

基于概率策略逻辑的 VANET 信息 广播模型定量验证方法研究

李树秋,刘淑芬,王晓燕,徐伟峰,陆 闯

(吉林大学计算机科学与技术学院,吉林长春 130012)

摘 要: VANET 网络中信息的发送和接收具有随机性和不确定性,IEEE 802.11p 广播协议无法适应 VANET 网络拓扑动态变化,于是研究者们根据不同环境中的具体应用需求提出了各种 VANET 广播协议,如何对新提出的协议的性能以及可靠性进行分析与验证是一个关键性问题.自动化的定量验证技术能够针对系统需要满足的多个性质的分析,并给出满足需求的最大或者最小概率.然而研究人员在进行定量验证过程中使用的 PTCL、rPATL 等逻辑语言都不能够明确描述用户的策略是什么,因此本文提出基于概率策略逻辑的模型定量验证方法.该方法首先对系统中的多个角色使用概率时间接口自动机对其行为建模,然后使用概率策略逻辑语言对系统需要满足的性质进行描述,最后基于定量验证算法自动给出系统相关性质的分析结论.本文将该方法应用到 VANET 信息广播协议性能分析上,能够针对外界环境的变化选择合理的策略,从而分析出不同环境下信息广播发送成功的最大概率.

关键词: VANET; 定量验证; 基于角色的概率系统; 概率策略逻辑

中图分类号: TP311

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2015)08-1610-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.08.021

Quantitative Study of VANET Information Broadcasting Protocol Verification Based on Probabilistic Strategy Logic

LI Shu-qiu, LIU Shu-fen, WANG Xiao-yan, XU Wei-feng, LU Chuang

(College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China)

Abstract: The transmission and reception of information in VANET has the property of randomness and uncertainty. Due to the inadaptability of IEEE 802.11p broadcast protocol to the dynamic changes of VANET topology, researchers proposed VANET broadcasting protocol on the basis of specific application requirements. Therefore, the key is how to analyze and verify the performance and reliability of the updated protocol. Automated quantitative verification can analyze the properties of the system requirements and provide the maximum or minimum probability. However, PTCL and rPATL are found not to precisely represent the strategies of the users in the quantitative verification process delivered by researchers. For this purpose, the method namely, 'Quantitative Model Verification based on Probabilistic Strategy Logic' is proposed. Firstly, interval probabilistic timed interface automata are applied to model the behavior for each role in the system, then probabilistic strategy logic is adopted to describe the properties to meet the requirements and quantitative validation algorithm is given. Finally, the method is applied to the VANET information broadcast protocol. The proposed model can select a reasonable strategy revolving the external changes and analyze the maximum probability for a successful transmission of information broadcast.

Key words: vehicular ad hoc networks(VANET); quantitative verification; probabilistic system based on roles; probabilistic strategy logic

1 引言

车用自组网(vehicular ad hoc networks,简称 VANET)是一种以车辆为移动节点的自组织网络,能够在道路上动态构建一个自组织的、费用低廉的、结构开放的车辆

间通信网络,实现车辆与车辆(vehicle-to-vehicle, V2V)或车辆与路边基础设施(vehicle-to-infrastructure, V2I)通信,它是智能交通系统(Intelligent Transportation Systems, ITS)的一个重要组成部分^[1].2009年以来,我国将物联网作为战略性的新兴产业予以重点关注和推进,其中一个很

重要的应用就是 ITS。ITS 将先进的信息技术、数据通信传输技术、传感技术、电子控制技术以及计算机处理技术等有效地集成运用整个交通运输管理体系,从而建立起一种在大范围内、全方位发挥作用的、实时、准确、高效的综合运输和管理系统。VANET 作为 ITS 的核心部分,可为司机提供实时紧急交通信息和交通诱导信息,在降低交通事故、实施紧急救援、减轻交通拥堵、提高交通效率等应用方面具有越来越重要的作用^[2]。

