

## 微流程的建模与分析\*

徐彬<sup>1,2</sup>, 周洋<sup>1</sup>, 和淑芬<sup>1</sup>, 洪灿梅<sup>1</sup>, 周智勋<sup>3</sup>

(1. 云南电网有限责任公司 迪庆供电局, 云南 迪庆 674400;

2. 西南林业大学 大数据与智能工程学院, 云南 昆明 650224; 3. 云南云电同方科技有限公司, 云南 昆明 650217)

**摘要:** 业务流程管理技术是组织实施信息系统的重要使能技术。为确保微流程能正常运行, 提出了一种建模与分析微流程的方法。首先, 该方法以 Petri 网为形式化基础, 对微流程以及微流程间的同步组合和异步组合进行建模。其次, 基于 Petri 网的分析技术, 该方法对组合微流程进行了合理性分析。实验结果表明, 该方法能建模微流程, 并检测出组合微流程中因同步交互或异步交互错误引起的死锁。

**关键词:** 业务流程管理; 微流程; Petri 网; 组合微流程; 合理性

中图分类号: TN711.1; TP311

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211273

中文引用格式: 徐彬, 周洋, 和淑芬, 等. 微流程的建模与分析[J]. 电子技术应用, 2022, 48(1): 119-123, 128.

英文引用格式: Xu Bin, Zhou Yang, He Shufen, et al. Modeling and analysis of micro processes[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(1): 119-123, 128.

## Modeling and analysis of micro processes

Xu Bin<sup>1,2</sup>, Zhou Yang<sup>1</sup>, He Shufen<sup>1</sup>, Hong Canmei<sup>1</sup>, Zhou Zhixun<sup>3</sup>

(1. Diqing Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Diqing 674400, China;

2. School of Big Data and Intelligent Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;

3. Yunnan Yundian Tongfang Technology Co., Ltd., Kunming 650217, China)

**Abstract:** Business process management is an important enabling technology for organizations to build information systems. To ensure the correctness of micro processes, this paper proposes an approach to modeling and analyzing micro processes. Firstly, micro processes and micro processes composition under synchronous communication and asynchronous communication models are modeling based on Petri nets. Secondly, the soundness of composite micro processes is analyzed based on the Petri net analysis technology. Experimental results show that the proposed method can model microprocesses and detect the deadlocks caused by synchronous or asynchronous interaction errors of the composite micro processes.

**Key words:** business process management; micro processes; Petri nets; composite micro processes; soundness

## 0 引言

起源于本世纪初的业务流程管理(Business Process Management, BPM)已成为组织实施挖掘信息系统的重要使能技术<sup>[1]</sup>。BPM 是一种以规范化地构造端到端的卓越业务流程为中心、以持续地提高组织业务效绩为目的的系统化方法。一般而言, BPM 能为企业带来如下好处: (1) 固化企业的业务流程, 以规范化管理; (2) 实现业务流程的自动化, 以提高业务效率; (3) 实现业务流程的优化, 以达到流程持续优化的目的。

为了快速响应客户需求、持续演化信息系统, 业务流程管理要求业务流程微化<sup>[2]</sup>。相比传统的业务流程, 微流程为特定条件下不可再分解的业务流程。当组织准确实施一个微流程前, 要确保微流程能否正常运行, 就

必须进行流程分析。因此, 对微流程进行建模和分析, 便成为了业务流程管理领域的关键任务之一<sup>[2]</sup>。

现有研究工作主要关注传统业务流程的建模与分析。在业务流程的建模方面, 文献[3]从控制流的角度提出了在工作流领域大名鼎鼎的工作流网(Workflow Net, WF-net), 以建模组织的业务流程。文献[4]、[5]提出使用事件驱动过程链(Event-driven Process Chains, EPC)作为业务流程建模的符号。文献[6]使用 Petri 网, 提出了一种多视角的跨组织业务流程建模方法, 以建模私有流程、公共流程和协作流程。在业务流程的分析方面, 针对组织内的业务流程模型, 文献[3]基于 Petri 网的分析技术, 提出了合理性的形式定义, 可以在多项式时间内完成业务流程合理性的检测。针对跨组织业务流程模型, 文献[7]也提出了合理性的定义。文献[8]提出了兼容性的概念, 用于检测协作流程间的交互正确性。文献[9]使用 Pi 演

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(61702442)

