

一种能量高效的线性传感器网络多信道 MAC 协议

童飞^{1,2,3}, 隋儒聪¹, 陈煜¹, 苏恒¹, 刘恒睿¹, 苏上峰¹, 晏宇珂¹

(1. 东南大学网络空间安全学院, 江苏 南京 211189; 2. 江苏省泛在网络安全工程研究中心, 江苏 南京 211189;

3. 网络通信与安全紫金山实验室, 江苏 南京 211111)

摘要: 线性传感器网络 (LSN, linear sensor network) 中的传感器节点因监测区域的线性拓扑而呈线性部署。目前用于 LSN 的基于占空比和流水线调度 (DCPF, duty-cycling and pipelined-forwarding) 的介质访问控制 (MAC, medium access control) 协议虽然能缩减数据包的传播时延并降低网络能耗, 但还存在数据包传输时的竞争、干扰以及能量空洞问题。为此, 针对 LSN 提出基于多信道和冗余节点部署的改进型 DCPF 协议。基于 OPNET 的仿真结果表明, 相较于现有协议, 所提协议在能量使用效率、包到达率、吞吐率、包传输时延等方面具有更好的表现。
关键词: 线性传感器网络; 冗余节点; 传输干扰; 能量空洞; 占空比调度; 多信道

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2022.00302

An energy-efficient multi-channel MAC protocol for linear sensor network

TONG Fei^{1,2,3}, SUI Rucong¹, CHEN Yu¹, SU Heng¹, LIU Hengrui¹, SU Shangfeng¹, YAN Yuke¹

1. School of Cyber Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China

2. Jiangsu Province Engineering Research Center of Security for Ubiquitous Network, Nanjing 211189, China

3. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China

Abstract: Sensor nodes in linear sensor network (LSN) are deployed linearly due to the linear topology of the monitoring area. Most of the state-of-the-art medium access control (MAC) protocols designed for LSN adopted the duty-cycling and pipelined-forwarding (DCPF) schemes. They can reduce data propagation delay and network energy consumption but may still cause issues such as transmission competition, interference, and energy hole. To address these issues, an improved DCPF MAC protocol was proposed based on multiple channels and redundant-node deployment for LSN. The extensive simulations based on OPNET demonstrate that, compared with existing protocols, the proposed protocol shows a better performance in terms of energy efficiency, packet delivery ratio, throughput, and packet transmission latency.

Key words: linear sensor network, redundant node, transmission interference, energy-hole, duty-cycling, multi-channel

0 引言

无线传感器网络 (WSN, wireless sensor network) 由若干传感器组成, 传感器能感知周围的物理环境, 可以部署在人类难以到达或无法长时间值守的区域, 如通过传感器实现水下环境的长时间监

测^[1]。无线传感器网络还能实现数据查询^[2]和空气质量监测^[3]等一系列功能, 其应用在现代社会的不可或缺。传感器节点的部署随实际物理环境的变化而变化。当传感器节点部署在线性的待监测区域 (如铁路、国境线以及石油和天然气管道等) 时^[4-5], 传感器节点构成的网络拓扑呈现一维线性的模式,

收稿日期: 2022-05-09; 修回日期: 2022-09-18

通信作者: 童飞, ftong@seu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61971131)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61971131)

这种网络被称为线性传感器网络 (LSN, linear sensor network) [6-9]。为了完成数据的传输,网络中的各个传感器节点需要将数据逐跳传输至部署在网络一端的汇聚节点,汇聚节点将进一步对数据进行处理。

传感器节点通常通过电池供电,而电池能量有限。因此,为了减少线性传感器网络中传感器节点的能量损耗,有研究人员提出基于占空比调度 (duty-cycling) 的介质访问控制 (MAC, medium access control) 协议 [10-12]。这类协议允许节点在完成数据传输之后进入休眠状态,这样既能减少节点的能量损耗,又能减少节点之间的通信干扰。然而,这种协议会导致睡眠时延 (sleep latency) 问题,因为节点在接收了上一跳节点传输的数据之后,如果下一跳节点处在休眠状态,发送节点需要等待其进入接收数据状态才能传输数据,因此会导致数据发送时延。在每一跳的传输中都会产生这种时延,逐跳累积之后,会导致较大的时延,使得数据无法及时传递到汇聚节点。为了解决睡眠时延问题,目前广泛采用了基于占空比调度和流水线传递 (DCPF, duty-cycling and pipelined-forwarding) 的 MAC 协议,该类协议在占空比的基础上引入了流水线传输模式,节点在接收到上一跳转发的数据之后,其下一跳节点马上进入工作模式,这样节点能迅速将数据传递给下一跳节点,大大缩减数据包传输时延。

然而,DCPF 协议存在两个问题。首先,DCPF 协议会根据节点距离汇聚节点的跳数,为节点划分等级,处在同一等级的各个节点会在相同的时间进入数据传输状态或休眠状态,这些节点在转发数据过程中存在相互竞争和干扰。此外,由于数据在线性传感器网络中向汇聚节点逐跳传输,节点需要转发从其他节点接收的数据和从物理环境感知的数据,因此,越靠近汇聚节点的传感器节点耗能越快,从而越早因能量耗尽而失效,进而导致网络的能量空洞 (energy hole) 问题。为了缓解能量空洞问题,已有工作提出了基于冗余节点的线性传感器网络 MAC 协议 (RDCPF, redundancy-based duty-cycling pipelined-forwarding) [13],但是该协议没有考虑处在相同状态的节点在转发数据过程中的相互竞争和干扰问题。

针对上述两个问题,本文提出了一种改进的 DCPF 协议——基于冗余节点部署,以及占空比和流水线调度的线性传感器网络多信道 MAC 协议

(MRPDC, a multi-channel MAC protocol for LSN based on redundant node deployment plus pipelined and duty-cycled scheduling)。该协议以部署冗余节点为代价,避免感知节点过多参与数据转发,从而使汇聚节点附近的能量空洞问题得到缓解,并借助正交信道和流水线调度来避免数据传输过程中节点间的传输竞争和干扰问题。所提协议中的冗余节点仅用作中继节点进行数据转发,因而不需要为其配备传感器设备,价格相对低廉。基于网络仿真软件 OPNET 的仿真结果表明,所提协议相较于现有协议,在能量使用效率、包到达率、吞吐率、包传输时延等方面具有较优的表现。

1 相关工作

1.1 线性传感器网络 MAC 协议

目前,由于对线性环境监测的广泛需求,针对 LSN 数据传输的 MAC 协议设计与实现得到了研究人员的广泛关注。其中,基于占空比和流水线调度的 DCPF 协议在近年来被广泛关注。

Singh 等 [14] 提出了一个用于多跳线性无线传感器网络的联合路由和 MAC 协议 (JRAM, joint routing and MAC protocol) 的性能分析模型。使用该模型根据数据包到达率 (PDR, packet delivery ratio)、传感器节点每秒的平均能耗和端到端传输时延 (E2ETD, end-to-end time delay) 来评估网络性能。Shim 等 [15] 提出了一种基于优先级的流水线转发 MAC 协议 (PP-MAC, priority-based pipelined-forwarding MAC protocol), 确保中继节点不会耗尽功率,从而实现稳定和低时延的数据传输。文献 [16-17] 提出了将流水线转发作为缓解睡眠延迟问题的方法。文献 [18] 介绍了选择性唤醒 MAC 协议 (SA-MAC, selective-awakening MAC protocol), 该协议具有线性传感器网络的流水线调度特性。文献 [19] 提出了一种可以有效减少传输数据量的多带数据收集方案 (multi-strip data gathering scheme), 实现绿色数据收集以解决应用程序所需要的各种功能与传感器节点能源供应有限之间的冲突。文献 [20] 提出了一种基于功率的流水线转发 MAC 协议, 该协议可以根据传感器网络中的剩余功率和能量收集率来选择中继节点, 最大限度地减小传输时延并增加网络寿命。现有 DCPF 协议主要集中在节省能量的占空比设计和减小数据包传输时延的流水线转发设计上, 没有考虑到 LSN 中亟待解决的干扰冲突和能量空洞问题。

