

异构无线传感器网络基于区分服务的网络编码协议

缪静文^{1,3} 陶雯² 白光伟^{1,3} 曹磊³

(南京工业大学计算机科学与技术系 南京 210009)¹ (江苏教育学院数学与信息技术学院 南京 210013)²
(南京大学计算机软件新技术国家重点实验室 南京 210093)³

摘要 通过将来自多条链路的数据包融合为一个单独的编码信息流进行传输,网络编码技术能够显著地提高无线多跳网络的容量。提出一种基于区分服务的异构无线传感器网络编码协议(DBNC)。协议的核心思想是周期性地计算节点剩余能量的均值和标准差,对节点进行动态分类。在此基础上,将服务质量需求映射到网络编码协议中。为此,引入能量感知编码包转发机制,以高效地利用节点的能量;另一方面,设计多优先级数据包调度策略,目的是创造更多的编码机会。仿真结果表明,DBNC不仅可以保障数据的可靠传输,而且可有效地减少低能量节点的能耗,从而延长网络的生命周期。

关键词 异构无线传感器网络,无线网络编码,区分服务,能量感知

中图分类号 TP393 文献标识码 A

DiffServ-based Network Coding Protocol in Heterogeneous Wireless Sensor Networks

MIAO Jing-wen^{1,3} TAO Wen² BAI Guang-wei^{1,3} CAO Lei³

(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)¹

(College of Mathematics and Information Technology, Jiangsu Institute of Education, Nanjing 210013, China)²

(State Key Laboratory of Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)³

Abstract By combining multiple packets in a single broadcast transmission, network coding can greatly improve the capacity of multi-hop wireless networks. This paper proposed a diffserv-based network coding protocol (DBNC) for heterogeneous wireless sensor networks. The main idea is to compute periodically the mean and standard deviation of residual energy of nodes, together with a dynamic node classification. On this basis, the QoS requirements are mapped to network coding metrics. For this purpose, we introduced an energy-aware forwarding mechanism for coded-packet. Meanwhile, a multi-priority packet scheduling strategy was designed to increase the opportunities for coding. Our simulation results demonstrate that DBNC achieves a significant improvement in energy efficiency, as well as in reliability of data transmission.

Keywords Heterogeneous wireless sensor networks, Wireless network coding, DiffServ, Energy-aware

1 引言

无线传感器网络是一个动态的环境,受周围环境、传输距离、传输速率、能量等多方面的影响,在该环境下提供可靠的数据传输是一个挑战性问题^[1]。异构传感器网络(heterogeneous sensor networks)是指由多种不同类型的传感器节点构成的网络^[2]。异构网络中,能量的异构特征是普遍存在的。一方面,在原有节点的基础上布置的新传感器节点通常拥有更多的能量;另一方面,链路失效以及区域的地形特点等随机事件使得各个节点不可能均等地使用其能量^[3]。近年来,研究人员开始考虑将网络编码技术运用到多跳无线网络中,在

提高网络吞吐量的同时节省能耗^[4]。

无线网络编码技术是学术界的研究热点之一^[5-9]。2000年 Ahlswede 等第一次系统地提出了网络编码的思想^[9],即网络中的节点不再仅仅具有存储转发的功能,而是允许节点来自不同链路的数据包进行编码组合后再发送,从而减少传输次数,有效地提高网络吞吐量。在无线网络编码的研究中,代表性的工作是 Katti 等人提出的 COPE 协议^[5]。其工作原理如图 1 所示,节点 X 需要将数据包 P_1 发送到节点 Y,节点 A 需要将数据包 P_2 发送到节点 B。使用传统方法,中间节点 O 分别转发数据包 P_1 和 P_2 ,完成上述过程需要 4 次传输;若使用 COPE 协议,节点 O 收到数据包 P_1 和 P_2 后进行异或操

到稿日期:2012-01-20 返修日期:2012-04-23 本文受国家自然科学基金项目(60673185,61073197),江苏省自然科学基金项目(BK2010548),江苏省科技支撑计划(工业)项目(BE2011186),江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX11_0262),南京大学计算机软件新技术国家重点实验室开放课题(KFKT2010B08)资助。

