

基于Overlay-Underlay的功率控制路由算法

黄玉清, 王 娇, 江 虹

(西南科技大学信息工程学院 四川 绵阳 621010)

【摘要】对现有混合式认知无线网络频谱共享模型进行改进, 解决了现有路由算法在干扰与时延处理方面的缺陷, 提出了一种基于Overlay-Underlay频谱共享的路由算法。该算法以着色图为路由分析模型, 以最短路径和链路状态作为路由指标, 以最小累积干扰为信道分配指标, 优先接入空闲授权信道, 否则利用功率冗余接入, 发展了一种具有功率控制的端到端路径选择和信道分配方法。仿真研究结果表明了该算法的有效性, 与现有路由算法相比, 提高了网络吞吐量, 降低了丢包率和端到端时延。

关键词 信道分配; 混合式认知无线网络; 功率控制; 路由算法; 频谱共享

中图分类号 TN915

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.04.004

Power Control Routing Algorithm Based on Overlay-Underlay

HUANG Yu-qing, WANG Jiao, and JIANG Hong

(School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology Mianyang Sichuan 621010)

Abstract Based on overlay-underlay spectrum sharing model, a routing algorithm for hybrid cognitive radio networks is proposed to improve the existing spectrum sharing model and to solve the deficiency in processing interference and delay of other algorithms. Taking shortest path and link state as routing metric and minimum cumulative interference as channel assignment target, the algorithm uses coloring graph as routing analysis model to develop an end-to-end path selection and channel assignment method with power control. Simulation results and comparison with existing routing algorithm show that the proposed algorithm can improve network throughput, reduce packet loss rate and end-to-end delay.

Key words channel assignment; hybrid cognitive radio networks; power control; routing algorithm; spectrum sharing

认知无线电(cognitive radio, CR)是一种智能无线电技术^[1]。目前针对CR技术的研究主要集中在频谱感知、频谱分配以及性能优化等方面^[2]。随着研究的进一步深入, 基于CR技术的组网问题变得不容忽视, 而路由技术作为认知无线网络(CRN)的关键技术, 其研究具有重要意义。

认知无线网络模型包括集中式、分布式与混合式, 而混合式模型具备前两者的特点。认知用户(次用户)择机使用授权信道, 其优先级低于主用户, 属于频谱共享模型中的垂直共享模型, 适用于混合式CRN。垂直共享模型包括Overlay和Underlay两种方式, Overlay方式只允许认知用户接入空闲授权信道, 主用户与次用户使用的频谱不重叠; 而Underlay方式在保证不干扰主用户通信的前提下择机接入授权信道, 此时与主用户共用同一段频谱。在路由分

析模型方面^[3], 已有分层图模型、冲突图模型、着色图模型、混合整数线性规划等, 而着色图模型具有较低算法复杂度^[4]。

基于Overlay频谱共享模型的路由研究有一定进展^[5-7], 这些方案存在对交叉节点影响网络通信性能考虑的不足, 以及认知用户只能使用空闲授权信道的局限性。为获得更宽的频带, 采用Underlay频谱共享方式^[7], 通过为主用户定义保护等高线从而避免对主用户的干扰, 实现一种Underlay频谱共享方式, 但该方式未考虑主用户功率冗余的利用。本文提出一种基于Overlay-Underlay频谱共享模型, 利用着色图模型作为混合式CRN信道分配和路由选择的分析模型, 优先采用Overlay频谱共享方式接入空闲授权信道, 当不存在空闲授权信道时, 利用Underlay频谱共享方式接入非空闲授权信道, 以链

收稿日期: 2011-10-01; 修回日期: 2013-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(61072138); 四川省科技厅应用基础研究项目(2010jy0173)

