# 自适应时槽分配的机械振动 WSNs 传输休眠 时序调度方法

## 舒云龙,汤宝平,黄艺

(重庆大学 机械传动国家重点实验室,重庆 400030)

摘要:目的 针对均匀时槽分配方法在机械振动无线传感器网络大量原始数据传输需求下,节点传输能耗升高、传输速率降低的问题,降低机械振动无线传感器网络传输能耗。方法 提出一种自适应时槽分配的机械振动无线传感器网络传输体眠时序调度方法,首先利用信标调度的自适应时槽分配时钟同步方法使各节点不需晶振补偿就可校准本地时钟误差,然后测量 LQI 预测节点数据传输速率,为各个节点分配最优传输时槽,最后设置休眠机制,让未进行数据传输的节点处于休眠状态待机,直到下一个同步时槽时,自动唤醒,并侦听网关信标帧。采用三种方法进行冲突次数、传输能量消耗和传输速率的对比实验。结果 所提方法的传输能耗比 CSMA-CA 机制降低 23.4%,比均匀时槽分配降低 10.6%。结论 所提方法能有效降低机械振动无线传感器网络数据传输能耗。

关键词:机制机械振动监测;无线传感器网络;自适应时槽分配;时序调度 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.04.012 中图分类号: TP274.2; TP393.1 文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)04-0071-06

## Adaptive Time Slot Allocation Transmission-sleep Timing Scheduling Method for Mechanical Vibration Wireless Sensor Networks

SHU Yun-long, TANG Bao-ping, HUANG Yi

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**ABSTRACT:** The work aims to reduce the transmission energy consumption of mechanical vibration wireless sensor networks in view of the problems in uniform time slot allocation under the mass raw data transmission requirement in mechanical vibration wireless sensor networks, such as increased transmission energy consumption and reduced transmission rate. Adaptive time slot allocation transmission-sleep timing scheduling method for mechanical vibration wireless sensor networks was proposed. Firstly, high accuracy of local clock of each sensor node regardless of the errors among crystal oscillators was ensured by the adaptive time slot allocation clock synchronization method based on beacon scheduling. Then, the optimal transmission slot was allocated for each sensor node based on the transmission rate predicted according to LQI. Finally, a new sleep scheduling mechanism was set up, in which the child nodes would be in a sleeping mode until being automatically woken up in the next

收稿日期: 2019-10-26; 修订日期: 2019-11-26

Received: 2019-10-26; Revised: 2019-11-26

基金项目:国家自然科学基金(51675067,51775065)

**Fund:** Support by National Natural Science Foundation of China (51675067, 51775065)

作者简介:舒云龙(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向为机械振动无线传感器网络。

Biography: SHU Yun-long (1993-), Male, Master graduate student, Research focus: mechanical vibration of wireless sensor networks.

**通讯作者:**汤宝平(1971—),男,博士,教授,主要研究方向为机械振动无线传感器网络。

Corresponding author: TANG Bao-ping (1971-), Male, Ph. D., Professor, Research focus: mechanical vibration of wireless sensor networks.

synchronization slot and gateway beacon frames were monitored. The number of conflicts, the energy consumption and the data transmission rate were compared and tested. The transmission energy consumption by the proposed method was respectively 23.4% and 10.6% lower than that by CSMA-CA mechanism and uniform time slot allocation. This proposed optimized method effectively reduces the energy consumption of mechanical vibration wireless sensor network.

KEY WORDS: mechanical vibration monitoring; WSNs; adaptive time slot allocation mechanism; time scheduling

