

基于最短时延的认知无线电网络安全路由算法

薛楠 周贤伟 林琳 周健

(北京科技大学信息工程学院通信工程系 北京 100083)

摘 要 针对认知无线电网络可用频谱动态变化和路由过程中出现的安全问题,提出将最短数据传输时延和高安全等级路由作为选路标准,设计了一种跨层路由选择算法。算法通过优化转发节点个数和各转发节点接收、发送数据信道来减少数据传输时延。通过选择具有高安全级别的转发节点来保证路由的安全性。理论分析表明算法是高效和可行的。它的时间复杂度是 $O(N^2)$,其中 N 是拓扑图中节点的个数。

关键词 认知无线电网络,跨层路由选择算法,安全路由,最短时延

中图法分类号 TP309.2 **文献标识码** A

Security Routing Algorithm Based on Shortest Delay for Cognitive Radio Networks

XUE Nan ZHOU Xian-wei LIN Lin ZHOU Jian

(Department of Communication Engineering, College of Information Engineering, University of Science and Technology in Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract The paper proposed a cross-layer routing selection algorithm, which considers the shortest delay and highest security as routing selection standard. The routing algorithm aims to solve the problem of both the dynamic spectrum and security problem in cognitive radio networks. The Algorithm reduces the data transfer delay by optimizing the number of forwarding nodes and selecting channel for transmitting and receiving, and ensures routing security by choosing a forwarding node of high level security. The results of theory analysis show that the algorithm is efficient and feasible. The computing complexity of the algorithm is $O(N^2)$, where N is the number of nodes in the network topology graph.

Keywords Cognitive radio networks, Cross-layer routing selection algorithm, Secure routing, Shortest delay

随着无线通信技术的迅猛发展,可用频谱资源日益短缺。为了解决这个问题,1999年瑞典皇家工学院的 Mitola 博士提出认知无线电概念^[1]。它是一种新的智能无线技术,其通过检测那些处于空闲状态的频谱,在不影响授权用户工作的前提下智能地选择和利用这些空闲频谱,从而极大地改善了现有低效的频谱资源利用率^[2]。当前,人们对这种技术已经展开了广泛的研究^[3]。

认知无线电路由技术是其中的一个研究热点。由于在认知无线网络中,可用频谱具有不确定性,因此需要将网络层和 MAC 层联合起来进行跨层路由设计,即在路由选择的同时,选择邻节点间的可用数据信道^[4]。当前认知无线网络路由协议研究主要分为两类,集中式和分布式。集中式,即在掌握网络全部节点的频谱可用性和拓扑结构的前提下求出最优路由^[5,6];分布式,即采用按需路由和频谱分配相结合的方式建立路由^[7,8]。

认知无线网络安全问题也是一个研究热点。其中不但包括无线网络固有的安全问题,还包括引入认知无线电技术以后带来的新安全问题,如,低成本连锁反应攻击(Low Cost Ripple effect Attack, LORA)、寄生虫攻击、Jellyfish 攻击等。

这些安全问题有些是转发节点自身产生的,如丢包自私行为和数据包篡改等^[9]。因此选择高安全级别的路由就显得尤为重要。

本文将时延最短和高安全等级路由作为选路标准,设计了一种安全路由选择算法。首先,设计一种网络拓扑图;然后,提出本文设计的路由算法。理论分析表明该算法是高效和可行的。

本文第 1 节介绍认知无线网络路由相关研究工作;第 2 节描述认知无线网络工作模型;第 3 节介绍认知无线网络拓扑图;第 4 节详述路由选择算法;第 5 节是算法性能分析;第 6 节是举例说明;最后总结全文。

1 相关研究工作

当前,已提出几种认知无线网络跨层路由设计方法。

文献[8]提出转发节点使用轮循转发方式收发各频段的数据,通过这种方式可以减少数据传输时延,但其实现过于复杂。

文献[7]提出通过减少节点间的频谱切换次数和转发节点个数来减少数据传输时延,并且提出将节点间切换可用信

到稿日期:2009-03-02 返修日期:2009-04-30 本文受国家自然科学基金项目(No. 60773074)认知无线电安全关键技术研究资助。

薛楠(1978—),男,博士研究生,主要研究方向为信息安全、认知无线网络安全、组播安全、传感器网络安全, E-mail: xuenanhello@163.com; 周贤伟(1963—),男,博士后,教授,博士生导师,主要研究方向为通信网安全、宽带移动通信和组播安全等;林琳(1983—),女,博士研究生,主要研究方向为认知无线网络安全、传感器网络安全;周健(1979—),男,博士研究生,主要研究方向为认知无线网络安全、传感器网络安全。