缪静文(1988—),女,硕士生,主要研究方向为无线网络编码、无线多媒体传感器网络,E-mail:xx.miaojingwen@163.com;陶雯(1979—),女,硕士,讲师,主要研究方向为无线网络协议;白光伟(1961—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究方向为移动互联网、无线传感器网络、网络体系结构和协议、网络系统性能分析和评价、多媒体网络服务质量等;曹磊(1980—),男,博士生,CCF 会员,主要研究方向为无线网络编码、移动互联网、无线传感器网络等。

作,得到编码包 $P_1 \oplus P_2$, 然后进行广播, 节点 Y 收到编码包后进行异或操作 $P_2 \oplus (P_1 \oplus P_2)$, 得到数据包 P_1 , 节点 B 收到编码包后进行异或操作 $P_1 \oplus (P_1 \oplus P_2)$, 得到数据包 P_2 , 完成上述过程仅需 3 次传输。

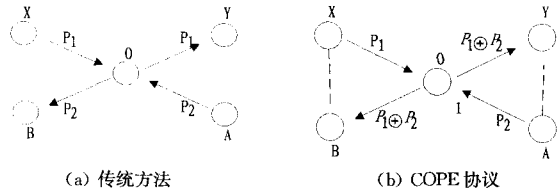


图 1 传统方法与 COPE 协议的比较

我们在研究中发现, 现有的无线机会网络编码机制大多没有考虑节点能量的高效利用, 容易导致编码节点因负载过重而过早死亡。针对这一问题, 本文提出一种适合异构无线传感器网络的、基于区分服务的网络编码协议 DBNC, 该协议周期性地计算节点剩余能量的均值和标准差, 对节点进行动态分类。在此基础上, 将服务质量需求映射到网络编码协议中。一方面, 引入能量感知编码包转发机制, 以高效地利用节点的能量; 另一方面, 设计多优先级数据包调度策略, 目的是创造更多的编码机会。仿真结果表明, DBNC 不仅保障了数据的可靠传输, 而且有效地减少了低能量节点的能耗, 从而延长了网络的生命周期。

本文第 2 节深入分析基于竞争的机会网络编码存在的问题; 第 3 节提出基于区分服务的网络编码机制 DBNC, 详细论述其设计; 第 4 节通过仿真的方法对协议的性能进行分析与评价; 最后总结全文。

2 问题的提出

如上所述, 现有的无线网络编码方法并没有充分考虑无线传感器网络的固有特性, 容易导致编码节点能量消耗过快, 过早死亡, 形成能量空洞。本节首先深入研究具有代表性的无线网络编码协议, 在此基础上对存在的问题进行总结和归纳。

Zhang 等人提出一种基于竞争的机会网络编码协议 BEND^[10]。如图 2(a) 所示, 根据事先确定的路径, 源节点 X 要将数据包 p_1 通过节点 A 传输到目的节点 Y , 源节点 U 需要将数据包 p_2 通过节点 C 传输到目的节点 V 。根据无线信道信号广播式传送的特点, 中间竞争转发节点 B_1 、 B_2 和 B_3 均可捕捉到数据包 P_1 和 P_2 , 并将其储存于相应的队列中。节点 B_1 、 B_2 和 B_3 根据队列中数据包的类型通过竞争信道的方式进行转发。如图 2(b) 所示, 节点 B_2 优先竞争到信道, 并转发编码包 $P_1 \oplus P_2$, 第二跳节点 V 和 Y 收到编码包后, 使用缓存中的数据可以成功解码。

