

车联网中基于贝叶斯决策的垂直切换方法研究

范存群, 王尚广, 孙其博, 邹华, 杨放春

(北京邮电大学 网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876)

摘要: 车辆需要在车联网的异构无线网络环境下进行垂直切换, 针对垂直切换技术普遍不能支持 WAVE, WiMAX 和 3G cellular 间的垂直切换这一问题, 提出了一种基于贝叶斯决策的垂直切换算法。首先, 根据接入网络的信号强度、传输速率、误码率和网络阻塞率以及车辆终端的速度和运动趋势建立多条件相关的切换概率分布, 计算出切换先验概率; 然后通过贝叶斯决策算法计算后验概率并进行决策分类, 从而选取最优网络接入。仿真实验结果表明, 该算法不仅有效地实现 WAVE, WiMAX 和 3G cellular 无线接入技术之间的垂直切换, 而且避免了乒乓效应, 保证了网络及时更新。

关键词: 车联网; 无线异构网; 贝叶斯决策; 垂直切换

中图分类号: TN929

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)07-0034-08

IoV vertical handoff research based on Bayesian decision

FAN Cun-qun, WANG Shang-guang, SUN Qi-bo, ZOU Hua, YANG Fang-chun

(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Vehicles need vertical handoffs in the heterogeneous wireless network environment of IoV, but current vertical switching technologies generally cannot support vertical handoff among WAVE, WiMAX and 3G cellular. In order to overcome this problem, a vertical handoff method with Bayesian decision was proposed. Firstly, according to the signal strength, transmission rate, bit error rate, blocking probability, vehicle speed and movement trend, the handoff probability distribution of Multi-condition was established and the handoff prior probability was calculated. Secondly, Bayesian decision method was used to obtain the handoff posterior probability and to classify decisions, which made vehicles access the best network. Simulation results show that the proposed method can not only achieve the vertical handoff among WAVE, WiMAX and 3G cellular, but also avoid the ping-pong effect and ensure the network update rate.

Key words: Internet of vehicles; heterogeneous wireless networks; Bayesian decision; vertical handoff

1 引言

车联网也称为车辆物联网, 是伴随物联网技术及其应用示范研究的一个热点。车联网中由于车辆自身移动性的特点使网络拓扑变化较快, 从而导致需要较多的网间切换, 频繁的切换会使网络稳定性较差, 这将严重影响到终端上的业务质量, 并且切

换决策判定是垂直切换中一个非常重要的部分, 直接决定了切换后网络的服务质量和稳定情况, 因此在车联网环境中, 如何保障异构无线网络间的有效垂直切换具有重要的研究意义。

目前, 可以应用于车辆节点的无线接入技术主要有^[1]: 1) 802.11p/WAVE(wireless access in the vehicular environment)主要可用于车载无线通信, 充

收稿日期: 2012-08-27; 修回日期: 2013-01-09

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划基金资助项目(NCET100263); 教育部博士点基金资助项目(20110005130001); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2011AA01A102); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2009CB320406); 中国博士后科学基金资助项目(2011M500226); 国家自然科学基金资助项目(61272521)

Foundation Items: New Century Talent Supporting Project of Education Ministry (NCET100263); Ph D Programs Foundation of Ministry of Education (20110005130001); The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2011AA01A102); The National Basic Research Program of China (973 Program)(2009CB320406); China Postdoctoral Science Foundation (2011M500226); The National Natural Science Foundation of China (61272521)

当 DSRC(dedicated short range communications)或者面向车载通信的基础,支持更先进的热点切换、移动环境,安全性以及身份认证,传输距离可以达到 1000 m; 2) 802.16/WiMAX(worldwide interoperability for microwave access)是一种新兴宽带无线接入技术,数据传输速率高,覆盖距离 50 km,支持节点 160 km/h 的移动速度; 3) 3G 蜂窝技术,覆盖范围广,无缝切换,支持高速移动的节点,但是传输速率有限。在上述无线接入技术中, 802.11p 主要用于车与车之间 (V2V, vehicle-to-vehicle) 和车与路边基站之间 (V2R, vehicle-to-roadside) 通信,通常作为城市环境下车辆自组网 (VANET, vehicular ad hoc network) 的无线通信技术,如图 1(a)所示。在郊区时,一般道路较宽,车辆稀疏,车辆可以通过 WiMAX 或者 3G cellular 接入网络,如图 1(b)所示。而在偏远地区,车辆孤立,只有 3G cellular 可以覆盖到,如图 1(c)所示。

