

无线纳米传感器网络高吞吐量无冲突接入控制

池凯凯^{1,2} 林一民¹ 李燕君¹

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)¹

(浙江省可视媒体智能处理技术研究重点实验室 杭州 310023)²

摘 要 无线纳米传感器网络是一种有着重要潜在应用的新兴传感器网络。考虑到纳米传感器的极低处理能力,研究人员提出了具有极低复杂度的基于 TS-OOK 的接入控制方案。针对该方案存在的数据比特发送会连续冲突及吞吐量较低这两个不足,设计了 3 种改进型 TS-OOK 方案:周期固定带宽均分接入控制方案、周期倍增带宽均分接入控制方案和支持优先级的接入控制方案。这 3 种方案都通过接入节点与中继节点之间的简单控制包交互来实现冲突避免。性能分析表明这 3 种方案具有更高的吞吐量和更低的传输时延。

关键词 无线纳米传感器网络,接入控制,冲突避免,高吞吐量

中图分类号 TN 911.2 **文献标识码** A

High-throughput and Collision-free Medium Access Control for Wireless Nanosensor Networks

CHI Kai-kai^{1,2} LIN Yi-min¹ LI Yan-jun¹

(School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)¹

(Key Laboratory of Visual Media Intelligent Process Technology of Zhejiang Province,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)²

Abstract Wireless nanosensor networks(WNSNs) are a new type of sensor networks which have some very important and promising applications. Considering the severely low computation capability of nanosensors, the TS-OOK based medium access control(MAC) mechanism with very low computation complexity was proposed. Aiming to eliminate the defects of TS-OOK based MAC that the continuous bit collision may happen and the throughput is low, this paper presented three improved TS-OOK based MAC mechanisms: period-fixed and bandwidth-fair MAC, period-doubling and bandwidth-fair MAC, and priority-aware MAC. All three mechanisms achieve no collision through a few transmissions of control frames between access nodes and relay node. Performance evaluation shows that the enhanced MAC mechanisms have higher throughput and lower transmission delay.

Keywords Wireless nanosensor networks, Access control, Collision avoidance, High throughput

1 引言

随着纳米技术的快速发展,通过直接控制原子拼组成纳米级别的传感器即纳米传感器^[1,2]已经成为可能。使用无线通信技术将多个纳米传感器相互连接所组成的网络称为无线纳米传感器网络(Wireless NanoSensor Networks, WNSNs)^[3,4]。该类新型传感器网络在环境、医疗、工业等领域有着非常广泛的应用前景。由于纳米传感器节点仅具有约几百纳米的大小,其纳米处理器的处理能力极其有限,因此需要设计具有极低计算复杂度的通信协议。

无线纳米传感器网络通信协议设计包括物理层调制模式、数据链路层的多址接入方法、路由协议设计等,都需要考虑到计算复杂度问题。关于物理层调制模式的设计,由于键控开关调制即 OOK(On-Off Keying)调制具有较低的复杂度,即发送一个脉冲信号来表示发送比特“1”,而保持无线电

安静即天线上不发送任何电压信号来表示发送比特“0”,是无线纳米传感器较有应用前景的调制方式之一^[4]。对于基于 OOK 调制的 WNSNs, Jornet 等人首先提出低码重编码方案,其能降低邻近节点的比特发送发生冲突的概率^[5],我们以及 Kocaoglu 等人提出了低码重编码方案来显著节省发送能耗^[6,7]。

关于 WNSNs 的接入控制协议,已有的无线网络的 MAC 协议都是面向具有较高计算能力的宏观节点来设计的,如无线局域网的 IEEE 802.11 MAC 协议、传统无线传感网采用的基于竞争的 MAC 等。因此这些已有的高复杂度的 MAC 协议不适用处理能力极其有限的纳米传感器节点。Akyildiz 等人提出了能实现较低冲突的接入控制方案^[4,5];对于采用 OOK 调制的纳米传感器节点,每发送出一个比特符号后,空闲一个较长的固定的时间间隔后再发送下一个比特符号。这种基于 OOK 调制的较长周期 T 内只发一个比特符号的发送

