 推导出相应的次用户系统接入策略. 在文献[5~7]中, 作者将主用户传输系统近似建模为连续时间马尔科夫链, 提出了受碰撞约束限制的认知介质接入方案, 并讨

论了在该马儿科夫信道下的最优认知接入策略。但是,上面的研究中都存在一个相同的假设,那就是假定次用户系统一直都存在数据包需要传输,而忽略了次用户系统中数据包到达和传输的动态性。考虑到次用户系统的业务动态性,将授权信道当作服务器,用户数据包当作需要被服务的顾客,我们便可以建立等效的排队模型并进行重要的理论分析。

众所周知,系统传输时延是衡量无线网络服务质量好坏的一个重要性能参数。但是,基于认知无线网络进行讨论,并由于时延性能分析本身的复杂性,其在目前的研究中并未得到更进一步的讨论。文献[8]中,作者将主用户数据包的到达建模成为排队模型中服务器的中断,并详细分析单服务器双队列和双服务器单队列这两种特殊的情况下的队列性能参数。文献[9]中所做的工作与我们本文的研究有很大的相关性。其将主用户和次用户数据包传输系统和在一起建模为优先级 $M/G/1$ 模型,并讨论了共享单个授权信道情况下的系统时延性能。但是在文献[9]讨论中,其忽略了次用户数据包到达瞬间,授权信道上是否存在其它次用户数据包正在被传输,对该到达次用户数据包排队时延的影响。在这篇论文中,我们加入了所有情况的讨论,并且进一步讨论了分级认知无线网络环境下多信道接入情况。基于相应的次用户系统时延均值,我们设计了最优的多信道接入策略。其他有关接入多信道排队时延性能分析的工作,可以参阅文献[10]和[11]。但是,在文献[10]和[11]的分析中,其都忽略了在次用户数据包传输过程中主用户数据包突发到达对其整个传输过程的影响。

在这篇论文中,我们将次用户传输系统时延性能的分析和多信道接入策略的设计和在一起逐个进行讨论。我们首先对次用户数据包传输的系统时延进行分析。主用户传输系统和次用户传输系统各自都被建模为 $M/G/1$ 排队模型。针对某个授权信道上的用户数据包传输而言,主用户数据包和次用户数据包分别被等效为排队队列中的高优先级顾客和低优先级顾客。同时考虑到在次用户数据包传输过程中主用户数据包突发到达对其的影响,次用户数据包传输的系统时延可以基于 $M/G/1$ 抢占重传优先级排队模型进行相应的理论分析。对于其他授权信道上的数据包传输而言,我们也可以进行类似的分析。在共享多个授权信道的情况下,我们基于上面的分

析获得了次用户数据包传输系统时延的均值表达式。基于该表达式,我们发现次用户数据包传输的系统时延与对应的多信道接入策略呈现出某种凸函数的映射关系。当我们采用最优的多信道接入策略时,次用户数据包传输的系统时延均值也相应的达到最小值。于是我们可以将其等效为一个非线性规划问题,通过遗传算法得到的全局最优解,就是我们所需要的最优接入策略。考虑到遗传算法的时间复杂度过高,在实际应用中我们也可以采用次优的低复杂度的反比例接入策略,来得到其近似最优解。

总之,我们在这篇论文中所做的贡献总结如下:

(i) 首先,针对授权信道上主用户和次用户的数据包业务传输过程,我们提出一种虚拟优先级队列模型。

(ii) 其次,在分级认知无线网络场景下,基于优先级抢占重传排队模型,我们展示了基于排队论分析次用户数据包传输系统时延的一般方法。

(iii) 最后,在共享多个授权信道的情况下,基于次用户数据包传输系统时延的最小均值,我们获得了最优的多信道接入策略。同时,考虑到遗传算法的收敛时间复杂度过高,在实际应用中我们也可以采用反比例接入策略得到其近似最优解。

这些都为以后认知无线网络中多信道接入协议的设计,提供了指导性的建议和方法。

1 系统模型

在这篇论文中,我们将集中于分级认知无线网络的场景下进行讨论。假定网络中存在 M 个可用的授权信道,分别被标记为 1 到 M ; 存在 N 个次用户,分别被标记为 1 到 N 。每个主用户固定的在其所分配的授权信道上传输数据包。只要当前授权信道未被其授权的主用户占用,次用户便可以使用 M 个授权信道中的任何一个信道传输数据包。同时对于某个授权信道上的用户数据包传输而言,主用户数据包的优先级高于次用户数据包的优先级。图 1 展示了在共享多个授权信道的情况下,次用户数据包传输的一个实例。

对于次用户而言,其不必区分授权信道上传输的是不同的主用户数据包。因此,在下面的分析中,我们假定在某个授权信道上,只有相对应的一个等效的主用户传输数据包。也就是说,在网络中只存在 M 个主用户分别对应 M 个授权信道上传输数据包,

