

认知无线网络频谱分配策略的社会最优问题研究^①金顺福^{②*} 肖玉鹏^{*} 赵媛^{*}

(* 燕山大学信息科学与工程学院 秦皇岛 066004)

(** 河北省计算机虚拟技术与系统集成重点实验室 秦皇岛 066004)

摘 要 结合离散时间排队理论和博弈论,进行了认知无线网络中频谱分配策略的社会最优问题的研究。考虑到主用户(PUs)对次级用户(SUs)数据包的传输中断,建立了一个带有传输中断及中断重传的排队模型,并使用矩阵几何解的方法进行排队模型的稳态分析,给出了次级用户数据包的平均延迟。从不可观察的排队规则出发,令次级用户数据包根据传输所获得的回报及逗留在系统中所花费的代价决定是否加入缓存,揭示次级用户数据包在个人最优策略下的加入率大于社会最优策略下的加入率。针对不同的数据包到达率及服务率,通过数值实验,给出了次级用户接入频谱的合理费用,实现频谱分配的社会最优。

关键词 认知无线网络,频谱分配策略,不可观察排队规则,社会最优,博弈论

0 引言

频谱在无线网络中是稀缺资源。在传统的静态频谱分配方式下,系统的利用率低下,而认知无线电频谱共享技术可以有效地解决频谱资源紧张的问题^[1]。在认知网络中,授权用户(以下称主用户(primary users, PUs))拥有频谱授权,具有频谱认知能力的未授权用户(以下称次级用户(secondary users, SUs))可以使用主用户暂未使用的频谱。主用户在将暂时不使用的频谱资源出让给次级用户时,可以获得额外的收益^[2]。

研究人员从理论和实践的角度研究了认知无线网络的频谱使用问题。文献[3]将排队系统服务中断类型分为破坏性(中断结束后重新开始服务)和非破坏性(中断结束后继续先前的服务)两种,分别给出了两种中断情况下用户的平均延迟。文献[4]基于一个简单的排队中断模型,分别对双服务台单队列和单服务台双队列模型进行了稳态分析,给出了在不同服务率及中断参数情况下次级用户的最大数据包到达率。文献[5]利用带有服务中断的排队

模型分析了受到周期性中断的认知网络的性能表现,给出了不同中断恢复方案、不同信道带宽和不同服务率下的流量监测指标。以上的研究单从排队理论的角度分析了次级用户对频谱的使用情况。Li 将 Naor 可观察排队模型应用到认知网络中,考虑主用户对次级用户数据传输的中断,分别给出个人最优均衡策略和社会最优策略下的次级用户的最大队长,并在此基础上提出了一种计价和自学习的方法,使两种策略下的最大队长一致^[6,7]。Do 将 Naor 模型的研究成果应用到混合填充式/共享式认知网络系统中,并分析了最优排队控制以及计价控制策略^[8,9]。以上的文献基于可观察排队规则进行了频谱分配策略优化问题的研究。本文从不可观察排队规则出发,结合离散时间排队理论和博弈论,进行了认知网络频谱分配策略的社会最优化问题研究,给出了次级用户接入频谱的合理费用。

1 系统模型

1.1 带有传输中断和中断重传的排队模型

在集中式频谱分配策略下,如果有主用户

① 国家自然科学基金(11201408)和河北省自然科学基金(2012203093)资助项目。

② 女,1966年生,博士,教授;研究方向:无线网络资源管理,计算机通信网络的系统建模与性能分析,排队论应用等;联系人,E-mail:jsf@ysu.edu.cn

(收稿日期:2013-05-29)

(PUs)数据包到达,则正在传输的次级用户(SUs)数据包必须立即停止传输,并且返回缓存中。当主用户数据包传输完成并离开授权频谱后,次级用户返回频谱,并重新传输数据。根据次级用户的频谱分配策略,建立一个带有传输中断及中断重传的排队模型。

将时间轴分为长度间隔相等的,称为时隙的时间序列。主用户和次级用户的数据包均以时隙为单位进行数据传输,令数据包的到达发生在时隙 n 的首端 (n, n^+) , 传输结束离开授权频谱发生在时隙 n 的末端 (n^-, n) 。

假设次级用户数据包和主用户数据包分别以参数为 λ_{SU} 、 λ_{PU} 的 Bernoulli 过程到达。次级用户数据包的到达与主用户数据包的到达相互独立。

