·计算机工程与应用·

基于时间区间时序逻辑的实时系统统一模型检测

朱维军[1,2]，乔芃喆[3]，周清雷[1]，张海宾[2]

(1. 郑州大学信息工程学院　郑州　450001;　2. 西安电子科技大学计算机学院　西安　710071;　3. 河南牧业经济学院信息工程系　郑州　450011)

【摘要】在同一个逻辑框架内无法自动验证实时区间模型的实时区间性质。为此，该文使用一个离散时间区间时序逻辑公式建立实时系统模型，使用另一个离散时间区间时序逻辑公式描述实时系统需要满足的性质，在此基础上，离散时间区间时序逻辑统一模型检测问题即可归约为目前已解决的离散时间区间时序逻辑可满足性判定问题。该文证明了新方法的有效性以及正确性，为区间实时逻辑这一类的模型检测问题提供了方法。

关　键　词　统一模型检测;　实时系统;　可满足性判定;　时间区间时序逻辑

中图分类号　TP301　　　文献标志码　A　　　doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.05.014

Model Checking Real-Time Systems within Unified Approach of Timed Interval Temporal Logic

ZHU Wei-jun[1,2], QIAO Peng-zhe[3], ZHOU Qing-lei[1], and ZHANG Hai-bin[2]

(1. School of Information Engineering, Zhengzhou University　Zhengzhou　450001;

2. School of Computer Science and Technology, XIDIAN University　Xi’an　710071;

3. School of Information Engineering, Henan University of Animal Husbandry and Economy　Zhengzhou　450011)

Abstract　There is no method for model checking real-time systems within the same real-time interval logic. To this end, we restrict a real-time logic, called Timed Interval Temporal Logic (TITL), on discrete time domain. And then, we use a TITL formula to construct an interval model and another TITL formula to describe an interval property. On the basis of this, we formalize a novel approach for model checking within the same logical framework based on TITL. The validity and correctness of the method are proved at last.

Key words　model checking within unified logical framework;　real-time systems;　satisfiability checking; timed interval temporal logic

模型检测(model checking, MC)是一种自动验证系统性质的形式化技术，得到了广泛关注、研究与使用。在实时计算模型检测领域，时间自动机(timed automata, TA)[1]已成为建立模型的事实标准，各种实时逻辑被提出并用于描述系统的实时性质[2-4]。一方面，稠密时间域上定义的所有实时逻辑均不可模型检测。虽然可通过多种不同的限制[5-6]换来逻辑的可模型检测能力，却不可避免地降低了逻辑的表达能力。另一方面，离散时间域上的实时逻辑则可较好地满足多数情况下实时系统自动验证的需要[6]。

普通的实时逻辑建立在点语义基础上，公式只能在孤立的点上被满足，而基于区间的实时逻辑[7-10]的优点在于可描述区间之间的关系，因而时段演算(duration calculus, DC)被广泛研究[10-12]和使用。然而，即使在离散时间域，时段演算仍不可判定，因而不可模型检测。因此，文献[9]提出了时间区间时序逻辑(timed interval temporal logic, TITL)。目前TITL及其扩展逻辑已被成功应用于网络入侵检测[13-15]以及“起重机释放金属块到浸泡坑”中。

文献[14]证明了离散时间TITL满足可判定性，提出了验证离散时间自动机模型是否满足离散TITL性质的模型检测方法。然而，由于普通的线性实时逻辑模型检测对系统的模型和性质采用不同的形式化语言描述，验证时需在逻辑和自动机之间进行转换，因此验证技术非常复杂。在统一的离散TITL逻辑框架内，本文对描述和验证实时区间进行了研究，

收稿日期：2013－06－08;　修回日期：2014－07－08

基金项目：国家自然科学基金(U1204608, U1304606, 61373043)；中国博士后科学基金(2012M511588)

作者简介：朱维军(1976－)，男，博士，副教授，主要从事软件形式化方法、实时系统方面的研究.