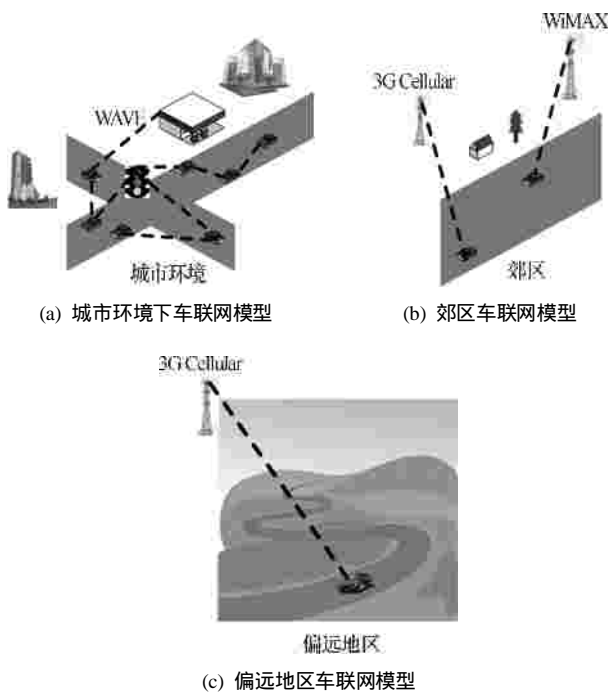


图 1 异构无线网下车联网模型

目前,针对异构无线网络下的垂直切换技术,已取得了一些相关研究成果。为了避免乒乓效应(当网络垂直切换时,如果所处的 2 个网络或多个网络信号强度相差不大时终端节点会在不同的基站之间发生来回的切换,称之为乒乓效应), PANDE M, BUDDHIKOT M 等人^[2,3]提出了迟滞电平和驻留定时器算法, 2 个算法都以接收器接收到的信号强

度 (RSS) 作为依据,其中,迟滞电平算法是当新接收的网络信号强度达到接入要求并且比已接入网络的信号强度大于设定的阈值时发生网络切换。驻留定时器算法则是设定了一个时间阈值,当接收到的信号强度达到某一值时并且在设定的时间阈值内强度没有明显减弱,则进行网络切换。这 2 个算法虽然避免了乒乓效应,但由于迟滞电平和驻留定时器采用静态的数值和预置的方式,这种固定且单一切换时机选择在很大程度上推迟了切换触发,降低了切换效率。

近年来许多研究者^[4-12]在上述 2 种切换算法的基础上进行了改进,取得了较好的研究成果。刘敏等^[4,5]给出了常用的迟滞电平算法和驻留定时器算法中切换判定条件的形式化表达,对其进行了性能分析,并在此基础上根据终端节点的运动趋势,提出了一种自适应的垂直切换算法,自适应地调节切换触发条件。刘侠等人^[6]引入了预判方法,采用前向差分预测能够较准确地预测出下一时刻的信号强度,以提高切换触发速度和切换判决精度,然后采用模糊逻辑的方法,以接收信号强度、预测信号强度及可用带宽作为网络参量设计模糊逻辑控制器,进而采用归一化的方法改进模糊逻辑系统,得到网络的综合性能值进行垂直切换判决。康亚博等^[7]提出了一种终端预测的切换算法。给出了网络代价函数、归一化网络参数、网络参数预测算法和垂直切换基本流程来确保垂直切换的合理性。DONG M 和 MAODE M^[8]第一次引入了 WiMAX 网络带宽的计算,基于网络服务质量提出了 WLAN 与 WiMAX 网络垂直切换算法。SHAFIEE K 等人^[9]对终端到基站的距离和终端的速度对传输成本和切换时间花费进行分析,并证明了 WLAN, 3G cellular 和 ad hoc 的组合网络在传输成本和切换时间花费上优于其他网络组合的策略。潘甦等人^[10]指出未来无线通信系统将融合多种异构无线接入网络以提供泛在业务。文中为异构无线网络提出了等效带宽的概念,以表达用户在不同系统中占用的资源,并在此基础上将等效带宽用到异构网络切换中,同时将马尔科夫决策过程引入切换算法。此外,还有基于不对称 QoS 映射机制垂直切换算法^[11]和基于标量的卡尔曼滤波的垂直切换算法^[12]。

尽管上述研究^[2-12]取得了较好的研究成果,但由于车联网网络环境的独特性,以及对网络相关状态和终端运动状态多条件下的考虑还不够充分,一

些简单的加权策略并不能真正意义上体现车辆终端对网络的需求。并且上述研究成果缺乏在车联网环境下的验证,更重要地是,上述研究中对 WAVE, WiMAX 和 3G cellular 网络垂直切换的研究还没有涉及。因此,为解决上述问题,本文把车联网环境下 WAVE, WiMAX 和 3G cellular 技术的垂直切换作为研究目标,并在此基础上优化适合于车联网中车辆终端的垂直切换算法。文中根据 WAVE 的特点,给出了相关的网络属性参数分析和计算,根据网络属性参数、运动趋势、速度等条件的相关分布关系得出切换先验概率分布,再通过贝叶斯决策算法得出相应的切换后验概率,并对决策分类,根据决策分类结果得到最优的目标网络进行切换。仿真结果表明,本文所提算法可有效地实现 WAVE, WiMAX 和 3G cellular 无线接入技术间的垂直切换与水平切换,并且在切换次数,无线网络更新时效性,切换的有效性上都取得了较好的效果。