频谱对次级用户数据包的服务率为 μ_{SU} , 即在一个时隙内以概率 μ_{SU} 完成一个次级用户数据包的传输,以概率 $\bar{\mu}_{\text{SU}} = 1 - \mu_{\text{SU}}$ 继续传输次级用户数据包。此外,次级用户数据包的传输还可能由于主用户的到达而提前终止。频谱对主用户数据包的服务率为 μ_{PU} , 即在一个时隙内以概率 μ_{PU} 完成一个主用户数据包的传输,以概率 $\bar{\mu}_{\text{PU}} = 1 - \mu_{\text{PU}}$ 继续传输主用户数据包。

将系统中次级用户数据包的数量定义为水平,授权频谱的状态定义为阶段(0 表示频谱未被主用户占用;1 表示频谱被主用户占用)。令 $X(n)$ 、 $Y(n)$ 分别表示时隙 n 系统所处的水平与阶段,则 $\{X(n), Y(n)\}$ 构成离散时间二维马尔科夫过程,其状态空间 Ω 表示为 $\Omega = \{(x, y) : x \geq 0, y = 0, 1\}$ 。

1.2 转移概率矩阵

设二维马尔科夫过程 $\{X(n), Y(n), n \geq 0\}$ 的一步转移概率矩阵为 Q 。令 $Q(i, k)$ 表示系统由水平 i 至水平 k 的一步转移概率子阵,其分析过程如下:

(1) 当 $i = 0, k = 0$ 时, $Q(0, 0)$ 表示经过一步转移系统水平始终为 0 的转移概率子阵。令 $B = Q(0, 0)$, 则有

$$B = \begin{pmatrix} \bar{\lambda}_{\text{SU}}\bar{\lambda}_{\text{PU}} & \bar{\lambda}_{\text{SU}}\lambda_{\text{PU}} \\ \bar{\lambda}_{\text{SU}}\bar{\lambda}_{\text{PU}}\mu_{\text{PU}} & \bar{\lambda}_{\text{SU}}(\lambda_{\text{PU}}\mu_{\text{PU}} + \bar{\mu}_{\text{PU}}) \end{pmatrix} \quad (1)$$

(2) 当 $i = 0, k = 1$ 时, $Q(0, 1)$ 表示系统由水平 0 经过一步转移至水平 1 的转移概率子阵。令 $C = Q(0, 1)$, 则有

$$C = \begin{pmatrix} \lambda_{\text{SU}}\bar{\lambda}_{\text{PU}} & \lambda_{\text{SU}}\lambda_{\text{PU}} \\ \lambda_{\text{SU}}\bar{\lambda}_{\text{PU}}\mu_{\text{PU}} & \lambda_{\text{SU}}(\lambda_{\text{PU}}\mu_{\text{PU}} + \bar{\mu}_{\text{PU}}) \end{pmatrix} \quad (2)$$

(3) 当 $i = 1, k = 0$ 时, $Q(1, 0)$ 表示系统由水平 1 经过一步转移至水平 0 的转移概率子阵。令 $E = Q(1, 0)$, 则有

$$E = \begin{pmatrix} \bar{\lambda}_{\text{SU}}\mu_{\text{SU}}\bar{\lambda}_{\text{PU}} & \bar{\lambda}_{\text{SU}}\mu_{\text{SU}}\lambda_{\text{PU}} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

(4) 当 $k = i(i \geq 1)$ 时, $Q(i, i)$ 表示系统经过一步转移水平始终为 $i(i \geq 1)$ 的转移概率子阵。令 $A_1 = Q(i, i)$, 则有

$$A_1 = \begin{pmatrix} (\bar{\lambda}_{\text{SU}}\bar{\mu}_{\text{SU}} + \lambda_{\text{SU}}\mu_{\text{SU}})\bar{\lambda}_{\text{PU}} & (\bar{\lambda}_{\text{SU}}\bar{\mu}_{\text{SU}} + \lambda_{\text{SU}}\mu_{\text{SU}})\lambda_{\text{PU}} \\ \bar{\lambda}_{\text{SU}}\bar{\lambda}_{\text{PU}}\mu_{\text{PU}} & \bar{\lambda}_{\text{SU}}(\lambda_{\text{PU}}\mu_{\text{PU}} + \bar{\mu}_{\text{PU}}) \end{pmatrix} \quad (4)$$

