

车辆异构网络中基于决策树的稳健垂直切换算法

马彬 汪栋* 谢显中

(重庆邮电大学重庆市计算机网络与通信技术重点实验室 重庆 400065)

(重庆邮电大学计算机科学与技术学院 重庆 400065)

摘要: 在带有噪声干扰的车辆异构网络中, 针对当前基于决策树的垂直切换算法存在切换精准性不高的问题, 该文详细分析并给出当前算法决策过程中存在的错误判决概率, 提出一种基于决策树的稳健垂直切换算法。首先, 采用卡尔曼滤波算法, 根据网络属性的预测值和当前测量值, 并结合它们各自的噪声偏差, 做出更准确的网络属性估计。其次, 针对少量网络属性值出现在判决门限附近的情况, 提出概率阈值区间法, 通过二次检测提高算法判决的准确性。仿真结果表明, 所提算法提高了切换判决精准性和网络总吞吐量, 降低了乒乓效应和切换失败率, 并得到了与传统算法同阶的时间复杂度性能结果。

关键词: 车辆异构网络; 垂直切换; 决策树; 卡尔曼滤波

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)07-1719-08

DOI: 10.11999/JEIT161182

Robust Vertical Handoff Algorithm Based on Decision Tree in Vehicle Heterogeneous Network

MA Bin WANG Dong XIE Xianzhong

(Chongqing Key Laboratory of Computer Network and Communication Technology, Chongqing

University of Post and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

(Institute of Computer Science and Technology, Chongqing University of Post and

Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In the vehicle heterogeneous network with noise and interference, the current vertical handoff algorithms based on decision tree have the problem of low handoff accuracy. In this paper, the decision processes of current algorithms are analyzed in detail and the formulation of false decision probability is given. Firstly, the Kalman filtering algorithm is employed to obtain the more accurate network attribute values according to the predicted values, the current values, and their noise deviations. Secondly, a probability threshold interval method is proposed to do a twice detection to the situation of the attribute value which is near the threshold. Simulation results show that the proposed algorithm can improve the accuracy of handoff decision and the total network throughput, and can also reduce the ping-pong effect and the failed handoff. Meanwhile, it still keeps the same-ordered time complexity with the traditional algorithms.

Key words: Vehicle heterogeneous network; Vertical handoff; Decision Tree (DT); Kalman filtering

1 引言

随着无线通讯技术的发展, 多种形态网络重叠并存, 共同为移动终端(Mobile Terminal, MT)提供

通信服务成为未来趋势。在多种网络重叠覆盖区域, 终端用户选择最佳的接入网络, 由此有了总是最佳接入(Always Best Connected, ABC)的概念^[1,2]。高速终端用户在异构无线网络环境中会发生频繁的网络切换, 给异构网络间的切换问题带来了新的挑战。垂直切换有助于 MT 选择最佳网络接入, 更好地保证其服务质量(Quality of Service, QoS)。不精准的网络垂直切换判决会导致终端在多个网络间来回切换, 产生乒乓效应(Ping-pong effect)。尤其是在未来交通信息服务系统的重要组成部分——车辆异构通信系统中, 如何设计一种高效精准的网络垂直切换算法, 保障高速的车辆终端(Vehicle Terminal, VT)

收稿日期: 2016-11-03; 改回日期: 2017-02-26; 网络出版: 2017-04-25

*通信作者: 汪栋 wangdcqupt@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61601070, 61271259, 61301123, 61471076), 重庆市基础与前沿研计(cstc2016jcyjA0455, cstc2015jcyjA40047), 重庆邮电大学博士启动基金(A2014-10, A2015-16)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61601070, 61271259, 61301123, 61471076), The Foundation and Advanced Research Program of Chongqing (cstc2016jcyjA0455, cstc2015jcyjA40047), The Doctoral Start-up Fund of Chongqing University of Posts and Telecommunications (A2014-10, A2015-16)

在异构无线网络中的服务质量,得到了学术界和工业界的广泛关注。

在现有的垂直切换算法研究中,普遍基于对当前网络属性的采集,将垂直切换建模成一个决策过程^[3]。已有研究工作总体上可以分为以下几种:(1)基于效用函数的切换算法^[1,3,4],通过考虑多个网络属性,主要有接收信号强度(Receive Signal Strength, RSS),传输速率,误码率,阻塞率等,设计判决收益效用函数;(2)基于模糊逻辑或模糊推理的切换算法^[3,5,6],该类算法主要是设计模糊推理规则和隶属度函数;(3)基于人工神经网络等智能模型的切换算法^[7,8],将复杂的网络切换问题,转化为已构建的人工神经网络的输入、输出问题;(4)基于马尔可夫过程的预测切换算法^[9,10],将预测的网络形态用于切换决策,提高了算法切换性能;(5)基于阈值的切换算法^[11,12],通常以RSS为主要参数,当RSS满足一定阈值时,做出切换判决。

上述算法均未考虑在噪声干扰下,不准确的网络属性值会带来错误判决等实际问题。车辆异构网络中,网络拓扑变化快,基于阈值的切换算法简单高效,能够较好地适用于车辆异构网络切换场景。文献[12]提出了一种基于决策树的阈值切换算法,通过构建不同决策分支来优化算法决策过程,但噪声干扰下的错误切换判决问题,依然存在。