作者简介: 黄玉清(1962-), 女, 教授, 主要从事认知无线电技术、图像信息处理等方面的研究。

路条数和链路状态的加权作为链路权重,利用贪婪搜索算法获得端到端路由。该方式既能接入空闲授权信道,也能利用主用户的功率冗余共用同一授权信道,提高了频谱利用率。

1 系统模型设计

1.1 网络模型设计

混合式CRN网络模型如图1所示,由主用户网络和认知用户网络组成。

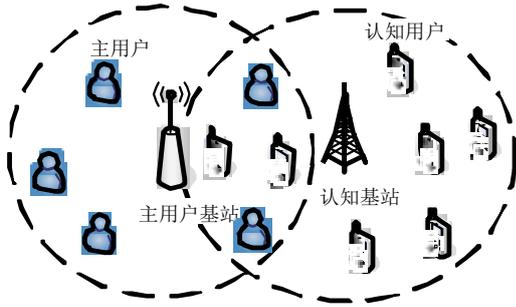


图1 CRN网络模型

其中,主用户网络包括正在通信的活跃主用户和处于空闲状态的非活跃主用户,认知用户网络由认知用户和认知基站组成。认知用户是具有频谱感知、频谱切换等认知能力的移动终端,通过择机方式接入主用户的授权信道。认知基站可以是类似于蜂窝网的基站,也可以是WLAN的接入点,除了具有传统基站的功能外,还具有认知功能,如检测无线频谱,获取认知用户和主用户的位置信息,管理认知用户的频谱接入、发射功率,决策认知用户的端到端路由。假设认知用户网络存在控制信道和数据传输信道,控制信道为固定的非授权信道低频段中的保留频段,具有较大的覆盖范围和较低的数据速率,实现公共控制信道功能。数据信道为认知用户通过感知技术检测到的可用授权信道。

1.2 着色图路由模型

在颜色敏感图论着色模型的基础上,引入链路权重,将着色图模型应用于CRN信道分配和路由选择算法的设计中^[5]。CRN用着色图 $G=(V, \text{SOP}, \text{EC}, \text{WE})$ 表示,其中,顶点集合 V 表示认知用户, SOP 表示认知用户可用的授权信道集合(又称机会频谱),边集合 EC 表示互为邻居节点的两认知用户可共用的授权信道,不同的边(信道)用不同颜色标记,边的权重集合用 WE 表示。假设CRN中可用信道数为 N ,则在着色图 G 中,颜色 k 分配给信道 f_k ,信道 $f_k \in \text{SOP}$,边的权重为 w_{ij} ,表示两认知用户之间的距离信息与链路质量等, i 和 j 为认知用户。图2为着色图模型示意图。

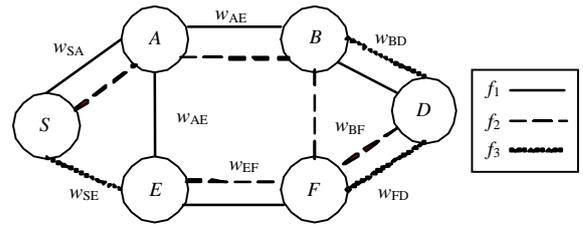


图2 着色图模型示意图

1.3 频谱共享与功率控制模型分析

如果认知用户 i 使用活跃主用户的授权频谱 f 与用户 j 进行通信,须满足接收条件:认知用户的接收功率 P_{SU}^r 高于预设门限值 $P_{\text{SU}}^{\text{th}}$,即:

$$P_{\text{SU}}^r = \frac{P_{ij}(f)G_i G_j (h_i^2 \cdot h_j^2)}{d_{ij}^\lambda} \geq P_{\text{SU}}^{\text{th}} \quad (1)$$

式中, $P_{\text{SU}}^{\text{th}}$ 的下标SU表示认知用户,上标th表示门限; P_{SU}^r 的上标r表示接收功率; $P_{ij}(f)$ 为链路 (i, j) 的发送功率; G_i 与 G_j 分别为节点 i 的发射天线增益与节点 j 的接收天线增益,当发射和接收天线为全向天线时, $G_i G_j = 1$; h_i 和 h_j 分别为发送节点 i 和接收节点 j 的天线高度; d_{ij}^λ 为节点 i 与节点 j 之间的距离; λ 为衰减指数,一般 $\lambda \in [2, 4]$ 。由式(1)可得认知节点的最小发送功率为:

$$P_{ij}^{\text{min}}(f) = \frac{P_{\text{SU}}^{\text{th}} d_{ij}^\lambda}{G_i G_j (h_i^2 h_j^2)} \quad (2)$$

