

一种相邻节点协作的无线传感器网络可靠传输方案

方维维¹, 钱德沛^{1,2}, 刘轶¹

(1. 北京航空航天大学中德软件技术联合研究所, 100083, 北京;

2. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对无线传感器网络中不可靠的通信链路引发传输效率下降的问题, 提出了一种基于相邻节点协作的无线传感器网络可靠传输方案(NNCS). 该方案利用无线信道的广播特性, 通过选择成功监听到数据传输的相邻节点来承担协作传输任务(重传或转发), 以降低重传次数, 提高传输效率. 在方案中, 相关节点根据自身传输能力发送数据应答以竞争协作机会, 同时通过信道监听避免发生竞争冲突. 实验结果表明, 较之传统重传方案, NNCS 能够以更少的传输消耗达到更高的传输成功率, 并有效降低了端到端的传输时延.

关键词: 无线传感器网络; 协作通信; 可靠传输

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)02-0033-05

Reliable Delivery Scheme for Wireless Sensor Networks Based on Cooperation among Neighboring Nodes

FANG Weiwei¹, QIAN Depei^{1,2}, LIU Yi^{1,2}

(1. Sino-German Joint Software Institute, Beihang University, Beijing 100083, China; 2. School of

Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To solve the transmission efficiency degradation problem in wireless sensor networks (WSN) due to unreliable communication links, a novel scheme NNCS that is based on cooperation among neighboring nodes is proposed for reliable data delivery in WSN. The NNCS exploits the broadcast feature of wireless channels, and passes the retransmission or forwarding responsibility to a neighboring node that has successfully snooped the data transmission, so as to achieve better transmission efficiency by reducing retransmission times. In the NNCS, related nodes compete for cooperation tasks by sending data acknowledgement according to their transmission capabilities, and snoop the channel activities to avoid interference in competition. The simulation results show that, compared with the traditional retransmission-based scheme, the NNCS can achieve a higher transmission success probability with lower cost, and effectively reduce the end-to-end transmission delay.

Keywords: wireless sensor network; cooperative communication; reliable delivery

无线传感器网络(WSN)由大量具备数据处理能力和通信能力的传感器节点组成, 用于感知和采

集网络覆盖范围内监测对象的相关信息, 并以短距离无线多跳的通信方式将监测数据发送给网关进行

分析处理^[1].已有的 WSN 平台运行结果^[2]表明,较之其他无线通信系统,WSN 的链路质量比较差,链路的丢包率甚至高达 50% 以上.因此,提供有效的控制机制,保证网络中可靠的端到端数据传输,是无线传感器网络研究中需要解决的一个关键问题.

现有 WSN 链路层的可靠保证机制主要分为 2 类:数据重传和前向纠错(FEC).在链路质量较差的情况下,数据重传往往需要反复进行很多次才能成功,前向纠错则要求在数据发送前对传输信道的质量进行最坏估计以增加有效的冗余编码信息.这 2 种方法都给资源受限的传感器节点带来很大的能耗,降低了网络的使用寿命^[3].鉴于此,CBF 协议^[3]引入了协作通信的思想,利用 WSN 无线信道的广播特性,将每跳节点及其相邻节点组织成簇进行传输协作,以增强传输可靠性,进一步提高传输效率.

本文在分析 CBF 协议不足的基础上,提出并验证了一种相邻节点协作的可靠传输方案(NNCS).

1 问题描述

在 WSN 数据传输过程中,传输距离、多径衰落和信号干扰等因素都会降低包的成功接收率.已有研究给出如下结论^[4]:给定发送功率 P_t ,当接收节点距发送节点的距离为 d 时,无线信号的信噪比为

$$\gamma(d) = P_t - P_L(d) - P_n \quad (1)$$

式中: P_n 为噪声本底;

$$P_L(d) = P_L(d_0) + 10n\lg(d/d_0) + X_\sigma \quad (2)$$

为链路损耗,其中 d_0 为近地参考距离, n 为路径损耗指数(信号衰减速率), X_σ 为均值为 0、标准差为 σ 的高斯分布随机变量.

在单跳内,接收节点的包成功接收率

$$p = (1 - P_e)^{8f} \quad (3)$$

式中: f 是数据帧长度; P_e 是位错误率. P_e 的值与调制方式相关,对于采用非相干频移键控(FSK)调制方式的 Mica2 节点^[5],有

$$P_e = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{\gamma(d)}{2} \frac{B_n}{R}\right) \quad (4)$$

对于采用四相相移键控(QPSK)调制方式的 Micaz 节点^[5],则有

$$P_e = Q\left(\left(2\gamma(d) \frac{B_n}{R}\right)^{1/2}\right) \quad (5)$$

式中: $Q(\cdot) = \int_x^\infty (2\pi)^{-1/2} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$; B_n 是噪声带宽; R 是数据传输率.