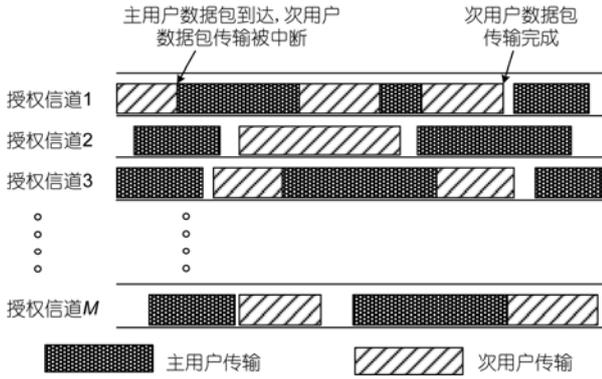


图1 主用户和次用户数据包传输信道占用模型

并且每个主用户分别固定的接入各不相同的其中的一个授权信道。为了简化分析并不失一般性，在整篇论文中我们都将作如下的假设：

(i) 完美的感知。次用户能够完美地感知授权信道上主用户数据的突发到达，并不存在任何感知错误。

(ii) 理想的冲突检测。一旦主用户数据包被检测出现在授权信道上传输，次用户必须马上中断其当前所传输的数据包，以防止对主用户数据包的传输产生干扰。当主用户数据包被检测到传输完成后，次用户马上重传原来被中断的整个数据包，包括发

生中断前已经传输的那部分数据。因为在无线网络中，每个数据包中必须携带相应的信令控制消息，例如循环冗余校验码，物理层前导符，以及MAC层地址等。因此，一旦次用户中断了当前数据包的传输，其必须从头开始完整的传输该数据包。

(iii) 集中式的调度。多个次用户的数据包业务采用和集中控制的方式进行调度，因此，次用户之间的数据包传输不存在相互干扰。

(iv) 数据包的活动特性。不失一般性，我们将主用户和次用户数据包传输系统都描述成为 $M/G/1$ 排队模型。由于，该排队模型的服务器忙期和闲期都呈指数分布时，传统的马尔科夫开关模型便成为该排队模型下的一个子集。因此，上述 $M/G/1$ 排队模型在描数据包的活动特性上更具一般性。

2 基于虚拟优先级队列理论的时延分析

2.1 虚拟优先级队列

在本节中，我们将基于排队模型分析次用户数据包传输的系统时延。需要指出的是，在不同授权信道上传输的次用户数据包将物理上等待在不同的缓存队列中。图2中展示了 N 个次用户共享 M 个授权信道的物理队列实例。主用户在其专有的授权信道

