

负载感知的太赫兹纳米传感网的 TDMA 协议

徐娟, 赵雅坤, 张茸, 阚佳丽

(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要: 针对基于 TS-OOK(time spread on-off keying)调制的通信系统存在数据传输连续碰撞的问题, 考虑到实际应用场合具备负载不均衡的特点, 提出负载感知的 TDMA (LA-TDMA) 协议. 该协议根据网络中源节点数目、源节点业务量大小以及太赫兹信道的传输特性, 在传统 TDMA 协议基础上实现动态分配时隙. 仿真结果表明: 该协议是能量高效的, 在时延和平均吞吐量方面均具有明显的优势, 因此可以应用于时延要求较苛刻的网络场景中.

关键词: 纳米网; 太赫兹带; 介质访问控制; 负载感知

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

Load-aware TDMA Protocol for Terahertz Nanosensor Networks

XU Juan, ZHAO Yakun, ZHANG Rong, KAN Jiali

(College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: A load-aware time division multiple access (LA-TDMA) protocol is proposed in this paper, by considering the avoidance of symbol collisions in the time spread on-off keying (TS-OOK) based communication system combined with load-unbalanced application scenarios. This protocol adopts a dynamic TDMA-based time slot allocation mechanism according to the current number of source nodes, their corresponding traffic and the transmission peculiarities of Terahertz channel. The simulation results show that LA-TDMA is energy efficient and gains obvious advantages in average end-to-end delay and average throughput, which proves suitable to support low-delay and load-unbalanced wireless nanosensor networks (WNSNs).

Key words: nanonetworks; Terahertz band; medium access control; load-aware

设备以无线通信方式连接起来的新型网络, 网络中的纳米传感节点不但尺寸微小, 而且具备感知纳米级事件的能力, 因此 WNSNs 在生物医学、环境监测以及军事防御等诸多领域都具有巨大的应用前景.

太赫兹 (THz) 波的频率范围是 0.1~10 THz, 具有很宽的可用带宽, 并且可以提供 10 Gbps 甚至更高的数据传输速率^[1]. 使用石墨烯制造的纳米天线和纳米收发机可工作在太赫兹带, 因此太赫兹无线通信技术成为 WNSNs 物理层的理想选择.

与传统无线传感网有所不同: 一方面 WNSNs 中纳米传感器的纳米电池只能存储非常有限的电量, 在大多数实际应用中无法更换, 也无法充电^[1]; 另一方面, 太赫兹信道具有独特的传输特性, 即很宽的可用带宽和大气分子吸收太赫兹波所造成的分子吸收损耗^[2]. 此外, 文献[3]中对采用 TS-OOK(time spread on-off keying)机制的太赫兹纳米网中存在的碰撞问题进行了研究, 由于分子吸收噪声和接收节点能量的波动, 数据在传输过程中发生连续性碰撞, 实验证明这种碰撞是不可避免的, 而且会大大降低通信质量. 文献[4]的仿真结果也表明, 符号碰撞概率随着发射节点数目的增加而增大, 即在节点密集的无线纳米传感网中符号碰撞是不可忽略的. 考虑到太赫兹信道的特性, 传统无线传感网络的经典 MAC(media access control)协议无法直接应用于 WNSNs, 因此研究适用于太赫兹纳米传感网的 MAC 协议是非常有意义的.

国内外学者已经研究了一些适用于无线纳米传感网的 MAC 协议. Jornet 等^[2]提出了一种基于物理层感知的 MAC 协议 PHLAME (physical layer aware MAC protocol for electromagnetic nanonetworks), 该协议通过收发机在握手过程中共同选择物理层参数的最佳值以达到减少多用户干扰、降低能耗和保证可靠通信的目的. 虽然

无线纳米传感网 (WNSNs) 是一种将多个纳米

收稿日期: 2018-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(61202384); 中央高校基本科研业务费专项资金(221201700186)

第一作者: 徐娟(1973—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为无线通信. E-mail: jxujuan@tongji.edu.cn