算,提出了一种对跨组织业务过程事务进行兼容性分析的方法。与上述工作相比,本文工作的最大不同在于:重点关注微流程在同步通信和异步通信语义下的交互建模和分析。

具体而言,本文提出一种建模与分析微流程的方法,主要贡献:(1)对微流程及组合微流程(同步组合和异步组合)进行了建模;(2)从局部和全局的角度,对组合微流程进行了合理性检测。

## 1 微流程的建模

由于 Petri 网可以直观地表示业务过程的控制流,且具有形式化基础和分析工具<sup>[10]</sup>,故而,本节采用 Petri 网对微流程进行形式化建模。

### 1.1 微流程的建模

定义 1(微流程) 微流程是一个六元组  $MP=(P,T;F,M,i,o)$ ,其中: $P \cup T \neq \emptyset \wedge P \cap T = \emptyset$ , $P$  为库所集, $T$  为活动集; $T=T_{\text{in}} \cup T_{\text{out}} \wedge T_{\text{in}} \cap T_{\text{out}} = \emptyset$ ,活动集  $T$  由内部活动集  $T_{\text{in}}$  和交互活动集  $T_{\text{out}}$  组成,且  $T_{\text{in}}$  与  $T_{\text{out}}$  的交集为空集; $\varphi:T \rightarrow \Sigma \cup \{\varepsilon\}$  是标记函数,其中  $\Sigma$  是有限的事件集; $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$  是流关系;映射  $M:P \rightarrow (0,1)$  表示微流程的状态; $i \in P$  表示微流程的输入库所; $o \in P$  表示微流程的输出库所;每一个节点  $x \subseteq P \cup T$  都位于从  $i$  到  $o$  的一条路径上。

更准确地,由定义 1 可知,本文建模微流程采用的是工作流网。与 Petri 网相比,工作流网要求有唯一的输入库所  $i$  和输出库所  $o$ 。

此外,还需说明的是,定义 1 对工作流网进行了兼容性扩展,将活动集  $T$  划分为两种类型。

为了直观图形地表示微流程,用空心大圆圈表示库所,用实心小圆圈表示库所中托肯,用实心方框表示交互活动,用空心方框表示内部活动,用有向线段表示流关系。

以文献[11]中的建立链接和访问为例,图 1 分别定义了 4 个微流程,分别表示客户( $MP_1$ )、Web 接( $MP_2$ )、软件程序( $MP_3$ )和数据库( $MP_4$ )。首先,客户需要使用软件程序,便向 Web 接口发送!connect,Web 接口再向软件程序发送!setup。其次,建立连接后,客户可以访问和使用软件程序(!access)。然后,客户决定退出,便向 Web 接口发

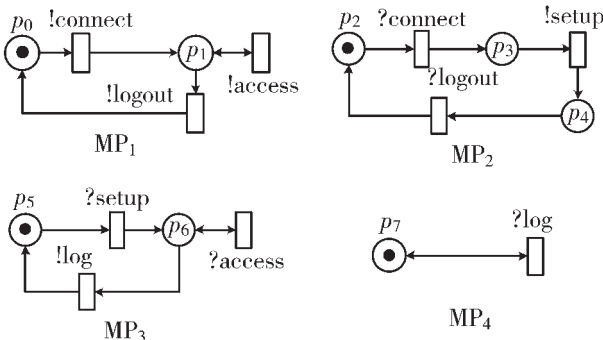


图 1 4 个微流程

送!logout。最后,软件程序把客户的相关信息储存到数据库(!log)。其中,活动标记中的“!”表示发送消息,“?”表示接收消息,对于微流程  $MP_1$  而言,库所  $p_0$  既是输入库所也是输出库所。

### 1.2 同步组合建模

微流程的同步组合是指:在同步通信语义和活动发生规则下,一个微流程中的发送消息动作与另一个微流程中的互补消息动作同时发生交互。所谓互补消息动作是指除首字母外其余字母都相同的标记动作,例如图 1 中的“!connect”和“?connect”。

定义 2(活动发生规则) 微流程是一个六元组  $MP=(P,T;F,M,i,o)$ ,并具有下述的活动发生规则:

(1)对于活动  $t \in T$ ,如果  $\forall p \in {}^*t: M(p) \geq 1$ ,则说活动  $t$  在状态  $M$  有发生权(enable),记为  $M[t>]$ ;

