

基于动作细化的握手扩展

杨昕梅¹, 孙秀莉², 李绍荣¹

(1. 电子科技大学光电信息学院; 2. 美国波特兰州立大学电子与计算机工程学院)

【摘要】基于并发系统层次化设计动作细化的强大策略,建立了异步电路握手扩展的形式化语义,提出了一种握手扩展的细化模型。该语义采用等待事件结构,派生出带最大并发的真并发模型,细化系统同垂直互模拟关系的最初规范相一致,并且可以维护细化系统的正确性以及无死锁行为。构建的最大化并发模型,能有效地处理并发信息的综合和验证。

关键词 并发系统; 无死锁; 握手扩展; 真并发模型; 等待事件结构

中图分类号 TN402

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.03.016

Handshaking Expansion Based on Action Refinement

YANG Xin-mei¹, SUN Xiu-li², and LI Shao-rong¹

(1. School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. Department of ECE, Portland State University Portland USA)

Abstract Handshaking expansion is a main procedure in the design of asynchronous circuits. At present, there is not description and definition for the refinement of handshaking expansion formality. Through investigating formal semantics of the handshaking expansion of asynchronous circuits, a refinement model for handshaking expansion is presented based on a powerful strategy of action refinement in the hierarchical design of concurrent systems. The proposed semantics employs wait event structures and then derives a true concurrency model with maximum parallelism. The refined system conforms to the original specification with respect to a vertical bisimulation relation. Furthermore, the refinement function preserves correctness and deadlock-freeness of the behavior in the refined system.

Key words concurrent system; deadlock-freeness; handshaking expansion; true concurrency model; wait event structure

近几年来,由于异步电路具有能够消除时钟歪斜问题,提供模块化设计以及适合处理环境变量的能力,异步电路设计引起了人们的广泛关注^[1-2]。但由于CAD和设计方法的落后,限制了异步电路设计的发展。刻画异步电路是一个繁琐且容易出错的过程,而形式刻画是异步硬件设计的最主要问题。

层次化设计是当今广泛接受的硬件电路设计的最主要方法之一。动作细化是系统层次化刻画方法的核心操作,已发展成为常用的自顶向下系统设计理论^[3-4]:以分层的方式描述系统,用较低抽象层次上复杂的进程解释较高抽象层次上的动作,从而改变其抽象层次,达到实现层次。虽然对该理论人们已经研究了多年,但是到目前为止,动作细化技术还没有被成功地应用于工业实际中。

握手扩展是异步控制电路分析自动化的重要步

骤。文献[5]在动作系统的细化演算内证明了握手扩展的正确性,并重组了握手扩展,在其中插入了几个周期。文献[6]给出了一种异步控制电路分析自动化方法,该方法通过握手扩展及采用并发减少的事件重组来实现。然而,目前还没有对握手扩展过程作形式化细化定义和描述。

本文把动作细化的理论和技术应用到实际中,与具体的异步电路设计和验证相结合,产生一种新的握手扩展形式化描述方法。具体地,本文通过一个基于事件结构框架^[7-8]中的参数化动作细化^[9]的层次化方法,解决了握手扩展的形式化细化符号问题,并派生出一个带最大并发的真并发握手电路模型。而包含在事件结构框架中的细化系统与垂直互模拟关系的最初规范相一致^[10]。该参数化动作细化功能可以维护细化系统的正确性以及无死锁行为^[11]。

收稿日期: 2009-10-28; 修回日期: 2010-01-18

基金项目: 国家863计划(2007AA01Z143)

作者简介: 杨昕梅(1978-),女,博士,主要从事复杂系统验证与评估技术方面的研究。

1 等待事件结构

在并发系统中, 系统与它的环境交互需要依靠一些同步动作。从系统方面看, 只有这些交互动作影响到系统的正确性。将系统中由环境触发的动作称为等待动作。为了区别等待动作和系统中的其他动作, 将后者定义为活动动作。

设 U 是一个已知动作集, $\tau \notin U$ 是一个不可见的无声动作, 而 $\surd \notin U$ 是终点标签, $Act \subseteq U$ 是一个活动动作集, $W \subseteq U$ 是一个由 $[a]$ 指示的等待事件集。本文中 a 是活动动作。令 $U = Act \cup W$ 。 $D \subseteq U \times U$ 是非自反且对称的关系, 称为全局依赖关系, 用作细化与序列合成的参数, 依赖关系是一个抽象关系。