由于无线传感器网络(Wireless sensor networks, WSNs)机动灵活,部署方便,可对密闭、旋转环境 中的机械装备关键部件进行振动监测等[1],已开始被 应用于机械振动监测领域<sup>[2-4]</sup>。由于机械振动数据采 样频率高,所采得数据量大,机械振动无线传感器网 络需要对大量数据进行传输。在数据传输期间,无线 传感器网络的 IEEE 802.15.4 协议定义了一种 CSMA/ CA 算法, 即载波侦听多路访问/冲突避免机制, 存在 多次载波侦听、隐藏节点所导致的高侦听能耗和高重 传能耗问题<sup>[5-6]</sup>。针对 CSMA-CA 在传输大量原始数 据时存在的不足,国内外学者进行了大量研究。Liu Y. 等人<sup>[7]</sup>提出了一种基于 OTSAC 的无线传感器网络自 适应压缩(QTSAC)协议,可以实现无线传感器网 络(WSNs)时延最小化,减少空闲侦听和冲突。Sharma N.等人<sup>[8]</sup>提出了一种基于负载的传输控制协议,通过 改变负载控制数据包的传输,减少能耗,提高网络生 命周期和吞吐量。这些算法<sup>[7-10]</sup>在具有物理分散性的 各节点上完成时隙分配往往不易。针对以上问题,赵 春华[11]提出了一种基于信标同步触发的机械振动 WSNs 传输休眠时序调度方法,通过周期性信息同 步调度,为各节点分配时槽,降低节点间数据包冲 突次数和能量开销。这种基于固定时槽节点轮询传 输机制的同步调度能耗开销较大,且由于各个节点 信道质量存在差异,导致传输速率不相等,部分节 点提前完成数据传输后仍然会占用时槽,无法进入 休眠状态,造成这些节点传输能耗升高,传输速率 降低等问题。

针对上述均匀时槽分配方法<sup>[11]</sup>存在的节点传输 能耗升高、传输速率降低的问题,文中提出了一种自 适应时槽分配的机械振动无线传感器网络传输休眠 时序调度方法。通过节点离线的时钟同步调度,与传 输时槽自适应分配,实现机械状态监测无线传感器网 络低功耗传输休眠时序调度。

## 1 自适应时槽分配传输休眠时序调 度方法原理

自适应时槽分配传输休眠时序调度方法原理如 图1所示。根据各个节点的数据传输链路质量,使用 自适应时槽分配算法,进行传输休眠时序调度,明确 各子节点的开始回传和结束回传时间,并在传输间隔 进行休眠以降低功耗。在网络节点时钟同步下,各子 节点可按传输时槽自主回传数据,减少子节点的侦听 能量损耗,并避免无谓的时槽占用。



图 1 目适应时槽分配传输休眠时序调度方法原理 Fig.1 Principle of adaptive slot allocation transmission-sleeping timing scheduling method

每隔一个同步时槽周期, 网关全网广播同步信标 帧,子节点接收同步信标帧,并更新本地时钟,实现 子节点间时钟同步,子节点回传 LQI (Link Quality Indicator,链路质量指示)、剩余的数据量等状态信 息至网关。网关以子节点上传的状态信息作为传输 时槽分配的依据,通过广播传输命令信标帧,通知 各子节点下一个同步时槽周期内的传输时槽信息。 各子节点在网络子节点时钟同步下,根据分配所得 传输时槽,按序自主占用信道使用时间。在用尽传 输时槽之后,进入休眠状态,将信道让出给下一个 子节点使用。未进行数据回传的子节点都将处于休 眠状态待机,在临近下一个同步时槽时自动唤醒, 并侦听网关信标帧。

同步时槽由比例因子 P 以及传输剩余时长 t 决定,同步时槽 T<sub>slot</sub>=P·t。一般情况下,P 设为 50%,同步时槽将随着数据传输的进行逐渐递减。在初次同步时,同步时槽设为固定值 1 s,在 1 s 内,各个子节点分别占用相同的传输时槽回传一段数据,借此测定各个子节点的 LQI,为网关对子节点的传输时槽分配提供依据。传输时槽分配基于各子节点的 LQI 值,LQI 越低,则为子节点分配的传输时槽将越大,使各个子节点在每一个同步时槽周期内传输相同的数据量,最终同步完成各自的数据传输任务。

# 2 机械振动 WSN 传输休眠时序调度 方法

## 2.1 信标调度

现有时钟同步方法需要网关频繁广播信标帧,节 点接收信标帧,并进行晶振偏移补偿。虽然同步精度 较高,但同步算法复杂,能耗高,不满足大量数据传 输中轻量、低功耗时钟同步需求。针对这一问题,提 出信标调度的自适应时槽分配时钟同步方法,网关节 点仅在需要同步时钟时发送单个信标,各节点通过信 标校准本地时钟误差,并在随后的同步时槽内,不再 进行晶振补偿,从而极大地降低同步次数。在全网时 钟同步基础上,自适应时槽分配算法既能有效避免节 点在设定的传输时槽内无法完成数据传输任务的情 况,又能避免节点传输完成还继续占用传输时槽的情 况,同时也可避免时钟偏移导致节点间数据传输冲突 造成不必要的能量消耗。