(2)若  $M[t>]$ ,则在状态  $M$  下活动  $t$  可以发生(fire),从状态  $M$  发生活动  $t$  得到一个新状态  $M'$ ,记为  $M'[t>M]$ , $\forall p \in P$ ,满足:

- ①若  $p \in {}^*t-t^*$ , $M'(p)=M(p)-1$ ;
- ②若  $p \in t^*-t^*$ , $M'(p)=M(p)+1$ ;
- ③其他, $M'(p)=M(p)$ 。

定义 3(同步组合) 设  $\{MP_1, MP_2, \dots, MP_n\}$  是一个微流程的集合,且每个微流程为  $MP_k=(P_k, T_k; F_k, M_k, i_k, o_k)$ ,其中  $k \in \{1, 2, \dots, n\}$ ,同步组合  $MP_1 ||_s MP_2 ||_s \dots ||_s MP_n$  将得到一个新的组合微流程  $MP=(P, T; F, M, i, o)$ ,其中: $P=P_1 \cup P_2 \cup \dots \cup P_n \cup \{i\} \cup \{o\}$ ;  $T=T_1 \cup T_2 \cup \dots \cup T_n$ ;  $F=F_1 \cup F_2 \cup \dots \cup F_n$ ;  $M=M_1 \cup M_2 \cup \dots \cup M_n$ 。

图 2 给出了微流程同步组合的示意图。

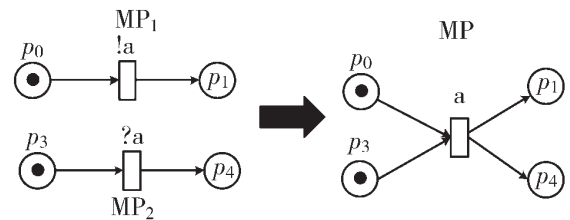


图 2 微流程同步组合的示意图

### 1.3 异步组合建模

微流程的异步组合是指:在异步通信语义和活动发生规则下,一个微流程中的发送消息动作与另一个微流程中的互补消息动作间通过消息缓冲区进行交互。与同步组合相比,异步组合不要求发送消息动作和互补消息动作同时发生交互。

定义 4(异步组合) 设  $\{MP_1, MP_2, \dots, MP_n\}$  是一个微流程的集合,且每个微流程为  $MP_k=(P_k, T_k; F_k, M_k, i_k, o_k)$ ,其中  $k \in \{1, 2, \dots, n\}$ ,异步组合  $MP_1 ||_{as} MP_2 ||_{as} \dots ||_{as} MP_n$  将得到一个新的组合微流程  $MP=(P, T; F, M, i, o)$ ,其中: $P=P_1 \cup P_2 \cup \dots \cup P_n \cup P_{ack}$ ;  $T=T_1 \cup T_2 \cup \dots \cup T_n$ ;  $F=F_1 \cup F_2 \cup \dots \cup F_n \cup F_{ack}$ ;  $M=M_1 \cup M_2 \cup \dots \cup M_n$ 。其中, $P_{ack}$  和  $F_{ack}$  分别

表示新增的库所和弧。

$$P_{\text{akl}} = \{p_{jk}^{\text{int}} \mid \exists i, j \in \{1, 2, \dots, n\} \wedge i \neq j \wedge \exists t_m \in T_i, \\ \exists t_k \in T_j \wedge t_m \text{ 与 } t_k \text{ 为互补变迁}\} \quad (1)$$

$$F_{\text{akl}} = \{(t_m, p_{jk}) \mid \exists p_{jk} \in P_{\text{akl}} \wedge \exists t_m \in T_i\} \cup \{(p_{jk}, t_k) \mid \exists p_{jk} \in \\ P_{\text{akl}} \wedge \exists t_k \in T_j\} \quad (2)$$

图3给出了微流程异步组合的示意图。其中,虚线圆圈和虚线有向线段分别表示新增的库所和流关系。

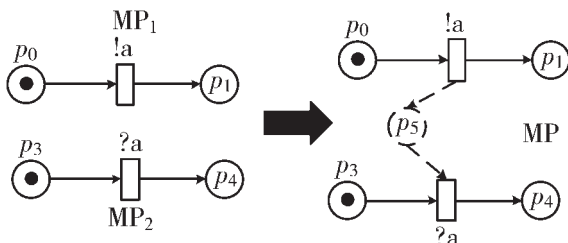


图3 微流程异步组合的示意图

## 2 微流程的分析

### 2.1 合理性

微流程在执行中因同步交互错误或异步交互错误容易引起死锁,进而导致软件系统出现故障、中断服务。因此,从控制流角度对微流程进行分析对确保微流程模型以及软件系统的正确性至关重要。