PHLAME 在节能、帧延时以及吞吐量上都取得一定成效,但是仍存在节点间通信发生连续冲突的问题. 文献[5]中提出一种基于定时信道的协议. 该协议利用定时信道的静默期对信息进行基于时延映射的编码,而接收机根据共享的编码映射表重构发端的数据. 通过理论分析和数值结果验证了利用定时信道延长网络生命周期的可行性,但尚未在仿真平台上实现并验证该协议. 文献[6]中提出了一种基于能量和频谱感知的 MAC 协议,该协议利用纳米能量采集系统使网络的生命周期趋于无穷大,采用新的码元压缩调度算法使吞吐量最大化. Rikhtegar 等^[7]提出了一种针对移动多跳无线纳米传感网的能量高效的 MAC 协议,该协议将传感器节点分簇,并利用 TDMA 机制缓解节点移动带来的影响和传输碰撞. 然而,文献[6]和[7]中所提出的 MAC 协议均没有考虑节点负载的动态变化.

目前已有的适用于 WNSNs 的 MAC 协议虽然考虑了纳米节点有限的能量、通信和计算能力等特性,但是并没有涉及基于 TS-OOK 的通信机制中数据发生连续冲突、实际应用场景中网络负载及节点业务量动态变化等情况. 针对以上问题,本文将 WNSNs 中源节点的数目以及业务量大小为考虑因素,从避免数据发生碰撞的角度提出了负载感知的 TDMA(LA-TDMA)协议. 该协议根据当前网络中源节点数目、节点业务量大小以及太赫兹信道的传输特性,在 TDMA 基础上实现动态时隙分配.

1 系统模型

常见的 WNSNs 是由一个处理能力较强的纳米控制节点和多个普通纳米传感节点组成的单跳星型网络结构. 网络中普通纳米传感节点负责采集数据,并直接与纳米控制节点进行数据传输,最后纳米控制节点将经其融合后的数据发给纳米接口设备. 将算法中的复杂计算交给纳米控制节点处理可弥补普通纳米传感节点计算能力有限的缺陷,因此本文采用集中式拓扑结构,纳米控制节点和普通纳米传感节点之间的通信为单跳通信.

1.1 网络模型

假设纳米网络由 1 个纳米控制节点和 U 个普通纳米传感节点组成.

网络模型存在以下假设:

(1) 普通纳米传感节点和纳米控制节点的位置固定,普通纳米传感节点拥有各自唯一的 ID,并且

ID 号从 1 开始连续递增,纳米控制节点的 ID 号为 0.

(2) 网络中纳米节点总数固定,且负载不均衡.

(3) 太赫兹纳米传感网的物理层采用 TS-OOK 调制技术,能够实现精确定位,因此纳米控制节点可通过广播简单的握手消息获得网络中所有纳米节点的位置信息.

(4) 纳米节点的能耗主要集中在数据传输阶段,因此能耗模型中将忽略节点因获取和处理数据所消耗的能量. 每个纳米节点的初始能量相同,并且不考虑纳米控制节点的能耗.

1.2 太赫兹信道容量

太赫兹信道存在分子吸收效应,该效应会引起较高的分子吸收损耗,并且数据在太赫兹信道中传输时会引入分子吸收噪声. 分子吸收效应将整个太赫兹频带划分成多个不同的传输窗口,因此建立太赫兹信道容量模型时,将计算可用带宽内每个子带的传输容量以此获得总的信道容量. 根据香农公式可得信道容量

$$C_s(d) = \sum_{M} \Delta f_w(d) \log_2(1 + S(f)/(N_a(d, f)P_L(d, f))) \quad (1)$$

式中: $C_s(d)$ 表示传输距离为 d 时太赫兹信道容量; M 表示所有子带数量; $\Delta f_w(d)$ 表示传输距离为 d 时不同的传输窗口,即每个子带的可用带宽; $S(f)$ 表示传输信号的功率谱密度; $N_a(d, f)$ 表示信道中噪声的功率谱密度; $P_L(d, f)$ 表示路径损耗; f 表示信号频率.

