

基于跳频的认知无线网络中的时隙优化策略

吉 毅^{1,2} 贾俊铖^{1,2,3} 盛 凯⁴

(苏州大学计算机科学与技术学院 江苏 苏州 215006)¹

(苏州大学计算机信息处理技术省级重点实验室 江苏 苏州 215006)²

(新型软件技术与产业化协同创新中心 南京 210000)³ (苏州大学能源研究实验室 江苏 苏州 215006)⁴

摘 要 随着近几年无线通信技术的快速发展,无线电频谱资源越来越匮乏。认知无线网络(CRN)由于可提高现有频谱资源的利用率,受到了广泛关注。针对传统的认知无线网络中随机跳频交汇策略没有考虑信道碰撞和切换延迟的问题,提出了一种基于时隙 ALOHA 协议,融入了切换延迟的最优随机跳频交汇策略。首先,将整个交汇过程以时隙微分化,定义信道时长和切换时长时隙模型,并将跳频过程与 ALOHA 协议融合,给出策略交汇时长(TTR)的计算方法;然后,分步骤详细分析交汇策略的流程,根据联合概率推导出时隙期望关于信道数目、切换时延的公式;最后,根据求导和函数趋势图计算最低点,进而提出一种基于整数规化的时隙最优数目计算算法,以取得整体交汇策略的最优化。通过模拟实验考查了可用时隙数目和切换时延这两个重要参数,实验结果表明切换时延比可用信道数目对交汇效率的影响更大。此外,实验结果还表明:该策略在充分考虑时延的同时,总能以最优方式交汇,相比传统方式可大幅度地缩短平均交汇时间(ATTR),当时延的时隙数目不大于 5 时,ATTR 整体上缩短了 15% 左右,这可促进节点快速交汇,进而加速节点信息交互,进一步提高现有频谱的利用率。

关键词 认知无线网络, 交汇策略, 跳频交汇, 时隙优化

中图分类号 TP393.1 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/jsjx.181001865

Time Slot Optimization for Channel Hopping in CRN

JI Yi^{1,2} JIA Jun-cheng^{1,2,3} SHENG Kai⁴

(School of Computer Science and Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)¹

(Provincial Key Laboratory for Computer Information Processing Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)²

(Collaborative Innovation Center of Novel Software Technology and Industrialization, Nanjing 210000, China)³

(Energy Research Laboratory, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)⁴

Abstract With the rapid development of wireless communication technology in recent years, radio spectrum resources are becoming scarcer. Cognitive radio networks (CRNs) attracts widespread attention because they can improve the utilization of existing spectrum resources. For the issue that the traditional random channel hopping rendezvous strategy of cognitive radio network do not consider the channel collision and switching delay, this paper proposed an optimal random channel hopping rendezvous strategy based on time slot ALOHA protocol with calculation of switching delay. Firstly, the proposed strategy differentiates the whole process in time slot, defines the model about time slot of channel staying and switching delay, integrates the channel hopping process with ALOHA protocol, and gives the calculation formula of time-to-rendezvous (TTR). Then, by analyzing the process of rendezvous strategy step by step, it derives the formula of time slot expectation for available channel number and switching delay based on joint probability. Finally, it calculates the lowest point according to the derivative and the trend graph of the function. And then according to the idea of integer programming, this paper proposed an algorithm for calculating the optimal number of slots to optimize the overall rendezvous strategy. The experiment was carried out under the control of the number of available slots and switching delay. The experimental results show that the effect of switching delay on the rendezvous efficiency is greater than that of channel number. Also, the proposed scheme can achieve rendezvous in an optimal way with full account of

收稿日期:2018-10-08 返修日期:2019-03-06 本文受国家自然科学基金项目(61672370, 61502328), 中国博士后科学基金资助项目(2017M611905), 江苏省高等学校自然科学研究面上资助经费项目(17KJB520034), 苏州市产业技术创新专项(民生科技)项目(SS201701)资助。

吉 毅(1993-), 男, 硕士生, 主要研究方向为高性能计算、社交网络、认知无线网络; 贾俊铖(1983-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为无线认知网络、大数据应用与机器学习, E-mail: jiajuncheng@suda.edu.cn (通信作者); 盛 凯(1985-), 男, 硕士, 主要研究方向为大数据应用。

the switching delay. It also can reduce the total rendezvous time effectively than the traditional strategy. When the number of time slots of switching delay is not more than 5, the ATTR is generally reduced by about 15%, which can promote the rendezvous and accelerate the message exchange between nodes and further improve the spectrum utilization.