VANET 网络拓扑结构动态变化,信息接收和发送具有随机性和不确定性,因此广播协议就成为 VANET 传输各种交通信息最有效的方式之一。但 VANET 特殊的应用环境,如狭窄的道路、高密度节点分布、节点高速移动等,直接影响 VANET 网络中信息传输能力,使得丢包增加、延迟增大、实时性差,因此如何满足信息传递的实时性、可靠性是 VANET 广播协议需要解决的关键问题。

定量验证是一种有限状态系统的自动化验证技术,其基本思想是用离散时间马尔科夫链 DTMC、连续时间马尔科夫链 CTMC 和马尔科夫决策过程 MDP、概率时间自动机 PTA 等数学抽象模型^[3-6]表示系统的行为,用时序逻辑公式描述系统的性质。通过验证系统中某一状态在系统中或者某个条件下是否可达,从而判断模型是否满足需求。概率定量验证技术用于计算系统在运行期间某事件发生的可能性,它结合了概率分析和模型检测技术,能够针对系统需要满足的一个或多个性质给出最大或者最小概率,因此它与传统的非概率的模型验证技术的不同在于除了需要对模型的状态进行遍历外,还需要进行大量的数值计算。目前大多数研究人员在进行概率定量验证时采用的逻辑语言分为两类:(1)在系统的整个模型上使用概率计算树逻辑 (Probabilistic Computation Tree Logic, PCTL) 或概率实时计算树逻辑 (Probabilistic Timed Computation Tree Logic, PTCTL) 对要验证的性质进行描述,并在验证后将满足用户需求的一条路径或几条路径再重新合成一个完整的策略^[7]。(2)使用 ATL* 或其扩展 rPATL 逻辑对系统中的每个 agent 的性质以及 agent 间的协作与竞争性质进行描述^[8]。这两种逻辑语言都没有把策略作为第一实体对象,不能够明确描述用户的策略是什么。因此本文提出概率策略逻辑 (Probabilistic Strategy Logic, PSL),它能够针对每个角色所使用的策略进行描述,并且采用变量赋值的方法描述外界环境对策略的影响,从而当外界环境发生改变时选取不同的策略。本文将基于概率策略逻辑的定量验证方法应用到对改进的 VANET 广播协议性能分析上,能够针对外界环境的变化选择合理的策略,从而分析出不同环境下信息广播发送成功的最大概率。

2 基于角色的概率系统与概率策略逻辑

2.1 基于角色的概率系统

牛津大学 Kwiatkowska 等人提出的 PTA (Probabilistic Timed Automata) 模型可以形式化建模具有概率、非确定性和实时特性的随机系统^[9],它假设系统中状态之间的迁移概率是固定值,然而在 VANET 网络中这种假设常常是不成立的,例如信息在无线网中传输,由于通信介质自身的特性和环境噪声的随机性,消息丢失的概率是可变的。此外, VANET 网络中信息广播需要多个角色的参与,例如汽车 A 发送紧急故障信息,汽车 B 进行信息的转发最后到达信息处理中心,它们之间需要互相协作才能完成信息的正确传送。因此,本文首先使用概率时间自动机为每个角色建立一个模型,使用概率表示状态转换的可能性,并在这些模型基础上使用 PSL 描述需要验证的性质,最后给出验证结果。

定义 1 基于角色的概率系统 (Probabilistic System Based On Roles, PS-R) 是一个七元组,

$$PS-R = (S, S^0, \chi, RLs, inv, Acts, Step_T, lab),$$

其中:(1) S 是系统中全局状态集合 $S = (S_e, S_1, \dots, S_n)$, S^0 是初始状态 $S^0 = (S_e^0, S_1^0, \dots, S_n^0)$;(2) RLs 是系统中的所有角色集合, $RLs = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$;(3) $Acts$ 是系统中全局的有限的动作集合, $Acts_i^I$ 表示角色 r_i 的输入动作, $Acts_i^O$ 表示角色 r_i 的输出消息(4) inv 是环境变量的集合; χ 是时钟变量;(5) $Step_T: S \times (Acts \cup R_+) \rightarrow IDist(S)$ 表示基于概率的迁移;(6) $lab: S \rightarrow 2^{AP}$ 是一个可对状态赋以原子命题的函数。