(5) 当 $k = i + 1(i \geq 1)$ 时, $Q(i, i + 1)$ 表示系统由水平 $i(i \geq 1)$ 经过一步转移至水平 $(i + 1)$ 的转移概率子阵。令 $A_0 = Q(i, i + 1)$, 则有

$$A_0 = \begin{pmatrix} \lambda_{\text{SU}}\bar{\mu}_{\text{SU}}\bar{\lambda}_{\text{PU}} & \lambda_{\text{SU}}\bar{\mu}_{\text{SU}}\lambda_{\text{PU}} \\ \lambda_{\text{SU}}\bar{\lambda}_{\text{PU}}\mu_{\text{PU}} & \lambda_{\text{SU}}(\lambda_{\text{PU}}\mu_{\text{PU}} + \bar{\mu}_{\text{PU}}) \end{pmatrix} \quad (5)$$

(6) 当 $k = i - 1(i \geq 2)$ 时, $Q(i, i - 1)$ 表示系统由水平 $i(i \geq 2)$ 经过一步转移至水平 $(i - 1)$ 的转移概率子阵。令 $A_2 = Q(i, i - 1)$, 则有

$$A_2 = \begin{pmatrix} \bar{\lambda}_{\text{SU}}\mu_{\text{SU}}\bar{\lambda}_{\text{PU}} & \bar{\lambda}_{\text{SU}}\mu_{\text{SU}}\lambda_{\text{PU}} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

由于系统的状态转移只能在相邻水平处发生,系统的一步转移概率矩阵 Q 可表示为分块三对角矩阵,如下式所示

$$Q = \begin{pmatrix} B & C & & & \\ E & A_1 & A_0 & & \\ & A_2 & A_1 & A_0 & \\ & & A_2 & A_1 & A_0 \\ & & & \ddots & \ddots & \ddots \end{pmatrix} \quad (7)$$

1.3 次级用户数据包的平均延迟

定义 $\pi_{i,j}$ 为稳态下系统处在 i 水平 j 阶段的概率,则有 $\pi_{i,j} = \lim_{n \rightarrow \infty} P\{X(n) = i, Y(n) = j\}$ 。

考虑到转移概率矩阵 Q 的分块结构特点,可将稳态分布向量写成分段形式,记为

$$\pi_i = (\pi_{i,0}, \pi_{i,1}), i \geq 0, \Pi = (\pi_0, \pi_1, \pi_2, \dots)$$

结合平衡方程及正规化条件,则有

$$\begin{cases} \Pi = \Pi Q \\ \Pi e = 1 \end{cases}$$

其中, e 为适当维数的单位列向量。

由于 $\{X(n), Y(n), n \geq 0\}$ 是一种拟生灭过程,可利用矩阵几何解方法求出系统的稳态概率分布。

次级用户数据包的平均延迟定义为从一个次级用户数据包进入系统开始,到传输完成离开系统为止所经历的平均时长。该指标与次级用户数据包的到达率 λ_{SU} 有关,记为 $W(\lambda_{\text{SU}})$ 。由 Little 定律可得

$$W(\lambda_{\text{SU}}) = \frac{1}{\lambda_{\text{SU}}} \sum_{i=1}^{\infty} (i\pi_{i,0} + i\pi_{i,1}) \quad (8)$$

2 基于不可观察排队的频谱接入费用

在实际应用中,次级用户在未加入缓存之前可能并不知道缓存的内部信息,如缓存中次级用户个数等^[10]。不同的次级用户数据包,无论是来自同一个次级用户还是不同的次级用户,均具有各自的利益,并进行独立的频谱接入决策。每个数据包都可以看成是以最大化各自净收益为目标的个体。

2.1 频谱接入的个人最优策略

次级用户数据包加入缓存后,直到它被传输完成,都不能离开缓存。对不可观察排队规则做如下假设:

(1) 一个次级用户数据包传输完成后对应的回报为 R 。一个次级用户数据包在系统中每逗留一个时隙所引起的成本为 f_w , 逗留时间既包括在缓存中的排队等待时间,也包括传输时间。

(2) 次级用户数据包在决定是否加入缓存之前观察不到缓存中的数据包个数。

定义一个完成传输的次级用户数据包的净收益为

$$U = R - f_w W(\lambda_{\text{SU}}) \quad (9)$$

假设次级用户数据包的潜在到达率为 Λ ($\Lambda < \mu_{\text{SU}}$)。每个潜在的次级用户数据包有两个可选策略:加入缓存或者离开缓存。令 q 表示潜在次级用户数据包加入缓存的概率,即加入率,则有 $\lambda_{\text{SU}} = q\Lambda$ 。假设个人最优策略下潜在次级用户数据包的加入率为 q_e , 有效到达率为 λ_e , 则有 $\lambda_e = q_e \Lambda$ 。

对加入率 q_e 分以下三种情况讨论:

(1) $W(0) \geq R/f_w$ 。在这种情况下,即使没有新的次级用户数据包加入缓存,缓存中已有的次级用户数据包的净收益也都小于零。此时, $q_e = 0$ 。

(2) $W(\Lambda) \leq R/f_w$ 。在这种情况下,即使所有潜在的次级用户数据包都加入缓存,它们的净收益也都大于零。此时, $q_e = 1$ 。

(3) $W(0) < R/f_w < W(\Lambda)$ 。在这种情况下,如果所有潜在的次级用户数据包都加入缓存,它们的

净收益将为负值,所以, $q_e = 1$ 不是此时的个人最优策略。只有部分次级用户数据包加入缓存时,才能保证它们的净收益为正值。当净收益为 0 时,系统达到均衡状态,即 $W(\lambda_e) = R/f_w$, 此时, $q_e = \lambda_e/\Lambda$ 。

稳态下,次级用户数据包的平均延迟 $W(\lambda_{\text{SU}})$ 是收敛的,函数 $W(\lambda_{\text{SU}})$ 是连续的。在其他参数不变的情况下,次级用户数据包的到达率 λ_{SU} 越高,需要传输的次级用户数据包就越多,数据包的平均延迟也就越大。因此,函数 $W(\lambda_{\text{SU}})$ 是单调递增且连续的。存在到达率 λ_0 满足条件:

$$W(\lambda_0) = R/f_w \quad (10)$$

针对不同的到达率 λ_0 , 个人最优策略下的有效到达率 λ_e 和加入率 q_e 如表 1 所示。

表 1 个人最优策略

条件	个人最优有效到达率 λ_e	个人最优加入率 q_e
$\lambda_0 \leq 0$	0	0
$\lambda_0 \geq \Lambda$	Λ	1
$0 < \lambda_0 < \Lambda$	λ_0	λ_0/Λ

2.2 频谱接入的社会最优策略

每个时隙内的社会平均净收益 U_{so} 表示为:

$$U_{\text{so}} = \lambda_{\text{SU}} (R - f_w W(\lambda_{\text{SU}})) \quad (11)$$

令 λ^* 和 q^* 分别表示社会最优策略下次级用户数据包的有效到达率及加入率,则有 $\lambda^* = q^* \Lambda$ 。社会最优策略下次级用户数据包的加入率 q^* 表示为

$$q^* = \frac{\arg \max_{0 \leq \lambda_{\text{SU}} \leq \Lambda} (\lambda_{\text{SU}} (R - f_w W(\lambda_{\text{SU}})))}{\Lambda} \quad (12)$$

有效到达率 λ^* 表示为

$$\lambda^* = \arg \max_{0 \leq \lambda_{\text{SU}} \leq \Lambda} (\lambda_{\text{SU}} (R - f_w W(\lambda_{\text{SU}}))) \quad (13)$$

存在到达率 λ_1 满足如下条件:

$$\lambda_1 = \arg \max (\lambda_{\text{SU}} (R - f_w W(\lambda_{\text{SU}}))) \quad (14)$$

针对不同的到达率 λ_1 , 社会最优策略下的有效到达率 λ^* 和加入率 q^* 如表 2 所示。

表 2 社会最优策略

条件	社会最优有效到达率 λ^*	社会最优加入率 q^*
$\lambda_1 \leq 0$	0	0
$\lambda_1 \geq \Lambda$	Λ	1
$0 < \lambda_1 < \Lambda$	λ_1	λ_1/Λ

2.3 频谱接入费用

因为 $W(\lambda_{\text{SU}})$ 为单调增函数, 所以 $W'(\lambda_{\text{SU}}) > 0$ 。由公式(14)可得

$$W(\lambda_1) + \lambda_1 W'(\lambda_1) = \frac{R}{f_w} \quad (15)$$

比较式(10)与式(15)可知, $\lambda_0 > \lambda_1$, 所以 $\lambda_e \geq \lambda^*$ 。也就是说个人最优并不能导致社会最优, 个人最优策略下将有更多的次级用户数据包加入缓存。为了迫使每个次级用户数据包采取社会最优策略, 可以从回报 R 中扣除一部分费用 p 作为频谱对次级用户数据包征收的频谱接入费用。此时, 单位时隙内社会平均净收益 U_{so} 表示为

$$\begin{aligned} U_{\text{so}} &= \lambda_{\text{SU}} p + \lambda_{\text{SU}} (R - p - f_w W(\lambda_{\text{SU}})) \\ &= \lambda_{\text{SU}} (R - f_w W(\lambda_{\text{SU}})) \end{aligned} \quad (16)$$