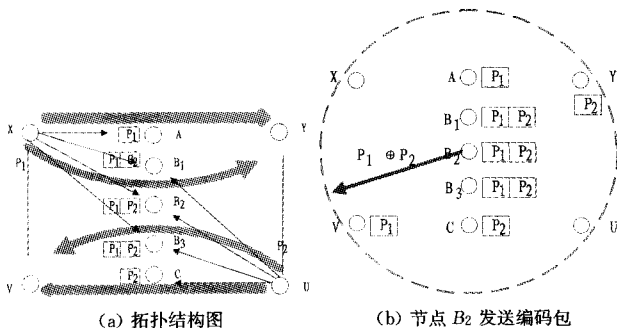


图 2 BEND 的工作原理图

BEND 通过主动创造编码机会, 一定程度上提高了网络的吞吐量。然而, 该协议没有考虑到节点能量的使用效率问题。在异构无线传感器网络中, 节点的初始能量是不同的。在数据包转发概率相同的情况下, 能量较低的编码节点容易因能量耗尽而过早死亡, 形成能量空洞, 从而缩短网络的生命周期。

针对上述问题, 本文提出了一种异构无线传感器网络环境下基于区分服务的网络编码协议 DBNC, 并用 NS2 仿真的方法对其有效性和性能进行了分析与评价。

3 基于区分服务的网络编码协议(DBNC)

本节首先引入网络模型和相关假设, 然后提出一种异构无线传感器网络基于区分服务的网络编码协议(DBNC)。从 3 个方面对其进行描述: 动态能量划分方法、能量感知编码包转发机制和多优先级数据包调度策略。

3.1 网络模型和相关假设

本文采用三级网络结构, 如图 3 所示, 网络拓扑可以由 3 个节点集合 $Tier-1$ 、 $Tier-2$ 和 $Tier-3$ 组成, $Tier-1$ 和 $Tier-3$ 集合中包括源节点和目的节点, $Tier-2$ 集合为竞争转发节点(既是下一跳节点, 又承担其它流竞争转发任务)。这里用 C_j ($j=1, 2, 3, 4, \dots, m$) 表示竞争转发节点, m 表示竞争转发节点的个数。 $Tier-2$ 与 $Tier-1$ 、 $Tier-3$ 之间距离为一跳, 所有集合中的节点都在彼此的覆盖范围之内, 源节点发送的信息包可以被传输半径内所有的节点接收。根据无线信道信号广播式传送的特点, $Tier-2$ 中的节点能够捕捉到源节点发送的数据包。设当前网络存在 M 对可编码流, 每对可编码流 $F_i = (f_{i,1}, f_{i,2})$ 包括 2 个源节点 $S_{i,1}$ 和 $S_{i,2}$, 2 个目的节点 $D_{i,1}$ 和 $D_{i,2}$, 至少 1 个竞争转发节点 C_j , 且满足如下条件:

- 1) $f_{i,1}$ 的源节点是 $f_{i,2}$ 的目的节点, 或者是 $f_{i,2}$ 目的节点的其中一个邻居节点。
- 2) $f_{i,2}$ 的源节点是 $f_{i,1}$ 的目的节点, 或者是 $f_{i,1}$ 目的节点的其中一个邻居节点。

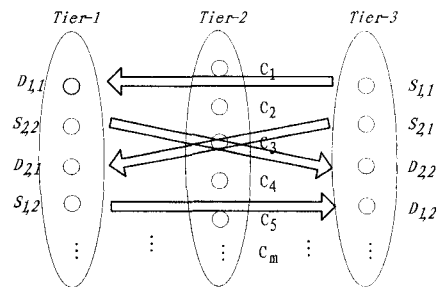


图 3 网络结构

本文假设 N 个传感器节点随机均匀分布在三级拓扑结构内, 并假设该网络具有如下性质:

- 1) 无线传感器节点部署后不再移动。
- 2) 节点能量异构, 且不能补充。

无线传感器网络能量消耗主要取决于数据发送和传输。本文将在在此基础上对基于区分服务的网络编码协议(DBNC)的吞吐量以及能耗进行分析。

3.2 动态能量划分方法

$Tier-2$ 中的节点负责数据的机会转发, 如何在保障数据可靠传输的同时, 高效地利用节点的能量至关重要。DBNC 协议的执行过程中, 各节点需要保存一张能量状态表,

网络中的每个节点 ID 都用全网唯一的整数值来标识。节点需要执行两个过程:1)各节点记录周围有哪些节点与其竞争转发(包括哪些数据流);2)收集这些节点的能量信息,用于更新能量状态表。