1.2 多信道 MAC 协议

在无线传感器网络中，信道正交意味着两个信道的互相关函数为零。通过正交信道发送的数据不会互相干扰。目前已有一部分无线传感器网络中关于正交信道的工作。文献[21]提出了一种低功耗的多信道无线传感器网络调度方法，通过求解二元线性规划问题，以最大限度降低各节点的能量消耗为目标，得出了各节点的最优时隙分配。为了解决水中传感网络的传输碰撞问题，文献[22]设计了一种基于多信道的 MAC (MC-UWMAC, multi-channel underwater MAC) 协议。为了解决现有 WSN 冲突避免机制导致效率降低的问题，文献[23]提出了一个快速自适应的多通道无线传感网络数据采集协议，通过仿真表明，该协议在适应无线传感器网络流量变化的同时，能够实现快速、节能的数据采集。为了增加网络吞吐量、提高能量使用效率，文献[24]提出了多信道流水线数据传输协议 (MPDC, multi-channel pipelined data collection MAC protocol)。而针对基于 DCPF MAC 协议的 LSN 中能量空洞问题，尚无基于多信道的相关研究工作。

1.3 部署冗余节点相关工作

目前也有部分研究人员关注通过在无线传感网中部署冗余节点从而协助数据转发的方法。文献[25]提出了在线性通信网络基础设施中引入冗余节点的方法，目的是提供一种克服因传感器节点故障而导致网络出现风险的方法。文献[26]为了解决节点高密度分布导致冗余数据的传输冲突和能量耗散的问题，提出了一种能量高效的睡眠唤醒调度机制 (ESSM, energy-efficient sleep scheduling mechanism)。通过对冗余节点的选择和应用，ESSM 可以在密集部署的环境中激活最少数量的传感器节点，并保持较高的数据准确性；此外，它通过执行最优信道选择方法和分散睡眠调度机制来提高网络寿命。文献[13]提出了在线性传感器网络中部署冗余节点的方法来协助数据传输，从而有效缓解能量空

洞问题。为了解决 WSN 随机部署策略中冗余节点和重复数据的问题，文献[27]提出的方法重新定位和识别冗余节点，并对冗余节点进行相关的处理，使得网络的覆盖率得到大幅度的提高，并提高了能量使用效率。而如何基于所部署的冗余节点，进行基于占空比和流水线调度的多信道 MAC 设计，尚无相关研究工作。

与上述相关工作不同，本文针对 LSN 数据传输过程，设计基于冗余节点部署以及占空比和流水线调度的多信道 MAC 协议，在提高数据传输能量使用效率、降低传输时延的同时，减少数据传输间的竞争和干扰，并以部署冗余节点为代价，避免感知节点过多参与数据转发，从而缓解能量空洞问题，提高数据传输的有效性和可靠性。

2 系统模型

2.1 网络拓扑

LSN 中部署了若干传感器节点（配置有传感器，可以感知环境）和冗余节点（无传感器，仅作中继节点），汇聚节点位于网络一端进行数据收集。传感器节点按照分簇算法被划分为若干簇 (cluster)，每个簇中选出一个节点作为簇头节点 (cluster header)，簇内其余节点将感知到的数据发送给簇头节点。目前已有许多关于分簇算法的研究，如文献[28-30]，分簇算法不作为本文工作的研究重点。

网络中节点等级的划分针对汇聚节点、簇头节点和冗余节点进行，节点等级划分的原则如下。

- 1) 汇聚节点的等级记为 0。
- 2) 在汇聚节点有效传输范围内的节点等级置为 1。
- 3) 在等级为 n 的节点的一跳传输范围内，尚未获得级别的节点等级置为 $n+1$ 。
- 4) 如果在 3) 的规则中，一个节点可以被划分为若干不同的等级，则其总是选择较小的等级加入。

LSN 拓扑如图 1 所示，每一个虚线框代表一个

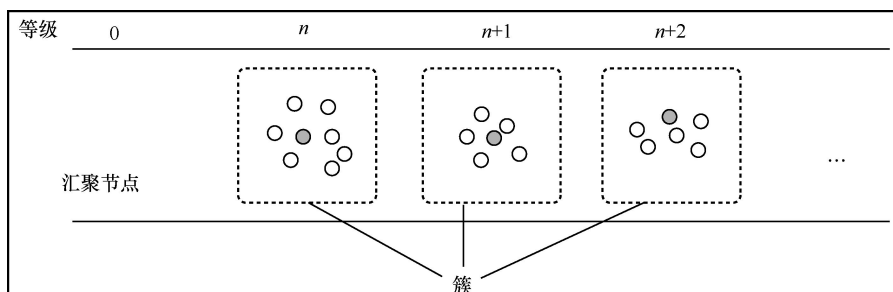


图 1 LSN 拓扑

簇，黑色节点为传感器节点，白色为冗余节点，簇内成员节点没有被显示。

为了利用冗余节点缓解能量空洞问题，MRPDC 令一个簇中的簇头节点将收到的来自簇内成员节点的数据转发给低一级别的冗余节点。级别大于 1 的冗余节点收到一个数据后会将其转发给低一级别的冗余节点；而级别为 1 的冗余节点则将数据发送给汇聚节点。因此，如图 1 所示网络中的数据运输将按如图 2 所示的逻辑拓扑进行（本文将传输路径定义为从数据产生的源节点到汇聚节点的数据传输路径，虚线箭头表示数据传输路径）。

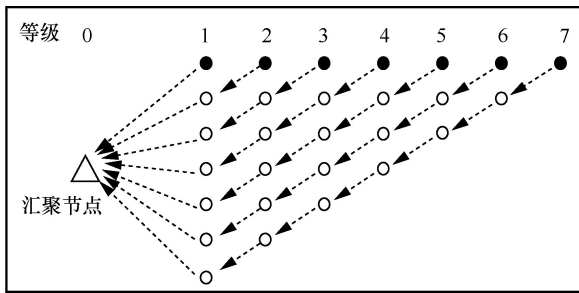


图 2 网络数据传输逻辑拓扑

2.2 传输路径上的流水线传输

在 MRPDC 中，节点周期性休眠以节省能量。具体而言，每个节点依次具有 3 个不同的状态。

R 状态：接收其他节点转发的数据包。

T 状态：向其他节点转发数据包。

S 状态：节点关闭收音机进入休眠状态，不转发也不接收数据包。

为了实现流水线传输以降低传输时延，在一条数据传输路径上，节点之间的睡眠—唤醒时间调度是错开的，一条数据传输路径（竖直方向）上的流水线传输示意图如图 3 所示。因为发送和接收成对出现，故 R 状态和 T 状态的持续时间相同，其时长

在本文中被称作一个时隙（slot）。一个节点在 R 状态收到数据后，即可在下一时隙进入 T 状态转发该数据，从而形成数据在传输路径上的流水线传输。S 状态的持续时间为 ξ 个时隙（ ξ 为正整数）。节点各个状态周期性出现。若一个时隙的时长记为 t_{slot} ，S 状态的持续时长则为 $\xi \cdot t_{slot}$ ，一个周期的时长 t_{cycle} 为

$$t_{cycle} = (2 + \xi) \cdot t_{slot} \quad (1)$$

在划分等级之后，数据包传输模式为：等级为 $i+1$ 的节点在进入 T 状态后，将数据转发给等级为 i （此时处在 R 状态）的节点，等级为 $i-1$ 的节点此时处在 S 状态；在等级为 i 的节点进入 T 状态后，将数据转发给等级为 $i-1$ （此时处在 R 状态）的节点，等级为 $i+1$ 的节点此时处在 S 状态。

因为网络中可能存在多条传输路径，处在相同级别的节点在 T 状态发送数据时会争用信道，和现有 DCPF 协议类似，MRPDC 设置了一个争用窗口（CW, contention window），并采用 RTS/CTS（request-to-send/clear-to-send）握手机制进行数据传输，基于信道争用和 RTS/CTS 握手机制的数据传输如图 4 所示。因此，一个时隙的时长 t_{slot} 为

$$t_{slot} = n_{cw} \cdot t_{cw} + t_{DIFS} + 3t_{SIFS} + t_{RTS} + t_{CTS} + t_{DATA} + t_{ACK} \quad (2)$$