定义 1 一个等待事件结构是7元组 $\langle N, s_0, A, E, \prec, \#, l \rangle$, 其中: 1) N 是信号集合; 2) $A \subseteq N \times \{+, -\} \cup \{\tau\} \cup \{\surd\}$ 是动作集合; 3) E 是事件集合; 4) $\# \subseteq E \times E$ 是非自反对称冲突关系; 5) $\prec \subseteq E \times E$ 是流关系集合; 6) $l: E \rightarrow A$ 是动作标签函数; 7) $s_0 \in \{0, 1\}^N$ 是初始值。

信号集合 N 包含电路规范的信号线; 动作集合 A 包含 N 中的每一个信号 x , 以及升序的变型 $x+$ 和降序的变型 $x-$; 事件集合 E 包含与发生指数匹配的动作; \prec 表示两事件的因果关系, 每一个 \prec 以 (e, f) 形式表示, 由使能事件 e 以及被使能事件 f 构成。一个事件的使能事件发生了, 该事件被使能。使能事件可以是活动动作, 也可以是等待动作; 状态 s_0 包含 N 中每个信号的初始值; 冲突关系 $\#$ 用来对分离行为和选择建模。

等待事件的结构描述如下: 事件由黑点表示, 黑点旁显示动作标签; $e \# e'$ 由 e 与 e' 之间的点线标明, 流动关系由箭头标明, 而重复动作标记为箭头和点, 为了不引起混淆, 有时会用一个事件的动作标签来标记。图1a描述了一个选择接口(SEL), 图1b显示了等待事件结构的通道事件规范。

此后, 使用WES来表示等待事件结构的通用模式, 并用 ξ 和 ξ_i 表示WES的元素, 其中, $\xi = (N, s_0, A, E, \#, \prec, l)$, $\xi_i = (N_i, s_{0_i}, A_i, E_i, \#_i, \prec_i, l_i)$ 。如果需要也使用 E_ξ 之类表示 ξ 的组件。等待事件结构的操作符基本上采用文献[9]中的操作符。

WES所指示的行为可通过解释事件的子集来描述。这些事件构成当前系统的可能(部分)运行。设 σ 是事件 ξ 的一个有限序列 $e_1 e_2 \dots e_n$, 当 $i \neq j$ 时, e_i 和 e_j 是不相等的。 $E(\sigma)$ 表示为发生在 σ 中的事件集合。设 $\sigma_{i-1} = e_1 \dots e_{i-1}$ 是 σ 的 $i-1$ 阶前缀。

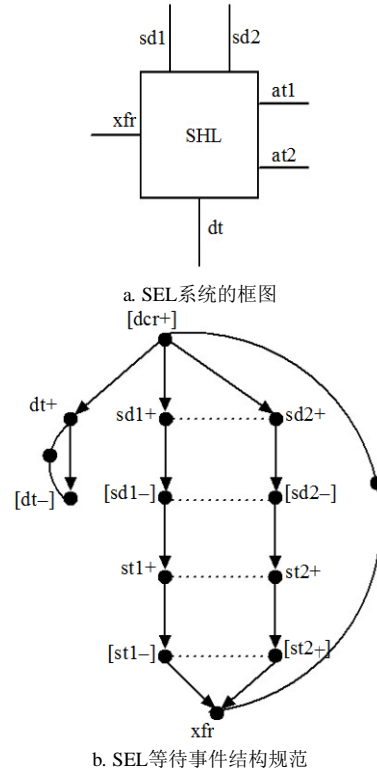


图1 SEL系统的框图和SEL等待事件结构规范

如果事件 e_i 与在 σ_{i-1} 之前发生的事件不相冲突, 那么它在 σ_{i-1} 之后被使能。且使能事件应该在 σ_{i-1} 之前发生。换句话说, e_i 应该是集合 $en(\sigma_{i-1})$ 中的事件。其中, $en(\sigma_{i-1}) = \{e \in E \setminus E(\sigma_{i-1}) \mid (\forall e_j \in E(\sigma_{i-1}): \neg(e \# e_j))\}$ 。

定义 2 (事件踪迹) 一个等待事件结构 ξ 的事件踪迹是一串事件 $e_1 e_2 \dots e_n$ 的序列 σ , 对于所有的 $1 \leq i \leq n$, 满足 $e_i \in en(\sigma_{i-1})$ 。