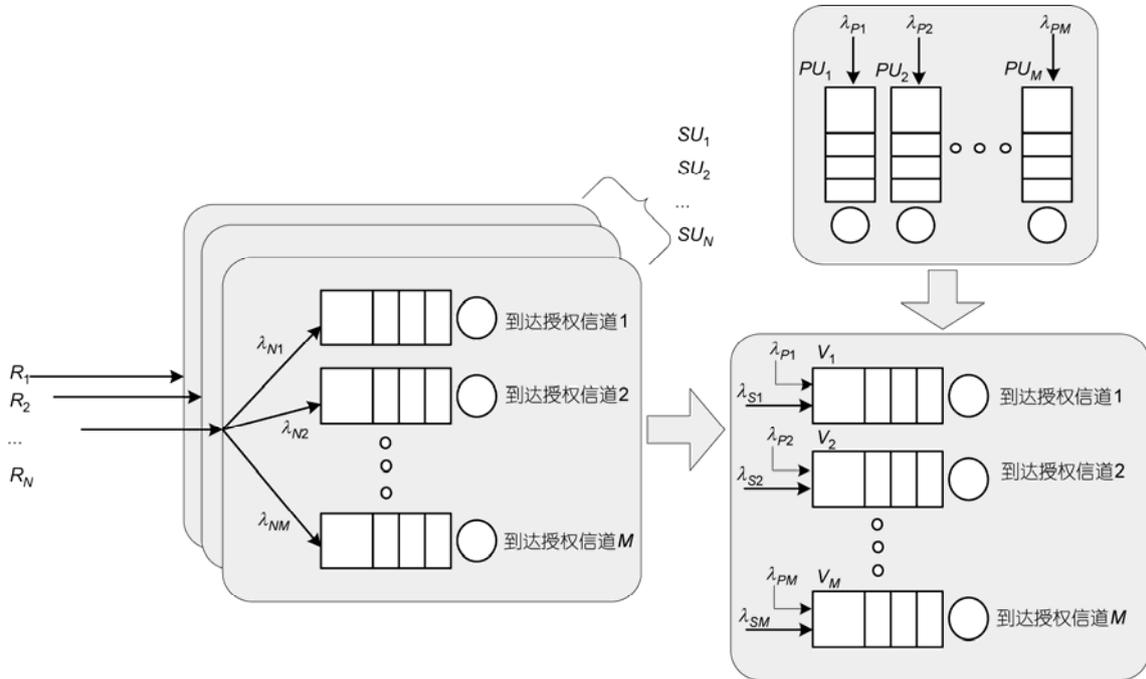


图2 授权信道上的物理队列和优先级队列

上保持一个物理队列. 次用户保持有 M 个物理队列, 其分别与 M 个授权信道相对应. 为了简化分析, 当次用户数据包被分配到某个物理队列后, 其将一直呆在该物理队列中, 直到整个数据包被传输完成. 次用户数据包在传输中被中断时, 考虑其切换到其他授权信道传输的情况, 由于所有次用户数据包的优先级相同, 因此该数据包只能呆在与该切换信道所对应的物理队列的队尾, 从而将引入更多的排队等待时延. 因此, 当次用户数据包在传输中被中断时, 与固定的信道分配模式相比, 切换信道并不一定能具有更好的时间优势. 其相互之间更进一步的时延比较目前正处于研究中, 将不在这篇论文作进一步的分析.

对于授权信道而言, 信道上存在两类数据包业务的传输, 即主用户数据包业务和次用户数据包业务. 由于主用户数据包优先级高于次用户数据包优先级, 因此我们可以在每个授权信道上建立相应的虚拟优先级队列. 在该队列中, 服务器代表授权信道, 优先级顾客分别代表主用户数据包和次用户数据包. 因此在每个授权信道上, N 个次用户物理队列和一个主用户物理队列融合在一起将被等效为一个虚拟的优先级队列. 具体的模型实例, 如图 2 所示.

2.2 系统时延分析

考虑到次用户共享多个授权信道的情况, 相应的多信道接入策略势必将得到重点讨论. 我们使用向量 $\mathbf{a}_i=[a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{iM}]$ 表示次用户 i 的接入行为, 其中 $a_{ij} \in \{0, 1\}$, $a_{ij}=1$ 代表次用户 i 选择在授权信道 j 上传输数据包, $a_{ij}=0$ 则情况相反. 次用户 i 接入多信道的策略被定义为 $\mathbf{s}_i=[s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{iM}]$, 其中 $s_{ij} \in \{0, 1\}$ 代表次用户 i 采用接入行为 $a_{ij}=1$ 的概率. 总之, 次用户 i 在所有授权信道上的接入策略总和满足 $\sum_{j=1}^M s_{ij} = 1$.

如图 2 所示, 在授权信道 j 上的主用户数据包到达速率为 λ_{pj} , 次用户数据包到达速率总和为 R_i . 因此, 次用户 i 在授权信道 j 上的数据包到达速率可以表示为 λ_{ij} , 其中 $\lambda_{ij}=R_i \cdot s_{ij}$. 同时, 在授权信道 j 上的所有次用户数据包业务流都可以被融合在一起讨论. 第 1 节指出, 次用户数据包传输系统被建模为 M/G/1 排队模型, 其表明所有次用户数据包的到达都服从泊松分布. 很容易证明, 多个服从泊松分布的次用户数据包到达融合在一起仍然服从泊松分布^[17], 其到达速率参数为 $\lambda_{sj} = \sum_{i=1}^N \lambda_{ij} = \sum_{i=1}^N R_i \cdot s_{ij}$.

现在, 将考虑次用户数据包传输在授权信道 j 的系统时延. 由于所有授权信道上数据包传输的相似性, 在不引起混乱的情况下, 在下面的讨论中将省略掉下标 j . 考虑主用户数据包突发到达对次用户数据包传输的影响, 在授权信道 j 上的虚拟优先级队列可以被转化为 M/G/1 抢占重传优先级队列进行讨论. 次用户数据包传输的系统时延由传递时延和排队等待时延两部分组成. 在基于排队模型的排队论分析中, 上述两部分也被称为服务时间和等待时间.

(1) 传递时延的计算. 首先, 集中讨论次用户数据包的传递时延. 根据第 1 节中基于理想冲突检测的假设, 图 3 显示了次用户数据包在授权信道的传递实例. 其中, $X^{(i)}(i=1, 2, \dots)$ 代表由于主用户数据包突发到达引起次用户数据包的无效传递时间, $B^{(i)}(i=1, 2, \dots)$ 代表授权信道 j 被主用户占用的忙期持续时间, X 代表次用户数据包完成一次无中断传递所需的时间, X_s 代表次用户数据包在授权信道 j 上完成整个数据包的传递所需的总时间, 这其中也包括主用户数据包突发到达和传输对其的影响.