由于认知用户接入授权信道不能对主用户造成有害干扰,因此需保证对主用户造成的累积干扰 IP_{PU}^c 不能高于能容忍的干扰功率门限值 $\text{IP}_{\text{PU}}^{\text{th}}$ ^[8], IP 表示干扰功率,上标c表示累积值,上标th表示门限值,下标PU表示主用户。定义 $\text{IP}_{\text{PU}}^{\text{th}} = \eta P_{\text{PU}}^{\text{th}}$,其中, $P_{\text{PU}}^{\text{th}}$ 为主用户正确接收数据的功率门限, η 为干扰功率门限系数,则累积干扰约束为:

$$\text{IP}_{\text{PU}}^c = \sum_{i, j \in \text{SU}} \frac{P_{ij}(f)G_i G_j (h_i^2 h_j^2)}{d_{ij}^\lambda} \leq \text{IP}_{\text{PU}}^{\text{th}} \quad (3)$$

当主用户的授权信道 f 只允许一条认知用户链路 (i, j) 接入时,节点 i 的最大发送功率为:

$$P_{ij}^{\text{max}}(f) = \frac{\text{IP}_{\text{PU}}^{\text{th}} d_{ij}^\lambda}{G_i G_j (h_i^2 h_j^2)} = \frac{\eta P_{\text{PU}}^{\text{th}} d_{ij}^\lambda}{G_i G_j (h_i^2 h_j^2)} \quad (4)$$

假设主用户的授权信道 f 可被认知用户节点 i 和 j 使用,那么 f 成为两用户节点可择机接入的信道,即: $f \in (\text{SOP}_i \cap \text{SOP}_j)$,其中, SOP_i 与 SOP_j 分别表示认知用户 i 与 j 的机会频谱集合。认知用户节点形成的链路 (i, j) 之间的通信可以表示为 $x_{ij}(f) = 1$ 。本文从频域方面考虑信道的分配,一旦信道 f 被节点 i 用于某条数据流的发送或接收,则它不能再被节点 i

用于其他数据流的数据传输^[9], 即:

$$\sum_{j \in T_i(f)} x_{ij}(f) + \sum_{k \in T_i(f)} x_{ki}(f) \leq 1 \quad (5)$$

式中, $T_i(f)$ 表示在节点*i*传输范围内能使用信道*f*的节点集合。根据式(2)、式(4)和式(5)可得认知用户链路(*i, j*)的发射功率与链路通信状态关系为:

$$x(f) = \begin{cases} P_{ij}(f) \in [P_{ij}^{\min}(f), P_{ij}^{\max}(f)] \\ P_{ij}(f) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

2 基于Overlay-Underlay的路由算法

2.1 假设与定义

为了将认知网络CRN用着色图路由模型表示并描述算法, 首先给出相关假设和定义。

1) 假设混合式CRN由*N*个认知用户和*M*个主用户(包括活跃主用户和非活跃主用户)组成, 其中活跃主用户数为 M_{act} , 非活跃主用户数为 $M - M_{act}$ 。用SU表示认知用户集合, PU表示主用户集合, PU_{act} 表示活跃主用户集合, 且 $PU_{act} \subseteq PU$, 用 f_k 表示主用户*k*的授权信道。设认知用户的通信半径为 R_{com} , 主用户的保护等高线(干扰半径)为 R_{inf} 。

2) SOP_i 表示认知用户节点*i*可使用的信道集合, 也称机会频谱, $i=1, 2, \dots, N$ 。

3) r_{ij} 表示认知用户*i*与*j*之间的链路跳数, 即:

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{当 } d_{ij} \leq R_{com} \text{ 且 } SOP_i \cap SOP_j \neq \Phi \\ \inf & \text{当 } d_{ij} > R_{com} \text{ 或 } SOP_i \cap SOP_j = \Phi \end{cases} \quad (7)$$

式中, \inf 表示链路不存在; d_{ij} 表示认知用户之间的距离。式(7)表明: 当且仅当用户*i*与*j*之间的距离小于其通信半径, 且它们至少共享一条可用信道时, 两个认知用户才能彼此直接通信, 则节点*i*和节点*j*互为邻居节点。用 NB_i 表示节点*i*的邻居节点集合, $1 \leq i \leq N$ 。

4) x_{ij} 表示认知用户链路(*i, j*)当前的状态, 如果链路中的节点当前正在转发或处理数据, 则状态为忙, 否则处于空闲状态, 表示为:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{当链路}(i, j) \text{处于忙状态} \\ 0 & \text{当链路}(i, j) \text{处于闲状态} \end{cases} \quad (8)$$

5) w_{ij} 表示认知用户链路(*i, j*)的权重, 定义为链路的跳数与链路状态的加权和, 即:

$$w_{ij} = \alpha r_{ij} + \beta x_{ij} \quad (9)$$

式中, $\alpha \in [0, 1]$; $\beta \in [0, 1]$; 且 $\alpha + \beta = 1$ 。为了减小端到端时延, 选择具有最小权重的链路作为路由, 即求 $\min w_{ij}$ 可得最优路由。

6) $I_{ij}(f)$ 表示认知用户链路(*i, j*)使用信道*f*对主

用户造成的干扰, $IP_{pu}^b(f)$ 表示主用户授权信道*f*的干扰功率门限。 $I_{ij}(f)$ 的计算方法与式(1)相似。

7) $e(f)$ 表示从源节点*S*到节点*n*的最短路径上具有相同颜色连续边(信道)的条数, 如在图2的SAB路径上, 若节点*S*与*A*的链路选择信道 f_1 作为通信信道, 此时节点*A*与*B*的链路可选用 f_1 和 f_2 。如果选择信道 f_1 , 则 $e(f_1) = 2$; 如果选择信道 f_2 , 则 $e(f_2) = 1$ 。为了减小信道间的干扰, 选择最小 $e(f)$ 值的信道作为链路通信信道, 则节点*A*与*B*的链路应选择 f_2 。即求 $\min e(f)$, 可得最优信道选择。

8) $p(n)$ 表示从源节点*S*到节点*n*路径上, 节点*n*的上游节点。

9) $c(p(n), n)$ 表示从源节点*S*到节点*n*最短路径上, 节点*n*与其上游节点间的数据传输信道。

10) $pw(p(n), n)$ 表示从源节点*S*到节点*n*最短路径上的*n*与其父节点链路的发送功率。

11) $path$ 表示从源节点*S*到目的节点*D*的路径, 可表示为该路径上所有节点的集合。

2.2 算法步骤

本文算法以首先基于Overlay方式, 利用空闲信道完成路径选择与信道分配; 若不存在空闲信道, 则基于功率冗余的Underlay频谱共享方式, 通过功率控制实现路径选择与信道分配。具体步骤如下:

1) 设路径从源节点*S*开始, 用 $path = [S]$ 表示。首先, 计算各认知用户节点*i*的授权信道集合(或机会频谱) SOP_i ($i=1, 2, \dots, N$), 可以表示为 $SOP_i = \{f_{k1}\} \cup \{f_{k2}\}$, $k1 \in PU - PU_{act}$, $k2 \in PU_{act}$, $\{f_{k1}\}$ 表示空闲信道, $\{f_{k2}\}$ 表示非空闲信道。然后根据各节点的位置信息和SOP信息, 生成认知网络的着色图*G*, 并计算连通矩阵 $W(i, j) = w_{ij}$, $\forall i, j \in SU$ 。

