

无线传感器网络数据传输可靠性研究综述

朱晓娟^{1,2} 陆阳^{1,3} 邱述威¹ 官骏鸣³

(合肥工业大学计算机与信息学院 合肥 230009)¹ (安徽理工大学计算机科学与工程学院 淮南 232001)²
(安徽省矿山物联网与安全监控技术重点实验室 合肥 230088)³

摘要 无线传感器网络在资源受限和环境因素影响下数据传输的可靠性较低,然而在国防军事、工业控制等应用领域中数据传输的可靠性是评价网络性能的重要指标。首先介绍了无线传感器网络可靠性的研究意义,从可靠性评估和可靠的数据传输技术两个方面介绍了近年来的研究成果,对这些成果进行了分类、比较,进一步展望了无线传感器网络可靠性未来的研究方向。

关键词 无线传感器网络,可靠性评估,可靠传输协议,跨层优化,网络编码,协作通信

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Survey of Data Transmission Reliability in Wireless Sensor Networks

ZHU Xiao-juan^{1,2} LU Yang^{1,3} QIU Shu-wei¹ GUAN Jun-ming³

(School of Computer & Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)¹
(School of Computer Science & Engineering, Anhui University of Science & Technology, Huainan 232001, China)²
(Anhui Provincial Key Laboratory of Mine IoT and Mine Safety Supervisory Control, Hefei 230088, China)³

Abstract The reliability of data transmission affected by resource-constrained and environmental factors in wireless sensor networks is lower. However, it is an important indicator to evaluate network performance in some application fields such as national defense, industrial control and so on. Firstly, the significance of the reliability of wireless sensor networks was introduced. Then the recent research achievements were reviewed from two aspects: the reliability estimation and the technology of improving reliability of data transmission, and these achievements were classified and compared. Finally the future directions of reliable data transmission in wireless sensor networks were pointed out.

Keywords Wireless sensor networks, Reliability evaluation, Reliable transmission protocols, Cross-layer optimization, Network coding, Cooperative transmission

1 引言

无线传感器网络中的大部分传感器节点由能量有限的电池供电,早期关于无线传感器网络的研究主要着重于节能,即尽量延长网络的生命周期。然而,可靠性(Reliability)是网络重要的性能指标,越来越多的应用对无线传感器网络中数据传输的可靠性提出了更高的要求,例如:工业监控、军事侦察等都要求被感知的信息能可靠地传输到汇聚(Sink)节点,以便用户能够根据这些信息准确地做出决策,采取行动。

无线传感器网络自身的一些特点易导致无线传感器网络的可靠性较低。例如:

- 1) 无线通信容易受到路径损耗、阴影效应、多径衰落和干扰等因素的影响,使得中断概率和误码率较高;
- 2) 随着能量耗尽和环境影响,容易发生节点和链路失效,因此无线传感器网络的拓扑结构会动态变化;
- 3) 节点的计算能力和存储能力较低,当网络中流量过大

时,容易发生拥塞,导致大量的丢包;

4) 很多应用需要较大规模的无线传感器网络,信息可能需要较长的距离才能传输到 Sink 节点,长距离多跳使得差错累积,从而降低整体无线通信的可靠性等等。

国家标准 GB-6583 中对可靠性的定义是:“产品在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力”,这里的产品泛指任何系统、设备和元器件。关于网络可靠性的研究开始于 20 世纪 60 年代,早期主要集中于通信网络、电力网络和计算机网络领域。无线传感器网络可靠性的概念起源于网络可靠性,目前尚未得到统一的定义。文献[1]将网络可靠性定义为:“在网络中按照给出的限制条件,节点之间可以正常通信的概率值”。文献[2]将其定义为:“网络在规定条件下和规定时间内,能在用户期望的时间范围内将物质、信息、能量按用户需求完整、正确地在网络中传输的能力”。文献[3]将其定义为:“网络将信息由源点成功地传送到终点的概率”。

研究无线传感器网络可靠性的主要意义体现在以下 3

到稿日期:2012-11-10 返修日期:2013-03-13 本文受国家自然科学基金项目(61070220,60873195),高等学校博士学科点专项科研基金项目(20120111110001)资助。

朱晓娟(1978-),女,博士生,讲师,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail:xjzhu@aust.edu.cn;陆阳(1967-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为无线传感器网络、分布式控制技术。

点:1)在传统网络可靠性的研究方法上进一步深入研究满足无线传感器网络特点的可靠性评价体系。2)在无线传感器网络的设计阶段对可靠性进行分析与评估,在评估基础上设计出合适的网络拓扑结构、高效的节点部署策略、高能效的数据可靠传输技术和可靠性管理技术,以此来提高无线传感器网络的传输性能。3)在资源受限、环境影响的约束下保证无线传感器网络达到期望的可靠性。

由于无线传感器网络自身的特征,目前关于其可靠性的研究成为一个难点。本文针对无线传感器网络的可靠性问题,首先介绍了无线传感器网络可靠性的研究意义,从可靠性评估和可靠的数据传输技术两个方面介绍了近年来的研究成果,并对这些成果进行分类、比较,进一步展望了无线传感器网络可靠性未来的研究方向。

2 可靠性评估

2.1 可靠性的评估模型

无线传感器网络的可靠性模型的研究是从网络可靠性模型延伸而来的,利用图论和概率论作为研究工具。结合无线传感器网络的特点,有以下3个基本的假设条件:

- 1)节点和链路都具有物理意义,都具有能否正常工作的概率;
- 2)节点、链路和网络只有两种可能状态,即正常或失效;
- 3)节点、链路之间在概率统计上都相互独立。

