

无线传感器网络中网络层 故障容错技术研究进展*

李洪兵^{1a,2}, 熊庆宇^{1b†}, 石为人^{1a}, 王小刚^{1a}, 何栋^{1a}, 李芮³

(1. 重庆大学 a. 自动化学院; b. 软件学院, 重庆 400030; 2. 重庆三峡学院 计算机科学与工程学院, 重庆 404100; 3. 重庆理工大学 电子信息与自动化学院, 重庆 400050)

摘要: 故障容错能提高无线传感器网络的稳定性和可靠性,是无线传感器网络的一项关键技术。网络层容错及跨层协同优化设计是网络故障容错的重要研究内容,主要对网络层容错技术研究进行了归纳和总结。网络层容错控制技术主要分为多路由传输、纠错编码/网络编码、数据重传机制、跨层协同优化与复合容错和仿生智能容错等,并对网络层容错控制技术研究趋势作了探讨。

关键词: 无线传感器网络; 故障容错; 多路径路由; 网络编码

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)07-1921-08

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.07.001

Survey on fault tolerant technology of network layer in wireless sensor networks

LI Hong-bing^{1a,2}, XIONG Qing-yu^{1b†}, SHI Wei-ren^{1a}, WANG Xiao-gang^{1a}, HE Dong^{1a}, LI Rui³

(1. a. School of Automation, b. School of Software Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. School of Computer Science & Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100, China; 3. School of Electronic Information & Automation, Chongqing University of Technology, Chongqing 400050, China)

Abstract: Fault tolerance can improve the stability and reliability of wireless sensor networks. It is a key technology in wireless sensor networks. Fault tolerance in network layer and collaborative optimization among the cross layers are the important research content of the network's fault tolerance. The work was mainly to summarize the research of fault tolerance in network layer. The fault-tolerant technologies in network layer mainly included multipath routing transmission mechanism, erasure encoding/network coding mechanism, retransmission mechanism, collaborative optimization among the cross layers, bionic intelligent fault tolerance and so on. In the end, this paper discussed the research trends of the fault tolerance in network layer.

Key words: wireless sensor networks(WSN); fault tolerance; multi-path routing; network coding

0 引言

无线传感器网络具有无中心自组网、网络拓扑动态变化、应用相关性、计算传输资源受限和能量约束等特性^[1],其工作环境存在不可预测性,诸如振动、电磁、系统噪声和随机噪声等干扰因素,容易使网络出现射频冲突、时钟异步、电池耗尽、信号丢失和软件错误等故障,导致节点失效、读数异常和传输中断或丢包等。影响无线传感器网络数据接收率、传输准确率和传输平均时延等关键性技术指标,降低无线传感器网络稳定性、准确性和可靠性,削弱网络预定功能,对现有的网络技术带来更大的挑战^[2,3]。尤其是应用在环境较复杂、对网络性能要求苛刻的领域,如关键设施运行状态监控、有毒有害气体监测

与抢险救灾等^[4,5]。

无线传感器网络健康状态对于网络的稳定运行和性能优化非常重要,对提高无线传感器网络运行的可靠性和鲁棒性具有非常重要的意义。良好的无线传感器网络应具有故障特征的完整性、故障诊断准确性和故障恢复快速性。在能量消耗的节约性、抵御入侵的抗毁性、节点互连的鲁棒性和信息传输的正确性等方面应有较好的表现^[6]。能在网络出现故障时及时作出诊断,寻找合理的容错控制方案,自适应地处理网络故障,继续提供高可信的计算服务。故障容错能提高无线传感器网络的可靠性与稳定性,是网络应用面临的一个共性的关键性技术问题。故障容错技术研究已引起学者们极大关注,是无线传感器网络领域的研究热点^[2]。

收稿日期: 2012-12-08; **修回日期:** 2013-01-21 **基金项目:** 国家科技重大专项资助项目(2009ZX07528-003-09);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100191110037);重庆市科技攻关项目(CSCT,2010AA2036,CSTC2012GG-YYJS40008);重庆万州区科技计划资助项目([2010]23号,201203037);重庆三峡学院科技资助项目([2011]52号);重庆三峡学院青年资助项目(12QN14);重庆市教委科技项目(KJ131117)

作者简介: 李洪兵(1981-),男,重庆人,博士研究生,主要研究方向为智能信息处理、无线传感器网络故障诊断等方面的理论与应用;熊庆宇(1965-),男(通信作者),四川人,教授,博导,主要研究方向为智能感知与智能计算、普适计算与嵌入式系统等(xiong03@hotmail.com);石为人(1948-),男,四川人,教授,博导,主要研究方向为智能感知、控制与决策等;王小刚(1984-),男,陕西宝鸡人,博士研究生,主要研究方向为无线传感器网络理论与应用;何栋(1987-),男,四川平昌人,博士研究生,主要研究方向为无线传感器网络理论与应用;李芮(1988-),女,湖北荆门人,硕士,主要研究方向为无线传感器网络理论与应用。

无线传感器网络故障容错是一个复杂的系统问题,主要包括网络各层容错协议设计与多层联合优化控制等研究内容^[7-9]。网络层容错及跨层协同优化设计是网络故障容错的重要研究方向^[5]。网络层路由故障容错主要是通过多路由传输容错技术、网络编码数据冗余传输、网络层与其他层协同优化控制和引入仿生智能算法等方式实现。本文主要从网络层容错技术角度对网络层容错研究进行了归纳和总结,并对网络层容错控制技术研究趋势作了探讨。

1 网络故障容错概述

1.1 故障容错必要性

无线传感器网络具有部分与传统无线网络相同的故障特征,如链路故障和信息堵塞等,但也存在着节点故障等自身独特的故障特征。因此,除了部分分布式系统已成为标准的SNMP和TCP/IP等故障诊断技术外,必须有适合于无线传感器网络的有效故障容错技术^[2]。

a)无线传感器网络自身独特性质,如无中心自组网、应用相关性、计算传输资源受限和能量约束等特性。传统的网络协议并不关心能量消耗和计算复杂度等问题,因为有线网络或无线Ad hoc网络等都能得到持续供电,且具有较大的计算资源。传统的用于有线或无线网络的部分故障容错方法已不能应用到无线传感器网络中。

b)传统网络主要关心的是点对点传输的可靠性,而无线传感器网络主要是关注事件本身的检测与感知。无线传感器网络的节点故障率要远高于有线网络,因此必须以较少的计算开支对节点的健康状态进行监测。

c)因为节点能量耗尽或外部事件,无线传感器网络节点易发生故障。节点或因为振动、电磁、系统噪声和随机噪声等环境因素干扰导致错误感知数据。因为网络拓扑动态变化或节点的移动超出了通信的范围,网络链路质量变差,或因物体阻挡等出现暂时或永久的故障,导致数据传输的失败。

d)有线网络为避免数据碰撞和信道错误等问题,主要是在MAC层用于物理载波侦听和虚拟载波方式进行。而在无线传感器网络中,MAC层也主要是运用睡眠和唤醒等方式避免数据碰撞,但也只能缓和而不能完全解决信道干扰和数据碰撞等故障问题。信道干扰、数据碰撞或传输堵塞等都会导致数据包的丢失。因此设计故障容错协议,以提高网络可靠性和稳定性,降低能量消耗,提高能量利用效率,显得非常必要^[2]。