各节点实时更新能量状态表。根据能量状态表,节点周期性地计算所有竞争转发节点剩余能量的平均值和标准差。用 $E(C_j)$ 表示竞争转发节点 C_j 当前的剩余能量。

这里用 E_a 表示能量状态表中节点的平均剩余能量:

$$E_a = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m E(C_j) \quad (1)$$

计算能量状态表中节点剩余能量的标准差 E_{sd} , 记为:

$$E_{sd} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (E(C_j) - E_a)^2} \quad (2)$$

定义 1(能量阈值 E_1) 根据所得到的节点剩余能量的均值 E_a 和标准差 E_{sd} , 计算节点剩余能量的 E_1 值, 记为:

$$E_1 = \alpha(E_a + E_{sd}) \quad (3)$$

式中, α 是一个小于 1 的常数, 可以随当前网络状况的变化做出相应的调整。

引理 1 在任意时刻, 总存在剩余能量值大于或等于能量阈值 E_1 的节点。

证明: 不妨设一组节点的剩余能量为:

$$E(C_1) \leq E(C_2) \leq E(C_3) \leq \dots \leq E(C_m)$$

节点剩余能量的均值 E_a 为:

$$E_a = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m E(C_j)$$

节点剩余能量的标准差 $D(E_j)$ 为:

$$E_{sd} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (E(C_j) - E_a)^2}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{m} [(E(C_1) - E_a)^2 + (E(C_2) - E_a)^2 + \dots + (E(C_m) - E_a)^2]}$$

显然有,

$$E_{sd} \leq$$

$$\sqrt{\frac{1}{m} [(E(C_m) - E_a)^2 + (E(C_m) - E_a)^2 + \dots + (E(C_m) - E_a)^2]}$$

$$= E(C_m) - E_a$$

故

$$E_{sd} + E_a \leq E(C_m)$$

即

$$E_1 \leq E(C_m)$$

综上所述, 这组剩余能量值中总存在大于或等于能量阈值 E_1 的值, 因此, 总存在剩余能量大于或等于这个能量阈值 E_1 的竞争转发节点。

定义 2 对于竞争转发节点 C_j ($j=1, 2, 3, 4, \dots, m$), 有 $E(C_j) \geq E_1$, 那么该节点 C_j 属于集合 M_1 。集合 M_1 中的元素为剩余能量大于或等于 E_1 的节点。集合 M_1 表示为:

$$M_1 = \{C_j | E(C_j) \geq E_1\} \quad (4)$$

根据引理 1 的内容有:

$$M_1 \neq \emptyset \quad (5)$$

即集合 M_1 是非空集合, 在任意时刻总存在节点属于集合 M_1 。

定义 3 对于竞争转发节点 C_j ($j=1, 2, 3, 4, \dots, m$), 有 $E(C_j) < E_1$, 那么该节点 C_j 属于集合 M_2 。集合 M_2 中的元素为剩余能量小于 E_1 的节点。集合 M_2 表示为:

$$M_2 = \{C_j | E(C_j) < E_1\} \quad (6)$$

定义 4(能量阈值 E_2) 根据所得到的节点剩余能量的均值 E_a 和标准差 E_{sd} , 计算节点剩余能量的 E_2 值, 记为:

$$E_2 = E_a - E_{sd} \quad (7)$$

定义 5(低能量节点) 对于任意竞争转发节点 C_j ($j=1, 2, 3, 4, \dots, m$), 有 $E(C_j) < E_2$, 那么该节点为低能量节点。

动态能量划分之后, 各节点进行分布式管理。在此基础上, 提出能量感知编码包转发机制以及多优先级数据包调度策略。

3.3 能量感知编码包转发机制

假设起始时, 节点均参与其它会晤的竞争(转发)。节点 C_j 采用分布式管理, 各节点根据自身所处的集合, 判断是否参与其它会晤的竞争(转发)。由于能量划分是动态的, 因此各节点实时判断是否参加其它会晤的竞争(转发)。节点传输的数据包可分为捕捉的未编码数据包(Overhead Non-Coded Packet, ONCP)、接收到的未编码数据包(Intended Non-Coded Packet, INCP)和编码数据包(Coded Packet, CP)3种。