比较式(11)与式(16)可知, 频谱对次级用户数据包征收接入费用并不影响社会净收益。事实上, 从社会角度来看, 征收的接入费用只是转移了一部分收益, 并不影响总收益。显然, 当 $p = R - f_w W(\lambda^*)$ 时, 个人最优策略下次级用户数据包的到达率与社会最优策略下次级用户数据包的到达率一致。

3 数值实验

针对不同的主用户数据包到达率、服务率, 次级用户数据包服务率, 以及不同的次级用户数据包传输回报、逗留成本, 进行系统的数值实验。实验中设定次级用户数据包的潜在到达率为 $\Lambda = 0.40$ 。

3.1 个人最优策略的数值实验

以 $\lambda_{\text{PU}} = 0.10$, $\mu_{\text{PU}} = 0.65$ 为例, 图1刻画了不同次级用户数据包服务率下, 次级用户数据包的平均延迟随次级用户数据包到达率的变化趋势。

由图1可以看出, 在次级用户数据包的服务率 μ_{SU} 不变的情况下, 次级用户数据包的平均延迟 $W(\lambda_{\text{SU}})$ 随着次级用户数据包到达率 λ_{SU} 的增大而增大。而在次级用户数据包到达率 λ_{SU} 不变的情况下, 次级用户数据包的平均延迟 $W(\lambda_{\text{SU}})$ 随着次级用户数据包服务率 μ_{SU} 的增大而减小。

以 $\mu_{\text{SU}} = 0.65$ 为例, 图2刻画了不同主用户数据包到达率和服务率下, 次级用户数据包的平均延迟随次级用户数据包到达率的变化趋势。

由图2可以看出, 在次级用户数据包的到达率

λ_{SU} 和主用户数据包的服务率 μ_{PU} 不变的情况下, 次级用户数据包的平均延迟 $W(\lambda_{\text{SU}})$ 随着主用户数据包到达率 λ_{PU} 的增大而增大。而在次级用户数据包的到达率 λ_{SU} 和主用户数据包的到达率 λ_{PU} 不变的情况下, 次级用户数据包的平均延迟 $W(\lambda_{\text{SU}})$ 随着主用户数据包服务率 μ_{PU} 的增大而减小。