如图 3 所示, 我们可以得到如下的等式:

$$X_s = \sum_{i=1}^n (X^{(i)} + B^{(i)}) + X. \tag{1}$$

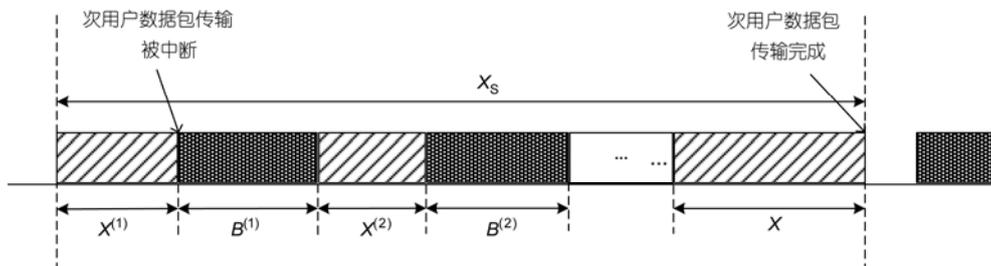


图 3 授权信道上的次用户数据包传输

由于主用户数据包在授权信道 j 的传递不会受到次用户数据包的影响, 换句话说, 次用户数据包在授权信道 j 的传递对于主用户来说是透明的. 因此, 主用户数据包在授权信道 j 上的传输过程仍然可以被当作 M/G/1 排队模型来处理. 基于前面第 1 节的假设, 主用户数据包的到达服从参数为 λ_p 的泊松分布, 同时该数据包的传递时间服从均值为 $1/\mu_p$ 的一般分布. 我们可以获得授权信道 j 被主用户占用的忙期均值为^[14]:

$$E[B] = \frac{1}{\mu_p - \lambda_p}. \quad (2)$$

而授权信道 j 未被主用户占用的闲期持续时间服从与主用户数据包到达过程相同的分布, 即参数为 λ_p 的泊松分布. 其相应的分布函数如下所示:

$$F(I) = 1 - e^{-\lambda_p I}, \quad I \geq 0. \quad (3)$$

让我们进一步假设图 3 中 X 的值为 t . 次用户数据包在传递过程中被中断的条件为授权信道 j 的闲期持续时间小于 X 的值 t . 因此当 $X=t$ 时, 次用户数据包在传递过程中被中断的概率为

$$P(K = n | t) = (1 - e^{-\lambda_p t})^n e^{-\lambda_p t}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (4)$$

其中 K 代表被中断的次数, 其均值可以通过如下等式获得:

$$\begin{aligned} E[K] &= \int_0^{\infty} (e^{-\lambda_p t} - 1) f(t) dt \\ &= E[e^{-\lambda_p X} - 1], \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $f(t)$ 代表 X 的概率分布函数.

于是当 $X=t$ 时, X_s 的均值如下所示:

$$\begin{aligned} E[X_s | t] &= E\left[\sum_{i=1}^n (X^{(i)} | t + B^{(i)} | t) + t\right] \\ &= E[K](E[X | t] + E[B | t]) + t, \end{aligned} \quad (6)$$

其中

$$E[B | t] = E[B] = \frac{1}{\mu_p - \lambda_p}, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} E[X | t] &= E[I | I \leq t] \\ &= \frac{1}{\lambda_p} - t \frac{e^{-\lambda_p t}}{1 - e^{-\lambda_p t}}, \end{aligned} \quad (8)$$

同时联合等式(5)~(8), 我们便可以得到 X_s 的均值为

$$\begin{aligned} E[X_s] &= E[E[X_s | t]] \\ &= E[K](E[E[X | t]] + E[B | t]) + E[t] \\ &= \left(\frac{1}{\lambda_p} + \frac{1}{\mu_p - \lambda_p}\right) E[e^{-\lambda_p X} - 1]. \end{aligned} \quad (9)$$

(2) 排队等待时延的计算. 要获得排队等待时

延的均值, 我们需要分如下两种情况进行讨论.

情况 1: 当次用户数据包到达时, 授权信道上不存在正在传输的其他次用户数据包.

在这种情况下, 基于第 1 节中所做的集中式调度的假设, 次用户数据包的排队等待时延仅仅与主用户数据包的到达和传递有关. 对于主用户而言, 用户数据包的排队等待时间 W_p 与 M/G/1 排队模型中的情况相同^[13], 即

$$W_p = \frac{\lambda_p E[X_p^2]}{2(1 - \rho_p)}, \quad (10)$$

其中主用户业务强度 $\rho_p = \lambda_p / \mu_p$, $E[X_p^2]$ 代表主用户数据包传递时间的二阶矩.

对于次用户而言, 在排队等待的过程中, 也会存在主用户数据包的到达, 因此次用户数据包的排队等待时间满足如下等式:

$$W_p + \lambda_p W_{s1} \cdot \frac{1}{\mu_p} = W_{s1}, \quad (11)$$

于是有

$$W_{s1} = \frac{\lambda_p E[X_p^2]}{2(1 - \rho_p)^2}. \quad (12)$$

情况 2: 当次用户数据包到达时, 授权信道上存在正在传输的其他次用户数据包.

