

无线射频 RFID 识别协议自动验证方法研究

宋 岚^{1,2,3} 薛锦云³ 胡启敏³ 谢武平^{1,3} 江东明^{1,3} 游 珍³

(武汉大学计算机学院软件工程国家重点实验室 武汉 430072)¹

(华东交通大学信息工程学院 南昌 330013)²

(江西师范大学国家网络化支撑软件国际合作基地 南昌 330022)³

摘 要 Population Protocols 是一种受生物启发的计算模型,能够表示无线网络中数量庞大但计算能力弱的多组件间的交互,它为无线传感器网络提供了一种可计算推理的理论框架。将 Population Protocol 理论引入到 RFID 识别协议中,提出了 RFID 识别协议系统模型验证框架;构建了标签与阅读器交互产生的状态变迁模型;最后用 spin 模型检测工具和 LTL 线性时序逻辑验证了弱公平条件下该模型的自稳定性,为分析与验证无线传感器网络中协议的正确性提供了一种行之有效的方法。

关键词 Population Protocols, RFID, 协议验证, Spin

中图分类号 TP391 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.09.020

Research of Automatic Verification Method about Radio Frequency Identification Protocol

SONG Lan^{1,2,3} XUE Jin-yun³ HU Qi-min³ XIE Wu-ping^{1,3} JIANG Dong-ming^{1,3} YOU Zhen³

(State Key Laboratory of Software Engineering, School of Computer, Wuhan University, Wuhan 430072, China)¹

(School of Information Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)²

(The State Base of Networked Supporting Software of International S/T Cooperation,

Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)³

Abstract Population Protocols, which is a calculation model inspired by biology, was designed to represent interaction between multiple components with very limited computational capability in wireless network. It provides a theoretical framework which has the function of computation and reasoning for wireless sensor networks. This paper introduced the population protocols model into the RFID anti-collision protocol, proposed the validation framework of RFID anti-collision protocol, built the state transition model through the interaction between the tag and the reader, and verified the self-stabilizing population protocols by using the spin model checker and linear temporal logic (LTL). These work will provide us an effective method to analyze and verify the correctness of the protocol in wireless sensor networks.

Keywords Population Protocols, RFID, Protocol verification, Spin

1 前言

无线传感器网络中的射频识别技术(Radio Frequency Identification, RFID)^[1],是一种利用射频通信实现的非接触式自动识别技术,它通过射频信号自动识别目标对象,可对载有射频标签的物体进行跟踪和识别,在工业自动化、供应链管理和物流运输等领域已经得到广泛的应用,其特点是识别迅速、成本低。RFID 识别协议是一种分布式协议,分布式协议的一个基本属性就是所有组件最终必须能转换成正确的输出值。Dijkstra 于 1974 年首次把自稳定性的概念引入到计算机科学中^[2],即系统从任何初始状态出发,总能在有限步内到达

一个合法状态。自稳定算法主要作用在无线网络中的分布式系统上,以确保系统的容错性和健壮性。性能较好的自稳定算法应用于实践时需要经过复杂的正确性验证。

Population Protocols 理论由 Angluin^[3]于 2004 年提出,适用于满足以下条件的无线网络协议:系统由大量有限状态的组件群构成,组件群属于被动通信,计算能力弱;一对组件交互后将依据事先的约定改变各自的状态;交互的模式不可预测。它是一种受生物启发的分布式计算模型,主要用于无线网络分布式系统中具有较低计算能力的可移动组件交互产生的状态变迁建模^[4-7]。近几年,越来越多的学者对该模型进行了研究,Clement^[8]为避免 Population Protocols 中 Agent 数

到稿日期:2016-08-03 返修日期:2016-11-13 本文受国家自然科学基金(61272075,61472167,61462041,61363012),江西省科技厅项目(20161BBH80039)资助。

宋 岚(1978—),女,博士生,CCF 会员,主要研究方向为软件的形式化及其自动化、智能图像处理,E-mail:sl130com@163.com;薛锦云(1947—),男,博士生导师,主要研究方向为软件的形式化及其自动化;胡启敏(1979—),男,博士,CCF 会员,主要研究方向为软件的形式化与自动化;谢武平(1984—),男,博士,CCF 会员,主要研究方向为软件的形式化与自动化;江东明(1975—),男,博士,CCF 会员,主要研究方向为服务计算和面向构件的软件开发;游 珍(1982—),女,博士,CCF 会员,主要研究方向为软件的形式化与自动化。