道的频繁程度作为衡量路由鲁棒性的标准进行路由选择,但文中并没有给出具体的实现方法和测量方法。

文献[6]提出以混合整数线性规划形式表示需要优化的设计目标,通过这种方法计算出一条在多目标情况下,可避免邻跳干扰的公平路由,但其考虑的网络环境过于简单,并不适合应用在复杂的网络环境中。

文献[10]提出基于冲突图的路由设计方法。冲突图的顶点对应于网络中的单跳链路,如果两个单跳链路不同时处于活动状态,则在它们对应的两个顶点之间连一条边。结合冲突图将无冲突的时间和信道调度问题转化为最大独立集问题。该方案时间复杂度高并不实用。

文献[11]提出基于分层图的路由设计方法。分层图的每一层对应于一个信道。顶点对应网络的节点和子节点。与节点和其子节点相连的边是接入边。连接同层两个不同子节点的边是水平边,水平边表示两个节点间潜在的邻居关系和可用的公共信道。垂直边连接同一个节点的不同子节点,它不但表示节点的空闲接口数对分层图拓扑结构的影响,也表示这些节点可通过在不同信道接收和发送信息来避免邻跳干扰。对边赋权之后,就可以进行路由选择和接口分配了。这种方法没有对路由指标做具体优化,并且实现复杂。

文献[8]采用分布式设计方法,其他文献都采用集中式设计方法。它们都从不同方面来提高网络的路由性能,但都没有考虑到认知无线网络的路由安全问题。本文设计的路由选择算法不但要求数据传输时延最短,而且将高路由安全等级作为选路标准,力求选择一条传输时延最少和高安全等级的路由(shortest delay highest security routing, SDHSR)。

2 认知无线网络工作模型

我们研究的认知无线网络工作模型如图1所示。认知无线网络由两部分组成,主用户网络和认知用户网络。主用户网络由主用户组成,其有自己的授权频段。认知用户网络由认知节点和基站组成,是一种集中式网络。认知用户网络中存在两种可用信道^[11],控制信道和数据传输信道。控制信道用于传输控制信息和频谱可用性信息,其采用非授权频段,是一种固定信道。数据传输信道是认知节点利用频谱检测技术检测出来的,由空闲授权频段组成的信道,用于传输大量数据,这种信道可能由于主用户出现而需要经常改变。每个认知节点可以有多个数据传输信道。每个认知节点有唯一的身份标识符(Identification, ID)和一个安全等级,节点安全等级越高通过其转发的数据就越安全。每个认知节点有一个数据收发器,用来在数据信道收发数据。基站掌握整个网络中认知节点的位置信息、安全等级和频谱可用性信息,基站负责向认知节点发送频谱切换策略和控制信息。基站和认知节点通过控制信道直接联系。由于可用频谱是动态变化的,基站和认知节点间不一定存在共享的数据传输信道,因此它们之间不一定能通过数据信道直接传输数据。当网络中认知节点位置信息、安全等级和频谱可用性信息发生变化时,认知节点及时将变化情况向基站汇报。当认知节点间需要建立路由连接时,源节点在控制信道向基站发送路由请求信息,基站应用路由选择算法计算出可用路由后,将路由信息发送给源节点。这样认知节点间就能在数据传输信道沿着选定路由进行数据传输。