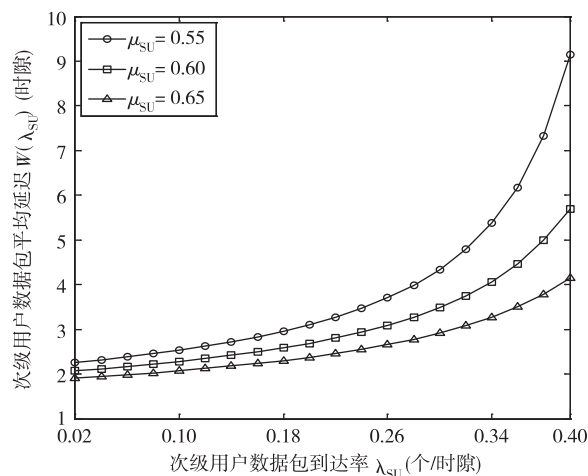


图1 不同 μ_{SU} 下次级用户数据包的平均延迟

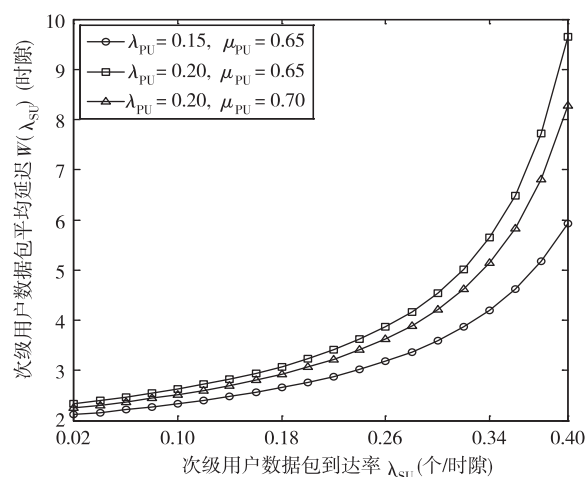


图2 不同 λ_{SU} 和 μ_{PU} 下次级用户数据包的平均延迟

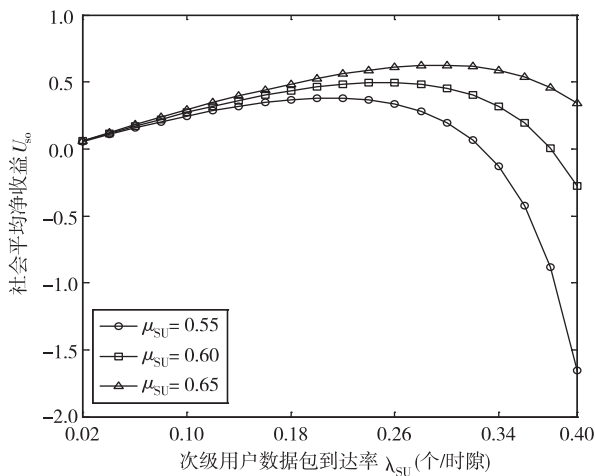
由表1可知, 当图1和图2中次级用户数据包的平均延迟 $W(\lambda_{\text{SU}}) = R/f_w$ 时, 所对应的横坐标值即为个人最优策略下的有效到达率 λ_e , 且 $0 \leq \lambda_e \leq \Lambda$ 。表3分别针对不同系统参数, 给出了最接近 R/f_w 的平均延迟取值范围, 并依此得到相应的有效到达率 λ_e 及加入率 q_e 的取值范围。

表3 个人最优策略下的数值结果

系统参数	个人最优平均延迟 $W(\lambda_e)$		个人最优有效到达率 λ_e		个人最优加入率 q_e	
	下限值	上限值	下限值	上限值	下限值	上限值
$R = 5, f_w = 2, \lambda_{PU} = 0.10, \mu_{PU} = 0.65, \mu_{SU} = 0.55$	2.4938	2.5342	0.09	0.10	0.225	0.250
$R = 8, f_w = 1, \lambda_{PU} = 0.10, \mu_{PU} = 0.65, \mu_{SU} = 0.55$	7.3229	8.1162	0.38	0.39	0.950	0.975
$R = 5, f_w = 1, \lambda_{PU} = 0.10, \mu_{PU} = 0.65, \mu_{SU} = 0.55$	4.7888	5.0600	0.32	0.33	0.800	0.825
$R = 5, f_w = 1, \lambda_{PU} = 0.10, \mu_{PU} = 0.65, \mu_{SU} = 0.60$	4.9867	5.3124	0.38	0.39	0.950	0.975
$R = 5, f_w = 1, \lambda_{PU} = 0.10, \mu_{PU} = 0.65, \mu_{SU} = 0.65$	4.1496	/	0.40	/	1.000	/
$R = 5, f_w = 1, \lambda_{PU} = 0.15, \mu_{PU} = 0.65, \mu_{SU} = 0.65$	4.8777	5.1732	0.37	0.38	0.925	0.950
$R = 5, f_w = 1, \lambda_{PU} = 0.20, \mu_{PU} = 0.65, \mu_{SU} = 0.65$	4.7679	5.0200	0.31	0.32	0.775	0.800
$R = 5, f_w = 1, \lambda_{PU} = 0.20, \mu_{PU} = 0.70, \mu_{SU} = 0.65$	4.8609	5.1388	0.33	0.34	0.825	0.850

3.2 社会最优策略的数值实验

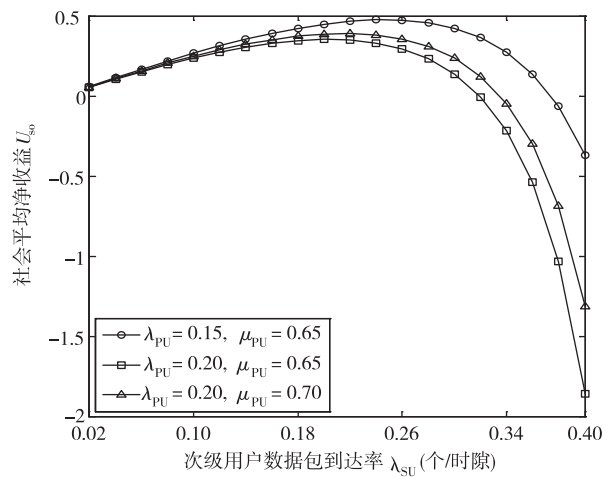
以 $R = 5, f_w = 1, \lambda_{PU} = 0.10, \mu_{PU} = 0.65$ 为例,图3揭示了不同次级用户数据包服务率的情况下,社会平均净收益 U_{so} 随次级用户数据包到达率的变化趋势。