2) 在着色图*G*中, 利用贪婪算法为上游节点*i*寻找转发节点*j*, 使其满足 $j = \arg \min w_{ij}$, $j \in SU$, $j \notin path$, $i \in path$ 。 w_{ij} 表征链路跳数与状态, 由式(9)确定。如果节点*j*被选中为转发节点, 则把该节点添加到路径中, 可表为 $path = path \cup \{j\}$ 。此时该链路路径最短, 质量最优。

再为节点*j*分配信道并控制节点*i*的发射功率:

① 若存在空闲信道, 基于Overlay方式, 由着色图*G*在节点*j*空闲信道集合 $\{f_{k1}\}$ 中分配信道*f*: 满足约束 $\min e(f)$, $f \in \{f_{k1}\}$, 且满足对主用户造成的累积干扰 IP_{pu}^c 最小要求。如果信道*f*已被其他认知用户使用, 则必须保证节点*j*处于干扰半径 R_{inf} 之外。节点*i*满足式(2)与式(4)约束的功率发送数据, 使节点*i*能可靠接收数据, 转步骤3);

② 若不存在空闲信道 $\{f_{k1}\}$ ，基于功率冗余 Underlay 方式， $\{f_{k1}\}$ 在可用信道集合 $\{f_{k2}\}$ 中，选择信道 f 应满足约束： $\min e(f)$ ， $f \in \{f_{k2}\}$ ，且距主用户最远，节点 i 以满足式(2)与式(4)约束的功率发送数据，同时满足功率干扰限制条件：

$$\sum I(f) + I_{ij}(f) < IP_{PU}^{\text{th}}(f) \quad (10)$$

式中， $\sum I(f)$ 表示由已选路径 path 上使用信道 f 对主用户产生的干扰和； $I_{ij}(f)$ 表示链路 (i, j) 使用信道 f 对主用户产生的干扰，转步骤3)；

③ 如果上述信道也不存在，与步骤2)-②相似，在 $\{f_{k2}\}$ 中为链路分配信道，满足约束： $\min e(f)$ ， $f \in \{f_{k1}\}$ ，且距主用户尽量远，干扰限制条件满足式(10)；认知节点 i 发送功率满足式(2)；转步骤3)；

④ 如果上述信道均不存在，则设置 $w_{ij} = \text{inf}$ ， inf 表示链路不存在，更新着色图 G ，转步骤2)。

3) 如果目的节点 $D \notin \text{path}$ ，设置 $i = i + 1$ ，转步骤2)；如果 $D \in \text{path}$ ，则算法结束，源节点 S 到目的节点 D 的最优路由 path 、路径上的通信信道 channel 以及发射功率 power 可分别表为：

$$D \rightarrow p(D) \rightarrow p(p(D)) \rightarrow \dots \rightarrow S$$

$$c(p(D), D) \rightarrow c(p(p(D)), p(D)) \rightarrow \dots \rightarrow S$$

$$\text{pw}(p(D), D) \rightarrow \text{pw}(p(p(D)), p(D)) \rightarrow \dots \rightarrow \text{pw}(\dots, S)$$

3 仿真实验

3.1 仿真场景与参数

本文采用如图3所示的网络仿真场景，认知用户和主用户随机分布在场景大小为 $1\ 000\ \text{m} \times 1\ 000\ \text{m}$ 的网络中，包括认知用户、非活跃主用户与活跃主用户，认知用户数为40，主用户数为8，其中主用户1、3、5、8处于通信状态，即为活跃主用户。

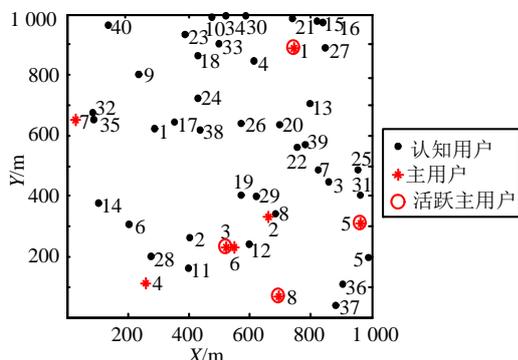


图3 仿真场景(网络拓扑)