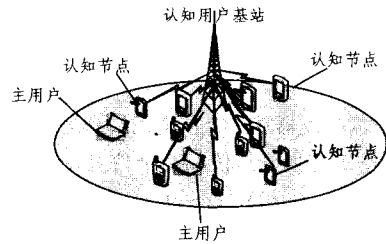


图1 认知无线网络工作模型图

3 认知用户网络拓扑图

为了进行路由选择,提出了一种网络拓扑图。从拓扑图中应用本文设计的路由选择算法就可以找到一条从源节点到目的节点传输时延最少、安全级别相对较高的路由。

将认知无线网络中的认知节点、可用空闲信道、认知节点收发数据使用的信道和认知节点内的信道切换过程用图 $G=(V, E)$ 来表示,其中 V 表示顶点集,对应网络中的认知节点正在使用某条数据信道接收或发送数据; E 表示边集,对应网络中认知节点间共享的可用信道或同一认知节点收、发数据的信道切换过程。

点表示认知节点正在使用某条数据信道。比如,节点 v_i^m 表示认知节点 v_i 在使用 m 信道接收或发送数据。

边分为点间边和点内边。不同认知节点间连线形的边叫点间边,比如, v_i^m 和 v_j^n 连线形成边 $e_{ij}^{m,n}$, $e_{ij}^{m,n}$ 表示节点 v_i 和节点 v_j 使用 m 信道建立的一个连接;同一个认知节点使用不同信道的两个节点间连线形成的边叫点内边,比如, v_i^m 和 v_i^n 间连线形成的边 $e_{ii}^{m,n}$, $e_{ii}^{m,n}$ 表示节点 v_i 在收、发数据时需要在 m, n 信道间进行信道切换。如认知节点在收发数据时不需要信道切换,则用一个节点表示即可,比如,节点 v_i 使用 m 信道收、发数据可表示为 v_i^m 。

图2是一个表示认知无线网络节点相互连接关系的网络拓扑图。图中存在4个认知节点, a 节点的可用信道是(2, 4), b 节点的可用信道是(2, 3, 4), c 节点的可用信道是(1, 2, 3, 4), d 节点的可用信道是(1, 2)。各个节点间通过共享的可用信道连接。每个节点的端口可以在不同信道间切换。

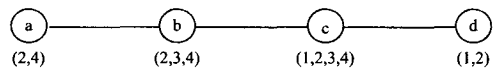


图2 节点连接关系网络拓扑图

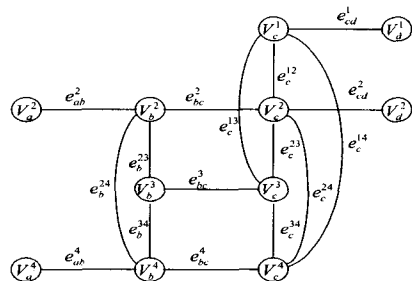


图3 适用于SDHSR算法的认知无线网络拓扑图

图3是按照上文定义由图2转化而来适用于SDHSR算法的认知无线网络拓扑图。 V_a^2 表示节点 V_a 正在使用2信道。 V_b^2 表示节点 V_b 正在使用2信道, e_{ab}^2 表示节点 V_a 和 V_b 使用2信道建立连接。 $e_{bc}^{2,3}$ 表示节点 V_b 在2,3信道间进行信道切换。

4 基于最短时延的认知无线网络安全路由选择算法

认知节点的收发器从一个信道切换到另一个信道产生非零延迟,这种信道切换延迟依靠两个信道在无线频谱上的相对位置关系。例如,在20MHz~3GHz的频谱范围内,收发器的工作频段每改变10MHz需要10ms的调节时间^[12],因此节点内的信道切换时延不可忽略。由文献[7]可知,在认知无线网络中源节点到目的节点的数据传输时延由转发节点间的数据传输时延和转发节点收、发数据的信道切换时延组成。

如式(1)所示, T 表示数据从源节点发送到目的节点的总传输时延; t_{hop}^i 表示第*i*跳的传输延迟, $\sum_{i=1}^n t_{hop}^i$ 表示在数据传输过程中,全部*n*跳传输延迟的总和; t_{sw}^j 表示第*j*个转发节点的信道切换延迟, $\sum_{j=1}^{n-1} t_{sw}^j$ 表示在数据传输过程中,全部*n-1*个转发节点信道切换延迟的总和。

$$T = \sum_{i=1}^n t_{hop}^i + \sum_{j=1}^{n-1} t_{sw}^j \quad (1)$$

下面引入Dijkstra算法^[13]的设计思想,并结合本文提出的路由选择标准设计一种新的路由选择算法。

为了便于算法表述,作如下定义:

$l(v_i^m)$ 表示通过SDHSR算法选出的从*S*到 v_i^m 的最短路径的长度;

$p(v_i^m)$ 表示通过SDHSR算法选出的从*S*到 v_i^m 的最短路径上点 v_i^m 的前一个点;

$\omega(v_i^m, v_j^m)$ 表示节点 v_i^m, v_j^m 连线的边长, $\forall v_i^m, v_j^m \in V(G)$;

边长表示认知节点间的数据传输时延和认知节点内的信道切换时延。 $\omega(e_{i,j}^m)$ 表示边 $e_{i,j}^m$ 的边长,即节点 v_i 和节点 v_j 使用信道*m*传输数据的时延, $\omega(e_{i,j}^m) > 0, i \neq j$ 。 $\omega(e_{i,i}^m)$ 表示边 $e_{i,i}^m$ 的边长,即为了转发数据,节点 v_i 在*m, n*信道间进行信道切换的时延。 $\omega(e_{i,i}^m) > 0, m \neq n$ 。

$Sec(v_i^m)$ 表示节点 v_i^m 的安全等级,对于节点 v_i^m, v_j^m ,如果*i=j*,则 v_i^m, v_j^m 具有相同的安全等级。 $Sec(v_i^m) > 0$

安全等级表示认知节点的安全性。认知节点的安全等级越高,则由其转发的数据越安全。

$P(v_i^m)$ 表示通过本文算法选出的从*S*到 v_i^m 的最短路径的安全等级,它等于整个路径上全部节点中安全等级最小的节点的安全等级^[14]。

高安全等级路由在本文中指多条时延最短的路由中安全等级最高的路由。

在进行路由选择前,基站按照源节点提出的路由安全要求将低于安全要求的认知节点从网络拓扑图中排除。然后,按照本文提出的路由选择算法进行路由选择和接口分配。

第1步 设 $l(S) = 0, l(v_i^m) = \infty, \forall v_i^m \in V(G) \setminus S$ 。设 $Sec(S) = \infty, Sec(D) = \infty, P(S) = \infty$ 。设 $R = \emptyset$ 。

第2步 找出一个满足 $l(v_i^m) = \min_{v_j^m \in V(G) \setminus R} l(v_j^m), v_i^m \notin R$ 。

如果满足上述条件的点 v_i^m 不止一个,先按照下标升序选择 $P(v_i^m)$ 最大的第一个点,如果满足条件的点有多个,再按照上标的升序进行选择。

第3步 设 $R = R \cup \{v_i^m\}$ 。

第4步 如果 $D \in R$,算法结束,输出从*D*到*S*的最优路径:

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

对于每一个 $v_j^m \in R$ 的点,假设在 v_i^m 和 v_j^m 间有单跳连接。

如果 $l(v_j^m) < l(v_i^m) + \omega(v_j^m, v_i^m)$,或者 $l(v_j^m) = l(v_i^m) + \omega(v_j^m, v_i^m)$ 并且 $P(p(v_j^m)) \geq P(v_i^m)$,那么返回第2步;否则,设 $l(v_j^m) = l(v_i^m) + \omega(v_j^m, v_i^m), p(v_j^m) = v_i^m$,如果 v_j^m 的安全级别 $Sec(v_j^m)$ 是 $l(v_j^m)$ 路径中最小的一个,则 $P(v_j^m) = Sec(v_j^m)$,然后返回第2步。

5 算法分析

本算法的设计思路是在保证路由时延最短的情况下,选定路由的安全等级是几条时延最短路由中最高的。

1) 本算法的计算复杂度为 $O(N^2)$

对拓扑图中*N*个节点的初始化过程是 $O(N)$ 次迭代,对拓扑图中*N*个节点都求 $l(v_i^m) = \min_{v_j^m \in V(G) \setminus R} l(v_j^m)$ 需要*N*次迭代,每次迭代包括从 $V(G) \setminus R$ 的节点中找到 $l(v_i^m) = \min_{v_j^m \in V(G) \setminus R} l(v_j^m)$ 所需的 $O(N)$ 次计算和*W*个与 v_i^m 直接相连的点 $v_j^m, v_j^m \in R$ 的 $O(W)$ 次比较, $(W < N)$;如果有*X*个节点的 $l(v_j^m) = l(v_i^m) + \omega(v_j^m, v_i^m)$,则还包括 $O(X)$ 个 $P(p(v_j^m))$ 与 $P(v_i^m)$ 的比较, $(X < W)$ 。算法时间复杂度为 $O(n) + n[O(n) + O(W) + O(X)] = O(n^2)$ 。