由于 PS-R 系统中存在多个角色,对于 PS-R 系统中的每个角色 $r_i \in RLs$ 都存在一个局部状态 L_i 用来保存角色 r_i 在第 i 个状态能够访问的系统信息,因此本文对于每个角色单独定义状态转换模型,而 PS-R 系统在第 i 个状态是所有角色在第 i 个状态的合集,即 $s_i = (l_e^i, l_1^i, \dots, l_n^i)$,其中 $l_e^i \in L_e, l_j^i \in L_j$ 。同理对于 $Acts$ 也有角色 r_i 的局部动作 LA_i 和环境的局部动作 LA_e ,全局动作 $a_i = (a_e^i, a_1^i, \dots, a_n^i)$,且 $a \in Act, a_e^i \in LA, a_j^i \in LA_j$ 。PS-R 系统中信息传递的路径,可以使用 $\omega = s_0 \xrightarrow{L_0^i, a_0^i, \rho_0^i} s_1 \xrightarrow{L_1^i, a_1^i, \rho_1^i} s_2 \dots$ 进行表示。为了简化描述,PS-R 系统中全局的状态 a_i 使用在第 i 个状态发生变化的角色的状态集合代替,而没有发生状态转变的状态不在重复书写。例如 $s_i = (l_e^i, l_1^i)$,表示在第 i 个状态只有环境与角色 r_1 的状态发生改变。因此信息传递的路径可以简写为 $\omega = s_0 \xrightarrow{a_0, \rho_0} s_1 \xrightarrow{a_1, \rho_1} s_2 \dots$,其中 s_i 是简化后的局部动作集合。一条长度为 n 的路径 $|\omega|_n = |s_0 s_1 \dots s_n|$ 。令 $\omega(i)$ 表示路径 ω 的第 i 个状态,即 $\omega(i) = s_i, first(\omega)$ 表示

路径 ω 的第一个状态, $last(\omega)$ 表示最后一个状态. 有限路径 ω 从状态 s_0 到状态 s_n 的概率可表示为 $P(\omega) = \rho_0 \rho_1 \cdots \rho_n$

2.2 概率策略逻辑 PSL

目前大多数研究人员在进行定量验证时采用概率计算树逻辑 (Probabilistic Computation Tree Logic, PCTL) 或概率实时计算树逻辑 (Probabilistic Timed Computation Tree Logic, PTCTL) 对要验证的性质进行描述, 然后在验证后将满足用户需求的一条路径或几条路径再重新合成一个完整的策略. 由于 PCTL 没有把策略作为第一实体对象, 因此在验证时不能够明确描述用户的策略是什么. ATL* 及其扩展 rPATL 用于描述多 agent 系统中 agent 间的协作与竞争属性, 但是它们不能够描述 agent 间的策略共享以及策略的改变. 本文提出概率策略逻辑 (Probabilistic Strategy Logic), 它把策略作为第一实体对象进行描述, 其语法如下所示:

$$\begin{aligned}\varphi &::= p \mid \chi \mid \neg \varphi \mid \varphi \wedge \varphi \mid \varphi \vee \varphi \mid \forall x. \varphi \mid \\ &\quad \exists x. \varphi \mid (a, x) \varphi \mid (x, v) \varphi \\ \varphi &::= X\varphi \mid \varphi U \varphi \mid \varphi U^{\leq k} \varphi \\ \psi &::= P_{\sim \lambda} \phi\end{aligned}$$