1.2 网络故障容错控制分类

无线传感器网络故障容错的研究内容主要是网络各层协议及算法的优化、多层间的联合优化控制和系统硬件容错等。根据网络各层容错技术进行分类,物理层容错技术主要是硬件冗余容错、各模块功能自检及参数自适应调整^[7,10];链路层容错技术主要包含容错覆盖、容错拓扑结构与容错拓扑控制和编码容错等^[9,11,12];网络层主要探索具有容错能力的路由算法和容错编码技术等^[5,13];传输层建立故障检测、隔离与恢复机制;应用层利用数据融合模型等进行数据检测与容错^[14,15]。跨层协同优化是网络故障容错设计的一个很重要的方面。

根据无线传感器网络各层次的故障解决方法,借用传统分布式系统的不同故障容错的分类方法,分为故障预防、故障检测、故障孤立、故障诊断和故障恢复五个方面^[2]。故障预防就

是避免或阻止故障事件的发生;故障检测是利用不同的方法采集可能故障事件的特征;故障孤立是关联网络中收集到的各种故障预警信息,并提出各种故障假设;故障诊断就是对各种假设进行论证以获得精确的位置信息并进行故障诊断;故障恢复是对故障进行处理。无线传感器网络故障容错控制技术就是对这些容错方面进行组合实现。

根据故障检测与容错的管理模式和结构,可分为集中式、分布式和分层式故障检测与容错模式^[16]。集中式故障检测与容错由一个中心节点或基站负责收集并更新网络内所有节点状态信息,并根据节点目前状态与历史信息集中式比较进行判断和容错。分布式故障检测与容错是将网络分簇成一定数量的子区域,每个子区域进行分布式的故障检测与容错,而基站只负责少量节点状态信息的检测。分层式故障检测与容错综合了分布式和集中式检测与容错模型,子区域簇头节点负责簇内节点信息融合,并将各子区域的融合信息传输到基站节点再进行决策信息融合,从而实现分层式的网络故障检测与容错。

2 网络层容错控制技术

2.1 主要容错控制技术

网络层故障容错主要是通过多路径路由数据传输、纠错编码/网络编码、数据重传机制、跨层协同优化与复合容错和仿生智能容错等方式实现。

a)多路径路由^[17-31]传输容错技术是当源节点在确认存在路由故障时,在源节点与目的节点间建立多条传输路径进行数据传输,通过冗余路由实现故障容错。多路径路由是通过重新建立路径或在事先建立好的多路径路由表中选择激活等方式实现。虽增加了路由建立的复杂度,但改进了网络负载均衡和传输带宽,提高了数据传输的稳定性和可靠性。

b)纠错编码/网络编码传输方式^[5,32-42]是对原始数据包分片编码后进行多路径传输,在目的节点对一定数量的编码数据包解码重组成源数据包,通过冗余编码数据包实现故障容错。编码传输方式提高了数据传输稳定性和负载均衡等,但同时增加了冗余数据片的网络传输能耗。

c)数据重传^[43]是当目的节点没有收到源数据或源节点没有目的节点的确认信息时,在多条路由中选取最小跳数或最小能耗的路径进行数据重传。虽增加了网络传输延迟与能耗,但有助于提高数据传输成功率。

d)跨层协同优化与复合容错是指网络层协同其他层容错控制技术,跨层优化实现故障容错,或对多种容错方法进行组合以取得更好的容错效果^[5,44,45]。

e)仿生智能容错是在网络层路由的建立和网络编码技术中引入仿生智能计算,包括蚁群算法、粒子群算法和免疫系统的基本原理等,实现并优化网络层故障容错^[37,46-49]。

2.2 多路径路由容错技术

2.2.1 多路径传输容错机制分类

在源节点和sink节点之间建立多条传输路径,通过建立冗余路由机制实现网络层传输容错,虽增加了建立路由的能耗和复杂度,但改进了网络负载均衡和传输带宽,提高了数据传输的稳定性和可靠性。这是在网络层实现故障容错的一种较普遍方法,其多路径传输容错机制如图1所示。

多路径路由容错技术可分为如下几类:

a) 根据多路径是否交叉,可分为互不交叉多路径传输机制 DM (disjoint multipath) 和部分交叉多路径传输机制 BM (braided multipath) [19]。DM 为所建立的主路径和备选路径互不交叉的多路由机制,所建立的每一条传输路径互不交叉。任何一个节点或链路故障都不影响其他传输路径, k 条互不连接的多路径可以容许 $k-1$ 条路径故障。BM 是存在部分路径交叉的多路由机制,其主路径比备选路径在数据传输能耗和传输延迟方面更优,但 BM 的备选路径总体上在时间延迟和能耗等方面比 DM 较优。

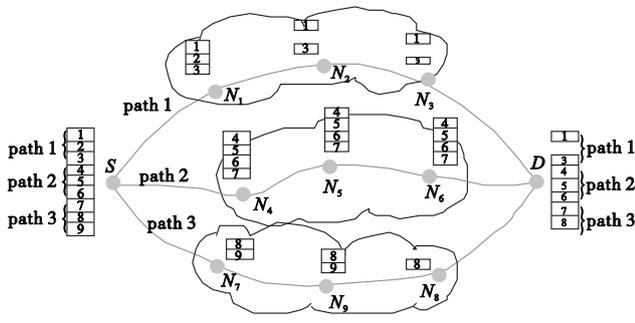


图1 多路径传输容错机制

- b) 根据是否同时使用多路径传输,可分为在建立的多路径中只使用一条路径进行传输和同时使用多条路径进行传输。
- c) 根据建立备份路径的起始位置,可分为在故障节点的上一节点处重新寻找下一跳节点并建立到目的节点的路由,在故障节点的前后邻居节点间建立备份路径对故障节点进行隔离,在源节点和目的节点间重新建立一条传输路径。
- d) 根据建立多路径的时间,可分为在事先建立好的多条路径路由表中选择激活所需路由和在出现故障节点时临时建立传输路由两种方式。