节点 C_j 设置 1 个 *Flag* 标志位, 表示此节点是否参与其它会晤的竞争(转发), 即是否参与编码数据包(CP)的竞争(转发)。当节点 $C_j \in M_1$ 时, 参与编码数据包(CP)的竞争(转发); 当节点 $C_j \in M_2$ 时, 不参与编码数据包(CP)的竞争(转发)。Flag 标志位表示为:

$$Flag = \begin{cases} 1, & C_j \in M_1 \\ 0, & C_j \in M_2 \end{cases} \quad j=1, 2, 3, \dots, m \quad (8)$$

引理 2 在任意时间段, 总存在节点可参与其它会晤的竞争(转发)。

证明: 根据引理 1 的内容, 任意时间段总存在剩余能量值大于或等于能量阈值 E_1 的节点, 集合 M_1 非空, 即总存在 *Flag* 为 1 的竞争转发节点, 因而在任意时间段总存在节点可参与其它会晤的竞争(转发), 即存在节点可转发编码数据包(CP), 从而保障数据的可靠传输。

各节点进行分布式管理, 采用的能量感知编码包转发机制为:

1) 节点 $C_j \in M_2$ 时, 节点的剩余能量相对较少 (*Flag* = 0)。此节点只转发捕捉的未编码数据包(ONCP)和接收到的未编码数据包(INCP), 不参与其它会晤的竞争(转发), 即不参与编码数据包(CP)的转发。

2) 节点 $C_j \in M_1$ 时, 节点的剩余能量相对充足 (*Flag* = 1)。此节点可参与其它会晤的竞争(转发), 从而均可参与捕捉的未编码数据包(ONCP)、接收到的未编码数据包(INCP)和编码数据包(CP)的转发。

基于区分服务的网络编码协议 DBNC 不仅可以保障数据的可靠传输, 而且可有效地减少低能量节点编码包的传输次数, 防止单个节点因负载过重而过早死亡, 延长网络的生命周期。

3.4 多优先级数据包调度策略

为了实现编码机会最大化, 这里对 BEND 的策略进行了修改, 引入了多优先级数据包调度策略。该策略借鉴了 IEEE 802.11e 中改进的 EDCF 机制, 为不同类型的数据包分配不同的优先级。节点发送数据包时, 首先根据数据包优先级等待相应的 AIFS 时间间隔。之后, 节点进入退避阶段, 竞争窗口值在 (0, CW) 间选取, 节点竞争信道时首先设置竞争窗口

CW 初始值为 CW_{\min} (这是最小值), 如果传输失败, 竞争窗口才会加倍, 直到最大竞争窗口值 CW_{\max} 。

该策略通过设定不同的 AIFS 和竞争窗口值来设定数据包优先级。 CW_{\min} 、 CW_{\max} 和 AIFS 时间间隔越小, 数据包的优先级就越高。节点在发送高优先级的数据包时, 有更高的概率接入信道。DBNC 结合数据包的类型和节点的剩余能量设定不同的竞争窗口值。如表 1 所列, 传输 CP 时, 具有最高的优先级; 传输 ONCP 时, 具有最低的优先级; 传输 INCP 时, $E(C_j) \in [E_1, \infty)$ 的节点比 $E(C_j) \in (0, E_1)$ 的节点的数据包接入优先级高。

表 1 多优先级数据包调度策略

数据包类型	节点能量	CW_{\min}	CW_{\max}	AIFS
ONCP	$E(C_j) \in (0, \infty)$	99	2047	$7 \times \text{slot time} + \text{SIFS}$
INCP	$E(C_j) \in (0, E_1)$	63	1023	$4 \times \text{slot time} + \text{SIFS}$
	$E(C_j) \in [E_1, \infty)$	41	1023	$3 \times \text{slot time} + \text{SIFS}$
CP	$E(C_j) \in [E_1, \infty)$	9	63	$2 \times \text{slot time} + \text{SIFS}$