其中， n_{cw} 为一个争用窗口中包含单位时隙（unit slot）的数量， t_{cw} 为每个单位时隙的时长， t_{DIFS} 为分布协调功能帧间间隔的时长， t_{SIFS} 为短帧间间隔的时长。 t_{RTS} 、 t_{CTS} 、 t_{DATA} 、 t_{ACK} 分别表示在数据传输时发送、接收一个 RTS、CTS、DATA（data packet）、ACK（acknowledgement）包需要的时间。数据包在传输过程中会对周围大概两跳范围内的节点造成干扰，因此 $\xi \geq 2$ 。另外，源节点从感知

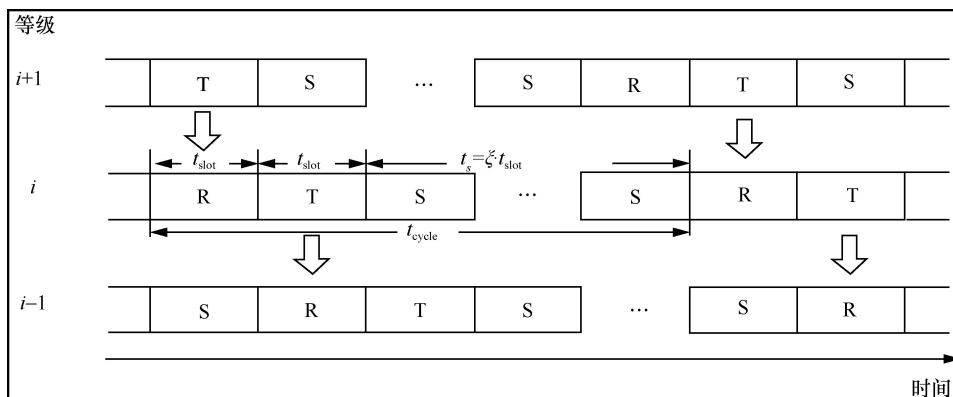


图 3 一条数据传输路径（竖直方向）上的流水线传输示意图

环境产生数据到其成功发送出该数据会因为节点休眠而产生等待时延。 ξ 越大, 节点休眠时间越长。在最坏情况下, 节点刚进入休眠时感知到数据, 就需要等待完整的休眠时间后才能进入激活状态来发送数据。最好情况下, 节点在激活状态感知到数据并能立即成功发送出去, 这时等待时间就会较小。总体来说, ξ 越大, 这种等待所需要的平均时间越长。但是所提方案因为采用流水线传递方式, 一旦感知到的数据被源节点成功发送出去, 数据在链路上的时延不受 ξ 值的影响。

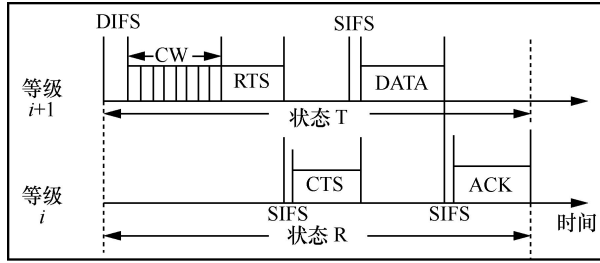


图 4 基于信道争用和 RTS/CTS 握手机制的数据传输

2.3 多信道模型

考虑网络中的可用信道数可能出现的两种情况, 可用信道数大于或等于传输路径数以及可用信道数小于传输路径数。在可用信道数大于或等于传输路径数的情况下, MRPDC 协议为每条传输路径分配不同的信道, 信道之间互不干扰。在可用信道数小于传输路径数的情况下, 会出现多条传输路径共用一个信道的情况, 节点之间依然会存在传输竞争和干扰问题, 为此, MRPDC 协议采用错开时隙的方式来进一步避免干扰。具体来说, 考虑在数据传输过程中节点的干扰范围为传输范围的两倍, 为了确保任意两个相邻数据传输 (可以在同一路径中, 也可以在不同路径中) 互不干扰, 它们之间至少要间隔两个等级, 也就是处于传输状态的两个节

点之间的传输跳数 (用 σ 表示) 至少为 4 跳, 即 $\sigma \geq 4$ 。若共用相同信道的传输路径数为 N , 则 σ 和 ξ 需要满足

$$\xi \geq \sigma \cdot N - 2 \quad (3)$$

基于冗余节点部署的多信道数据传输如图 5 所示 (除汇聚节点外, 图中虚线框内的节点为传感器节点, 其余为冗余节点), 网络中可用正交信道数为 $M = 4$, 传感器节点和冗余节点被划分为 $H = 9$ 个等级, 按第 2.1 节所述共建有 7 条传输路径。设 $\sigma = 4$, $\xi = 10$, 则需要共用一个信道的最大传输路径数 $N = \lceil H / M \rceil = 3$ 。

3 MRPDC 协议实现

如无特别说明, 下文中的“节点”包括传感器节点和冗余节点, “传感器节点”均指簇头节点。每个节点维护的属性见表 1, 其中所列属性名称将在后续小节中一一说明。

表 1 每个节点维护的属性

属性名称	说明
Grade	节点的等级
next_hop	当前节点的下一跳节点地址
ID	节点的 ID (标识符)
Channel	节点分配到的信道
Sinkid	节点所在传输路径 ID
pathid	节点在信道组中传输路径 ID
State	节点当前的状态, $State \in \{R, T, S\}$
StateDur	节点在当前状态所处时长
last_flag	节点是否确定上一跳节点

3.1 节点等级的划分

在初始阶段, 汇聚节点的等级属性置为 0, 其他所有节点的等级都置为 -1, 所有节点都工作在公共信道上, 即 Channel 属性值为 0, 并且 Sinkid 属

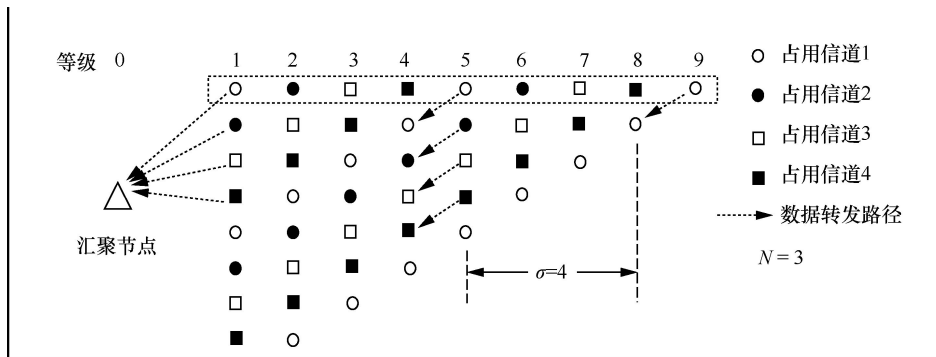


图 5 基于冗余节点部署的多信道数据传输

性都为-1、last_flag 属性置为 False。汇聚节点构造报文 I，报文 I 结构见表 2。其中，报文 I 中的 grade 域置为 0，source 域置为汇聚节点的标识符。报文 I 构造完成后，汇聚节点即广播报文 I。

变量	说明
grade	报文发送方的等级
next_hop	报文发送方的标识符
ID	报文发送方的 Sinkid

在汇聚节点一跳范围内的节点（记为 node）会收到报文 I，节点中的属性会根据报文 I 中的信息做出如下更新。

1) node.Grade=I.grade+1，节点更新自己的属性为报文 I 中 grade 域的值加一。

2) node.next_hop=I.source，节点更新自己的 next_hop 属性为报文中的 source 域的值。

如果接收者是未加入网络的传感器节点，还需要按照如下过程更新报文 I 中的信息和自身 Sinkid 域的值，然后广播报文 I。

1) I.grade=node.Grade，报文 I 中 grade 域更新为传感器节点的等级。

2) I.sinkid=node.Grade，报文 I 中 sinkid 域更新为当前传感器节点的等级。

3) I.source=node.ID，报文 I 中 source 域更新为当前节点的标识符。

4) node.Sinkid=node.Grade，传感器节点更新自身的 Sinkid 属性为当前节点的等级。

如果接收者是已经加入网络的冗余节点，并且节点等级等于广播报文 I 的节点（记为节点 A）的上一等级，即节点等级等于报文 I 中的 grade 域的值减 1，除此之外，这些冗余节点还未确定上一跳节点（即 last_flag 属性的值为 False），则需要竞争成为节点 A 的下一跳节点。这些冗余节点在收到报文 I 后，需要通过使用争用窗口来竞争回复 RTS 报文，RTS 报文结构见表 3。节点 A 仅根据第一个收到的 RTS 报文单播回复（节点 B）CTS 报文，CTS 报文结构见表 4。收到 CTS 报文后，节点 A 将节点 B 视为自己唯一的下一跳节点，同时节点 B 将 last_flag 属性置为 True，表示节点 A 已经和节点 B 唯一确定，同时设置节点属性 Sinkid 为 CTS 报文中 sinkid 域的值。节点 B 在确定上一跳之后，需要再次更改报文 I 中的 grade 域值为当前节点 Grade