发生在 σ 中的所有事件集合称为 ξ 的一个配置。令 $Conf(\xi)$ 为 ξ 的所有配置的集合。

定义 3 刻画 S 和实现 I 关于 ref 的垂直互模拟关系是集合 $h \subseteq Conf(\xi_S) \cdot R \cdot Conf(\xi_I)$, 对于所有的 $(C_S, R, C_I) \in h$, R 是剩余判定集, 且以下属性成立:

- 1) 如果 $C_S \xrightarrow{\alpha} C'_S, R = 0$ 并且 $ref(\alpha) \xrightarrow{\sigma} \xi_v \surd$, 那么 $\exists C_I \xrightarrow{\sigma} C'_I$ 使得 $C'_S h C'_I$ 。
- 2) 如果 $\exists C_I \xrightarrow{\gamma} C'_I$ 那么下列命题之一成立。① $\exists \alpha. \exists C_S \xrightarrow{\alpha} C'_S$ 且 $\exists ref(\alpha) \xrightarrow{\gamma} \xi_v$, 那么 $(C'_S, R \otimes [\xi_v], C'_I) \in h$; ② $\exists C_S \xrightarrow{\xi} C'_S$ 且 $\exists R \xrightarrow{\gamma} R'$, 那么 $(C'_S, R', C'_I) \in h$ 。
- 3) 如果 $R \xrightarrow{\gamma} R'$, 那么 $\exists C_I \xrightarrow{\gamma} C'_I$, 使得 $(C_S, R', C'_I) \in h$ 。

4) 如果 $C_S \checkmark$ 并且 $R=0$ ，那么 $C_I \xrightarrow{\xi} C'_I$ ，使得 $C'_I \checkmark$ 。

5) 如果 $C_I \checkmark$ 并且 $R=0$ ，那么 $C_S \xrightarrow{\xi} C'_S$ ，使得 $C'_S \checkmark$ 。

如果存在一个垂直双模拟关系 $h, (C_S q, 0, C_I q) \in h$ ，那么刻画 S 和实现 I 是关于 ref 的垂直双模拟关系，用 $S \prec I$ 表示。

6) 如果 $C_S q \xrightarrow{\tau} C_S$ ，那么 $C_I q \xrightarrow{\xi} C_I$ ，以使得 $(C_S, 0, C_I) \in h$ 。

7) 如果 $C_I q \xrightarrow{\tau} C_I$ ，那么 $C_S q \xrightarrow{\xi} C_S$ ，以使得 $(C_S, 0, C_I) \in h$ 。

定义 4 (动作细化) 函数 $\text{ref} : U \rightarrow \text{WES}$ 称为细化函数。令 $\xi \in \text{WES}$ 和 ref 是细化函数。那么细化 ξ 的函数 ref ，即 $\text{ref}(\xi)$ 是等待事件结构。

对于一个动作 $a \in U$ ， $\text{ref}(a) \in \text{WES}$ ，令 $\text{ref}(\xi) = (N_{\text{ref}}, s_{0_{\text{ref}}}, A_{\text{ref}}, E_{\text{ref}}, \#_{\text{ref}}, \prec_{\text{ref}}, l_{\text{ref}})$ ，其中：

$$N_{\text{ref}} = \{N \cup N_{\text{ref}(a)}\}$$

$$s_{0_{\text{ref}}} = \{s_0 \cup s_{0_{\text{ref}(a)}}\}$$

$$A_{\text{ref}} = \{(A \cup \text{ref}(a))\}$$

$$E_{\text{ref}} = \{(e, e') \mid (e \in E) \wedge (l(e) = a) \wedge (e' \in E_{\text{ref}(a)})\} \cup \{(e, e) \mid (e \in E) \wedge (l(e) \neq a)\}$$

$$\#_{\text{ref}} = \{(d, d') \#_{\text{ref}}(e, e') \mid d \#_{\xi} e \vee (d = e \wedge d' \#_{\text{ref}(a)} e')\}$$

$$\prec_{\text{ref}} = \{(d, d') \prec_{\text{ref}}(e, e') \mid ((d = e) \wedge d' \prec_{\text{ref}(a)} e') \vee (d \prec_{\xi} e \wedge (d', e') \in D)\}$$

$$l_{\text{ref}} = \{((e, e'), a) \mid (e, e') \in E_{\text{ref}}, a = l_{\text{ref}(a)}(e')\}$$

