

一种 k 跳回溯可信 QoS 重路由机制

杨 蕾 王兴伟 黄 敏

(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110819)

摘 要 在可信网络中,由于存在链路或节点失效,需要进行重路由。考虑到用户的服务质量 QoS (Quality of Service)和可信需求且为了减少算法开销,提出了一种 k 跳回溯可信 QoS 重路由机制。该机制以 k 作为最大回溯跳数,从失效节点(或链路)的前一节点开始逐跳进行回溯选路,同时尽可能复用路径的原有链路。构建了网络模型和用户信任评估模型,并给出了用户需求描述、满意度计算方法和路径评判标准。仿真结果表明,该机制是可行和有效的,同现有机制相比,在满足用户需求的同时,提高了重路由成功率和用户满意度,并减少了重路由时间。

关键词 可信网络,重路由,服务质量, k 跳回溯,用户信任评估

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A

k -Hop Backtracking Trusted QoS Rerouting Mechanism

YANG Lei WANG Xing-wei HUANG Min

(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract Because of link or node failures, rerouting is necessary in trusted network. Considering users' QoS (Quality of Service) requirements, trusted requirements and decrease of the algorithm cost, a k -hop backtracking trusted QoS rerouting mechanism was proposed. The mechanism backtracks hop by hop from the previous node of the failure node (or link) with k as the maximum hop count for the rerouting, and reuses original links of the path as much as possible. The network model and user trust evaluation model were constructed. Besides, the description of users' requirements, the calculation methods of users' satisfaction and the criterion of path judgments were given. The simulation results show that the proposed mechanism is both feasible and effective. In contrast to existing mechanisms, the rerouting success rate and user satisfaction degree are higher and the rerouting time is shorter with users' demands satisfied.

Keywords Trusted network, Rerouting, Quality of service (QoS), k -hop backtracking, User trust evaluation

1 引言

随着网络技术和应用的飞速发展,互联网已经成为当今社会的主要信息载体。然而,网络的不信任因素逐渐增加,网络安全引起了人们的广泛关注。因此,人们提出了可信网络^[1]的概念,它是指网络和用户的行为及其结果总是可预期与可管理的,能够做到行为状态可监测、行为结果可评估、异常行为可管理。新业务的不断涌现也使得人们对网络的服务质量 QoS (Quality of Service)^[2,3]提出了更高的要求。

可信网络需要在重路由过程中为用户提供 QoS 保证。文献[4]采用了接口特定转发 ISF (Interface Specific Forwarding) 的方法进行 IP 重路由。每个路由接口有单独的路由表,使得重路由更加灵活,并达到了平衡网络负载的目的。文献[5]提出了两种低复杂度的启发式重路由算法,其以最小化

网络阻塞率、最大化吞吐量和最小化对已建立连接的扰动为目标,并对这些目标进行均衡,从而找到性能较优的重路由路径。文献[6]利用快速隧道式选择 FTS (Fast Tunnel Selection) 的方法来获得基于隧道的 IPFRR (IP Fast Reroute)。FTS 方法可以在完成整个最短路径树之前找到隧道端点,因而有效地节省了网络的计算开销。文献[7]提出了一种 WDM (Wavelength-Division Multiplexing) 光网络中的重路由机制。该机制能够在波长连续性约束的条件下,最小化服务请求拒绝率,并保证较短的网络中断时间。文献[8]提出了一种完全重路由算法,其在路由失效后重新建立一条新的端到端通信路径。文献[9]提出了一种部分重路由算法,其每个路由节点都维护一棵受延迟约束、以某一能反映路径优劣的参数最少为优化目标的最短路径树。根据节点或链路故障情况,按规则对原最短路径树进行“偏转”,获得重路由路径。

到稿日期:2013-07-26 返修日期:2013-11-02 本文受国家杰出青年科学基金资助项目(61225012),国家自然科学基金资助项目(61070162, 71071028, 70931001),高等学校博士学科点专项科研基金优先发展领域资助课题(20120042130003),高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20100042110025, 20110042110024),工信部物联网发展专项资金资助项目,中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N110204003, N120104001)资助。