在这种情况下, 主用户数据包突发到达对次用户数据包传输的影响已经被包含在了传递时延的分析中, 此时次用户数据包的排队等待时间与主用户无关. 这时次用户数据包的排队等待过程正好与 M/G/1 排队模型中的情况相同, 于是次用户数据包的排队等待时间可以表示为

$$W_{s2} = \frac{\lambda_s E[X_s^2]}{2(1 - \rho_s) \rho_s}. \quad (13)$$

将上述两种情况存在的概率加入到一起讨论, 于是次用户数据包在授权信道上的排队等待时间均值为

$$\begin{aligned} E[W_s] &= W_{s1}(1 - \rho_s) + W_{s2} \rho_s \\ &= \frac{\lambda_p E[X_p^2]}{2(1 - \rho_p)^2} (1 - \rho_s) + \frac{\lambda_s E[X_s^2]}{2(1 - \rho_s)}, \end{aligned} \quad (14)$$

其中根据文献[8], $E[X_s^2]$ 的值为

$$\begin{aligned} E[X_s^2] &= 2(E[B] + 1/\lambda_p)^2 E[(e^{\lambda_p X} - 1)^2] \\ &\quad + (E[B^2] + 2E[B]/\lambda_p + 2/\lambda_p^2)(E[e^{\lambda_p X} - 1]) \\ &\quad - 2(E[B] + 1/\lambda_p)E[X e^{\lambda_p X}], \end{aligned} \quad (15)$$

于是,在等式(15)中,我们知道了除授权信道忙期二阶矩 $E[B^2]$ 之外的所有参数.同时根据文献[14,15]中的结果,我们也可以得到 $E[B^2]$ 的值为

$$E[B^2] = \frac{E[X_p^2]}{(1-\rho_p)^3}. \quad (16)$$

(3) 系统时延. 最后,次用户数据包在授权信道 j 上传输的系统时间即为其传递时间与排队等待时间的总和.

$$E[T_s] = E[W_s] + E[X_s]. \quad (17)$$

联合上述其他的等式(9), (14)~(16), 我们便可以得到最终的结果.

2.3 数值结果

在数值结果的验证中,相应的系统参数我们按照如下设置.主用户数据包传递时间和次用户数据包无中断传递时间都服从指数分布.对于次用户而言,相应的数据包传递时间均值设置为 $\mu_s=1$ ms, 业务强度为 $\rho_s=\lambda_s/\mu_s$. 对于主用户而言,其相应的数据包传递时间均值设置为 $\mu_p=1.5$ ms.

图4显示了次用户业务强度 ρ_s 从0增加到1的过程中,次用户数据包传输的系统时间均值 $E[T_s]$ 的变化情况.从图4中我们可以发现, $E[T_s]$ 的值随着次用户业务强度 ρ_s 的增长呈现近似指数型的增长趋势.在图5中,我们展示了 $E[T_s]$ 在某个固定的次用户业务强度 ρ_s 的条件下,其随着主用户业务强度 ρ_p 的变化趋势.不难发现,当 ρ_p 的值越大时, $E[T_s]$ 的值也越大.

3 多信道接入策略的优化

3.1 接入策略的优化

在第2.2节中,我们知道次用户 i 在多个授权信道上传输数据包的信道接入策略可以表示为

$$s_i = [s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{iM}], \text{ 其中 } \sum_{j=1}^M s_{ij} = 1.$$

假定每个次用户 $i(i=1,2,3,\dots,N)$ 的多信道接入策略相同,同时在不引起混乱的情况下,我们在下面的讨论中都将忽略掉相应的下标 i .也就是说对于所有次用户的多信道接入策略而言,其都可以被统一为 s_j , 并且满足 $\sum_{j=1}^M s_j = 1$.