本文受国家自然科学基金(61472367,61432015,61379124),浙江省自然科学基金(LY13F020025,LY13F020028)资助。

池凯凯(1980—),男,博士,副教授,主要研究方向为无线通信,E-mail:kkchi@zjut.edu.cn;林一民(1992—),男,主要研究方向为无线传感器网络;李燕君(1982—),女,博士,副教授,主要研究方向为无线传感器网络。

方式被称为时域扩展的 OOK 调制 (Time Spread On-Off Keying, TS-OOK)。将物理层发送一个比特符号 (即一个脉冲) 所消耗的时间用 T_s 表示。与传统无线网络中数据包级的接入控制不同, 基于 TS-OOK 的接入控制是比特级的接入控制。

对于使用 TS-OOK 的 WNSNs, 只有当两个发送比特信息的相邻节点刚好在同一时刻发送比特符号时才会发生冲突, 故两个接入节点的数据发送发生冲突的概率为 T_s/T 。根据 WNSNs 冲突概率需求, T 往往有一个取值下限 T_{\min} ; 而由于时延、速率等需求, T 有一个取值上限 T_{\max} 。TS-OOK 中 T 设置为 T_s 的整数倍且相对较大的值来实现较小的冲突概率, 比如 $T=100T_s$ 。然而, 已有 TS-OOK 方案存在以下两个不足: (1) 一旦两个节点的某一个比特发送发生了冲突, 则他们后续的所有比特发送都发生冲突, 从而会导致接收节点上大量的比特接收错误, 称这种冲突为连续冲突。连续冲突在很多应用中是无法接受的。(2) 已有 TS-OOK 方案由于在较长的周期 T 内只发一个比特符号, 导致节点吞吐量不高, 传输时延较长。考虑到已有 TS-OOK 的这两个不足, 本文提出了 3 种无冲突的改进型 TS-OOK 传输方案。这 3 种改进方案通过对接入节点和中继节点的简单互动协调, 达到无冲突的效果, 并且采用连续多比特数据发送方式, 即一个发送周期内, 接入节点连续发送多个比特符号, 来显著提高信息比特吞吐量, 减少信息传输时延。

本文第 2 节介绍了数据中继模型; 第 3 节提出了 3 种高吞吐量的无冲突接入控制方案, 并总结了所有方案的优缺点及适用场景; 第 4 节分析了不同方案的吞吐量和包传输时延; 第 5 节为性能评估; 最后总结全文。

2 中继模型

考虑的场景为一个中继节点 R 为多个接入节点 (邻居节点) 中继数据的情形, 如图 1 所示。不同接入节点的初始接入时刻相互独立, 各接入节点使用 TS-OOK 的数据发送方式且使用相同的发送周期 T 。本文考虑当某个邻居节点 A 有数据流需要发往中继节点 R 时 (即 A 成为一个接入节点时) 节点 A 与中继节点所要进行的操作, 以使 A 节点的比特发送同已有接入节点的比特发送达到低冲突甚至无冲突, 且使接入节点能有较高的吞吐量。

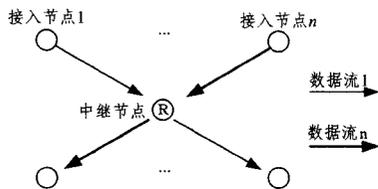


图 1 多接入中继示意图

3 高吞吐量冲突避免接入方案设计

首先, 本文所提出的改进型 TS-OOK 接入控制方案采用了一个周期内连续发送多个比特以提高吞吐量的方法。连续多比特发送方式的主要思想如图 2 所示, 接入节点每一个发送周期 T 内连续发送 N 个比特 ($N \geq 1$)。 N 的取值需要精心设计, 过大则会导致较高的比特发送冲突概率, 过小则会导致