为验证该方法有效性,以7个采集节点和1个网 关节点组建星型网络,使用逻辑分析仪,获取各采集 节点的时钟脉冲信号,进行时钟同步误差实验。对采 样时钟信号进行处理,分析其时钟时序变化,计算其 同步误差。在节点网络不进行晶振偏移补偿的前提 下,设置节点采样频率为50kHz,逻辑分析仪采样频 率为100MHz,7个采集节点连续采集90s,并以节 点1的采样时钟为基准,其他节点与节点1的采样时 钟偏差即为时钟同步误差,实验结果如图2所示。随 着时间的推移,节点间同步误差逐步累积。当采集时 间达到90s时,最大同步误差仅为0.514ms,能够满 足对精度要求较低的机械振动数据传输时钟需求。



Fig.2 No crystals offset compensation synchronization error

### 2.2 传输休眠时序调度

同步时槽内,对各节点传输时槽的自适应分配依赖于节点传输速率,而节点传输速率与传输信道链路

质量直接相关。通过 LQI 指标评价链路质量,并通过 测量 LQI 预测节点数据传输速率,进而为各个节点分 配最优传输时槽。

为得到 LQI 与数据传输速率的离散模型,将采集 节点置于不同的工作条件下,以改变 LQI 进行簇内通 信。每次发送 1000 条与节点传输的原始振动数据长 度等长的数据帧至网关节点,每个数据帧 96 Bytes, 网关节点记录下传输 1000 条数据帧的时间以及 LQI 并取平均,最后构造 LQI 与数据传输速率,如图 3 所示。



Fig.3 Relations between data transmission rate and LQI

根据所得的 LQI 与数据传输速率的离散关系, 假 设满足一元线性回归模型:

v = aL + b, (L > 0, L < 45) (1)

式(1)中:v为数据传输速率;L为链路质量指 示;a、b为回归系数。拟合得到:

 $v = 0.29L + 32.53 \tag{2}$ 

在数据传输阶段,初次同步时,同步时槽设为固定值1s,并设置LQI为一个定值。网关节点广播传输命令信标帧,采集子节点开始在1s时间内分别占用相同的传输时槽进行数据传输,并上传子节点状态信息。网关节点获取各个子节点的剩余数据量 N<sub>i</sub>以及相应的LQI值,剩余传输阶段,所有子节点完成数据传输所需要的时间 t 由式(2)和式(3)可得:

$$t = \sum_{i=1}^{i} \frac{N_i}{v_i} \tag{3}$$

下一次同步时槽将由比例因子 P 以及传输剩余时长 t 决定,一般情况下,P 设为 50%,同步时槽将随着数据传输的进行逐渐递减,由式(4)重新分配下一次同步时槽 T<sub>slot</sub>:

$$T_{\text{slot}} = P \cdot t \tag{4}$$

网关节点通过广播传输命令信标帧,子节点接收 同步信标帧和下一个同步时槽周期内的传输时槽信 息。传输时槽分配基于各子节点的 LQI 值,LQI 越低, 则为子节点分配的传输时槽将越大。使各个子节点在 每一个同步时槽周期内传输相同的数据量,各采集子 节点分配的传输时槽 t<sub>slot(i)</sub>由式(5)可得:

$$t_{\text{slot}(i)} = T_{\text{slot}(i)} \cdot \frac{N_i / v_i}{t}$$
(5)

各子节点在网络时钟同步下,根据分配的传输时 槽,按序自主占用信道使用时间。在用尽传输时槽之 后,进入休眠状态,将信道让出给下一个子节点使用。 未进行数据回传的子节点都将处于休眠状态待机,在 临近下一个同步时槽时自动唤醒,并侦听网关信标 帧。在一个同步时槽内,各子节点开始唤醒进行数据 传输的时间相位 *B*<sub>i</sub>由式(6)可得:

$$B_i = \sum_{n=1}^{i-1} t_{\text{slot}(n)} \tag{6}$$

一次同步时槽内的数据传输完成后,重复上述过程,继续下一次同步时槽分配和子节点传输时槽分配。直到 *T*<sub>slot</sub>小于等于 1 s,则设置 *T*<sub>slot</sub>=1 s,直到所有采集子节点完成所有数据传输。