无线传感器网络可用图 $G=(V,E)$ 表示, V 代表无线传感器网络中传感器节点的集合, E 表示节点间的无线链路集合。

已提出的模型大部分都是基于图的连通性来评估无线传感器网络的可靠性^[4]。

基于连通的可靠性模型研究的是图的连通概率,分析角度可分为3类。

1)两终端可靠性

在图 G 中,指定源节点 s 与目的节点 t 之间至少有一条路径连通的概率,记为 $R_2(G)$ 。

2) k 终端可靠性

在图 G 中,由 k 个节点所构成的顶点子集内任意两个节点都能连通的概率,记为 $R_k(G)$ 。

3)全终端可靠性

在图 G 中,所有的点之间都连通的概率,记为 $R_A(G)$ 。

经典的基于连通的网络可靠性计算方法有状态枚举法、容斥原理法、不交积和法、因子分解法等^[5]。

1)状态枚举法

列举出使网络可靠的所有网络状态,得到网络的可靠度为:

$$R(G) = \sum_{x \in \Omega_1} P_r\{x\} \quad (1)$$

2)容斥原理法

容斥原理法利用组合数学中容斥原理公式计算可靠度,其中最经典的是最小路集法。一个路集对应网络的一个正常状态,假设网络 G 有 m 个最小路集, A_i 表示第 i 个最小路集,则至少有一个最小路集即可保障网络处于正常状态。设网络正常这一事件为 S ,则网络的可靠度为:

$$R(G) = P(S) = P\left(\bigcup_{i=1}^m A_i\right)$$

$$= \sum_{i=1}^m P(A_i) - \sum_{i < j=2}^m P(A_i \cap A_j) + \sum_{i < j < k=3}^m P(A_i \cap A_j \cap A_k) + \dots + (-1)^{m+1} P\left(\bigcap_{i=1}^m A_i\right) \quad (2)$$

3)不交积和法

不交积和可以看成是容斥原理的改进,利用不交积和公式,求解网络全部最小路集的并,即:

$$\begin{aligned} R(G) &= P(S) = P\left(\bigcup_{i=1}^m A_i\right) \\ &= P(A_1) + P(\overline{A_1} \cap A_2) + \dots + P(\overline{A_1} \cap \overline{A_2} \dots \cap \overline{A_{m-1}} \\ &\quad \cap A_m) \end{aligned} \quad (3)$$

4)因子分解法

对于较大规模的网络,因式分解法将其按照式(4)分解成若干个简单网络,直到不能分解为止。

$$R(G) = p_e R(G * e) + (1 - p_e) R(G - e) \quad (4)$$

在图 G 中,选择一条边 e , $G * e$ 是图 G 中将边 e 收缩后得到的新图, $G - e$ 是图 G 中删除边 e 得到的新图, p_e 是边正常工作的概率。

由于无线传感器网络节点的通信距离、能量等资源有限,为使感知区域至少被 k 个不同的节点同时覆盖,需要部署大量的传感器节点,从而保证感知信息能被可靠地传输到 Sink 节点。与传统的网络可靠性模型相比,无线传感器网络可靠性模型不仅要考虑节点间的连通性,还要考虑网络的覆盖性。

文献[5]中定义了无线传感器网络的可靠性是监控区域内的每一个点至少被 K 个节点覆盖,并且 K 个节点中任一节点都至少存在一条连通 Sink 节点的路径的概率。在建模过程中考虑了共因失效(CCF)因素,使用简化的二元决策图方法。

文献[7]建立了基于任务的无线传感器网络可靠性模型,实现了从单个任务的局部可靠性评价到系统全局可靠性评价方法,最后针对 WSN 中典型的簇拓扑结构,给出了建模实例。该文定义了任务模型 $T_{s,d}$ (S 表示源节点, D 表示任务的目的节点),假设单个任务 $T_{s,d}$ 的完成可通过多条路径实现,则单个任务 $T_{s,d}$ 的可靠性 $R_{T_{s,d}}$ 定义为任务的路径集中至少有一个路径正常工作的概率,如式(5)所示。其中 $k_{s,d}$ 表示从源节点到目的节点的路径个数, $r_{i,s,d}$ 表示第 i 条路径的可靠性。

$$R_{T_{s,d}} = P\left\{\bigcup_{i=1}^{k_{s,d}} r_{i,s,d}\right\} \quad (5)$$

整个网络的可靠性如式(6)所示,其中 M 表示任务个数。

$$\overline{R}_{system} = \frac{\sum_{s=1}^M \sum_{\substack{D=1 \\ S \neq D}}^M R_{T_{s,d}}}{M(M-1)} \quad (6)$$

文献[8]考虑无线传感器网络中大量节点因为同一个原因同时失效的情况,基于图变换法提出一种可靠评估算法(COBD)。该算法只对原始网络建立有序二叉决策图(ordered binary decision diagram, OBDD),只执行一次递归过程,剩下的有序二叉决策图利用布尔操作直接计算,如式(7)所示,节省了大量的运行时间。其中 G_i 表示发生了共同事件 CE_i 的网络, L 是共同原因的数量。此外该算法利用节点扩展构造有序二叉决策图,减少了对同形子网的重复计算。该算法需要了解全局拓扑,当网络规模过大时,建立 OBDD 会需要较多的计算时间。

$$REL_{total}(OBDD(G)) = \sum_{i=0}^{2^L-1} REL_{total}(OBDD(G_i)) \times Pr(CE_i) \quad (7)$$

最近几年,针对无线传感器网络中节点和链路状态可能出现动态变化的现象,有研究者提出了实时的可靠性评估模型。文献[9]定义了节点的可靠性,即 t 时刻下节点处于正常状态并能与 Sink 节点连通的概率。评估节点的可靠性时还考虑了节点的剩余能量。网络失效条件与能够将数据传递到 Sink 节点的传感器集合中节点数量的最小值相关。作者利用连续马尔科夫链和补偿函数建立了可靠性模型。

文献[10]使用 Weibull 函数表示故障率模型,建立了链路和节点效能的时变模型,并建立了整个网络的时间效能模型,通过网络效能的变化动态评价网络的可靠性。

现有关于无线传感器网络的可靠性评估模型都是从传统的网络可靠性模型发展而来的,但是无线传感器网络的动态性、故障统计不独立(共因失效)等现象使得建立可靠性模型时其必须符合无线传感器网络自身特性才能进行准确的可靠性评估,从而为无线传感器网络的设计提供合理的决策。

2.2 可靠性的近似计算方法

网络可靠性的精确计算方法已经被证明为 NP-hard 问题,因此研究者尝试去寻求其近似解。典型的近似算法有图变换法、定界法、蒙特卡罗法等,具体可参考文献[11]。