较低的吞吐量。

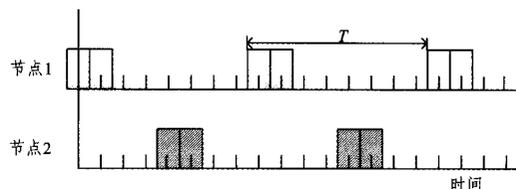


图 2 接入节点的发送信号

另外, 本文所提出的 3 个接入控制方案当发生以下两种情况中的任何一种时, 触发中继节点启动接入控制操作: 情况一, 当接入节点有数据流要发送给中继节点时, 接入节点在其他接入节点的发送空闲期发送一个很小的接入请求控制包来通知中继节点本节点有数据流要发往中继节点, 中继节点接收接入请求控制包; 情况二, 当中继节点发现有接入节点数据发送完毕时。3 个接入控制方案都是分如下 3 步操作来执行: 步骤一, 中继节点重新计算各个接入节点 (包括新加入的接入节点) 的周期长度、周期内连续发送比特个数、新的开始发送时刻等参数值; 步骤二, 将计算所得参数值写入回复控制包并广播该控制包给所有接入节点; 步骤三, 接入节点接收来自中继节点的回复控制包, 然后从该回复控制包中读出本节点相关参数的值, 并按新的参数值来进行后面的比特发送。这 3 个接入控制方案通过中继节点和接入节点的简单互动操作, 有效协调各个接入节点的发送时刻、连续发送比特数目等参数, 避免各个接入节点的数据流冲突, 同时提高了吞吐率并减小了传输时延。

需要说明的是, 3 个接入控制方案的不同之处体现在: 步骤一中接入节点发送参数的取值方法是不同的。正是发送参数取值的不同, 使得 3 个接入控制方案有较大的区别。下面进一步说明 3 个接入控制方案的参数取值方法。表 1 总结了本文所用到的符号。

表 1 符号描述

符号	描述
T	接入节点发送周期
T_{\min}	发送周期取值下限
T_{\max}	发送周期取值上限
T_s	物理层发送一个比特符号所消耗的时间
n	接入节点个数
N_i	节点 i 连续发送比特个数
P	优先级参数
P_T	接入节点优先级参数之和
R_i	节点 i 的吞吐量
R	接入节点总吞吐量
L_i	节点 i 数据包的长度, 即所包含的比特数目
D_i	节点 i 的数据包传输时延

3.1 方案一: 周期固定带宽均分的接入控制方案

本方案主要思想如图 3 所示, 各个节点发送周期固定不变, 当需要中继的接入节点数目越多时, 每个接入节点在一个周期内连续发送比特数目越少, 直至单比特传输。

本方案中步骤一的参数值计算操作包括: (1) 先更新接收节点个数参数 n 。网络刚部署或初始化时 n 被初始化为 0; 有新节点加入时, $n \leftarrow n+1$; 有节点传输完成退出时, $n \leftarrow n-1$ 。(2) 对于每个接入节点 i , 计算连续发送比特个数 $N(n) = \left\lfloor \frac{T}{nT_s} \cdot \alpha \right\rfloor$, 其中参数 α 为发送时间在总时间里占的比例值。

如果 $N(n) < 1$, 则结束计算过程并且不给新接入节点回复任何控制包以表示拒绝其接入请求。(3) 计算节点 i 开始发送时刻 $t_i = t_0 + \left\lfloor (i-1) \frac{T}{nT_s} \right\rfloor \cdot T_s$, 其中 t_0 是本中继节点下一个周期的开始发送时刻。