参数化动作细化函数已被证明能保持一些属性。一个重要的无死锁属性可通过死锁细化来保持。其证明可参阅文献[10]。

2 动作细化的握手扩展

一般系统都能分解为控制子系统和数据子系统。图2显示了多通道系统，图中 L 、 M 和 R 是控制系统， P 是数据系统，对于系统 M ，动作 $\text{cd}+$ 是初始数据计算和从输入到输出的传输，动作 $\text{cd}-$ 是完成数据的计算。

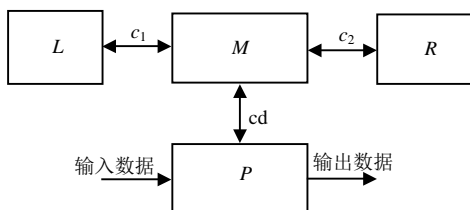
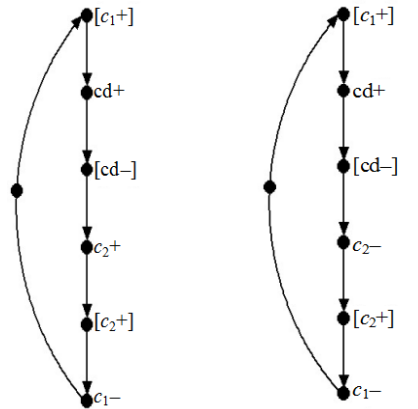


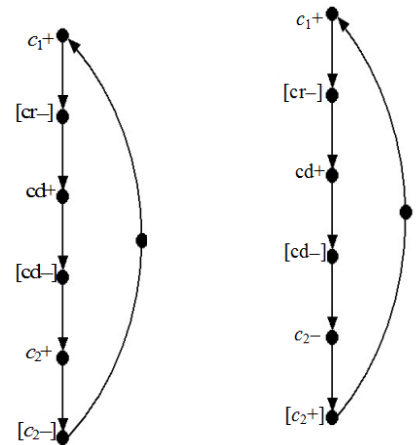
图2 信道

在图2中，假设 c_1 是输入通道， c_2 是系统 M 中 c_1 对应的输出。不同信道类型组合而成的一般系统如图3所示。



a. 等待事件结构

b. 组合的事件结构



c. c_1 和 c_2 均为有源端口

d. c_1 有源端口 c_2 无源端口

图3 不同信道组合的等待事件结构

图3a表示无源端口 c_1 以及有源端口 c_2 中的等待事件结构。同步约束要求 c_1- 在 $[c_2-]$ 之后执行。根据通道排列以及同步条件，可派生出依靠关系 $\{([c_1+], \text{cd}+), ([\text{cd}-], c_2+), ([c_2-], c_1-)\}$ 。令 c_1 和 c_2 是无源端口。

图3b显示了组合的事件结构。根据同步约束， c_1- 必须在动作 $[c_2+]$ 之后发生。所以依赖关系为 $\{([c_1+], \text{cd}+), ([\text{cd}-], c_2-), ([c_2+], c_1-)\}$ 。图3c设 c_1 和 c_2 均为有源端口。其依赖关系是 $\{([c_1+], \text{cd}+), ([\text{cd}-], c_2-), ([c_2+], c_1-)\}$ 。图3d 设 c_1 是有源端口， c_2 是无源端口，其依赖关系是 $\{([c_1-], \text{cd}+), ([\text{cd}-], c_2-)\}$ 。

用4个阶段握手。将单信道周期由下一个转移序列取代，称为握手周期。req 和 ack 的动作有 req+，ack+，req-，ack-。相应的握手周期的下一部分只用来将所有动作设为false。

