

基于 Pareto 多目标优化的工业传感网路由协议研究

吴怡之¹ 全东平¹ 许红安² 齐金鹏¹ 丁永生^{1,3}

(东华大学信息科学与技术学院 上海 201620)¹ (华东师范大学信息科学与技术学院 上海 200062)²

(东华大学数字化纺织服装技术教育部工程研究中心 上海 201620)³

摘要 工业传感网通常包含实时性和可靠性在内的多个性能指标,因此需要应用多目标优化方法设计路由算法,以满足性能需求。在收集树协议 CTP 的基础上进行改进,提出了基于 Pareto 多目标优化的路由协议 TCTP。该协议首先在单跳链路质量评估中,增加单跳节点传输时延性能指标。然后运用 Pareto 原理通过路由拓扑建立了多路径路由,并基于数据传输的实时性和可靠性指标,选择多路径路由。最后使用有色 Petri 网对 TCTP 进行了形式化建模并利用 CPN Tools 工具进行了实现和验证。与 CTP 协议相比,TCTP 协议不仅在选择传输路径上具有更强的适用性和灵活性,而且满足了工业上实时、可靠等多目标传输性能的需求。

关键词 无线传感器网络,工业传感网,TCTP,有色 Petri 网,CPN 工具

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Study on Pareto-based Industrial WSN Multi-objective Optimization Routing Algorithm

WU Yi-zhi¹ QUAN Dong-ping¹ XU Hong-an² QI Jin-peng¹ DING Yong-sheng^{1,3}

(College of Information Sciences and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)¹

(College of Information Sciences and Technology, East China Normal University, Shanghai 200062, China)²

(Engineering Research Center of Digitized Textile & Fashion Technology, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China)³

Abstract Industrial WSNs have various performance indicators such as real-time and reliability. In order to meet those performance requirements, multi-objective optimization may apply on routing algorithm design. This paper modified Collection Tree Protocol (CTP) and presented Pareto-based multi-objective optimization routing protocol TCTP. In the quality evaluation of single hop link, TCTP adds a performance indicator of single hop transmit delay. Then a multi path routing strategy was established on routing topology by Pareto principle, also with multi path routes selection based on performance indicators of real-time and reliability. Finally a colored Petri net was adapted to formalize TCTP, which has been realized and verified by CPN Tools. Compared with CTP, TCTP surpasses on adaptability and flexibility on transmit path selection, and satisfies multi-objective data transmission requirements of real-time and reliability in industrial WSNs.

Keywords WSNs, Industrial WSNs, TCTP, Colored Petri net, CPN tools

1 概述

无线传感器网络^[1] (wireless sensor network WSN)是集信息采集、信息处理、信息传输于一体的综合智能信息系统,具有广阔的应用前景。该网络由于其低成本、低能耗、高度灵活性、扩展性强等特点,近年来逐渐向工业测控领域渗透,正成为继现场总线技术后工业网络技术的又一个研究热点。但工业传感网的研究尚处于起步和发展阶段,其原因是工业现场环境复杂、工业应用需求特殊,通常包含对数据传输实时性和可靠性要求在外的多个性能指标和约束条件,并且相互关联和耦合,而目前的传感网的研究成果大都针对单一目标进

行优化,因此如何应用多目标优化方法来满足通信实时性、可靠性、高速率以及抗干扰等多方面性能需求,是成功地地将 WSN 应用于工业领域的首要问题。

目前基于多目标优化的 WSN 研究可以分为两类:静态优化和动态优化。静态 WSN 多目标优化 (WSN-Static Multi-Objective Optimization, WSN-SMOO) 在 WSN 的部署阶段全局地进行,根据能耗、可靠性、运行生命周期等多优化目标,采用遗传、进化等智能寻优方法,合理配置网络资源,以达到性能优化指标^[2,3]。动态 WSN 多目标优化 (WSN-Dynamic Multi-Objective Optimization, WSN-DMOO) 则在 WSN 运行时在线分布式地进行^[4-8],进行能耗与可靠性、速率等网络性

到稿日期:2010-05-24 返修日期:2010-08-21 本文受国家自然科学基金(60975059),教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20090075110002),上海市科学技术委员会重点基础研究项目(10JC1400200),上海市科学技术委员会技术标准专项(10DZ0506500),上海市自然科学基金(10ZR1401600)资助。