多路径传输容错机制分类如表 1 所示。

表 1 多路径传输容错机制分类

分类依据	多路径或备份路径建立模式	
多路径是否交叉	DM	BM
同时使用路径数量	一条	两条及以上
路径起始位置	故障节点前后跳节点间	源节点与目的节点间或故障节点的前一跳节点与目的节点间
建立时间	事先建立好,需要时选择激活	临时建立

2.2.2 多路径传输容错算法

安全多路径高可靠性入侵故障容错机制 SMRP (sub-branch multi-path routing protocol) [17] 是针对节点故障和入侵攻击影响网络可信度,基于 DM 模式的多路由机制优化。其核心是基于多路径高效轻量的安全机制 SEIF (secure and efficient intrusion-fault tolerant protocol),通过分布式网内认证机制而不需要基站作为参考信息,通过建立的多路径选择机制来提高数据传输容错性和节约节点能量。

自适应选择可靠路径进行传输的路由算法 SRP (self-selecting reliable path routing) [18],包括 SSR (self-selecting routing) 和 SHR (self-healing routing) 两部分。自适应路由选择 SSR 协议利用广播通信的优势和优先回退传输延迟机制选择前行传输的下一跳节点。自适应路由由修复机制 SHR 是在 SSR 基础上增加了路由修复阶段,当数据包前行传输过程中面临的下一跳节点发生故障时,能回退到源节点并从众多传输路径中另外选择一条路径到达目标节点。SRP 的特点是保持了动态路由选择,

当没有传输故障发生时选择既定的能成功传输数据到目的节点的路径进行数据传输,这些路径是最短最优没有故障的传输路由。通过与 AODV 和 GRAB 进行比较分析,在数据传输丢包率和建立新路由能耗等方面具有良好的性能。

REAR (reliable energy aware routing) 协议中 [20],当 sink 节点接收到从源节点传来的 interest 消息并不在其路由表时,sink 节点建立两条互不相连的路径,其中一条用来传输数据,第二条作为主路径的备份路径。其容错性体现在:当其中一条路径发生故障时,中间节点将所传送的数据包回传至源节点并发送一个错误报告给 sink 节点,故障路径信息就在源节点和 sink 节点路由表里删除。当需要重新建立服务路径时,就切换到新建的数据传输路径上。REAR 的核心思想是在源节点和目的节点之间为主路径建立一条备份路径以提高网络传输稳定性,降低能耗和减少存储空间。

Ganesan 等人 [21] 提出的高效多路径弹性路由机制是基于 DD 路由协议的 BM 多路径路由模式,能建立几条部分不交叉的传输路径,以保持多路径机制的低能耗性和路由故障的快速恢复性。它的容错特性在于在源节点和 sink 节点间建立了多条传输路径,主路径被用来传输数据,通过 sink 节点连续发送的 keep-alive 信息包保持备选路径处于激活状态,以便在主路径发生故障时能迅速激活备份路径并重新传输丢失的数据。按需多路径可靠容错路由 RFTM (reliable fault tolerant multipath) [22] 根据网络可靠性需求和链路质量期望,建立可满足不同需求的互不交叉的多路径,运用编码方式进行数据传输; sink 节点根据节点可用资源、跳数和时延等作出智能决策,以满足网络状态和不同应用需求。

能量高效多路径容错路由协议 MFTR [23] 是运用多路径路由进行故障容错和流量控制,一条最短的路径作为主数据传输路径,并建立其他两条备份路径预防网络故障并处理主路径过载的传输流量。IFRP [24] 根据能量效率同时运用单路径与多路径传输机制,通过本地监测和中心决策机制监测并孤立入侵节点或故障节点。当监测到网络面临恶意情况时,将从单路径切换到多路径模式提高网络的可靠性与灵活性。故障容错实时路由协议 FT-SPEED [25] 使用空隙通知和空隙避让机制,使要传输的数据包沿“空洞”两边的路径同时传输,以保证数据有效传输到目的节点,避开传输路径的空洞问题。

ENFAT-AODV 协议 (enhanced fault-tolerant AODV routing protocol) [26] 是将 Ad hoc 网络中的按需距离矢量路由 (AODV) 应用到无线传感器网络中,为网络主传输路径中的每个节点都建立了备份路径。当主路径中的节点发生故障时立即启用备份路径生成主传输路径进行下一个数据包的传输,以减少数据丢包率和保持数据传输连续性。

高效多路径容错路由 EEFTM [27] 提出了节点的可靠度 (RR) 是节点正确传输数据到目的节点的概率。EEFTM 正是通过基于节点可靠度的各路径平均可靠度 (ARR) 来选择可靠路由。当网络中存在链路质量差或路由故障时,从可选择的多路径中选择具有最高 ARR 值的链路作为传输路由,从而实现传输可靠性和故障容错性。

DD (directed diffusion) 路由协议 [28] 通过网络洪泛并加强所需要建立的路由。在 DSR (dynamic source routing) [29] 中,当源节点要发送数据到目的节点时,感知事件源节点负责进行所有路由的决策。DVR (distance vector routing) [30] 利用轻量级洪

泛法建立路径。与 DSR 略有不同的是,它是在源节点和目的节点之间需要传输数据时才建立路径,而并非一开始就建立传输路径,不用发现或建立不需要的路径以节约能量。Gregoire 等人^[31]提出通过射频信道监听确诊故障节点。当网络中存在

故障节点时,通过在故障节点处选择另一个不同的节点重新建立路由,而并非在网络中重新建立一条从源节点到目的节点的备份路由,多路径路由传输容错算法对比分析如表 2 所示。此方法能提高数据传输率并降低建立路由能耗。