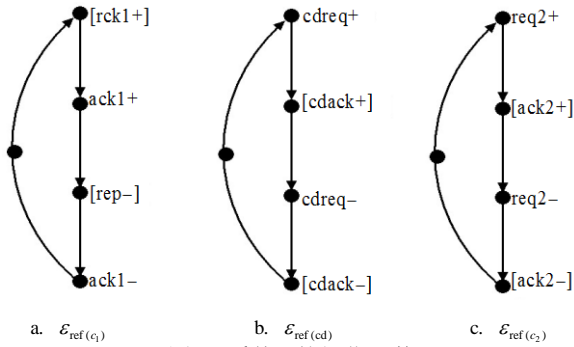


图4 系统M的细化函数

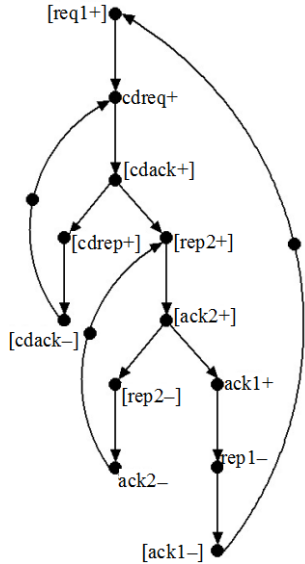


图5 图3a的带最大并发的细化等待事件结构

考虑上述系统M的细化, 其细化函数如图4所示。细化系统为 $\xi_{ref(M)} = \xi_{ref(c_1)} \cdot \xi_{ref(cd)} \cdot \xi_{ref(c_2)}$, 其依赖关系为 $\{([req1+], cdreq+), ([cdack+], req2+), ([ack2+], ack1+)\}$ 。通过依赖关系, 知道动作 $cdreq-$ 和 $req2+$ 是并发的, $[req2-]$ 和 $ack1+$ 也一样。图5显示了图3握手扩展后的结构。

系统M和满足垂直双模拟的细化函数 $M' = ref(M)$ 的证明简单明了, 本文就不叙述了。

3 研究案例

以图1a所示的端口选择器SEL的接口为例。首先, 细化函数如图6所示。其次, 依据通道实现和同步约束的顺序定义依赖关系集合为:

- $\{([xferreq+], datareq+), ([xferreq+], sel1req+),$
- $([xferreq+], sel2req+), ([selack+], out1req+),$
- $([selack+], out2req+), (out1req+, sel1req-),$
- $(out2req+, sel2req-), ([out1ack+], datareq-),$
- $([out2ack+], datareq-), (out1req-, [xferreq-]),$
- $(out2req-, [xferreq-])\}$

最后, 其实现如图7所示, 它具有最大并发, 并正确地保持其行为。

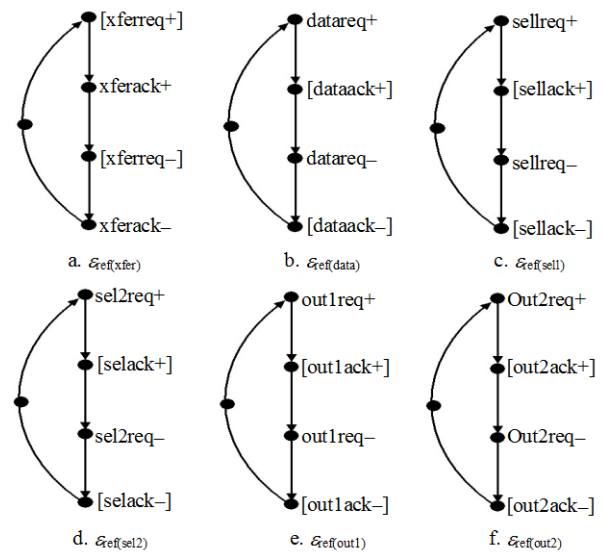


图6 系统SEL的细化函数

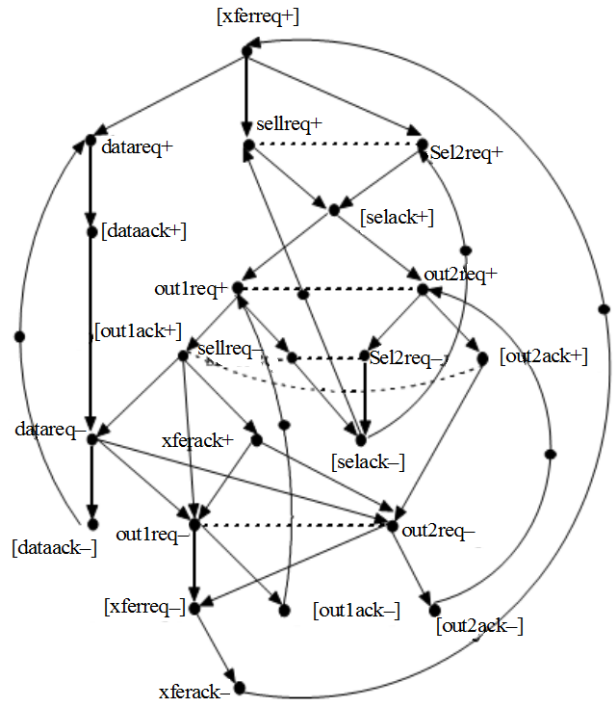


图7 细化后的SEL系统的等待事件结构

4 总结

本文通过层次化方法派生出一个最大并发的真并发握手电路模型。基于参数化动作细化, 通过将异步控制电路模拟为等待事件结构和公式化正确性准则, 垂直互模拟, 证明了握手扩展的正确性。此外, 细化函数也保持握手电路的无死锁行为。根据本文的方法构建的最大化并发模型, 能有效地处理并发信息的综合和验证。

参考文献

[1] MYERS C J. Asynchronous circuit design[M]. NJ, USA: John Wiley & Sons Inc, 2001.