其中 p 是原子命题, χ 是时钟约束, $a \in RLs$ 代表了系统中的某一类角色, $\forall x. \varphi$ 含义是任意策略 x 都满足 φ , 而 $\exists x. \varphi$ 表示存在一个策略 x 满足 φ , (a, x) 是策略赋值公式, 表示角色 a 使用策略 x 且满足 φ , (x, v) 是变量赋值公式, 表示将外界环境变量 v 与策略 x 绑定, 并且策略 x 满足 φ , $\sim \in \{<, <<, >, >>\}$, $\lambda \in [0, 1]$, $\tau \in R_+$. φ 和 ϕ 表示系统中的路径公式, 概率算子 $P_{\sim \lambda} \phi$ 表示满足公式 ϕ 和界限符 $\sim \lambda$ 的路径的概率. 例如公式 $P_{<0.1} \exists x. \forall y(\alpha, x)(\beta, y) X\varphi$ 表示当角色 α 使用策略 x , 角色 β 使用策略 y 时满足 $X\varphi$ 时的概率要小于 0.1. 在 PS-R 系统中, 由于可以将同一个策略赋值给不同的角色, 因此可以实现策略共享, 例如 $\exists x. \forall y(\alpha, x)(\beta, x)(\delta, y) \varphi_1 \cap \varphi_2$ 表示在角色 α 和 β 中共同使用策略 x .

策略通常表示系统在不确定性环境下的特定的解决方案. PSL 逻辑中直接将策略赋值给角色, 这意味着每个角色会使用自己的策略进行行为选择, 而 PS-R 系统中每个角色有其自己的局部状态和局部动作, 因此可以将每个角色的策略映射到该角色下路径的动作集合, 而系统总的策略则是从初始状态 S^0 开始的所有角色的策略的集合, 其定义如下所示.

定义 2 策略 映射 $RSM: \omega \xrightarrow{r, x} Acts$, 表示在 PS-R 系统中角色 r 使用策略 x 选出的路径 ω 上的所有的动作序列, 记为 $Str(r, x)$, 其中 $r \in RLs$. 对于角色 r 的某个状态 s , 完全策略是指某个策略 f 定义在以 s 开始的角色 r 参与的所有路径上, 记为 $totalStr(s, r)$, 其中 $s \in$

$S, f \in Str(r, x)$, 集合 Str 用来表示 PS-R 系统中的所有角色的完全策略的交集, 即 $Str = \bigcap_{i=1}^n totalStr(S^0, r_i)$

定义 3 运行 PS-R 系统中的运行表示 t 时刻角色 r 在某个策略 f 下执行的动作, 因此系统的运行可以定义为 $Run(r, t, f) = S_r \times L_r \times Act_r \times \chi$, 简写为 $R(r, t, f)$.

2.3 PSL 语义

PSL 的语义通过在 PS-R 系统 I 上解释路径公式 φ 进行描述. 设系统 I 中某一状态 s 及策略 f , 则其满足关系 \models 的定义如下所示:

- (1) $I, s, R(r, t, f) \models p$, 当且仅当 $p \in lab(s)$
- (2) $I, s, R(r, t, f) \models \neg \varphi$, 当且仅当 $I, s, R(r, t, f) \not\models \varphi$
- (3) $I, s, R(r, t, f) \models \varphi_1 \wedge \varphi_2$, 当且仅当 $I, s, R(r, t, f) \models \varphi_1$ 且 $I, s, R(r, t, f) \models \varphi_2$
- $I, s, R(r, t, f) \models \varphi_1 \vee \varphi_2$, 当且仅当 $I, s, R(r, t, f) \models \varphi_1$ 或者 $I, s, R(r, t, f) \models \varphi_2$
- (4) $I, s, R(r, t, f) \models \forall x. \varphi$, 如果对于所有的策略 $x \in totalStr(s, r)$, 都满足 $I, s, R(r, t, x) \models \varphi$
- (5) $I, s, R(r, t, f) \models \exists x. \varphi$, 如果存在一条策略 $x \in totalStr(s, r)$, 满足 $I, s, R(r, t, x) \models \varphi$
- (6) $I, s, R(r, t, f) \models (a, x) \varphi$, 当且仅当 $I, s, R(a, t, x) \models \varphi$
- (7) $I, s, R(r, t, f) \models (x, v) \varphi$, 当且仅当 $I, s, R(a, t, x) \models \varphi$ 且 $v \models lab(s)$
- (8) $I, s, R(r, t, f) \models X\varphi$, 当且仅当 $I, s, R(r, t+1, f) \models \varphi$
- (9) $I, s, R(r, t, f) \models \varphi_1 \cup \varphi_2$, 如果存在 $t < t_2$, 有 $I, s, R(r, t_2, f) \models \varphi_2$, 则对所有 $t < t_1 < t_2$, 均有 $I, s, R(r, t_1, f) \models \varphi_1$
- (10) $I, s, R(r, t, f) \models \varphi_1 \cup^{\leq k} \varphi_2$, 如果存在 $t < t_2$, 有 $I, s, R(r, t_2, f) \models \varphi_2$, 则对所有 $t < t_1 < t_2$ 且 $t_1 + k \leq t_2$, 均有 $I, s, R(r, t_1, f) \models \varphi_1$
- (11) $I, s, R(r, t, f) \models P_{\sim \lambda} \varphi$, 如果对于角色 r , 存在一个策略 f , 满足 $I, s, R(r, t, f) \models \varphi$, 且 φ 上状态转移最大概率之积 $\prod_{i=1}^{|\varphi|} \rho_i \leq \lambda$ 或者状态转移最小概率之积 $\prod_{i=1}^{|\varphi|} \rho_i \geq \lambda$

3 基于 PTA 构建 VANET 信息广播模型

VANET 是分发应用信息的有效平台, 例如停车场停车位信息, 道路交通拥挤信息, 出行线路查询信息等, 这些都需要通过 VANET 将某个区域内 (命名 A) 的交通信息传输到更远的区域 (命名 B), 以保证 B 区域内

的驾乘人员能够接收到实时、可靠的交通信息.然而由于 VANET 网络中节点的高速移动、道路限制等因素,信息的发送和接收具有随机性和不确定性,传统的网络仿真方法无法定量分析信息到达目的节点的的概率,或者信息不成功转发的概率,本文以文献^[10]提出的广播

转发协议为例,对不同策略下信息广播成功发送或接收的概率进行定量分析与验证.

3.1 信息广播源节点模型

源节点发送信息的过程分为 3 步,其对应的 IPJA-R 模型如图 1 所示.