从式(1)~式(5)可得到如下 2 个基本结论.

结论 1 在噪声功率一定的情况下,距离发送节点

越近的节点,接收信号的功率越强,信噪比越大,包成功接收率就越高.考虑到各种负面因素的影响,包成功接收率并不完全随距离的增加而减小,它也具有一定的突发性.

结论 2 在没有纠错机制的条件下,帧的长度越长,其传输出错而被丢弃的可能性越大.因此,由介质访问控制(MAC)层发出的请求发送(RTS)、允许发送(CTS)、确认(ACK)等控制帧出错丢弃的概率要远远小于包含一定长度的监测信息的数据帧.

1.1 基本思想

如上所述,WSN 中的无线链路质量直接影响着数据传输的可靠性.因此,WSN 的路由协议在考虑传输路径跳数的同时,也要尽可能选择质量相对较好的链路进行数据转发.链路质量可以通过多种方式估计和表征,如节点通过监听邻近区域内无线信道中传输包序号的连续性来统计接收率,或使用通信芯片支持的链路质量指示器(LQI)参数等.

如图 1 所示,采用这种路由方式的传输路径为 $A \rightarrow B \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G$.以 A 和相邻的 B 、 C 、 D 为例,若先选择 C ,虽然 AC 间距比 AB 间距小,但很可能会增加传输路径跳数($A \rightarrow C \rightarrow B$)或导致下一跳选择质量很差的链路进行传输($A \rightarrow C \rightarrow E$);若先选择 D ,有可能会减少路由跳数,但 AD 间的链路质量非常差,易引发丢包.

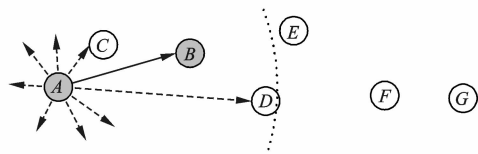


图 1 数据传输示例

在选择路由时,尽管 C 和 D 作为 A 的下一跳并不合适,但由于 WSN 无线信道的广播特性,使得 A 在将数据包转发给 B 时,相邻的 C 和 D 也有成功接收该数据包的可能性.如果恰好 C 接收成功而 B 失败且链路 CB 质量优于 AB ,那么由 C 替代 A 来重传该数据包将会提高重传的成功概率;如果 D 接收成功,无论 B 收到与否,由 D 替代 B 来转发,将有可能减少路由跳数($A \rightarrow D \rightarrow F \rightarrow G$).这 2 种由相邻节点协助进行传输的方式,能进一步提高传输的成功概率和传输效率.

1.2 CBF 协议

CBF 协议以路由路径上的每个转发节点为簇首建立相邻节点簇.在每次传输前,簇首为本簇内符合协作条件的节点分配固定时隙.协作节点通过监

听信道,尝试获取簇首接收的数据包.尝试成功,该节点在自身时隙内向簇首发送 RTS,请求协作重传或者协作转发,而簇首通过回应 CTS 接受请求.在图 1 中, B 可以作为簇首接受来自 C 、 D 的协作请求.

CBF 协议的主要缺点是:①要求簇首能够获知数据包发送情况,以便及时分配时隙;②簇首用于簇内协作管理的开销较大;③簇首向簇内节点发送时隙分配结果时也受到链路质量制约;④使用 RTS/CTS 进行协商易引发对正常数据传输流程(RTS/CTS/DATA/ACK)的干扰;⑤簇首接受协作请求时未考虑到请求节点的能耗情况.

2 NNCS 方案设计

2.1 相关定义

本文分别使用 s 、 r 和 u 表示单跳范围内的发送节点、接收节点和网关, p_{ij} 表示从节点 i 到节点 j 的单向链路包成功接收率, d_{ij} 表示 i 与 j 的间距.

定义 1 在单跳内,能够协助 s 向 r 进行数据包重传的节点 q 称为重传协作节点,满足: q 成功接收 s 发送给 r 的数据包; $p_{qr} > p_{sr}$ 且 $d_{qr} < d_{sr}$. q 的集合记为 Q .

定义 2 在单跳内,能够替代 r 进行数据包下一跳转发的节点 t 称为转发协作节点,满足: t 是 r 的相邻节点,且 t 成功接收到 s 发送给 r 的数据包, $d_{tu} < d_{ru}$. t 的集合记为 T .