杨 蕾(1989—),女,硕士生,主要研究方向为 QoS 重路由、社交网络;王兴伟(1968—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为下一代互联网、移动 Internet、IP/DWDM 光 Internet 等;黄 敏(1968—),女,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为智能算法设计与优化、调度理论与方法等。

上述研究工作还存在一些问题:重路由路径可能严重偏离最优路径,如部分重路由;网络资源利用率低,如完全重路由预约大量资源;大部分重路由由算法没有充分考虑应用对 QoS 和路径可信的需求;计算开销和网络开销较大。本文提出了一种 k 跳回溯可信 QoS 重路由机制,目的在于克服或改善这些问题,使重路由路径支持 QoS 保证和可信需求。

2 问题描述

2.1 网络模型

网络抽象为图 $G(V, E)$ 。 V 表示节点集,代表网络路由节点。每个接入路由节点配备信任评估代理,负责对用户终端身份进行信任评估。 E 表示边集,代表网络通信链路。本文把节点参数归并到边上,这样, $\forall e_l \in E (l=1, 2, 3, \dots, |E|)$, 考虑的参数包括总带宽 tbw 、可用带宽 bw 、延迟 dl 、延迟抖动 jt 、出错率 ls 和信任值 tv 。

2.2 用户信任评估模型

用户终端的接入信任分别以可靠性特性、性能特性和行为安全特性进行评估。可靠性特性包括平台、系统、安全组件和应用程序的可靠性。性能特性包括用户终端当前内存占用率、CPU 占用率和建立连接所需的延迟。行为安全特性包括接入路由器信任评估代理记录的用户非法连接次数、认证失败次数、尝试越权次数以及扫描重要端口次数。

证据^[10]通常由可信信息收集器 TIC (Trusted Information Collector) 检测获得,用 et 表示。TIC 负责检测用户终端运行环境的信息,即可靠性特性。同时, TIC 定期收集当前用户终端的内存占用率、CPU 占用率和建立连接所需的延迟证据,并定期与接入路由器信任评估代理交互。

对于可靠性特性的证据, TIC 根据每种证据与可信集的匹配情况来确定各自的可信度。如果待证明系统的可信报告中包含 N 个证明向量,属于平台、系统、安全组件和应用程序的数量分别为 N_1, N_2, N_3, N_4 , 与可信集匹配的个数分别为 M_1, M_2, M_3, M_4 , 则归一化的各证据值分别为 $M_1/N_1, M_2/N_2, M_3/N_3, M_4/N_4$ 。

对于内存和 CPU 占用率证据,归一化表示如下:

$$et_n = \frac{et_{\min}}{et} \quad (1)$$

建立连接所需的延迟证据以及行为安全特性的各证据均为具体测量数值,归一化表示如下:

$$et_n = \begin{cases} \frac{et - et_{\min}}{et_{\max} - et_{\min}} et & \\ \frac{et_{\max} - et}{et_{\max} - et_{\min}} et & \end{cases} \quad (2)$$

其中, $et_{\min}$ 和 $et_{\max}$ 分别是一段时间的证据最小值和最大值。如果证据值越大越好,则利用式(2)中第一个表达式归一化;否则,利用第二个表达式归一化。

G1 法是一种用来确定指标权重的序关系分析法^[11]。本文采用 G1 法计算各个证据值的权重 ω_i 。首先确定各证据 pa_i 的重要程度关系,对所属特性的重要程度进行降序排列,然后给出相邻证据之间的相对重要程度的比值判断 $r_i (r_i = \frac{\omega_{i-1}}{\omega_i})$, 本文设定了 5 种 r_i 的取值。计算 m 个证据权重的公式如下:

$$\omega_m = \frac{1}{1 + \sum_{k=2}^m \prod_{i=k}^m r_i}, \omega_{i-1} = r_i \omega_i (2 \leq i \leq m) \quad (3)$$