首先,为确保构成组合微流程的微流程是无死锁的,本文首先提出了局部合理性的概念。

定义5(局部合理性) 给定一个微流程  $MP=(P, T; F, M, i, o)$ , 该微流程是局部合理的, 当且仅当: 对于每个从初始状态  $i$  可达的状态  $M$ , 存在一个活动发生序列, 使得  $M$  可达状态  $o$ ; 状态  $o$  是从状态  $i$  可达的唯一状态, 且结束时  $M(o) \geq 1$ ;  $\forall t \in T, \exists M, M', i \xrightarrow{*} M \xrightarrow{t} M'$  即不存在死活动。

虽然每个微流程都是局部合理的, 但是组合微流程也可能发送因交互引起的死锁。

其次, 在局部合理性的基础上, 本节提出了全局合理性的概念。

定义6(全局合理性) 给定一个组合微流程  $MP=MP_1 \parallel MP_2 \parallel \dots \parallel MP_n=(P, T; F, M, i, o)$ , 其中  $\parallel_i \in \{\parallel_s, \parallel_{as}\}$ ,  $MP_k=(P_k, T_k; F_k, M_k, i_k, o_k)$  为微流程, 该组合微流程是全局合理的, 当且仅当:  $MP$  是局部合理的。

最后, 基于局部合理性和全局合理性, 本节提出了合理性的概念, 用于确保组合微流程的正确性。

定义7(合理性) 给定一个组合微流程  $MP=MP_1 \parallel MP_2 \parallel \dots \parallel MP_n=(P, T; F, M, i, o)$ , 其中  $\parallel_i \in \{\parallel_s, \parallel_{as}\}$ ,  $MP_k=(P_k, T_k; F_k, M_k, i_k, o_k)$  为微流程, 该组合微流程是合理的, 当且仅当:  $MP_k$  是局部合理的,  $k \in \{1, 2, \dots, n\}$ ;  $MP$  是全局合理的。

### 2.2 合理性检测算法

根据定义5~7, 给定一个组合微流程, 直接检测该

微流程是否满足合理性是困难的。为此, 文献[3]证明了可以将合理性规约为活性和有界性, 而检测活动和合理性可以使用基于 Petri 网的分析技术来完成。

定义8(活性) 给定一个微流程  $MP=(P, T; F, M, i, o)$ , 该微流程具有活性, 当且仅当: 对于每个从初始状态  $i$  可达的状态  $M$  和每个活动  $t$ , 存在一个从  $M$  可达的状态  $M'$ , 使得  $M'[t>0]$ 。

定义9(有界性) 给定一个微流程  $MP=(P, T; F, M, i, o)$ , 该微流程具有有界性, 当且仅当: 对于每个库所  $p$ , 存在一个自然数  $n$ , 对于每个可达状态  $M$ , 都有  $M(p) \leq n$ 。

基于定义8和9, 文献[3]提出了定理1。

定理1 在一个微流程  $MP=(P, T; F, M, i, o)$ , 活动  $t \in T$  是死的, 当且仅当: 可达状态图  $RG(MP)$  中不存在以  $t$  为旁标的弧。

定义10(可达状态图) 给定一个微流程  $MP=(P, T; F, M, i, o)$ , 其中  $M_0$  是  $MP$  的初始状态图, 可达状态图  $RG(MP)$  的定义如下:  $M_0 \in RG(MP)$ ; 若  $M \in RG(MP)$ , 且存在  $t \in T$  使得  $M[t>M']$ , 则  $M' \in RG(MP)$ 。

根据定理1, 给出检测组合微流程是否具有合理性的算法如下:

输入:  $MP=MP_1 \parallel MP_2 \parallel \dots \parallel MP_n=(P, T; F, M, i, o)$ , 其中  $\parallel_i \in \{\parallel_s, \parallel_{as}\}$ ,  $MP_k=(P_k, T_k; F_k, M_k, i_k, o_k)$  为微流程;