## 3 实验验证

为了验证该自适应时槽分配的机械振动无线传 感器网络传输休眠时序调度方法的性能,采用机械无 线振动传感器网络节点WSNG4组成星型网络进行测 试。WSNG4采用双核心处理器架构,其中核心 1STM32F405负责信号采集、信号存储和处理,核 心 2 CC2530主要负责网络管理和数据传输,两者协 同工作。节点支持IEPE传感器,可采用低噪声的IEPE 传感器进行机械振动信号采集。实验测试平台如图 4 所示,分别对动力传动故障诊断综合试验台平行轴齿 轮箱输入轴和输出轴的水平和垂直方向进行机械振 动信号采集。测试实验以数据传输中的冲突次数、能量消耗以及传输速率作为性能指标。为测试不同 LQI 对测试性能指标的影响,将 WSNG4 采集节点分别布置在试验台的四个角落,1、2、3、4 号节点距离网关的距离分别为5、100、120、100 cm。



图 4 实验测试平台 Fig.4 Experimental test platform

#### 3.1 冲突次数对比

采用1个网关和4个采集节点组成星型网络,各 个子节点数据传输总量均为25.6 kB。网关节点首先 下发数据传输命令信标帧,子节点接收到命令信标帧 后,采用CSMA-CA机制进行数据传输,统计各个子 节点完成数据传输中发生的冲突次数。然后分别采用 均匀时槽分配方法以及文中提出的自适应时槽分配 方法按照上述实验过程重复测试,三种方法分别重复 20次实验。实验结果如图5所示。



Fig.5 Number of conflict of each child node: a) CSMA-CA mechanism; b) uniform time slot allocation; c) adaptive time slot allocation mechanism

由图 5 可知,各节点在相同方法下的冲突次数基本保持一致。采用 CSMA-CA 机制时,对于请求传输的子节点,需要请求获得信道使用权,每个节点获得使用权的几率都是相等的。对于均匀时槽分配方法和自适应时槽分配方法而言,由于冲突仅是在信标网络周期,网关将在每个长同步时槽之后广播信标帧,信

道仅在此时被占用,每个子节点的数据传输总量是一 致的,因此冲突次数基本相同。通过方法对比,在均 匀时槽分配方法和自适应时槽分配方法下,由于各节 点采用休眠和传输时序调度,不需要进行信道冲突访 问,因此各节点的冲突次数基本相同,并且冲突次数 较 CSMA-CA 机制而言大幅下降。

#### 3.2 能量消耗对比

在上述实验过程中,测试数据传输过程各个子节 点的传输能量消耗。各子节点的能量消耗如图 6 所 示,从四个节点的能量对比分析可知,随着距离的增 加,各节点的传输能耗相应增加。这是由于各节点离 数据中心距离的不同,导致节点的通信质量不同,进 而通信质量差的丢包重传次数多,增加传输能耗。同 时由图 6 可以得到,自适应时槽分配方法的传输能 耗比 CSMA-CA 机制降低 23.4%,比均匀时槽分配 方法降低 10.6%。这是因为在 CSMA-CA 机制下, 冲突次数比其他两种方法大,整体传输能量消耗大 于另外两种方法。均匀时槽分配方法中,时槽是均 匀的,在传输时槽中会出现因数据已经发送完毕却 没有释放信道的情况,在传输能耗上比自适应时槽 分配方法略高。



#### 3.3 传输速率对比

通过记录各个节点数据传输的时间,分别计算三 种方法下各个子节点的传输速度。靠近网关最近的节 点1和最远的节点3的一次测试数据如图7所示。采 用 CSMA-CA 机制时, 传输速率比其他两种方法速率 高。这是因为每个节点都有相同的几率占用信道,并 且一直在请求占用信道上传数据,但是它消耗的能量 是高于其他两种方法的。均匀时槽分配方法因为数据 量的大小在传输时槽中数据传输完毕后依然占用着 信道,因此而消耗的传输时间更多,传输速率更低。 对于自适应时槽方法,由于各个子节点数据传输的时 间相互错开,减少了冲突次数,在每段传输时槽保 证了数据传完之后释放信道,因此传输时间更短, 相比均匀时槽分配方法传输速率高。通过对距离数 据的分析,节点1的平均传输速率为87.6 kbps,节 点 3 的平均传输速率为 82.7 kbps。因各节点距离的 不同,导致通信质量不一样,而通信质量在较低时 丢包重传次数高,因此距离较近的节点通信质量较 好,传输速率更高。