将规范化后得到的证据矩阵 E 与利用 G1 法求得各证据权重构成的矩阵 WE 进行计算:

$$M = E * WE^T \quad (4)$$

取计算结果 M 的主对角线值构成用户终端信任向量 $A = (a_1 \cdots a_i \cdots a_n)$, 由 G1 法计算出特性权重向量 $WA = (\omega_1 \cdots \omega_i \cdots \omega_n)$ 。用户终端的行为信任值 atv 计算如下:

$$atv = A * WA^T = \sum_{i=1}^n a_i \omega_i \quad (5)$$

如果 $atv \geq atv_L$ (atv_L 为用户可信接入信任值阈值), 接入路由器为该用户找路; 否则, 认为该用户不可信, 不为其接入网络。

2.3 用户需求

用户需求体现在用户对网络应用 QoS 参数和信任等级的需求, 表现为对网络良好的 QoS 保证和可信性方面的要求。网络提供的应用类型集合为 $APT = \{AP_1, AP_2, \dots, AP_{|APT|}\}$ 。每种应用类型都对应一个 QoS 参数需求, 即 $AP-TR = \{APR_1, APR_2, \dots, APR_{|APT|}\}$ 。 $APR_i = (\Delta_{bw}^i, \Delta_{dl}^i, \Delta_{jt}^i, \Delta_{ls}^i)$ 表示第 i 种应用类型的 QoS 参数需求。其中, $\Delta_{bw}^i = [bw_{-r_L}^i, bw_{-r_H}^i]$ 表示第 i 种应用类型的带宽需求区间; $\Delta_{dl}^i = [dl_{-r_L}^i, dl_{-r_H}^i]$ 表示第 i 种应用类型的延迟需求区间; $\Delta_{jt}^i = [jt_{-r_L}^i, jt_{-r_H}^i]$ 表示第 i 种应用类型的延迟抖动需求区间; $\Delta_{ls}^i = [ls_{-r_L}^i, ls_{-r_H}^i]$ 表示第 i 种应用类型的出错率需求区间。此外, 将信任值划分为不同的区间, 供用户选择不同的信任等级, 每种信任等级对应一个信任值区间 $\Delta_{tv}^i = [tv_{-r_L}^i, tv_{-r_H}^i]$ 。在这里, 我们设置了 5 种信任等级, 分别是高信任、一般信任、不确定信任、缺失信任以及不信任。

可信 QoS 重路由请求描述为 $TR^2Q(v_s, v_d, AP_i, TL, ID)$ 。 $v_s, v_d \in V$, v_s 表示源节点, v_d 表示目的节点, AP_i 表示用户请求的应用类型, TL 表示用户需要的信任等级。 ID 表示会话编号, 各节点会根据 ID 号来判断是否为其发起重路由, 以保证重路由请求的唯一性。

2.4 用户满意度

用户满意程度的变化应该呈现类似“S 型”的趋势。当取值接近区间最高或最低时, 用户满意度变化不是很大。而当取值接近区间中部时, 用户满意度会有较明显的变化。

当路径提供的带宽为 bw_p 时, 带宽满意度函数 $Sat(bw_p)$ 的定义如下:

$$E_{bw_p} = \frac{\pi}{bw_{-r_H}^i - bw_{-r_L}^i} (bw_p - \frac{bw_{-r_H}^i + bw_{-r_L}^i}{2}) \quad (6)$$

$$Sat(bw_p) = \begin{cases} 0, & bw_p < bw_{-r_L}^i \\ \epsilon, & bw_p = bw_{-r_L}^i \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin E_{bw_p}, & bw_{-r_L}^i < bw_p \leq bw_{-r_H}^i \\ 1, & bw_p > bw_{-r_H}^i \end{cases} \quad (7)$$

其中, ϵ 是一个非常小的正数。由上式可以看出, 用户带宽满意度随着 bw_p 的增大而增大。在 bw_p 接近应用带宽需求值上限和下限位置时用户带宽满意度变化比较缓慢, 在中间值部分变化明显。