输出: true 表示是合理的, false 表示不是合理的。

- (1) for ( $i=1, i \leq n, i++$ ) do
- (2) 构建  $MP_i$  对应的可达状态图  $RG(MP_i)$
- (3) while( $t \in MP_i.T \wedge t$  未被标识)
- (4) if  $RG(MP_i)$  中不存在以  $t$  为旁标的弧 then
- (5) 微流程不是局部合理的, 且标识  $t$
- (6) return false
- (7) 构建  $MP$  对应的可达状态图  $RG(MP)$
- (8) while( $t \in MP.T \wedge t$  未被标识)
- (9) if  $RG(MP)$  中不存在以  $t$  为旁标的弧 then
- (10) 微流程不是全局合理的, 且标识  $t$
- (11) return false
- (12) return true

需要说明的是, 该算法中使用构建可达状态图的算法可参见文献[12]。

## 3 工具与实验

### 3.1 工具

本文采用开源工具 WoPeD(Workflow Petri Net Designer, WoPeD)对微流程进行建模与分析。WoPeD<sup>[13]</sup>是一个用于建模、模拟和分析基于工作流网描述业务流程的工具, 被学术界广泛使用。

图1所示4个微流程经异步组合得到的组合微流程在 WoPeD 工具的实现如图4所示。

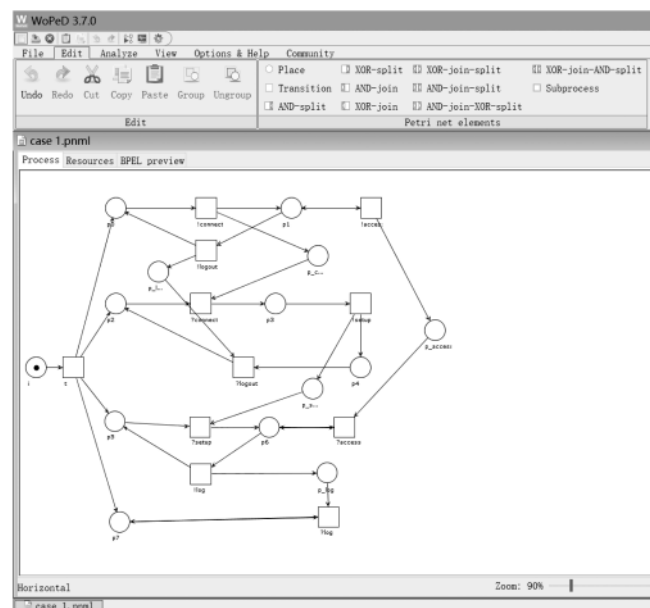


图 4 组合微流程的建模结果截图

在 WoPeD 中,可以使用语义分析功能对组合微流程的合理性进行分析,分析结果如图 5 所示。其中,灰色圆圈表示该组合微流程中的库所不满足有界性。因此,该微流程不满足合理性。

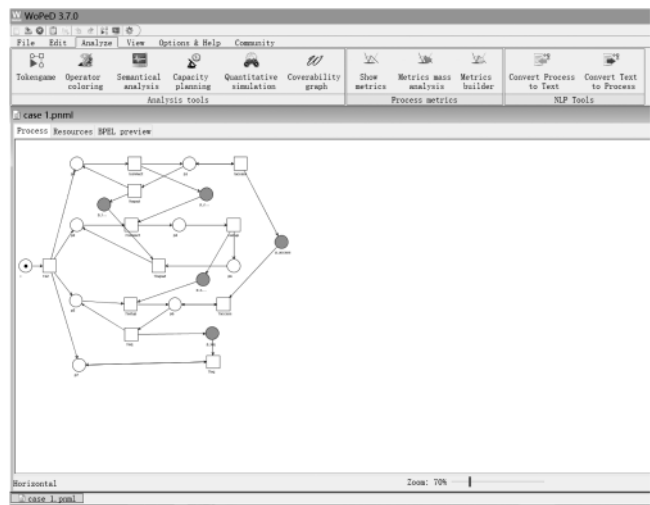


图 5 组合微流程的分析结果截图

3.2 实验结果

本文在 Windows 环境下运行了 50 多个例子,其中,部分例子来源于文献,部分例子来源于某电力行业内部的微流程。实验环境的具体配置如下:2.3 GHz Intel Core i7 处理器和 16 GB 内存。

表 1 给出了部分实验结果。表 1 第 1 列为编号,编号中“e-\*”表示该例子来源于文献,“l-\*”表示该例子来源于行业内部;第 2 列为组合微流程的描述;第 3 列为构成组合微流程的流程个数;第 4 列为同步通信语义下得到的组合微流程;第 5 列为异步通信语义下得到