量引起的状态爆炸问题,提出了 Population Protocols 的抽象模型,并证明了抽象模型与 Population Protocols 重要属性的约束关系;Liu^[9]提出了一种通用算法,用 LTL 验证了有限尺寸下 Population Protocols 的强公平约束及弱公平约束算法;Mery 等^[10]采用 Population Protocols 对领导人选举协议、红绿灯协议及舞者协议进行建模后,使用 event B 和 TLA 证明了其在弱公平下的收敛性。

近年来,在 Population Protocols 模型与 RFID 相结合的应用方面出现了许多有意义的研究。Becchetti 等^[11]将 Population Protocols 模型应用于社交网络,使用 RFID 技术将采集到的 Agent 移动数据作为 NetLogo 仿真器的输入,模拟实际场景中 Agent 的移动,研究任意网络拓扑下 Population Protocols 模型的聚合性;Pennisi 等^[12]将 RFID 标签作为可穿戴设备放于人体上,将 RFID 阅读器安装于室内不同位置的机器上,使用基于 Population Protocols 模型的种群交互算法完成大量传感数据的收集,检测人体移动的位置,以应对紧急突发事件。

上述应用常攸关安全,对 RFID 识别协议进行高可靠的形式化分析显得十分必要。Spin 是功能强大的模型检验器,支持验证以建模语言 PROMELA 编写的系统,并对其进行功能检验以及线性时态逻辑 LTL 表示的属性正确性分析^[13-15]。因此,本文将 Population Protocols 模型与可视化的模型检测工具 spin 及线性时态逻辑 LTL 结合后应用于无线传感器网络的 RFID 识别协议的自稳定性验证,从而方便对多个阅读器或多个标签场景进行形式化建模描述,以分析无线网络中协议的约束特征。

本文所做的主要工作是在 RFID 系统的理论上,研究了 Population Protocols 表示及投影和点火规则,提出了 RFID 识别协议系统模型验证框架,构建了标签与阅读器交互产生的状态变迁模型,最后用 LTL 验证其模型约束及配置约束,spin 运行的结果证明了协议模型的自稳定性。本文第 1 节引入与本文相关的知识背景;第 2 节介绍 RFID 系统及其识别协议的基本理论;第 3 节对用到的形式化模型及其转换规则进行定义;第 4 节设计 RFID 识别协议的验证框架;第 5 节对模型进行建模及相应配置;第 6 节通过 spin 工具检测 LTL 描述的属性是否满足协议需求的自稳定性;最后进行总结并指明未来的研究方向。

2 RFID 系统理论

无线射频 RFID 系统由 3 部分组成:标签、读写器和上行/下行模块软件,系统工作流程如图 1 所示。读写器通过共享无线信道的通信来识别标签,再将采集的数据交由后台进行处理。若多个标签在同一时间内发送自己的 UID 给阅读器,则会产生碰撞。为了解决这些碰撞,实现标签的正确识别及选取合适的防碰撞机制,是阅读器快速、正确获取标签数据的关键。在 RFID 系统的空间通道内存在 3 类事件模型:以能量提供为基础的事件模型;按时序方式进行数据交换的事件模型;以数据交换为目的的事件模型。依据形式化描述的特点,本文将对第二种情况下的事件模型进行形式化分析与验证。

以时序方式进行的数据交换模式有两种:1)读写器首先广播,对 RFID 场区内的标签发送寻呼信号(Reader Talk

First,RTF);2)标签先对所在射频场区的读写器发出寻呼信号(Tag Talk First,TTF)。本文仅考虑第一种情况,在 RTF 工作模式下,读写器首先对场内的标签发出具有约束条件的指令,从而使射频场内某些电子标签因自身数据信息所受到的条件约束而进入等待状态,直至有某一处于活动状态的标签最终与读写器建立完整的通信联系,标签与读写器通信完毕后进入休眠状态,周而复始,直至所有标签被成功识别。

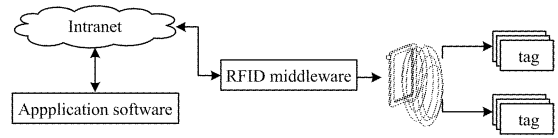


图 1 RFID 系统工作流程图

3 相关概念的形式化表述

本节将介绍下文所提到的形式化模型的定义、迁移点火规则及其转换约定,其他有关 Population Protocols 的基本概念和定义请见文献[3-7]。

定义 1 Population Protocols 模型用一个五元组表示为 $PPM = (Q, \Sigma, \ell, \omega, \delta)$ 。其中, Q 是组件状态的有限集合; Σ 是输入集合; ℓ 是从 $\Sigma \rightarrow Q$ 的映射函数, $\ell(\sigma)$ 表示一个输入为 σ 的组件的初始状态; ω 是从 $Q \rightarrow Y$ 的映射函数, $\omega(q)$ 表示在状态 q 下组件的输出, Y 表示输出集合; $\delta \subseteq Q^4$ 表示一对组件交互所产生的迁移关系。假设两个分别处于状态 q_1 和 q_2 的组件进行交互,交互后的状态迁移为 q_1', q_2' ,那么 (q_1, q_2, q_1', q_2') 就处于迁移关系 δ 中。