本文从提高算法切换判决的精准性角度出发,提出了一种基于决策树的稳健垂直切换算法,用于解决高速终端用户的垂直切换问题。本文主要贡献总结如下:

- (1)采用了卡尔曼滤波算法,降低属性值偏差,得到更准确的网络属性值;
- (2)鉴于噪声服从高斯分布的特性,对落入概率阈值区间的属性值进行二次检测。该方法能一定程度规避属性值偏差导致的切换判决错误,增强算法容错和纠错能力;
- (3)对比分析了本文算法与已有基于决策树的垂直切换算法的切换性能,并对关键决策点和算法总体错误判决概率进行了量化。

2 现有基于决策树的垂直切换算法及性能分析

本节介绍现有基于决策树的垂直切换算法,并理论分析了算法关键决策点的错误判决概率。错误判决概率可分为两种:误警概率(False Alarm Probability, FAP)和漏警概率(Miss Alarm Probability, MAP)。FAP指在网络属性值不满足阈值时做出了满足阈值要求的错误判决的概率,MAP指在网络属性值满足阈值时做出了不满足阈值要求的错误判决的概率。

2.1 算法判决过程

当前基于决策树的垂直切换算法中,主要考虑RSS、误码率和阻塞率等网络属性,这3个主要决策点构成的核心决策子树模型如图1所示。通过决策树筛选后的网络构成候选网络集(Candidate Network Set, CNS)。

2.2 判决错误概率性能分析

定义决策点RSS、误码率、阻塞率的判决,分别对应决策事件 $\{l_1, l_2, l_3\}$ 。在无干扰情况下,第 i 个决策事件判决为满足阈值对应 $PN_i = 1$,否则 $PN_i = 0$,其中 $i = 1, 2, 3$ 。在实际情况下,获取网络属性受到噪声的干扰,第 i 个决策事件判决为满足阈值对应 $PD_i = 1$,否则 $PD_i = 0$,其中 $i = 1, 2, 3$ 。因此在决策树模型中,针对网络进入CNS过程的总体错误判决概率为

$$P(\text{FAP}) = P(PD_1 = 1 \wedge PD_2 = 1 \wedge PD_3 = 1 | PN_1 = 0 \vee PN_2 = 0 \vee PN_3 = 0) \quad (1)$$

$$P(\text{MAP}) = P(PD_1 = 0 \vee PD_2 = 0 \vee PD_3 = 0 | PN_1 = 1 \wedge PN_2 = 1 \wedge PN_3 = 1) \quad (2)$$

(1)RSS决策点错误判决概率分析:信号强度表示为

$$\text{RSS}(L) = \rho - \eta \lg(L) + n \quad (3)$$

其中, L 为移动终端到接入点的距离, ρ 为目标网络的发送功率, η 是路径损失因子,变量 n 是服从均值为0、标准差为 σ_1 的高斯随机变量。则RSS满足设定最小强度阈值 ε_1 表示为

$$\text{RSS}(L) > \varepsilon_1 \quad (4)$$

RSS决策点错误判决概率为

$$P_{\text{RSS}}(\text{FAP}) = P(PD_1 = 1 | PN_1 = 0) \quad (5)$$

$$P_{\text{RSS}}(\text{MAP}) = P(PD_1 = 0 | PN_1 = 1) \quad (6)$$

由式(3),式(4),式(5)和式(6)可得,RSS决策点错误判决概率化为标准高斯分布后可表达为

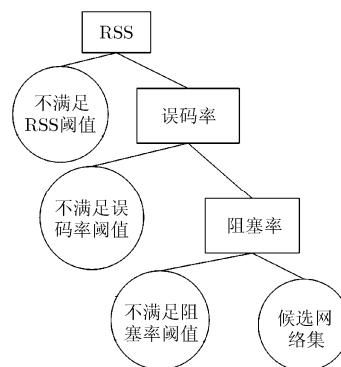


图1 核心决策子树

$$P_{\text{RSS}}(\text{FAP}) = 1 - \Phi\left((\varepsilon_1 - \rho + \eta \lg(L))/\sigma_1\right),$$

$$L \geq 10^{(\rho - \varepsilon_1)/\eta} \quad (7)$$

$$P_{\text{RSS}}(\text{MAP}) = \Phi\left((\varepsilon_1 - \rho + \eta \lg(L))/\sigma_1\right),$$

$$L < 10^{(\rho - \varepsilon_1)/\eta} \quad (8)$$

其中, $\Phi(x)$ 为服从参数值为 $(0, 1)$ 的标准高斯分布函数。

(2) 误码率决策点错误判决概率分析: 误码率 (BER) 是信噪比 (SNR) 的函数, 而 SNR 近似为

$$\text{SNR}(L) = \text{RSS}(L)/D(L) \quad (9)$$

$$\text{BER}(L) = F\left(\sqrt{\text{SNR}(L)}\right) \quad (10)$$

$$F(x) = (1/\sqrt{2\pi}) \int_x^\infty e^{(-y^2)/2} dy \quad (11)$$

其中, $D(L)$ 为干扰信号强度, 设定 $D(L) = m + u(x)$ dBm, $u(x)$ 为服从参数为 $(0, \sigma_2^2)$ 的高斯分布, 取 $m = -130$ dBm。设定误码率阈值 ε_2 , 则满足误码率阈值的条件为