2 基于贝叶斯决策的垂直切换方法

本文所提出的基于贝叶斯决策的垂直切换方法如图 2 所示,首先对网络属性和终端运动状态进行分析,得到在基于单个条件下各自的切换概率;再通过多条件相关分布函数得到发生切换的先验概率,经过贝叶斯决策算法得到后验切换概率和后验比较概率;最后通过对后验比较概率与后验切换概率进行比较给出适合切换的目标网络,并对可切换的目标网络进行后验切换概率的比较,从而选择最优目标网络进行切换。

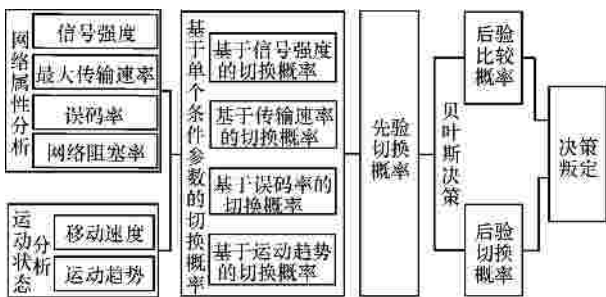


图 2 基于贝叶斯决策的垂直切换方法

2.1 网络属性参数定义和分析

针对影响异构无线网垂直切换的网络属性参数:信号强度、传输速率、误码率和网络阻塞率,本节给出 4 种网络参数的具体分析。

1) 信号强度:信号强度作为触发垂直切换一个最基本的条件,信号强度反映了当前信道的质量。

信号强度表达式为

$$RSS(d) = K_1 - K_2 \lg(d) + u(x) \quad (1)$$

其中, K_1 是网络发送功率, K_2 是网络路径损失因子, d 表示终端与接入点距离, $u(x)$ 为服从参数 $(0, s_1)$ 的高斯随机分布函数。

2) 最大传输速率:传输速率是网络选择的一个重要指标,直接影响到终端上业务的质量。根据香农定理可知信道的最大传输速率如下

$$C = W \lg(1 + \frac{S}{n}) \quad (2)$$

其中, W 是频带宽度, $\frac{S}{n}$ 是信噪比。

3) 误码率 (BER):当网络的误码率高于一定阈值时,表明网络不能满足一些业务的需求。为计算误码率,这里采用一般情况下的服从高斯随机分布的噪声,假设终端在所处的间隔距离 $d'_k (k=1, 2, \dots)$ 中, BER 是信噪比 (SNR) 的函数,可以近似地得到

$$SNR(k) = \frac{RSS(k)}{I(k)} \quad (3)$$

$$BER(k) = Q(\sqrt{SNR(k)}) \quad (4)$$

其中, $I(k)$ 为干扰信号强度, $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp(-t^2/2) dt$ 。

4) 网络阻塞率:在已有的研究^[9]中,考虑目标网络接入时的网络参数还包括网络阻塞率。在车联网环境下,当终端车辆数量比较多时,车辆通过 WAVE 无线技术组成车辆自组网。传统的无线局域网中介质访问控制方式在车辆互联网中是不符合要求的,载波监听多路访问/冲突检测方法 (CSMA/CD) 不区分优先级,在网络负载很大时,这种机制效率特别低。802.11p/WAVE 协议中采用基于时频二维随机退避策略 (OFDMA-CSMA) 解决^[13]。OFDMA-CSMA 机制主要是在子载波组上实现,每个子载波组采用单独的 CSMA 机制。在一个基站子系统初始时各个站点的列表是空的,此时每个想要发送数据的发送点都可以竞争某个子载波组。所以,车联网环境下选择无线网络接入时可以淡化网络阻塞率的影响。

2.2 基于运动趋势的车辆运动模型

在车联网环境下的异构无线网络垂直切换时,必须要考虑到车速和运动趋势对垂直切换的影响,由于车辆终端自身的特点,车速、运动趋

势和车与接入点的距离可以影响到网络接入后维持网络的时间以及切换次数等,选择接入网络时也必须考虑到这几个条件。因此,本节建立基于运动趋势的车辆运动模型进行分析,首先给出车速和车到接入点距离的定义和分析,再通过模型中车辆运动趋势对垂直切换的影响提出距离累积变化和的计算方法来判断车辆与接入点的相对运动关系。

车辆终端节点在公路上整个移动的过程是变速运动,因此对于车辆移动速度的研究一般是取一定周期时间 T_V 内车辆的平均速度。车载终端自身的测速功能可以在周期时间 T_V 内采样获取 N 个瞬时速度值,并通过对这些瞬时速度值取均值。按照应用需要,周期 T_V 根据实际情况而定,周期 T_V 内车辆节点的平均移动速度可表示为

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} V_j, j = 0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