该策略在保障数据可靠传输的同时, 可进一步有效地减少低能量节点的能耗, 防止单个节点因能量耗尽而过早死亡, 从而延长网络的生命周期。

4 性能分析与评价

下面采用仿真的方法对协议性能进行分析, 首先介绍仿真环境以及实验设计, 然后对实验结果进行分析和讨论。

4.1 实验设计

我们在 NS2 平台中实现了基于区分服务的网络编码协议 DBNC, 对其进行全面的性能分析与评价, 并将其与 BEND 和 COPE 协议进行比较。模拟实验所用的场景为三级拓扑结构, $Tier-2$ 与 $Tier-1$ 、 $Tier-3$ 的间隔均为 200m, $Tier-2$ 集合中的节点数为 8, 节点均可捕捉到所有源节点发送的数据包, 节点初始能量设置为不同的数值。当节点进入工作状态后, 每发送或接收一次数据包都要消耗能量。实验使用 CBR 数据流, 数据包的大小为 1000byte, 发送开始时间为 220s, 发送时间间隔为 0.01s, 信道速率为 1Mbps, 在可编码流对数分别为 3、4、5 的情况下进行。

本文设计了 2 组实验来分别对 DBNC 进行性能分析。第 1 组实验分析了在不同可编码流对数的情况下, DBNC 运行 100s 的平均网络通信性能, 并与 BEND、COPE 和 802.11 进行比较; 第 2 组实验分析了 DBNC 运行 1200s 的节点能耗的相关数据, 并与 BEND 和 COPE 进行比较。

4.2 结果分析

实验中用成功传输的数据包数量来衡量网络的吞吐量。图 4 给出了第 1 组实验的结果, 仿真时间从 220s 到 320s, 其中, 图 4(a) 比较了 DBNC、BEND、COPE 与 802.11 在可编码流对数分别为 3、4 和 5 的情况下, 网络平均吞吐量的情况。从仿真结果看出, 随着可编码流对数的增加, DBNC 与 BEND 的平均吞吐量明显高于 COPE 与 802.11。在可编码流对数为 5 时, DBNC 的平均吞吐量比 802.11 提高了约 1.9 倍, 比 COPE 提高了约 1.4 倍。DBNC 可以主动获取更多的编码机会, 因此可提高吞吐量。DBNC 的平均吞吐量与 BEND 差不多, 它们均可主动获取更多的编码机会。图 4(b) 比较了各协议下编码包的平均传输总数。从仿真结果看出, BEND 编码包的平均传输总数最多, DBNC 其次, 两者远远多于 COPE。

DBNC 和 BEND 可以主动获取更多的编码机会, 因此其转发的编码包数量更多。图 4(c) 比较了 DBNC、BEND 与 COPE 协议下能量最低节点编码包的平均传输次数。因为 DBNC 采用能量感知编码包转发机制和多优先级数据包调度策略, 降低了低能量节点的编码包发送概率, 所以 DBNC 低能量节点编码包的平均传输次数极少。

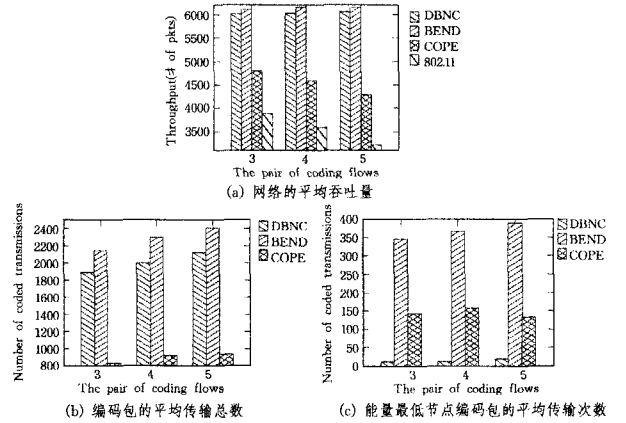


图 4 网络通信性能的比较(实验 1)