3 提高无线传感器网络可靠性的传输技术

无线传感器网络吸引了世界上大量的研究机构和生产厂商的研究热情,但至今未形成一个统一的网络标准,已提出的有:IEEE 802. 15. 4、ZigBee、WirelessHART、ISA SP100、Z-Wave、6LoWPAN 等等。

ZigBee 是一种短距离、低功耗的无线通信技术。主要应用于工业、家庭自动化控制、工业遥测遥控、智能交通等领域。6LoWPAN 是基于 IEEE802. 15. 4 标准上 IPv6 传输的通信技术标准。WirelessHART 和 ISA SP100 是专门面向工业自动化与控制应用领域的无线通信标准。IEEE 802. 15. 4 标准针对无线低速个域网定义了网络的物理层和介质访问控制子层,已被众多研究者接受,成为无线传感器网络底层标准,ZigBee、6LoWPAN、WirelessHART、ISA SP100 等均在 IEEE 802. 15. 4 的基础上扩充其上层协议。

IEEE 802. 15. 4 标准中采用带冲突避免的载波侦听多路访问技术(CSMA-CA)、帧确认机制及帧校验机制来保证数据的可靠传输^[11]。无线信道中的数据因受环境影响而产生较高的误码率,IEEE 802. 15. 4 标准用两种方法解决误码问题:一是使用短帧格式减小出错概率;二是利用 MAC 帧中的帧检验机制来检查错误,一旦发现错误就将其丢弃,等待重传。

为满足可靠的数据传输需求,很多研究者在 IEEE 802. 15. 4 标准的基础上对协议进行了修订。

本文将提高数据可靠传输的技术按照不同的角度进行分类,如图 1 所示。

数据传输的可靠性度量指标分为“包可靠性(Packet Reliability)”和“事件可靠性(Event Reliability)”两种^[12]。“包可靠性”要求所有传感器节点发送出的所有携带感知信息的数据包能可靠地传递给 Sink 节点。“事件可靠性”只需要确保

Sink 节点能够获取关于某个事件发生的足够信息即可,不需要保证所有的数据包都能被传递给 Sink 节点。因此,“事件可靠性”更适合作为无线传感器网络传输可靠性度量指标。

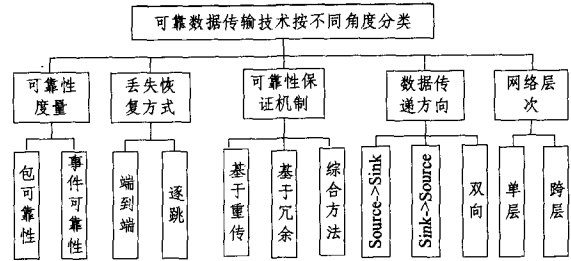


图 1 可靠数据传输技术分类

无线传感器网络的带宽资源有限而且传感器节点的存储能力较低,网络中容易发生拥塞;同时受环境的影响,无线通信还具有较高的误码率,因此无线传感器网络中会出现较高的丢包率。为了达到网络期望可靠性的要求,丢失的数据包可以通过端到端(end-to-end)^[14,16,17,20,21,26,33,34]或逐跳(hop-by-hop)^[15,19,30]方式进行恢复。端到端的恢复方式仅在 Sink 节点进行丢包恢复,中间节点只需进行转发;而逐跳的恢复方式中,每一跳都要进行丢包恢复,最终使得数据包能够可靠地传输到 Sink 节点。

无线传感器网络中的数据流按传递方向可分为上行和下行两种。上行方向表示源节点将感知数据传送给 Sink 节点的数据流,主要用于信息的采集,大部分文献^[16,17,19-21,26,30,33,34]关注的都是该方向数据包的可靠传输。下行方向表示 Sink 节点向整个网络或局部网络发送的广播或单播数据流,主要用于发送查询、重新编程、调整节点发送速率、发送功率、编码参数等控制消息^[14,15]。

可靠性保证手段有重传(Retransmission)、冗余(Redundancy)及混合(Hybrid) 3 种方法。IEEE 802. 15. 4 标准中利用重传机制来保证数据传输的可靠性,重传的方法简单,并且能达到较高的可靠性,但是过多地重传会消耗大量的能量。基于冗余的机制有两种:一种方法是节点将原始数据包拷贝出多个副本经过多路径传递给接收节点,从而提高数据包成功传递到接收节点的概率^[19,20];另一种方法是利用前向纠错技术(Forward Error Correction, FEC)对原始数据包进行编码,即使数据包在传输的过程中发生了错误或丢失,接收节点也能在一定程度上恢复出原始数据包,从而保证数据传输的可靠性^[16,17]。冗余机制能够满足网络的期望可靠性并且减少重传的次数,但是增加的冗余也会给网络增加额外的负载。混合方法就是将重传和冗余结合起来,以达到更好的可靠传输能效。近年来,还有文献提出利用新的通信技术如网络编码或协作传输来保证数据传输的可靠性^[30,33,34]。

为了更好地提高数据传输可靠性,有研究者提出了跨层(Cross-Layer)^[27,28]解决方案,亦即将物理层的功率控制技术、MAC 层的自动重传和前向纠错技术、网络层的多径路由以及传输层的拥塞控制技术部分或整体地结合起来进行优化设计,以提高数据传输的可靠性。

并非所有无线传感器网络标准都建立在 IEEE 802. 15. 4 之上,例如,Z-Wave 是由丹麦 Zensys 公司提出的一种新兴的基于射频频的、低成本、低功耗、高可靠的无线网络,适于网络的短距离无线通信技术。Z-Wave 联盟现已具有超过 160 多家

国际知名公司,在智能家居领域已占据了较强地位。Z-Wave 底层没有采用 IEEE 802.15.4 标准,而是从下到上定义了 RF Media 层、MAC 层、传输层、路由层 4 层协议栈结构。Z-Wave 标准采用 mesh 拓扑、碰撞避免、帧确认重传、帧校验和检查以及源路由协议来保证传输的可靠性。文献[13]介绍了一种基于 Z-Wave 标准下的无线传感器网络智能抄表系统的实现方法。

下文介绍几种典型的可靠传输协议。

4 典型的可靠传输协议

4.1 重传

在 IEEE 802.15.4 标准中,节点发出数据后,如果在给定的时间内没有收到 ACK,节点就自动重传数据,直至收到 ACK 或达到最大重传次数,节点才会将该数据从缓冲区中清除。