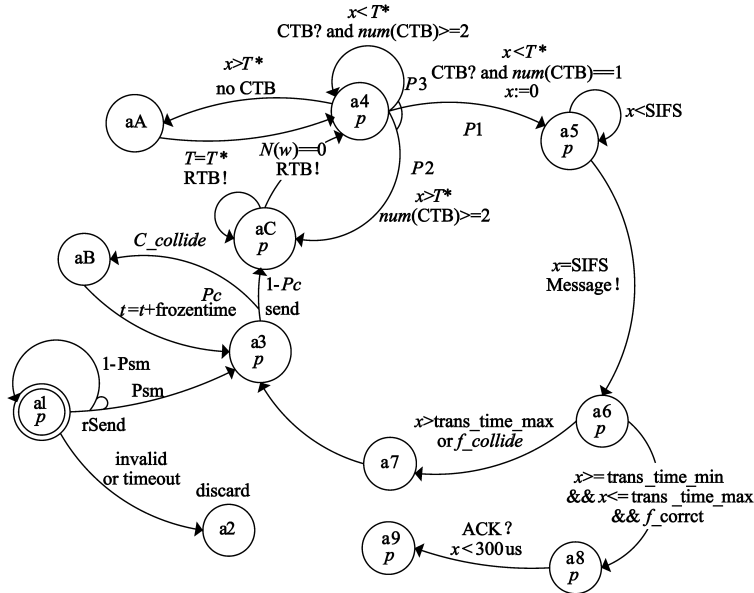


图1 信息发送节点模型

Step 1:源节点 S 首先需要利用 IEEE802.11 竞争窗口选择和退避机制选择退避窗口 cw ,以确定广播退避计数器的退避时隙数 $N(W)$.这是一个时间迁移过程,图 1 中的节点 $a3$ 的自身迁移就是表示这一过程.

Step 2:节点 S 在每一个时隙 σ 探测信道状态,当信道空闲时,广播退避计数器 $N(W) = N(W) - 1$,否则冻结.当 $N(W) = 0$ 时,源节点 S 立即发送广播请求 RTB (Request To Broadcast) 帧,如果在发送过程中检测到有其它节点也在发送 RTB 帧,则表明至少有两个以上的节点在竞争信道,则需要返回 Step 1,重新设置广播退避计数器.当节点成功发送 RTB 后,设置等待时间 T^* .这一过程与图 1 中的节点 $a3$ 到 $a4$ 的转移过程相对应.

Step 3:如果节点 S 在等待时间 T^* 结束之前正确接收到其邻居节点响应的 CTB,则在 SIFS 之后向该节点发送广播信息,并等待中继节点的确认信息 ACK,这一过程与图 1 中的节点 $a5$ 到 $a9$ 的转移过程相对应.当广播节点在 T^* 结束时没有正确接收到邻居节点的 CTB,则说明邻居节点竞争失败,需要源节点 S 重新发送 RTB,以寻找新的中继节点.如果在等待时间 T^* 结束时一直没有接收到任何 CTB,则说明信息分发方向已经没有邻居节点,则该节点需要将信息转发给下一个区域内的节点,进入区域间信息转发阶段,即进入 $a4$

状态.

由上面的分析可知,图 1 中的节点 $a4$ 需要根据是否收到 CTB 以及收到 CTB 的个数进行条件转移,而是否成功收到 CTB 与网络节点数 n 、退避窗口 cw 密切相关,因此节点 $a4$ 上的转移可以使用概率表示,而是否收到 CTB 使用不确定性表示.

3.2 接收信息节点模型

信息接收模型如图 2 所示.

Step 1:接收到 RTB 信息帧的节点 C_i 首先判断广播信息传递方向、信息的有效期和传输范围 R 以便确定是否参与中继节点的竞争,并通过自己与广播节点之间的坐标确定自己所属的分段区域 N_j ,然后选择中继

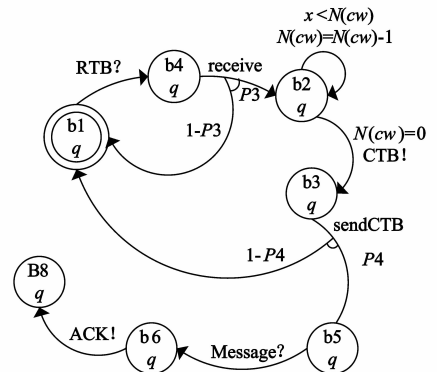


图2 信息接收节点模型

节点竞争退避窗口 cw , 并设置相应的计数器值等于选择的中继节点竞争计数器 $N(cw) = k \times cw$

Step 2: 节点 C_i 不需要探测信道状态, 每经历一个时隙 σ , 节点的计数器值减 1, 当计数器值为 0 时, 节点 C_i 立即发送 CTB, CTB 中包含节点 ID, 广播节点 ID 以及自己的位置坐标, 并等待接收广播信息, 其他收到 RTB 的节点也相应退出竞争过程. 但是, 当某个节点检测到信道忙, 不能正确识别 CTB 时, 则说明至少存在两个邻居节点同时发送 CTB, 导致信道发生碰撞, 因此剩余的邻居节点继续执行退避计数, 以继续竞争中继节点.

