

基于相长干涉的无线传感器网络数据收集

张 阳

(青岛科技大学 自动化与电子工程学院 青岛 266061)

摘要: 为延长无线传感器网络的生命周期,提高数据收集的可靠性,提出一种基于相长干涉的无线传感器网络低功耗可靠数据收集协议。利用时分多址技术对网络中的节点分配时隙,采用感知节点轮询发起相长干涉的网络洪泛的方式实现数据收集。针对时分多址技术需要的时间同步要求,改进现有的隐式全局时间同步算法,来保证节点轮询发起相长干涉网络洪泛的时间对齐。利用丢包重传机制来实现可靠性。仿真和测试平台实验结果均表明,能够实现几乎100%的数据收集,能量效率约为CTP的2.2倍,大幅度提高网络的生命周期、可靠性。

关键词: 相长干涉;时分多址;时间同步;丢包重传;无线传感器网络

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Constructive interference based data collection in wireless sensor network

Zhang Yang

(College of Automation and Electronic Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: In order to prolong network lifetime and improve the reliability, a constructive interference based low-power and reliable data collection protocol (CI-DC) for wireless sensor network is proposed. In CI-DC protocol, data gathering is achieved in a way that sensor nodes initiate flooding in a circular manner by using time division multiple access (TDMA) technology. In order to tackle this dilemma of time synchronization for TDMA, implicit time synchronization algorithm is improved to ensure the time alignment of sensor nodes carrying out constructive interference based flooding. Extensive simulations and testbed experiment results show that it achieves almost 100% data collection. Compared with traditional classical data collection protocol CTP, CI-DC provides 2.2 times of energy-efficient collection while achieving end-to-end collection reliability. Evaluation has verified that the proposed is able to greatly improve network performance in terms of lifetime and reliability.

Keywords: concurrent interference; TDMA; time synchronization; retransmission; wireless sensor network

0 引言

数据收集是无线传感器网络研究中最基础最重要的任务之一^[1-4],负责将数据从感知节点(sensor)传输到汇聚节点(sink)。近年来,无线传感器网络已广泛应用于健康监测^[5]、火山监测^[6]、智能交通^[7]等。

在无线传感器网络中,当前的数据收集协议多是基于树形拓扑结构^[8-15],每一个节点从其邻居节点中选择一个节点作为父节点,通过父节点将数据包传输到 Sink 节点,实现数据收集。在基于树形拓扑结构的数据收集协议中,通信机制分为两类:一类基于波监听多路访问(carrier sense multiple access, CSMA)技术^[10-11],CTP^[10]是其中的经典数据收集协议,CTP 采用 CSMA 技术,既不能保证可靠性,也不能实现低功耗。为了降低网络功耗,LICTP^[11]

在 CTP 之上改进了路由链路选择的代价函数,均衡不同节点间的能量消耗,延长了网络生存周期;另一类是基于分配的时分多址(time division multiple access, TDMA)技术^[12-15]。与基于 CSMA 的协议相比,基于 TDMA 的协议更加高效。由于 TDMA 的实现需要时间同步,所以多数基于 TDMA 的协议或以仿真为主^[13],或放宽了时间同步的要求^[14-15]。放宽时间同步的要求也就造成了一定程度上的能量开销。2011 年 Ferrari 等^[16]在 Contiki OS 操作系统下实现了基于相长干涉(constructive interference, CI)的高效网络洪泛和时间同步协议 Glossy。Glossy 实现了亚微秒级的时间同步^[17],为时间同步提供了一种全新的隐式时间同步方案。Glossy 具有低功耗、高数据包接收率的特点。借助于 Glossy 协议,节点可以快速地将数据包发送到全网络。Glossy 使得通过简单洪泛实现点对点通信成为可能。

收稿日期:2020-11-08

本文提出基于 CI、采用 TDMA 通信机制的高效数据收集协议,利用重传机制来保证可靠性。基于 CI 的网络洪泛机制,有效降低了协议的功耗、实现了数据收集的可靠性。