定义 3 在单跳内,一次传输过程中的接收节点和所有协作节点统称为协作相关节点.

定义 4 在单跳内发生的一次数据传输中,如果 $T \neq \emptyset$,可以选择 $t \in T$ 替代 r 进行协作转发;如果 r 没有收到数据包,而 $Q \neq \emptyset$,则可以选择 $q \in Q$ 替代 s 进行协作重传;如果所有协作相关节点都未收到数据包,则由 s 进行重传.协作选择结果如表 1 所示.

表 1 协作选择结果

$t \in T$	r	$q \in Q$	结果
Y	Y/N	Y/N	协作转发
N	Y	Y/N	接收节点转发
N	N	Y	协作重传
N	N	N	传输失败, s 向 r 重传

注: Y 和 N 分别表示接收成功和失败.

2.2 NNCS 方案

为了协调节点间的传输协作, NNCS 方案对基于载波侦听多路访问/冲突避免 (CSMA/CA) 的

MAC 协议^[5]进行了扩展,图 2 给出了 MAC 层传输的时序流程.

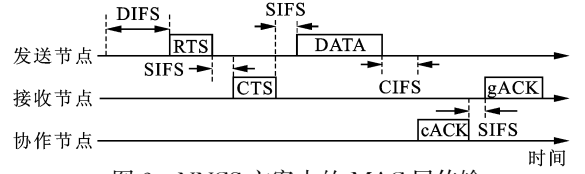


图 2 NNCS 方案中的 MAC 层传输

NNCS 方案将原 MAC 协议^[5]中 DATA 与 ACK 之间的短帧间间隙(SIFS)扩展为竞争帧间间隙(CIFS).协作相关节点会根据自身各相关参量计算各自的 CIFS 值(S_{CIFS}),这样在路由、能量等方面处于相对较优状态的节点将获得更短的 CIFS 竞争时隙.同时,根据 MAC 协议^[5]规定的冲突避免原则,方案必须保证 S_{CIFS} 小于分布式的帧间间隙(DIFS)值(S_{DIFS}),否则将会引发竞争冲突.因此,结合节点的协作规则,本文设计的不同节点 CIFS 的计算方式如下.

(1) 对于节点 $t \in T$,有

$$S_{CIFS_t} = W_t S_{SIFS}$$

$$W_t = [W_r M + W_e(1 - e/E) + W_v V] \quad (6)$$

式中: M 为路由优先参量, $M < 1$, 根据网络层的路由协议, M 取值可采用不同方式,如支撑树类路由可采用路由代价比等; e 和 E 分别为节点的当前能量和初始能量; V 是 $(0, 1)$ 间的随机数; 权值 W_r 、 W_e 和 W_v 满足 $W_r > W_e > W_v$ 且 $W_r + W_e + W_v = 1$.

(2) 对于接收节点 r

$$S_{CIFS_r} = S_{SIFS} \quad (7)$$

(3) 对于节点 $q \in Q$

$$S_{CIFS_q} = S_{SIFS} + \alpha W_q (S_{DIFS} - S_{SIFS})$$

$$W_q = [W_p(1 - p_{qr}) + W_e(1 - e/E) + W_v V] \quad (8)$$

式中: $\alpha \approx 1$ 且 $\alpha < 1$; W_p 为赋予传输成功率的权值,满足 $W_p > W_e > W_v$ 且 $W_p + W_e + W_v = 1$.

协作相关节点在进行协作操作时,会根据各相关参量的当前值计算产生的新的 CIFS 值,而当 CIFS 计时结束后会立即发送竞争 ACK(cACK),只有最先发送 cACK 的节点才能获得向接收节点请求的机会.为了减少信道竞争和传输消耗,协作相关节点会监听信道,若监听到了其他节点发出的 cACK 及后续的传输活动,将取消自身的发送计划.由式(6)~式(8)可知, $S_{CIFS_t} < S_{CIFS_r} = S_{SIFS} < S_{CIFS_q} < S_{DIFS}$,从而保证了定义 4 中协作规则和 MAC 层冲突避免策略的正常进行.接收节点在收到首个返

回的 cACK 之后,将发送准许 ACK(gACK). gACK 有 2 个作用,一是告知发送节点本次发送的 DATA 已由某个协作相关节点接收,无须再重传;二是准许协作请求,发送请求的节点收到该 gACK 后将会进行协作操作. 为了保证数据传输流程的正常进行,以上协作方式仅用于数据的首次传输,而在数据重传过程中,节点间不进行协作.