$$\text{BER}(L) < \varepsilon_2 \quad (12)$$

根据误码率的性质, 可知 $0 < \varepsilon_2 < 1$, 在这里引入一个特殊点, $F(t_0) = \varepsilon_2$, 概率为

$$P_{\text{BER}}(\text{FAP}) = P(\text{PD}_2 = 1 | \text{PN}_2 = 0) \quad (13)$$

$$P_{\text{BER}}(\text{MAP}) = P(\text{PD}_2 = 0 | \text{PN}_2 = 1) \quad (14)$$

记 $\theta_1 = ((-2k - t_0^2)m + \rho - \eta \lg(L))/(t_0^2 - k)$, $\theta_2 = \eta \lg(L) - \rho$, $\theta_3 = \min(\theta_1, -m)$ 。其中 $k = \sigma_1/\sigma_2$, 进一步将错误判决概率化为标准高斯分布函数后, 可以得到

$$P_{\text{BER}}(\text{FAP}) = \begin{cases} \Phi(\theta_1/\sigma_2) - \Phi(\theta_2/\sigma_2), & \theta_2 < \theta_1 \\ \Phi(\theta_3/\sigma_2), & \theta_2 > \theta_1 \end{cases} \quad (15)$$

$$P_{\text{BER}}(\text{MAP}) = 1 - \Phi\left((\theta_1 - 2km)/(t_0^2 - k)\right)/\sigma_2 \quad (16)$$

(3) 网络阻塞率决策点错误判决概率分析: 呼损率 (Loss Probability, LP) 指呼叫损失的概率, 用来描述终端业务呼叫的阻塞程度, 根据 Erlang 呼损公式, 可用式 (17) 描述某个网络终端业务呼叫的阻塞概率

$$P_q = (A^q/q!)/\left(\sum_{i=0}^q A^i/i!\right) \quad (17)$$

其中, $A = \bar{k}s$, $\bar{k}, s$ 分别为归一化的单位时间内平均产生的终端业务呼叫次数和终端业务服务时长, q 为网络总的信道数。若单位时间内发生的终端业务呼叫次数 k 服从参数为 λ 的泊松分布 $p(k) = (\lambda^k/k!)e^{-\lambda}$, 终端业务服务时长 s 服从参数为 (μ_t, σ_t^2) 的高斯分布, 则终端业务呼叫次数的平均值满足 $\bar{k} = \lambda$ 。阻塞率需低于一定阈值的网络才能进入

CNS。

$$P_q < \varepsilon_3 \quad (18)$$

记 $b = q\lambda^{-q}$, $c = A_q^{q-1}\lambda^{-1}$, 数列 $\{d_i = (A_q^{i+1} - A_q^i)\lambda^{q-i}, i = 1, 2, \dots, q-2\}$ 。其中, $A_q^i, i = 1, 2, \dots, q$ 为 q 的 i 排列数值, 当信道总数 q 和参数 λ 确定时, 视为常数。由式 (17), 式 (18) 可得仅含变量 s 的方程

$$\lambda^{-1}s^{-1}(1 - \lambda s) \left(bs^{-q} - cs^{-1} + \sum_{i=1}^{q-2} d_i s^{q-i} \right) > \varepsilon_3^{-1} \quad (19)$$

从式 (19) 可以看出判决结果与变量 s 的偏差有关。由于表达式中存在变量 s 的高次项累加和, 无法完全分离变量, 因此没有给出阻塞率决策点的错误判决概率的确切表达式。

3 基于决策树的稳健垂直切换算法

基于决策树的稳健垂直切换算法执行过程如图 2 所示, 算法可分为两个阶段: (1) 网络筛选和生成 CNS 阶段: VT 检测到的每一个网络, 通过决策树筛选生成 CNS。(2) 切换执行阶段: 若成功生成 CNS, 则为 CNS 中的每个网络生成多属性判决值, 选择多属性判决值最大的网络。否则, 选择 RSS 最大的网络。在第 (1) 阶段, 采用卡尔曼滤波算法获取更准确的网络属性值, 并设计基于概率阈值区间的二次检测方法来增强算法判决精准性。第 (2) 阶段, 设计了一个网络属性快速查找表 (QST) 来优化网络属性的获取过程。

3.1 卡尔曼滤波算法获取更准确的网络属性值

本文算法根据系统对网络属性的预测值和当前测量值, 并结合它们各自的噪声偏差来估计当前网络属性值。假设上一时刻的接收信号强度为 $\text{RSS}(k-1)$, 干扰强度为 $D(k-1)$, 这两个值的高斯噪声偏差分别是 $\text{no}(k-1)$, $\text{nD}(k-1)$ 。当前时刻检测到的接收信号强度为 $\text{RSS}(k)$, 干扰强度为 $D(k)$, 这两个值的高斯噪声偏差分别为 $\text{no}(k)$, $\text{nD}(k)$ 。