Keywords Cognitive radio network, Rendezvous strategy, Channel hopping, Time slot optimization

1 概述

传统的无线网络采用固定的频谱分配策略,导致频谱的利用率非常低,因此研究者提出了认知无线电(Cognitive Radio Networks)的概念^[1]。其基本思想是:在不对拥有频谱主导权的主用户(Primary Users)产生有害干扰的前提下,次用户(Secundary Users)可以选择接入主用户空闲的频段,以提高频谱利用率^[2]。

次用户使用频段进行信息交互的前提是需要建立该频段的通信链路,这个过程叫作交汇过程^[3]。交汇过程的建立时长直接影响着次用户的通信效率。目前关于交汇策略的研究主要分为两大类:基于中心的交汇策略和基于去中心的交汇策略。基于中心的策略需要预先设置一个控制中心来协调整个 CRN 区域中的用户交汇过程,这种方式需要统一频谱信道,并且容易发生单点失效的威胁^[4]。因此,目前主流的方式是采用去中心的交汇方式,BR(Blind Rendezvous)^[5]是其中最具代表性的方向。在 BR 方向中,跳频(Channel Hopping)技术由于具有可以适应不同网络环境的变化^[6]而无须改变自身的实现方式的优点,成为了目前应用得最普遍的去中心交汇技术。

目前,基于跳频技术涌现出了很多交汇算法^[7-10],这些算法都是以设计用户跳频序列为主要方式,并且都是假设两个用户节点在相同时间点切换到同一信道即可交汇成功,但用户节点要真正交汇成功,则需要涉及到具体的 MAC 协议,毕竟用户节点在某一信道上存在接收和发送两种状态。目前的交汇方式普遍忽略了此种信道的碰撞情况,如 Ring-Walk 策略^[7]、Jump-Stay 策略^[9]以及多天线的 AMRR 交汇策略^[11]等都假设存在高效的 MAC 协议,而忽略了具体 MAC 协议对交汇效果的影响。此外,文献^[12-13]证实了无线电设备在信道切换时会产生一定的时间延迟,当无线电设备信道的切换较为频繁时,此时间延迟将不可忽略,且会直接影响最终交汇成功的总时长,但是目前绝大部分的研究也忽略了此部分的时间延迟因素。

本文基于随机跳频技术,充分考虑了以上两种影响因素,使用时隙 ALOHA 协议作为基本 MAC 协议^[14],以减少信道冲突,通过分时方式将整个交汇过程时隙化,在设备切换信道时引入切换延迟,最终给出整体的时隙期望表达式,这使得本文策略具有更精确的交汇时间说明。然后,基于时隙期望目标函数,设计了一个以整数规划为基础的最优时隙计算算法,从而使得当采用随机跳频的方式时能以最快的速度进行交汇。本文的主要创新点在于:

1)将时隙 ALOHA 协议以及无线电设备的切换时延引入到认知无线网络节点的交汇过程中,并推导出时隙期望公式。

2)提出了一种计算最优时隙数目的整数规划算法,基于可用信道和切换时延值,可在线性时间内得出最优时隙值,并将此值转化为随机跳频占用信道的时长,以提升交汇策略的性能。

3)通过实验不仅证实了以上结论,还得到了最优时隙数目与信道切换时延、节点的可用信道数目的相关性结论,并通过图示进行了表示。本文的基于随机跳频的研究方式,是目前所有策略中实现方式最为简单易行的;同时本文策略又是所有随机跳频策略中最优的,在实现的易行性和交汇时间的性能上,本文策略应该是认知无线网络节点交汇策略的首选方案。

2 系统模型

设在一个 CRN 中,某一时刻可用的授权频段集合为 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$,集合中的每个元素为一个独立的信道,且 $m = |C|$ 。由于认知无线电设备本身就具有频谱感知元件,可感知周围频谱的使用状态,在某一时刻认知无线电设备可以筛选出一个空闲授权频段集合,这里的 C 即为此类集合,因此下文的研究均基于这一系统模型假设,以避免次用户对主用户的频段干扰,这也是认知无线电研究中常用的前提假设^[15-17]。基于此定义说明,本文主要关注 CRN 中任意两个节点用户 u_i 和 u_j 的交汇过程,每个节点都可以随机地从 C 中选择一个信道作为当前节点来尝试与外界建立链路的通信频段。

单个节点的系统模型如图 1 所示,假设整个过程是时隙可分的且时隙时长固定。白色块表示节点处于某个确切的信道上,且采用时隙 ALOHA 协议运行,假设时长为 n 个时隙长;灰色块表示节点处于信道切换过程中,即信道切换延迟时长,本文假设每次的信道切换时延是相同的,用 Θ 表示,因为切换时延只与无线电设备相关,一旦硬件固定,则每次信道切换时延确定,假设信道切换时长为 k 个时隙长。