Step 3: 节点 C_i 收到信息后, 发送 ACK 应答信息.

3.3 VANET 信息广播模型策略选取与定量验证

从上面的分析可以看出, 信息传输的过程中, 广播源节点和接收节点都需要选择退避竞争窗口 cw , 然而信息能够在网络上正确传输的概率不仅与 cw 相关, 而且与节点数 n 及节点广播概率相关. 为了定量分析信息成功接收的概率与竞争窗口 cw 及节点数 n 的关系, 本文在信息传送过程中使用的策略为: 针对不同的节点数, cw 值分别使用 16、32、64、128 和 256 进行验证;

使用 PSL 公式表达该策略为:

$$P_{\max} = ? [\exists x. \forall y. (a, x)(b, y)(a, d)(a, n) \cup aSuc \wedge \cup bSuc]$$

该公式表示角色 a (发送者) 使用策略 x , 角色 b (接收者) 使用策略 y , 同时将变量 d (两车之间的距离) 和 n (节点数) 赋值给角色 a , 则角色 a 成功发送信息,

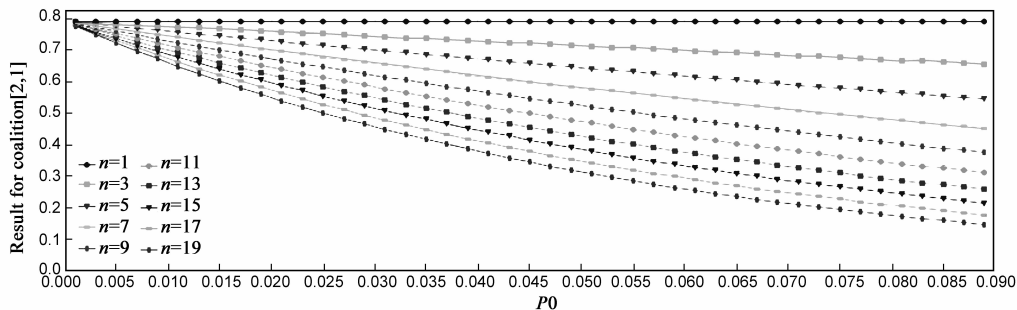


图3 信息接收成功的最大概率图

4 结束语

本文提出了一种基于概率策略逻辑的定量验证方法, 该方法首先对系统中的多个角色使用概率时间接口自动机对其行为建模, 然后使用概率策略逻辑语言对系统需要满足的性质进行描述, 并将该方法应用到 VANET 信息广播协议性能分析上, 在验证过程中, 针对 VANET 节点数 n 、中继节点竞争窗口值 cw 选取不同的策略, 并给出不同策略下信息广播发送与接收成功的最大概率.

未来的工作包括完善定量验证的算法, 完善支持

角色 b 成功接收信息的最大概率是多少.

由于在一幅图中无法表示出 cw, d, n 以及概率 P 之间的关系, 本文给出另外一种表示方法, 如表 1 所示, 它表示节点广播概率 σ 与竞争窗口 cw 、节点数 n 之间的关系. 从表 1 可以看出, 当竞争窗口固定时, 节点的信息广播概率随着节点数量的增加逐渐降低; 而当节点数固定, 竞争窗口相应增加时, 节点的信息广播概率减小. 因此在图 3 中将 X 轴设置成节点发送概率, Y 轴发送信息成功接收的概率, 且发送节点和接收节点间的距离小于 200. 从图 3 中可以看出, 当 X 轴保持不变, 节点数增加时, 信息发送和接收成功的最大概率变小, 这是因为当节点发送概率保持不变时, 随着节点数的增加, 需要减少 cw 值, 而 cw 值变小会直接导致成功概率降低. 当节点数保持不变, 即 cw 值保持不变, 随着每个节点发送广播的概率的增加, 发生冲突的可能性增加, 因此信息发送和接收成功的最大概率变小.