基于第2节的分析,不难发现次用户数据包传输

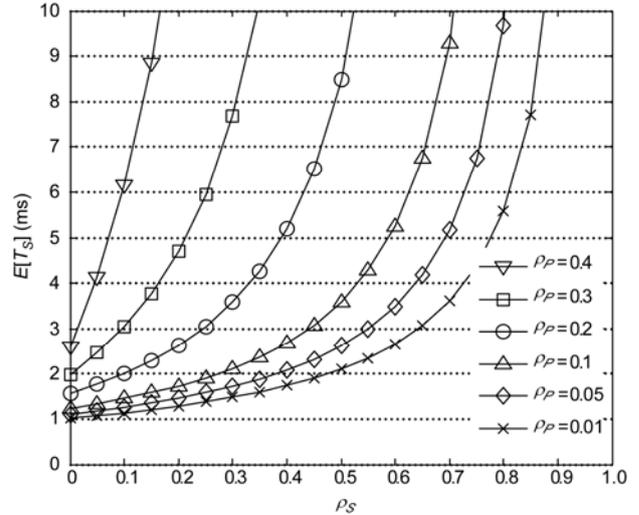


图4 不同次用户业务强度下的次用户系统时延变化趋势

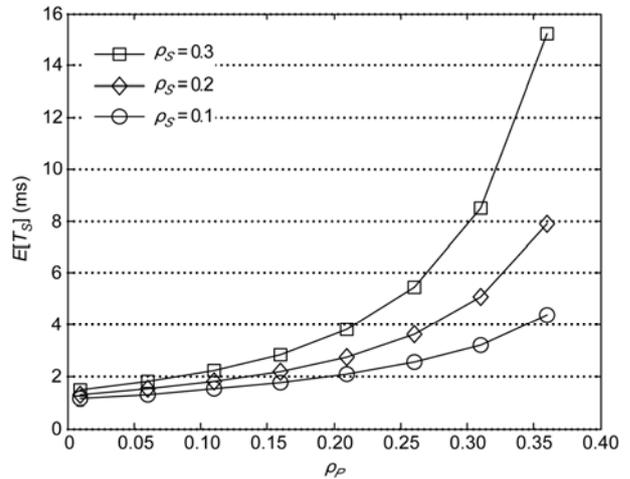


图5 不同主用户业务强度下的次用户系统时延变化趋势

的系统时延均值可以表示为

$$E[T_s] = \sum_{j=1}^M E[T_{sj}] \cdot s_j, \quad (18)$$

其中 $E[T_{sj}]$ 代表次用户数据包在授权信道 j 上传输的系统时延.从直观上讲,当主用户数据包到达速率参数 λ_{pi} 越低时,相应的次用户数据包系统时延越小,正如图4和5所示.但是如果所有的次用户数据包都选择在主用户数据包到达速率参数最低的授权信道上传输时,由于排队等待时延的增加,次用户数据包的系统时延也将会随着快速增加.从另一方面讲,如果其中一部分次用户数据包选择在其它的授权信道上传输,那么所有次用户数据包传输的系统时延均

值将会更低. 因此对于次用户共享多个授权信道而言, 在一个长期稳定的状态下, 一定存在最优的多信道接入策略使得整个次用户数据包传输的系统时延均值最小.

为了得到最优的多信道接入策略, 建立了如下一个非线性规划的最优问题:

$$\begin{aligned} \text{Min } S_{Op} = \arg \min_{s=\{s_j\}} & \left\{ E[T_S] = \sum_{j=1}^M E[T_{S_j}] \cdot s_j \right\} \\ \text{st. } & \sum_{j=1}^M s_j = 1, s_j \geq 0. \end{aligned} \quad (19)$$

其中下标 j 用来标识不同的授权信道, M 用来代表授权信道的总数.

上述优化问题, 可以通过经典的遗传算法得到全局最优解^[16], 也就是所需寻找的最优的多信道接入策略.

3.2 低复杂度接入策略

可以通过遗传算法找到全局的最优解, 但是由于其本身的计算复杂度, 这将带来过多的时间开销. 在实际中, 可以采用一些简单的低复杂度的接入策略, 例如反比例接入策略和等概率接入策略等. 这样只能获得一些次优的结果, 但是可以节约更多的时间开销.

这里, 定义反比例接入策略为与主用户数据包到达速率的倒数成比例接入到每个授权信道. 具体如下所示

$$s_j = \frac{1/\lambda_{pj}}{\sum_{j=1}^M 1/\lambda_{pj}}. \quad (20)$$

定义等概率接入策略为等概率的接入每个授权信道. 具体如下所示

$$s_j = \frac{1}{M}, \quad (21)$$

其中下标 j 用来指定不同的授权信道, M 用来代表授权信道的总数. 相应的数值结果验证与比较, 将在下一小节进行详细讨论.

3.3 数值结果

为了图示方便, 我们考虑次用户共享两个授权信道的情况. 当着两个授权信道上的主用户数据包到达速率相同和不同时, 图 6 和 7 分别表征了这两种情况下采取某多信道接入策略的系统时延均值. 同

时其也验证了最优接入策略 (s_1, s_2) 的存在性问题, 在该最优接入策略下次用户数据包传输的系统时延均值 $E[T_S]$ 达到最小值. 当考虑次用户共享多于两个授权信道的情况时, 也可以基于 3.1 节中的分析, 找到最优的多信道接入策略.

当考虑共享 3 个授权信道的情况时, 对应的主用户数据包到达速率参数集设置如表 1 所示. 不同接入策略下的次用户系统时延均值的比较如图 8 所示. 基于第 2 节对系统时延的分析, 发现随着主用户业务强度的增加次用户数据包传输的系统时延也将随着增加. 对于反比例接入而言, 其很好地反映了次用户系统时延与主用户业务强度变化之间的关系. 而对于等概率接入而言, 只有当各个授权信道上的主用户