一个配置(Configuration)由协议中所有组件状态组成的向量来描述,用符号 $C: A \rightarrow Q$ 来表示,其中 A 表示组件集合。

若 $C \rightarrow C'$ 表示两个组件一次交互的状态迁移,则协议的一次执行(Execution)是由配置 C_0, C_1, C_2, \dots 组成的序列。

如果有 k 个组件, $\Pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k\}$ 表示组件的集合,无线网络中每一个参与协议的组件都可以用有限状态机的形式表示。

定义 2 带标签迁移系统 LTS 用一个四元组表示为 $LTS = (S, I, \Sigma, \Delta)$ 。其中, S 是一个有限状态集合, $I \subseteq S$ 是初始状态集, Σ 是标签的有限集, $\Delta \subseteq S \times \Sigma \times S$ 是标签迁移的有限集,或者用符号 $s \xrightarrow{\ell} s'$ 表示 $(s, \ell, s') \in \Delta$ 。

标签迁移系统是描述系统的状态及状态之间迁移关系的模型。该模型用于描述系统行为,用点表示状态,被标记的边表示迁移,用于对实时系统建模。

定义 3 变迁规则或点火规则 E 是 LTS 的一个执行序列, $E = S_0, \ell_0, S_1, \ell_1, \dots, S_i, \ell_i, \dots$ 。其中, $S_0 \in I$, 对于 $\forall i \geq 0$, 有 $S_i \xrightarrow{\ell_i} S_{i+1}$ 。一个标签 ℓ 在执行序列 E 中使能,当且仅当满足条件: $\exists i$, 使得 ℓ 在状态 S_i 使能。

迁移的引发规则对路径进行了约束,引发规则定义了 LTS 的执行轨迹。LTS 的状态空间通过迁移的引发可用可达树或可达图的形式来表示。

定义 4 PPM 语义到 LTS 语义的投影规则。

(1) 状态 S 是一个 $\Pi \rightarrow Q$ 的映射函数,指明了每个组件的状态,因此 $S = 2^{\Pi \rightarrow Q}$ 。

(2) 初始状态 I 由在 PP 模型中的函数 ℓ 产生。

(3) 标签集: $\Sigma \subseteq P_2(\Pi) \times \delta$, P 表示幂集。

(4)标签转换函数: $\Delta = \{s \xrightarrow{\ell} s' \mid \exists \pi_i, \pi_j \in \Pi, s, t, t = s(\pi_i) \parallel s(\pi_j) \rightarrow s'(\pi_j) \in \delta, \ell = (\{i, j\}, t), \text{ and } \forall \pi \in \Pi \{ \pi_i, \pi_j \} \cdot s(\pi) = s'(\pi)\}$ 。

通过投影规则,使用 PPM 定义的语义转换为 LTS 语义后,即可使用 petri_net 图形化描述状态之间的变迁及用线性逻辑 LTL 表示的配置约束。

4 RFID 识别协议模型验证框架

本文对无线网络中 RFID 识别协议设计了相对应的验证框架,主要步骤如下:

步骤 1 建立 RFID 识别协议的 PPM,对五元组中的各元素分别赋值。将已建好的 PPM 按第 3 节所述投影规则构建起多标签多阅读器的无线网络下协议的 LTS 模型,并用 petri_net 图形化表示。

步骤 2 在步骤 1 的基础上,将 PPM 转换为 petri_net,每一个状态 Q 对应 petri_net 中的 place; δ 的每一个迁移对应 petri_net 中的 transition;组件对应 petri_net 中的 token;petri_net 中的一次点火对应 PPM 中组件间的一个交互,然后再对 petri_net 模型按指定的协议需求进行配置。