表 1 节点广播概率、节点数和竞争窗口之间的关系

$cw \backslash n$	10	20	30	40	50
16	0.07	0.053	0.048	0.04	0.038
32	0.042	0.038	0.035	0.032	0.03
64	0.028	0.025	0.022	0.02	0.018
128	0.018	0.017	0.016	0.015	0.014
256	0.009	0.0088	0.0086	0.0084	0.0082

PSL 的定量验证工具, 同时将此种定量建模与验证方法与系统预测方法相结合, 使之能够通过验证不满足性预测系统存在的问题, 以帮助设计人员建立更加完善的系统模型.

参考文献

[1] Zhou Lianke. Research on traffic flow density based broadcasting technologies in VANETS[D]. Harbin Institute of Technology, 2011.

[2] Biswas S, Tatchikou R, Dion F. Vehicle-to-vehicle wireless communication protocols for enhancing highway traffic safety

- [J]. IEEE Communications Magazine, 2006, 44(1): 74 – 82.
- [3] Sproston J. Discrete-time verification and control for probabilistic rectangular hybrid automata[A]. Proc 8th Int Conf Quantitative Evaluation of SysTems (QEST' 11)[C]. Aachen, Germany, 2011, 79 – 88.
- [4] Chatterjee, K. Markov decision processes with multiple long-run average objectives[A]. Proc 27th Int Conf on Foundations of Software Technology and Theoretical Computer Science (FSTTCS' 07)[C]. Springer, 2007, 473 – 484.
- [5] Kwiatkowska M, Norman G, Segala R, Sproston J. Verifying quantitative properties of continuous probabilistic timed automata[A]. Proc 11th Int Conf of Concurrency Theory (CONCUR 2000)[C]. PA, USA, Springer, 2000, 123 – 137.
- [6] 刘志锋, 孙博, 周从华. 概率实时时态认知逻辑模型检测中抽象技术的研究[J]. 电子学报, 2013, 41(7): 1343 – 1351.
- Liu Zhi-feng, Sun Bo, Zhou Cong-hua. Abstuction in model checking probabilistic real-time temporal logic of knowledge [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(7): 1343 – 1351. (in Chinese)
- [8] Norman G, Parker D, Sproston J. Model checking for probabilistic timed automata[J]. Formal Methods in System Design, 2013, 43(2): 164 – 190.
- [9] Taolue Chen, Jian Lu. Probabilistic alternating-time temporal logic and model checking algorithm[A]. Proc 4th Int Conf on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery(FSKD 2007)[C]. Haikou: IEEE, 2007. 35 – 39.
- [10] Kwiatkowska M, Norman G, Parker D. PRISM 4.0: Verification of Probabilistic Real-time Systems [A]. Proc 23rd Int Conf on Computer Aided Verification (CAV' 11)[C]. UT,

USA: Springer, 2011. 585 – 591.

- [11] 刘鸿飞. VANET 信息广播模型与优化方法研究[D]. 重庆大学, 2009.

作者简介



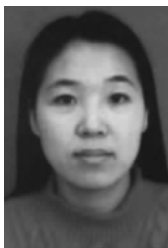
李树秋 男, 1966 年出生, 黑龙江省江尚志县人, 吉林大学计算机学院副教授, 工学硕士. 研究方向为计算机协同、计算机应用.

E-mail: shuqiu@jlu.edu.cn



刘淑芬 女, 1950 年出生, 教授, 博士生导师. 研究方向为计算机支持协同工作、软件体系结构、基于模型驱动的软件编程方法.

E-mail: liusf@jlu.edu.cn



王晓燕(通信作者) 女, 1977 年出生于吉林长春, 博士, 讲师. 研究方向为模型检测、形式化方法.

E-mail: wangxy@jlu.edu.cn