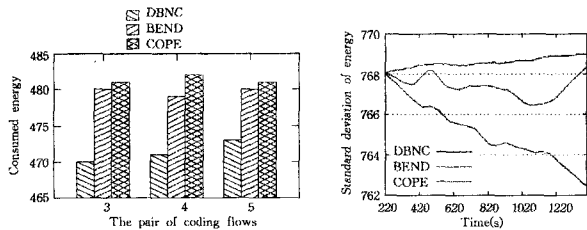
第 2 组实验分析了 DBNC、BEND 与 COPE 节点能耗的相关数据, 仿真时间从 220s 到 1440s。表 2 是各协议下节点剩余能量标准差的减少值, 从多组数据中取其平均值。随着可编码流对数的变化, DBNC 节点剩余能量标准差的减少值约为 4, 而 BEND 与 COPE 的能量标准差处于平稳状态。DBNC 协议因为采用能量感知编码包转发机制和多优先级数据包调度策略, 不仅可以保障数据的可靠传输, 而且可有效地减少低能量节点的能耗, 所以有助于剩余能量标准差的减少, 最终达到节点的能量均衡。BEND 与 COPE 没有考虑节点能量的高效利用, 若低能量节点能量消耗相对过快, 则会导致能量的标准差值增大(这里用负数表示)。

表 2 节点剩余能量标准差的减少值

协议	可编码流对数		
	3	4	5
DBNC	3.62	4.13	3.94
BEND	-0.37	0.20	0.34
COPE	0.14	-0.02	-0.50

图 5 展示了第 2 组实验的结果。如图 5(a) 所示, DBNC 能量最低节点的平均能耗最少, 因为 DBNC 采用能量感知编码包转发机制和多优先级数据包调度策略, 降低了低能量节点的编码包发送概率, 从而有效地降低了低能量节点的能耗。有 4 对可编码流时, 图 5(b) 中各协议选取一组有代表性的标准差值进行跟踪。从仿真结果看出, 随着时间的推移, DBNC 节点能量的标准差逐渐递减, 而 BEND 与 COPE 的标准差处于平稳状态。DBNC 采用能量感知编码包转发机制和多优先级数据包调度策略, 对具有不同初始能量的节点区别对待, 从而有效地降低了低能量节点的能耗, 有助于节点的能量均衡。

观察表 3 的数据可以看出, DBNC 能量最低节点消耗相同能量所需的时间比 BEND 和 COPE 多。这是由于 DBNC 对具有不同能量的节点区别对待, 采用能量感知编码包转发机制和多优先级数据包调度策略, 高效利用了节点的能量, 从而有助于网络生命周期的延长。



(a) 能量最低节点的平均能耗 (b) 4对可编码流时节点能量的标准差值

图5 节点能耗的比较(实验2)

表3 4对可编码流时能量最低节点消耗一定能量的平均时间

单位能量	协议	DBNC	BEND	COPE
100		255.3	250.6	249.7
200		508.9	501.4	499.2
300		764.1	752.1	750.3
400		1016.9	1003.4	999

结束语 为了延长异构无线传感器网络的生命周期,同时保障数据的可靠高效传输,本文提出了一种基于区分服务的网络编码协议(DBNC)。该协议周期性地计算节点剩余能量的均值和标准差,对节点进行动态分类。在此基础上,将服务质量需求映射到网络编码协议中。一方面,引入能量感知编码包转发机制,以高效地利用节点的能量;另一方面,设计多优先级数据包调度策略,目的是创造更多的编码机会。仿真结果表明,DBNC不仅保障了数据的可靠传输,而且有效地减少了低能量节点的能耗,从而延长了网络的生命周期。DBNC与BEND和COPE协议相比具有更好的性能,而且DBNC对异构无线传感器网络环境具有自适应的特点。下一步的工作是研究多媒体传感器网络基于区分服务的网络编码协议。

[1] Akyildiz I, Su W, Sankarasubramanian Y, et al. A survey on sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8):102-114

[2] Duarte-Melo E J, Liu M. Analysis of energy consumption and lifetime of heterogeneous wireless sensor networks[C]//Proceedings of IEEE GLOBECOM, New York, NY, USA, March 2002;21-25

[3] Smaragdakis G, Matta I, Bestavros A. SEP: A stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks [C]//Proceedings of SANPA, Boston, MA, USA, August 2004; 1-11