步骤 3 根据模型本身的配置需求,分析无线网络的通信特点,将约束用自然语言描述,并用 LTL 公式形式化表示配置约束及模型约束。

步骤 4 通过检测 LTL 是否满足可达性来分析与验证可配置模型是否满足模型的结构属性和协议需求。

协议模型验证框架如图 2 所示。

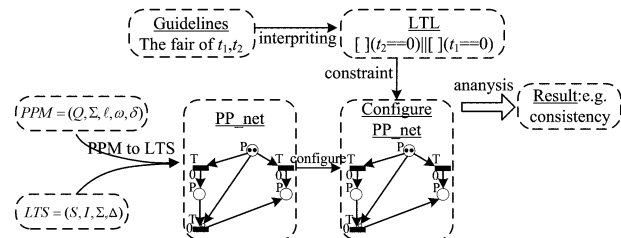


图 2 RFID 识别协议模型验证流程框架

5 RFID 识别协议的形式化建模及配置

本节将依据第 4 节给出的理论框架来构建协议的形式化模型,并给出其配置信息。

RFID 识别协议的形式化建模需要考虑 3 种情况:1)单个标签、单个阅读器,这种情况不会产生冲突;2)单个标签、多个阅读器,将产生标签冲突;3)多个标签、多个阅读器,这种情况将产生标签冲突及阅读器冲突。本文首先对第一种情况进行建模分析,再将其按一定规则扩展为单阅读器多标签情况。第三种情况更为复杂,状态数将呈指数上升,这时需要采用模型约简机制来避免状态爆炸问题,限于篇幅,本文将另文再述。

在 RTF 模式下,标签最初处于空闲工作状态。标签进入阅读器的工作范围后便从空闲态转入准备态,等待阅读器发出选择指令,标签若被阅读器正确识别,则由准备态转入激活态。而如果此时有多个标签同时响应阅读器指令,将产生冲突,这时需要利用冲突算法来逐个屏蔽其他电子标签,直到识别出唯一的标签并将其选中,被选中的标签将与阅读器进行数据通信,最后阅读器对该标签进行去选中,标签进入休眠状态。

依据 Population Protocols 理论,两个关键组件阅读器和标签作为参与交互的一对实体,其五元组的形式化表示如图 3 所示。

$PPM = (Q, \Sigma, \ell, \omega, \delta)$ $Q = \{tag_idle, ready, active, halt, reader_idle, collision, reading, end\}$ $\Sigma = \{REQA, select, read_data, unselect, only_ack_UID, mult_ack_UID, mark_read\}$ $\ell = \{(REQA, ready), (select, active), (unselect, halt), (wake_up, ready), (wait, ready), (read_data, active), (only_ack_UID, reading), (mult_ack_UID, collision), (mark_read, end)\}$ $\omega = \{(reader_idle, REQA), (ready, only_ack_UID), (ready, mult_ack_UID), (reading, select), (collision, wait), (active, mark_read), (end, unselect), (reader_idle, wake_up)\}$ $\delta = \{((tag_idle, REQA), (reader_idle, only_ack_UID)) \rightarrow (ready, reading), ((ready, select), (reading, -)) \rightarrow (active, reading), ((active, unselect), (reading, mark_read)) \rightarrow (halt, end), ((ready, wait), (reader_idle, mult_ack_UID)) \rightarrow (ready, collision), ((collision, only_ack_UID), (ready, select)) \rightarrow (reading, active)\}$

图 3 RFID 识别协议的 Population Protocols 五元组表示

为更直观地表示识别协议模型,本文用 petri_net 将模型进行图形化表示。将系统中的进程符号化为一系列状态,对两组交互过程进行建模分析,依据进程和事件之间的关系得到状态和输入事件之间的转移关系。Petri_net 的描述有 4 种基本元素^[16-17]:库所(place)、标记(token)、迁移(transition)、带箭头的弧线(arc)。它属于有限状态机的一种,允许多种状态迁移同时交叉发生,对异步并发过程的描述比有限状态机更方便。

根据前面的描述,阅读器与标签的 petri_net 模型分别如图 4、图 5 所示,其中长方形表示触发的事件,圆圈表示阅读器或标签的状态,有向箭头表示状态变迁。

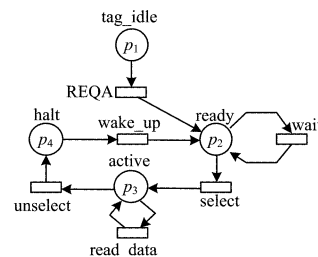
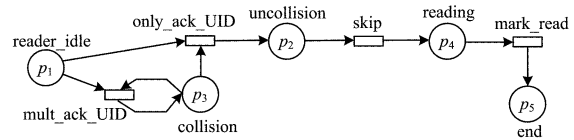
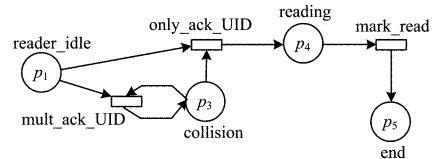