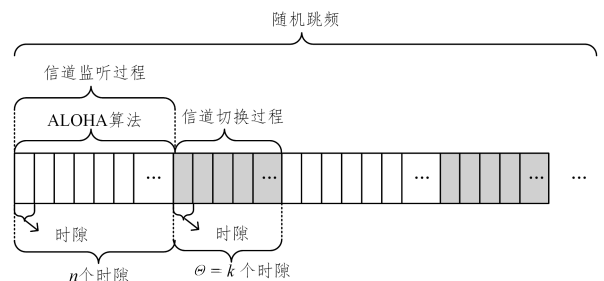


图 1 单节点信道切换运行模型

Fig. 1 Model of switching channel in a single node

在 ALOHA 算法运行过程中,节点在每个时隙上会随机地选择发送和接收状态,设 S 表示发送态, R 表示接收态。那么,任意两个节点 u_i 和 u_j 取得成功交汇的标志是当且仅当

这两个节点在同一时刻处于相同的信道上,且一个节点处于 S 态,另一个节点处于 R 态。整个交汇过程如图 2 和图 3 所示。

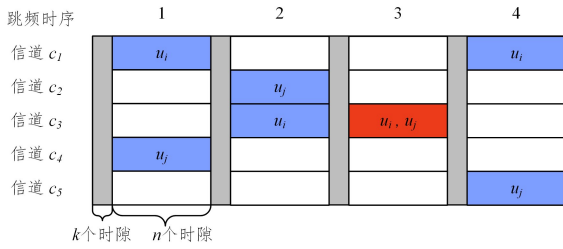


图 2 u_i 和 u_j 随机跳频的过程

Fig. 2 Rendezvous between u_i and u_j in random channel hopping

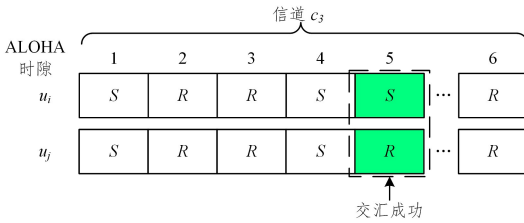


图 3 u_i 和 u_j 使用 ALOHA 算法随机切换 S 和 R 状态

Fig. 3 Process of u_i and u_j randomly switch to state S or R in ALOHA algorithm

图 2 给出了 u_i 和 u_j 基于随机跳频的交汇过程。 u_i 和 u_j 同时各自初始化自身设备,开始随机跳频,左列 5 个信道对于 u_i 和 u_j 来说都是可访问的,每个节点在各个信道上都占用 n 个时隙,灰色块代表信道切换时延。从图中可以看出, u_i 和 u_j 在时序 3 时均处于信道 c_3 ,但是它们还不能立即交汇成功,因为它们还需要运行 ALOHA 算法。图 3 给出了两个节点运行 ALOHA 算法的简单示例。从图中可以看出,在时隙 5 时, u_i 处于发送状态(S 态), u_j 处于接收状态(R 态),因此 u_i 和 u_j 最终在此处交汇成功,整个交汇 TTR(Time To Rendezvous)^[18] 为 $2 \times n + 3 \times k + 5$ 。TTR 是指在认知无线网络中从所有节点初始化成功到最终交汇成功所消耗的总时长^[19],通常用时隙数目表示,是交汇策略中常用的衡量策略优劣的指标。

3 交汇过程的时隙优化分析

3.1 交汇时隙的期望

第 2 节通过一个示例简单展示了一次交汇过程中 TTR 的计算方式,本节以 TTR 的期望值为策略在一般情况下的评价标准。根据第 2 节的系统模型说明,在一个 CRN 区域内,考虑 u_i 和 u_j 两个节点交汇的情况,且每个节点都可随机访问 $m(m \geq 1)$ 个可用信道,整个交汇过程如图 4 所示,分为下面两个部分:

- 1) u_i 和 u_j 随机跳频 X 次仍未交汇成功;
- 2) 在 X 次跳频后, u_i 和 u_j 又经过了 Y 个 ALOHA 时隙,最终交汇成功;

令 T 为一般情况下的总体交汇 TTR,则可以得到:

$$T = n \times X + k \times (X + 1) + Y \quad (1)$$

其中, k 为单次信道切换的时隙数目,由于初始化时也算一次

信道切换,因此总的切换次数比跳频次数多 1。根据式(1),得出 T 关于 X 和 Y 的期望为:

$$\begin{aligned} E(T) &= E(nX + k(X + 1) + Y) \\ &= (n + k)E(X) + E(Y) + k \end{aligned} \quad (2)$$