路径提供的信任值为 tv_p (取路径所经过链路综合信任值^[12]的最小值), 信任值满意度函数 $Sat(tv_p)$ 与带宽满意度

函数 $Sat(bw_p)$ 的计算方法类似,只需将式(8)、式(9)中的带宽值换成相应的信任值。

路径提供的延迟、延迟抖动和出错率分别为 dl_p 、 jt_p 和 ls_p ,延迟满意度函数 $Sat(dl_p)$ 、延迟抖动满意度函数 $Sat(jt_p)$ 以及出错率满意度函数 $Sat(ls_p)$ 的计算方法与带宽满意度函数 $Sat(bw_p)$ 类似,只是将式(8)、式(9)中的带宽值换成相应的延迟、延迟抖动和出错率值,并将式(9)中的“+”变为“-”。这说明 dl_p 、 jt_p 或 ls_p 越大,相应的满意度越小。

根据以上计算结果,可以得到用户对路径的 QoS 满意度 Q_{sat} 与综合满意度 I_{sat} ,定义如下:

$$Q_{sat} = w_1 Sat(bw) + w_2 Sat(dl) + w_3 Sat(jt) + w_4 Sat(ls) \quad (8)$$

$$I_{sat} = \alpha Q_{sat} + (1 - \alpha) Sat(tv_p) \quad (9)$$

其中, w_1 、 w_2 、 w_3 和 w_4 分别表示带宽、延迟、延迟抖动和出错率的相对重要性,且 $0 < w_1, w_2, w_3, w_4 < 1$ 、 $w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$ 。 α 为 QoS 满意度权重,通常取大于 0.5 小于 1 的值。

2.5 数学模型

本文目标是:当重路由触发时,为用户找到一条从 v_s 到 v_d 的重路由路径,使得在满足 QoS 约束的条件下,最大化 Q_{sat} 和 I_{sat} ,数学描述如下:

$$Q_{sat} \rightarrow \max\{Q_{sat}\} \quad (10)$$

$$I_{sat} \rightarrow \max\{I_{sat}\} \quad (11)$$

s. t.

$$bw_p = \min_{e_l \in P_{sd}} \{bw_{e_l}\} \geq bw_{r_H} \quad (12)$$

$$dl_p = \sum_{e_l \in P_{sd}} dl_{e_l} \leq dl_{r_H} \quad (13)$$

$$jt_p = \sum_{e_l \in P_{sd}} jt_{e_l} \leq jt_{r_H} \quad (14)$$

$$ls_p = 1 - \prod_{e_l \in P_{sd}} (1 - ls_{e_l}) \leq ls_{r_H} \quad (15)$$

其中, P_{sd} 表示从源节点 v_s 到目的节点 v_d 的路径, bw_{e_l} 、 dl_{e_l} 、 jt_{e_l} 和 ls_{e_l} 分别为链路 e_l 上的带宽、延迟、延迟抖动和出错率。

3 算法设计

本文提出了一种可信 QoS 重路由机制,它基于 k 跳回溯^[13] 寻找重路由路径。

3.1 设计思想

k 跳回溯重路由机制综合考虑用户的 QoS 需求、信任需求和重路由时间,并且充分利用原始路径连接进行重路由,基本思路是:当重路由触发时,在原始路径的失效节点或失效链路的前一节点先后以延迟、延迟抖动和出错率参数为链路权值,运行 Dijkstra 最短路算法。如果找到的路径满足用户 QoS 需求且路径信任值高于原始路径信任值,则将其作为最佳重路由路径输出。如果路径满足用户 QoS 需求但信任值等于原始路径,则将其作为候选路径。如果当前节点无法找到最佳路径,则沿原始路径向上回溯一个节点,直到找到最佳路径或已经回溯 k 跳。如果未找到最佳路径且已回溯 k 跳,则选择用户满意度最高的候选路径作为重路由路径。

3.2 路由选择

k 跳回溯 QoS 重路由算法的具体步骤:

Step 0 当重路由触发时,根据用户信任评估模型对用户身份进行评估,判断其是否可信。如果 $atv < atv_L$,即重路由请求不可信,不能为其重路由,则转 Step 1;否则,转 Step 10。

Step 1 将拓扑图中不满足应用带宽需求的链路进行标记,形成简化的网络拓扑图 $G(V', E')$,设置备选路径集为空。如果 $G(V', E')$ 不连通,则与用户协商是否可以降低带宽需求;如果可以,则重新生成 $G(V', E')$;否则,重路由失败,转 Step 10。

Step 2 确定回溯跳数 k ,令计数器 $cnt = 0$,将乘性 QoS 参数(出错率)转化为加性参数,减少计算量。在原始路径上取失效节点(或链路)的前一个节点 v_p 。

Step 3 $cnt = cnt + 1$,判断 cnt 是否大于 k 。如果是,转 Step 9;否则,以链路延迟为权值运行 Dijkstra 最短路径算法,找到一条以 v_p 为起点、 v_d 为终点的路径,将找到的路径 $Path(v_p \rightarrow v_d)$ 与原始路径中的 $Path(v_s \rightarrow v_p)$ 进行合并,构成新路径。

Step 4 检查以延迟为权值构成的新路径。

Step 4.1 判断新路径提供的延迟是否满足延迟需求。如果不满足,则丢弃该路径,转 Step 5。

Step 4.2 判断新路径是否满足用户 QoS 需求。如果不满足,则丢弃该路径,转 Step 5。

Step 4.3 比较新路径的信任值与原始路径的信任值。如果前者大于后者,则该条路径为最佳重路由路径,转 Step 10;如果相等,则将其加入到备选路径集合。

Step 5 以延迟抖动为链路权值运行 Dijkstra 算法,将找到的路径 $Path(v_p \rightarrow v_d)$ 与原始路径中的 $Path(v_s \rightarrow v_p)$ 进行合并,构成新路径。

Step 6 检查以延迟抖动为权值构成的新路径。

Step 6.1 判断新路径提供的延迟抖动是否满足延迟需求。如果不满足,则丢弃该路径,转 Step 7。

Step 6.2 判断新路径是否满足用户 QoS 需求。如果不满足,则丢弃该路径,转 Step 7。

Step 6.3 比较新路径的信任值与原始路径的信任值。如果前者大于后者,则该条路径为最佳重路由路径,转 Step 10;如果相等,则将其加入到备选路径集合。

Step 7 以出错率为权值运行 Dijkstra 算法,将找到的路径 $Path(v_p \rightarrow v_d)$ 与原始路径中的 $Path(v_s \rightarrow v_p)$ 进行合并,构成新路径。

Step 8 检查以出错率为权值构成的新路径。

Step 8.1 判断新路径提供的出错率是否满足出错率需求。如果不满足,则丢弃该路径,设置原始路径中 v_p 的前一跳节点等于 v_p ,即向上回溯一跳,转 Step 3。

Step 8.2 判断新路径是否满足用户 QoS 需求。如果不满足,则丢弃该路径,向上回溯一跳,转 Step 3。

Step 8.3 比较新路径的信任值与原始路径的信任值。如果前者大于后者,则该条路径为最佳重路由路径,转 Step 10;如果相等,则将其加入到备选路径集合,并向上回溯一跳,转 Step 3;否则,向上回溯一跳,转 Step 3。

Step 9 判断备选路径集合是否为空。如果为空,则重路由失败;否则,在备选路径集合中选出用户满意度(Q_{sat} 或 I_{sat})最高的路径作为重路由路径,若存在多条这样的路径,则随机选择其一作为重路由路径。