图 4 标签状态变迁图



(a)原始阅读器的状态变迁



(b)优化后的阅读器的状态变迁

图 5 阅读器状态变迁图

依据约简规则将图 5(a)转化为图 5(b),仍旧保持了其性

质不变。图 6 示出了图 5 两种情况下的可达图,通过分析优化前后的可达图,观察阅读器状态变化及变迁发生序列的情况,其有界性和活性并没有因约简而产生变化。

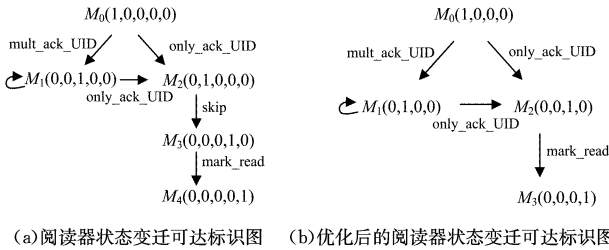


图 6 优化前后的阅读器状态变迁可达标识图

依据 petri_net 理论可知,图 7(a)中 $t_1 \cap t_2 = \{p_1\} \neq \emptyset$,这是模型冲突产生的必要条件但不是充分条件。分析其模型,这些迁移点若同时发生,则产生并发;但若发生的先后顺序不一致,则在新的标识下将产生冲突。可以通过相应的机制来避免该冲突,如图 7(b)所示。这里在模型中加入库所 p_4, p_5 ,与迁移 t_1, t_2 形成一个环路,从而避免这两个迁移竞争资源的冲突,进而使得都能收到来自对方组件的消息。

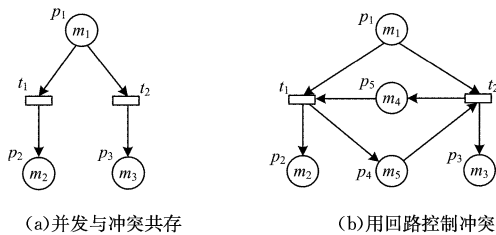


图 7 对 petri_net 冲突的改进措施

标签属于被动通信,标签间不能相互通信,且 RFID 标签间的冲突是在阅读器收到来自多个标签的回应信息后由阅读器产生的。解决方法是使用约束机制,将标签冲突或阅读器冲突转换为对协议模型的公平属性的约束机制的研究,实现协议的冲突检测。

本文用符号 A 来表示一个由 N 个组件组成的集合,阅读器作为组件(编号为 0)与所有标签进行交互,得到 $E = (0, t_1), (0, t_2), \dots$,其中, E 由 A 中的有序偶对组成,表明交互过程中将产生状态变迁的组件信息。将一个 PPM 应用于组件群 A, A 中每一个组件就具备了协议运行时的一个状态。

在 PPM 的形式化表示中,模型的尺寸是需要考虑的一个重要因素。一个阅读器、多个标签的情况下,标签的数量将引起状态空间的指数上升,用 spin 能处理 1020 个左右的状态,本文将状态数量限定在该范围之内。

6 RFID 识别协议模型的验证

前文采用 PPM 对 RFID 识别协议建立了形式化模型。为了保证模型的正确性,需要在已建立的模型上加上约束规则,通过 spin 证明器验证是否满足目标的约束。本文使用 LTL 线性时序逻辑对模型的属性约束进行描述。下面是关于 LTL 公式的定义,其他有关 spin 中 LTL 的使用方法请见文献[18]。

定义 5(属性(约束)) 设 AP 为原子命题集,归纳定义

LTL 公式(formula)为:

$$\phi ::= p \in AP \mid \text{true} \mid \text{false} \mid \neg \phi \mid \phi_1 \vee \phi_2 \mid X\phi \mid \phi_1 U \phi_2$$

为了增加 LTL 的描述能力,在经典集合论基本符号上增加了 4 个算子: $U, X, \square, \langle \rangle$,分别表示下一刻(next-state operator)、直到(until)、必然(always)、可能(finally)。其中,算子 \square 可用 G 表示, $\langle \rangle$ 可用 F 表示。由于 U, X 两个算子可以用 $\square, \langle \rangle$ 算子组合表示,因此所有的 LTL 公式都可用布尔符号 \neg 与 \vee 、量词符号 \forall 与 \exists 及算子 $\square, \langle \rangle$ 来表示。