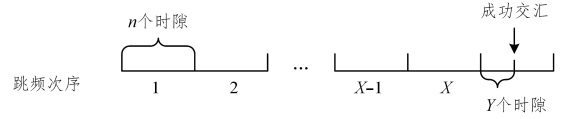


图 4 节点交汇的一般情况

Fig. 4 General situation of rendezvous between nodes

如果 u_i 与 u_j 切换到了相同的信道上,那么两者成功交汇则需要在某个时隙上其中一个节点处于 S 态而另一个节点处于 R 态。而对于单个时隙,假设 p 为在该时隙上两个节点成功交汇的概率, q 为失败交汇的概率,则:

$$p = C_2^1 \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$$

$$q = 1 - p = \frac{1}{2} \quad (3)$$

又由于 ALOHA 算法在每个信道上会运行 n 个时隙数,因此当两个节点处于相同的信道上时,其可成功交汇的概率 P_s 为:

$$P_s = 1 - q^n = 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^n \quad (4)$$

在前 X 次的跳频过程中, u_i 和 u_j 交汇失败的情况可以分为以下两种:

1) u_i 切换的下一个新信道与 u_j 切换的下一个新信道不同,记此情况的概率为 P_1 :

$$P_1 = 1 - C_m^1 \times \frac{1}{m} \times \frac{1}{m} = 1 - \frac{1}{m} \quad (5)$$

2) u_i 和 u_j 切换的下一个信道相同,但是在经过了 n 次 ALOHA 时隙后没有成功交汇,记此种情况的概率为 P_2 :

$$P_2 = \frac{1}{m} \times q^n = \frac{1}{m} \left(\frac{1}{2}\right)^n \quad (6)$$

基于以上的分析,变量 X 的随机分布为:

$$\begin{aligned} P(X=a) &= (C_m^0 P_1^0 P_2^a + C_m^1 P_1^1 P_2^{a-1} + \dots + C_m^a P_1^a P_2^0) \times (1 - P_1) P_s \\ &= (P_1 + P_2)^a (1 - P_1) P_s \\ &= \left[1 - \frac{1}{m} + \frac{1}{m} \left(\frac{1}{2}\right)^n\right]^a \frac{1}{m} \left[1 - \left(\frac{1}{2}\right)^n\right] \end{aligned} \quad (7)$$

令 $h = 1 - \frac{1}{m} + \frac{1}{m} \left(\frac{1}{2}\right)^n$, 由于 $m \geq 1$, 则可以得到:

$$P(X=a) = h^a \frac{1}{m} \left[1 - \left(\frac{1}{2}\right)^n\right], h \in (0, 1) \quad (8)$$

从而,变量 X 的期望为:

$$\begin{aligned} E(X) &= \sum_{a=0}^{\infty} a P(X=a) \\ &= \sum_{a=0}^{\infty} a h^a \frac{1}{m} \left[1 - \left(\frac{1}{2}\right)^n\right] \\ &= \sum_{a=0}^{\infty} a h^{a-1} h \frac{1}{m} \left[1 - \left(\frac{1}{2}\right)^n\right] \\ &= \left(\sum_{a=0}^{\infty} h^a\right)' h \frac{1}{m} \left[1 - \left(\frac{1}{2}\right)^n\right] \\ &= \left(\frac{1}{1-h}\right)' h \frac{1}{m} \left[1 - \left(\frac{1}{2}\right)^n\right] \end{aligned}$$

$$= \frac{m-1+(\frac{1}{2})^n}{1-(\frac{1}{2})^n} \quad (9)$$

由于在 Y 个时隙交汇过程中, 每个节点只有两种状态, 因此 Y 是一个服从几何分布的变量, 可表示为 $Y \sim G(\frac{1}{2})$, 因此 Y 的期望为:

$$E(Y) = \frac{1}{(\frac{1}{2})} = 2 \quad (10)$$

最终, 根据式(2)、式(9)和式(10), 可以得到 T 的期望公式:

$$E(T) = (n+k)E(X) + E(Y) + k$$

$$= (n+k) \frac{m-1+(\frac{1}{2})^n}{1-(\frac{1}{2})^n} + 2 + k \quad (11)$$

其中, $n, m \geq 1, n, m \in \mathbf{Z}, k > 0$ 。

3.2 最优时隙数目

式(11)给出了总期望时隙数与每个信道时隙数目 $n(n \geq 1, n \in \mathbf{Z})$ 、信道切换延迟时隙数目 $k(k > 0)$ 以及每个节点可用信道数目 $m(m \geq 1, m \in \mathbf{Z})$ 的关系。对于一个给定的无线电设备, 其信道切换时延和可用信道数目都是一定的, 即 k 和 m 固定。因此优化的目的就是寻求一个最优的 n , 使得整个交汇过程的总期望时隙数目最小。

为了便于求导和了解函数趋势, 这里使用 $F(x)$ 来表示 T 的期望公式。设 x 为大于 0 的连续变量, 用于替代原不连续的 n 变量, 则可得:

$$F(x) = (x+k) \frac{m-1+(\frac{1}{2})^x}{1-(\frac{1}{2})^x} + 2 + k, x > 0 \quad (12)$$