属性的值，source 为当前节点的标识符。继续广播给更低等级节点，依次确定下一跳节点的标识符，直到下一跳为汇聚节点。

变量	说明
grade	发送 RTS 报文节点的等级
source	发送 RTS 报文节点的标识符
destination	允许接收 RTS 报文的的目标节点地址

变量	说明
sinkid	发送 CTS 报文节点的传输路径 ID
source	发送 CTS 报文节点的地址
destination	允许接收 CTS 报文的的目标节点地址

由于节点在收到报文 I 后，需要从高等级到低等级广播至汇聚节点，因此未加入网络的传感器节点收到报文 I 后，需要等待低等级节点确定路由后再继续广播报文 I，即需要等待 $t_M \times (Grade - 1)$ ，其中， $t_M = t_1 + t_{RTS} + t_{CTS}$ ， t_1 、 t_{RTS} 和 t_{CTS} 分别代表发送或者接收报文 I、RTS 和 CTS 报文所需要的时间。

至此，分级过程结束。所有的节点都被划分一个等级，维护一个 Sinkid 属性，并且确定了网络的路由表。

3.2 信道的分配

网络中可用的正交信道总数用 M 表示。MRPDC 将各传输路径划分到相应的信道组中，具体来说，在相同信道下的传输路径被划分在同一个信道组中，以图 5 为例，等级为 1、3、7、9 的传感器节点所在传输路径上的各个节点划分在第一个信道组中（工作在信道 1 下），等级为 2、4、6、8 的传感器节点所在传输路径上的各个节点划分在第二个信道组中（工作在信道 2 下）。当节点加入网络后，每个节点分配到的信道为

$$\text{channel} = \text{sinkid} \% M \quad (4)$$

节点所在传输路径在当前信道组中的传输路径序号为

$$\text{pathid} = \left\lfloor \frac{\text{sinkid}}{M} \right\rfloor \quad (5)$$

至此，信道分配过程结束，加入网络的节点都被分配一个信道，并在相同信道组内分配到一个相应的路径 ID（即表 1 中的 pathid），用来实现不同传输路径间的时间调度分配。信道分配示意图如图 6 所示，其中可用信道数 M 为 4，网络

中传感器节点数量为 9, 各节点左边的数字表示节点维护的 Sinkid。在此过程中, 节点仍然工作在公共信道上。

3.3 节点时间表的建立

在节点建立时间表的阶段, 汇聚节点需要在进入 R 状态时, 构建并广播 IM 报文, IM 报文结构见表 5。

变量	说明
state	发送方节点所处的状态
duration	发送方节点在当前状态所处的时间
grade	发送方节点的等级
order	汇聚节点发送此 IM 的顺序, $1 \leq \text{order} \leq \lceil H/M \rceil$

其中 order 域从 1 开始, 每发送一次 IM 报文, order 增 1, 到 $\lceil H/M \rceil$ 时广播最后一次 IM 报文。汇聚节点每隔 σt_{slot} 的时间间隔广播一次 IM 报文, 汇聚节点构造并广播 IM 数据包算法见算法 1。

算法 1 汇聚节点构造并广播 IM 数据包算法

输入: 初始 IM 报文、 H 、 M 、 σ 、 t_{slot}

输出: 更新后的 IM 数据包

IM.grade \leftarrow 0

IM.state \leftarrow R

IM.duration \leftarrow 0

for $n \leftarrow 1$ to $\lceil \frac{H}{M} \rceil$ do

IM.order \leftarrow n

Send IM out

Wait for $\sigma \cdot t_{\text{slot}}$

end for

汇聚节点在 R 状态发送 IM 数据包时的 4 种情况如图 7 所示, 当汇聚节点处在 R 状态时, IM 报文会经过一段传播时延到达一跳范围内的节点, 这些节点建立时间表的情况可以分为 4 种情况: 节点处在 T 状态; 节点处在 S 状态; 节点处在 R 状态; 节点进入下一个周期。

在节点收到 IM 报文之后需要计算传播时延 t_{delay} 。考虑如果传播时延足够大的情况, 数据包在到达接收节点时已不在发送节点发送该数据包时的周期内, 该段时长横跨的周期数记为 L , L 的计算方法为

$$L = \left\lceil \frac{\text{IM.duration} + t_{\text{delay}}}{t_{\text{cycle}}} \right\rceil \quad (6)$$

若 $L \geq 1$, 则表示节点进入下一个周期。为了方便节点建立时间表, 需要计算 δ , 计算方法为

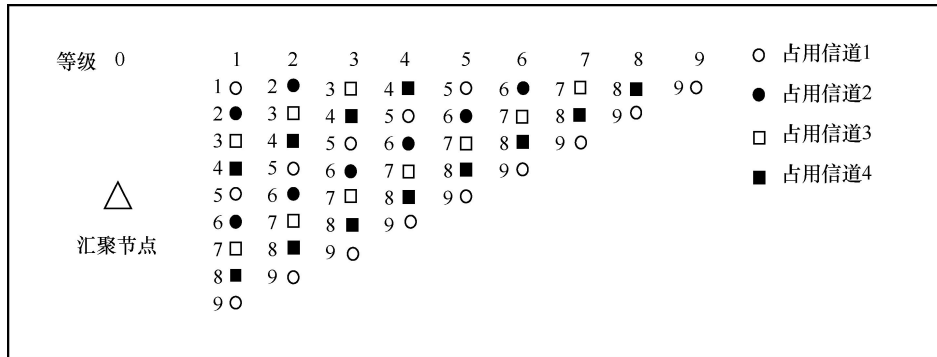


图 6 信道分配示意图

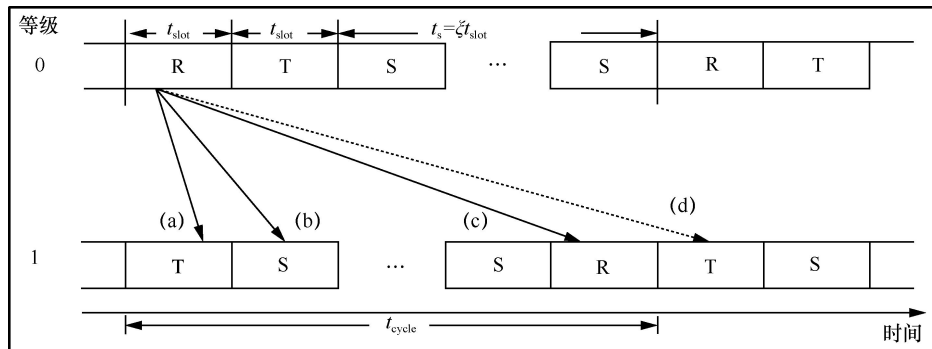


图 7 汇聚节点在 R 状态发送 IM 数据包时的 4 种情况

$$\delta = \text{IM.duration} + t_{\text{delay}} - L \cdot t_{\text{cycle}} \quad (7)$$

IM 报文从汇聚节点开始沿着传输路径传播至传感器节点，节点在接收 IM 报文并确定时间表之后，需要更新 IM 报文，并在进入 R 状态后广播 IM 报文，节点接收 IM 数据包算法见算法 2。广播报文后，节点需要切换到信道分配过程中分配到的信道，其余节点在收到来自低一等级节点广播的 IM 报文后，依次处理并广播至传感器节点为止。IM 报文逐跳传输，至此，在数据传输过程中所需要的所有节点都切换到相应的信道，建立自己的时间表。