假设混合式CRN应用背景为基于蜂窝网络的下一代无线通信系统 xG 网络(如3G或4G网络)，仿真场景中的主用户为手机用户，认知用户既可以是具有

数据业务的手机用户也可以是其他无线通信终端。网络传播模型简化为两径模型，认知用户默认的通信传输范围 $R_{\text{com}} = 250\ \text{m}$ ，干扰范围 $R_{\text{inf}} = 550\ \text{m}$ ，发射天线增益 $G_t = 1$ ，接收天线增益 $G_r = 1$ ，发射天线高度 $h_t = 1.5\ \text{m}$ ，接收天线高度 $h_r = 1.5\ \text{m}$ ，衰减系数 $k = 4$ 。

假设手机信号强度用格数表示，它与接收功率的关系如表1所示。

表1 手机信号强度与接收功率之间的关系

手机信号强度/格	手机接收功率/dBm
5	$\geq -80 (\pm 2)$
4	$-80 \sim -90 (\pm 2)$
3	$-90 \sim -99 (\pm 2)$
2	$-100 \sim -101 (\pm 2)$
1	$-102 \sim -103 (\pm 2)$
0	$\leq -104 (\pm 2)$

为保证认知用户之间的有效通信，假定认知用户可靠接收数据的信号强度最低为3格，则认知用户的接收功率门限 $P_{\text{SU}}^{\text{th}} = -94.4\ \text{dBm} = 3.652\ 62 \times 10^{-10}\ \text{mW}$ 。同时，为了保证主用户的正常通信，假定主用户进行无差错数据传输的信号强度为满格，主用户接收到的累积干扰功率不得超过其接收功率 $1/10$ ，即干扰功率门限系数 $\eta = 0.1$ 。根据表1可知，手机信号强度达到满格时，相应的接收功率至少为 $P_{\text{SU}}^{\text{th}} = -80\ \text{dBm} = 10^{-8}\ \text{mW}$ ，则主用户的干扰功率门限 $IP_{\text{SU}}^{\text{th}} = \eta P_{\text{PU}}^{\text{th}} = 10^{-9}\ \text{mW}$ 。

3.2 仿真结果与分析

为了验证本文算法的有效性和可行性，利用 Matlab 和 NS2 工具分别实现算法的功能仿真和性能仿真，并与文献[5]提出的信道分配和路径选择 (CARS) 算法进行比较分析。

在图3所示的仿真场景中，假设存在认知用户数据流 $5 \rightarrow 12$ 和数据流 $2 \rightarrow 7$ ，分别利用 CARS 算法和本文算法为数据流决策端到端路由、链路上的信道以及链路发射功率，Matlab 仿真结果如表2所示。例如，Path 对应 [5, 31, 3, 8, 12]，表示对应4段路径经过的节点编号；channel 对应 [2, 4, 6, 2]，表示相应4段路径使用的信道编号；power 对应 [3.697 5, 0.292 1, 4.234 3, 0.507 4]，表示对应4段路径相应信道的功率(单位为 mW)。

根据上述 Matlab 仿真结果，利用为 NS2 工具添加的多信道 Manual 静态路由协议对算法进行性能仿真^[10]。首先，在 NS2 中建立如图3所示的网络场景 TCL 脚本，设置网络传播模型为两径模型，MAC 协议为 RTS/CTS 的多信道 802.11 协议，路由协议为 Manual 协议，信道带宽为 $2\ \text{MB/s}$ ，数据分组为

512 byte, 数据流通信模型为CBR, 仿真时间为100 s。再根据表2所得的仿真结果在TCL脚本中设置两条认知用户数据流 5 → 12 和 2 → 7, 以及相应的端到端路由、信道与功率。为了保证认知用户之间的通信半径为250 m, 对于没有进行功率控制的CARS算