图 5 和图 6 分别给出了 m 取固定值和 k 取固定值时的 $F(x)$ 的趋势图。从中可以看出, $F(x)$ 总是随着 x 先递减再递增。因此, 当 $x > 0$ 时, 一定存在一个 x 使得 $F(x)$ 取最小值。对 $F(x)$ 求导的公式如下:

$$F'(x) = \frac{\partial((x+k) \frac{m-1+(\frac{1}{2})^x}{1-(\frac{1}{2})^x} + 2 + k)}{\partial x}$$

$$= \frac{m-1+(\frac{1}{2})^x}{1-(\frac{1}{2})^x} - \frac{m(\ln 2)(x+k)(\frac{1}{2})^x}{(1-(\frac{1}{2})^x)^2} \quad (13)$$

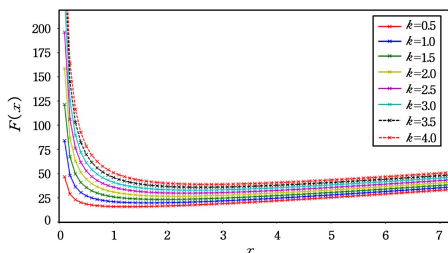


图 5 k 取不同值时 $F(x)$ 随 x 的变化图 ($m=5$)

Fig. 5 Variation of $F(x)$ with x when k takes different values ($m=5$)

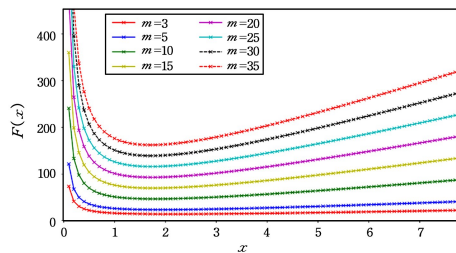


图 6 m 取不同值时 $F(x)$ 随 x 的变化图 ($k=1.5$)

Fig. 6 Variation of $F(x)$ with x when m takes different values ($k=1.5$)

设 $x=\alpha$ 时, $F(x)$ 取得最小值, 那么当 $x \in (0, \alpha), F'(x) < 0$, 且 $x \in [\alpha, +\infty)$ 时, $F'(x) \geq 0$ 。由于所求的时隙数目为大于 1 的整数, 即 $n \geq 1, n \in \mathbf{Z}$, 因此需要通过计算 $F(n)$ 的最小值来最终确定最优 n 。

假设 d 是大于或等于 α 的最小整数, 即 $d \geq \alpha, d \in \mathbf{Z}$, 从而可以得到如下约束条件:

$$\begin{cases} d = \min_{i \in \mathbf{Z}, i \geq \alpha} i \\ F'(d) \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

那么最优值 n 的计算公式为:

$$n_{optimal} = \begin{cases} 1, & d=1 \\ \operatorname{argmin}_{z \in \{d, d-1\}} F(z), & d \geq 2 \end{cases} \quad (15)$$

由于式(14)中 $F'(d) \geq 0$, 因此可进一步进行化简计算:

$$F'(d) \geq 0 \Rightarrow \frac{m-1+(\frac{1}{2})^d}{1-(\frac{1}{2})^d} - \frac{m(\ln 2)(d+k)(\frac{1}{2})^d}{(1-(\frac{1}{2})^d)^2} \geq 0$$

$$\Rightarrow (2^d - 1 - (\ln 2)(d+k))m \geq \frac{(2^d - 1)^2}{2^d}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} 2^d - 1 - (\ln 2)(d+k) > 0 \\ m \geq \frac{(2^d - 1)^2}{2^d - 1 - (\ln 2)(d+k)} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} k < \frac{2^d - 1}{\ln 2} - d \\ m \geq \frac{(2^d - 1)^2}{2^d - 1 - (\ln 2)(d+k)} \end{cases} \quad (17)$$

基于以上分析, 可以通过求导约束来计算最低点, 并将其作为最优求解的下限值。由于最优时隙数目应为正整数, 如果最低点的值为正整数, 则最低点的值即为所求最优解; 若最低点的值不是正整数, 则根据原函数图像可知在最低点左右最临近的正整数值均有可能是最优解, 因此需要通过这两个函数值的对比来得出最优解。最优时隙计算算法如算法 1 所示。

算法 1 Calculation for Optimal Number of Slots

Input: $m(m \geq 1, m \in \mathbf{Z}), k(k > 0)$

1. $n \leftarrow 1$

2. while true do

3. if $k < (\frac{2^n - 1}{\ln 2} - n)$ and $m \geq \frac{(2^n - 1)^2}{(2^n - 1) - (n+k)\ln 2}$ then

```

4. break
5. end
6. n←n+1
7. end
8. if (n>1) and F(n-1)<F(n) then
9.     return n - 1
10. end
11. return n