并给出了实施方法。

1　离散时间区间时序逻辑

TITL是对命题EITL的实时扩展，它在后者的状态间引入时间变量和约束，以表达状态之间的时间约束。定义正整数N为时间域，得到的逻辑称为TITL_N。

定义 1　状态s是一个2元组(a, t)。其中，a是命题集P在真值集合{true, false}上的映射，它的规范形式是一个由真值为真的命题x组成的集合$a_P=\{x \mid x\in P\wedge x=\text{true}\}$；$t$是一个从时间到整数的映射，$t:T\to N$，表示当前状态的时间。

定义 2　定义时间状态序列为：$\sigma=(s_0,s_1,\cdots,s_n)$，其中$s_i$表示状态。

定义 3　TITL_N基本公式：

$$t ::= T \mid T_f \tag{1}$$

$$\delta ::= T_f \leqslant a \mid T_f < a \mid T_f > a \mid T_f \geqslant a \mid \delta_1\wedge\delta_2 \tag{2}$$

$$\varphi ::= p \mid \delta \mid \text{skip} \mid \varphi_1\vee\varphi_2 \mid \neg\varphi \mid \varphi_1;\varphi_2 \tag{3}$$

定义 4　TITL_N导出公式：

$$p\wedge q ::= \neg(\neg p\vee\neg q) \tag{4}$$

$$p\to q ::= \neg p\vee q \tag{5}$$

$$\text{O}\, p ::= \text{skip} \,;p \tag{6}$$

$$\Diamond\, p ::= \text{true} \,;p \tag{7}$$

$$\Box\, p ::= \neg\Diamond\neg p \tag{8}$$

$$\text{more} ::= \text{O true} \tag{9}$$

$$\text{empty} ::= \neg\text{more} \tag{10}$$

$$p;q ::= (p\wedge T_f\in I);q \tag{11}$$

其中，I表示区间。

$$p \parallel q ::= (p\wedge(q;\ \text{true}\,))\vee(q\wedge(p;\ \text{true}\,)) \tag{12}$$

定义 5　TITL_N公式解释为$I=(\sigma,i,k,j)$。其中，σ是一个在$(s_i,s_{i+1},\cdots,s_j)$上的时间状态序列；i,j均为正整数；s_k表示当前状态，$\text{len}(\sigma)=j-i$为区间的时序长度，$\text{len}_t(\sigma)=s_t(j)-s_t(i)$为区间的时间长度，$s_t(i)$为状态$s_i$所对应的时间。

上述定义中，TITL_N同时具备有穷模型与无穷模型。在无穷区间中，$\text{len}(\sigma)=j-i=\omega$，$\text{len}_t(\sigma)=s_t(j)-s_t(i)=+\infty_N$。

定义 6　令$c\in N$，令$s_p(k)$表示$p\in AP$状态下s_k的真值，TITL_N语义定义为：

$$\begin{cases} T=s_t(k) \\ T_f=s_t(j)-s_t(k) \end{cases} \tag{13}$$

1) 当且仅当$s_t(j)-s_t(k)\leqslant C$时，$I\models T_f\leqslant C$；

2) 当且仅当$s_t(j)-s_t(k)\geqslant C$时，$I\models T_f\geqslant C$；

3) 当且仅当$s_t(j)-s_t(k)<C$时，$I\models T_f<C$；

4) 当且仅当$s_t(j)-s_t(k)>C$时，$I\models T_f>C$；

5) 当且仅当$I\models\delta_1$且$I\models\delta_2$时，$I\models\delta_1\wedge\delta_2$。

状态公式与时序公式：

1) 当且仅当$s_p(k)$=true时，$I\models p$；

2) 当且仅当$I\not\models\varphi$时，$I\models\neg\varphi$；

3) 当且仅当$I\models\varphi_1$或$I\models\varphi_2$时，$I\models\varphi_1\vee\varphi_2$；

4) 当且仅当$\text{len}(\sigma)=1$时，$I\models\text{skip}$；

5) 当且仅当$\exists r$，$k\leqslant r\leqslant j$时，$I\models\varphi_1;\varphi_2$，使得$(\sigma,i,k,r)\models\varphi_1$且$(\sigma,r,r,j)\models\varphi_2$。