ESRT^[14]是一个在 Sink 端执行的包含可靠性和拥塞控制的传输协议,该协议首先提出了“事件可靠性”的概念。Sink 节点能够根据当前网络状况和期望可靠性,通过广播通知源节点自适应地调整报告频率,从而使事件特征能被可靠地传输并且不会导致拥塞,获得了较高的能效。作者对 ESRT 进行了理论分析并利用 NS-2 进行了仿真,结果表明无论网络的初始状态如何,ESRT 均能使网络收敛于最优状态(无拥塞、满足期望可靠性)。但是 Sink 节点向网络广播通知源节点调整报告频率的方法加重了 Sink 节点周围节点的负载。

PSFQ^[15]协议即“慢输入,快提取”的可靠传输协议,主要用于 Sink 节点向传感器节点发送查询和控制消息。“慢输入”是指节点以较慢的速度向周围邻居节点广播数据,“快提取”是指当节点发生丢包时向邻居节点请求重传,以快速地恢复丢包。作者利用 NS-2 对其进行了仿真,并且利用一个基于 Mote 节点和 TinyOS 系统的实验床进行了实验。与 SRM 协议相比,PSFQ 在容错、通信开销和传输时延方面具有明显优势。该协议的缺点是需要设计多个定时器,并且定时器的计算方法固定,不能动态地适应网络状态。

4.2 冗余

冗余机制是通过增加数据的数量来达到较高的成功传输概率,可分为前向纠错和多径路由两种方法。

(1) 前向纠错

前向纠错是一种传统的差错技术,接收端利用发送端在发送码元序列中加入的差错控制码元,发现错码并将其纠正。在无线传感器网络中采用前向纠错技术,减少重传导致的时延和传输能耗,但是加入的冗余也会给网络增加一定的负载。常用的纠错码有 BCH 码、RS 码等。擦除码(Erasur coding)是从纠错码的基础上发展而来的针对纠正删除错误的编码,也叫纠错码。其纠正删除错误的能力常被用来针对无线通信中经常发生的丢包现象进行丢包恢复。擦除码的基本原理如图 2 所示,源节点将原始数据包分成 k 个数据片段,通过增加 r 个冗余片段,将原始数据编成 $n(n=k+r)$ 个片段进行发送,假设接收端收到了 m 个片段,只要 $m \geq k$,接收节点就可以重构出原始数据包。利用擦除码进行丢包恢复,大大减少了网络中由于丢包导致的不断重传的次数。

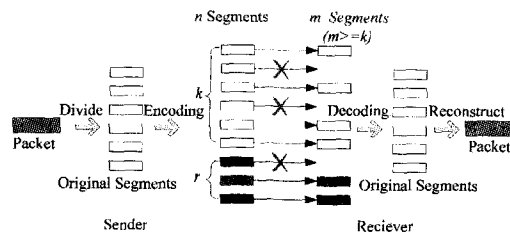


图 2 Erasure Coding 原理

文献[16]的作者观测一个无线传感器网络,发现其平均每秒或每分钟的误码率从 0 到 10^{-3} 持续地变化,表明在无线传感器网络中很难精确估计底层信道状态,因此很难确定与不断变化的误码率相匹配的合适的 FEC 编码策略。该文提出了一种自适应 FEC 技术 AFECCEC,发送节点不需从接受节点获取信噪比和误码率等信息,只需根据收到的 ACK 确认就可动态地调整每包的 FEC 编码策略。采用乘法增加加法减小方法,当发送节点成功接收到接收节点发回的连续确认包时,每超过一个降落时间就降低一个 FEC 的编码级别,一旦发生丢包就将 FEC 的编码提高到较高级别。该文的自适应编码冗余通过调整 FEC 的编码级别实现,但是文中没有给出自适应编码级别的构造函数,而是按照能够纠正 2, 5, 8, 12, 16, 21, 26, 33, 41, 45 个错误字节将编码级别设计成了 11 个等级。虽然 AFECCEC 的计算方法比较简单,但是其自适应准确性较低。

文献[17]提出一个传输机制——RDTs,即以逐跳的方式编解码,每个中间节点根据其与其下一跳之间的链路质量决定编码的冗余数据包数量。针对单条多跳路径,假设跳数为 n ,其中第 i 跳的成功概率为 p_i ,为使每个第 $i+1$ 个节点都能成功接收到 m 个数据片段,第 i 个节点需要发送的数据片段数量为 $\frac{m}{p_i}$ 。该文提出的逐跳编码方式与端到端编码方式相比,总体发送的数据片段数量减少了:

$$S_{end-to-end} - S_{hop-by-hop} = \sum_{i=1}^n m \left(\frac{1}{\prod_{j=1}^i p_j} - \frac{1}{p_i} \right) \quad (8)$$

利用 RDTs 以后,由增加冗余带来的网络负载显著地减少并且能够均衡,最终可以延长整个网络的生命周期。此外,逐跳的编码方式还具有较低的编码代价,作者进一步提出一种部分编码机制,以减少编码的计算时间。作者采用 802.11 作为底层协议,基于 NS-2 进行了仿真,为评估 RDTs 的性能,选择了包成功传输率、能量消耗、生命周期、负载均衡作为评价参数,与 EEEEC 进行了对比。仿真结果显示 RDTs 以较小的编码代价显著地减轻了网络负载,延长了生命周期。然而该文作者只针对多跳的单路径进行了研究,对于多跳多路径情况下逐跳的编码方式及性能未作分析。

(2) 多径路由

由于无线传感器网络节点是密集部署的,因此源节点到 Sink 节点之间可能存在多条路径。多径路由 (Multipath Routing) 可以均衡无线传感器网络的负载,同时还能提高无线传感器网络的可靠性和安全性,因此被视为一种能量有效的路由方法。

文献[18]研究了建立两种多路径:不相交多路径 (disjoint multipath) 和缠绕多路径 (braid multipath) 的方法,然而严格地说,该文提出的方法在数据传输时使用的仍然是单路径(即