NNCS 方案对原 MAC 协议中的 ACK 帧结构^[5]进行了扩充,如图 3 所示,其中 type 为 1 b 的 ACK 类型标识位. 需要说明的是,由于 ACK 帧长度非常短,且发送和接收 cACK 和 gACK 的节点间距相对较小,根据第 1 节结论 2 可知 ACK 帧出错丢弃的概率极低,从而保证了本方案的可行性.

原始 ACK	帧控制	持续时间	接收者地址	帧校验序列		
cACK	帧控制	持续时间	类型	请求者地址	接收者地址	帧校验序列
gACK	帧控制	持续时间	类型	协作者地址	接收者地址	帧校验序列

图 3 NNCS 的 ACK 帧格式与原帧格式对比

鉴于无线信道的广播特性,NNCS 方案会多次使用信道监听来调整节点行为,以进一步保证传输效率,降低传输消耗. 如:协作相关节点对其他节点的 cACK 及后续活动的监听;发送节点若监听到接收节点已将 DATA 转发给其下一跳节点,即 DATA 已经被正确接收,可将 DATA 从重传缓冲区中移除. 参与协作的相关节点的状态转换如图 4 所示.

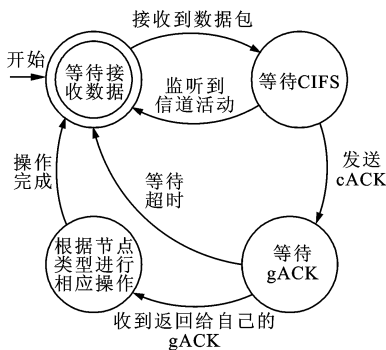


图 4 节点的状态转换图

3 实验与性能分析

本文使用 NS2 模拟器对 NNCS 方案进行了仿真实验,实验中的节点随机均匀地分布在矩形监测区域中,参数设置见表 2.

实验考察了下面 2 个问题.

(1)单跳内不同场景中的传输效率. 对选择 $p_{\text{DATA}}=50\%$ 的接收节点来接收发送节点的 1 000

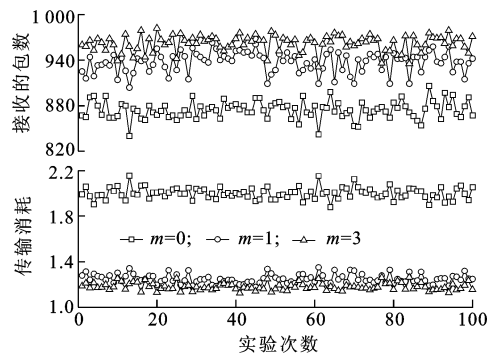
表 2 参数设置

区域/ m^2	100×100	节点数	200
$S_{\text{DIFS}}/\mu\text{s}$	16	地址长度/B	1
$S_{\text{SIFS}}/\mu\text{s}$	8	发送间隔/s	1
带宽/ $\text{kb}\cdot\text{s}^{-1}$	250	数据长度/B	250

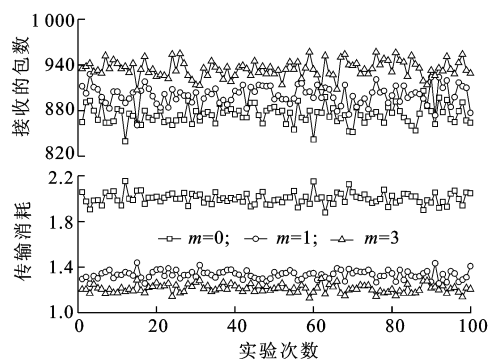
个数据包,该实验分组如下:①存在 $p_{\text{DATA}}\in[70\%, 90\%]$ 的 m 个协作重传节点;②存在 $p_{\text{DATA}}\in[10\%, 30\%]$ 的 m 个协作转发节点;③以上 2 种区间内均有若干节点存在. 实验中,规定发送失败重传次数为 2,传输消耗为数据包总发送次数与被成功接收的独立数据包总数之比^[3]. 实验反复进行 100 次,结果如图 5 所示. 由图 5 可知,在各种场景下,NNCS 方案的传输成功率比传统的数据重传方案($m=0$) 均有不同程度的提高,传输成功率可达 90% 以上. 在图 5a 和图 5b 中,传输消耗为重传方案的 60%~70%; 在图 5c 中,传输消耗仅为重传方案的 50%~55%. 从对比结果还可以看出,增大节点部署密度可以增加可选的协作节点数量,因而可以进一步提高传输效率.