Step 10 算法结束。

4 仿真实验与性能评价

本文在 VC++ 平台上对所提出的重路由机制(简称 A

机制)进行了仿真实现,并将其与文献[8](简称B机制)和文献[9](简称C机制)中的重路由算法进行了性能对比分析。B机制以链路带宽和信任值的归一化结果之和作为链路权值,因为带宽是影响用户QoS体验的最主要因素。C机制中没有具体给出链路参数,将其设定为延迟抖动参数。本文设置了5种网络负载等级,网络负载等级越高,相应的网络负载越高,其QoS参数均为相对值。在等级1下,网络的QoS参数信息均用单位1表示。随着负载等级的递增,带宽值依次减少0.2,延迟和延迟抖动值依次增大0.5,出错率值依次增大0.1。图1—图6分别是重路由成功率、用户满意度、重路由时间和链路复用率在CERNET2(第二代中国教育和科研计算机网)、INTERNET2(美国下一代互联网)拓扑下的性能比较结果。经过验证,当回溯跳数为5时,算法在两种拓扑下的重路由成功率最大。为简便起见,这里设 $k=5$ 。

由图1、图2可知,随着网络负载等级的升高,3种机制的重路由成功率均下降。这是由于网络资源的减少会导致重路由由所选路径无法满足用户QoS需求,从而造成重路由失败。B机制属于完全重路由算法,所以重路由成功率最高。A机制对新路径的QoS参数逐个进行判断,并考虑到路径的可信性,所以新路径很容易满足用户需求,重路由成功率较高。C机制重路由成功率下降最快,这是因为偏转重路由算法仅仅在失效节点或链路的前一节点寻找到达目的节点的路径,并且没有考虑路径的可信性,重路由成功率最差。

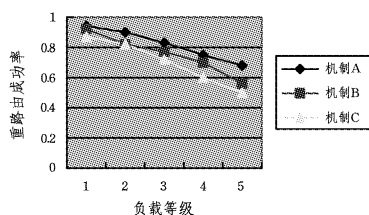


图1 CERNET2 拓扑下重路由成功率

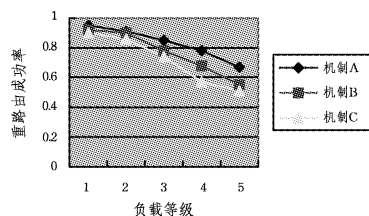


图2 INTERNET2 拓扑下重路由成功率

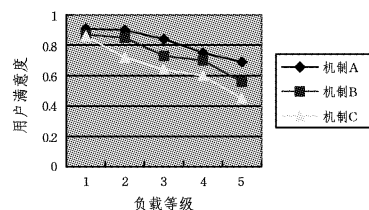


图3 CERNET2 拓扑下用户满意度

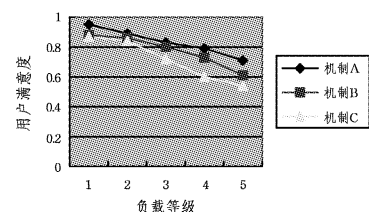


图4 INTERNET2 拓扑下用户满意度

由图3、图4可知,网络负载级别越高,3种重路由机制的用户满意度越低。在网络负载较低、资源较充足的时候,3种重路由机制都能够很容易找到用户满意度较高的重路由路径。而当网络负载升高时,A机制的满意度下降最慢。这是因为A机制能够根据某一QoS参数来选择最短路径,如果路径满足用户QoS需求,再判断该路径的信任值是否大于原始路径的信任值。而B机制和C机制只考虑了部分QoS参数,没有考虑路径的可信性,因此用户满意度较差。

当网络负载等级为3时,使用3种重路由机制在不同的网络拓扑下运行,取其平均运行时间,具体统计结果如图5所示。可以看出,A机制的重路由时间最短,这是因为A机制的本质是基于Dijkstra最短路径算法的扩展,在回溯过程中寻找部分路径,计算开销最低。B机制为完全重路由机制,需要寻找端到端的完整路径,所以重路由时间较长。而C机制需要建立SPT树,其计算开销相对于其他两种机制要高,因此C机制的重路由时间最长。