主路径),当主路径失效时,次优路径才被激活成为新的主路径。

ReInForm^[19]路由将每个数据包拷贝了多个副本,沿着从源节点到 Sink 节点的多条路径传递。首先,数据源节点根据本地无线信道质量、到达 Sink 节点的跳数和期望可靠性计算出为保证至少一个原始数据包到达目的节点所需要的数据包拷贝数量 N_c (数据包由一条从源节点到 Sink 节点的最短路径传输);其次源节点将邻居节点按距离 Sink 节点的跳数进行分类,在已分类的邻居节点中按一定规则选择下一跳节点,并给这些选中的节点按比例分配拷贝数据包数量,所有中间节点将自己再作为源节点,根据接收到的数据包的数量计算出新的可靠性,再重新计算传输所需要的路径数,整个过程一直持续到数据包被传递到 Sink 节点。仿真实验表明,与单路径、洪泛路由相比,ReInForm 以较小的通信开销、较均衡的网络负载达到期望可靠性。

ReInForm 能够根据网络实际情况选择路径数量,但是在选取下一跳节点时是按概率随机选取的,没有考虑节点的剩余能量和当前节点到被选中的下一跳节点之间的链路质量。

MMSPEED 协议^[20]针对实时性和可靠性为无线传感器网络提供 QoS 保障。MMSPEED 协议以本地化方法实现,无需全局网络信息。假设相邻的节点 i 和节点 j 之间的丢包率为 $e_{i,j}$,节点之间的距离表示为 $dist$, $\lceil dist_{j,d}/dist_{i,j} \rceil$ 表示节点 j 到节点 d 的跳数估计,则数据包从节点 i 经过节点 j 到达最终目的节点 d 的概率如式(9)所示:

$$RP_{i,j}^d = (1 - e_{i,j}) (1 - e_{j,d})^{\lceil dist_{j,d}/dist_{i,j} \rceil} \quad (9)$$

所谓本地化方法即是节点 i 不断从相邻节点之间选择 $RP_{i,j}^d$ 较大的节点作为转发节点,直到满足成功传输率 TRP 大于期望的可靠性为止。节点 i 根据当前自身的期望可靠性分别计算各个转发节点的期望可靠性,通过捎带的方法告知各转发节点,转发节点再重复以上选择过程。如果本地决策出现了误差,MMSPEED 通过动态补偿的方法(后压反馈)调整对各个节点的可靠性要求。由于利用本地化方法保证端到端需求,MMSPEED 能更好地适应大规模动态传感器网络的可扩展性要求。作者选择 J-SIM 进行仿真,并与 SPEED 协议进行了对比。仿真结果显示 MMSPEED 能够有效地满足不同的可靠性与实时性的组合需求,并显著地提高了不同需求下的网络容量。

REER^[21]协议提出一种多径路由协议,与 ReInForm^[19]协议相比,在路径建立阶段,其利用代价方程综合考虑节点的剩余能量、节点可用缓冲区大小以及信噪比来选择最佳的下一跳节点,如式(7)所示。其中 N_x 表示当前节点 x 的下一跳节点集合, $E_{resd,y}$ 和 $B_{buffer,y}$ 分别表示选中的节点的剩余能量和缓冲区大小, $I_{interference,zy}$ 表示节点 x 与节点 y 之间链路的信噪比。 α, β, γ 分别代表每个因素的权重。

$$Next_hop = \max_{y \in N_x} \{ \alpha E_{resd,y} + \beta B_{buffer,y} + \gamma I_{interference,zy} \} \quad (10)$$

当路径探测好以后,REER 提出了两种流量分配机制:一种是利用已发现的路径中的一条来传输数据包,当该路径的代价超过某个阈值时,切换到下一条备用路径;另一种机制是将被传输的信息分成多个大小相同的片段,增加基于 XOR 的纠错码,通过多条路径同时传输来增加原始数据成功传输到目的节点的可靠性,同时不会增加过量的延时。仿真结果

表明,与 Directed Diffusion^[22]和 N-to-1^[23]路由相比,REER 具有较低的能耗和时延以及较高的成功传输率。

4.3 混合方法

究竟重传和冗余方法哪一种更适合用来提高无线传感器网络的可靠性?关于二者在提高数据传输可靠性和传输能耗方面的性能优劣,有研究者对其进行了比较。

文献[24]提出一个跨层方法来分析无线传感器网络的差错控制机制,对前向纠错(FEC)、自动重传(ARQ)以及混合方法(Hybrid)进行了综合比较并进行了仿真实验,发现 Hybrid 和 FEC 与 ARQ 相比有较强的错误恢复能力,在多跳网络中,利用较强的错误恢复能力可以增加跳距或者减少传输能耗,由此减少能耗以及端到端时延。在一些实时性要求较高的应用中,Hybrid 或 FEC 都可以作为候选方案,当网络密度增加时,FEC 具有更明显的优势。作者还分析了在某些个别的端到端距离和目标丢包率下,ARQ 的性能优于 FEC 编码。

文献[25]建立了理论分析模型来研究冗余和重传在不同情况下的数据包传输可靠性和能量效率。当丢包率较低或中等时(丢包率 $\leq 50\%$),冗余(该文使用的是 Erasure Coding)能达到和重传基本相同的传输可靠性,但能量效率优于重传;当丢包率增大时,随着跳数的增加,冗余的优势逐渐消失。理论分析模型的建立使我们能更充分、更清楚地比较二者的性能,能更好地根据当前网络状况选择传输策略。

为了在达到满足期望可靠性的同时达到更高的能效和更低的时延,有研究者提出了将重传和冗余结合起来的方法,比如:

RELAX^[26]协议提出了一个结合 FEC 的能量有效的多径路由协议,即把经过编码的数据包通过多条路径传递给目的节点。与 REER^[21]相同,在路径发现阶段,RELAX 利用基于当前剩余能量、可用缓冲区大小和链路质量的链路代价方程来选择最佳的下一跳节点。RELAX 通过多个路径来转发数据,以此来均衡不同节点的能耗、提高吞吐量并减小端到端时延。在传输数据包之前,RELAX 协议通过较小权重的 FEC 来增加冗余,以此提高协议的可靠性及克服链路失效的弹性。仿真实验表明,与 Directed Diffusion^[22]和 N-to-1^[23]协议相比,RELAX 具有较低的能耗和时延、较高的吞吐量和较长的生命周期。