```

式(17)说明了 k 和 m 的限制条件,基于此范围条件,再结合式(14)中 $d = \min_{i \in \mathbb{Z}, i \geq a} i$ 的条件,可以唯一确定 d 的值,此过程与算法 1 的第 1—7 行对应。算法 1 的第 8—11 行主要依据最小的时隙期望值选择最优的时隙数目 n 。由于在最低点左右的两个整数点都可能是最优值,因此需再一次进行比较才能进行选择。该算法在实际应用中具有很好的效果,因为最优时隙数值一般都是很小的值,可以通过图 5、图 6 得出。同时,本文对实际应用中最常出现的可用信道值和切换时延值进行了最优化计算,结果如表 1 所列,其中纵向、横向分别表示 m 和 k 的值。

表 1 不同 k 和 m 值下的最优时隙数目

Table 1 Optimal number of time slots when k and m take different values

m	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4
3	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
5	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3
10	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3
15	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3
20	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3
25	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3
30	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3
35	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3
40	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3
60	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3
80	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3
100	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3
200	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3

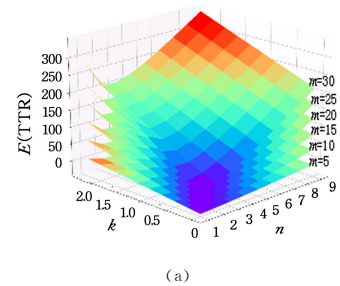
从表 1 中可以看出:随着 m 的变化,最优 n 值趋于稳定;而随着 k 值的变化,最优 n 值的变化比较明显。因此,当 m 处于一定范围时,最优时隙数目与信道切换时延的关系较大,而与设备可用信道数目的关系较小,这一点也正说明设备信道切换时延应该是交汇策略必须要考虑的重要因素之一。同时,该结论可为定性分析认知网络交汇相关的选择问题提供依据,例如:若在某个区域可用信道达到一定数目,则应该选择切换时延较小的无线电设备进行组网,以使得交汇的速度更快;若在可用信道少于一定数目时,则无线电设备的最终交汇时间将由切换时延和信道数目共同决定。第 4 节的实验会对此相关性结论进行进一步的验证。

4 实验及分析

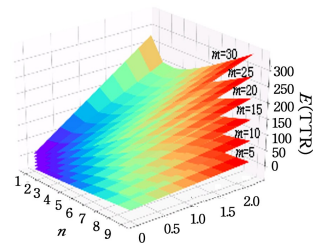
本节使用 Python 语言来模拟 CRN 下的节点交汇过程^[4],以验证前文的假设以及结论。正如前文所提到的,节点

交汇成功的时长与无线电设备的可用信道数目以及设备切换信道的时延有关,因此实验主要针对 m 和 k 两个变量进行模拟验证实验。所有实验数据均是在同一模拟环境下进行 500 次运行测试所得的均值数据。

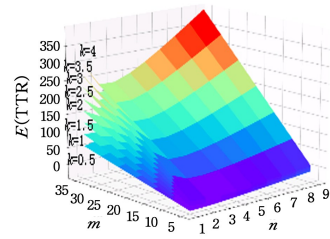
为了便于更直观地展示信道可用数目和信道切换时延对整体交汇时间的影响,绘制 k, m 对时隙期望的影响的 3D 视图,如图 7 所示。



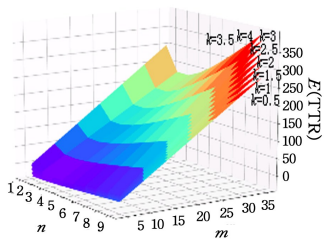
(a)



(b)



(c)



(d)

图 7 k 和 m 对于时隙期望值的影响图(电子版为彩色)

Fig. 7 Comparison of influence of k and m on time slot expected value

其中,图 7(a)和图 7(b)均表示不同信道可用数目对时隙期望值的影响,图 7(a)表示前视角图,而图 7(b)表示侧视角图;图 7(c)和图 7(d)表示不同时延对时隙期望值的影响,相应地,图 7(c)为前视角图,图 7(d)为侧视角图。从中可以看出,无线电设备的信道可用数目以及信道切换延迟均会对整体交汇 TTR 产生不同程度的影响。图中的蓝色部分为各个图形的“低点”部分,也就是靠近最优的部分。而从图 7(a)和

图 7(b)中可看出:随着 k 的变化,蓝色区域块出现较大变化;而从图 7(c),图 7(d)可出:随着 m 的变化,蓝色区域块的变化较小,这可初步说明策略交汇期望时隙数与设备的信道切换时延存在较大的相关性。