算法 2 节点接收 IM 数据包算法

输入：接收到的 IM 数据包, ζ

输出：节点属性<State, StateDur>

```

If IM.order==node.pathid and IM.grade==node.
grade-1 then
    if  $\delta < t_{\text{slot}}$  then
        State=T
        StateDur =  $\delta$ 
    else if  $\delta < (1 + \xi) \cdot t_{\text{slot}}$  then
        State = S
        StateDur =  $\delta - t_{\text{slot}}$ 
    else
        State=R
        StateDur =  $\delta - (1 + \xi) \cdot t_{\text{slot}}$ 
    end if
else
    dropIM
end if

```

3.4 数据传输

在数据传输阶段，网络中的传感器节点感知环境中的数据。为了进行数据传输，传感器节点需要寻找数据传输过程中的下一跳并交付数据包。若传感器节点等级为 1，则下一跳为汇聚节点；若传感器节点等级不为 1，则需要寻找作为下一跳的冗余节点，交付数据包。与传感器节点类似，若冗余节点等级为 1，则数据传输过程中的下一跳为汇聚节点；若冗余节点等级不为 1，则仍需要寻找在数据传输过程中作为下一跳的冗余节点，交付数据包。

由第 3.2 节和第 3.3 节可知，所有 channel 相同的节点分配到的信道相同，但是根据 sinkid 的不同，数据包的传输路径会不一样，不同 sinkid

对应的时间表也会交错，所以即使两个数据传输对分配到相同信道，但因为所在路径不同，它们之间也不会互相干扰。因此，在数据传输过程中，发送方在包中添加自身的等级和 sinkid。等级不为 1 的节点在发送数据包时，低一等级并且 sinkid 相同的冗余节点会接收该数据包，其余节点不接收；等级为 1 的节点直接将数据包交付给汇聚节点。

3.5 冗余节点失效的解决方案

在网络中，若冗余节点失效，则会导致某条传输路径上的数据转发失败。考虑到在分级过程中，一些未加入到路由中的冗余节点 (last_flag 属性为 False) 也会被分配了等级，可以将这些节点作为冗余节点的后备节点，在冗余节点失效时，及时替代相应节点工作。

在数据发送过程中，接收方成功接收数据包后，会给发送方回复一个 ACK 报文确认。当节点 (记作 X，等级为 n) 在传输数据时未收到 ACK 确认，则可推测下一跳节点失效。此时，节点 X 发起选举，节点等级比 X 小 1、没有加入路由并且未分配 sinkid 的冗余节点竞争回复，节点 X 选择其中一个冗余节点 (记作 Y，等级为 $n-1$) 作为自己在数据传输过程中的下一跳。由 X 向 Y 分配与自己相同的 sinkid，并为 Y 设置正确的时间表。节点 X 为节点 Y 设置的时间表示意图如图 8 所示，由于此时网络中其他节点已经处在工作状态，因此，在节点 X 进入 T 状态时，发送 reIM 数据包，设置节点 Y 的时间表。顶替失效节点的冗余节点的时间表设置算法见算法 3。节点 Y 的时间表建立之后，向节点 X 回复 IMack。这样，节点 X 可重新将数据转发给节点 Y。这一做法使得网络中的冗余节点失效时，借助于其他冗余节点，网络仍能继续工作，增强了网络的鲁棒性。

算法 3 顶替失效节点的冗余节点的时间表设置算法

输入：接收到的 IM 数据包, ξ , sinkid, M

输出：Y 节点的属性<State, StateDur>

```

if  $\delta < t_{\text{slot}}$  then
    State= R
    StateDur=  $\delta$ 
else if  $\delta < 2 t_{\text{slot}}$  then
    State= T
    StateDur =  $\delta - t_{\text{slot}}$ 

```

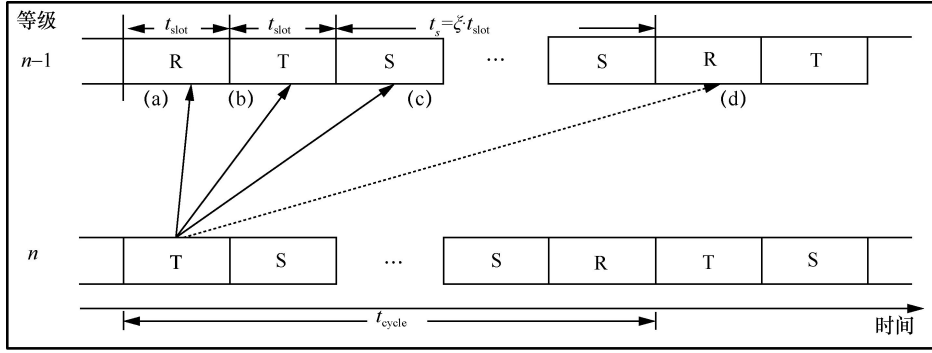


图 8 节点 X 为节点 Y 设置的时间表示意图

else

State=S

StateDur= $\delta - 2t_{slot}$

end if

3.6 冗余节点数量

在如图 2 所示网络拓扑中，各个节点（汇聚节点除外）最多发送来自一个源节点的数据（包含源节点发送自身感知数据的情况），共需要部署的冗余节点的数量为 $H(H-1)/2$ ，其中 H 表示网络中节点被划分的等级数，在此情况下，冗余节点数量较多，例如当 $H=7$ 时，即需要部署 21 个冗余节点。为了减少冗余节点的数量，可令除汇聚节点外的各节点最多发送来自 n 个源节点的数据， n 越大，所需冗余节点的数量越小。例如， $H=7$ 时， $n=2$ 和 $n=3$ 所对应的网络拓扑分别如图 9 和图 10 所示，分别仅需要部署 9 个和 5 个冗余节点。

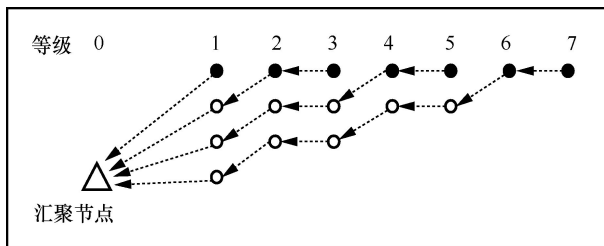


图 9 $n=2$ 所对应的网络拓扑

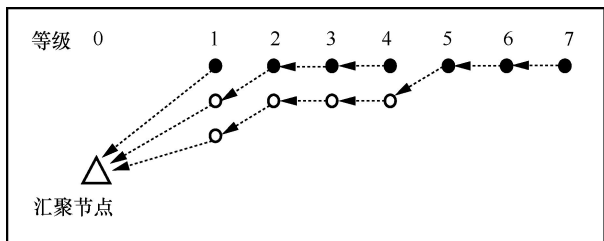


图 10 $n=3$ 所对应的网络拓扑

按照上述部署方法，一般来说，如果 $H \% n = 0$ ，

所需部署的冗余节点数量为 $\frac{H(H-n)}{2n}$ ；如果

$H \% n \neq 0$ ，令 $h = \lceil H/n \rceil$ ，所需部署的冗余节点数量为 $\frac{n(h-1)(h-2)}{2} + (h-1)(H \% n)$ 。当 $n=1$ 时，所

需冗余节点最多，但是网络中各节点的能量消耗最为均衡。随着 n 的增大，所需冗余节点的数量会减少，但是节点能量消耗的均衡性也会变差。特别地，当 $n=H$ 时，网络中不需要部署冗余节点，但能量消耗均衡性最差，能量空洞问题也最为严重。综上，网络设计者可根据实际情况，决定冗余节点的部署数量。

4 实验设计与分析

4.1 实验环境及相关参数

本文基于 OPNET 网络仿真平台实现 MRPDC，并将其与现有的 DCPF 协议^[17]和 RDCPF 协议^[13]进行对比，以评估协议的性能。实验参数设置见表 6，网络中的传感器节点数量为 5（代表网络中的 5 个簇头节点）， $\xi=18$ ， $\sigma=4$ ，每个节点的队列长度为 15。为了充分对比 MRPDC，增加了 ξ 为 10 和 6 的两个 MRPDC 的最优场景。仿真中的 7 种网络场景如图 11 所示，对应如下 7 个场景。