图 7 节点 1、3 传输速率与数据长度的关系 Fig.7 Relationship between transmission rate and data length of nodes: a) node 1; b) node 3

## 4 结论

文中提出了自适应时槽分配的机械振动无线传 感器网络传输休眠时序调度方法,用于改进均匀时槽 分配的方法在机械振动无线传感器网络大量原始数 据传输需求下节点传输能耗升高、传输速率降低的不 足。通过信标调度的自适应时槽分配时钟同步方法, 使各节点不需要晶振补偿,就可以校准本地时钟误 差,极大地降低了同步次数。通过 LQI 指标评价链路 质量,并通过测量 LQI,预测节点数据传输速率,进 而为各个节点分配最优传输时槽,以充分利用信标网 络下全网周期性同步。此外,未进行数据回传的子节 点都将处于休眠状态待机,直到下一个同步时槽时自 动唤醒,并侦听网关信标帧,使节点空闲期能耗降至 最低。实验结果表明,与 CSMA-CA 方法和均匀时槽 分配方法相比,自适应时槽分配方法能有效降低无线 传感器网络的传输能耗。

#### 参考文献:

 汤宝平,黄庆卿,邓蕾,等.机械设备状态监测无线传 感器网络研究进展[J].振动、测试与诊断,2014,34(1): 1-7.

TANG Bao-ping, HUANG Qing-qing, DENG Lei, et al. Research Progress and Challenges of Wireless Sensor Networks for Machinery Equipment Condition Monitoring[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosi, 2014, 34(1): 1-7.

[2] 曾超,汤宝平,邓蕾,等.基于混合拓扑的机械无线传感器网络多信道数据传输方法[J].振动与冲击,2018,37(4):28-34.

ZENG Chao, TANG Bao-ping, DENG Lei, et al. A Multi-channel Data Transmission Method for Mechanical Wireless Sensor Networks Based on Hybrid Topology[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(4): 28-34.

- [3] WHELAN M, ZAMUDIO N S, KERNICKY T. Structural Identification of a Tied arch Bridge Using Parallel Genetic Algorithms and Ambient Vibration Monitoring with a Wireless Sensor Network[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2018, 8(1): 1-16.
- [4] 曾贵伟,汤宝平,邓蕾,等. 机械振动无线传感器网络 节点高精度数据采集方法[J]. 振动与冲击, 2016, 35(16): 59-63.
  ZENG Gui-wei, TANG Bao-ping, DENG Lei, et al. A High Precision Method for Mechanical Vibration Data Acquisition Based on Wireless Sensor Networks Node[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(16): 59-63.
- [5] YE D, ZHANG M. A Self-Adaptive Sleep/Wake-Up Scheduling Approach for Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 99: 1-14.
- [6] MUKHERJEE M, SHU L, PRASAD R V, et al. Sleep

Scheduling for Unbalanced Energy Harvesting in Industrial Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 99: 1-8.

- [7] LIU Y, OTA K, ZHANG K, et al. QTSAC: An Energy-Efficient MAC Protocol for Delay Minimization in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Access, 2018, 99(6): 8273-8291.
- [8] SHARMA N, SINGH K, SINGH B M. A Load Based Transmission Control Protocol for Wireless Sensor Networks[J]. International Journal of Information Technology, 2018(4): 1-7.
- [9] KIRUBAKARAN M K, SANKARRAM N. IW-MAC: A Invite and wait MAC Protocol for Power Efficient Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Ambient Intelligence & Humanized Computing, 2018(6): 1-12.
- [10] CHINCOLI M, LIOTTA A. Self-Learning Power Control in Wireless Sensor Networks[J]. Sensors, 2018, 18(2): 375.
- [11] 赵春华,邓蕾,汤宝平,等.基于信标同步触发的机械振动 WSNs 传输休眠时序调度方法[J].振动与冲击,2018,37(22):103-108.
  ZHAO Chun-hua, DENG Lei, TANG Bao-ping, et al. Transmission-sleep Timing Scheduling Method Based on the Beacon Synchronous Trigger for Machine Vibration Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(22): 103-108.