2) 数据传输时延最短

本文将数据在节点间的传输时延和每个转发节点收发数据的频谱切换时延分别设为点间边和点内边的边长。求源节点到目的节点间的最短时延即是求源节点到目的节点的最短路径。本算法采用Dijkstra算法的设计思想,因此由Dijkstra算法的证明来保证传输时延最短。

3) 路由安全性高

首先,根据路由安全要求从网络拓扑图中排除不符合安全要求的节点,然后,在第4步更新 v_j^m 前面的节点时,判断拓扑图中与 v_j^m 相连的其他节点所在路由的安全等级,选出一条安全等级相对最大的路由,则这条路由中与 v_j^m 相连的节点就是 v_j^m 前面的邻节点,通过这种方法可以保证路由的高安全等级。

当 $l(v_j^m) = l(v_i^m) + \omega(v_j^m, v_i^m)$ 时,即两条路由长度相等时,判断 v_j^m 前一个节点路由的安全等级和 v_i^m 所在路由的安全等级的大小;当 $P(p(v_j^m)) < P(v_i^m)$ 时,则将 v_i^m 变为 v_j^m 前一个邻节点,如果 v_j^m 的安全等级 $Sec(v_j^m)$ 是 $l(v_j^m)$ 路径中最小的一个,则 $P(v_j^m) = Sec(v_j^m)$ 。

6 举例说明

下面给出本文算法的一个例子,图4是一个认知无线网络节点连接关系拓扑图,图5是由图4转化而来适用于SDHSR算法的认知无线网络网络拓扑图,图5中有6个节点,设6个节点都满足安全级别需求,各个节点的安全级别和各条边的边长如表1所列。整个认知无线网络存在4条可用授权信道,设每个节点只有一个信号收发器,根据所处地理位置和不同的环境其可用信道数在 $0 \leq N \leq 4$ 范围内。表2为使用本文算法求从源节点*S*到目的节点*D*的最优路径的过程。求得的最优路径如图5黑粗线所示。