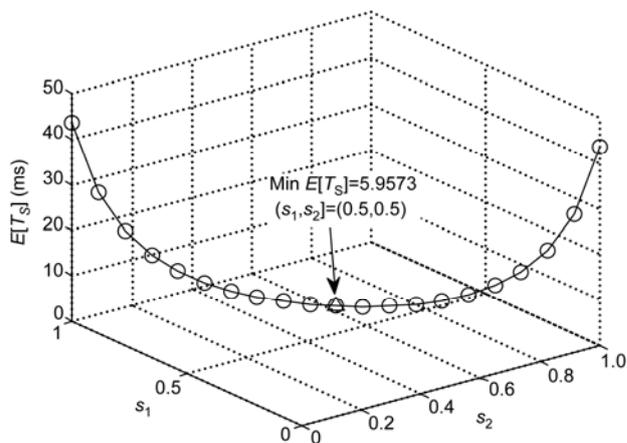


图 6 主用户数据包到达速率相同的条件下系统时延均值 $\lambda_{p1}=\lambda_{p2}=0.3$

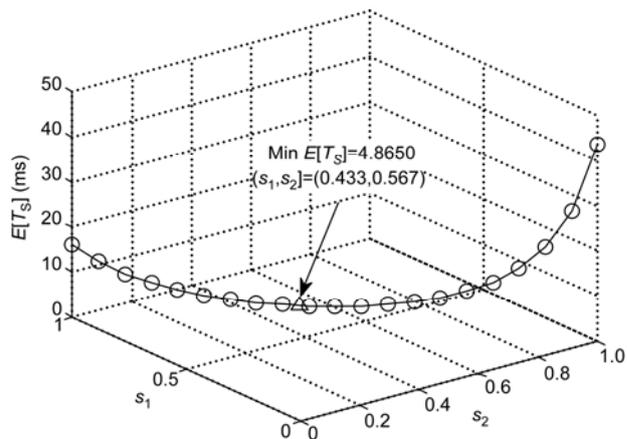


图 7 主用户数据包到达速率不同的条件下系统时延均值 $\lambda_{p1}=0.3, \lambda_{p2}=0.25$

表1 3个授权信道上的主用户数据包到达速率参数集

主用户业务 参数索引	$(\lambda_{P1}, \lambda_{P2}, \lambda_{P3})$	主用户业务 参数索引	$(\lambda_{P1}, \lambda_{P2}, \lambda_{P3})$
1	(0.3, 0.3, 0.3)	7	(0.3, 0.05, 0.05)
2	(0.3, 0.3, 0.25)	8	(0.25, 0.05, 0.05)
3	(0.3, 0.3, 0.15)	9	(0.2, 0.05, 0.05)
4	(0.3, 0.3, 0.05)	10	(0.15, 0.05, 0.05)
5	(0.3, 0.25, 0.05)	11	(0.1, 0.05, 0.05)
6	(0.3, 0.15, 0.05)	12	(0.05, 0.05, 0.05)

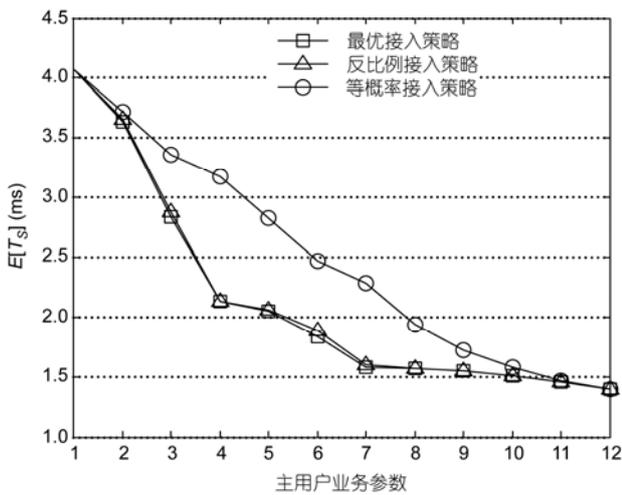


图8 不同接入策略下系统时延均值的比较

数据包到达速率相同时,其才能正确地反映出次用户系统时延与主用户业务强度变化之间的关系.正如图8所示的那样,在反比例接入策略下的次用户系统时延均值,近似的与通过遗传算法所得到的最优接入策略下的次用户系统时延均值相同.同时,当各授权信道上的主用户数据包到达速率相同时,上述3种接入策略下的次用户系统时延均值也相同.因此,考虑到遗传算法的收敛时间复杂度过高,在实际应用中我们也可以采用反比例接入策略来得到近似最优的值,从而节省更多的时间开销.