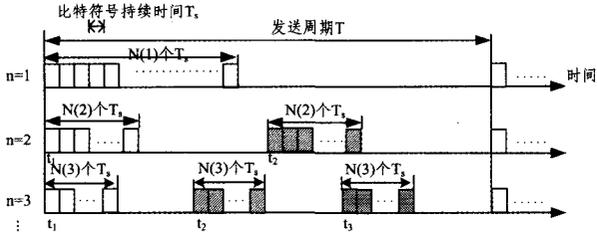


图3 基于固定周期的带宽均分发送方案示意图

在本方案中, 节点发送周期 T 固定。当接入节点 i 读出回复控制包信息后, 在时刻 t_i 开始, 以 T 为周期, 每个周期开始时连续发送 $N(n)$ 个比特符号, 周期内发送完 $N(n)$ 个比特符号后的剩余 $T - N(n) \times T_s$ 时间内不发送任何比特符号。需要说明的是, $\alpha < 0.5$ 可保证中继节点可用来转发数据的时间大于接收数据所耗时间, 即能把收到的数据都转发出去。

3.2 方案二: 周期倍增带宽均分的接入控制方案

本方案的主要思想如图4所示, 各个接入节点每周期内连续发送比特个数恒定为 $N = \left\lfloor \frac{T_{\min}}{T_s} \cdot \alpha \right\rfloor$ 。当有 n 个接入节点时, 各个接入节点的发送周期 $T = nT_{\min}$ 。但要满足约束 $T = nT_{\min} \leq T_{\max}$, 因此本方案适用于 T_{\max}/T_{\min} 较大的 WNSNs, 从而 n 可以取相对较大的值。

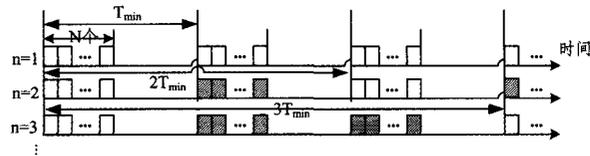


图4 基于固定吞吐量的发送周期倍增方案示意图

步骤一的计算处理操作包括: (1) 先更新接收节点个数 n 。(2) 计算节点 i 开始发送时刻 $t_i = t_0 + (i-1) \times T_{\min}$, $i = \{1, 2, \dots, n\}$ 。(3) 计算节点 i 的发送周期 $T(n) = nT_{\min}$, 如果 $n > \lfloor T_{\max}/T_{\min} \rfloor$, 则结束操作并且不给新接入节点回复任何控制包以表示拒绝其接入请求。

在本方案中连续发送比特个数 N 保持不变, 在接入节点读出回复控制包信息后, 在下一个开始发送时刻 t_i 开始, 在发送周期 $T(n)$ 内连续发送 N 个比特。

3.3 方案三: 支持优先级的接入控制方案

上述两种方案是为数据流地位平等的 WNSNs 设计的, 即不考虑优先级存在的情况。

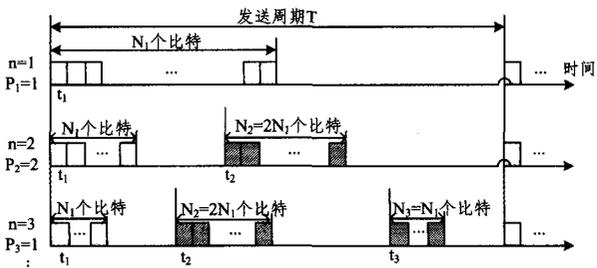


图5 不同优先级数据节点传输示意图

对于有些无线纳米传感网, 由于数据的实时性要求和数据的重要性不同, 需要区分各个纳米传感器节点上传送的数据的优先级大小。为此, 我们设计具有优先级区分的接入控制方案。在接入节点发送的接入请求控制包中设置其数据流优先级参数 P , P 为正整数。不同优先级的数据接入同一个中继节点时, 优先级越高则单位时间内发送的比特数越多, 如图5所示。

步骤一的计算处理操作包括: (1) 更新接收节点个数参数 n 。对于有新节点接入的情况, 存储该接入节点的优先级参数, 并计算当前所有接入节点的优先级总和 $P_T = \sum_{i=1}^n P_i$ 。