表 2 多路径路由传输容错算法对比分析

名称	拓扑结构	多路径建立模式	核心容错方法	容错效果与稳定性	能效性	其他
SMRP	平面树状结构	DM	节点不相交和分支不相交	高于 HSPREAD	高	结合安全机制 SEIF,分布式无须参考基站
SRP	平面结构	BM	SSR 和 SHR	高于 AODV 和 GRAB	高于 AODV 和 GRAB	动态路由选择机制
RFTM	平面结构	DM	flooding	较高	一般	结合编码方式,无须重传
MFTR	簇式结构	BM	阈值判定	一般	视故障节点数	一条主路径和两条备份路径
IFRP	平面树状结构	BM	本地监测和中心决策机制	高于 SeRINS	高于 SeRINS	实现单路径与多路径传输切换机制,密钥认证
ENFAT-AODV	平面 Mesh 网络	BM	AODV	高于 AODV	高于 AODV	为每个节点都建立了备份路径
EEFTM	分簇结构	DM	AOMDV 协议	高于 AOMDV	高于 AOMDV	节点可靠度与各路径平均可靠度
DD	平面 Mesh 结构	BM	flooding	高于 flooding	高于 flooding	有向多路径传输
DVR	平面结构	DM	light flooding, AODV	高于 AODV	高于 AODV	源节点和目的节点之间需要传输数据时才建立路径

2.3 纠删编码与网络编码容错技术

2.3.1 纠删编码冗余容错原理

网络层数据冗余传输机制是将原始数据包分片进行编码,将源数据包的多个编码数据片通过不同的路径进行传输。若网络发生节点或路径故障,可通过其他路径的编码数据片在目的节点处进行解码重组成源数据包。通过源数据包的编码数据片进行多路径传输,增加了一定的开销,但提高了故障容错性和数据传输准确率^[32-42]。

纠删码是数据冗余传输方式中较为广泛运用的一种编码方式^[5]。源节点将大小为 bM Byte 的数据包分解成大小为 b Byte 的 M 个数据片,将此 M 个数据片进行编码,生成 $N+R$ 个编码数据片在网络中沿源节点到目的节点的 x_1 到 x_n 这 n 条路径进行传输,有 $\sum_{i=1}^n x_i = N+R$ 。目的节点将接收到 N' ($N \leq N' \leq N+R$) 个编码数据片。根据解码规则,目的节点至少接收到 N 个编码数据片才能重组成 M 个源数据,允许丢失最多 R 个数据片。如果随机变量 Z_i 是路径 x_i 上接收到的数据片量,则有 $\sum_{i=1}^n Z_i \geq N$ 。数据编码冗余度以 R 表示。当 R 大于数据传输丢失率时,通过冗余数据传输就能在目的节点获得源节点的数据包。众多纠删编码方式中最具有代表性的就是 Reed-Solomon (RS) 编码和可变速率编码 rateless code。其容错编码机制如图 2 所示。

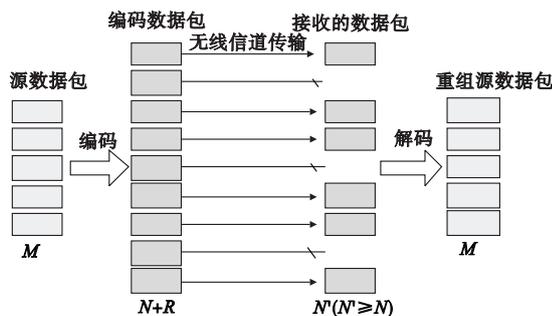


图 2 纠删编码容错机制

2.3.2 基于纠删编码的传输容错算法

ReInForm (reliable information forwarding)^[5,39] 机制是根据源节点的可靠度期望和包含了网络可靠性与跳数等信息的 DSP (dynamic packet state) 数据包,将感知数据的多个副本通过多条路径传输到 sink 节点。ReInForm 的容错性在于将同一

份数据的多个副本沿着随机选择的多条路径进行传输。数据的复制不仅在源节点,同时也在每个中间节点。每个中间节点利用 DSP 数据包的信息,决定分解成多少份副本以及决定数据传输的下一个节点,直到数据传输到 sink 节点。ReInForm 机制有较高的数据传输率,即使在传输过程中有一些数据丢失,也能通过其他数据包副本进行恢复。ReInForm 协议代价较大,但在每个节点处不需要较大的存储空间。

Petar 建立网络故障容错模型,确定多路径传输模式下数据传输的成功率和能耗有效性等。根据数据传输丢包率和能耗信息等确定每条路径的质量与生存期,并确定传输数据片量的大小,以提高网络容错性和延长网络生存期^[32]。运用多路径按需路由 (multipath on demand routing, MDR) 和解码 Reed-Solomon 方式进行数据可靠性传输^[33]。当源节点有数据发送时,通过包含有源节点、sink 节点和请求节点 ID 的信息包,在网内以洪泛方式开始路由请求。源节点将收到所有返回的路由信息并储存邻居节点 ID 和路径长度值等;源节点根据路径数、路径长度和最大故障概率等对数据包进行分割。这种机制下数据包是在源节点进行编码,并非 ReInForm 在每个节点处都对数据进行复制。

编码算法^[34] 能根据路由协议反馈信息动态地配置,在路由建立和数据传输中通过纠删编码减小运算量和存储空间。在源节点处运用纠删编码将源数据分成数据片并建立索引,将 ARQ (auto repeat request) 信息包传递到 sink 节点。Sink 节点接收到这个信息包时就能识别数据片丢失并确认相应链路故障,然后 sink 节点选择沿良好的链路发送包含有故障路径和丢失数据包信息的 ARQ-1 到源节点;当源节点接收到 ARQ-1 数据包时标注故障路径并重传丢失的数据包。如果 sink 节点仍没有收到需要的数据,则启动发送 ARQ-2 信息包。从接收到的数据包可以估计网络状态,如果数据丢包率较高,sink 节点则发送 DAQ (dynamic adjust request) 信息调整编码率以增加数据包的冗余度。这种协议避免了下一数据包因故障路径进行重传。在不交叉多路径路由中进行测试表明,在有路径故障信息的先验知识条件下,其具有较低的数据丢包率。

2.3.3 网络编码容错原理

网络编码 (network coding)^[50] 融合了编码和路由的功能,网络节点不仅参与数据转发,还参与数据编码处理,通过对来

自不同链路的信息进行编码组合,即使网络部分节点或链路失效,最终在目的节点仍然能恢复出原始数据,增强了网络数据传输稳定性,提高了网络容错性与鲁棒性,扩展了传感器网络容错技术的适用范围。

网络编码有别于纠删编码冗余传输容错技术。纠删编码冗余传输容错技术只在源节点处对数据进行编码,在目的节点对其接收到的编码数据片进行解码重组成源数据包,而网络中的中继节点只对分组进行存储转发而不对数据进行处理。网络编码方式中的中继节点不仅对接收到的数据片进行编码处理,还须进行路由转发。网络编码基本原理如图3所示。