其中, V_j 为车辆节点的第 j 个速度样值。

车辆的运动趋势具有前向性,并且可以认为在较短时间内车辆的运动轨迹是接近直线的,车辆的运动趋势与路边接入点 (AP, access point) 的关系如图 3 所示。可以通过式(1)计算得到接入点与车辆节点的距离 d 。

$$d = 10^{\frac{K_1 + u(x) - RSS}{K_2}} \quad (6)$$

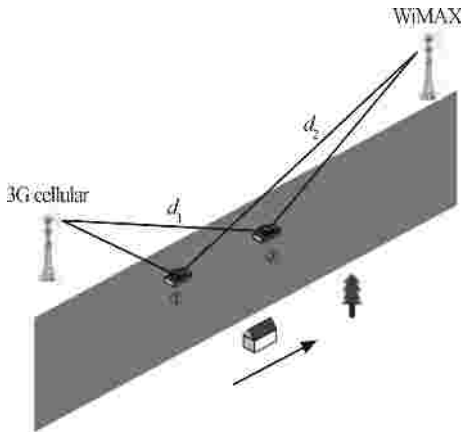


图 3 车辆节点与接入点运动模型

由图 3 中车辆节点的运动模型可知:当节点处于位置 x 时,与接入点 A 的距离 d_1 小于与接入点 B 的距离 d_2 。在以往的一些研究中^[9,12]提出了基于车辆与基站的距离的垂直切换方法,这些研究中所考虑的是车与接入点之间的距离越短对网络的接入

选择越佳。然而,在车联网环境下,车辆的高速移动必须要考虑接入网络所能维持的时间。当节点运动到位置 x 后,随着运动的继续, d_1 逐渐大于 d_2 ,按照基于距离的切换方法则需要再次进行网络切换。这里本文引入距离累积变化方法,通过车辆终端抽样获取 RSS 的值从而计算出抽样时刻终端与基站的距离。在设定的一段时间 T_n 内,获取到 M 次采样的 $RSS_i (i=1, 2, \dots, M)$ 值,则可以得到 T_n 内距离的累积变化和如下

$$\Delta D_n = \sum_{i=1}^M \left[10^{\frac{K_1 + u(x) - RSS_i}{K_2}} - 10^{\frac{K_1 + u(x) - RSS_{i-1}}{K_2}} \right] \quad (7)$$

当 $\Delta D_n > 0$ 时,判断出车辆正在远离网络接入点,当 $\Delta D_n < 0$ 时,车辆正在接近网络接入点。车辆接入正在靠近的基站接入点后会一定程度上增加网络维持的时间,从而减少切换次数。

2.3 多条件切换概率分布

现有的切换触发机制都是基于单个或者多个网络的属性参数,当基于单个属性参数时,会根据设定阈值的情况来触发切换,而当基于多个属性参数时,根据不同属性设定的不同阈值,当条件满足时发生切换。基于以上分析,这里首先给出单个参数条件下切换发生的概率,再通过多条件切换概率的相关性分析,得出多条件下的切换概率分布。

单参数切换概率主要有如下几种。

1) 基于信号强度的切换概率

$$P_{h1} = P(RSS_B(d) > h) \quad (8)$$

其中, $RSS_B(d)$ 为目标切换网络信号强度, h 表示终端接入网络所需要的最小信号强度阈值。

2) 基于传输速率的切换概率

$$P_{h2} = P(C_B > C_T) \quad (9)$$

其中, C_B 是目标切换网络最大传输速率, C_T 是能支持当前业务所需最小传输速率。

3) 基于误码率的切换概率

$$P_{h3} = P(BER(k) < t) \quad (10)$$

其中, $BER(k)$ 是目标切换网络误码率, t 是满足终端业务需要的最大误码率。

4) 基于运动趋势的切换概率

$$P_{h4} = P(\Delta D_n < 0) \quad (11)$$

其中, ΔD_n 表示目标切换网络 T_n 内的距离累积变化和。

上述各个条件中，互相存在一定的相关性，这里把信号强度作为比较的基准条件进行分析。由式(2)~式(4)、式(9)和式(10)得

$$P_{h_2} = P(W_B \ln(1 + \frac{RSS_B(k)}{I_B(k)}) > C_f) \quad (12)$$

$$P_{h_3} = P(Q(\sqrt{\frac{RSS_B(k)}{I_B(k)}}) < t) \quad (13)$$

其中， $RSS_B(k)$ 表示目标切换网络的信号强度， W_B 表示目标切换网络的带宽， $I_B(k)$ 表示目标切换网络的干扰信号强度。

由以上分析可知 P_{h1} 概率分布由信号强度的分布所确定，而 P_{h2} 与 P_{h3} 的分布与信号强度具有很高的相关性并由信号强度分布和干扰信号分布所共同确定。由式(7)和式(11)可知 P_{h4} 不仅与当前信号强度有关，还与前一连续状态的信号强度分布有关。经过上述分析，可以给出切换的先验概率为

$$P_{f_1} = P(Q(\sqrt{\frac{R_B(k)}{I_B(k)}}) < t, W_B \ln(1 + \frac{R_B(k)}{I_B(k)}) > C_f, D_d < 0, R_B(k) > ?) \quad (14)$$