1) 基于 DCPF 协议的单链传感器传输（如图 11(a)所示）。

2) 基于 RDCPF，在 1 个信道内不使用错开时间表策略传输（如图 11(b)所示）。

3) 基于 MRPDC，在 1 个信道内传输（case 1，如图 11(c)所示）。

4) 基于 MRPDC，在 3 个正交信道内不使用错开时间表策略传输（case 2，如图 11(d)所示）。

5) 基于 MRPDC，在 3 个正交信道内使用错开时间表策略传输（case 3，如图 11(e)所示）。

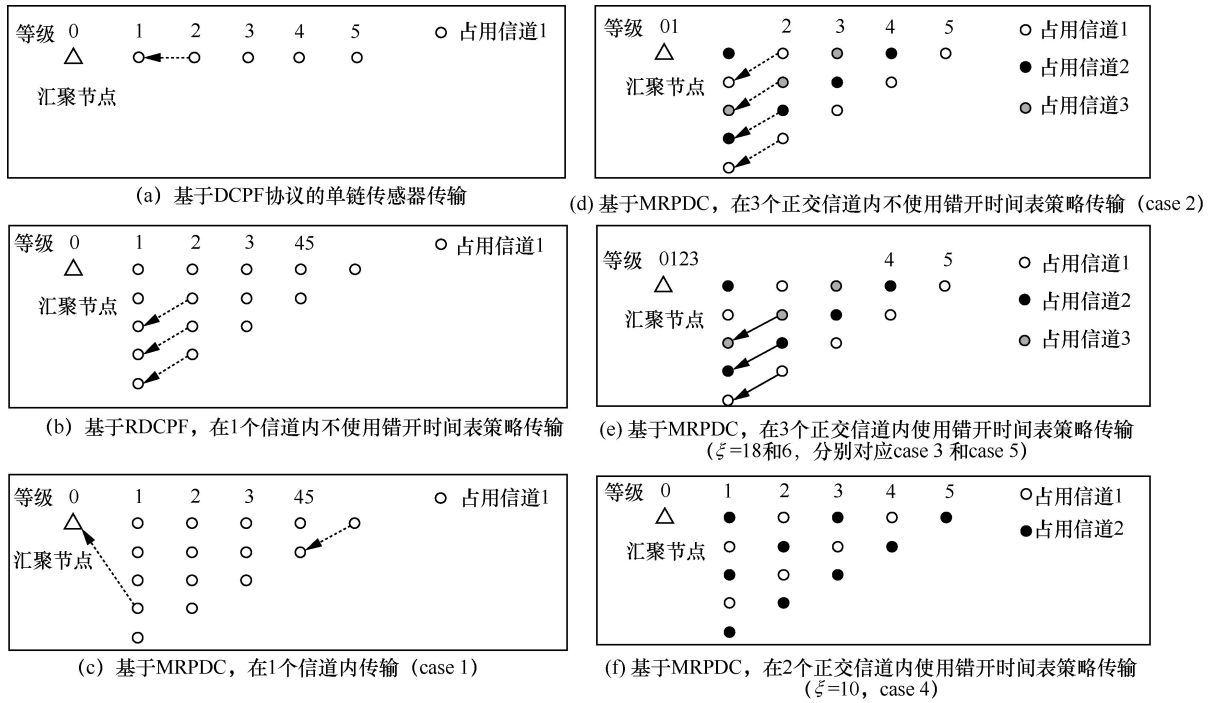


图 11 仿真中的 7 种网络场景

- 6) 基于 MRPDC, $\xi=10$, 在 2 个正交信道内使用错开时间表策略 (case 4, 如图 11(f)所示)。
- 7) 基于 MRPDC, $\xi=6$, 在 3 个正交信道内使用错开时间表策略 (case 5, 如图 11(e)所示)。

表 6 实验参数设置

参数	数值	参数	数值
t_{DFS}	10 ms	t_{SIFS}	5 ms
t_{RTS}	11 ms	t_{CTS}	11 ms
t_{ACK}	11 ms	t_{DATA}	43 ms
n_{CW}	16 ms	t_{CW}	1 ms

本文考虑以下几个基本的评价指标。

- 1) 包到达率 (packet delivery ratio): 汇聚节点成功接收到的数据包总数与网络中累计产生的数据包总量的比值, 该值越高则表明网络中丢包率越小。
- 2) 吞吐量 (throughput): 汇聚节点每秒成功接收到数据包的量。
- 3) 数据包的平均能量消耗 (energy consumption per packet): 数据包被汇聚节点接收所需要的平均能耗, 用来表示协议的传输效率。
- 4) 数据包传输时延 (PDL, packet delivery latency): 每个数据包从同一等级的源节点传输到汇聚节点所花费的平均时间。
- 5) 每个等级节点的平均能量消耗 (energy

consumption per node): 每个等级中节点的平均能量消耗。

仿真中吞吐量、包到达率、网络节点平均能量消耗、网络节点平均占空比和数据包的平均能耗是按照包产生速率 λ 个 pkt/s (传感器节点都以泊松分布产生数据, pkt 是 packet 的缩写), 从 0.05 到 0.5 以 0.05 为步长增加的结果。根据吞吐量的结果, 取 $\lambda=0.05$ 和 $\lambda=0.1$ 对数据包传输时延和每个等级节点的平均能量消耗进行统计。

4.2 实验结果分析

4.2.1 包到达率

包到达率如图 12 所示, 可以看出随着包产生速率的提升, RDCPF 场景下的结果最差, 因为将原本处于同一传输路径上的数据包分散到处于不同传输路径的冗余节点上, 反而会导致节点从高等级向低等级传输数据时存在不同路径上争用信道的现象, 与 DCPF 相比会造成更多的争用和干扰, 效果会更差。MRPDC 通过融入多信道资源分配, 不同传输路径上节点竞争发送数据包的现象得到了缓解。其次, 在相同睡眠时隙数 ξ 的情况下, 在基于 MRPDC、使用错开策略的场景下, 无论是使用单信道还是多信道, 数据传输的效果都能达到最优, 这是因为该场景保证了节点唤醒后按照时间表可以实现无干扰的数据包传输。但是处于单信道的

节点，想要实现错开策略，需要满足式(3)；而多信道的引入，能够增加节点睡眠时隙数的调控范围，能够适应更多的使用场景，同时根据需求可以设置更短的睡眠时隙数，相比于使用单信道，包到达率可以达到更高。

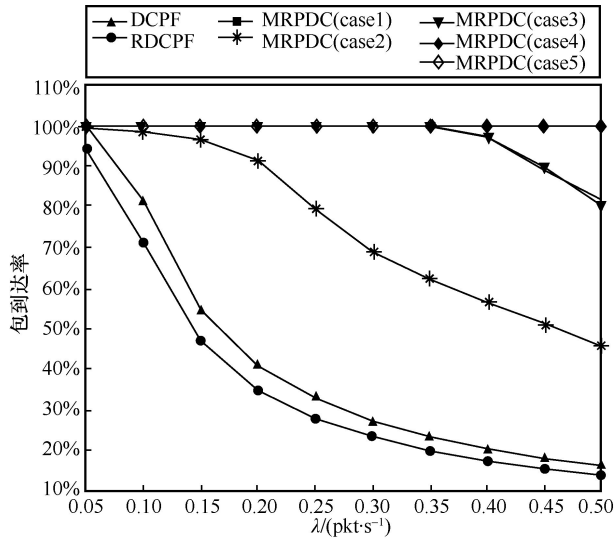


图 12 包到达率

4.2.2 吞吐量

吞吐量如图 13 所示，可以看出，在睡眠时隙数相同的情况下，使用错开策略的方法接收到的数据包更多，而在 RDCPF 场景下相比于 DCPF 效果会更差，因为传输路径增多反而导致了更多的碰撞。同样的，多信道场景可以通过使用更小的睡眠时隙达到更高的吞吐量。