2　离散时间自动机

定义 7　时间字$(a,\ t)$是一个2元组。其中，$a\in\varSigma$表示字母表$\varSigma$中的输入字母；$t:T\to N$是从时间到整数的映射，表示输入字母的时间。

定义 8　令X为时钟变量集，$\varPhi(X)$为时钟约束集，时钟约束$\delta\in\varPhi(X)$被定义为：$\delta ::= x\leqslant c \mid x\geqslant c \mid x>c \mid x<c \mid \delta_1\wedge\delta_2$。其中，时钟$x\in X$；时钟域$c\in N$。

定义 9　映射时钟到它的赋值$v:X\to N$，当且仅当$v\models\delta$，称时钟集X的值满足时钟约束δ。

定义 10　对任意$\tau\in N$，$v+\tau$表示$x\in X$时，时钟x的赋值$v(x):=v(x)+\tau$，表示时钟流逝。对$Y\subseteq X$，$[Y\mapsto 0]v$表示对每一个$x\in Y$，$v(x):=0$，对每一个$x\in X$，$x\notin Y$，时钟流逝。

定义 11　一个时间转换表A可用一个5元组$(\varSigma,S,S_0,X,E)$表示。其中，$\varSigma$表示有限字母表；S表示有限状态集；$S_0\subseteq S$表示开始位置集；X表示有限时钟集；$E\subseteq S\times S\times\Sigma\times 2^X\times\varPhi(X)$表示转换规则集，其中边$<s,s',a,\lambda,\delta>\in E$表示一个转换。

定义 12　时间转换表$(\varSigma,S,S_0,X,E)$在时间字$(a,\ t)$上的一个运行$r=(\bar{s},\bar{v})$是如下有穷或无穷序列。其中，s表示状态；v表示在状态下的时钟值。

$$r:<s_0,v_0>\xrightarrow[t_1]{a_1}<s_1,v_1>\xrightarrow[t_2]{a_2},\cdots,\xrightarrow[t_i]{a_i}<s_i,v_i> \tag{14}$$

定义 13　一个离散时间自动机可用一个7元组$(\varSigma,S,S_0,X,E,F,\text{AC})$表示。其中，$(\varSigma,S,S_0,X,E)$表示时间转换表；$F$表示终止位置集；AC表示接受位置集。

定义 14　一个离散时间自动机在时间字$(a,\ t)$上的运行r为接受运行，当且仅当$r=<s_0,v_0>\xrightarrow[t_1]{a_1}$

$<s_1,v_1>\xrightarrow[t_2]{a_2},\cdots,\xrightarrow[t_i]{a_i}<s_i,v_i>$ 且 $a=(a_1,a_2,\cdots,a_i)$，$s_i\in F$ 或 $\inf(r)\cap\mathrm{AC}\neq\varnothing$，其中，inf($r$)为运行$r$中无穷次出现的位置。

定义 15 离散时间自动机A接受的语言$L(A)$={(a, t)|A在(a, t)上有接受运行}

定义 16 离散时间自动机A的操作语义是状态为$<s,v>$的离散时间转换系统，定义为：$<s,v>\xrightarrow{\tau}<s,v+\tau>$，$<s,v>\xrightarrow{a}<s',v'>$，当$<s,s',a,\lambda,\delta>$时，且$v\models\delta$，$v'=[\lambda\mapsto 0]v$，即时钟集$\lambda$包含的所有时钟清零。

3 使用TITL$_N$公式建立模型

3.1 顺序模型

定义 17 TITL$_N$公式φ的时间模块为5元组TM=(Event_formula, State_formula, Ini_condition, Jump, Clocks)。其中，State_formula $\subseteq$ state(φ)，state(φ)表示φ的状态子公式集；Event_formula表示事件公式集；Ini_condition表示初始状态公式；Clocks表示在整数时间上计时的时钟集；$\mathrm{Jump}=\mathrm{sub}(\{\mathrm{vertex}\wedge\mathrm{event}\wedge\delta\wedge O(\mathrm{newvertex}\wedge\Lambda_{x\in\lambda}p_x)\})$表示状态转换公式。其中，(vertex, event, newvertex) $\in$ State_formula；$\lambda\subseteq$ Clocks；δ是时钟约束；p_x是原子命题当且仅当x=0时为真。