吴怡之 博士,副教授,主要研究方向为可穿戴系统、信息融合与智能计算, E-mail: yz_wu@dhu.edu.cn; 全东平(1986-),女,硕士生,主要研究方向为无线网络、网络仿真。

能指标的平衡和优化。例如,利用模糊逻辑算法优化能耗和系统生命周期^[4];利用跨层算法优化路由平衡多应用需求和受限资源^[8];利用多目标优化方法公平分配网络带宽,实现系统整体生存周期的最大化,并利用单跳重传增加可靠性^[6,7]。但现有文献尚未针对工业传感网进行网络实时性、可靠性的多目标优化。

不同于农业、环境等领域 WSN 研究,实时性保证是工业传感网十分重要的性能需求。对于无线传感网的实时性,文献[9]提出轮询路径梯度算法 RPPS,即通过传输路径中跳数的多少来选择路由。文献[10]提出接收 5 组连续时刻的数据帧来计算时延,通过时延选择路径。但文献[9]提出的跳数选择方式缺乏可靠性保证,也没有考虑不断变化的环境将会影响数据传输的延时。在文献[10]中,仅实现了数据传输的实时性,没有考虑到在可靠传输方面的优化。

本文提出一个基于多目标优化思想的 WSN 实时收集树路由方法 TCTP(Timed Collection Tree Protocol),即收集树路由协议 CTP(Collection Tree Protocol)^[11]的改进算法,它采用分布式动态优化,保证传感数据在允许的时间范围内,最可靠地传输到汇聚节点,以满足工业传感网对监控数据实时可靠的传输需求。在建立 TCTP 算法的基础上,本文利用有色 Petri 网对其进行形式化建模,在 CPN Tools 中实现了模型,证明了算法的有效性。

2 TCTP 算法模型

CTP 协议提供从传感器节点到汇聚节点(也称根节点)的尽最大可能的多跳包传递服务,但是没有考虑数据传输延迟控制机制。本文利用 Pareto 多目标优化理论,基于 CTP 协议建立实时可靠的 WSN 路由协议 TCTP。

定义 1(Pareto 最优解^[12]) 对于可行解 $x^* \in S$, 当且仅当不存在另一个可行解 $x \in S$, 使所有不等式 $f_j(x) \leq f_j(x^*)$, $j=1, \dots, q$ 成立, 且至少存在一个 $j_0 \in \{1, \dots, q\}$, 使严格不等式 $f_{j_0}(x) < f_{j_0}(x^*)$ 成立, 则称 x^* 为多目标优化问题的一个 Pareto 最优解。

通常,多目标优化问题都有很多个 Pareto 最优解,解决多目标优化问题的关键在于获得由这些 Pareto 最优解组成的集合。在路由的拓扑和建立时,节点有不止一个候选父节点。为了实现传输数据的最优化,节点应该根据 Pareto 原理选择最优的下一跳节点。本文提出的基于 CTP 的 TCTP 协议分为单跳链路质量估计、路由建立和路径选择 3 个部分,目的是在一定的传输延迟范围内,减少传感器数据帧的丢失。

2.1 单跳链路质量估计

传感器网络节点之间的传输模型如图 1 所示,并进行如下定义。

定义 2 以节点 A 所在位置 O 为中心、以节点 A 发出的有效的无线射频信号覆盖的范围形成的区域称为 A 的传输区域。

定义 3 落在节点 A 的传输区域中的节点,都是 A 的邻节点。如图 1 中节点 B、C 都是 A 的邻节点。

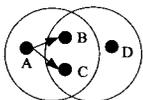


图 1 传感器网络节点传输模型

定义 4(入站链路质量, in-bound link quality) 参考点 B

点成功接收到从 A 点发送的连续帧的概率和平均时延,定义为 A 到 B 的入站链路质量,记为 $G(A, B)$ 和 $T(A, B)$,计算方法如下:

(1)节点 A 连续向节点 B 发送 5 个记录了发送时刻的数据帧;