本文采用仿真实验来验证最优时隙算法的正确性,实验结果如图 8 所示。实验通过模拟时隙 ALOHA 算法以及随机跳频策略,遍历 n 的取值,每个值都进行 500 次仿真模拟并取均值 TTR,从中选出使得 TTR 最小的 n 作为实验值,如图 8 中红色线所示。而分析值则采用本文设计的最优时隙算法来计算得出。图 8 中的仿真值和分析值基本完全拟合,从而证实了最优策略的正确性。

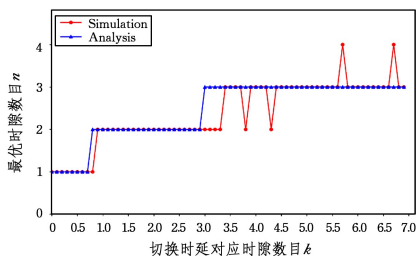


图 8 分析值与实验值的对比(电子版为彩色)

Fig. 8 Comparison between analytical value and experimental value

同时,对最优时隙策略与随机策略进行对比测试,结果如图 9、图 10 所示。图 9 为切换延迟一定时,最优时隙方式与随机策略的耗时对比图。图 10 为当设备可用信道一定时,最优时隙方式与随机策略的耗时对比图。从图 9 和图 10 中可以看出,本文策略的耗时总是最短的,从而证实了本文算法的性能最优。

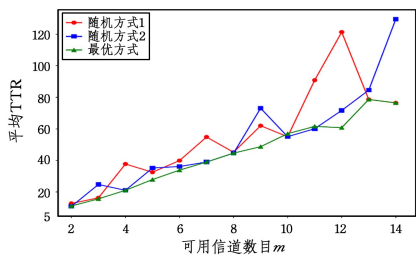


图 9 最优时隙策略与随机策略的对比($k=2$)

Fig. 9 Comparison between optimal slot strategy and random strategy ($k=2$)

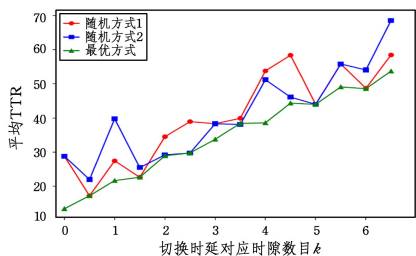


图 10 最优时隙策略与随机策略的对比($m=5$)

Fig. 10 Comparison between optimal slot strategy and random strategy ($m=5$)

的影响偏向如图 11、图 12 所示。图 11 给出了当 m 较小时, k, m 对最优时隙数目的影响效果,从中可以看出最优时隙数目随 k, m 的不同而不同,两者对最优值都有较大影响。而图 12 则给出了当 m 较大时, k, m 对最优时隙数目的影响效果,从中可以看出尽管 m 取了多个不同值,但最优时隙数目几乎不变,最优值的变化只与 k 的值相关。因此,从所有可能情况而言,策略的交汇最优时隙数目与信道切换时延有着很大的关系,尤其在设备可用信道较多时,信道切换时延具有决定性的影响,这说明信道切换时延应该是交汇策略中不可忽略的重要因素之一;同时,这可为定性分析认知无线网络中如何选择传感器设备以完成大规模组网部署问题提供依据。比如,若在某个区域的可用信道远多于此处的实验结果值 15,则应该选择切换时延较小的无线电设备进行组网,交汇的速度更快;或者,若在可用信道少于 15 时,则无线电设备的最终交汇时间将由切换时延和信道数目共同决定,必须使用本文的最优方法来选择最优结果。因此,第 3.2 节的结论也得以验证。

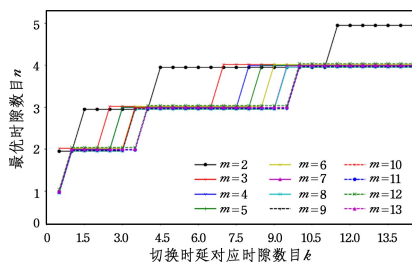


图 11 m 小于 15 时 k 和 m 对最优时隙数目的影响

Fig. 11 Influence of k and m on optimal value when m is less than 15

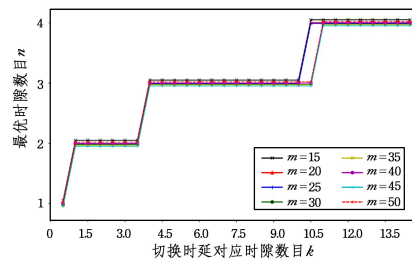


图 12 m 大于或等于 15 时 k 和 m 对最优时隙数目的影响

Fig. 12 Influence of k and m on optimal value when m is greater than or equal to 15