1 基于相长干涉的网络洪泛

1.1 相长干涉

相长干涉是指两个及其以上数量的节点同时通过无线传输相同的数据,无线电波在空间中叠加形成更强的信号,从而使接收机接收到更强的信号,如图 1 所示。对于运行在 2.4 GHz 频带下的符合 IEEE802.15.4 标准的节点,其信号调制过程如图 2 所示。首先将要发送的数据分为 4 组,每组形成一个符号。每个符号都进行直接序列扩频(direct sequence spread spectrum, DSSS)调制。扩频码序列采用伪随机噪声序列(pseudo-random noise, PN)。符号到码片的映射由 IEEE802.15.4 标准定义。其次,通过偏移四相相移键控(offset quadrature phase-shift keying, O-QPSK)将基带信号调制到载波,通过无线介质进行传输。

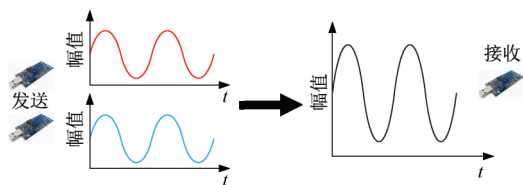


图 1 相长干涉

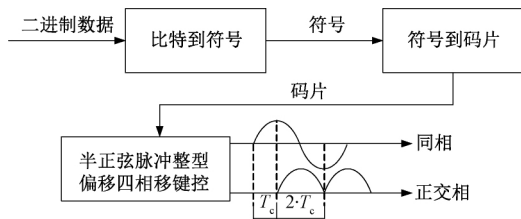


图 2 IEEE 802.15.4 调制

在接收机,使用相干检测方法来解调载波信号。信号被下变频为码片,然后被映射为符号。PN 序列引入的冗余在一定范围上允许由于信道导致的错误。这种冗余以降低数据速率为代价提高了接收机的灵敏度。

相长干涉要求信号之间的容许时间偏差为 $0.5 \mu\text{s}$ ^[14]。因为对于同相载波,正交相的码片时间滞后于同相码片时间 $T_c = 0.5 \mu\text{s}$ 。令 O-QPSK 信号 $S(t)$ 为:

$$S(t) = I(t)\cos\omega_c t - Q(t)\sin\omega_c t \quad (1)$$

式中: $I(t)$ 表示同相分量; $Q(t)$ 表示正交相分量; $\omega_c = \pi/2T_c$ 表示半正弦脉冲整形的径向频率。于是相长干涉信号 $S_c(t)$ 可以表示为:

$$S_c(t) = \sum_{i=1}^K A_i S_i(t - \tau_i) + N_i(t) \quad (2)$$

式中: K 表示并发发射机的数量; A_i 表示第 i 个并发发射机发射信号的幅值; τ_i 表示第 i 个并发发射机发射信号的时间偏移值; $N_i(t)$ 表示信号中存在的噪声。

1.2 网络洪泛

无线通信方式为节点监听邻居节点发送的数据包提供了可能。工作在同一信道下的节点无线打开时,当一个节点发送数据包,一跳通信范围内的邻居节点同时接收到该数据包并同时转发。这种机制称为网络洪泛,如图 3 所示。节点 N1 发出数据包后,节点 N2 与 N3 同时收到此数据包。经过相等的软件处理时间后,节点 N2 与 N3 同时发送来自于节点 N1 的数据包。无线电波在空中叠加形成更强的信号,被节点 N4 所接收。网络洪泛可以快速的将数据包从发起者传输到整个网络。通过增加洪泛次数,可以提高数据包发送成功率。如图 3 所示,数据包被转发 2 次。