(2)节点 B 接收数据并记录接收时刻,分别计算出 $G(A, B)$ 和 $T(A, B)$ 。

例如,节点 A 向节点 B 发送 5 个数据帧,其中 3 号帧丢失。发送时刻的时间序列是 $T(T_1, T_2, T_3, T_4, T_5)$,接收时刻的时间序列为 $T^*(T_1^*, T_2^*, T_4^*, T_5^*)$,则

$$G(A, B) = 4 \div 5 = 0.8 \quad (1)$$

$$T(A, B) = \frac{1}{4} [(T_1^* - T_1) + (T_2^* - T_2) + (T_4^* - T_4) + (T_5^* - T_5)] \quad (2)$$

定义 5(出站链路质量, out-bound link quality) 是参考点 B 到 A 的链路质量, B 点成功发送到 A 点的连续帧的概率和平均时延分别记为 $G(B, A)$ 和 $T(B, A)$ 。节点 B 无法直接测出到 A 的出站链路质量,它是通过 A 点发送数据帧中携带的入站链路质量信息获得的。这里,不考虑通信链路双向的差异,则:

$$G(A, B) = G(B, A) \quad (3)$$

$$T(A, B) = T(B, A) \quad (4)$$

定义 6(单跳链路质量表) 每个节点通过出站链路质量估计维护单跳链路质量信息,表中记录为四元组 $(N_i, N_j, G(N_i, N_j), T(N_i, N_j))$ 。

2.2 路由拓扑和建立

设传感器网络中的普通节点个数为 k , N_i 表示单个节点, S 表示汇聚节点,传感器网络中的节点集为 $\{N_i, a \leq i \leq k\} \cup \{S\}$ 。设允许的传感器数据发送到汇聚节点的最大延迟为 T_{max} 。由于传感器网络使用的是无线信道,节点 N_i 的邻节点都可以接收到 N_i 发送的报文,记为 $\{A_i\}$ 。基于对称链路,如果 $N_j \in \{A_i\}$, 那么 $N_i \in \{A_j\}$ 。每个节点 N_i 维护一个多路径路由表。

定义 7(多路径路由表) 每个节点多路径路由表的记录为四元组 $(N_i, N_j, G(N_i, S), T(N_i, S))$, 分别为当前节点的标识、上一跳节点的标识、当前节点到汇聚 Sink 节点的传输可靠性度量 $G(N_i, S)$ 和传输延迟 $T(N_i, S)$ 。

TCTP 网络传输协议实现方法如下:初始时, Sink 设置为 $(S, S, 0, 0)$, 其他节点设置为 $(0, N_i, 0, \infty)$ 。若 $T(N_i, S) < \infty$, N_i 发布路由信息。首先, Sink 节点广播路由消息。节点 N_i 从节点 N_j 接收到一条路由消息 $(N_j, N_k, G(N_j, S), T(N_j, S))$ 后,基于节点 N_i 单跳链路质量表和路由表,判断 N_j 是否是一个潜在的父节点,并且经 N_j 的路径性能度量是否属于 Pareto 非劣解。具体流程如下:

(1)如果在单跳链路质量表中存在记录 $(N_i, N_j, G(N_i, N_j), T(N_i, N_j))$, 即 N_j 为 N_i 的邻节点, 则 $G(N_i, S) = G(N_j, S) \times G(N_i, N_j)$, $T(N_i, S) = T(N_j, S) + T(N_i, N_j)$; 如果不存在, 则返回。

(2)如果在节点 N_i 路由表中, 存在记录 $(N_i, N_k, G^*(N_i, S), T^*(N_i, S))$, $G(N_i, S) < G^*(N_i, S)$ 且 $T(N_i, S) > T^*(N_i, S)$, 则返回; 否则, 将 $(N_i, N_j, G(N_i, S), T(N_i, S))$ 加入到 N_i 的路由表中。

(3)如果某个节点 N_i 更新路由表, 则广播路由信息, 相

关节点立即更新路由表。

2.3 路径选择

作为 TCTP 的第三个部分, 路径选择模块完成传感器节点和路由节点的 Pateto 多路径选择和数据包的转发任务, 即节点在其路由表中查询一条多目标 Pateto 最优路径, 到汇聚节点的总延迟小于最大延迟 T_{max} , 且可靠性最高。设节点 N_i 收到待转发的数据帧 P , 其累计的传输延迟为 T_p , 并作为协议帧头字段包含在数据帧中。初始化到汇聚节点可靠性度量最大值 $G_{max}=0$, 则 N_i 遍历路由表进行路径选择和转发的过程如下所示:

(1) 假设在路由表中, 存在一条记录 $(N_i, N_j, G(N_i, S), T(N_i, S))$, 若任意其它的路由 $(N_i, N_k, G(N_k, S), T(N_k, S))$ $a \leq g \leq k, g \neq i$ 满足关系 $G(N_i, S) < G(N_k, S)$ 且 $T(N_i, S) > T(N_k, S)$, 则不予考虑。

(2) 设当前路由记录为 $(N_i, N_j, G(N_i, S), T(N_i, S))$, 判断 3 种情况:

- i) 如果 $T(N_i, S) + T_p > T_{max}$, 则转到(2);
- ii) 如果 $T(N_i, S) + T_p > T_{max}$, 而且 $G(N_i, S) < G_{max}$, 则转到(2);
- iii) 如果 $T(N_i, S) + T_p \leq T_{max}$, 而且 $G(N_i, S) > G_{max}$, 则 $G_{max} = G(N_i, S)$, 下一跳节点设为 N_j , 转到(2)。

(3) 后移到下一条路由记录, 如果不是最后一条记录, 则转到(1), 否则退出。

3 TCTP 路由算法的 CPN 模型

分布式系统建模与分析工具高级 Petri 网系统——有色 Petri(Colored PetriNet, CPN)^[12], 在对复杂系统建模时, 可以使 Petri 网模型显得简单、清晰, 特别适用于描述并行和异构网络的系统分析和设计, 典型的应用领域就是通信协议、分布式系统等。CPN 的自动化分析工具 CPN Tools^[13], 是一个用于编辑、模拟和分析 Petri 网模型的工具。

在上一节分析 TCTP 路由算法运行机制的基础上, 本节采用 CPN Tools 作为实现工具, 对 TCTP 进行形式化建模和分析验证。

3.1 TCTP 路由算法的 CPN 模型

模型中采用的颜色集和变量集定义如下:

Colset INT = int

Var a, b, c, d: INT

Var m, n, p, q: INT

Var i, j, k, l: INT

Var v: INT

Colset INTxINTxINT = product INT * INT * INT

Colset INTxINTxINT = product INT * INT * INT

根据设计的 TCTP 协议, 可得到该协议的路由拓扑和建立有色的 CPN 模型。

在 TCTP 协议中, Sink 节点 A 发出路由信息, 开始路由的拓扑和建立。为了简化模型, 这里只描述在 3 个邻域的范围, 5 个节点先后建立各自路由表的过程, 如图 2 所示。

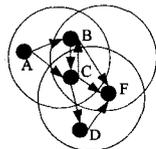


图 2 节点的拓扑和建立

在此过程中, 使用四元组表示路由表信息, 分别是当前节点的位置、上一跳节点的位置、当前节点到 Sink 节点接收质量、当前节点到 Sink 节点的延迟。

库所 A, B, C, D, F 分别表示已知节点的单跳链路质量表, 库所 B+, C+, D+, F+ 分别表示需创建的节点路由表。

在模型建立后, 通过 CPN Tools 的符号检查功能和模拟功能, 验证该模型的正确性。另外, 利用 CPN Tools 的模拟功能对模型进行模拟运行, 得到运行结果, 如图 3 所示。