2.4 基于贝叶斯决策的垂直切换算法

在进行切换决策时，往往希望切换后的网络是最优的，从这样的要求出发，利用贝叶斯决策算法可以得到在一定条件下最合适的决策。切换的 2 种状态为随机变量，而 2 种状态的概率分布在 2.3 节已经给出。2 种状态 f_1, f_2 的先验概率分别为 P_{f_1} 和 P_{f_2} ， P_{f_1} 表示切换发生概率， P_{f_2} 表示不发生切换概率，并且 $P_{f_1} + P_{f_2} = 1$ 。一般情况下的决策为：若 $P_{f_1} > P_{f_2}$ ，则做出网络切换的决策；若 $P_{f_1} < P_{f_2}$ ，则不做出切换的决策。

如果仅仅按照先验概率进行决策会容易将所能切换的网络都归为一种状态，即全部可切换或者全部不可切换，达不到区分并择优的目的。这是由于先验概率提供的条件分类信息还不够，所以需要引入网络优先级这一公认的主动条件。

不同网络所提供的带宽服务质量以及花费是不一样的。车辆自组网 (VANET, vehicular ad hoc network) 中使用 WAVE 技术，车辆终端通过自身的收发模块来接入网络并提供接入点给周围车辆，车辆在获得很高带宽的同时所花费的成本也很低。WiMAX 网络可以提供很高的带宽但有一定的花费成本。3G cellular 网络覆盖范围广，但带宽偏小且

花费成本较高。进行业务传输时，因为 WAVE 具有传输速率高、高带宽和低花费的优点，所以给它较高的网络优先级。对于 WiMAX 网络给予次网络优先级，而对于带宽较小和费用偏高的 3G 蜂窝网络给予低优先级。

2.4.1 基于贝叶斯决策的目标网络区分

为对覆盖节点区域的多个目标网络能否进行切换进行准确区分，表示出哪些目标网络能满足切换的要求，哪些目标网络不能满足切换的要求。下面给出基于贝叶斯决策的多目标网络能否切换区分。

令 X_1, X_2, X_3 表示接入 3 种网络 C_1, C_2, C_3 的事件状态，设定网络优先级为： $C_1 > C_2 > C_3$ ，则会有 $P(X_1) > P(X_2) > P(X_3)$ 。这里已知状态条件概率： $p(X_1|f_1)$ 是发生切换下接入到网络 X_1 的条件概率密度， $p(X_1|f_2)$ 是未发生切换下接入到网络 X_1 的条件概率密度。利用贝叶斯定理，即

$$P(j_i | X_1) = \frac{p(X_1 | j_i) P(j_i)}{\sum_{i=1}^2 p(X_1 | j_i) P(j_i)} \quad (15)$$

得到的条件概率 $P(j_i | X_1)$ 称为状态的后验概率，基于后验概率的决策为

- 1) 当 $P(j_1 | X_1) > P(j_2 | X_1)$ 时，则把 X_1 状态归类于 f_1 ，则切换到 C_1 网络；
- 2) 当 $P(j_1 | X_1) < P(j_2 | X_1)$ 时，则把 X_1 状态归类于 f_2 ，则不切换到 C_1 网络。

因此，可以基于上述分析推出：如果 $p(X_1 | j_1) P(j_1) > p(X_1 | j_2) P(j_2)$ 时，则把 X_1 状态归类于 f_1 ，则认为切换到 C_1 网络；反之，如果 $p(X_1 | j_1) P(j_1) < p(X_1 | j_2) P(j_2)$ 时，则把 X_1 状态归类于 f_2 ，则认为不切换到 C_1 网络。

通过上述分析可知，通过 $p(X_i | j_1) P(j_1)$ 与后验比较概率 $p(X_i | j_2) P(j_2)$ 进行比较后，可以将目标网络明确地区分成 2 类：一类目标网络表示可以满足切换要求；另外一类目标网络表示不满足切换要求。接下来针对在可切换的目标网络中如何选择最优的接入网络进行分析。

2.4.2 基于贝叶斯决策的目标切换网络选择

假使可选切换网络为多个时，即目标网络同时满足 $p(X_1 | j_1) P(j_1) > p(X_1 | j_2) P(j_2)$ ， $p(X_2 | j_1) P(j_1) > p(X_2 | j_2) P(j_2)$ ， $p(X_3 | j_1) P(j_1) > p(X_3 | j_2) P(j_2)$ 时，基于贝叶斯决策的最优选择策略应如下：

1) 如果 $p(X_1 | j_1)P(j_1) > p(X_2 | j_1)P(j_1)$ 且 $p(X_1 | j_1)P(j_1) > p(X_3 | j_1)P(j_1)$ 时, 选择 C_1 网络作为切换网络;

2) 如果 $p(X_2 | j_1)P(j_1) > p(X_1 | j_1)P(j_1)$ 且 $p(X_2 | j_1)P(j_1) > p(X_3 | j_1)P(j_1)$ 时, 选择 C_2 网络作为切换网络;