定义 18 TITL$_N$公式φ的时间模块TM的两个操作语义规则集为Jump和Jump′。$\mathrm{Jump}'=\mathrm{sub}(\{\mathrm{vertex}\wedge O(\mathrm{vertex}\wedge\Lambda_{x\in\mathrm{Clocks}}q_x)\})$为时间流逝公式，$q_x$为原子命题当且仅当$x=\Theta x+1$时为真($\Theta x$表示上一时刻的$x$值)。

定义 19 设TM为一个时间模块，$\alpha_1,\alpha_2,\cdots,\alpha_k$为TM的所有$k$个状态转换公式，$\beta_1,\beta_2,\cdots,\beta_l$为TM的所有$l$个时间流逝公式。称TITL$_N$公式$\varphi$为TM对应的实时逻辑公式，当且仅当：$\varphi=\mathrm{TF(TM)}=\mathrm{ini\_condition}\wedge\Lambda_{x\in\mathrm{Clocks}}\ p_x\wedge\Box(V_{i=1}^{k}\alpha_i\vee V_{i=1}^{l}\beta_i\vee\Box\mathrm{false})$。

定理 1 对任意一个离散时间自动机转换表$A=(\Sigma,S,S_0,X,E)$，存在一个时间模块TM的实时公式$\varphi=\mathrm{TF(TM)}$，使得TF(TM)模拟A运行。

证明：

1) 在转换表$A=(\Sigma,S,S_0,X,E)$上构造时间模块TM=(Event_formula,State_formula,Ini_condition,Jump,Clocks)，令Event_formula: $=\Sigma$ State_formula: =S，Ini_condition: S_0，Clocks: X，并按如下方式构造状态转换公式集合$\mathrm{Jump}=E'$模拟E——对每一个转换规则$<s,s',a,\delta,\lambda>\in E$，在Jump集中添加转换规则，令$\mathrm{Jump}:=\mathrm{Jump}\cup\{\mathrm{vertex}\wedge\mathrm{event}\wedge\delta\wedge O\}$，其中：vertex $=s$，newvertex $=s'$，event $=a$，(vertex，newvertex) $\in$ State_formula，event $\in$ Event_formula。

2) 对每一个vertex，构造$\mathrm{Jump}'\cup\{\mathrm{vertex}\wedge O(\mathrm{vertex}\wedge\Lambda_{x\in\mathrm{Clocks}}q_x)\}$。

3) 对模块TM，构造公式

$$\varphi=\mathrm{TF(TM)}=\mathrm{ini\_condition}\wedge\Lambda_{x\in\mathrm{Clocks}}p_x\wedge\Box(V_{i=1}^{k}\alpha_i\vee V_{i=1}^{l}\beta_i\vee\Box\mathrm{false})。$$

4) 本文的逻辑时间模块带有时钟。通过以上构造可知，对转换表A的每个运行步，如果使用转换规则$<s,s',a,\delta,\lambda>\in E$，则公式$\varphi$可以使用状态转换公式$\mathrm{vertex}\wedge\mathrm{event}\wedge\delta\wedge O(\mathrm{newvertex}\wedge\Lambda_{x\in\lambda}p_x)$，该步状态转换中，无论是自动机还是公式，二者在一个转换步的操作语义均为$<s,v>\xrightarrow{a}<s',v'>=<\mathrm{vertex},v>\xrightarrow{\mathrm{event}}<\mathrm{newvertex},v'>$，若时间流逝，无论是自动机还是逻辑公式，二者的操作语义均为$<s,v>\xrightarrow{\tau}<s,v+\tau>=<\mathrm{vertex},v>\xrightarrow{\tau}<\mathrm{vertex},\ v+\tau>$，因此对$A$的一个无穷运行$r:<s_0,v_0>\xrightarrow{(a_1,t_1)}<s_1,v_1>\xrightarrow{(a_2,t_2)}\cdots$，存在公式$\varphi$的一个动态生成无穷模型$\mathrm{TM}_\varphi:<\mathrm{ini_condition},\vec{0}>\xrightarrow{(\mathrm{event}_1,t_1)}<\mathrm{vertex}_1,v_1>\xrightarrow{(\mathrm{event}_2,t_2)}\cdots$。同理可证有穷的情况。因此$\varphi$模拟$A$运行。