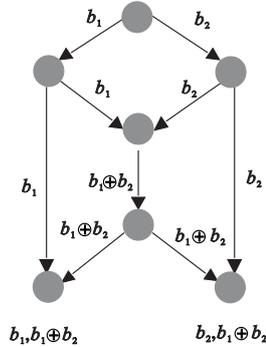


图3 网络编码

网络编码技术是近年来通信领域的重大突破,以数据为中心和无线传输的无线传感器网络将是网络编码技术可应用的领域,将网络编码技术应用到无线传感器网络故障容错以提高网络传输可靠性和稳定性等还处于起步阶段^[51]。

2.3.4 基于网络编码传输容错算法

Ho 等人^[52]提出了一种随机网络编码算法。除目的节点外的其余节点独立选择在有限域上的随机线性映射,将映射作用于输入数据流得到输出数据。接收节点只需知道各个编码节点进行线性运算的系数即可解码出原始数据,其系数可随同网络数据包一起传送。通过仿真比较分析表明,分布式随机网络编码方法在组播吞吐量和鲁棒性方面要明显优于基于路由的算法。

结合分布式源编码和网络编码的优化算法中,Zhang 等人^[53]提出了节能和鲁棒性的量化模型及动态调整的链式编码结构,对分布式源编码的压缩效率和网络鲁棒性进行了折中考虑,以提高无线传感器网络的容错性和可靠性。Dimakis 等人^[54]提出了一种数据聚合算法,每个单独的节点只保存一个数据包,当监听到邻居节点的数据包时,就在有限域上乘上一个随机系数并与自身数据相加。网络的 sink 节点能以较高的概率通过查询仅 n 个节点就能重建 n 个数据包,极大地提高了传感器网络数据聚合效率。

文献[55,56]中将编码算法和多路由技术相结合,将信息从源节点传输到目的节点。文献[55]中提出的算法思想是通过多路径路由传输已编码的数据片,sink 节点将接收到的编码数据片进行解码。在源节点传送数据之前须知道传输路径数。此算法结合网络编码减少传输路径数来减少能耗,并保证相同的可靠度,但算法难以获得较为精确的路径数。NC-EERMR (energy efficient reliable multipath routing using network coding) 路由协议^[56]通过多跳的方式建立多路径路由,每个节点只须建立并维持本地节点到下一跳节点之间的路径,无须建立源节点到目的节点之间的路径。此协议能减少所需传输路径数和

传输数据,并能降低能耗。

文献[57]中提出的网络编码算法主要关注簇内信息交换问题。算法基本思想是:簇头节点对两个簇节点广播的两个数据进行异或编码后再广播此编码数据,这种方式减少了传输数据量,并能降低能耗。Li 等人^[58]提出了一种自适应网络编码算法,提出解析模型来估计数据传输的冗余度,并基于簇结构和分布式机制动态地调整在每跳节点的冗余度,但此算法并不适合于广播场景。Hou 等人^[59]提出的可靠数据传输协议 AdapCode,根据链路质量动态调整编码机制,通过自适应网络编码减小编码更新过程中的广播信息流。此算法的编码机制是靠节点密度和网络稳定性来决定,而网络稳定性往往难以精确获取。

2.4 数据重传机制

数据重传^[43]是链路层实现传输容错的方法,将其应用到网络层传输容错中能提高数据传输成功率。当目的节点没有接收到源数据包或源节点没有接收到目的节点的确认信息时,在多条路由中选取最小跳数或最小能耗的路径进行数据重传;当源节点接收到目的节点传回的确认信息时表示源数据传输成功。虽增加了网络传输延迟,更多数据包的丢失需要更多的数据存储空间,但提高了数据传输的成功率,具有重要意义。

具有数据重传机制的无线传感器网络路由协议较多。DD 协议^[28]被认为是经典的具有数据重传机制的协议,通过 sink 节点发布 interest 信息包到网络各节点并周期性更新;接收到 interest 信息包的节点以洪泛方式将数据传送到邻居节点,以确保所有的节点都能收到这个数据。每个节点都产生一个包括数据传输率和传输方向的梯度值。当节点检测到的数据与其缓存作比较判断,并周期性地以较低速率广播数据。当 sink 接收到多路传来的数据时,通常在具有最低时延的路径上广播加强信息以提高 interest 数据传输率。DD 协议的容错之处在于,当 sink 节点没有接收到任何数据,确认所建立的路径发生故障,则重新发送 reinforcement 信息,利用另一条路径来重新传输丢失的数据。

2.5 跨层协同优化与复合容错

跨层协同优化是指网络层协同其他层的容错控制技术。跨层优化实现故障容错,如结合网络拓扑结构和容错覆盖,或结合应用层的数据融合机制等。复合容错是指对多种容错方法进行组合以取得更好的容错效果,如网络编码与多路由技术相结合、多路由传输与负载均衡机制相结合等。

Boukerche 等人^[44]提出了周期的基于事件驱动和问询机制的协议 PEQ 及基于簇结构的改进机制 CPEQ。PEQ 建立具有跳数值的树结构,通过跳数值建立节点到 sink 点的最短传输路径,沿着最短路径的反方向传输 sink 节点的兴趣消息;建立了基于回答确认的故障修复机制能发现故障节点,并重新选择一个跳数值较小的节点为前向节点建立一条新的路径。这对于事件驱动的网络具有较小时间延迟、快速的故障路径重新配置和事件数据传输的高可靠性。PEQ 是基于分簇模式的 PEQ 协议的改进,具有较高的数据传输率和数据传输平均时延,性能总体优于 DD 协议。两种算法具有故障容错性和数据传输低延迟率,能很好地满足于条件苛刻的上下文物理信息的感知。

运用纠删编码方式和基于时间多项式算法建立多路径的

传输方式^[60],降低数据丢失率(PPL)和提高网络传输可靠性。在源节点运用 FEC(forward error correction)对每个源数据包编码成多份编码数据片,并沿多条互补交叉的路径传输到目的节点。源节点应用负载均衡算法确定在每一条路径上分配多少数据片进行传输。在目的节点将接收到与源数据片数量相等或更多的编码数据片进行解码重构,以减小数据丢失率,达到更高的传输可靠性。

Kim 等人^[61]研究了影响无线传感器网络可靠性的因素,对多种容错方法进行优化组合以提高网络容错性,包括链路层重传机制,纠错编码如线性编码、范德蒙式矩阵编码和 Reed-Solomon 编码等。通过寻找故障节点的可替代下一跳节点进行数据传输,能减少数据包的丢失。实验结果表明每一种方法能解决不同的故障类型,通过对这些方法的合理组合,能较大幅度地提高网络可靠性和容错性,降低数据丢包率和网络开销,使链路故障快速恢复。