法采用统一功率0.281 838 15 mW。假设数据流 5 → 12 在第10 s开始传输, 而数据流 2 → 7 在第20 s开始传输。最后, 通过分析NS2仿真的Trace文件获得网络性能仿真数字结果, 包括吞吐量、丢包率和端到端时延。

表2 路由、信道与功率仿真结果

算法	频谱共享方式	数据流	参数	仿真结果
CARS算法	Overlay方式	5→12	path	[5,31,3,8,12]
			channel	[2,4,2,4]
		2→7	path	[2,12,8,7]
			channel	[6,7,6]
本文算法	Overlay-Underlay方式	5→12	path	[5,31,3,8,12]
			channel	[2,4,6,2]
			power	[3.697 5,0.292 1,4.234 3,0.507 4]
		2→7	path	[2,19, 22, 7]
			channel	[7,1,8]
			power	[4.693 9,6.946 1,0.222 4]

图4为CARS算法和本文算法获得的网络累积吞吐量比较图。CARS算法^[5]是在Overlay频谱共享方式下获得的网络累积吞吐量, 而本文算法是在基于Overlay-underlay方式下获得的网络累积吞吐量。

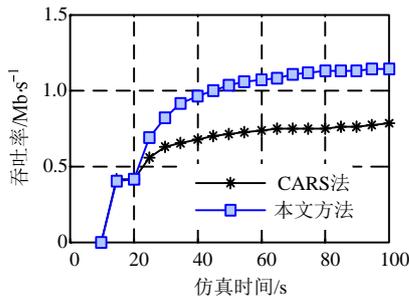


图4 网络累积吞吐量比较

从图4可以看出, 在20 s后随着数据流的增加, 网络累积吞吐量也随之增加, 但增加的程度却不同。本文算法获得的网络累积吞吐量明显高于CARS算法, 且增加程度接近46%。

图5和图6分别为两种算法获得的网络丢包率和端到端平均时延。

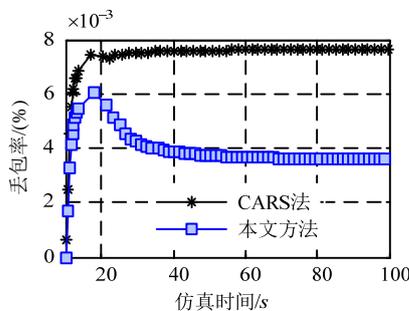


图5 网络丢包率比较

端到端平均时延, 除了传输时延、排队时延、退避时延外, 还包括信道的切换时延。从图5和图6

可知, 在整个仿真过程中, 本文算法获得的丢包率和端到端时延比CARS算法降低的幅度分别接近33%和46%。

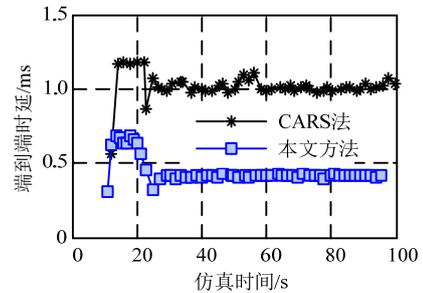


图6 网络端到端平均时延比较

图7为随认知用户数据流增加两种算法分别获得的网络平均吞吐量。从图7可知, 随着数据流的增加, 本文算法获得的平均网络吞吐量比CARS更大, 经过计算平均增加43.3%。可见, 本文算法可以缓解由于数据流增加造成的网络拥塞状况。

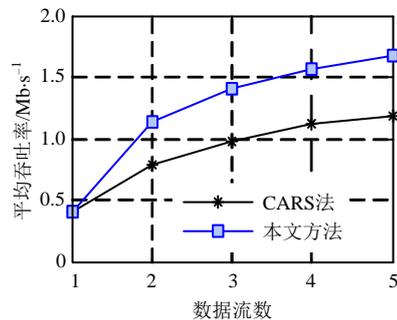


图7 随数据流变化获得的网络吞吐量

上述性能仿真都是基于固定活跃主用户数完成。为了进一步验证本文算法的有效性, 在网络场景其他参数相同的情况下, 图8给出了CARS和本文算法在不同活跃主用户数下获得的网络吞吐量。