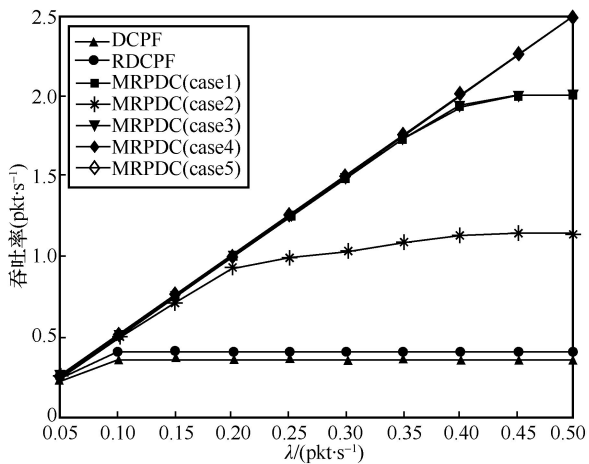


图 13 吞吐量

4.2.3 数据包的平均能量消耗

数据包平均能量消耗如图 14 所示，可以看出，包产生的速率越快，每个包的平均耗能就越低，最后趋于稳定，因为包产生的越多，整个网络就可以

保证节点唤醒后都能有数据包，因此效率更高。基于 MRPDC 使用错开策略场景下的节点，平均每个包的能耗更低，结合包到达率可以看出，在包到达率达到一定高度后，依然可以维持较低的平均能耗，说明能量使用效率更高。

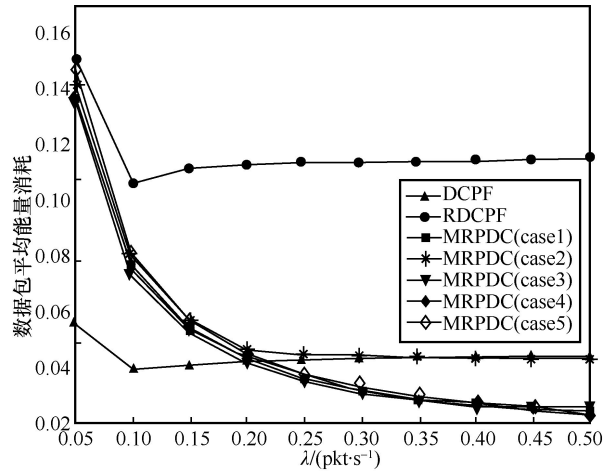


图 14 数据包平均能量消耗

4.2.4 数据包传输时延

各等级数据包传输时延如图 15 所示，可以看出，在包的产生速率为 0.05 pkt/s 时，随着等级的增加，数据包从产生到被接收花费的时间更长，因为随着节点等级增加，数据包需要传输的路径以及在队列中等待的时间都会增加。在 DCPF 场景下的时延更高，且随等级增加，相差的更多；而使用了错开策略后，节点的时延相比于 DCPF 更小，并且等级间的时延差距也更小；设置了更小睡眠时隙的多信道场景的时延也更低，效果更好；此外，可以看出在 case 2 中，等级 3 的时延更低，因为传感器节点等级 1 和 4 (2 和 5) 的传输路径都处于相同信道，信道内的传输路径越多，需要争用导致时延增加的结果更明显，而等级 3 的传感器节点单独处于 3 信道，因此该等级平均时延更低。在包的产生速率为 0.1 pkt/s 时，也可以看出基于 MRPDC 使用错开策略的时延更低。

4.2.5 各等级节点的平均能量消耗

各等级节点的平均能量消耗如图 16 所示，可以看出，不论是包产生速率为 0.05 pkt/s 还是 0.1 pkt/s，在 DCPF 场景下，随着等级的降低，等级的平均能耗都会增加，因为越是靠近汇聚节点，节点需要转发的数据包越多，需要的能耗就会越多。而布置了冗余节点之后，传感器节点不需要中转数据，每个

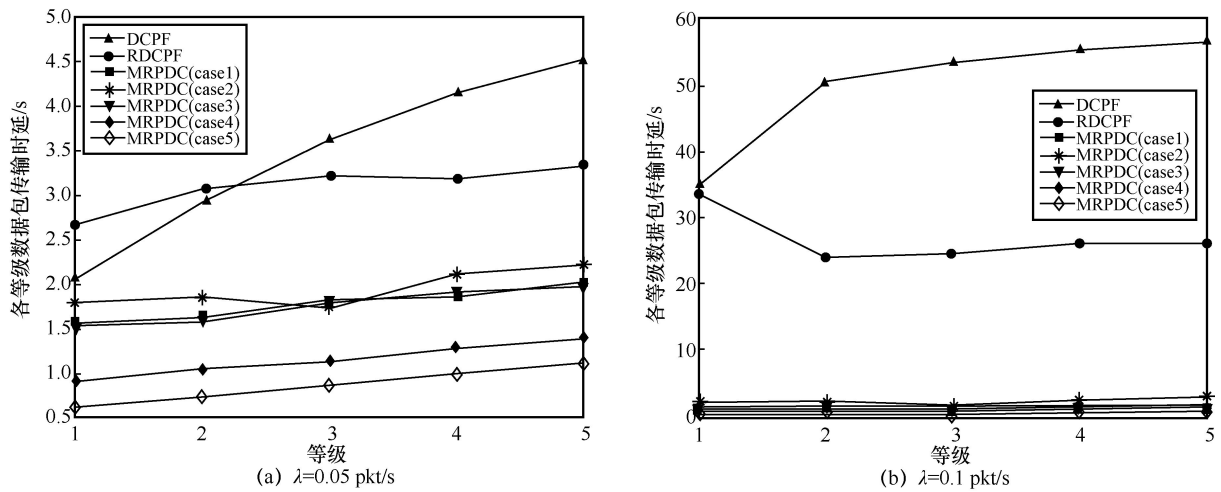


图 15 各等级数据包传输时延

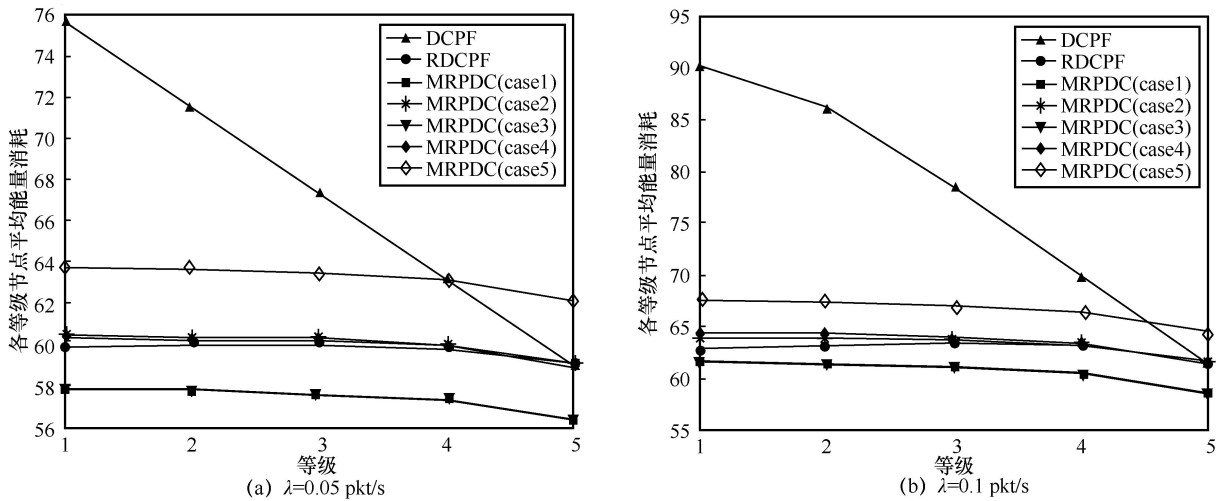


图 16 各等级节点的平均能量消耗

传感器节点都有独立的传输路径，通过冗余节点分担了能耗集中的问题，因此即使是不同等级的节点之间，平均能耗也相差不大。并且相比于 DCPF 场景下的能耗，布置冗余节点后，网络总体都处于较低的能耗范围。

5 结束语

本文提出了一种基于冗余节点部署以及占空比和流水线调度的线性传感器网络多信道 MAC 协议——MRPDC。该协议以部署冗余节点为代价，避免感知节点过多参与数据转发，从而有效缓解能量空洞问题，并借助正交信道和流水线调度来避免数据传输过程中节点间的传输竞争和干扰问题。所提协议中的冗余节点仅用来作为中继节点进行数据转发，因而不需要为其配备传感器设备，价格相对低廉。同时，本文针对冗余节点的失效问题提出