定理1表明时间模块TM及TITL$_N$公式φ可替代离散时间自动机做系统模型。

定义 20 设TM是一个时间模块，$\varphi=\mathrm{TF(TM)}\in L_{\mathrm{TITL}_N}$是TM对应的实时逻辑公式。设$\psi\in L_{\mathrm{TITL}_N}$是另一个实时逻辑公式，如果$\mathrm{TF(TM)}\models\psi$，即$\varphi\Rightarrow\psi$永真，则称$\psi$是模型$\varphi=\mathrm{TF(TM)}$具有的性质。

3.2 并发模型

TITL$_N$的区间语义非常适合对并发实时模型进行验证。本文给出两种范型，分别使用||算子和$\wedge$算子描述多个模块的并发。

定义 21 设$\mathrm{TM}_1,\mathrm{TM}_2,\cdots,\mathrm{TM}_n$为$n$个模块，$\varphi_1=\mathrm{TF}(\mathrm{TM}_1),\mathrm{TF}(\mathrm{TM}_2),\cdots,\mathrm{TF}(\mathrm{TM}_n)$为模块对应的实时公式，定义$\mathrm{TM}=\mathrm{TM}_1\|,\mathrm{TM}_2\|,\cdots,\mathrm{TM}_n\|$为系统并发模块，$\varphi=\mathrm{TF(TM)}=\varphi_1\|\varphi_2\|,\cdots,\varphi_n\|$为TM对应的实时逻辑公式。

定义 22 范型1.设$\varphi_i=\ \mathrm{TF}(\mathrm{TM}_i)\in L_{\mathrm{TITL}_N}$，使

用 $\wedge$ 建立模型公式： $\varphi=\varphi_1\wedge\varphi_2=\mathrm{TF}(\mathrm{TM})=\mathrm{ini\_condition}_1\wedge\mathrm{ini\_condition}_2\wedge\Lambda_{x\in\mathrm{Clocks}}p_x\wedge\Box((V_{i=1}^{k1}\alpha_i^1\vee V_{i=1}^{l1}\beta_i^1)\wedge(V_{i=1}^{k2}\alpha_i^2\vee V_{i=1}^{l2}\beta_i^2)\vee\Box\mathrm{false})$，且 $\mathrm{ini\_condition}\triangleq\mathrm{ini\_condition}_1\wedge\mathrm{ini\_condition}_2$。

定义 23　范型2.设 $\varphi_i=\mathrm{TF}(\mathrm{TM}_i)\in L_{\mathrm{TITL}_N}$，定义 $\|$ 如下：$\varphi=\varphi_1\|\varphi_2=\mathrm{TF}(\mathrm{TM}_1\|\mathrm{TM}_2)=\mathrm{TF}(\mathrm{TM})\triangleq\varphi_1\wedge(\varphi_2;\mathrm{true})\vee\varphi_2\wedge(\varphi_1;\mathrm{true})$。

范型1适用于两个无穷区间运行的模块的并发或者两个长度相等的有穷模型模块的并发，而范型2则适合两个长度不等的有穷模型或一个有穷一个无穷的情况。

从定义22和定义23易见，在并发模型模块TM对应的公式 φ 中，模型模块 TM_1 公式 φ_1 和模型模块 TM_2 公式 φ_2 均拥有自己的运行区间。

4　TITL$_N$统一框架模型检测

引理 1[14]　TITL$_N$公式可满足性可判定。

定义 24　设 $\varphi=\mathrm{TF}(\mathrm{TM})$ 是实时系统模型模块公式，ψ 是需求性质公式，且 $\varphi,\psi\in L_{\mathrm{TITL}_N}$，则统一TITL$_N$逻辑框架模型检测问题定义为：对 $\mathrm{TF}(\mathrm{TM})\models\psi$，$\varphi\Rightarrow\psi$ 是否永真的判定问题。