表 1 部分实验结果

编号	描述	个数	同步组合		异步组合	
			状态数	合理性	状态数	合理性
e-01	用章审批微流程	3	52	✓	71	✓
e-03	日志上报微流程	4	14	✓	52	×
e-07	出差审批微流程	3	33	✓	47	✓
e-11	会议申请微流程	3	8	✓	22	✓
e-20	项目验收微流程	2	10	✓	12	✓
l-01 <sup>[14]</sup>	购物微流程	4	23	✓	31	✓
l-02 <sup>[15]</sup>	订单微流程	4	45	✓	78	✓
l-03 <sup>[16]</sup>	客户端/服务器	3	34	✓	34	✓
l-04 <sup>[17]</sup>	Web 服务	3	44	×	44	×
l-05 <sup>[18]</sup>	旅游代理	4	29	✓	42	×

的组合微流程。在第 4 列和第 5 列中,“x”表示不满足合理性;“✓”表示满足合理性。

从表 1 可知:(1)在来自企业的例子中,e-03 在异步通信语义下,该组合微流程不满足合理性;(2)在来自文献的例子中,l-03 在同步通信和异步通信语义下,该组合微流程都不满足合理性;(3)l-05 在异步通信语义下,该组合微流程不满足合理性。

4 结论

为确保微流程能正常运行,一方面,本文使用工作流网对微流程以及微流程间的同步组合和异步组合进行了建模;另一方面,使用 Petri 网的分析技术对组合微流程进行了合理性分析。实验结果表明,该方法能建模微流程,并检测出组合微流程中死锁错误。

参考文献

[1] SMITH H, FINGAR P. Business process management: the third wave[M]. Tampa: Meghan-Kiffer Press, 2003.

[2] 代飞, 赵文卓, 杨云, 等. BPMN2.0 编排的形式语义和分析[J]. 软件学报, 2018, 29(4): 1094-1114.

[3] VAN DER AALST W M P. The application of Petri nets to workflow management[J]. Journal of Circuits, Systems, and Computers, 1998, 8(1): 21-66.

[4] LAROSA M, DUMAS M, TER HOFSTEDE A H M, et al. Configurable multi-perspective business process models[J]. Information Systems, 2011, 36: 313-340.

[5] REIJERS H A, MANS R S, VAN DER TOORN R A. Improved model management with aggregated business process models[J]. Data & Knowledge Engineering, 2009, 68: 221-243.

[6] 代飞, 莫启, 林雷蕾, 等. 一种多视角的跨组织业务过程建模方法[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(11): 3001-3016.

[7] VAN DER AALST W M P. Modeling and analyzing interorganizational workflows[C]//Proceedings of the International Conference on Application of Concurrency to System Design, 1998: 262-272.

[8] 乔晓强, 魏峻, 黄涛. 基于分布式协调模型的服务协作方



法研究[J].软件学报,2009,20(6):1470-1486.

[9] 袁敏,黄志球,胡军.跨组织多业务事务建模与验证方法[J].软件学报,2012,23(3):517-538.

[10] 代飞,陈凤强,莫启,等.一种保持编排与参与者间行为一致的映射方法[J].软件学报,2018,29(5):1451-1470.

[11] OUEDERNI M, SALAÜN G, BULTAN T. Compatibility checking for asynchronously communicating software[C]// Proceedings of the International Workshop on Formal Aspects

of Component Software(FACS 2013), LNCS, Springer, 2013, 8348:310-328.

[12] 吴哲辉.Petri 网导论[M].北京:机械工业出版社,2006.

[13] THOMAS F, MARTIN S. WoPeD - an educational tool for workflow net[C]// Proceedings of the BPM Demo Sessions, Eindhoven/The Netherlands, September, 2014:31-35.