图3 不同 μ_{SU} 下的社会平均净收益

由图3可以看出,在次级用户数据包的到达率 λ_{SU} 不变的情况下,社会平均净收益 U_{so} 随着次级用户数据包服务率 μ_{SU} 的增大而增大。而在次级用户数据包的服务率 μ_{SU} 不变的情况下,社会平均净收益 U_{so} 随着次级用户数据包到达率 λ_{SU} 的增大呈现先上升后下降的趋势。

以 $R = 5, f_w = 1, \mu_{SU} = 0.65$ 为例,图4揭示了不同主用户数据包到达率和服务率下,社会平均净收益 U_{so} 随次级用户数据包到达率的变化趋势。

由图4可以看出,在次级用户数据包的到达率 λ_{SU} 以及主用户数据包的服务率 μ_{PU} 都不变的情况

图4 不同 λ_{PU} 和 μ_{PU} 下的社会平均净收益

下,社会平均净收益 U_{so} 随着主用户数据包到达率 λ_{PU} 的增大而减小。而在次级用户数据包的到达率 λ_{SU} 以及主用户数据包的到达率 λ_{PU} 不变的情况下,社会平均净收益 U_{so} 随着主用户数据包服务率 μ_{PU} 的增大而增大。

根据表2可知,图3和图4中社会平均净收益最大值所对应的横坐标值即为社会最优策略下的有效到达率 λ^* , 且 $0 \leq \lambda^* \leq \Lambda$ 。针对不同系统参数,表4给出了社会最优策略下的有效到达率 λ^* 及加入率 q^* 的数值结果。

3.3 频谱接入费用

综合表3和表4,可知 $\lambda_e > \lambda^*, q_e > q^*$ 。为此,对系统中次级用户数据包征收费用 p 。当 $p = R - f_w W(\lambda^*)$ 时,个人最优策略下次级用户数据包的到达率与社会最优策略下次级用户数据包的到达率一致。表5给出了不同系统参数下,频谱应对次级用户数据包征收的频谱接入费用 p 的数值结果。

表 4 社会最优策略下的数值结果

系统参数	社会平均净收益 U_{so} 最大值	社会最优有效到达率 λ^*	社会最优加入率 q^*
$R = 5, f_w = 2, \lambda_{PU} = 0.10, \mu_{PU} = 0.65, \mu_{SU} = 0.55$	0.0149	0.05	0.125
$R = 8, f_w = 1, \lambda_{PU} = 0.10, \mu_{PU} = 0.65, \mu_{SU} = 0.55$	1.1231	0.27	0.675
$R = 5, f_w = 1, \lambda_{PU} = 0.10, \mu_{PU} = 0.65, \mu_{SU} = 0.55$	0.3814	0.21	0.525
$R = 5, f_w = 1, \lambda_{PU} = 0.10, \mu_{PU} = 0.65, \mu_{SU} = 0.60$	0.4971	0.25	0.625
$R = 5, f_w = 1, \lambda_{PU} = 0.10, \mu_{PU} = 0.65, \mu_{SU} = 0.65$	0.6256	0.29	0.725
$R = 5, f_w = 1, \lambda_{PU} = 0.15, \mu_{PU} = 0.65, \mu_{SU} = 0.65$	0.4759	0.25	0.625
$R = 5, f_w = 1, \lambda_{PU} = 0.20, \mu_{PU} = 0.65, \mu_{SU} = 0.65$	0.3541	0.20	0.500
$R = 5, f_w = 1, \lambda_{PU} = 0.20, \mu_{PU} = 0.70, \mu_{SU} = 0.65$	0.3914	0.22	0.550

表 5 频谱接入费用的数值结果

系统参数	社会最优有效到达率 λ^*	社会最优平均延迟 $W(\lambda^*)$	接入费用 p
$R = 5, f_w = 2, \lambda_{PU} = 0.10, \mu_{PU} = 0.65, \mu_{SU} = 0.55$	0.05	2.3515	0.2970
$R = 8, f_w = 1, \lambda_{PU} = 0.10, \mu_{PU} = 0.65, \mu_{SU} = 0.55$	0.27	3.8402	4.1598
$R = 5, f_w = 1, \lambda_{PU} = 0.10, \mu_{PU} = 0.65, \mu_{SU} = 0.55$	0.21	3.1840	1.8160
$R = 5, f_w = 1, \lambda_{PU} = 0.10, \mu_{PU} = 0.65, \mu_{SU} = 0.60$	0.25	3.0116	1.9884
$R = 5, f_w = 1, \lambda_{PU} = 0.10, \mu_{PU} = 0.65, \mu_{SU} = 0.65$	0.29	2.8427	2.1573
$R = 5, f_w = 1, \lambda_{PU} = 0.15, \mu_{PU} = 0.65, \mu_{SU} = 0.65$	0.25	3.0963	1.9037
$R = 5, f_w = 1, \lambda_{PU} = 0.20, \mu_{PU} = 0.65, \mu_{SU} = 0.65$	0.20	3.2297	1.7703
$R = 5, f_w = 1, \lambda_{PU} = 0.20, \mu_{PU} = 0.70, \mu_{SU} = 0.65$	0.22	3.2208	1.7792