在各授权信道上主用户数据包到达速率相同的情况下,图6和8显示了当次用户等概率接入各个信道时,相应的系统时延均值取得最小值.在上述情况不变的条件下,根据第2节中对系统时延和次用户业

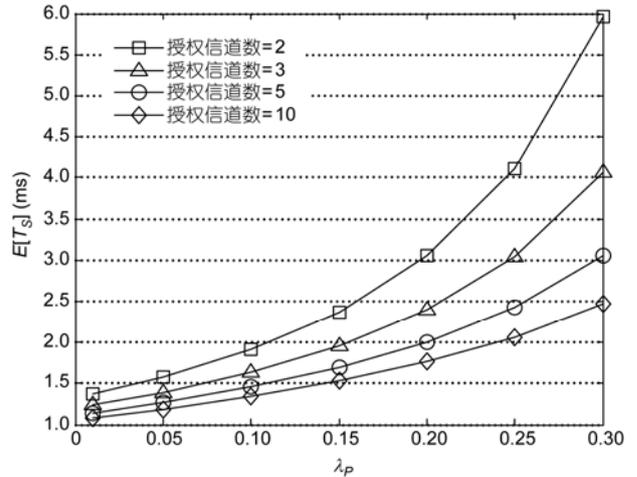


图9 不同授权信道数,相同主用户业务强度下的次用户最小系统时延均值

务强度交互关系的分析,更多的授权信道意味着更低的次用户数据包到达速率,与之相对应的系统时延也将会更小.如图9所示,当可共享的授权信道越多时,其可获得的最小系统时延的均值性能将会越好.而且当主用户数据包到达速率越高时,这种性能优势也会越明显.

4 总结

在认知无线网络机会式频谱接入模式下,对次用户业务传输时延性能进行了深入的分析,并讨论了在共享多个授权信道情况下的最优接入策略.同时提出了 M/G/1 虚拟优先级队列模型,基于该模型可以将主用户数据包和次用户数据包传输放在同一队列中加以讨论,并获得了有关次用户数据包传输的时延表达式.基于该系统时延性能的分析,进一步研究了共享多个授权信道情况下接入策略的性能.将其等效成为一个非线性规划问题,并依靠经典的遗传算法,找到了次用户系统时延的最小均值,并且获得的全局最优解就是与之相对应最优的多信道接入策略.数值结果验证了理论分析和接入策略设计的正确性.同时考虑到遗传算法的时间复杂度过高,为了降低相应的时间开销,在实际应用中也可以采用反比例接入策略得到其近似最优解.

参考文献

- 1 Hossain E, Niyato D, Han Z. *Dynamic Spectrum Access and Management in Cognitive Radio Networks*. London: Cambridge University Press, 2009
- 2 Akyildiz I F, Lee W Y, Vuran M C, et al. Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey. *Comput Netw*, 2006, 50: 2127–2159
- 3 Zhao Q, Sadler B M. A survey of dynamic spectrum access. *IEEE Signal Proc Mag*, 2007, 24: 79–89
- 4 Zhao Q, Tong L, Swami A, et al. Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: A POMDP frame-work. *IEEE J Sel Area Comm*, 2007, 25: 589–600
- 5 Geirhofer S, Tong L, Sadler B M. Cognitive medium access: Con-straining interference based on experimental models. *IEEE J Sel Area Comm*, 2008, 26: 95–105
- 6 Geirhofer S, Tong L, Sadler B M. Dynamic spectrum access in the time domain: Modeling and exploiting whitespace. *IEEE Commun Mag*, 2007, 45: 66–72
- 7 Li X, Zhao Q C, Guan X H, et al. Optimal cognitive access of Markovian channels under tight collision constraints. *IEEE J Sel Area Comm*, 2011, 29: 746–756
- 8 Li H S, Han Z. Queuing analysis of dynamic spectrum access subject to interruptions from primary users. In: Hayar A, Larsson E G, eds. *Proceedings of the Fifth International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*. Piscataway: IEEE Computer Society, 2010. 1–5
- 9 Borgonovo F, Cesana M, Fratta L. Throughput and delay bounds for cognitive transmissions. *Adv Ad Hoc Netw*, 2008, 265: 179–190
- 10 Shiang H P, Scharr M. Queuing-based dynamic channel selection for heterogeneous multimedia applications over cognitive radio networks. *IEEE Trans Multimedia*, 2008, 10: 896–909
- 11 Wang S S, Zhang J S, Tong L. Delay analysis for cognitive radio networks with random access: A fluid queue view. In: Mandyam G, Westphal G, eds. *Proceedings IEEE INFOCOM*. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers Incorporated, 2010. 1–9
- 12 Graver D P. A waiting line with interrupted services, including priori-ties. *J R Statist Soc*, 1962, 24: 73-90
- 13 Hock N C, Hee S B. *Queueing Modeling Fundamentals with Applications in Communication Networks*. Chichester: John Wiley and Sons Limited, 2008
- 14 Kleinrock L. *Queueing Systems-Volume 1: Theory*. Chichester: John Wiley and Sons Limited, 1976
- 15 Kleinrock L. *Queueing Systems-Volume 2: Computer Applications*. Chichester: John Wiley and Sons Limited, 1976
- 16 Goldberg D E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Chichester: John Wiley and Sons Limited, 1989
- 17 Ross S M. *Stochastic Processes*. Chichester: John Wiley and Sons Limited, 1995