算法 1 滤波优化网络属性值获取方法。

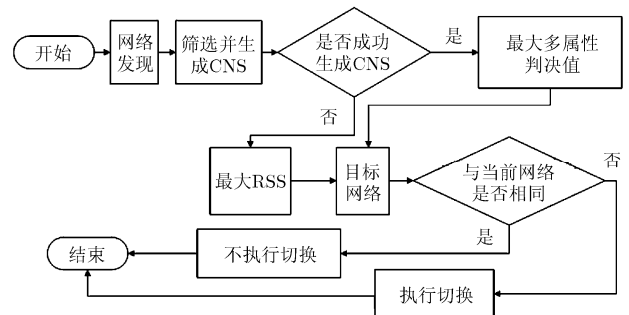


图 2 算法流程图

步骤 1 开始,记录并维护 $RSS(k-1), D(k-1), no(k-1), nD(k-1)$ 。

步骤 2 检测并记录当前时刻数值 $RSS(k), D(k)$ 和噪声偏差 $no(k), nD(k)$ 。

步骤 3 计算卡尔曼增益:

$$no(k-1)^2 / (no(k-1)^2 + no(k)^2) \rightarrow Kg_{RSS}(k)$$

$$nD(k-1)^2 / (nD(k-1)^2 + nD(k)^2) \rightarrow Kg_D(k)$$

步骤 4 由上一时刻的网络属性值估计当前时刻网络属性值:

$$RSS(k-1) + \eta \lg(L(k-1)) - \eta \lg(L(k)) \rightarrow RSS_c(k)$$

$$D(k-1) \rightarrow D_c(k)$$

其中, $L(k-1), L(k)$ 分别为终端在上一时刻和当前时刻到接入点的距离。

步骤 5 计算当前时刻网络属性值:

$$RSS_c(k) + Kg_{RSS}(k)(RSS(k) - RSS_c(k)) \rightarrow RSS(k)$$

$$D_c(k) + Kg_D(k)(D(k) - D_c(k)) \rightarrow D(k)$$

步骤 6 计算当前时刻网络属性值的噪声偏差,并对网络属性值和噪声偏差进行更新:

$$\sqrt{(1 - Kg_{RSS}(k))no(k-1)^2} \rightarrow no(k-1),$$

$$RSS(k) \rightarrow RSS(k-1)$$

$$\sqrt{(1 - Kg_D(k))nD(k-1)^2} \rightarrow nD(k-1),$$

$$D(k) \rightarrow D(k-1)$$

步骤 7 结束。

步骤 8 随着 VT 的移动,迭代执行步骤 1~步骤 7,直到属性值偏差降低到一定程度以下。

3.2 设置概率阈值区间增强算法容错、纠错能力

在噪声的干扰下对于边界值的处理容易出现错误判决。本文考虑到高斯噪声瞬时值集中在噪声期望值附近的区域,以网络属性阈值为中心设置一个概率阈值区间 (Probability Threshold Interval, PTI),对落入 PTI 的属性值进行二次检测 (Two Times of Detection, TTD),结合后两次获取到的属性值来做判决。区间大小设置可以借鉴高斯分布在统计学上的 3 个重要区间,假设噪声 X 服从参数为 μ 和 σ^2 的高斯分布,则区间 $[\mu - 1.96\sigma, \mu + 1.96\sigma]$,的面积占到了总面积的 95.00%。据此设置的 PTI 如图 3 所示,其中 ε 为网络属性阈值, σ 为属性值的高斯噪声标准差,PTI 为 $[\varepsilon - 1.96\sigma, \varepsilon + 1.96\sigma]$ 。

基于 PTI 的二次检测方法执行过程如图 4 所示。该方法能使算法对因不准确的属性值导致的错误判决具有一定的纠正能力,从增强算法容错、纠错的层面,提高算法判决精准性。

3.3 切换判决方法

将决策树中涉及的 3 个属性值,进行归一化处理,生成的多属性判决值为

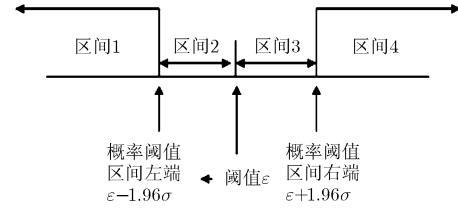


图 3 概率阈值区间图 (PTI)

$$H_i(x) = \frac{(RSS_i(x) - \varepsilon_i)}{\varepsilon_i} (1 - P_i(\text{FAP})(x)) \cdot (1 - P_i(\text{MAP})(x)) (1 - \text{BER}_i(x)) (1 - P_{q_i}(x)) \quad (20)$$

其中, ε_i 为第 i 个网络 RSS 的判决阈值, $P_i(\text{FAP})(x)$, $P_i(\text{MAP})(x)$ 为计算得到的第 i 个网络的判决误警概率和漏警概率。在切换执行阶段,按照式(21)条件切换到第 k 个网络。

$$H_k(x) = \max \{H_1(x), H_2(x), \dots, H_n(x)\} \quad (21)$$

式(21)表示选择多属性判决值最大的网络。若 CNS 生成失败,则选择 RSS 最大的网络。当切换目标网络为当前接入网络时,不进行切换。

3.4 基于决策树的稳健垂直切换算法性能分析

(1)切换算法时空复杂度评估:在评估所提算法的时空复杂度前,首先介绍一种优化网络属性值查找的机制。算法设置一个网络属性快速查找表 (QST),通过提前获取网络属性值并存储。在切换判决时,首先从 QST 中查找所需要的网络信息,查找成功,则直接使用 QST 中该网络的属性值,而不需要通过检测和计算来获取网络属性。QST 中一条完整的网络信息记录为 $\{n_{id}, k-1, pa_1, a_1, a_2, a_3, k, pa_1, a_1, a_2, a_3\}$ 。其中, n_{id} 为网络名, pa_1, a_1, a_2, a_3 分别对应干扰强度值、RSS、误码率和阻塞率, $k-1$ 和 k 对应两个不同时刻。按固定时隙更新 QST 中数据