3) 如果 $p(X_3 | j_1)P(j_1) > p(X_1 | j_1)P(j_1)$ 且 $p(X_3 | j_1)P(j_1) > p(X_2 | j_1)P(j_1)$ 时, 选择 C_3 网络作为切换网络。

通过对以上可能出现的3种情况进行分析, 可以判定出最优的接入网络。在实际应用中, 可以扩展到4个及以上的更多目标网络的选择判定。

3 仿真实验及分析

在本章中, 将通过构建仿真运动场景来对车辆运动中垂直切换方法进行验证, 具体包括: 具体切换位置和次数、网络持续稳定时间、先验切换概率、后验切换概率、后验比较概率以及切换的目标网络最大传输率。

3.1 实验建立

如图4所示, 给出了本文的仿真场景, 场景中车辆在开始阶段的一段行程内可以接入车辆自组织网, 此后的路程中由于车辆稀疏, 车辆自组织网无法建立, 车辆经由3G全覆盖网络和WiMAX覆盖网络。

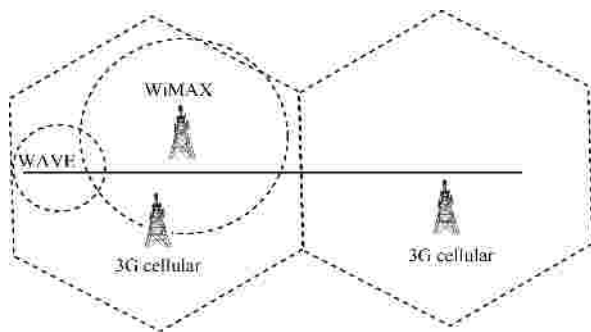


图4 仿真运动场景

仿真实验运动场景参数: A点坐标为[0,10], B点坐标[300,10], A与B相距30 km, WAVE信号覆盖前5 km, 并且由于车辆较为密集, 实验中认为在5 km范围内WAVE信号强度稳定, 此后因车辆稀疏无法组成自组网。WiMAX基站坐标[90,15], 覆盖半径5 km, 3G cellular全路段覆盖, 两个基站坐标分别为[75,0]和[230,0]。为了便于分析, 设定车辆以60 km/h的速度匀速从A点向B点直线行驶。

网络仿真参数如下: WAVE的覆盖半径为1000 m, 接入带宽为27 Mbit/s, 发送功率为10 dBm, 路径损失为20 dBm, 参数 s_1 为6 dBm; WiMAX的覆盖半径为10 km, 接入带宽为45 Mbit/s, 发送功率为25 dBm, 路径损失为35 dBm, 参数 s_1 为8 dBm; 3G cellular全覆盖, 接入带宽为2 Mbit/s, 发送功率为30 dBm, 路径损失为33 dBm, 参数 s_1 为6 dBm。最大误码率阈值为0.006, 支持当前业务所需最小传输速率 C_f 为120 kbit/s。最小信号强度阈值为-110 dBm, 干扰信号强度为-130 dBm+ $u(x)$, $u(x)$ 为服从参数为(0, s_2)的正态随机分布, s_2 为10 dBm。

仿真环境建立的PC机配置为: CPU Core i3-2310 M 2.10 GHz, RAM为2 GB, Windows 7操作系统。实验仿真系统通过Java (Java 1.6) 语言编写实现, 实验所涉及的函数计算通过调用Apache数学函数库进行计算评估。

3.2 实验结果及分析

在仿真实验中设定 $p(X_1 | j_1) = 0.4$, $p(X_2 | j_1) = 0.32$, $p(X_3 | j_1) = 0.28$, $p(X_1 | j_2) = 0.39$, $p(X_2 | j_2) = 0.31$, $p(X_3 | j_2) = 0.30$, 每隔30s进行一次切换决策计算。

3.2.1 切换情况

表1给出了仿真实验得到的网络切换的具体情况。在终端行驶的开始阶段, 接入通过WAVE技术组成的车辆自组网中; 在终端行驶到5000 m时发生垂直切换, 由WAVE网络切换到WiMAX网络; 终端行驶到13500 m时再次发生垂直切换, 由WiMAX网络切换到3G cellular网络, 接入到3G(left)基站; 行驶到16000 m时发生水平切换, 即在3G cellular网络内部发生切换, 切换到3G(right)基站。并且每次进行的贝叶斯决策计算所花费的时间在100 ms以内。

3.2.2 切换概率分析

本次实验中各个位置发生切换到目标网络的先验概率如图5所示, 经过贝叶斯决策算法得到的后验切换概率如图6所示, 后验比较概率的分布情况如图7所示。从实验中的概率分布可知, 进行贝叶斯决策算法对先验概率计算分析后得到的后验切换概率(如图6所示)相比于先验切换概率(如图5所示)能更为准确地判断出所需要切换的目标网络, 概率数值大小区分明显,

表 1 仿真中网络切换具体情况

位置属性/m	切换种类	由当前的网络切换到的目标网络	网络持续稳定时间/s
0	—	接入 WAVE 技术的自组网	300
5 000	垂直切换	由自组网切换到 WiMAX 网络	510
13 500	垂直切换	由 WiMAX 网络切换到 3G cellular, 接入 3G(left)	150
16 000	水平切换	3G 蜂窝网内部切换, 接入 3G(right)	840