(下转第 128 页)

(上接第 118 页)

使用 TXOP 时的吞吐率如图 7 所示。开启 TXOP 后 AC\_VO 和 AC\_VI 获得更大的传输机会,吞吐率明显提升。

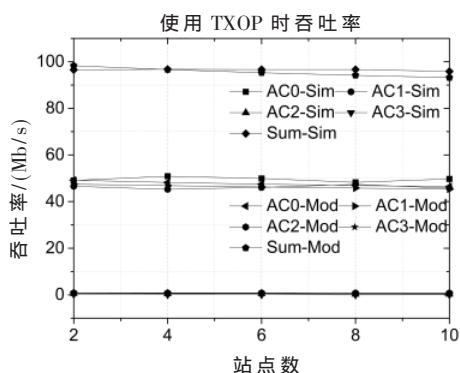


图 7 开启 TXOP 后 802.11ac 不同接入流的饱和吞吐量

使用 A-MPDU 时的饱和吞吐率如图 8 所示。开启聚合后每次传输的数据包更大,吞吐率提升明显。

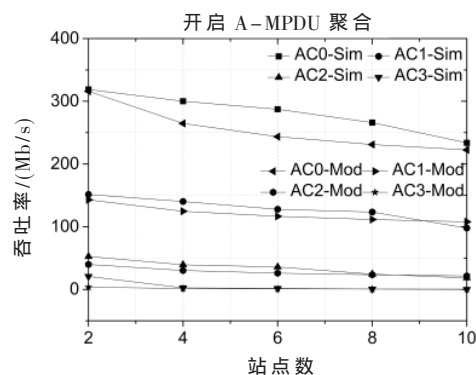


图 8 使用 A-MPDU 聚合时的饱和吞吐量

### 3 结论

本文针对 IEEE 802.11e 协议 EDCA 机制建立四维马尔科夫链模型,该模型可以计算不同 AC 的吞吐率,可适用饱和状态和非饱和条件,支持 TXOP 机制。最后利用 NS-3 网络仿真工具对饱和和数据情况下模型的正确性进行了验证。

#### 参考文献

[1] BIANCHI G, TINNIRELLO I. Remarks on IEEE 802.11 DCF

performance analysis[J]. IEEE Communications Letters, 2005, 9(8):765-767.

[2] 高峰,高泽华,文柳,等. IEEE 802.11a DCF 协议吞吐量与时延性能分析[J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(6):43-47.

[3] 钟萍,施海彬,庄玉祥,等. IEEE 802.11 DCF 协议性能分析模型[J]. 应用科学学报, 2013, 31(1):41-47.

[4] 陈涛,胡园园,王颖. WiFi 关键技术与产品演进研究[J]. 软件导刊, 2020, 19(3):215-219.

[5] 何明泰,李可,刘恒. 密集 WiFi 网络环境网络分配矢量优化与性能分析[J]. 电子技术应用, 2017, 43(9):106-110.

[6] 朱林杰. 802.11ac Gbps WLAN 芯片 MAC 层关键技术研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2019.

[7] CAI L X, LING X, SHEN X, et al. Supporting voice and video applications over IEEE 802.11n WLANs[J]. Wireless Networks, 2009, 15(4):443-454.

[8] 王鹭. IEEE 802.11e 的 EDCA 机制及其改进算法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2013.

[9] 刘文. 基于 IEEE 802.11 无线局域网 QoS 机制的研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2009.

[10] 侯丽俊. 无线局域网 MAC 层帧聚合技术的研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2013.

[11] 尹春雷. 基于 WLAN 的视频流传输研究[D]. 成都:电子科技大学, 2011.

[12] 彭勃. 下一代无线局域网 EDCA 关键技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2015.

[13] 周玉滨. 影响 WiFi 速度六大因素[J]. 计算机与网络, 2014, 40(21):38.

[14] 徐景,杜金玲,杨旸. LTE 和 Wi-Fi 系统间灵活频谱使用关键技术[J]. 中兴通讯技术, 2015, 21(1):43-46.

[15] 何源,郑霄龙. 2.4GHz 无线网络共存技术研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2016, 53(1):26-37.

(收稿日期:2021-03-20)

#### 作者简介:

王心源(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:无线通信网络。

程鹏(1982-),男,博士,高级工程师,主要研究方向:嵌入式系统。

吴斌(1976-),男,博士,研究员,主要研究方向:无线通信芯片及系统应用。



扫码下载电子文档

程中同时恢复两个稀疏向量,影响检测性能的问题,本文使用分别只构建目标字典和背景字典的BSR模型;其次针对目标尺寸、位置等影响导致同心双窗口无法构建纯净背景字典的问题,本文利用RPCA的思想,将高光光谱图像分解为低秩背景和稀疏目标。同时,引入目标字典作为稀疏目标的先验信息,更好地分离目标和背景,构建纯净的背景字典,进而提出了基于背景字典构造的稀疏表示高光光谱目标检测算法。在4个公开高光光谱图像数据集上进行实验,实验结果表明,本文提出的BDCSTD显示出了良好的检测性能,优于其他目标检测算法。