4 结 论

本文为实现认知无线网络的频谱分配策略的社会最优,提出了对次级用户数据包征收一定的频谱接入费用的策略。通过建立一个带有传输中断及中断重传的离散时间排队模型,导出了认知无线网络中次级用户数据包平均延迟的表达式。基于不可观察的排队规则,令次级用户数据包根据传输回报及逗留成本来决定是否加入缓存,分别针对个人最优策略和社会最优策略给出了次级用户数据包的有效到达率及加入率,并揭示了个人最优并不能满足社会最优。数值实验结果表明,基于不同的系统参数,个人最优策略下有更多的次级用户数据包加入缓存,这与理论揭示的结果一致。在此基础上,给出了次级用户数据包频谱接入费用的合理方案,实现了认知无线网络中频谱分配策略的社会最优。

本文提出的认知无线网络频谱分配策略中社会最优问题的研究,从另外一个角度探索了如何最大限度地提高认知无线网络中频谱的利用率。在下一

步的工作中,将考虑有限缓存进行认知无线网络频谱分配策略及系统优化的研究。

参考文献

[1] Zhao Q, Sadler B M. A survey of dynamic spectrum access. *Signal Processing Magazine*, 2007, 24(3) : 79-89

[2] Fette B A. *Cognitive Radio Technology*. Burlington: Academic Press, 2009. 33-42

[3] Fiems D, Maertens T, Bruneel H. Queueing systems with different types of server interruptions. *European Journal of Operational Research*, 2008, 188(3) : 838-845

[4] Li H, Han Z. Queueing analysis of dynamic spectrum access subject to interruptions from primary users. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks & Communications*, Cannes, France, 2010. 1-5

[5] Azarfar A, Frigon J F, Sansò B. Analysis of cognitive radio networks based on a queueing model with server interruptions. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*, Ottawa, Canada, 2012. 1703-1708

[6] Li H. Socially optimal queueing control in cognitive radio systems: pricing and learning. In: *Proceedings of IEEE*

- Wireless Communications and Networking Conference, Sydney, Australia, 2010. 1-6
- [7] Li H, Han Z. Socially optimal queueing control in cognitive radio networks subject to service interruptions; to queue or not to queue? *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(5): 1656-1666
- [8] Do C T, Tran N H, Hong C S. Optimal queueing control in hybrid overlay/underlay spectrum access in cognitive radio networks. In: *Proceedings of IEEE 75th Vehicular Technology Conference*, Yokohama, Japan, 2012. 1-5
- [9] Do C T, Hong C S, Hong J. Pricing control for hybrid overlay/underlay spectrum access in cognitive radio networks. In: *Proceedings of 14th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium*, Seoul, South Korea, 2012. 1-6
- [10] Hassin R, Haviv M. To Queue or Not to Queue: Equilibrium Behavior in Queueing Systems. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003. 45-51

Research on the social optimization of spectrum allocation strategies for cognitive radio networks

Jin Shunfu^{* **}, Xiao Yupeng^{* **}, Zhao Yuan^{* **}

(^{*} College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

(^{**} Key Laboratory for Computer Virtual Technology and System Integration of Hebei Province, Qinhuangdao 066004)

Abstract

The research was performed by combining the discrete time queue theory and the game theory to socially optimize the spectrum allocation strategies for cognitive radio networks. Considering primary users (PUs) may interrupt the transmission of secondary users (SUs)' packets, a queueing model with a possible interrupted transmission and a retransmission policy was established. By using the method of a matrix geometry solution, the queueing model was analyzed in the steady state, and then the average delay of SUs packets was given accordingly. Based on an unobservable scenario, SUs were supposed to decide whether to join the cache according to the reward from transmission completion and the cost due to staying in the system. Moreover, it was investigated that the join probability of an SUs packet with an individually optimal strategy was greater than that with a socially optimal strategy. For different arrival rates and service rates of packets, a reasonable spectrum admission fee of SUs packets was proposed with numerical experiments, and then the spectrum allocation strategy was optimized socially.

Key words: cognitive radio networks, spectrum allocation strategy, unobservable queueing discipline, social optimization, game theory