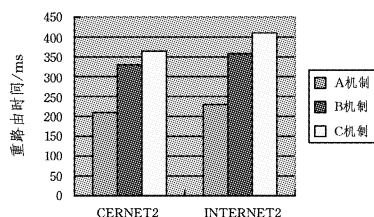


图5 两种拓扑下重路由的时间对比

当网络负载等级为3时,使用3种重路由机制在不同的网络拓扑下运行,图6为3种机制的链路复用率对比结果。可以得知,A机制尽量利用路径的原有链路进行回溯寻路,充分利用原路径的网络资源,相对于B机制有效地降低了网络开销。而C机制只在重路由失效节点或链路的前一节点进行找路,所以其链路复用率最大。

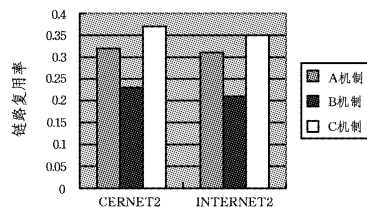


图6 两种拓扑下的链路复用率对比

结束语 本文综合考虑了用户QoS需求、可信需求和重路由时间等因素,设计了一种 k 跳回溯可信QoS重路由机制。仿真结果表明,本文机制同现有算法相比,在重路由成功率、用户满意度、重路由时间以及链路复用率上具有一定的优势。本文算法依次以延迟时间、延迟抖动、出错率为链路权值,在实际应用中应该对其进行综合考虑。因此,算法的实用化以及如何更好地均衡重路由由各项指标是今后研究的主要方向。

参考文献

- [1] Wang Fu-xiong, Xiao Zi-qian, Chen Jing-you. Research on Security of Trusted Network and Its Prospects [C]//2010 2nd International Workshop on Education Technology and Computer Science, Wuhan, China, 2010: 256-259

(下转第96页)

- [2] Viani F, Oliveri G, Donelli M, et al. WSN-based Solutions for Security and Surveillance[C]//Proceedings of the 3rd European Wireless Technology Conference, Piscataway, USA; IEEE, 2010; 285-288
- [3] Bhuvaneswari P T V, Vaidehi V, Karthik M. Dasarathy Model based Fusion Framework for Fire Detection Application in WSN [C]//Proceedings of 2nd International Conference on Networks and Communications. Heidelberg, Germany; Springer Verlag, 2010; 472-480
- [4] Feng Y B, Zhang R B. Fault Detection of WSN Based on Spatial Correlation[C]//Proceedings of International Conference on Information Technology for Manufacturing Systems. Clausthal-Zellerfeld, Germany; Trans Tech Publications, 2011; 1504-1510
- [5] Shen D D. Energy-saving Routing Algorithms with Optimization for Wireless Sensor Networks[D]. Hanzhou: Zhejiang University of Technology, 2009
- [6] Huang X, Tan L, Hu K. A Cooperative Game-based Clustering Algorithm in WSN[J]. Advances in Information Sciences and Service Sciences, 2012, 4(8): 147-154
- [7] Chatzigiannakis V, Papavassilion S. Diagnosing Anomalies and Identifying Faulty Nodes in Sensor Networks[J]. Sensor Journal, 2007, 7(5): 637-645
- [8] Gao J L, Xu Y J, Li X W. Online Distributed Fault Detection of Sensor Measurements[J]. Tsinghua Science and Technology, 2007, 12(1): 192-196
- [9] Chen J R, Kher S, Somani A. Distributed Fault Detection of Wireless Sensor Networks[C]//Proceedings of the Workshop on Dependability Issues in Wireless Ad Hoc Networks and Sensor Networks. New York, USA; ACM, 2006; 65-71
- [10] Ding M, Chen D C, Xing K, et al. Localized Fault-tolerant Event Boundary Detection in Sensor Networks[C]//Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. New York, USA; IEEE, 2005; 902-913
- [11] Zoumboulakis M, Roussos G. Complex Event Detection in Extremely Resource-constrained Wireless Sensor Networks[J]. Mobile Networks and Applications, 2011, 16(2): 194-213
- [12] Ngaopitakkul A, Pothisarn C. The Protection of Transmission Network Systems Using Discrete Wavelet Transforms[J]. International Journal of Innovative Computing Information and Control, 2012, 8(9): 6491-6502
- [13] Ohsaki M, Abe H, Yamaguchi T. Numerical Time-series Pattern Extraction based on Irregular Piecewise Aggregate Approximation and Gradient Specification[J]. New Generation Computing, 2007, 25(3): 213-222
- [14] Jiang Y L, Chen H B. Application of General Orthogonal Polynomials to Fast Simulation of Nonlinear Descriptor Systems Through Piecewise-linear Approximation [J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2012, 31(5): 804-808
- [15] Li H L, Guo C H. Symbolic Aggregate Approximation based on Shape Features[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2011, 24(5): 665-672
- [16] Zhang X P, Zhu X C, Ma C. Clustering Algorithm based on Boundary Identification[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(12): 1387-1390
- [17] Dai Dong-Bo, Xiong Yun, Zhu Yang-Yong. Efficient Algorithm for Sequence Similarity Search based on Reference Indexing[J]. Journal of Software, 2010, 21(4): 718-731
- [18] Xiang H M, He W S. Mining Wireless Sensor Network Data based on Vector Space Model[C]//Proceedings of International Conference on Computing, Information and Control. Heidelberg, Germany; Springer, 2011; 100-104