## 参考文献

- [1] DONG Y, DU B, ZHANG L, et al. Dimensionality reduction and classification of hyperspectral images using ensemble discriminative local metric learning[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2017, 55(5): 2509–2524.
- [2] CHANG S, DU B, ZHANG L, et al. IBRS: an iterative background reconstruction and suppression framework for hyperspectral target detection[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2017, 10(7): 3406–3417.
- [3] ZHANG Y, XIE B, SUN J, et al. A hybrid sparsity and constrained energy minimization detector for hyperspectral images[C]//2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2017: 1137–1140.
- [4] HASHJIN S S, KHAZAI S. A new method to detect targets in hyperspectral images based on principal component analysis[J]. Geocarto International, 2020(16): 1–19.
- [5] WU X, ZHANG X, WANG N, et al. Joint sparse and low-rank multi-task learning with extended multi-attribute profile for hyperspectral target detection[J]. Remote Sensing, 2019, 11(2): 150–167.
- [6] BITAR A W, CHEONG L F, OVARLEZ J P. Simultaneous sparsity-based binary hypothesis model for real hyperspectral target detection[C]//IEEE International Conference on Acoustics, 2017.
- [7] ZHU D, DU B, ZHANG L. Single-spectrum-driven binary-class sparse representation target detector for hyperspectral imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 59(2): 1487–1500.

(上接第123页)

- [14] DENI'ELOU P M, YOSHIDA N. Multiparty session types meet communicating automata[C]//Proceedings of ESOP'12, LNCS, 2012, 7211: 194–213.
- [15] CUBO J, SALAÜN G, CANAL C, et al. A model-based approach to the verification and adaptation of WF/.NET components[C]//Proceedings of FACS'07, ENTCS, 2007, 215: 39–55.
- [16] CANAL C, POIZAT P, SALAÜN G. Synchronizing behavioural mismatch in software composition[C]//Proceedings

- [8] WU X, ZHANG X, CEN Y. Multi-task joint sparse and low-rank representation target detection for hyperspectral image[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 16(11): 1756–1760.
- [9] SUN W, YANG G, PENG J, et al. Lateral-slice sparse tensor robust principal component analysis for hyperspectral image classification[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2020, 17(1): 107–111.
- [10] Zhu Dehui, Du Bo, Zhang Liangpei. Binary-class collaborative representation for target detection in hyperspectral images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 16(7): 1100–1104.
- [11] GUO T, LUO F, ZHANG L, et al. Target detection in hyperspectral imagery via sparse and dense hybrid representation[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2020, 17(4): 716–720.
- [12] AZIZI R, SATARI M, MOMENI M. A new dictionary construction method in sparse representation techniques for target detection in hyperspectral imagery[J]. Geomatics Science and Technology, 2020, 10(1): 111–132.
- [13] LI W, MENG M, ZHAO C. Hyperspectral target detection based on sparse errors matrix[C]//Progress in Electromagnetics Research Symposium—fall, 2017.
- [14] WARREN R E, OSHER S J. Hyperspectral unmixing by the alternating direction method of multipliers[J]. Inverse Problems and Imaging, 2017, 9(3): 917–933.
- [15] ZHU D, DU B, ZHANG L. Target dictionary construction-based sparse representation hyperspectral target detection methods[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019, 12(4): 1254–1264.

(收稿日期: 2021-02-23)

## 作者简介:

陶洋(1964–),男,博士,教授,主要研究方向:异构网络、机器学习、模式识别等。

林飞鹏(1992–),男,硕士研究生,主要研究方向:模式识别。

杨雯(1992–),女,硕士研究生,主要研究方向:模式识别。



扫码下载电子文档

of FMOODS'06, LNCS, 2006, 4037: 63–77.

- [17] FU X, BULTAN T, SU J. Analysis of interacting BPEL web services[C]//Proceedings of WWW'04, 2004: 621–630.
- [18] BENNACEUR A, CHILTON C, ISBERNER M, et al. Automated mediator synthesis: combining behavioural and ontological reasoning[C]//Proceedings of SEFM'13, LNCS, 2013, 8137: 274–288.

(收稿日期: 2021-01-04)

## 作者简介:

徐彬(1974–),男,本科,工程师,主要研究方向:电力系统及其自动化。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所