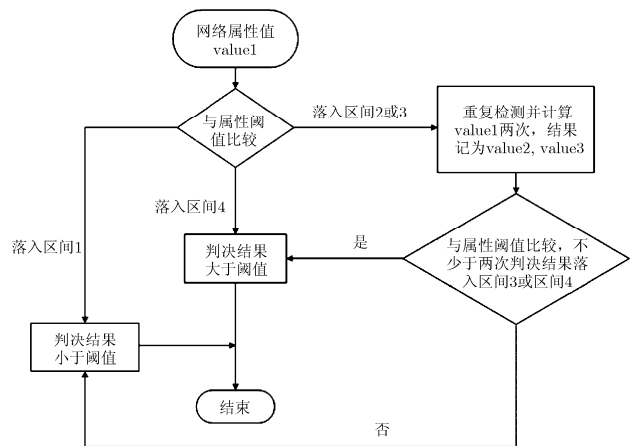


图 4 基于 PTI 的二次检测方法执行流程图

以保证时效性, 规则如下:

(a)已存储的网络, $k-1$ 时刻的值作为上一时刻的值, k 时刻值作为当前时刻的网络属性值;

(b)按时隙检测获取网络属性值, 并更新 QST 表中数据。对同一个网络, 用 k 时刻替换 $k-1$ 时刻值, 用当前检测和计算获取到的数值替换 k 时刻数值。

(c)新发现的网络, 在 QST 中没有存储相关信息, 则插入到 QST 中。

(d)超过时间限度, 检测不到的网络, 从 QST 中删除。

假设系统获取 RSS、干扰强度和获取计算阻塞率所需参数的时间开销为 t_1 , t_2 和 t_3 , 计算 RSS、误码率和阻塞率的时间开销为 t_4 , t_5 和 t_6 。切换触发后, VT 发现了 n 个可用网络。假设在 RSS、误码率两个决策点满足阈值约束条件的概率分别为 p_1, p_2 。由于 VT 发现的接入网络数不会是特别大, 因此在 CNS 中确定切换目标网络时间开销统一设定为 t_0 。则传统基于决策树的垂直切换算法(TT-VHO)从切换触发到切换执行过程的时间开销为

$$T_{TT} = (t_1 + t_4) + p_1(t_2 + t_5 + p_2(t_3 + t_6)) + t_0 \\ = t_1 + p_1 t_2 + p_1 p_2 t_3 + t_4 + p_1 t_5 + p_1 p_2 t_6 + t_0 \quad (22)$$

QST 中查找数据的方式为内存查找, 时间开销可以忽略。若上述 3 个判决点, 属性值分别以概率 pr_1, pr_2, pr_3 落入 PTI, 且基于决策树的稳健垂直切换算法(DT-VHO)在 RSS、误码率决策点满足阈值条件的概率分别为 po_1, po_2 。由于卡尔曼滤波算法中计算 5 个关键表达式的时间开销与数据量之间具有线性特性, 所以生成滤波后的属性判决值时间开销可设为 kt_4, kt_5, kt_6 , k 为一常量。则算法 DT-VHO 由切换触发到切换执行阶段所花费的时间开销为

$$T_{DT} = (1 - pr_1)kt_4 + pr_1(2t_1 + 2kt_4) \\ + po_1((1 - pr_2)kt_5 + pr_2(2t_2 + 2kt_5)) \\ + po_2((1 - pr_3)(t_3 + kt_6) + pr_3(2t_3 + 2kt_6))) \\ = 2pr_1 t_1 + 2po_1 pr_2 t_2 + po_1 po_2(1 + pr_3)t_3 \\ + k(1 + pr_1)t_4 + kpo_1(1 + pr_2)t_5 \\ + kpo_1 po_2(1 + pr_3)t_6 + t_0 \quad (23)$$

由于属性值落入 PTI 的概率较小, 因此 pr_1, pr_2, pr_3 较小。从式(22)和式(23)可知, DT-VHO 算法相对于 TT-VHO 算法, 增加了线性倍数的时间开销, 但两个算法属于同阶时间复杂度。

$$O(T_{DT}) = O(T_{TT}) \quad (24)$$

为分析 QST 表所占用的内存大小, 以计算机中

double 类型数据来存储网络记录每一项为例, 则耗费的空间大小为 $10N \text{sizeof}(\text{double})$, 其中 $\text{sizeof}(\text{double})$ 是一个数据块的内存大小。

(2)判决错误概率分析: 假设在获取到的属性值噪声偏差为 σ_0 , 由上一时刻的属性值计算当前时刻属性值的噪声偏差为 σ_L 。根据 3.1 节中滤波算法, 经过一次滤波后的属性值偏差为

$$\sigma_{cu} = \sqrt{\sigma_0^2 / (\sigma_0^2 + \sigma_L^2)} \sigma_L \Rightarrow \\ \sigma_{cu} / \sigma_0 = \sqrt{\sigma_L^2 / (\sigma_0^2 + \sigma_L^2)} < 1 \quad (25)$$