(2)多跳传输过程中的传输效率. 在部署的多跳网络中随机选择一条距离网关 $n(n=3,5,7,\dots,15)$ 跳的传输链路,选择 $p_{\text{DATA}}\approx 50\%$ 的相邻节点作为转发节点,并保证该链路上每个转发节点至少存在 1 或 2 个协作节点,链路末端的源节点向网关发送 1 000 个数据包. 取多次实验平均数据作为结果,如图 6、图 7 所示. 由图 6 可知,随着传输跳数的不断增加,传统重传方案的数据接收率急剧下降,而 NNCS 方案则维持了 90% 以上的数据接收率. 从图 7 可以看出,尽管 NNCS 方案增添了一个 ACK 响应阶段,并扩充了新 ACK 帧结构,但其有效利用协作传输减少了数据重传带来的延迟,因而降低了传输的端到端时延,在跳数较多的链路传输场景中优势更为明显.

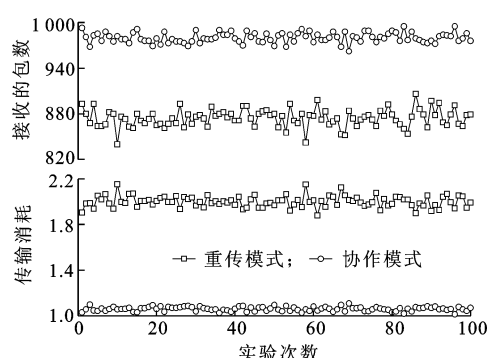
(3)NNCS 和 CBF 方案的分析对比. 根据 2.2 节所述,CBF 协议采用了静态的、集中式的协作方式,簇首节点不能及时有效应对簇内协作节点的状态变化(如移动、失效等),同时簇首节点与簇内节点间状态信息的交换及时隙分配结果的传输都给网络带来了额外的传输消耗. 由于 NNCS 方案采用了动态、分布式的控制方式,其中节点根据当前自身传输能力通过 ACK 应答方式动态地竞争以获取协作机会,所以传输消耗相对较小. 由于文献[3]未给出



(a)重传协作



(b)转发协作



(c)重传+转发协作

图 5 单跳传输的实验结果

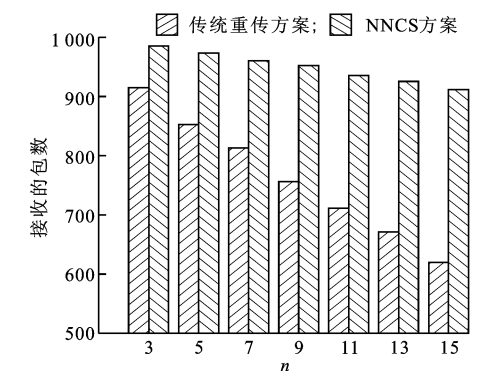


图 6 多跳场景中网关接收的数据包数

CBF 中有关簇内协作的设计细节和实验参数,因此本文未进行该内容的实验比较。

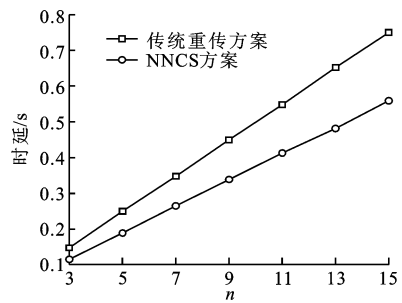


图 7 多跳场景中数据包平均端到端时延

4 结束语

本文提出了一种基于相邻节点协作的无线传感器网络链路传输可靠性保证方案. 该方案通过充分利用无线信道的共享广播特性,并在原有的 MAC 层协议中加入了协作竞争机制,这样原收发节点可在协作节点的协助下进行数据传输. 实验结果表明, NNCS 方案可以有效提高网络中的数据传输成功率,减少数据包重传次数,从而减轻了网络负载,降低了传输消耗和端到端的传输时延.

参考文献:

[1] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291.
REN Fengyuan, HUANG Haining, LIN Chuang. Wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2003, 14(7): 1282-1291.

[2] ZHAO J, GOVINDAN R. Understanding packet delivery performance in dense wireless sensor networks [C]//Proceedings of International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York, USA: ACM, 2003: 1-13.

[3] CAO Qing, ABDELZAHER T, HE Tian, et al. Cluster-based forwarding for reliable end-to-end delivery in wireless sensor networks [C]//Proceedings of International Conference on Computer Communications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 1928-1936.

[4] ZUNIGA M, KRISHNAMACHARI B. Analyzing the transitional region in low power wireless links [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 517-526.

[5] IEEE. IEEE std 802.11a-1999 IEEE standard for wireless LAN medium access control(MAC) and physical(PHY) layer specifications[S]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999.

(编辑 苗凌)