(2) 计算接入节点 i 连续发送比特个数 $N_i = \left\lfloor \frac{T}{T_s} \cdot \frac{P_i}{P_T} \cdot \alpha \right\rfloor$, $i = \{1, 2, \dots, n\}$ 。当 $N_i < 1$ 时, 则结束计算过程并且不给新接入节点回复任何控制包以表示拒绝其接入请求。(3) 计算节点 i 开始发送时刻 $t_i = t_0 + \sum_{k=1}^{i-1} T_k$, 其中 $T_k = \left\lfloor \frac{T}{T_s} \cdot \frac{P_k}{P_T} \right\rfloor T_s$ 。

本方案周期固定不变, 接入节点 i 接收回复控制包后, 即在时刻 t_i 开始, 以 T 为周期, 在每个周期的开始时刻连续发送 N_i 个比特符号, 周期内发送完这 N_i 个比特符号后的剩余 $T - N_i \times T_s$ 时间内不发送任何比特符号。

3.4 方案优缺点分析

总的来说, 相比于已有的 TS-OOK 的方案, 本文提出的3个方案会在中继节点上进行少量的简单计算以及在中继节点和接入节点间进行少量的控制包收发, 但有效地避免了冲突和提高了吞吐量。表2总结了不同接入方案的优缺点。

表2 WNSNs 不同接入控制方案的优缺点

方案	特征	优点	缺点	适用场景
已有方案	单比特随机发送	无控制包收发, 操作简单	会发送连续冲突, 吞吐量小, 传输时延大	适用于数据量小且简短的传输场景
方案一	周期不变、带宽均分	无冲突、高吞吐量、低传输时延	有少量控制包收发	适用于数据流无优先级、 $K=T/T_s$ 较大的网络场景
方案二	周期倍增、带宽均分	无冲突、高吞吐量、低传输时延	有少量控制包收发	适用于数据流无优先级、 T_{\max}/T_{\min} 值较大的网络场景
方案三	周期不变、考虑优先级	无冲突、高吞吐量、低传输时延	有少量控制包收发	适用于区分数据优先级传输的场景

4 性能分析

本节分析不同接入控制方案的吞吐量和数据包传输时延。

4.1 吞吐量

吞吐量 R 指在单位时间内中继节点中继的比特数目, 也即单位时间内信道传输的比特数目。因此, 可表示如下:

$$R = \sum_{i=1}^n N_i / T \quad (1)$$

在已有 TS-OOK 方案中, 一个接入节点在一个周期内只发送一个比特符号。由于多个接入节点加入中继是不经过中继节点协调处理的, 两个数据流可能产生冲突。对于 n 个接入节点而言, 某个数据流不与其它 $n-1$ 条流发生冲突的概率 $P_s = (1 - \frac{1}{K})^{n-1}$, 其中 $K = \frac{T}{T_s}$ 。那么某个数据流与其它一条

或多条数据流发生冲突的概率 $P_f = 1 - P_s = 1 - (1 - \frac{1}{K})^{n-1}$ 。

由此可得,节点 i 的期望吞吐量

$$R_i = P_f \cdot 0 + P_s \cdot \frac{1}{T} = (1 - \frac{1}{K})^{n-1} \cdot \frac{1}{T} \quad (2)$$

因此信道总吞吐量

$$R = \sum_{i=1}^n R_i = n(1 - \frac{1}{K})^{n-1} \cdot \frac{1}{T} \quad (3)$$

在方案一中,接入节点每周期内连续发送比特个数相同,

都为 $N = \lfloor \frac{T\alpha}{nT_s} \rfloor$,且因此吞吐量

$$R = \sum_{i=1}^n N_i / T = n \lfloor \frac{T\alpha}{nT_s} \rfloor / T \quad (4)$$

在方案二中,节点 i 在周期 T 内发送比特数为 $\lfloor \alpha T_{\min} / T_s \rfloor$,因此当有 n 个接入节点时,信道上每周期内传输的总信息比特数为 $n \lfloor \frac{T_{\min}}{T_s} \cdot \alpha \rfloor$,而周期长为 nT_{\min} 。因此吞吐量

$$R = \frac{n \lfloor \frac{T_{\min}}{T_s} \cdot \alpha \rfloor}{nT_{\min}} = \frac{\lfloor \frac{T_{\min}}{T_s} \cdot \alpha \rfloor}{T_{\min}} \quad (5)$$