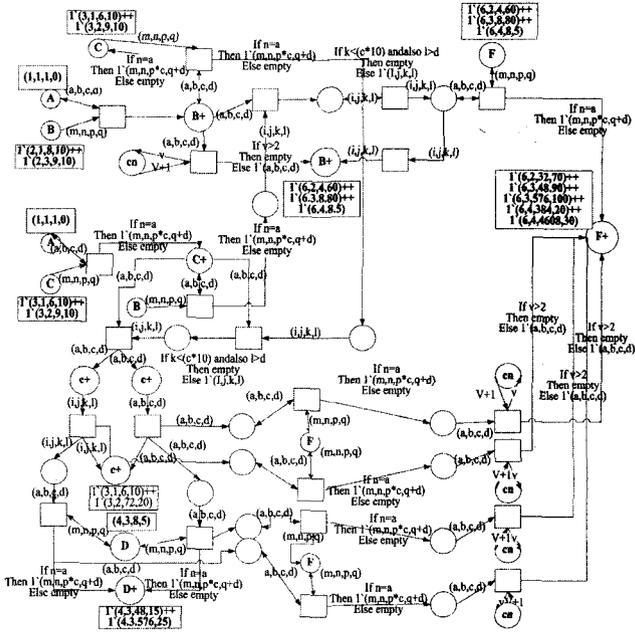


图 3 TCTP 协议的 CPN 模型

3.2 TCTP 协议模型的分析

为了简化说明, 根据定义 5, 这里只列出各节点中有用的链路质量表: $A[(1, 1, 1, 0)]$, $B[(2, 1, 0, 8, 10), (2, 3, 9, 10)]$, $C[(3, 1, 0, 6, 10), (3, 2, 0, 9, 10)]$, $D[(4, 3, 0, 8, 5)]$, $F[(6, 2, 0, 4, 60), (6, 3, 0, 8, 80), (6, 4, 0, 8, 5)]$ 。根据定义 6, 经过路由拓扑后, 各节点建立了多路径路由表。以库所 F+ 为例, 其可能的路径信息如表 1 所列, 经 Pareto 优化的路径信息如表 2 所列。其中, 接收质量和时间延迟根据定义 6, 时间延迟单位为 ms。基于 TCTP 的路由表为 F-B-A, F-C-A, F-C-B-A, F-D-C-A, F-D-C-B-A, 库所 F+ 的多目标优化路径的 Pareto 前沿如图 4 所示。

表 1 库所 F+ 获得的路由信息

| 当前节点 | 父节点 | 接收质量 | 时间延迟 |
|------|-----|--------|------|
| F | B | 0.32 | 70 |
| F | C | 0.48 | 90 |
| F | C | 0.576 | 100 |
| F | D | 0.384 | 20 |
| F | D | 0.4608 | 30 |

表 2 库所 F+ 获得的非劣解路由信息

| 当前节点 | 父节点 | 接收质量 | 时间延迟 |
|------|-----|--------|------|
| F | C | 0.48 | 90 |
| F | C | 0.576 | 100 |
| F | D | 0.384 | 20 |
| F | D | 0.4608 | 30 |

从表 1、表 2 可知, 点 $(20, 0.384)$, $(30, 0.4608)$, $(90, 0.48)$, $(100, 0.576)$ 根据上述 TCTP 原理, 属于 Pareto 非劣解; 而点 $(70, 0.32)$ 不是 Pareto 前沿, 所以在路径选择中, 该

点不在考虑范围之内。最终得到如图 4 所示的 Pareto 前沿, 对应于 4 条 Pareto 多目标最优通信路径, 即路径 1(90, 0.48)、路径 2(100, 0.576)、路径 3(20, 0.384)、路径 4(90, 0.48)。

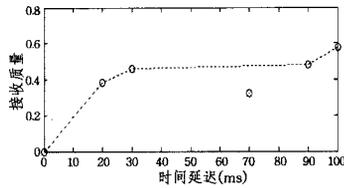


图 4 Pareto 前沿

(I) 多目标优化路径选择分析

(1) 路径 2 的链路质量是最好的, 但是时延严重; 路径 3 与路径 2 的性能参数恰好相反。而路径 1, 4 的性能参数处于路径 2, 3 之间。

(2) 如果按照未改进的 CTP 传输协议, 应该选择质量最好的路径 2, 但忽略了实时性能。路径 2 的链路质量虽然最好的, 但是它延时严重。

(II) TCTP 可扩展性分析

进一步分析在网络负载增加的情况下 TCTP 的运行性能和多目标优化路径的选择情况。本文对不同通信负载的 TCTP 运行情况进行仿真, 传输数据包数量分别为 50, 70, 100, 120 的情况下, 4 条 Pareto 多目标最优通信路径(1: F-C-A; 2: F-C-B-A; 3: F-D-C-A; 4: F-D-C-B-A) 的接收质量和时间延迟分别如图 5、图 6 所示。

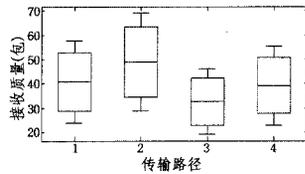


图 5 Pareto 多传输路径的接收质量比较

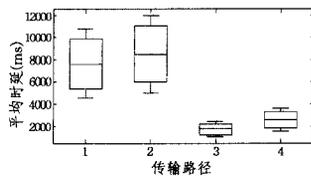


图 6 Pareto 多传输路径的传输时延比较

在图 5、图 6 中, 我们可以看到:

(1) 随着通信负载的增加, 各路径的可靠性呈下降趋势, 而传输延迟呈上升趋势, 但各路径的相对优劣保持不变, 证明在网络负载变化的情况下, TCTP 运行稳定。

(2) 随着负载的变化, 不同的传输路径的可靠性能和延迟性能的变化程度有所不同。具体说来, 数据传输可靠性变化小, 但传输延迟变化较大。其中路径 3, 4 的传输延迟变化幅度较小。例如, 路径 3 在网络负载 120(延迟 2400ms) 下的延迟比负载为 50(延迟 1000ms) 时的延迟增加 1400ms; 而路径 1 却增加了 6300ms。因此在大网络负载下, 路径 3 为优选。

结束语 多目标性能优化研究已经成为无线传感器网络最重要的研究领域之一。工业传感网要求保证可靠性和实时

性等多目标性能。基于 Pareto 多目标优化思想的 TCTP 协议实现简单, 实现了在实时的前提下保证数据可靠传输的工业要求。而有色 Petri 网能够提供有效的形式化分析方法。本文使用有色 Petri 网对 TCTP 协议进行了形式化建模, 并通过 MATLAB 工具对 TCTP 的运行性能进行分析, 验证了该协议能够同时满足传输可靠性和实时性要求, 并且在网络负载变化的情况下, 表现了良好的可扩展性。

参考文献

- [1] 齐小刚, 刘三阳. 无线传感器网络动态路由研究与展望[J]. 计算机科学, 2009, 36(8): 1-2
- [2] Jourdan D B, de Weck O L. Layout optimization for a wireless sensor network using a multi-objective genetic algorithm[C]// Proc. of the Vehicular Technology Conf. Los Angeles, CA, USA, 2004: 2466-2470
- [3] Konstantinidis A, Yang K, Zhang Q. An evolutionary algorithm to a multi-objective deployment and power assignment problem in wireless sensor networks[C]// IEEE Global Communications Conference(GlobeCom08). vol. AH16, New Orleans, LA, 2008: 475-481
- [4] Minhas M R, Gopalakrishnan S, Leung V C M. Fuzzy algorithms for maximum lifetime routing in wireless sensor networks[C]// Global Telecommunications Conference. 2008: 1-6
- [5] Mahjoub D, El-Rewini H. Adaptive constraint-based multi-objective routing for wireless sensor networks[C]// Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Pervasive Services, The Marmara Istanbul, 2007: 72-75
- [6] Zhu J, Hung K L, Bensaou F B, Nait-Abdesselam. Rate-lifetime tradeoff for reliable communication in wireless sensor networks [J]. Computer Networks, 2008, 52(1): 25-43
- [7] Chen J, He S, Sun Y, et al. On utility-lifetime tradeoff in wireless sensor networks by optimal flow control[C]// Proceedings of the IEEE Globecom, 2009
- [8] Villaverde B C, Rea S, Pesch D. Multi-objective Cross-Layer Algorithm for Routing over Wireless Sensor Networks[C]// The Third International Conference on Sensor Technologies and Applications, Athens, Greece, June 2009: 568-574
- [9] 朱小松, 陈敏. 一种适合在无线传感网络中传输实时业务的区分服务方案[J]. 计算机科学, 2006, 33(5): 63-69
- [10] 卜长清. 无线传感器网络实时传输协议的研究和实现[D]. 重庆: 重庆大学, 2009
- [11] Fonseca R, Gnawali O, Jamieson K, et al. The collection tree protocol(CTP)[R]. TEP 123 Draft, 2006
- [12] 马青亮, 胡昌华, 杨青. 一种用于多目标优化的混合遗传算法[J]. 系统仿真学报, 2004(16): 5
- [13] Roubtsova E E. Property specification for coloured Petri nets [J]. 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2004, 3(3): 2617-2622
- [14] Kristensen L M, Jørgensen J B, Jensen K. Application of Coloured Petri Nets in System Development [C] // Lectures on Concurrency and Petri Nets. Advances in Petri Nets. Proceedings of 4th Advanced Course on Petri Nets. Lecture Notes in Computer Science, vol 3098. Berlin: Springer, 2004: 626-685