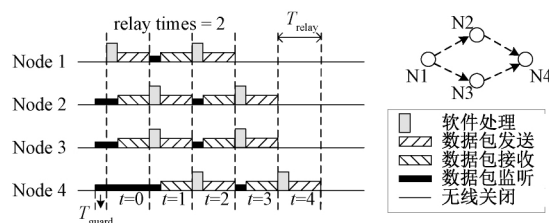


图 3 网络洪泛机制

2 数据收集与时间同步

为进行数据收集,需要感知节点轮流发起洪泛,汇聚节点作为接收方参与洪泛。同时为保证网络的时间同步,汇聚节点必须对网络进行周期性时间同步。

2.1 轮询洪泛机制

节点轮流发起洪泛如图 4 所示。每一个节点都分配有一个独立的 phase, phase 的编号称为 phaseID。在这一 phaseID 内,节点发起相长干涉的网络洪泛,其他节点则作为接收者参与洪泛。由图 4 可知,节点 N1 在 $\text{phaseID} = n$ 时发起相长干涉的网络洪泛,节点 N2、N3 作为接收者参与洪泛。同样地,在 $\text{phaseID} = n + 1$ 以及 $\text{phaseID} = n + 2$ 时,节点 N2、N3 分别发起相长干涉的网络洪泛,其他节点则作为接收者参与洪泛。由于节点通信范围有限,节点 N1、N3 都处在节点 N2 的通信范围内,而节点 N1 与节点 N3 不能直接相互通信,所以在 $\text{phaseID} = n$ 时节点 N1 发起的洪泛数据包,要经过节点 N2 转发才能被节点 N3 收到,在 $\text{phaseID} = n + 2$ 时节点 N3 发起的洪泛数据包,要经过节点 N2 转发才能被节点 N1 收到。图 4 中,每个 phase 的长度为 T_{phase} 。每个时隙的长度为 T_{slot} , T_{guard} 是保护时间,用于补偿同步误差。 T_{interval} 表示两次洪泛之间的时间间隔。

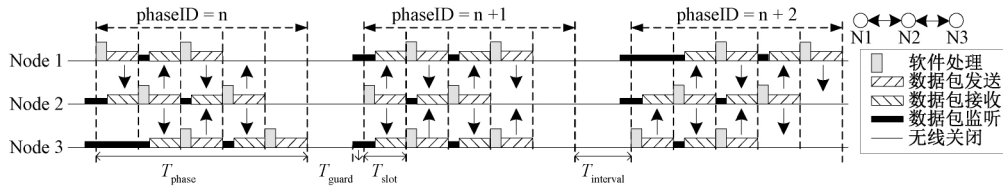


图 4 节点轮流洪泛机制

2.2 时间同步

时间同步是实现 TDMA 通信机制的必要条件。只有所有节点都保持全局时间的基础之上,才能实现时间对齐。

依据 Glossy 隐式时间同步原理,在汇聚节点以同步周期 T_{sync} 对网络进行同步时,记汇聚节点开始洪泛发送消息的时间为 $t_{\text{tx_sync}}$,记汇聚节点上一个周期开始洪泛的时间为 $t_{\text{tx_sync_old}}$,记感知节点开始接收汇聚节点洪泛消息的时间为 $t_{\text{rx_sync}}$,记感知节点上一个周期开始接收汇聚节点洪泛消息的时间为 $t_{\text{rx_sync_old}}$ 。由于同步误差的存在,所以感知节点需要预留一定的保护时间。于是下一次同步时节点无线打开的时间 $t_{\text{next_sync}}$ 为:

$$t_s = \begin{cases} t_{\text{tx_sync}} - t_{\text{tx_sync_old}}, & \text{Sink} \\ t_{\text{rx_sync}} - t_{\text{rx_sync_old}}, & \text{Sensor} \end{cases} \quad (3)$$

$$t_{\text{next_sync}} = \begin{cases} t_{\text{tx_sync}} + T_{\text{sync}} + t_s, & \text{Sink} \\ t_{\text{rx_sync}} + T_{\text{sync}} + t_s - T_{\text{guard}}, & \text{Sensor} \end{cases} \quad (4)$$

式中: t_s 表示一个同步周期 T_{sync} 产生的时钟偏移值。

在同步周期内,感知节点轮流发起洪泛进行数据收集。于是 $\text{phaseID}=i$ 时节点无线开启的时间为:

$$t_{\text{clct}_i} = \begin{cases} t_{\text{tx_sync}} + T_{\text{phase_sync}} + T_{\text{interval}}, & i = 1, \text{Sink} \\ t_{\text{rx_sync}} + T_{\text{phase_sync}} + T_{\text{interval}}, & i = 1, \text{Sensor} \\ t_{\text{clct}_{i-1}} + T_{\text{phase_clct}} + T_{\text{interval}}, & i > 1 \end{cases} \quad (5)$$