在方案三中,由于不同节点的数据流有不同的优先级,因此每个节点在每个周期内连续发送比特数目不同,节点 i 一个周期内连续发送比特个数为 $N_i = \lfloor \frac{T}{T_s} \cdot \frac{P_i}{P_T} \cdot \alpha \rfloor$,因此

$$R = \sum_{i=1}^n N_i / T = \sum_{i=1}^n \lfloor \frac{T}{T_s} \cdot \frac{P_i}{P_T} \cdot \alpha \rfloor / T \quad (6)$$

4.2 传输时延

接入节点 i 的包传输时延 D_i 定义为该节点的数据包的第 1 个比特发送时刻到最后一个比特发送完成时刻所经历的时间。设接入节点 i 传送的数据包为 L_i bit。在前 $\lfloor \frac{L_i}{N_i} \rfloor$ 个周期时间内,节点 i 每个周期连续传输 N_i bit;在最后一个周期时间内,尚未发送的数据比特数小于本周期可以连续发送的比特数,在最后一个比特的发送完成时完成包传输,而不是在周期末尾时隙完成包传输。因此,传输时延可表示为

$$D_i = \lfloor \frac{L_i}{N_i} \rfloor T + (L_i \% N_i) T_s \quad (7)$$

在已有 TS-OOK 方案中,一个周期只发送一个比特即 $N=1$,因此在不发生冲突时其包传输时延

$$D_i = L_i T \quad (8)$$

在方案一中,节点 i 连续发送比特个数为 $N_i = \lfloor \frac{T\alpha}{nT_s} \rfloor$,且每个节点连续发送比特个数相同,因此其传输时延

$$D_i = \lfloor L_i / \lfloor \frac{T\alpha}{nT_s} \rfloor \rfloor \cdot T + (L_i \% \lfloor \frac{T\alpha}{nT_s} \rfloor) T_s \quad (9)$$

在方案二中,所有节点的连续发送比特数目恒定。节点 i 在周期 T 内发送比特数为 $\lfloor \alpha T / T_s \rfloor$,因此其传输时延为

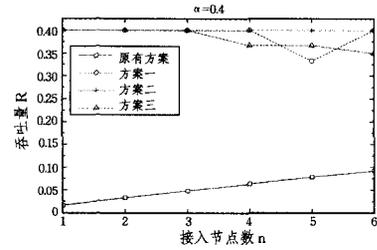
$$D_i = \lfloor L_i / \lfloor \frac{\alpha T}{T_s} \rfloor \rfloor \cdot nT_{\min} + (L_i \% \lfloor \frac{\alpha T}{T_s} \rfloor) T_s \quad (10)$$

在方案三中,不同节点的数据流有不同的优先级,优先级参数越大,连续发送比特数也越多。节点 i 在周期 T 内连续发送比特个数为 $N_i = \lfloor \frac{T}{T_s} \cdot \frac{P_i}{P_T} \cdot \alpha \rfloor$,因此其传输时延

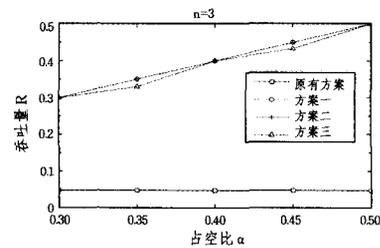
$$D_i = \lfloor L_i / \lfloor \frac{\alpha TP_i}{T_s P_T} \rfloor \rfloor \cdot T + (L_i \% \lfloor \frac{\alpha TP_i}{T_s P_T} \rfloor) T_s \quad (11)$$

5 性能评估

本节将所提出的 3 种改进的 TS-OOK 方案与原有 TS-OOK 进行性能比较。进行比较的性能指标为吞吐量和包传输时延。图 6 中的数据都是在以下参数取值时计算所得: $T_s = 1, T = T_{\min} = 60$,且方案三中节点 i 的优先级 $P_i = i$ 。