大大减少了“乒乓效应”发生率。整个过程中，终端总共进行了 2 次垂直切换和 1 次水平切换。在本文的仿真场景下，最基本的固定门限 RSS 切换算法^[2]发生了 11 次切换（8 次垂直切换和 3 次水平切换），模糊逻辑切换算法^[6]则进行了 4 次切换（3 次垂直切换和 1 次水平切换）。相比于上述 2 种算法，基于贝叶斯决策的垂直切换算法减少了切换的次数。并且，基于贝叶斯决策的垂直切换算法每次计算时间花费在 100 ms 以内，进行切换决策的间隔时间可以根据实际情况设定。而自适应垂直切换算法^[4]一次切换的时间开销为 2 s，相比自适应垂直切换算法，本文所提算法更具有及时性。

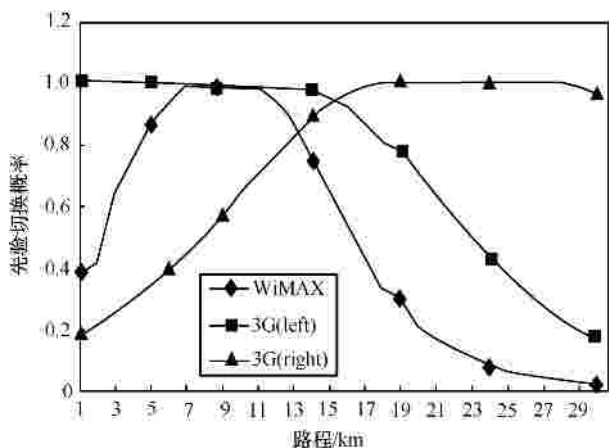


图 5 先验切换概率

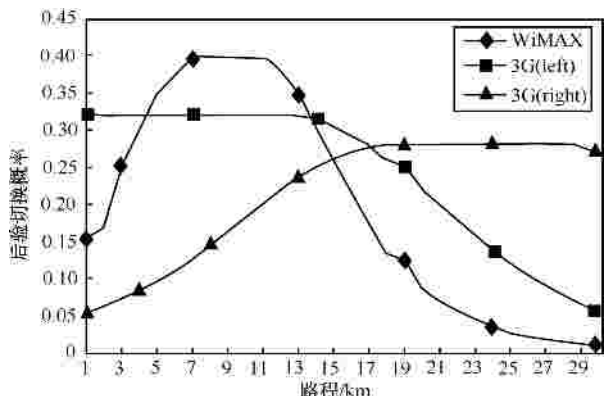


图 6 后验切换概率

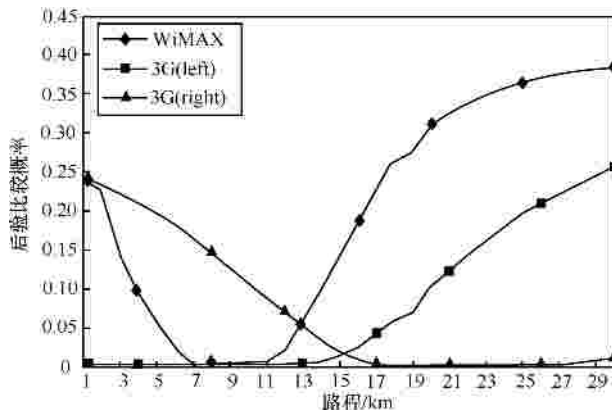


图 7 后验比较概率

3.2.3 最大传输速率

图 8 是本次实验中车辆在整个过程中所能获得的最大数据传输速率，车辆的最大数据传输速率正好反映了图 4 运动场景中发生切换的目标网络是当前所能接入的最优网络。这对于车联网中高速运动的车辆节点来说是更合适的选择。

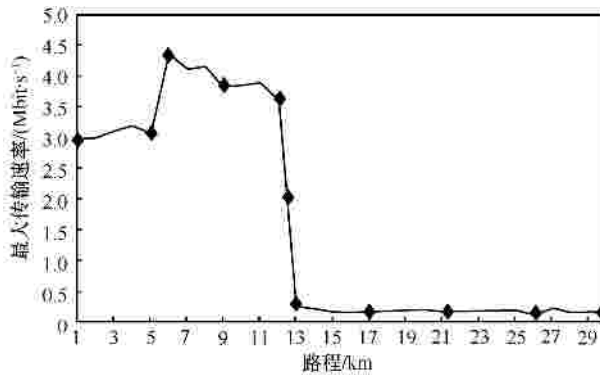


图 8 最大传输速率

4 结束语

本文提出了一种基于贝叶斯决策的垂直切换方法，用于车联网下 WAVE, WiMAX 和 3G cellular 无线接入技术之间的垂直切换和水平切换。该方法首先根据接入网络的信号强度、传输速率、误码率和网络阻塞率以及车辆终端的速度和运动趋势建