以互斥算法为例,描述以下 3 个用自然语言表示的属性:

- 1)每个进程最终可以进入它的临界区;
- 2)每个进程将不时地进入它的临界区;
- 3)每一个等待进程最终能进入它的临界区。

设 cs_i 表示临界区的进程 $i, waiting_i$ 表示处于等待中的进程 i 。

用 LTL 公式将上面 3 个属性分别表示为:

- 1) $\langle \rangle cs_i$;
- 2) $\square \langle \rangle cs_i$;
- 3) $\square (waiting_i \rightarrow \langle \rangle cs_i)$ 。

本文使用 3 个数组来表示整个系统中的状态,分别是 $identified[N], token[N], Label[N]$,这里 N 是网络中标签的数量,设阅读器是组件 0,标签用组件 1 到 $N-1$ 表示。一个进程表示一对可能的组件交互行为,建模时只需考虑每个交互组件固定的输入而无需考虑复杂的协议细节。

一个进程的迁移用 $proctype\ rulen(int\ i, r)$ 表示,其中参数 i 和 r 用于标识阅读器和标签。

比如, $rule1(0, 1)$ 表示阅读器和标签 1 依据规则 1 发生迁移。

状态的变迁遵循两个用 PPM 描述的迁移规则:

$$Rule1 : ((reader_idle, mult_ack_UID), (tag_idle, REQA)) \rightarrow (collision, ready)$$

这个规则表明,阅读器由 $reader_idle$ 状态经输入 $mult_ack_UID$ 变迁为 $collision$ 状态,标签由 tag_idle 状态经输入 $REQA$ 变迁为 $ready$ 状态,即阅读器检测到了多标签请求的冲突,将状态变为冲突态,标签经阅读器命令 $REQA$ 变为准备态。

$$Rule2 : ((collision, only_ack_UID), (ready, select)) \rightarrow (reading, active)$$

这个规则表明,阅读器由 $collision$ 状态经输入 $only_ack_UID$ 变迁为 $reading$ 状态,标签由 $ready$ 状态经输入 $select$ 变迁为 $active$ 状态,即阅读器检测到唯一的标签请求,由冲突态变为读卡状态,相应的标签被激活,随后与阅读器进行读写操作。

协议的 LTL 属性描述为:

- 1) $\Sigma 1 \mid = G(reader_idle \rightarrow F(tag_idle))$
这个需求表明阅读器始终持有令牌。
- 2) $G((tag_idle \rightarrow X(ready)) \wedge (ready \rightarrow X(active))) \wedge (active \rightarrow X(halt))$

这个需求表明如果只有一个标签,那么该标签能被阅读

器识别,其状态按时序变化。

3)G(collision->F(reading))

这个需求表明,产生冲突后的标签最终能被阅读器正确读写。

实验在 1.8GHz, Intel Core i3-3217U CPU 和 4GB 内存环境下进行,结点数为 3,交互的偶对数为 2 时,执行 Xspin 5.1.6 产生的结果如图 8 所示。Sequence Chart 窗口列出了仿真过程中所有消息的发送和接收,在经历冲突后,标签最终全部被阅读器识别。

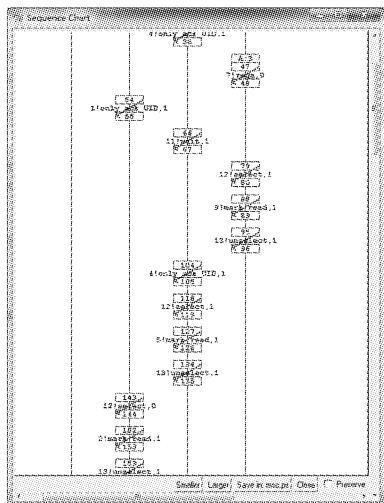


图 8 识别协议可达图

图 9 中的表达式 []p 表示标签能被阅读器识别。定义 #define p identified[1]==0,运行窗口显示验证结果不成立,说明 identified[1]不是总为 0 的。这里 0 表示没有被识别,1 表示已经被阅读器识别。