结束语 本文主要研究了认知网络中的交汇策略。与绝大部分研究工作不同,本文同时考虑了信道切换时延以及交汇碰撞情况,并以随机跳频的交汇方式为基础,详细分析了整个交汇过程,推导出时隙期望公式;然后利用整数规划理论设计最优时隙算法;最后通过实验得出设备信道切换时延与设备可用信道对交汇期望时间的影响偏向关系,并证实最优时隙策略优于传统随机跳频策略。然而,对于特殊设计的跳频序列,本策略还未完全适配,需要进行单独的推导调优,因此在未来的研究中将进一步扩展该方案的适用范围,以期实现具有普适性且考虑时延因素的加速汇聚框架。

设备信道切换时延和信道可用数目对交汇最优时隙数目

参考文献

- [1] LIU Q,ZHAO G S,WANG X D,et al. A Survey of Channel Rendezvous in Cognitive Radio Networks[J]. Chinese Journal of Software,2014,25(3):606-630. (in Chinese)
刘权,赵光胜,王晓东,等. 认知无线电网络信道交汇研究综述[J]. 软件学报,2014,25(3):606-630.
- [2] ZHANG X,LIU C,HU S,et al. Centralized spectrum allocation strategy based on Queuing Theory in cognitive radio networks[J]. Chinese Application Research of Computers,2015,32(1):187-190. (in Chinese)
张旭,刘聪,胡胜,等. 认知无线网络中基于排队论的集中式频谱分配策略[J]. 计算机应用研究,2015,32(1):187-190.
- [3] THEIS N C,THOMAS R W,DASILVA L A. Rendezvous for cognitive radios[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing,2011,10(2):216-227.
- [4] JIA J C,QIAN Z. Rendezvous protocols based on message passing in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2013,12(11):5594-5606.
- [5] ROBERTSON A,LAN T,MOLNAR J,et al. Experimental comparison of blind rendezvous algorithms for tactical networks[C]//IEEE International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks. IEEE Computer Society,2012:1-6.
- [6] CHANG G Y,TENG W H,CHEN H Y,et al. Novel Channel-Hopping Schemes for Cognitive Radio Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing,2014,13(2):407-421.
- [7] LIU H,LIN Z,CHU X,et al. Ring-Walk Based Channel-Hopping Algorithms with Guaranteed Rendezvous for Cognitive Radio Networks[C]//Ieee/acm Int'l Conference on Green Computing and Communications & Int'l Conference on Cyber, Physical and Social Computing. IEEE Computer Society,2010:755-760.
- [8] SHIN J,YANG D,KIM C. A channel rendezvous scheme for cognitive radio networks[J]. IEEE Communications Letters,2010,14(10):954-956.
- [9] LIN Z,LIU H,CHU X,et al. Jump-stay based channel-hopping algorithm with guaranteed rendezvous for cognitive radio networks[C]//INFOCOM,2011 Proceedings IEEE. IEEE,2011:2444-2452.
- [10] ZHANG Y,LI Q,YU G,et al. ETCH:Efficient Channel Hopping for communication rendezvous in dynamic spectrum access networks[C]//IEEE INFOCOM. IEEE,2011:2471-2479.
- [11] YU L,LIU H,LEUNG Y W,et al. Adjustable rendezvous in multi-radio cognitive radio networks[C]//Global Communications Conference (GLOBECOM),2015 IEEE. IEEE,2015:1-7.
- [12] GÖZÜPEK D,BUHARI S,ALAGÖZ F. A Spectrum Switching Delay-Aware Scheduling Algorithm for Centralized Cognitive Radio Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing,2013,12(7):1270-1280.
- [13] ERYIGIT S,BAYHAN S,TUGCU T. Channel switching cost aware and energy-efficient cooperative sensing scheduling for cognitive radio networks[C]//IEEE International Conference on Communications. IEEE,2013:2633-2638.
- [14] SCHOUTE F C. Dynamic Frame Length ALOHA[J]. Mobile Communications,1983,31(4):565-568.
- [15] SHEU J P,LIN J J. A Multi-Radio Rendezvous Algorithm Based on Chinese Remainder Theorem in Heterogeneous Cognitive Radio Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing,2018,PP(99):1-1.
- [16] XU D,GAO Y,YANG C,et al. Performance Analysis of Opportunistic Cooperation Schemes in Cognitive Radio Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2018,67(4):3658-3662.
- [17] XIN C S,ULLAH S,SONG M,et al. Throughput oriented lightweight near-optimal rendezvous algorithm for cognitive radio networks[J]. Computer Networks,2018,137:49-60.
- [18] LI J,ZHAO H,WEI J,et al. Sender-Jump Receiver-Wait:a simple blind rendezvous algorithm for distributed cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing,2018,17(1):183-196.
- [19] AKYILDIZ I F,LEE W Y,VURAN M C,et al. A survey on spectrum management in cognitive radio networks[J]. IEEE Communications Magazine,2008,46(4):40-48.