由于存在时间偏移,所以每次洪泛前需对节点开启无

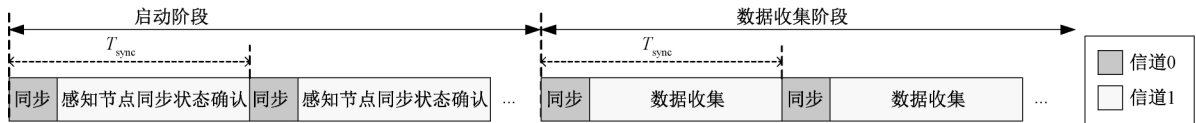


图 5 数据收集协议总览

3.1 启动阶段

启动阶段的任务是完成网络中感知节点的时间同步。启动阶段细分为两个过程:建立同步过程与同步确认过程。

建立同步过程中,所有的节点工作在信道 0,由汇聚节点对网络进行周期性洪泛,洪泛周期为 T_{sync} 。感知节点为了保证尽快完成时间同步,无线的开启时间为 T_{sync} 。待感知节点时间同步后,无线开启时间则变为 T_{phase} 。

同步确认过程分为两个时段:同步时段和感知节点同

步的时间进行补偿。时钟偏移补偿 t_{c_i} 计算如下:

$$t_{s_i} = \begin{cases} \frac{t_{\text{clct}_i} - t_{\text{tx_sync}}}{T_{\text{sync}}} \cdot t_s, & \text{Sink} \\ \frac{t_{\text{clct}_i} - t_{\text{rx_sync}}}{T_{\text{sync}}} \cdot t_s, & \text{Sensor} \end{cases} \quad (6)$$

$$t_{c_i} = t_{s_i} - t_{s_{i-1}} \quad (7)$$

式中: t_{s_i} 表示本周期内汇聚节点发起洪泛进行同步到 $\text{phaseID}=i$ 时的时钟偏移估计值; t_{clct_i} 表示 $\text{phaseID}=i$ 时节点无线开启的理论时间; $t_{\text{rx_sync}}$ 表示汇聚节点同步时感知节点开始接收洪泛数据包的时间; $t_{\text{tx_sync}}$ 表示汇聚节点同步时汇聚节点开始发送洪泛数据包的时间; t_{c_i} 表示 $\text{phaseID}=i$ 时节点无线开启的时钟偏移补偿值。

考虑到时钟偏移的情况, $\text{phaseID}=i$ 时节点无线开启的实际时间为 $t_{\text{clct}_i} - t_{c_i}$ 。

3 协议概述

数据收集分为两个阶段:启动阶段和数据收集阶段,如图 5 所示。启动阶段和数据收集阶段的周期长度均为 T_{sync} 。启动阶段包括同步时段和感知节点同步状态确认时段。数据收集阶段包括同步时段与数据收集时段。同步时段,所有节点使用信道 0;感知节点同步状态确认时段和数据收集时段,所有节点工作在信道 1。信道 0 与信道 1 的使用,使的节点在出现通信失败后也可以保持时间同步,提高系统的稳定性。

步状态确认时段,如图 6 所示。同步时段只有一个 phase,称为 sync-phase。感知节点同步状态确认时段,phase 的数量与感知节点的数量一致,phase 被称为 cfm-phase。

图 6 中,同步时段,所有节点工作在信道 0,由汇聚节点发起洪泛,对感知节点进行隐式时间同步。在感知节点同步状态确认时段,所有节点切换到信道 1,感知节点根据预分配的 phaseID 轮流发起洪泛,告知汇聚节点其同步状态。