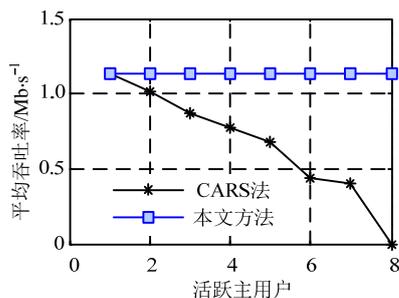


图8 随活跃主用户变化获得的网络吞吐量

从图8中可以看出,随着活跃主用户数的增加,CARS算法获得的网络吞吐量随之降低,这是由于随着活跃主用户数的增加,认知用户可用信道数随之减少,从而限制了网络吞吐量。本文算法以基于Overlay-Underlay频谱共享方式,可利用主用户的功率冗余接入授权信道,即可用的机会频谱更宽,网络吞吐量受活跃主用户行为的影响不大。

4 结论

针对混合式CRN,本文提出了基于Overlay-Underlay频谱共享方式的功率控制路由算法。以着色图模型分析认知用户的信道与路由策略;给出了认知用户在接入时功率控制与累积干扰的约束。利用贪婪搜索算法为端到端通信选择具有最小累积干扰最短路径以及路径上的信道,同时通过功率控制避免对主用户产生有害干扰。NS2仿真结果表明,与CARS算法相比,本文算法获得的网络通信性能有较大的提高,网络吞吐量提高了近43.3%,丢包率和端到端平均时延分别降低了近33%和46%,表明了本文算法的有效性,且更适合混合式CRN。

参 考 文 献

[1] MITOLA III J. Cognitive radio an integrated agent architecture for software defined radio[D]. Kista: Royal Institute of Technology (KTH), 2000.

- [2] HUANG Y Q, WANG J, JIANG H. Modeling of learning inference and decision-making engine in cognitive radio [C]//The 2th International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing. Wuhan: IEEE Computer Society, 2010: 258-261.
- [3] CESANA M, CUOMO F, EKICI E. Routing in cognitive radio networks: challenges and solutions[J]. Ad Hoc Networks, 2011(9): 228-248.
- [4] KONDAREDDY Y R, AGRAWAL P. A graph based routing algorithm for multi-hop cognitive radio networks[C]// Proceedings of the 4th Annual International Conference on Wireless Internet. Maui, HI, USA: ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2008: 63-68.
- [5] ZHOU X, LIN L, WANG J, et al. Cross-layer routing design in cognitive radio networks by colored multigraph model[J]. Wireless Personal Communications, 2009, 49(1): 123-131.
- [6] 李洋, 董育宁, 赵海涛. 认知Mesh网络的动态分层图路由模型及路由策略[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(8): 1975-1979.
- LI Yang, DONG Yu-ning, ZHAO Hai-tao. Dynamicayered-graph routing model and routing policy in cognitive radio mesh networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(8): 1975-1979.
- [7] GALINDO-SERRANO A, GIUPPONI L. Distributed Q-learning for aggregated interference control in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(4): 1823-1833.
- [8] DING L, MELODIA T, BATALAMA S N, et al. Cross-layer routing and dynamic spectrum allocation in cognitive radio Ad Hoc networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(4): 1969-1979.
- [9] SHI Y, HOU Y T, ZHOU H B, et al. Distributed cross-layer optimization for cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(8): 4058-4069.
- [10] CMU-MONARCH group, Carnegie Mellon University. Cognitive radio cognitive network simulator[EB/OL]. [2011-07-27]. <http://stuweb.ee.mtu.edu/~ljialian/crcn.Zip>.

编辑 税红