图 9 LTL 验证结果图

表 1 显示上述协议用 LTL 公式表示的 3 个关键属性在弱公平条件下的模型检测能够通过,并且给出了每个属性验证时所需的时间和占用的存储空间。

表 1 识别算法在弱公平下的验证结果

公式	属性	时间/ s	内存/ kB	结果
LTL1	$\Sigma = G(\text{reader_idle} \rightarrow F(\text{tag_idle}))$	16.38	7.293	valid
LTL2	$G((\text{tag_idle} \rightarrow X(\text{ready})) \wedge (\text{ready} \rightarrow X(\text{active}))) \wedge (\text{active} \rightarrow X(\text{halt}))$	44.35	56.95	valid
LTL3	$G(\text{collision} \rightarrow F(\text{reading}))$	24.35	17.06	valid

结束语 本文提出了一个 RFID 识别协议系统模型正确性的分析方法。此方法是将 Population Protocols 理论引入识别协议的形式化建模技术中,用以表示无线网络中数量庞大而计算简单的结点间的交互。本文构建了 RFID 识别协议的形式化模型,用 spin 作为工具验证了其中的模型属性及协议属性,实验结果表明了该模型的正确性。尽管 spin 在运行过程中采用了偏序归约策略来减少状态空间中需要遍历及存储的状态数目,但在数量规模 N 较大的网络节点中,验证时需要研究其优化约简策略来避免状态爆炸问题,这些都有待进一步研究。

参考文献

- [1] SHAHZAD M, LIU AX. Probabilistic optimal tree hopping for RFID identification[J]. ACM Sigmetrics Performance Evaluation Review, 2013, 41(1):293-304.
- [2] DIJKSTRA E W. Self-stabilization in spite of distributed control [C]//Selected Writing on Computing: A personal Perspective. Springer-Verlag, Berlin, 1982:41-46.
- [3] ANGLUI D, ASPNES J, DIAMADI Z, et al. Computation in networks of passively mobile finite-state sensors[J]. Distributed Computing, 2006, 18(4):235-253.
- [4] ALISTARH D, ASPNES J, EISENSTAT D. Time-space trade-offs in population protocols[EB/OL]. [2016-02-25]. <https://www.researchgate.net>.
- [5] ASPNES J, RUPPERT E. An introduction to population protocols[C]//Middleware for Network Eccentric and Mobile Applications. Heidelberg: Springer, 2009:97-120.
- [6] PANG J, LUO Z, DENG Y. On automatic verification of self-stabilizing population protocols [J]. Frontiers of Computer Science in China, 2008, 2(4):185-192.
- [7] JIANG H. Distributed system of simple interacting agents[D]. Connecticut: Yale University, 2007.
- [8] CLEMENT J, DELPORTE-GALLET C, FAVCONNIER H, et al. Guidelines for the verification of population protocols[C]//2011 31st International Conference on Distributed Computing Systems. Minneapolis: ACM, 2011:215-224.
- [9] LIU Y. Model checking concurrent and read-time systems: the PAT approach[D]. Singapore: Computer science national university of Singapore, 2009.
- [10] MERY D, POPPLETON M. Formal modeling and verification of population protocols[M]//Lecture Notes in Computer Science. Turku: Springer, 2013:208-222.
- [11] BECCHETTI L, BERGAMINI L, FICAROLA F, et al. Population Protocols on real social networks[C]//Proceedings of the 9th ACM Symposium on Performance Evaluation of Wireless Adhoc, Sensor, and Ubiquitous Networks. Minneapolis: ACM, 2012:17-24.
- [12] PENNISI A, PREVITALI F, FICAROLA F, et al. Distributed sensor network for multi_robot surveillance[C]//3rd International Workshop on Cooperative Robots and Sensor Networks (Robosense-2014). Amsterdam: Elsevier, 2014:1095-1100.

- [13] KOMU B N, MZYECE M, DJOUANI K. Spin-based verification of authentication protocols in WiMAX networks[C]//2012 Vehicular Technology Conference(VTC Fall). IEEE, 2012:1-5.
- [14] FENG J. Formal analysis and verification of SPIN protocol[D]. Guizhou: Guizhou University, 2009. (in Chinese)
冯杰. 基于 SPIN 的协议的形式化分析和验证[D]. 贵州: 贵州大学, 2009.
- [15] 古天龙, 蔡国永. 网络协议的形式化分析与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003:37-80.
- [16] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006:10-30.
- [17] 原菊梅. Petri 网建模及其智能分析方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011:39-122.
- [18] HOLZMANN G J. The spin model checker: primer and reference manual[M]. New Jersey: Addison-Wesley, 2003:95-123.