式(25)表明属性值的偏差降低了。将 σ_{cu} 分别代入到式(7)、式(8)、式(15)和式(16)式中, 即为滤波后对应决策点的错误判决概率。当 PTI 大小设置为 $[\mu - 1.96\sigma, \mu + 1.96\sigma]$, 可以检测到 95.00% 的由噪声导致的错误判决, 并采用基于 PTI 的二次检测方法来进行纠正。假设属性值的真实值为 v , 则对落入 PTI 的属性值, 在错误判决的情况下予以纠正的概率为

$$P_{rd} = \left(1 - \Phi\left(\frac{-|\varepsilon - v|}{\sigma_{cu}}\right)\right)^2 \quad (26)$$

其中, ε 为属性值阈值, 则对发生的错误判决, 能够有 $0.95P_{rd}$ 的概率得到纠正。另一方面, 算法 TT-VHO 和算法 DT-VHO 判决出错的概率分别为

$$P_{TT} = \Phi\left(\frac{-|\varepsilon - v|}{\sigma_0}\right) \quad (27)$$

$$P_{DT} = \Phi\left(\frac{-|\varepsilon - v|}{\sigma_{cu}}\right) \left(1 - 0.95P_{rd}\right) \\ = 0.95\Phi\left(\frac{-|\varepsilon - v|}{\sigma_{cu}}\right) \left[1 - \Phi\left(\frac{-|\varepsilon - v|}{\sigma_{cu}}\right)\right]^2 \quad (28)$$

由式(25)、式(27)和式(28)可得

$$\left\{ \begin{aligned} &\Phi\left(\frac{-|\varepsilon - v|}{\sigma_{cu}}\right) < \Phi\left(\frac{-|\varepsilon - v|}{\sigma_0}\right) \\ &\left[1 - \Phi\left(\frac{-|\varepsilon - v|}{\sigma_{cu}}\right)\right]^2 < 1 \end{aligned} \right\} \\ \Rightarrow P_{DT} < P_{TT} \quad (29)$$

$$P_{TT} - P_{DT} = \Phi\left(\frac{-|\varepsilon - v|}{\sigma_0}\right) \\ - 0.95\Phi\left(\frac{-|\varepsilon - v|}{\sigma_{cu}}\right) \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_0^2} / (\sigma_L \sigma_0) \\ \cdot \left[1 - \Phi\left(\frac{-|\varepsilon - v|}{\sigma_{cu}}\right) \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_0^2} / (\sigma_L \sigma_0)\right]^2 > 0 \quad (30)$$

4 仿真结果分析

4.1 系统模型和仿真参数设置

图 5 所示为采用 LTE, WiMAX, WAVE 技术组成的自组织网络构建的系统仿真环境, 无线接入网络采用主流的正交频分复用(Orthogonal Frequency

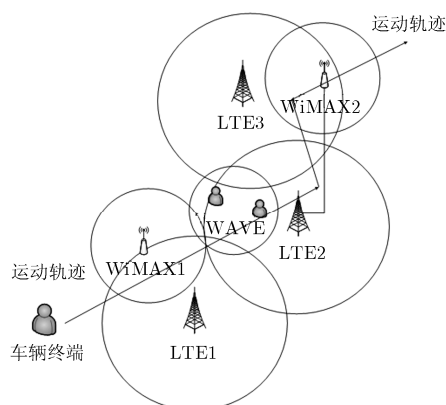


图5 车辆异构网络仿真场景图

Division Multiplexing, OFDM)技术。仿真场景为一个 $20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$ 大小的矩形区域, LTE1 基站的坐标为(4012, 16010), LTE2 的坐标为(15223, 11000), LTE3 的坐标为(13950, 1660), WiMAX1 的坐标为(3130, 3205), WiMAX2 的坐标为(16860, 1500), WAVE 区域的中心点坐标为(11023, 9861)。

仿真中对比了本文算法 DT-VHO 与传统基于决策树的垂直切换算法(TT-VHO)^[12]以及基于模糊逻辑的垂直切换算法(FL-VHO)^[5], 网络参数设置如表1所示。

4.2 判决精准性分析

图6展示了一个网络经过决策树筛选后, 进入

CNS 的次数与车辆终端到接入点距离的关系, 并统计了错误判决进入 CNS 的误警次数和漏警次数。图中 Optimal 曲线代表在无噪声情况下进入 CNS 的次数。曲线 TT-VHO, TT-VHO-FAN 和 TT-VHO-MAN 分别代表传统算法进入 CNS 的次数、误警次数和漏警次数。可知 DT-VHO 算法误警次数和漏警次数低于 TT-VHO 算法, 但高于 Optimal 曲线。图7对比了 DT-VHO 算法与 TT-VHO 算法的错误判决概率。可知 DT-VHO 算法具有更低的误警概率和漏警概率。