感知节点同步状态确认时段,汇聚节点对完成同步节

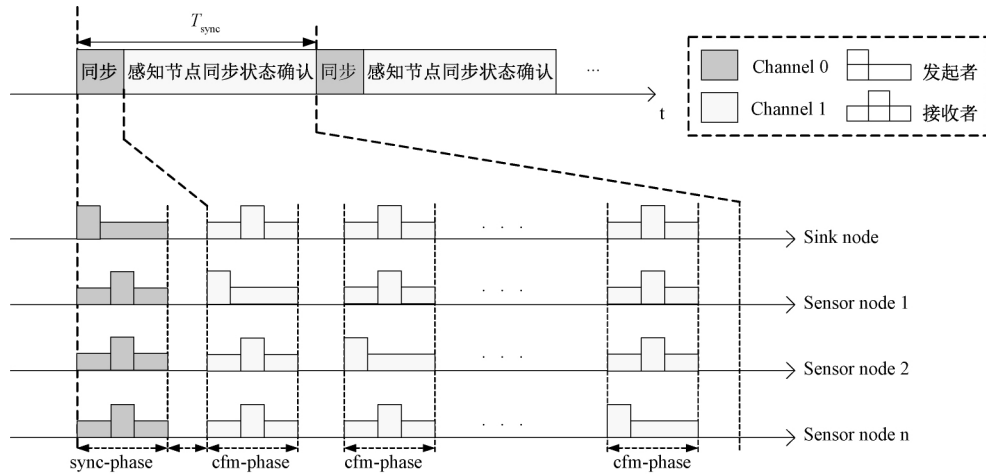


图 6 同步确认过程

点的数量进行统计。当连续 3 次确认所有节点完成同步后,由汇聚节点在同步时段告知感知节点进入数据收集阶段。

3.2 数据收集阶段

数据收集阶段的同步时段,同样只有一个 sync-phase。在 sync-phase 内,汇聚节点在信道 0 对所有感知节点维持同步。数据收集时段,phase 分为两类:lost-phase, data-phase。lost-phase 是为 lost 节点准备的。网络中存在节点丢包时,该 lost-phase 中才会有感知节点发起洪泛。data-phase 则是均分给所有的感知节点。在 data-phase 中,所有节点工作在信道 1,感知节点按照设定的 phaseID 轮询发起洪泛,汇聚节点作为接收者参与网络洪泛,进行数据收集。

数据收集时段,汇聚节点在进行数据收集时,对节点丢包情况进行统计。当某个周期中出现丢包时,由汇聚节点找出丢包节点 ID,然后在下一个周期的同步时段,通过同步消息将丢包节点 ID 告知丢包节点。于是在这个周期的数据收集时段的 lost-phase,由该丢包节点发起洪泛,进行丢包重传,保证可靠性;如果某个周期没有出现丢包情况时,那么下一个周期的 lost-phase 中将没有节点开启无线,如图 7 所示。

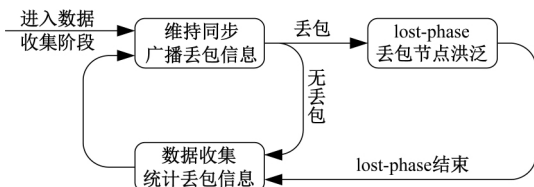


图 7 数据收集阶段流程

由于 Glossy 具有高可靠性,数据包接收成功率高于 99.99%^[14],所以每个周期的数据收集时段仅预留一个 lost-phase,在一定程度上降低网络的能耗。

4 性能评估

为评价 CI-DC 协议,采用 Contiki OS 操作系统在 Tmote Sky 节点上对 CI-DC 协议进行实现。通过 Contiki OS 内嵌的 Cooja 仿真工具对协议进行最大吞吐量的仿真,评价该协议的适用场景。为衡量 CI-DC 协议的低功耗与可靠性,在占空比、数据包到达率方面与经典数据收集协议 CTP 进行比较。此外,利用实验室构建了一个具有 30 个 Tmote Sky 传感器节点的测试平台,对本文提出 CI-DC 协议进行实验。为降低环境中无线频谱的干扰,选择与 2.4 GHz Wi-Fi 信道重叠最少的信道 25 与信道 26 作为本实验的信道 0、信道 1^[18]。下文将从仿真和实验两个方面对提出数据收集协议的吞吐量、占空比、数据包到达率进行分析。

4.1 数据指标

1) 吞吐量

吞吐量大小决定网络的数据收集能力,决定其应用场景,其表达式如式(8)所示。

$$Thpt = \sum_{k=1}^r \sum_{p=1}^n PktPayload \cdot f(k, p) / t \quad (8)$$

$$f(k, p) = \begin{cases} 1 & \text{packet received} \\ 0 & \text{packet lost} \end{cases} \quad (9)$$