[4] Keshavarz-Haddad A, Riedi R. Bounds on the benefit of network coding; throughput and energy saving in wireless networks[C]// Proceedings of IEEE INFOCOM, Phoenix, AZ, USA, April 2008;376-384

[5] Katti S, Rahul H, Hu W, et al. XORs in the air; practical wireless network coding[C]//Proceedings of ACM SIGCOMM, Pisa, Italy, September 2006;243-254

[6] 陈贵海,李宏兴,等.多跳无线网络中基于网络编码的多路径路由[J]. 软件学报,2010,21(8):1908-1919

[7] Matsuda T, Noguchi T, Takine T. Survey of Network Coding and Its Applications[J]. IEICE Transactions on Communications, 2011, E94, B(3):698-717

[8] 夏卓群,陈志刚,等.无线 Mesh 网中网络编码的研究进展[J]. 计算机工程与应用,2010,46(12):1-4

[9] Ahlswede R, Cai N, Li S R, et al. Network Information Flow [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1206

[10] Zhang J, Chen Y P, Marsic I. MAC-layer Proactive Mixing for Network Coding in Multi-hop Wireless Networks[J]. Computer Networks, 2010, 54(2):196-207

(上接第12页)

[18] Da Dean J, Dean J G S, Ghemawat S. MapReduce: Simplified data processing on large clusters[J]. Communications of the ACM, 2008, 51(1):107-113

[19] Sottara D, Mello P, Proctor M. Adding Uncertainty to a Rete-OO Inference Engine[C]//LNCS 5321; Proc. Int'l Symp. Rule Representation, Interchange and Reasoning on the Web (RuleML2008). Berlin; Springer, 2008;104-118

[20] Kim M, Kim M. Fast Service Selection using Rete Network in Dynamic Environment[C]//Proc of World Conference on Services 2009. NJ; IEEE, 2009; 85-92

[21] Özacar T, Öztürk Ö, Osman ünaler M. Optimizing a Rete-based Inference Engine using a Hybrid Heuristic and Pyramid based Indexes on Ontological Data[J]. Journal of Computers, 2007, 2(4):41-48

[22] Luger G F, Chakrabarti C. Knowledge-Based Probabilistic Reasoning from Expert Systems to Graphical Models [OR]. <http://www.cs.unm.edu/~luger/23-Luger-Chakrabarti.pdf>, 2010-06-09

[23] Bouaud J. TREE: The heuristic driven join strategy of a RETE-like matcher[C]//Proc of Thirteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence. New York; ACM, 1993;496-503

[24] Oguz G, Proctor M. Decision Tree Learning for Drools[OR]. ht-

[tp://infoscience.epfl.ch/record/126292/files/oguz-thesis_final.pdf?version=1](http://infoscience.epfl.ch/record/126292/files/oguz-thesis_final.pdf?version=1), 2008-04-07

[25] Nickles M, Sottara D. Approaches to Uncertain or Imprecise Rules-A Survey[C]//LNCS 5858; Proc of RuleML2009. Berlin; Springer, 2009;323-336

[26] Xiao Ding, Zhong Xiao-an. Improving Rete Algorithm to Enhance Performance of Rule Engine Systems[C]//Proc of 2010 International Conference on Computer Design and Applications (ICDDA 2010). NJ; IEEE, 2010;572-575

[27] Stolfo S J. Five Parallel Algorithms for Production System Execution on the DADO machine[C]//Proc. of National conference of A. I. AAAI, 1984;300-307

[28] Berstel B. Extending the RETE Algorithm for Event Management[C]//Proceedings of the Ninth International Symposium on Temporal Representation and Reasoning (TIME'02). Washington; IEEE Computer Society, 2002;49-52

[29] Stolfo S T, Shaw D E. DADO: A Tree-structured Machine for Production Systems[C]//Proc. of National conference of A. I. AAAI, 1982;242-246

[30] Cao Bin, Yin Jian-wei, Zhang Qi, et al. A MapReduce-based architecture for rule matching in production system[C]//Proc of the 2nd IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science. NJ; IEEE, 2010;790-796