定理 2　统一TITL$_N$逻辑模型检测是可判定的。

证明：判定 $\varphi\Rightarrow\psi$ 永真，可归约为判定 $\varphi\wedge\neg\psi$ 不可满足。由定义1-3和定义1-4可知，$\varphi\wedge\neg\psi\in L_{\mathrm{TITL}_N}$，根据引理1，TITL$_N$逻辑公式满足性可判定的，因此 $\varphi\wedge\neg\psi$ 不可满足性可判定，从而统一TITL$_N$逻辑模型检测问题可判定。

5　相关工作比较

本文的主要结论定理2表明，若使用基于TITL$_N$逻辑的时间模块与TITL$_N$公式建立实时系统模型，使用另一个TITL$_N$公式描述模型需满足的性质，那么离散TITN统一模型检测问题就被归约为文献[14]中已解决的离散TITL公式满足性判定问题。这样就能够开发工具在同一个逻辑框架内自动验证区间模型是否满足区间性质。定理2的证明过程给出了这样的自动验证方法。

表1　实时逻辑模型检测不同子领域的特点比较

逻辑分类/方法分类	普通模型检测方法类	统一模型检测方法类
实时时序逻辑类	逻辑无法描述时间正则性质。验证需不同语言之间的转换，系统无法由早期规范向后期代码逐步求精	逻辑无法描述时间正则性质。验证不需要复杂转换，有系统逐步求精的能力
实时区间逻辑类	逻辑可描述时间正则性质。验证需复杂转换，无法逐步求精	可描述时间正则性。不需复杂转换，可逐步求精

对实时计算系统的模型检测一直是研究的一个热点，大量的工作集中在了该领域。本文对现有工作和本文工作进行了对比分析。实时逻辑模型检测不同子领域的特点比较如表1所示，实时逻辑模型检测不同子领域的现有报道如表2所示。两表相结合即可看出新方法的比较优势。

表2　实时逻辑模型检测不同子领域的现有报道

逻辑分类/方法分类	普通模型检测方法类	统一模型检测方法类
实时时序逻辑类	每年数十篇SCI、EI检索论文	文献[4, 16-17]为代表若干研究
实时区间逻辑类	文献[11-12, 14]为代表对时段演算、TITL等逻辑模型检测问题的若干研究	本文方法，国内外未见该类报道

6　结　论

本文构建了使用逻辑公式建立实时区间模型的方法，在此基础上提出了基于实时区间逻辑的统一模型检测技术。一方面，本文把实时统一验证从时序扩大到了区间，从而不仅可以描述与验证点之间的时序，而且可以对蕴含区间及区间之间丰富语义联系信息的实时区间性质进行描述与验证。另一方面，与非实时的区间逻辑统一模型检测技术[18]相比，新方法实现了对实时性质的统一验证，有利于实时系统设计与开发从高抽象规范到低抽象实现的逐步求精，含实时特征的软件开发全过程自动验证做出有益的探索。

参 考 文 献

[1] ALUR R, Dill D. A theory of timed automata[J]. Theoretical Computer Science, 1994, 126(2): 183-236.

[2] ALUR R., FEDER T, HENZINGER T A. The benefits of relaxing punctuality[J]. Journal of the ACM, 1996, 43(1): 116-146.

[3] PATRICIA B. Model-checking timed temporal logics[J]. Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 2009(231): 323-341.

[4] 李广元, 唐稚松. 带有时钟变量的线性时序逻辑与实时系统验证[J]. 软件学报, 2002, 13(1): 33-41.
LI Guang-yuan, TANG Zhi-song. A linear temporal logic with clocks for verification of real-time systems[J]. Journal of software, 2002, 13(1): 33-41.

[5] ALUR R, HENZINGER T A. Logics and models of real time: a survey[C]//Proceedings of the Real-Time: Theory in Practice, REX Workshop. London: Springer-Verlag, 1992.

[6] THOMAS A. Specifying timed state sequences in powerful decidable logics and timed automata[C]// Proceedings of the Third International Symposium Organized Jointly with the Working Group Provably Correct Systems on Formal Techniques in Real-Time and Fault-Tolerant Systems. London: Springer-Verlag, 1994.