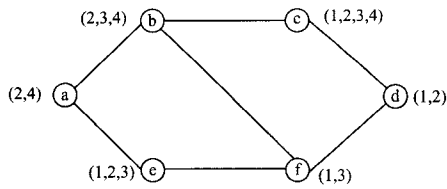


图4 认知无线网络节点连接关系拓扑图实例

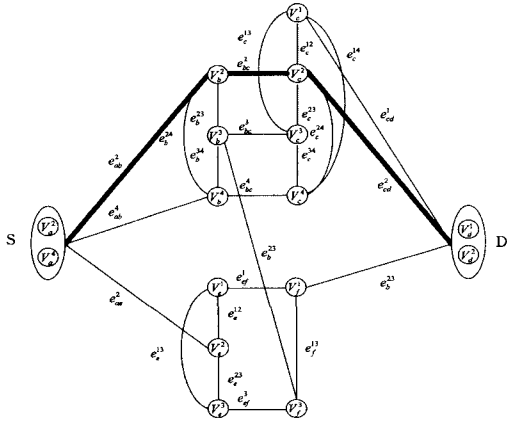


图5 适用于SDHSR算法的认知无线网络拓扑图实例

表1 图5中各节点安全等级及各边边长

$Sec(v_a) = \infty$	$\omega(e_{ab}^2) = 6$	$\omega(e_{bc}^{23}) = 1$	$\omega(e_{bc}^{24}) = 6$	$\omega(e_{cd}^{12}) = 1$	$\omega(e_{cd}^{14}) = 5$
$Sec(v_b) = 3$	$\omega(e_{ab}^4) = 7$	$\omega(e_{bc}^{34}) = 1$	$\omega(e_{bc}^3) = 7$	$\omega(e_{cd}^{23}) = 1$	$\omega(e_{cd}^2) = 3$
$Sec(v_c) = 1$	$\omega(e_{ae}^2) = 8$	$\omega(e_{bc}^{24}) = 2$	$\omega(e_{bc}^4) = 6$	$\omega(e_{cd}^{34}) = 1$	$\omega(e_{cd}^4) = 8$
$Sec(v_d) = \infty$		$\omega(e_{bf}^{12}) = 1$	$\omega(e_{bf}^3) = 8$	$\omega(e_{cf}^{13}) = 2$	
$Sec(v_e) = 2$		$\omega(e_{ce}^{23}) = 1$	$\omega(e_{cf}^2) = 5$	$\omega(e_{cf}^4) = 2$	
$Sec(v_f) = 2$		$\omega(e_{cf}^{13}) = 2$	$\omega(e_{cf}^3) = 4$	$\omega(e_{cf}^4) = 3$	
					$\omega(e_{ef}^{13}) = 2$

表2 算法寻路过程

循环次数	各节点距源节点的最少跳数	每轮循环 R 的变化情况	每轮循环各参数的变化情况
1	$l(S) = 0$	$R = \{S\}$	$l(v_b^2) = 6 \quad p(v_b^2) = S \quad P(v_b^2) = 3$ $l(v_b^4) = 7 \quad p(v_b^4) = S \quad P(v_b^4) = 3$ $l(v_e^2) = 8 \quad p(v_e^2) = S \quad P(v_e^2) = 2$ $l(v_b^3) = 7 \quad p(v_b^3) = v_b^2 \quad P(v_b^3) = 3$
2	$l(v_b^2) = 6$	$R = \{S, v_b^2\}$	$l(v_c^2) = 12 \quad p(v_c^2) = v_b^2 \quad P(v_c^2) = 1$ $l(v_c^3) = 14 \quad p(v_c^3) = v_b^2 \quad P(v_c^3) = 1$ $l(v_f^1) = 9 \quad p(v_f^1) = v_e^2 \quad P(v_f^1) = 2$
3	$l(v_b^3) = 7$	$R = \{S, v_b^2, v_b^3\}$	$l(v_f^3) = 15 \quad p(v_f^3) = v_b^3 \quad P(v_f^3) = 2$ $l(v_c^4) = 13 \quad p(v_c^4) = v_b^4 \quad P(v_c^4) = 1$ $l(v_e^1) = 9 \quad p(v_e^1) = v_e^2 \quad P(v_e^1) = 2$ $l(v_e^3) = 9 \quad p(v_e^3) = v_e^2 \quad P(v_e^3) = 2$
4	$l(v_b^4) = 7$	$R = \{S, v_b^2, v_b^3, v_b^4\}$	$l(v_f^4) = 14 \quad p(v_f^4) = v_e^1 \quad P(v_f^4) = 2$ $l(v_e^3) = 13 \quad p(v_e^3) = v_e^3 \quad P(v_e^3) = 2$ $l(v_c^1) = 13 \quad p(v_c^1) = v_e^2 \quad P(v_c^1) = 1$ $l(v_c^3) = 13 \quad p(v_c^3) = v_e^2 \quad P(v_c^3) = 1$
5	$l(v_c^2) = 8$	$R = \{S, v_b^2, v_b^3, v_b^4, v_c^2\}$	$l(v_c^3) = 13 \quad p(v_c^3) = v_e^2 \quad P(v_c^3) = 1$ $l(D) = 15 \quad p(D) = v_c^2 \quad P(D) = 1$
6	$l(v_c^1) = 9$	$R = \{S, v_b^2, v_b^3, v_b^4, v_c^2, v_c^1\}$	
7	$l(v_e^3) = 9$	$R = \{S, v_b^2, v_b^3, v_b^4, v_c^2, v_c^1, v_e^3\}$	
8	$l(v_c^3) = 12$	$R = \{S, v_b^2, v_b^3, v_b^4, v_c^2, v_c^1, v_e^3, v_c^3\}$	
9	$l(v_f^1) = 13$	$R = \{S, v_b^2, v_b^3, v_b^4, v_c^2, v_c^1, v_e^3, v_c^3, v_c^4, v_f^1\}$	
10	$l(v_c^4) = 13$	$R = \{S, v_b^2, v_b^3, v_b^4, v_c^2, v_c^1, v_e^3, v_c^3, v_c^4, v_f^1, v_c^4\}$	
11	$l(v_c^3) = 13$	$R = \{S, v_b^2, v_b^3, v_b^4, v_c^2, v_c^1, v_e^3, v_c^3, v_c^4, v_f^1, v_c^4, v_c^3\}$	
12	$l(v_c^4) = 13$	$R = \{S, v_b^2, v_b^3, v_b^4, v_c^2, v_c^1, v_e^3, v_c^3, v_c^4, v_f^1, v_c^4, v_c^3, v_c^4\}$	