式中:Thpt 表示吞吐量,单位为 kbps; k 表示收集周期; r 表示收集周期的数量; p 表示感知节点; n 表示感知节点的数量; PktPayload 表示数据包有效负载; t 表示一个超帧的时间; f(k, p) 用来表示数据包是否被接收。

2) 无线占空比

无线占空比用于衡量节点的功耗,其计算公式为:

$$Dc = \frac{T_{rx} + T_{tx}}{T_{MCU}} \times 100\% \quad (10)$$

式中: T_{rx} 表示节点无线监听与接收所持续的时间; T_{tx} 表示节点无线发送所持续的时间; T_{MCU} 表示节点的运行时间。

3) 数据包到达率

数据包到达率指汇聚节点成功接收数据包的数值与节点发送的数据包数值的比值,如式(11)所示。

$$PRR = \frac{C_{Sr}}{C_{sts}} \times 100\% \quad (11)$$

式中: C_{Sr} 表示汇聚节点成功接收到的数据包数量; C_{sts} 表示全部感知节点发送数据包的数量,不包括重传的数据包。

4.2 仿真

在 cooja 仿真下构建一个 $20\text{ m} \times 120\text{ m}$ 的 CI-DC 仿真网络,其仿真模型为多路径光线追踪模型(multi-path ray tracing model, MRM),节点数据包洪泛次数 $N=2$ 。

为了方便最大吞吐量的计算,设置节点数量为 43, T_{sync} 为 2 s, data-phase 数量为 126,数据包有效负载设定为 19 Bytes,节点发射功率设定为 0 dBm。在这一条件下,仿真运行 150 个周期。测得其最大吞吐量为 1.107 kBytes/s,与理论计算值一致。对应的无线占空比为 40.053%。

为了比较 CI-DC 与 CTP 的无线占空比、数据包到达率,在 TinyOS 下利用 Tossim 对 CTP 进行仿真,CTP 保持默认设置。在 cooja 仿真和 Tossim 仿真中,节点的数量设置为 54,数据包产生间隔(inter-packet interval, IPI)设定为 10, 30, 100, 300 s,数据包有效负载设定为 17 Bytes,发射功率设定为 0 dBm。

图 8 所示为不同 IPI 下 CI-DC 与 CTP 的无线占空比。从图上可以看出,CI-DC 的无线占空比远小于 CTP 的无线占空比,而且两者的比值随着 IPI 的增大而增大。在 IPI=10 s 时,CTP 的无线占空比为 9.45%,CI-DC 的无线占空比为 4.28%,CI-DC 的能量效率是 CTP 的 2.2 倍;IPI=300 s 时,CTP 的无线占空比为 2.58%,CI-DC 的无线占空比为 0.79%,CI-DC 的能量效率是 CTP 的 3.26 倍。随着 IPI 的增大,CI-DC 的无线占空比下降速率变缓。这是由于 IPI 变大,感知节点发起洪泛的次数减少,而汇聚节点的同步次数没有发生变化,使得网络的开销变大。

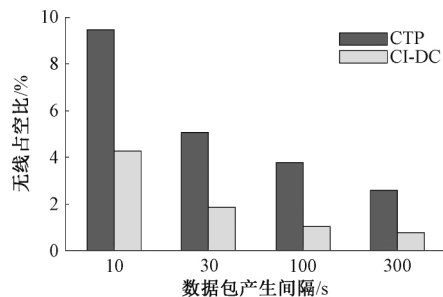


图 8 不同 IPI 下的平均无线占空比对比

图 9 所示为 IPI=30 s 的条件下每个节点的无线占空比。CTP 中节点的无线占空比取决于其子节点的数量。子节点数量越多,节点的无线占空比越大。然而,CI-DC 中,各个节点的无线占空比都相差不大。CI-DC 中各节点