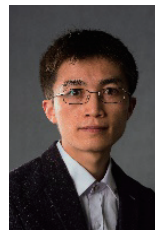
了相应的解决方法，增强了所提协议运行的鲁棒性。基于网络仿真软件 OPNET 的仿真结果表明，所提协议相较于现有协议，在能量使用效率、包到达率、吞吐率、包传输时延等方面具有较优的表现。

参考文献:

- [1] 夏娜, 闻心怡, 杜华争, 等. 基于水平集的围猎式水下传感器节点布置研究[J]. 计算机学报, 2021, 44(5): 1024-1036.
XIA N, WEN X Y, DU H Z, et al. Study on hunting deployment of underwater sensors based on level set method[J]. Chinese Journal of Computers, 2021, 44(5): 1024-1036.
- [2] 梁俊斌, 马方强, 何宗键. 动态无线传感网中低延迟高可靠的数据查询机制[J]. 计算机学报, 2020, 43(3): 555-572.
LIANG J B, MA F Q, HE Z J. Low latency and high reliable data query mechanism in dynamic wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2020, 43(3): 555-572.
- [3] ARROYO P, HERRERO J L, SUÁREZ J I, et al. Wireless sensor network combined with cloud computing for air quality monitoring[J].

- Sensors (Basel, Switzerland), 2019, 19(3): 691.
- [4] 李翠然, 王雪洁, 谢健骊, 等. 基于改进 PSO 的铁路监测线性无线传感器网络路由算法[J]. 通信学报, 2022, 43(5): 155-165.
LI C R, WANG X J, XIE J L, et al. Routing algorithm for railway monitoring linear WSN based on improved PSO[J]. Journal on Communications, 2022, 43(5): 155-165.
- [5] 孟建军, 王建国, 李德仓, 等. 铁路沿线线型无线传感器网络节点部署策略[J]. 传感技术学报, 2021, 34(6): 829-834.
MENG J J, WANG J M, LI D C, et al. The deployment strategy of wireless sensor network nodes along the railway[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2021, 34(6): 829-834.
- [6] VARSHNEY S, KUMAR C, SWAROOPA. Lightning-based lion optimization algorithm for monitoring the pipelines using linear wireless sensor network[J]. Wireless Personal Communications, 2021, 117(3): 2475-2494.
- [7] KHOSHABI NOBAR S, MANSOURKIAIEF, AHMED M H. Packet dropping minimization in energy harvesting-based wireless sensor network with linear topology[J]. IEEE Access, 2020, 8: 38682-38691.
- [8] ABRARDO A, POZZEBONA. A multi-hop LoRa linear sensor network for the monitoring of underground environments: the case of the medieval aqueducts in siena, Italy[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019, 19(2): 402.
- [9] MO Y C, XING L D, JIANG J H. Modeling and analyzing linear wireless sensor networks with backbone support[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2020, 50(10): 3912-3924.
- [10] AJMI N, HELALI A, LORENZ P, et al. SPEECH-MAC: special purpose energy-efficient contention-based hybrid MAC protocol for WSN and ZigBee network[J]. International Journal of Communication Systems, 2021, 34(1): e4637.
- [11] RADHA S, JOSEMIN B, NAGABUSHANAM P, et al. Energy efficient MAC with variable duty cycle for wireless sensor networks[J]. International Journal of Electronics, 2022, 109(3): 367-390.
- [12] CHAROENCHAIPRAKIT K, PIYARAT W, WORADIT K. Optimal data transfer of SEH-WSN node via MDP based on duty cycle and battery energy[J]. IEEE Access, 2021, 9: 82947-82965.
- [13] ZHANG Q W, LI D Z, FEI Y, et al. RDCPF: a redundancy-based duty-cycling pipelined-forwarding MAC for linear sensor networks[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 20(19): 5608.
- [14] SINGH R, RAI B K, BOSE S K. Modeling and performance analysis for pipelined-forwarding MAC protocols for linear wireless sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(15): 6539-6552.
- [15] SHIM K, PARK H K. Priority-based pipelined-forwarding MAC protocol for EH-WSNs[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2019, 2019: 5418516.
- [16] TONG F, HE S B, PAN J P. Modeling and analysis for data collection in duty-cycled linear sensor networks with pipelined-forwarding feature[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(6): 9489-9502.
- [17] TONG F, ZHANG Y J, TAO J, et al. EPDC: an enhanced pipelined data collection MAC for duty-cycled linear sensor networks[C]//Proceedings of 2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-5.
- [18] VILLORDO-JIMENEZ I, TORRES-CRUZ N, CARVALHO M M, et al. A selective-awakening MAC protocol for energy-efficient data forwarding in linear sensor networks[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2018, 2018: 6351623.
- [19] LI Z T, LIU Y X, MA M, et al. MSDG: a novel green data gathering scheme for wireless sensor networks[J]. Computer Networks, 2018, 142: 223-239.
- [20] SHIM K, PARK H K. A power-based pipelined-forwarding MAC protocol for energy harvesting wireless sensor networks[J]. The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 2019, 68(1):98-101.
- [21] 刘丰年. 多信道无线传感器网络节点传输调度方法[J]. 河南工程学院学报(自然科学版), 2020, 32(1): 72-75.
LIU F N. Scheduling method for multichannel wireless sensor network node transmission[J]. Journal of Henan University of Engineering (Natural Science Edition), 2020, 32(1): 72-75.
- [22] BOUABDALLAH F, ZIDIC M, BOUTABAR, et al. Collision avoidance energy efficient multi-channel MAC protocol for Under Water acoustic sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2019, 18(10): 2298-2314.
- [23] LIEW S Y, TAN C K, GAN M, et al. A fast, adaptive, and energy-efficient data collection protocol in multi-channel-multi-path wireless sensor networks[J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2018, 13(1): 30-40.
- [24] TONG F, SUI R C, ZHANG Y J, et al. MPDC: a multi-channel pipelined data collection MAC for duty-cycled linear sensor networks[C]//Wireless Algorithms, Systems, and Applications, Springer, 2021: 550-562.
- [25] TOMMASO A, ADA F, ELIA L D, et al. Reliability and availability evaluation of linear LoRa WAN sensor network architectures for pipeline monitoring[C]//Proceedings of 2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [26] WAN R Z, XIONG N X, LOC N T. An energy-efficient sleep scheduling mechanism with similarity measure for wireless sensor networks[J]. Human-Centric Computing and Information Sciences, 2018, 8(1): 141.
- [27] CHOWDHURY S, BENSLIMANE A. Relocating redundant sensors in randomly deployed wireless sensor networks[C]//Proceedings of 2018 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [28] BEHERA T M, MOHAPATRA S K, SAMAL U C, et al. Residual energy-based cluster-head selection in WSNs for IoT application[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(3): 5132-5139.
- [29] RAO P C S, JANA P K, BANKA H. A particle swarm optimization based energy efficient cluster head selection algorithm for wireless sensor networks[J]. Wireless Networks, 2017, 23(7): 2005-2020.
- [30] SARKAR A, SENTHIL MURUGAN T. Cluster head selection for energy efficient and delay-less routing in wireless sensor network[J]. Wireless Networks, 2019, 25(1): 303-320.

[作者简介]



童飞 (1987-), 男, 博士, 东南大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为物联网安全、泛在网络智能与安全等。



隋儒聪（1996- ），男，东南大学硕士生，主要研究方向为无线通信网络、无线自组织网络等。



刘恒睿（2000- ），男，东南大学在读，主要研究方向为区块链应用安全、物联网安全等。



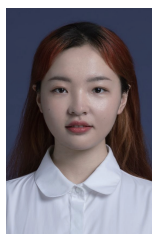
陈煜（1999- ），男，东南大学硕士生，主要研究方向为人机交互和安全等。



苏上峰（2001- ），男，东南大学在读，主要研究方向为物联网安全、无线传感器网络等。



苏恒（2000- ），男，东南大学硕士生，主要研究方向为基于大数据与深度学习的网络安全。



晏宇珂（2000- ），女，东南大学硕士生，主要研究方向为人工智能、深度学习等。