立多条件相关的切换概率分布，计算出切换先验概率；然后通过贝叶斯决策算法来得到后验概率和决策分类选择最优网络接入。仿真结果表明，本文提出的方法不仅可以用于车联网中 WAVE、WiMAX 和 3G cellular 无线接入技术之间的垂直切换与水平切换，而且还能在避免发生过多的切换，保证终端所在区域无线网络能及时地更新的同时，使切换的目标网络是当前最优的接入网络。

目前该切换技术即将应用到公交/环卫电动车组网测试中，因此，下一步的工作重点是，根据测试结果在完善提出的垂直切换方法的同时，将车辆的接入偏好引入到垂直切换和水平切换方法中，以进一步提高车联网环境下终端的网络切换性能。

参考文献：

- [1] YLIANTTILA M, HOSSAIN E, CHOW G, *et al.* Vehicular telematics over heterogeneous wireless networks: a survey[J]. *Computer Communications*, 2010, 33(7):775-793.
- [2] PANDE M, MAKELA J, MAHONEN P. Optimization scheme for mobile users performing vertical handoffs between IEEE 802.11 and GPRS/EDGE networks[A]. *Proc GLOBECOM, San Antonio[C]*. USA, 2001. 3439-3443.
- [3] BUDDHIKOT M, CHANDRANMENON G, HAN S, *et al.* Integration of 802.11 and third-generation wireless data networks[A]. *INFOCOM 2003[C]*. San Francisco, USA, 2003.503-512.
- [4] LIU M, LI Z C, Performance evaluation of vertical handoff decision algorithms in heterogeneous wireless networks[A]. *Proc GLOBECOM[C]*. San Francisco, USA, 2006. 1-5.
- [5] 刘敏, 李忠诚, 过晓冰等. 基于运动趋势的自适应垂直切换算法及其性能评价[J]. *计算机学报*, 2008, 31(1):112-119.
LIU M, LI Z C, GUO X B, *et al.* A movement trend based self-adaptive vertical handoff algorithm and its performance evaluation[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2008, 31(1):112-119.
- [6] 刘侠, 蒋铃鸽, 何晨. 一种基于模糊逻辑的预判辅助垂直切换算法[J]. *电子学报*, 2007, 35(10):1989-1993.
LIU X, JIANG L G, HE C. A novel vertical handoff algorithm based on fuzzy logic in aid of pre-decision method[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007,35(10):1989-1993.
- [7] 康亚博, 许昆, 沈玉龙等. 无线异构网络中的切换预测算法[J]. *通信学报*, 2009,(S1):69-73.
KANG Y B, XU K, SHEN Y L, *et al.* Predictive algorithm of handoff in heterogeneous wireless networks[J]. *Journal on Communications*, 2009,(S1): 69-73.
- [8] MAD, MAM. A QoS-based vertical handoff scheme for interworking of WLAN and WiMAX[A]. *Proc GLOBECOM[C]*. Honolulu, USA, 2009. 1-6.
- [9] SHAFIEE K, ATTAR A, LEUNG V. Optimal distributed vertical handoff strategies in vehicular heterogeneous networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2011, 29(3):534-544.
- [10] 潘甦, 叶强, 刘胜美. 泛在网络中的等效频谱带宽概念及其在异构网络切换中的应用[J]. *通信学报*, 2012,33(3):130-136.
PAN S, YE Q, LIU S M. Equivalent spectral bandwidth concept in ubiquitous networks and applications in vertical handoff algorithms[J]. *Journal on Communications*, 2012, 33(3):130-136.
- [11] CAO G Y, WANG Y, YAO W Q. A novel QoS mapping mechanism in integrated satellite and terrestrial networks[A]. *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), IEEE 72rd[C]*. Ottawa, Canada, 2010.1-5.
- [12] ABDELMALEK S, GAGNON F, DESPINS C, *et al.* Vertical handoff algorithm for heterogeneous wireless networks based on scalar kalman filtering[A]. *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), IEEE 73rd[C]*. Yokohama, Japan, 2011. 1-5.
- [13] FALLAH Y P, KHAM S, NASIOPOULOS P, *et al.* Hybrid OFDMA/CSMA based medium access control for next-generation wireless LANs[A]. *Communications, 2008 ICC'08[C]*. Beijing, China, 2008.2762-2768.

作者简介：



范存群 (1986-), 男, 江苏南通人, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为物联网安全和车联网技术。



王尚广 (1982-), 男, 河南周口人, 博士, 北京邮电大学讲师, 主要研究方向为服务计算、车联网技术及网络安全。

孙其博 (1975-), 男, 河南郑州人, 博士, 北京邮电大学副教授, 主要研究方向为服务计算、物联网和网络安全。

邹华 (1969-), 女, 四川成都人, 博士, 北京邮电大学教授, 主要研究方向为智能网络和服务计算。

杨放春 (1957-), 男, 北京人, 博士, 北京邮电大学教授, 主要研究方向为智能网络、服务计算和交换技术。