(上接第 82 页)

结束语 知识约简是保持决策系统不同分类特征的最小属性子集, 分布式约简可以保持在知识约简前后各个规则的置信度不变^[15-16]。通过扩展 Pawlak 决策系统中的等价关系到区间值决策系统中的相容关系, 本文提出了区间值决策系统的分布约简与相应差别矩阵的计算方法, 并将提出的计算方法与区间值决策系统的广义决策约简计算方法进行了分析与比较。最后, 通过人工数据集的实验验证了相关结论的有效性。本文的研究工作为相容关系下区间值决策系统的分布式约简提供了具体的方法, 是对区间值决策系统约简的有益探索。根据区间值决策系统的不同约简目标, 如何建立有效的区间值决策系统的知识约简评价体系将是下一步的工作。

参 考 文 献

- [1] MIAO D Q, ZHAO Y, YAO Y Y, et al. Relative reducts in consistent and inconsistent decision tables of the Pawlak rough set model[J]. Information Sciences, 2009, 179(24):4140-4150.
- [2] CHEN Z C. The study of knowledge discovery and attributes reduction in set-valued informations systems[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
陈子春. 集值信息系统的知识发现与属性约简研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [3] ZHANG N, MIAO D Q, YUE X D. Approaches to Knowledge Reduction in Interval-Valued Information Systems[J]. Journal of Computer Research and Development, 2010, 47(8):1362-1371. (in Chinese)
张楠, 苗夺谦, 岳晓冬. 区间值信息系统的知识约简[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(8):1362-1371.
- [4] DENG D Y, HUANG H K, LI X J. Comparison of various types of reductions in inconsistent systems[J]. Chinese Journal of Electronics, 2007, 35(2):252-255. (in Chinese)
邓大勇, 黄厚宽, 李向军. 不一致决策系统中约简之间的比较[J]. 电子学报, 2007, 35(2):252-255.
- [5] XU F F, LEI J S, BI Z Q, et al. Approaches to approximate reduction with interval-valued multi-decision tables in big data[J]. Journal of Software, 2014, 25(9):2119-2135. (in Chinese)
徐菲菲, 雷景生, 毕忠勤, 等. 大数据环境下多决策表的区间值全局近似约简[J]. 软件学报, 2014, 25(9):2119-2135.
- [6] PAWLAK Z. Rough sets [J]. International Journal of Computer & Information Sciences, 1982, 11(5):341-356.
- [7] WANG G Y, YAO Y Y, YU H. A survey on rough set theory and applications [J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(7):1229-1246. (in Chinese)
王国胤, 姚一豫, 于洪. 粗糙集理论与应用研究综述[J]. 计算机学报, 2009, 32(7):1229-1246.
- [8] MIAO D Q, HU G R. A heuristic algorithm for reduction of knowledge[J]. Journal of Computer Research and Development, 1999, 36(6):681-684. (in Chinese)
苗夺谦, 胡桂荣. 知识约简的一种启发式算法[J]. 计算机研究与发展, 1999, 36(6):681-684.
- [9] ZHANG W X, MI J S, WU W Z. Knowledge reductions in inconsistent information systems[J]. Chinese Journal of Computers, 2003, 26(1):12-18. (in Chinese)
张文修, 米据生, 吴伟志. 不协调目标信息系统的知识约简[J]. 计算机学报, 2003, 26(1):12-18.
- [10] DOMINIK S. The rough Bayesian model for distributed decision systems[C]// Proceedings of 4th International Conference on Rough Sets and Current Trends in Computing. 2004:384-393.
- [11] XU W H, ZHANG W X. Distribution reductions in inconsistent information systems based on dominance relations [J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2007, 21(4):124-131. (in Chinese)
徐伟华, 张文修. 基于优势关系下不协调目标信息系统的分布约简[J]. 模糊系统与数学, 2007, 21(4):124-131.
- [12] 徐伟华. 序信息系统与粗糙集[M]. 北京: 科学出版社, 2013:27-46.
- [13] DU W S, HU B Q. Approximate distribution reducts in inconsistent interval-valued ordered decision tables [J]. Information Sciences, 2014, 271(7):93-114.
- [14] ZHANG X, MEI C L, CHEN D G, et al. Multi-confidence rule acquisition and confidence-preserved attribute reduction in interval-valued decision systems[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2014, 55(8):1787-1804.
- [15] ZHOU J. Research on Knowledge Acquisition Algorithms in Probabilistic Rough Set Models[D]. Shanghai: Tongji University, 2011. (in Chinese)
周杰. 概率粗糙集模型的知识获取算法研究[D]. 上海: 同济大学, 2011.
- [16] QIN K Y, PEI Z, DU W F. The relationship among several knowledge reduction approaches[C]//Proceedings of the Second International on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. 2005:1232-1241.