4.3 切换次数和切换失败率分析

网络切换次数反应了一个算法的稳定性, 过高的切换次数会带来较大切换开销。图8表明 DT-VHO1 算法(仅采用 Kalman 滤波)相对于 TT-VHO 算法, 降低了切换次数, 而采用两种优化方法的 DT-VHO 算法能够进一步降低切换次数。车辆终端切换失败时, 认为其连接中断, 数据传输为0。在一段时间内切换失败次数占总切换次数比率的统计平均值为切换失败率。图9表明, DT-VHO 算法的切换失败概率最低。

4.4 误码率和吞吐量分析

图10对比了在 VT 数量增多的趋势下, 3种算法的网络平均误码率性能。在少于100台 VT 时, 3种算法均有较低误码率, 随着 VT 数量的增多, DT-VHO 算法误码率性能表现更佳。图11中 VT

表1 网络仿真参数

网络	发送功率 ρ (dBm)	路径损失 η (dBm)	噪声偏差 σ_1 (dBm)	覆盖半径 r (km)	接入带宽 w (Mbit/s)
LTE	30	33	6	全覆盖	2
WiMAX	25	35	8	10	45
WAVE	信号强度恒定, 设定为 -95 dBm			5	27

其他参数设置: RSS 阈值 $\varepsilon_1 = -110 \text{ dBm}$, 误码率阈值 $\varepsilon_2 = 0.006$, 阻塞率阈值 $\varepsilon_2 = 0.07$, 干扰信号强度 $D(x) = -130 + u(x) \text{ dBm}$, $u(x)$ 服从参数为 (0,10) 的高斯随机分布, VT 速度默认 60 km/h 。

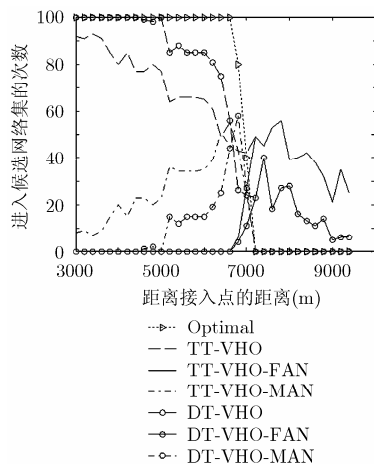


图6 进入候选网络集次数

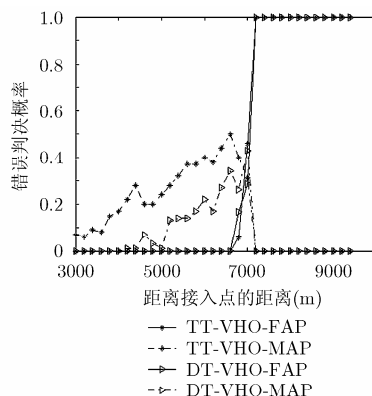


图7 错误判决概率

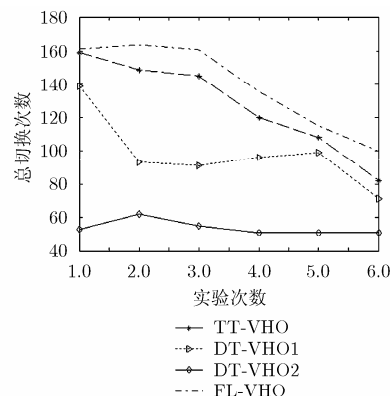


图8 车辆终端总切换次数

数量为300台, 仿真表明, 误码率会随终端速度增大而增大, DT-VHO算法在3种算法中误码率最低。图12对比了3种算法的网络总吞吐量与VT数量的关系, 图13为3种算法在VT不同行驶速度下的网络总吞吐量。

4.5 算法时间开销分析

图14仿真给出了本文算法和传统算法的决策时间对比, DT-VHO-QST为设置了网络属性快速查找表机制的DT-VHO算法。通过仿真实验, 验证了本文算法与传统基于决策树的垂直切换算法具有同阶时间复杂度的结论。

5 结束语

本文提出了一种基于决策树的稳健垂直切换算法, 适用于车辆终端等高速终端用户在异构无线网络中的垂直切换问题。采用卡尔曼滤波算法获取更准确的网络参数, 并利用基于概率阈值区间的二次检测方法来纠正错误决策, 增强了算法决策精准性, 使得算法更加稳健。仿真表明本文算法可提高算法判决精准性和网络总吞吐量, 降低乒乓效应。下一步工作, 考虑进一步优化所采用的两种增强判决精准性方法。