但是,该文在选择路径分配冗余时只考虑了路径的成功传输率,没有考虑路径的剩余能量,这可能会给链路质量较好的链路分配过多的冗余,导致负载不均衡。

为了更好地发挥混合方法的能效,文献[27,28]研究了跨层优化方案。文献[27]针对 Rayleigh 块衰落信道提出一个网络层的冗余包(基于擦除码)和物理层的信道编码的优化分配方案,实验显示,在传输一个数据包时,若没有出现信道差异,优化方案比单独的物理层信道编码具有明显的优势,反之,优势变小。经过优化后,网络层的擦除码和物理层的信道编码的开销得到均衡,从而在提供可靠传输的同时最小化传输能耗。

文献[28]将无线传感器网络中端到端可靠传输问题按照不同的网络层次分成几个子问题,为每个子问题选择复杂性较低的启发式算法,在保证端到端成功传输的情况下,最大化网络生命周期。在网络层,提出一个路由算法,它将端到端传输的期望可靠性根据跳数分配到每一跳,同时将端到端可靠

传输的能量约束考虑进来,并对其进行优化。在物理层和MAC层,提出了功率和重传次数限制算法。当链路距离较短且功率转换效率是一个发送功率的增函数时,多次重传的低功率增益较小。因此重传次数的选择要考虑目标传输距离和给定环境的能耗特性。

4.4 与其他技术结合

(1)网络编码

Ahlsweide 等人于 2000 年提出了网络编码^[29]概念,指出对组播网络中的某些节点增加额外的编码操作能使源与组播成员间达到最大流最小割组播速率。当前无线网络通信中的网络编码主要是通过异或(XOR)运算或有限域上的线性运算实现的。

近年来,已有文献指出在有损网络中网络编码通过减少数据包重传的次數可以提高网络的可靠性。文献[30]对网络编码能够提高可靠性的程度进行了量化。该文将基于网络编码的可靠性机制与基于 FEC 和 ARQR 的进行了比较。仿真实验表明,当接收者的数量规模达到 $\Theta(\log K)$ 时,网络编码的每包期望传输次数显著小于 ARQ。该文的研究表明,在有损网络中,与自动重传机制相比,网络编码可以显著地减少重传的次數。

很多利用网络编码进行丢包恢复的方法是将不同接收者的多个丢包异或成一个数据包,利用单路径进行重传。然而简单的异或运算不能完全利用潜在的编码机会,同时寻找将要进行异或运算的不同接收者的丢包集合的最大值已被证明为一个 NP-hard 问题。文献[31]选择有限域上的编码方案,提出了静态的和动态的两种丢包恢复机制,在静态机制中,一个编码包会持续重传,直到所有的期望接收者成功接收到该数据包,在动态机制中,每一次重传,被编码的数据包都会动态地更新,从而潜在的编码机会能被更有效地利用。这两种机制不仅能完全利用潜在的编码机会,而且具有多项式的时间复杂性。仿真实验表明,与基于异或编码的丢包恢复方法相比,该方法能更高效地减少带宽消耗,尤其是在较高的丢包率和较多的接收者情况下。

之前关于网络编码的文献都假设数据包没有发生错误,

然而实际上无线通信中经常存在由信道噪声、网络拥塞或恶意攻击等引发的各种错误。网络编码对网络中的错误十分敏感,一个关键性错误就可以导致译码失败。因此有文献将网络编码和传统纠错码结合起来,提出“网络纠错码”^[32,33],其允许在一定差错范围内接收节点通过解码来纠正网络中出现的传输错误。

(2)协作传输

由于无线传输的广播特点,研究者发现协作通信技术(cooperative techniques)可以用来提高无线传输的可靠性。协作通信技术通过共享邻居节点的天线建立虚拟的 MIMO 系统,实现了空间分集,克服了多径传输过程中的信号衰退。研究发现,协作通信可以提高无线通信的可靠性和吞吐量,同时节省能量消耗。

文献[34]将协作通信技术和信道编码技术相结合,提出一种结合非均匀网络编码(RBC, random binning coding)的协作传输策略,分析了端到端的中断概率,评估了中继选择过程的有效性,选择了空间分散的若干中继节点,这些节点能够以较高的概率成功对数据分组进行解码,然后协作地向其他节点转发数据。开发了一个基于协作传输策略、ACK 较少的数据传输方法,仿真实验表明,该方法能够较好地利用网络资源,提高了信息传输的可靠性。

文献[35]利用 MIMO 和正交空时编码(Orthogonal Space Time Block Codes, OSTBC)技术研究无线传感器网络中可靠数据包传输问题。该文提出一个满足给定的端到端能耗约束条件下最大化成功传输率的跨层优化(联合信道编码、功率控制和路由规划)机制。仿真实验表明,与两个未采用联合优化的协议:SP-power^[36]和 PARO^[37]比较,跨层优化机制明显地降低了误符号率,取得了较高的成功传输率。

5 综合比较

以上介绍了一些典型的无线传感器网络可靠传输技术。表 1 从传输方向、可靠性保证手段、可靠性度量指标、恢复方法和能耗几个方面对这些典型的可靠传输技术进行了比较。

表 1 可靠传输比较

Name	Direction	Method	Metric	Recover way	Cost
ESRT	Sink→Source	Retransmission	Event Reliability	End-to-End	Middle
PSFQ	Sink→Source	Retransmission	Packet Reliability	Hop-by-hop	Middle
AFECCC	Source→Sink	Erasure code	Packet Reliability	End-to-end	Middle
RDTs	Source→Sink	Erasure code	Packet Reliability	End-to-end	Low
RelnForM	Source→Sink	Multipath	Packet Reliability	Hop-by-hop	High
MMSPEED	Source→Sink	Multipath	Packet Reliability	End-to-end	Middle
REER	Source→Sink	Multipath+XOR	Packet Reliability	End-to-end	Low
RELAX	Source→Sink	Multipath+FEC	Packet Reliability	End-to-end	Low
文献[30]	Source→Sink	Network coding+Retransmission	Packet Reliability	Hop-by-hop	Middle
文献[33]	Source→Sink	MIMO+RBC	Packet Reliability	End-to-end	Middle
文献[34]	Source→Sink	MIMO+OSTBC	Packet Reliability	End-to-end	Middle