文献[32,62]中采取了类似于 TinyDB 结构的网络系统,利用一部分节点与 sink 节点建立的高稳定性和高带宽的链路进行数据传输;当节点需要特定的信息时,在网络中泛洪发送请求信息。当请求信息经历网络节点时,记录下路径并包括每一跳的可靠度和能量信息。源节点利用请求数据包携带的丢包率和能量信息选择路径进行数据传输,结果显示在增加数据片数量的情况下,网络能耗与传输效率也随之下降。这是一个利用了链路层信息来进行路由决策的跨层设计。

在网络存在多个节点故障的情况下,运用改进路由协议 BVR(beacon vector routing)^[63]在 mesh、torus、FCR 和 communication graph 等不同的拓扑结构上,根据网络吞吐率、传输时延、计算开销和数据准确率等指标开展容错性能比较。

2.6 网络层引入仿生智能容错机理

基于仿生学原理与现代智能仿生算法的无线传感器网络故障检测与容错是新的研究热点^[37,46-49]。无线传感器网络层引入仿生学原理或仿生智能处理方法能较好地提高其容错性,这包括生物免疫系统机理、模糊诊断、专家系统、人工神经网络、粒子群算法、蚁群算法和遗传免疫算法等,对无线传感器网络的故障检测与容错提供了较好的思路和方法,已显示出了较好的容错效果。

已有学者将仿生学理论和现代智能仿生算法应用到无线传感器网络故障检测与容错研究中,如将蚁群算法的群智能优势引入到网络层多路由的构建中,粒子群算法能够利用其快速的聚类收敛特性在拓扑结构构建中提高网络分簇效率,人工神经网络或结合模糊算法等,在应用层或网络层可对感知数据单元进行预测与容错,遗传算法可应用到网络链路层或网络层对其数据单元进行编码传输,提高数据容错性等。

将生物免疫系统机理引入到无线传感器网络故障检测与容错中,已初显良好的容错效果和优势。国外已有学者在这方面做了前期基础性的研究工作^[37,46-49]。Bokareva 等人^[35]提出了一种基于生物免疫机制的无线传感器网络容错结构 SASHA,将淋巴结机制用于产生胸腺机制检测器对故障进行检测,完成对故障的确诊。此结构不但能识别已知故障,对未知故障具有良好的自适应学习和进化能力。Jabbari 等人模拟生物免疫系统或神经免疫系统的自学习、自组织、记忆和信息处理等机理,利用免疫理论中的克隆选择、亲和力和免疫网络理论等构建网络模型,开展无线传感器网络安全检测、系统协调

和故障容错研究^[36,37,64,65]。

3 网络层容错研究发展趋势

无线传感器网络作为物联网推广的重要载体、未来延伸 Internet 覆盖范围和实现普适计算的一项关键技术,必将在国民经济和社会发展各个领域显示出巨大的价值。将无线传感器网络应用到火灾预警、安全检测、健康监护和关键设备状态监测等领域,必将对网络的可靠性和稳定性等提出较高的要求,这为无线传感器网络故障检测与容错技术带来了较大的挑战。针对网络层容错技术是无线传感器网络容错的一项非常重要的研究内容,本文重点对网络层的容错控制技术进行了总结。网络层容错控制技术仍是无线传感器网络容错研究的重点,其研究内容和发展趋势主要包括如下几个方面:

a) 多路径路由传输协议的优化。多路径路由传输机制仍将是无线传感器网络路由传输故障容错的主要研究内容。针对不同的网络特点和应用要求,建立合适的多路径路由传输机制,并充分考虑到多路径路由建立计算复杂度、能效性和时间延迟等关键指标。在多路径路由建立的方法上探讨更有效的建立方式,如引入仿生智能算法等。目前多路径路由较多考虑的是单源节点单目的节点或多源节点单目的节点的情况,根据不同的网络应用需求,将多路径路由传输机制延伸到多源节点多目的节点情况下开展故障容错研究。

b) 将网络层的多种容错机制与方法进行有效组合,包括多路径路由传输与编码机制、数据重传机制或负载均衡机制相结合等。探索多路径路由建立方式与多种编解码方式相结合,根据网络及节点能耗、开销、时延和带宽利用情况,将编码数据片通过负载均衡规则优化分配到多路径上传输,以实现负载均衡,减少传输时延,提高数据传输有效性和准确率。将网络编码与多路由传输相结合实现容错,优化网络编码技术,降低计算复杂度,解决网络编码与时间同步的问题,或结合安全性考虑容错等。

c) 网络层与其他层联合控制优化。网络层多路径路由机制与网络拓扑结构设计相结合,如考虑是在平面结构上、簇层次结构上,还是在树一簇拓扑结构上建立多路径路由传输机制。网络层多路径路由机制与节点代理、移动节点管理策略、节点覆盖性与连通性策略相结合,开展网络容错控制技术研究。现有网络节点更多的是考虑节点位置固定没有移动的情况,当节点因移动导致与网络连接或覆盖等问题出现时,通过能量管理、信道资源共享、信息传输拥塞优化和管理策略等联合实现故障容错管理。

d) 引入仿生学原理与现代智能仿生算法开展网络层故障容错研究。仿生学理论和现代智能仿生算法包括有生物免疫系统机理、模糊诊断、专家系统、人工神经网络、粒子群算法、蚁群算法和遗传免疫算法等,对无线传感器网络的故障检测与容错提供了较好的思路和方法,已显示出了较好的容错效果,成为新的研究热点。

4 结束语

稳定性和可靠性是无线传感器网络应用较为重要的性能指标,尤其是应用到火灾预警、安全检测和健康监护等对无线传感器网络可靠性要求较高的领域。通过网络故障容错,能提高网络传输稳定性、可靠性和数据传输准确性。故障容错控制

已成为无线传感器网络一项关键技术和研究热点。

本文首先简要介绍了无线传感器网络容错概况,针对网络层容错是无线传感器网络故障容错一个重要的研究内容,重点归纳总结了网络层容错控制技术,主要包括多路由传输、纠错编码/网络编码、数据重传机制、跨层协同优化与复合容错和仿生智能容错等,并对网络层容错控制技术的发展趋势作了探讨。

参考文献:

- [1] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, *et al.* Wireless sensor networks: a survey[J]. *Computer Networks*, 2002, 38(4):393-422.
- [2] PARADIS L, HAN Qi. A survey of fault management in wireless sensor networks[J]. *Journal of Network and Systems Management*, 2007, 15(2):171-190.
- [3] 王良民, 马建峰, 王超. 无线传感器网络拓扑的容错度与容侵度[J]. *电子学报*, 2006, 34(8):1446-1451.
- [4] YICK J, MUKHERJEE B, GHOSAL D. Wireless sensor network survey[J]. *Computer Networks*, 2008, 52(12):2292-2330.
- [5] ALWAN H, AGARWAL A. A survey on fault tolerant routing techniques in wireless sensor networks[C]//Proc of the 3rd International Conference on Sensor Technologies and Applications. 2009:366-371.
- [6] 陈拥军, 袁慎芳, 吴键, 等. 无线传感器网络故障诊断与容错控制研究进展[J]. *传感器与微系统*, 2010, 29(1):1-5.
- [7] MINI R, LOUREIRO A, NATH B. The distinctive design characteristic of a wireless sensor network: the energy map[J]. *Elsevier Computer Communications*, 2004, 27(10):935-945.
- [8] WANG Xiao-rui, XING Guo-liang, ZHANG Yuan-fang, *et al.* Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor networks[C]//Proc of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York:ACM Press, 2003:28-39.
- [9] BADONNEL R, STATE R, FESTOR O. Management of mobile Ad hoc networks: information model and probe-based architecture[J]. *International Journal of Network Management*, 2005, 15(5):335-347.
- [10] ZHAO Y, GORVINDAN R, ESTRIN D. Residual energy scan for monitoring sensor networks[C]//Proc of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. 2002:356-362.
- [11] SHEN C C, SRISATHAPORNPHAT C, JAIKAO C. An adaptive management architecture for Ad hoc networks[J]. *IEEE Communication Magazine*, 2003, 41(2):108-115.
- [12] CHEN Wen-li, JAIN N, SINGH S. ANMP: Ad hoc network management protocol[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1999, 17(8):1506-1531.
- [13] 江贺, 务志坤, 张宪超, 等. 一种容错的无线传感器网络聚类路由协议[J]. *小型微型计算机系统*, 2007, 28(8):1362-1366.
- [14] 黄日茂, 邱雪松, 高志鹏, 等. 无线传感器网络中邻居数据分析的故障检测方法[J]. *北京邮电大学学报*, 34(3):31-34.
- [15] 肖伟, 徐明, 吕品, 等. 无线传感器网络事件簇的数据聚集容错机制[J]. *通信学报*, 2010, 31(6):112-118.
- [16] 李宏, 谢政, 陈建二, 等. 一种无线传感器网络分布式加权容错检测算法[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(14):3750-3755.
- [17] CHALLAL Y, OUADJAOUT A, LASLA N, *et al.* Secure and efficient disjoint multipath construction for fault tolerant routing in wireless sensor networks[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2011, 34(4):1380-1397.
- [18] BABBITT T A, MORRELL C, SZYMANSKI B K, *et al.* Self-selecting reliable paths for wireless sensor network routing[J]. *Computer Communications*, 2008, 31(16):3799-3809.
- [19] HOANG N, SON V. Disjoint and braided multipath routing for wireless sensor networks [C]//Proc of International Symposium on Electrical & Electronics Engineering. 2005:11-12.
- [20] HASSANEIN H, LUO Jing. Reliable energy aware routing in wireless sensor networks[C]//Proc of the 2nd IEEE Workshop on Dependability and Security in Sensor Networks and Systems. 2006:54-62.
- [21] GANESAN D, GOVINDAN R, SHENKER S, *et al.* Highly-resilient, energy-efficient multipath routing in wireless sensor networks [C]//Proc of ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing. New York:ACM Press, 2001:251-254.
- [22] HIND A, ANJALI A. Reliable fault-tolerant multipath routing protocol for wireless sensor networks[C]//Proc of the 25th Biennial Symposium on Communications. 2010:323-326.
- [23] INDRAJIT B, PRASENJIT C, HAFIZUR R. MFTR: multipath fault tolerant routing in wireless sensor networks[C]//Proc of the 5th International Conference on Information Processing. 2011:410-415.
- [24] HAMID N, MAGHSOUD A. IFRP: an intrusion/fault tolerant routing protocol for increasing resiliency and reliability in wireless sensor networks [C]//Proc of International Conference on Selected Topics in Mobile and Wireless Networking. 2011:24-29.
- [25] ZHAO Lei, KAN Bao-qiang, XU Yong-jun, *et al.* FT-SPEED: a fault-tolerant, real-time routing protocol for wireless sensor networks [C]//Proc of International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. 2007:2531-2534.
- [26] CHE-ARON Z, AL-KHATEEB W F M, ANWAR F. An enhancement of fault-tolerant routing protocol for wireless sensor network [C]//Proc of International Conference on Computer and Communication Engineering. 2010:1-3.
- [27] KAVITHA C, VISWANATHA K V. An energy efficient fault tolerant multipath (EEFTM) routing protocol for wireless sensor networks [C]//Proc of IEEE International Advance Computing Conference. 2009:746-751.
- [28] INTANAGONWIWAT C, GOVINDAN R, ESTRIN D. Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks[C]//Proc of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York:ACM Press, 2000:56-67.
- [29] JOHNSON D, MALTZ D. Dynamic source routing in Ad hoc wireless networks[M]//Mobile Computing. San Francisco:Kluwer Academic Publishers, 1996:153-181.
- [30] MARINA M K, DAS S R. Ad hoc on-demand multipath distance vector routing [J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2006, 6(7):969-988.
- [31] GREGOIRE M, KOREN I. An adaptive algorithm for fault tolerant re-routing in wireless sensor networks [C]//Proc of the 5th Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications. Washington DC:IEEE Computer Society, 2007:542-547.
- [32] DJUKIC P, VALAEE S. Maximum network lifetime in fault tolerant sensor networks [C]//Proc of Global Telecommunications Conference. 2005:3102-3106.
- [33] WU Jian, DULMAN S, HAVINGA P, *et al.* Multipath routing with erasure coding for wireless sensor networks [C]//Proc of ProRISC. 2004:25-26.
- [34] XIONG Zhi-qiang, YANG Zong-kai, LIU Wei, *et al.* A lightweight