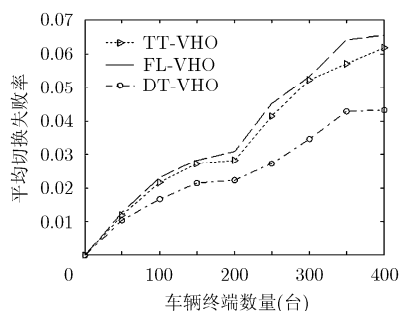


图9 切换失败概率

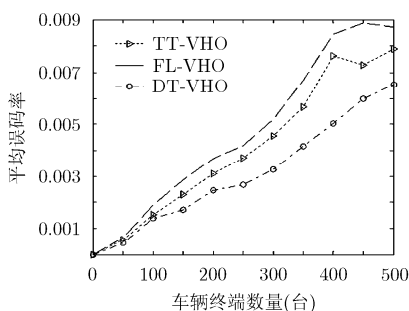


图10 网络平均误码率

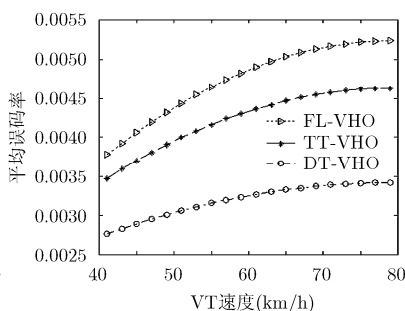


图11 网络平均误码率与终端速度关系

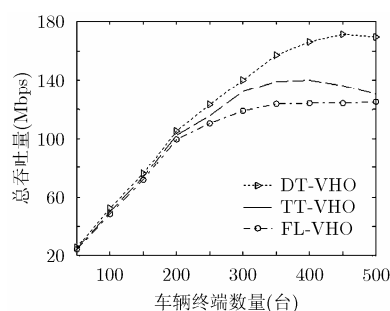


图12 网络总吞吐量

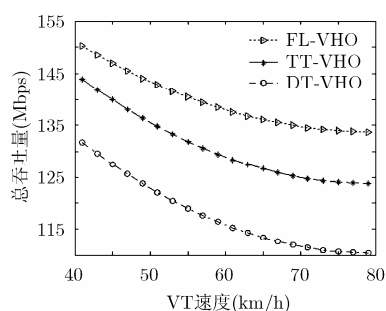


图13 网络总吞吐量与终端速度关系

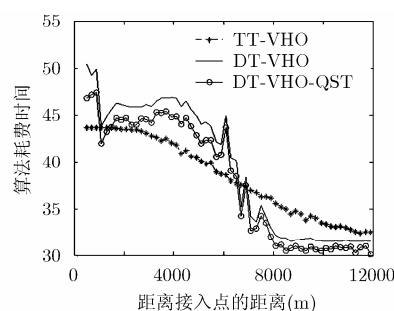


图14 算法决策时间开销

参考文献

- [1] BHOSALE S and DARUWALA R. Multi-criteria vertical handoff decision algorithm using hierarchy modeling and additive weighting in an integrated WLAN/WiMAX/UMTS environment — A case study[J]. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 2014, 8(1): 38–40.
- [2] GUSTAFSSON E. and JONSSON A. Always best connected[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2003, 10(1): 49–55.
- [3] 马彬, 谢显中, 廖晓峰. 车辆异构网络中预测垂直切换算法[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(4): 874–880. doi: 10.11999/JEIT 140845.
- [4] GUO Y S, TAN G Z, LIBDA A S M, et al. A QoS-aware vertical handoff algorithm based on predictive network information[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2012, 19(8): 2187–2191. doi: 10.1007/s11771-012-1263-3.
- [5] SINGHROVA A and PRAKASH N. Vertical handoff decision algorithm for improved quality of service in heterogeneous wireless networks[J]. *IET Communications*, 2012, 6(2): 211–222. doi: 10.1049/iet-com.2010.0820.
- [6] 任堃晔, 赵季红, 曲桦. 基于模糊逻辑的多终端协同的垂直切换决策算法[J]. *通信学报*, 2014, 35(9): 69–71. doi: 10.3969/j.issn.1000-436x.
- [7] network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(4): 874–880. doi: 10.11999/JEIT140845.

- REN Gongye, ZHAO Jihong, QU Hua, *et al.* Vertical handoff decision algorithm for cooperation of multi-terminal based on fuzzy logic terminal[J]. *Journal on Communications*, 2014, 35(9): 69–71. doi: 10.3969/j.issn.1000-436x.
- [7] CELAL C A C. Artificial neural network based vertical handoff algorithm for reducing handoff latency[J]. *Wireless Personal Communications*, 2013, 71(4): 2401–2405. doi: 10.1007/s11277-012-0944-4.
- [8] MARIA D J S, JUAN A, GOMEZ P, *et al.* Embedded intelligence for fast QoS-based vertical handoff in heterogeneous wireless access networks[J]. *Pervasive and Mobile Computing*, 2014, 1(9): 4–5.
- [9] NING Z L, SONG Q Y, LIU Y J, *et al.* Markov-based vertical handoff decision algorithms in heterogeneous wireless networks[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2014, 40(2): 456–472.
- [10] ZHU J, XU L M, YANG L, *et al.* An optimal vertical handoff decision algorithm for multiple services with different priorities in heterogeneous wireless networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2015, 83(1): 527–549. doi: 10.1007/s11277-015-2407-1.
- [11] LIU M, LI Z C, GUO X B, *et al.* Performance analysis and optimization of handoff algorithms in heterogeneous wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2008, 7(7): 846–857. doi: 10.1109/TMC.2007.70768.
- [12] WANG S G, FAN C Q, HSU C H, *et al.* A vertical handoff method via self-selection decision tree for internet of vehicles[J]. *IEEE Systems Journal*, 2016, 10(3): 1183–1192. doi: 10.1109/JSYST.2014.2306210.
- 马 彬: 男, 1978 年生, 博士, 教授, 研究方向为异构无线网络、认知无线网络等.
- 汪 栋: 男, 1992 年生, 硕士生, 研究方向为异构无线网络.
- 谢显中: 男, 1966 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为移动通信网络、感知无线电技术等.