(a) 不同接入节点数下的吞吐量



(b) 不同占空比下的吞吐量

图 6 吞吐量性能比较

图 6(a) 给出了不同接入节点数下的各种方案的吞吐量对比,其中 $\alpha = 0.4$ 。从该图中可以得到以下结论。首先,原有 TS-OOK 方案吞吐量随着接入节点数增多而增大,这是由于该方案中每个接入节点在每个周期 T 中只发送一个比特,当接入节点增多时,吞吐量会随接入节点数增多而增大,但吞吐量还是相对较低。另外,总体来说,3 种改进的 TS-OOK 方案的吞吐量比较高且基本保持不变,这是由于这 3 种方案中每个接入节点在每个周期 T 中会发送多个比特且吞吐量主要取决于占空比(见图 6(b))。不过,方案一和方案三的吞吐量会略有波动,其原因在于这两个方案的每个周期中比特发送总数由于带有取整的操作(参见式(4)和式(6)),在不同的 n 取值下是略有波动的。而该波动的幅度随着 K 取值的增加而减小。

图 6(b) 给出了不同占空比下的各种方案的吞吐量,其中 $n = 3$ 。从图中可以看出,3 种改进的 TS-OOK 方案的吞吐量都随占空比的增大而增大,且他们的吞吐量基本相同。

图 7(a) 给出了不同接入节点数下的各种方案的包传输时延,其中 $\alpha = 0.4, L_i = 100$ 。方案三中不同接入节点有不同的优先级,图中传输时延为各个接入节点传输时延的平均值。从该图中可以得到以下结论。首先,随着接入节点数的增多,原有 TS-OOK 方案的传输时延较大,但保持不变,这是因为原有方案的每个接入节点在单个周期只发送一个比特,传输时延只与数据包长度和周期长度有关。而 3 个改进方案的传输时延都随节点数的增多而增大,这是因为 3 个改进方案中接入节点的一个周期内发送比特数目随接入节点数增多而减少。其次,方案三的传输时延比方案一和方案二的大,这是由

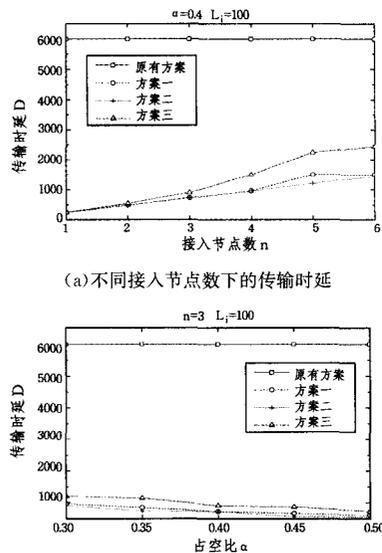
(下转第 300 页)