结束语 本文从无线传感器网络可靠性评估以及提高数据传输的可靠性技术两个方面介绍了当前关于无线传感器网络可靠性的研究成果。前期的研究工作已经取得了一定的进展,但是仍然存在很多问题值得进一步研究。对于无线传感器网络的可靠性评估,仅从图论的角度考虑连通概率是不恰当的,还应考虑到在节能、实时等约束下无线传感器网络的可靠性。可靠传输的评价指标也不应该只考虑丢包率,还应将

中断概率、传输能耗、延迟等参数包含进来。我们认为关于无线传感器网络可靠性评估在以下几个方面还有待进一步研究:

- (1)建立合理的可量化的可靠性评估模型;
- (2)进一步研究高准确度、低复杂度的网络可靠性近似算法;
- (3)开发实用的可靠性评估仿真工具;

(4)对已有的可靠性评估方法进行综合对比与优化等。

只有建立准确的、低复杂度的可靠性评估方法才能设计出可满足期望可靠性的最小代价的无线传感器网络,更好地优化多约束条件下的数据可靠传输技术。在提高数据传输的可靠性方面,仍需要解决如下问题:

(1)提高综合的控制能力

大部分的可靠传输技术都偏向“监视”应用,关注的是源节点到 Sink 节点方向采集信息传输的可靠性;而“控制”应用需求没有得到重视,即 Sink 节点到源节点方向传输可靠性的研究较少。然而由 Sink 节点发送给源节点的查询和控制命令往往需要以较高的可靠性传输,因此需要进一步研究能够控制双向可靠传输的方案。

无线传感器网络中的丢包可能是由拥塞造成的,在这种情况下盲目进行重传或增加冗余来恢复丢包会加重网络拥塞的状况,导致更严重的丢包。因此,可靠传输技术与拥塞控制应该结合在一起考虑。

(2)增强对动态拓扑的适应能力

大部分研究都假设无线传感器网络是一个静态网络,实际上在无线传感器网络中,节点移动、节点失效或链路失效都会导致网络拓扑发生变化,甚至发生网络分割。由于无线传感器网络资源受限,因此在 Ad Hoc 中针对动态拓扑的可靠传输方法并不适用于无线传感器网络,经常变化的网络拓扑也给准确预测网络状况带来了挑战。因此,需要专门针对无线传感器网络的动态拓扑研究具有较低能耗的可靠数据传输技术。

(3)进一步研究联合优化方案

已有文献提出利用跨层优化的方法设计高能效的可靠传输策略,按网络层次进行分层优化,但是局部最优方法不一定能使整体性能达到最优,并且物理层、MAC 层以及网络层之间并非是相互隔离的,局部优化策略会影响到其他层的性能,因此现有的优化策略存在一定的缺陷。为了提高无线传感器网络传输的可靠性,可将各层次之间的资源分配转化成一个非线性优化问题,进一步研究联合优化的跨层设计方案。

(4)与其他新技术的结合

协作通信技术和网络编码是近几年发展起来的新一代通信技术,已有研究者将这两种新技术运用到无线传感器网络中,以提高数据传输的可靠性。使用协作通信技术时,需要对中继节点的位置、数量以及中继节点的转发模式进行进一步优化设计以达到最佳性能;使用网络编码时,需要降低编码和解码的复杂度,以达到更高的能效。网络编码可以进一步与信道编码、自动重传技术结合,以获得最佳的可靠性。将协作通信技术和网络编码运用于无线传感器网络来提高传输可靠性时,还要对吞吐量、延时、能耗等各方面性能进行评估,同时与传统的传输方法进行比较。

(5)满足异构网络融合时数据的可靠传输需求

早期关于无线传感器网络的数据可靠传输都局限于单一的专用网,随着无线传感器网络投入实际应用,特别是在“物联网”的背景下,无线传感器网络需要与现有的工业现场总线、以太网、无线局域网等网络进行融合,实现系统间的互联、互通、互操作,从而方便用户进行数据采集、管理和控制。在物联网背景下,感知数据不仅多源异构而且数据量巨大,网络之间数据的格式、路由方式、网络带宽、节点的处理、存储能力

以及能量都有很大差异,如何在异构的网络中提供可靠的数据传输是需要关注的问题。

无线传感器网络作为物联网以及信息物理系统的关键组成部分,其研究趋势已经从理论走向实际应用,从单一的网络走向异构网络融合。可靠性是评价无线传感器网络的一个重要性能指标,数据传输的可靠性决定了无线传感器网络的实际应用价值,新形势下带来了更多、更复杂的问题,研究者需要对无线传感器网络的可靠性进行更加深入的研究。

参 考 文 献

- [1] 孟华军. 网络可靠性的最优化及其应用研究[D]. 上海:华东理工大学,2010
- [2] Li Rui-ying, Huang Ning, Chen Wei-wei, et al. A Practical Approach for Network Application Reliability Assessment [J]. Eksploatacja Iniezawodnosc-Maintenance and Reliability, 2009, 4: 17-27
- [3] Yousefi H, Mizanian K, Jahangir A H. Modeling and Evaluating the Reliability of Cluster-Based Wireless Sensor Networks[C]// Proceedings of 24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications. 2010
- [4] Silva I, Guedes L A, Portugal P. Reliability and Availability Evaluation of Wireless Sensor Networks for Industrial Applications[J]. Sensors, 2012, 12(1): 806-838
- [5] 江逸楠, 李瑞莹, 黄宁, 等. 网络可靠性评估方法综述[J]. 计算机科学, 2012, 39(5): 9-13
- [6] Shrestha A, Xing Liu-dong, Liu Hong. Modeling and evaluating the reliability of wireless sensor networks[C]// Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2007
- [7] 周强, 杜毓青, 熊华钢. 无线传感器网络可靠性建模研究[J]. 兵工学报, 2008, 29(9): 1063-1068
- [8] Xiao Yu-feng, Li Xin, Li Yu-hong, et al. Evaluate Reliability of Wireless Sensor Networks with OBDD [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Communications. 2009: 453-457
- [9] Bruneo D, Puliafito A, Scarpa M. Energy control in dependable wireless sensor networks: a modelling perspective [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2011, 225(4): 424-434
- [10] 姜禹, 胡爱群. 基于效能分析的网络可靠性评估模型[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2012, 42(4): 599-603
- [11] 孙利民, 李建中, 陈渝, 等. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008
- [12] 方维维, 钱德沛, 刘轶. 无线传感器网络传输控制协议[J]. 软件学报, 2008, 19(06): 1439-1451
- [13] Amaro P, Cortesao R, Landeck J, et al. Implementing an Advanced Meter Reading infrastructure using a Z-Wave compliant Wireless Sensor Network [C]// Energetics (IYCE), Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on. IEEE, 2011: 1-6
- [14] Akan O B, Akyildiz I F. Event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2005, 13(5): 1003-1016
- [15] Wan C Y, Campbell A T, Krishnamurthy L. Pump-slowly, fetch-quickly (PSFQ): a reliable transport protocol for sensor networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(4): 862-872