无线占空比略微差异是由于节点分布位置不同导致的。在基于相长干涉的网络洪泛中,各个节点的无线同时打开,但是关闭时间由转发次数与最大持续时间决定。当节点的转发次数达到设定值时,或者无线开启时间达到设定最大开启时间时,无线就会关闭。每个节点相对于洪泛发起者的跳数不同,导致无线关闭的时间不同,所以无线占空比会略有差异。

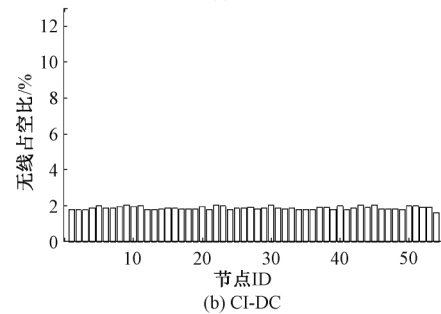
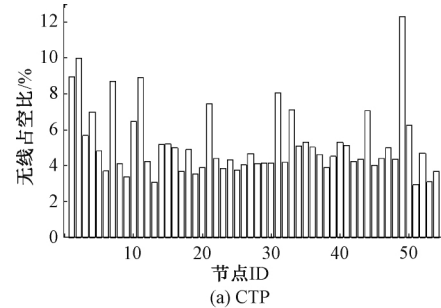


图 9 仿真下每个节点的无线占空比

表 1 所示为 CI-DC 与 CTP 的数据包到达率。由表 1 可以清晰的看出,CI-DC 的数据包到达率在 IPI=10, 30, 100, 300 s 下都是 100%,而 CTP 的数据包到达率分别为 93.4%, 94.2%, 92.1%, 88.6%。显然,CI-DC 的数据包到达率明显优于 CTP,从而证明了 CI-DC 的可靠性。

表 1 数据包到达率

IPI/s	10	30	100	300
CI-DC/(%)	100	100	100	100
CTP/(%)	93.4	94.2	92.1	88.6

4.3 实验验证

为了验证 CI-DC 的实际性能,我们在 $13.5\text{ m} \times 8.2\text{ m}$ 面积大小的实验室随机布置了 28 个 Tmote Sky 节点,如图 10 所示。测试平台上各节点的发射功率设置为 0 dBm。在 IPI=2 s 的条件下运行 3 h 来进行指标分析。

实验结果表明,在 IPI=2 s 的条件下,3 h 内的吞吐量为 0.303 2 Kbytes/s,与理论计算值相一致,如图 11 所示。运行时间内,吞吐量变化曲线没有波动,表明 CI-DC 运行稳定,能够实现几乎 100%的数据收集。图 12 所示为测试平台上 IPI=2 s 条件下运行 3 h 的每个节点的无线占空

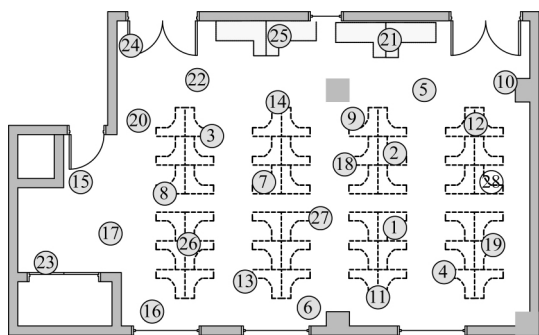


图 10 测试平台节点布置

比。由图 11 可以看出,每个节点的无线占空比基本一致,与仿真结论一致。

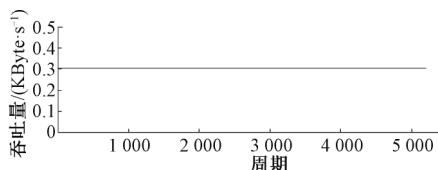


图 11 测试平台 IPI=2 s 对应的吞吐量

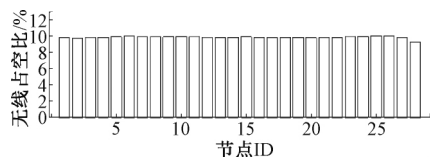


图 12 测试平台 IPI=2 s 每个节点的无线占空比

5 结 论

本文提出了一种基于相长干涉的无线传感器网络高效数据收集协议 CI-DC,在 Tmote Sky 节点上实现了感知节点轮询发起相长干涉网络洪泛的数据收集。CI-DC 的洪泛通信,不需要维护路由拓扑,避免了维护路由所需要的开销。这种无路由的机制,保障了网络的可靠性。CI-DC 的 TDMA 通信策略,避免了网络拥塞。大量的仿真和测试平台实验结果均表明,与 CTP 相比,CI-DC 显著降低了无线占空比,提高了数据收集的可靠性。为使协议具有更好的适用性,下一步讲进行吞吐量指标上的改进与提高。