- [8] Freeman L C. A set of measures of centrality based on betweenness[J]. *Sociometry*, 1977, 40: 35
- [9] Yan G, Zhou T, Hu B, et al. Efficient routing on complex networks[J]. *Phys Rev E*, 2006, 73: 1-5
- [10] Freeman L C. Centrality in social networks conceptual clarification[J]. *Soc Netw*, 1979, 1: 215-239
- [11] Kitsak M, Gallos L K, Havlin S, et al. Identification of influential spreaders in complex networks[J]. *Nat Phys*, 2010, 6: 888-893
- [12] Zeng A, Zhang C J. Ranking spreaders by decomposing complex networks[J]. *Phys. Lett. A*, 2013, 377(14): 1031-1035
- [13] Liu J G, Ren Z M, Guo Q. Ranking the spreading influence in complex networks[J]. *Physica A*, 2013, 392: 4154-4159
- [14] Newman M E J. A measure of betweenness centrality based on random walks[J]. *Soc. Netw.*, 2005, 27 (1): 39-54
- [15] Bonacich P. Factoring and weighting approaches to status scores and clique identification[J]. *J Math Sociol*, 1972, 2: 113-120
- [16] Hethcote H W. The mathematics of infectious disease[J]. *Soc. Industr. Appl. Math*, 2000, 42: 599-653
- [17] Blower S, Bernoulli D. An attempt at a new analysis of the mortality caused by smallpox and of the advantages of inoculation to prevent it[J]. *Rev. Med. Virol*, 2004, 14: 275-288
- [18] Anderson R M, Robert M. *Infectious Diseases of Humans; Dynamics and Control*[M]. New York: Oxford University Press, 1992: 66
- [19] Diekmann O, Heesterbeek J A P. *Mathematical Epidemiology of Infectious Diseases; Model Building, Analysis and Interpretation* [M]. New York: Wiley Series in Mathematical & Computational Biology, 2001
- [20] Kendall M. A new measure of rank correlation[J]. *Biometrika*, 1938, 30: 81-93
- [21] Zachary W W. An information flow model for conflict and fission in small groups[J]. *J. Anthropol. Res.*, 1977, 33: 452-473
- [22] Newman M E J. Finding community structure in networks using the eigenvectors of matrices[J]. *Phys. Rev. E*, 2006, 74 (3): 036104
- [23] Guimera R, Danon L, Diaz-Guilera A, et al. Self-similar community structure in a network of human interactions[J]. *Phys. Rev. E*, 2003, 68: 065103
- [24] Xie N. *Social network analysis of blogs*[D]. UK: University of Bristol, 2006

(上接第 276 页)

于该方案中优先级低的那些节点在每个周期中发送的比特数目很少,从而有很大的包传输时延。不过,当方案三中各个接入节点的优先级相同时,该方案退化为方案一,这时的传输时延也与方案一相同。

图 7(b)给出了不同占空比下的各种方案的传输时延,其中 $n=3$, $L_i=100$ 。同上,方案三的包传输时延为各个接入节点包传输时延的平均值。可以看出,原有方案的传输时延与占空比无关,而其他改进方案都随着占空比的增大而减少。总的来说,所提出的方案的包传输时延远小于已有 TS-OOK 方案的传输时延。



(a) 不同接入节点数下的传输时延

(b) 不同占空比下的传输时延

图 7 传输时延性能比较

结束语 本文提出了 3 种无线纳米传感器网络改进型 TS-OOK 接入控制方案,这 3 种方法都通过接入节点与中继节点之间简单控制包交互来实现冲突避免,并且每个发送周期内会发送多个比特。与原有的 TS-OOK 方案的性能比较表明,本文提出的改进方案不仅避免了发送冲突的发生,而且有效提升了网络吞吐量,大大降低了单个接入节点的传输时延。

参考文献

- [1] Rao F, Fan Z, Dong L, et al. Molecular nanosensors based on the inter-sheet tunneling effect of a bilayer grapheme[C]// Proceedings of IEEE International Conferences on Nano/Molecular Medicine & Engineering. Hong Kong: IEEE, 2010: 172-175
- [2] Sorkin V, Zhang Y. Graphene-based pressure nano-sensors[J]. *Journal of Molecular Modeling*, 2011, 17(11): 2825-2830
- [3] Atakan B, Akan O. Carbon nanotube-based nanoscale ad hoc networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2010, 48 (3): 129-135
- [4] Akyildiz I, Jornet J. Electromagnetic wireless nanosensor networks[J]. *Nano Communication Networks*, 2010, 1(1): 3-19
- [5] Jornet J, Akyildiz I. Low-weight channel coding for interference mitigation in electromagnetic nanonetworks in the terahertz band[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Communications. Kyoto: IEEE, 2011: 1-6
- [6] Kocaoglu M, Akan O. Minimum energy channel codes for nanoscale wireless communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(4): 1492-1500
- [7] Chi K, Zhu Y, Jiang X, et al. Energy-efficient prefix-free codes for wireless nano-sensor networks using OOK modulation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(5): 2670-2682