- FEC algorithm for fault tolerant routing in wireless sensor networks [C]//Proc of International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. 2006:1-4.
- [35] BOKAREVA T, BULUSU N, JHA S. SASHA: toward a self-healing hybrid sensor network architecture[C]//Proc of the 2nd IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors. Washington DC: IEEE Computer Society, 2005:71-78.
- [36] ATAKAN B, AKAN O B. Immune system based distributed node and rate selection in wireless sensor networks[C]//Proc of the 1st International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems. New York: ACM Press, 2006.
- [37] 陈拥军, 袁慎芳, 吴健, 等. 基于免疫系统的无线传感器网络性能优化[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(5):1065-1069.
- [38] ALI S, FAKOORIAN A, TAHERI H. Optimum Reed-Solomon erasure coding in fault tolerant sensor networks[C]//Proc of the 4th International Symposium on Wireless Communication Systems. 2007:6-10.
- [39] DEB B, BHATNAGAR S, NATH B. ReInForm: reliable information forwarding using multiple paths in sensor networks[C]//Proc of the 28th IEEE International Conference on Local Computer Networks. Washington DC: IEEE Computer Society, 2003:406-415.
- [40] WEN Hao, LIN Chuang, REN Feng-yuan, *et al.* Retransmission or redundancy; transmission reliability in wireless sensor networks[C]//Proc of the 4th IEEE International Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Systems. 2007:737-746.
- [41] BYERS J W, LUBY M, MITZENMACHER M, *et al.* Digital fountain approach to reliable distribution of bulk data [C]//Proc of ACM Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication. New York: ACM Press, 1998:56-67.
- [42] DULMAN S, NIEBERG T, WU Jian, *et al.* Trade-off between traffic overhead and reliability in multipath routing for wireless sensor networks[C]//Proc of International Conference on IEEE Wireless Communications and Networking. 2003:1918-1922.
- [43] 张希元, 赵海, 孙佩刚, 等. 基于链路层重传的传感器网络可靠传输模型[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(22):5325-5335.
- [44] BOUKERCHE A, PAZZI R W N, ARAUJO R B. Fault-tolerant wireless sensor network routing protocols for the supervision of context-aware physical environments[J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2006, 66(4):586-599.
- [45] 卞永钊, 王军, 于海斌, 等. 无线传感器网络中具有容错能力的连通支配集构造算法[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(1):292-294, 313.
- [46] 张楠, 张建华, 李志蜀, 等. 无线传感器网络中基于免疫的数据融合机制[J]. 小型微型计算机系统, 2009, 3(3):454-459.
- [47] LI Qiao, ZHANG Bai-hai, CUI Ling-guo, *et al.* Immunizations on small worlds of tree-based wireless sensor networks [J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(5):1-9.
- [48] LU Xing-jia, DING Yong-sheng, HAO Kuang-rong. Immune clonal selection algorithm for target coverage of wireless sensor networks[J]. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 2011, 12(1):119-124.
- [49] MOHAMMAD T, NICOLE I, VAHAB S. Power optimization in fault-tolerant topology control algorithms for wireless multi-hop networks [J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2007, 15(6):1345-1348.
- [50] AHLSEWEDE R, CAI Ning, LI S Y R, *et al.* Network information flow[J]. *IEEE Trans on Information Theory*, 2000, 46(4):1204-1216.
- [51] WIDMER J, FRAGOULI C, Le BOUDEC J Y. Low-complexity energy-efficient broadcasting in wireless Ad hoc networks using network coding [C]//Proc of the 1st Workshops on Network Coding, Theory, and Applications. 2005.
- [52] HO T, LEONG B, MÉDARD M, *et al.* On the utility of network coding in dynamic environments [C]//Proc of International Workshop on Wireless Ad hoc Networks. 2004:196-200.
- [53] ZHANG Xin, WICKER S B. Robustness vs. efficiency in sensor networks[C]//Proc of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks. Piscataway: IEEE Press, 2005:225-230.
- [54] DIMAKIS A G, PRABHAKARAN V, RAMCHANDRAN K. Ubiquitous access to distributed data in large-scale sensor networks through decentralized erasure codes[C]//Proc of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks. Piscataway: IEEE Press, 2005:111-117.
- [55] LI Shan-shan, ZHU Pei-dong, LIAO Xiang-ke, *et al.* Energy efficient multipath routing using network coding in wireless sensor networks[C]//Proc of the 5th International Conference on Ad hoc, Mobile, and Wireless Networks. Berlin: Springer, 2006:114-127.
- [56] YANG Yu-wang, ZHONG Chun-shan, YANG J. Energy efficient reliable multi-path routing using network coding for sensor network[J]. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 2008, 8(12):114-127.
- [57] XIONG Zhi-qiang, LIU Wei, HUANG Jia-qing, *et al.* Network coding approach for intra-cluster information exchange in sensor networks [C]//Proc of 66th IEEE Fall Vehicular Technology Conference. 2007:164-168.
- [58] LI Ting-ge, HSU C C, CHOU C F. On reliable transmission by adaptive network coding in wireless sensor networks [C]//Proc of IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2009:1-5.
- [59] HOU I H, TSAI Y E, ABDELZAHER T F, *et al.* AdapCode: adaptive network coding for code updates in wireless sensor networks [C]//Proc of the 27th IEEE Conference on Computer Communications. 2008:1517-1525.
- [60] PETAR D, SHAHROKH V. Reliable packet transmissions in multipath routed wireless networks[J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2006, 5(5):548-559.
- [61] KIM S, FONSECA R, CULLER D. Reliable transfer on wireless sensor networks[C]//Proc of the 1st IEEE International Conference on Sensor and Ad hoc Communications and Networks. 2004:449-459.
- [62] DJUKIC P, VALAEE S. Minimum energy fault tolerant sensor networks[C]//Proc of Global Telecommunications Conference. 2004:22-26.
- [63] DEMORACSKI L, AVERESKY D R. Topology selection for fault-tolerant beacon vector routing in wireless sensor [C]//Proc of the 13th International Symposium on Temporal Representation and Reasoning. 2006:46-51.
- [64] JABBARI A, LANG W. Advanced bio-inspired plausibility checking in a wireless sensor network using neuro-immune systems; autonomous fault diagnosis in an intelligent transportation system[C]//Proc of the 4th International Conference on Sensor Technologies and Applications. 2010:108-114.
- [65] TENG Rui, LEIBNITZ K, ZHANG Bing. Immune system inspired reliable query dissemination in wireless sensor networks [C]//Proc of the 10th International Conference on Artificial Immune Systems. Berlin: Springer-Verlag, 2011:282-293.