参考文献

- [1] ZHANG H, LI Z. Energy-aware data gathering mechanism for mobile sink in wireless sensor networks using particle swarm optimization[J]. IEEE Access, 2020(8): 177219-177227.
- [2] JOHN N E, JYOTSNA A. A survey on energy efficient tree-based data aggregation techniques in wireless sensor networks [C]. 2018 International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA), IEEE, 2018: 461-465.
- [3] 郭立泉,王计平,熊大曦. 平衡评估压力传感阵列的高速数据采集系统设计[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(11):75-77.
- [4] ALDUAIS N A M, ABDULLAH J, JAMIL A, et al. An efficient data collection and dissemination for IOT based WSN[C]. 2016 IEEE 7th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON), IEEE, 2016: 1-6.
- [5] HABIB C, MAKHOUL A, DARAZI R, et al. Health risk assessment and decision-making for patient monitoring and decision-support using wireless body sensor networks[J]. Information Fusion, 2019, 47: 10-22.
- [6] RUTAKEMWA M M, JOSE I, GEORGES T M. Monitoring nyiragongo volcano using a federated cloud-based wireless sensor network [C]. 2017 4th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE), IEEE, 2017: 1545-1550.
- [7] SHA C, SONG D, YANG R, et al. A type of energy-balanced tree based data collection strategy for sensor network with mobile sink[J]. IEEE Access, 2019(7): 85226-85240.
- [8] GNAWALI O, FONSECA R, JAMIESON K, et al. Collection tree protocol[C]. Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, 2009: 1-14.
- [9] 钱锁. 基于无线传感器网络的智能交通系统介绍[J]. 电子测量技术, 2018, 41(5):102-105.
- [10] ARFI A B, KARKVANDI H R, PECHT E, et al. Lifetime-improved collection tree protocol for wireless sensor networks [C]. 2016 IEEE 7th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON), 2016: 1-6.
- [11] ZHANG J, HU P, LONG J. A hybrid transmission based data collection scheme with delay and reliability guaranteed for lossy WSNs[J]. IEEE Access, 2019(7): 70474-70485.
- [12] WU Y, LIU K S, STANKOVIC J A, et al. Efficient multichannel communications in wireless sensor networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), 2016, 12(1): 1-23.
- [13] 郑国强,李建东,周志立. 多跳无线传感器网络的高能效数据收集协议 [J]. 软件学报, 2010, 21(9): 2320-2337.
- [14] JINZHI L, MAKOTO S, DOOHWAN L, et al. Token-scheduled high throughput data collection with

- topology adaptability in wireless sensor network[J]. IEICE Transactions on Communications, 2014, E97. B(8):1656-1666.
- [15] JIN Y X, CHEN F Z, CHE G F, et al. Energy-efficient data collection protocol for wireless sensor network based on tree[C]. Asia-Pacific Conference on Wearable Computing Systems, IEEE Computer Society, 2010:82-85.
- [16] FERRARI F, ZIMMERLING M, THIELE L, et al. Efficient network flooding and time synchronization with glossy[C]. Proceedings of the 10th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks, IEEE, 2011: 73-84.
- [17] RAO V S, VENKATESHA P R, PRABHAKAR T V, et al. Understanding and improving the performance of constructive interference using destructive interference in WSNs[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking 2019, 27(2):505-517.
- [18] MOHAMMAD M, DODDAVENKATAPPA M, CHAN M C. Improving performance of synchronous transmission-based protocols using capture effect over multichannels [J]. ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), 2017, 13(2): 1-26.

作者简介

张阳,硕士,主要研究方向为无线传感器网络。

E-mail:zhangyang@mails.qust.edu.cn