$$13 \quad l(v_f^1) = 14 \quad R = \{S, v_b^2, v_b^3, v_b^4, v_c^2, v_c^1, v_e^3, v_c^3, v_c^4, v_f^1\}$$

$$14 \quad l(D) = 15 \quad R = \{S, v_b^2, v_b^3, v_b^4, v_c^2, v_c^1, v_e^3, v_c^3, v_c^4, v_f^1, D\} \quad \{D, v_c^2, v_b^2, S\}$$

结束语 本文设计了一种基于最短时延的安全路由选择算法,将路由安全性引入认知无线网络路由选择算法中,以此保证数据传输时延最短和数据安全传输。由理论分析可知这种路由选择算法是安全、高效和可行的。算法的时间复杂性是 $O(n^2)$ 。使用该算法的前提是已知每跳节点间的数据传输时延和信道切换时延。但在复杂的网络环境中如何准确求出这两种时延还需要进一步研究。

参考文献

- [1] Mitola J, Maquire G J. Cognitive radios; making software radios more personal[J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18
- [2] Haykin S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Area in Communication, 2005, 23(2): 201-220
- [3] Ghasemi A, Sousa E S. Spectrum sensing in cognitive radio networks; Requirements, challenges and design trade-offs[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(4): 32-39
- [4] Gong M X, Midkiff S E, Shiwen M. Design principles for distributed channel assignment in wireless ad hoc networks[C] // 2005 IEEE International Conference on Communications. Seoul, South Korea, 2005; 3401-3406
- [5] Kyasanur P, Vaidya N H. Protocol design challenges for multi-hop dynamic spectrum access networks[C] // 2005 1st IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks. Baltimore, MD, USA, 2005; 645-648
- [6] Miao M, Tsang D H K. Joint spectrum sharing and fair routing in cognitive radio networks[C] // 2008 5th IEEE Consumer Communications and Networking Conference. Las Vegas, NV, USA, 2007; 978-982
- [7] Krishnamurthy S, Thoppian M, Venkatesan S, et al. Control channel based MAC-layer configuration, routing and situation awareness for cognitive radio networks[C] // MILCOM 2005. 2006 IEEE Military Communications Conference. Atlantic City, NJ, USA, 2005; 455-460
- [8] Yang Z K, Cheng G, Liu W, et al. Local coordination based routing and spectrum assignment in multi-hop cognitive radio networks[J]. Mobile Networks and Applications, 2008, 13(1): 67-81
- [9] Burbank J L. Security in Cognitive Radio Networks: The Required Evolution in Approaches to Wireless Network Security[C] // 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, CrownCom 2008 Singapore. Singapore, 2008; 1-7
- [10] Wang Q W. Route and Spectrum Selection in Dynamic Spectrum Network[C] // 2006 3rd IEEE Consumer Communications and Networking Conference. Las Vegas, NV, USA, 2006; 625-629
- [11] Xin C S, Xie B, Shen C C. A novel layered graph model for topology formation and routing in dynamic spectrum access networks[C] // 2005 1st IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks. Baltimore, MD, USA, 2005; 308-317
- [12] TCI 8067 Spectrum Processor Data Specification[OL]. <http://www.tcibr.com/PDFs/8067webs.pdf>, 2000
- [13] Bondy J A, Murty S R. Graph theory with application[M]. The Macmillan Press LTD, 1976; 45-78
- [14] 王建新, 张亚男, 王伟平, 等. 移动自组网中基于声誉机制的安全路由协议设计与分析[J]. 电子学报, 2005, 33(4): 596-601