(上接第 81 页)

- [2] Wang Xing-wei, Cheng Hui, Huang Min. Multi-robot Navigation Based QoS Routing in Self-organizing Networks [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2013, 26(1): 262-272
- [3] Wang Xing-wei, Cheng Hui, Li Ke-qin, et al. A Cross-layer Optimization Based Integrated Routing and Grooming Algorithm for Green Multi-granularity Transport Networks [J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2013, 7(6): 807-822
- [4] Lee S S W, Tseng P-k, Li Kuang-yi, et al. Interface Specific Fast Failure Rerouting for Load Balanced IP Networks [C]//2011 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC). Kerkyra, 2011; 316-319
- [5] Metnani A, Jaumard B. Connection Rerouting in GRWA Networks [C]//2011 18th IEEE Workshop on Local & Metropolitan Area Networks (LANMAN). Chapel Hill, NC, 2011; 1-6
- [6] Xu Ming-wei, Yang Yuan, Li Qi. Selecting Shorter Alternate Paths for Tunnel-based IP Fast ReRoute in Linear Time [J]. Computer Networks, 2011, 56(2): 845-957
- [7] Amdouni N, Koubaa M, Aguilu T. Lightpath Rerouting Scheme for Dynamic Traffic in WDM All-Optical Networks [C]//2012 International Conference on Computer Systems and Industrial Informatics (ICCSII). Sharjah, 2012; 1-6
- [8] Ma Wen-chao, Fang Yu-guang. Dynamic hierarchical mobility management strategy for mobile IP networks [J]. IEEE Journal on Select Areas Commun, 2004, 22(4): 664-676
- [9] Li Xin, Qin Zhen, Yu Tao. Optimizing the QoS Performance of Fast Rerouting [C]//2009 Ninth International Conference on Hybrid Intelligent Systems. Shenyang, 2009; 313-318
- [10] Tian Li-qin, Lin Chuang, Ni Yang. Behavior Value Analysis and Application in Evaluating Network Entity Behavior Trust [C]//2010 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology (ICCET). Chengdu, 2010; 313-318
- [11] 王学军, 郭亚军. 基于 G1 法的判断矩阵的一致性分析[J]. 中国管理科学, 2006, 14(3): 65-70
- [12] 王兴伟, 王军伟, 黄敏. 基于狩猎搜索的可信 QoS 路由算法[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2012, 33(10): 1385-1389
- [13] 杜文峰, 贾维嘉, 王国军, 等. 基于 k 跳回溯机制的服务切换路由重建算法[J]. 小型微型计算机系统, 2006, 27(10): 1850-1855