[7] MICHAEL R, BREKLING W. On tool support for duration

calculus on the basis of presburger arithmetic[C]//The Eighteenth International Symposium on Temporal Representation and Reasoning, Lubeck. Germany: IEEE press, 2011.
[8] DIMITAR P, DANG HUNG. Reasoning about QoS contracts in the probabilistic duration calculus [J]. Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 2010, 238(6): 41-62.
[9] DUAN Z. Modeling of hybrid systems[M]. Beijing: science press, 2004.
[10] ZHOU C, HOARE C A, RAVN A P. A calculus of duration[J]. Information Processing Letters, 1991, 40(5): 269-276.
[11] FRÄNZLE M. Model-checking dense-time duration calculus[J]. Formal Aspects of Computing, 2004, 16(2): 121-139.
[12] HANSON R. Model checking discrete duration calculus[J]. Formal Aspects of Computing, 1994(6A): 826-845.
[13] ZHU W, ZHOU Q, LI P. Intrusion detection based on model checking timed interval temporal logic [C]//IEEE International Conference on Information Theory and Information Security. Beijing: IEEE press, 2010.
[14] 朱维军, 张海宾, 周清雷. 离散时间区间时序逻辑可满足性的判定[J]. 电子学报, 2010, 38(5): 1039-1045.
ZHU Wei-jun, ZHANG Hai-bin, ZHOU Qing-lei. On the decidability of satisfiability of discrete TITL formulae[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(5): 1039-1045.
[15] ZHU W, ZHOU Q, YANG W, et al. A novel algorithm for intrusion detection based on RASL model checking [EB/OL]. [2013-11-02]http://www.medsci.cn /sci/show_paper.asp? id=b6115317790.
[16] LI Guang-yuan, TANG Zhi-shong. Translating a continuous-time temporal logic into timed automata[C]//Proceedings of the first Asian Symposium on Programming Languages and Systems. Berlin: Springer-Verlag, 2003.
[17] 李广元, 唐稚松. 基于线性时序逻辑的实时系统模型检查[J]. 软件学报, 2002, 13(2): 193-202.
LI Guang-yuan, TANG Zhi-shong. A model checking of real-time systems in linear temporal logic with clocks[J]. Journal of software, 2002, 13(2): 193-202.
[18] 朱维军, 张海宾, 周清雷. 命题投影时序逻辑并发建模与自动验证[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(8): 77-80.
ZHU Wei-jun, ZHANG Hai-bin, ZHOU Qing-lei. Modeling and verification of concurrent systems using propositional projection temporal logic[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2010, 38(8): 77-80.

编 辑 叶 芳

(上接第695页)

[5] BUETTNER H M. Compact directional VHF antennas[J]. IEEE Electronics Letters, 1980,16(25): 938-939.
[6] DUFF B M, TRANBARGER O. A broadband directional corner reflector antenna for borehole applications[C]// Antennas and Propagation Society International Symposium. Vancouver: IEEE, 1989: 278-281.
[7] KOEN W A, van den Berg P M, FOKKEMAJ T. A directional borehole radar: numerical and experimental verification[C]//Antennas and Propagation Society International Symposium. Boston: IEEE, 2001: 746-749.
[8] SAGNARD F, FAUCHARD C. FDTD modeling of a resistively loaded monopoly for narrow borehole ground penetrating radar[J]. Progr Electromagn Res M, 2008(2): 201-211.
[9] WU T, KING R W P. The cylidrical antenna with nonreflecting resistive loading[J]. IEEE Trans on Antenna and Propagation, 1965,13(3): 369-373.
[10] 黄冶, 尹成友. Wu-King加载偶极子天线的FDTD分析[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(1): 105-109.
HUANG Ye, YIN Cheng-you. FDTD analysis of transient radiation from Wu-King resistive dipole antenna[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(1): 105-109.
[11] 唐剑明, 赵青, 郑灵, 等. 3 mm圆锥喇叭聚焦天线的理论与仿真[J]. 强激光与粒子束，2012, 24(2): 436-440.
TANG Jian-ming, ZHAO Qin, ZHEN Ling, et al. Theory and simulation of 3 mm conical horn focusing lens antennas[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(2): 436-440.

编 辑 黄 莘