- [2] EDWARDS D, MYERS B A. Balsa: an asynchronous hardware synthesis language[J]. *Computer Journal*, 2002, 45(1): 12-18.
- [3] WU Jin-zhao, YUE Hou-guang. Towards action refinement for concurrent systems with causal ambiguity[C]//Second International Conference on Software Engineering and Formal Methods (SEFM'04). [S.l.]: IEEE, 2004: 300-309.
- [4] BIJL M van der, RENSINK A, TRETMANS J. Action refinement in conformance testing[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2005, 3502: 381-96.
- [5] PLOSILA J, RUKSENAS R, SERE K. Action systems synthesis of DI circuits[C]//Proc of the International Refinement Workshop and Formal Methods Pacific 1998, Springer Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science. [S.l.]: Springer Verlag, 1998: 286-305.
- [6] KONDRATYEV A, CORTADELLA J, KISHINEVSKY M, et al. Automatic synthesis and optimization of partially specified asynchronous system[C]//Proc International Conference on Computer-Aided Design. New Orleans, Louisiana, USA: ACM, 1999: 110-115.
- [7] MAJSTER-CEDERBAUM M, WU J, YUE H. Refinement of actions for real-time concurrent systems with causal ambiguity[J]. *Acta Information*, 2006, 426(7): 389-418.
- [8] WINSKEL G. An introduction to event structures[J]. *Lecture Notes In Computer Science*, 1988, 354: 364-397.
- [9] WEHRHEIM H. Parametric action refinement[J]. *IFIP Transactions: Programming Concepts, Methods and Calculi*, Elsevier, 1994, A(56): 247-266.
- [10] RENSINK A, GORRIERI R. Action refinement as an implementation relation[C]//TAPSOFT'97: Theory and Practice of Software Development. [S.l.]: Springer-Verlag, 1997: 772-786.
- [11] 孙秀莉. 基于动作细化的异步电路自动综合[D]. 成都: 中国科学院研究生院(成都计算机应用研究所), 2005.
- SUN Xiu-li. Automatic Synthesis of Asynchronous Circuits Based on Action Refinement[D]. Chengdu: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Chengdu Institute of Computer Application), 2005.

编辑 漆蓉

(上接第369页)

References

- [1] LIU De-hong, KANG Gang, LI Ling, et al. Electromagnetic time-reversal imaging of a target in a cluttered environment[J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2005, 53(9): 3058-3066.
- [2] CHEN Ye, JOINES W T, XIE Zhen-tian, et al. Double-sided exponentially tapered GPR antenna and its transmission line feed structure[J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2006, 54(9): 2615-2623.
- [3] YAROVY A G, QIU W, YANG B, et al. Reconstruction of the field radiated by GPR antenna into ground[C]//The Second European Conference on Antennas and Propagation. Edinburgh, UK: IEEE, 2007.
- [4] CHEN Guo, LIU R C. Design of a shielded antenna system for ground penetrating radar applications[C]//Antennas and Propagation Society International Symposium. Charleston, SC: IEEE, 2009.
- [5] HEO H, PARK S S, KIM S C, et al. Performance of the Marx generator for repetitive applications[C]//IEEE International Power Modulators and High Voltage Conference. Las Vegas: IEEE, 2008.
- [6] LI Hong-tao, RYOO H J, KIM J S, et al. Development of rectangle-pulse Marx generator based on PFN[J]. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 2009, 37(1): 190-194.
- [7] GLIDDEN S C, SANDERS H D. Solid state Marx generator[C]//Power Modulator Symposium, 2006. Conference Record of the 2006 Twenty-Seventh International. Arlington, VA: IEEE, 2006.
- [8] SUNDARAJAN R, NAGABHUSHANA G R, KISHORE N K, et al. Influence of peaking capacitors in reducing rise times of high-voltage nanosecond pulses[J]. *IEEE Trans. on Industry Applications*, 2005, 41(3): 690-697.

编辑 税红