- [44] Witten I, Frank E. Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques with Java Implementations(Second Edition)[M]. Morgan Kaufmann Publishers, 2005
- [45] Vapnik V N. Statistical learning theory [M]. New York: Wiley, 1998
- [46] JNI[OL]. <http://java.sun.com>
- [47] Waikato Environment for Knowledge Analysis(WEKA)[OL]. <http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>
- [48] Li Zhu, Yuan Rui-xi, Guan Xiao-hong. Traffic Classification-Towards Accurate Real Time Network Applications[C]//Human-Computer Interaction, Part IV, HCI 2007. LNCS 4553, 2007: 67-76
- [49] Gu Cheng-jie, Zhang Shun-yi, Sun Yan-fei. Real-time Encrypted Traffic Identification using Machine Learning [J]. Journal of Software, 2011, 6(6): 1009-1016
- [50] Erman J, Mahanti A, Arlitt M, et al. Offline/realtime network traffic classification using semisupervised learning[R]. Technical Report. Department of Computer Science, University of Calgary, February 2007
- [51] Bar-Yanai R, Langberg M, Peleg D, et al. Realtime Classification for Encrypted Traffic[C]//SEA 2010. LNCS 6049, 2010: 373-385
- [52] Tavallae M, Lu W, Ghorbani A A. Online classification of network flows[C]//Proceedings of the 7th Annual Communication Networks and Services Research Conference. CNSR 2009, 2009: 78-85
- [53] Hifn company[OL]. <http://www.hifn.com>, September, 2008
- [54] Spencer H L, Domingos P. Mining timechanging data streams[C]//7th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. ACM Press, 2001: 97-106
- [55] 王建东, 祝超, 谢应科, 等. 基于 FPGA 的万兆流量并行实时处理系统研究[J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(2): 177-185
- [56] Tstat[OL]. <http://tstat.tlc.polito.it/index.shtml>
-
- (上接第 7 页)
- [16] Ahn J, Hong S, Heidemann J. An adaptive FEC code control algorithm for mobile wireless sensor networks [J]. Journal of Communications and Networks, 2005, 7(4): 489-499
- [17] Srouji M S, Wang Z, et al. RDTS: A Reliable Erasure-Coding Based Data Transfer Scheme for Wireless Sensor Networks[C]//Proceedings of 17th IEEE International Conference on Parallel and Distributed Systems. 2011
- [18] Ganesan D, Ramesh G, Scott S, et al. Highly-resilient, energy-efficient multipath routing in wireless sensor networks[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2001, 5(4): 11-25
- [19] Deb B, Bhatnagar S, Nath B. ReInForM: Reliable information forwarding using multiple paths in sensor networks[C]//Proceedings of 28th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks. 2003
- [20] Felemban E, Lee C G, Ekici E. MMSPEED: multipath Multi-SPEED protocol for QoS guarantee of reliability and Timeliness in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(6): 738-754
- [21] Yahya B, Ben-Othman J. REER: Robust and energy efficient multipath routing protocol for wireless sensor networks[C]//Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference. 2009
- [22] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networking[C]//Proceedings of ACM MobiCom'00. 2000: 56-67
- [23] Lou W. An efficient N-to-1 multipath routing protocol in wireless sensor networks[C]//Proceedings of IEEE international Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS). Washington, DC, November 2005
- [24] Vuran M C, Akyildiz I F. Error control in wireless sensor networks: a cross layer analysis[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2009, 17(4): 1186-1199
- [25] Wen H, Lin C, Ren F Y, et al. Retransmission or redundancy: Transmission reliability study in wireless sensor networks[J]. Science China Information Sciences, 2012, 55(4): 1-10
- [26] Yahya B, Ben-Othman J. Relax: an energy efficient multipath routing protocol for wireless sensor networks[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications. 2010
- [27] Courtade T, Wesel R. Optimal allocation of redundancy between packet-level erasure coding and physical-layer channel coding in fading channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(8): 1-9
- [28] Kwon H, et al. A cross-layer strategy for energy-efficient reliable delivery in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(12): 3689-3699
- [29] Ahlswede R, et al. Network information flow [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216
- [30] Ghaderi M, Towsley D, Kurose J. Reliability gain of network coding in lossy wireless networks[C]//Proceedings of the 27th IEEE Conference on Computer Communications. 2008
- [31] Chi K, Jiang X, Horiguchi S. Network coding-based reliable multicast in wireless networks[J]. Computer Networks, 2010, 54(11): 1823-1836
- [32] Cai N, Yeung R W. Network coding and error correction[C]//Proceedings the IEEE Information Theory Workshop. 2002
- [33] Koetter R, Kschischang F R. Coding for errors and erasures in random network coding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(8): 3579-3591
- [34] 张书奎, 樊建席, 崔志明. 无线传感器网络中可靠的数据协作传输机制[J]. 通信学报, 2010, 31(11): 30-40
- [35] Yu Rong, Zhang Yan, Song Ling-yang, et al. Joint Optimization of Power, Packet Forwarding and Reliability in MIMO Wireless Sensor Networks[J]. Mobile Networks and Applications, 2011, 16(6): 1-11
- [36] Stojmenovic I, Lin X. Power-aware localized routing in wireless networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2001, 12(11): 1122-1133
- [37] Gomez J, Campbell A T, Naghshineh M, et al. Conserving transmission power in wireless ad hoc networks[C]// Network Protocols, 2001. Ninth International Conference on. IEEE, 2001: 24-34