分子吸收噪声是太赫兹信道中的主要噪声源,其功率谱密度

$$N_a(d, f) = K_B T_0 (1 - e^{-k(f)d}) \quad (2)$$

式中: K_B 表示玻尔兹曼常数; T_0 表示参考温度; $k(f)$ 表示分子吸收因子^[8],取值与介质中分子的成分有关,其中水分子对太赫兹波的吸收作用显著.

总的路径损耗 $P_L(d, f)$ 由太赫兹波在介质中传播时所遭受的损耗和由分子吸收效应引起的损耗两部分组成,可表示为

$$P_L(d, f) = (4\pi f_c d/c)^2 e^{k(f)d} \quad (3)$$

式中: f_c 表示中心频率; c 表示真空中的光速.

每个子带的可用带宽 Δf_w 定义为满足以下条件的频带范围^[6]:

$$N_a(d, f)P_L(d, f) \leq 2N_a(d, f_c(d))P_L(d, f_c(d)) \quad (4)$$

子带的中心频率和可用带宽随着传输距离的变化而变化. 所选取的子带足够小时,每个子带可以看成平坦的信道,子带内的噪声也是局部平坦的,由此

便可以计算出总的信道容量。

1.3 能耗模型

在基于 TS-OOK 调制的太赫兹通信系统中, 纳米节点发射和接收单个数据包所消耗的能量可表示为

$$E_{tx}(A) = \omega A E_{ptx} \quad (5)$$

$$E_{rx}(A) = A E_{prx} = A E_{ptx} / 10 \quad (6)$$

式中: $E_{tx}(A)$ 、 $E_{rx}(A)$ 分别表示纳米节点发射、接收长度为 A bit 的数据包的能耗; E_{ptx} 和 E_{prx} 分别表示发射和接收单个脉冲所消耗的能量; ω 的取值与编码权重值有关, 表示 A bit 数据中出现符号“1”的概率。通常为了使符号“1”和符号“0”等概率出现, ω 设为 0.5。对于超低功耗的纳米收发机而言, 接收能耗 E_{prx} 通常被设为发射能耗 E_{ptx} 值的 $1/10^{[9]}$ 。

单个脉冲的发射能耗 E_{ptx} 是一个关于传输距离 d 的函数, 它可表示为

$$E_{ptx}(d) = P_{tx}(d) / C_s(d) \quad (7)$$

式中: $P_{tx}(d)$ 表示纳米节点的发射功率。

发射功率 $P_{tx}(d)$ 定义为当收发节点之间相距 d 并保证接收端获得信噪比 S_{NR} 的前提下所需发射功率, 它可通过下式求得:

$$P_{tx}(d) = \int_{B(d)} (S_{NR} N_a(d, f) P_L(d, f)) df \quad (8)$$

式中: S_{NR} 表示在接收端要保证的信噪比; $B(d)$ 表示当前太赫兹信道的可用带宽。 $B(d)$ 可表示为

$$B(d) = \sum^M \Delta f_w(d) \quad (9)$$

虽然分子吸收效应对整个太赫兹频带的影响很大, 但是在每个传输窗口 Δf_w 内部的分子吸收损耗是极小的, 远低于 $10 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1[10]}$ 。为了降低计算复杂度, 本文假设分子吸收损耗在各个传输窗口内部可忽略不计, 如下所示:

$$k(f) \approx 0, f \in \Delta f_w \quad (10)$$

噪声信号的功率谱密度 $N_a(d, f)$ 以及路径损耗 $P_L(d, f)$ 可进一步简化为

$$N_a(d, f) = F \quad (11)$$

$$P_L(d, f) = 4\pi f_c d / c \quad (12)$$

式中: F 表示常数。将简化后的式(11)和式(12)代入式(8)就可以通过积分计算得到发射能耗 $P_{tx}(d)$, 最后将所得 $P_{tx}(d)$ 与式(1)代入式(7)就可以得到纳米节点发射单位比特数据时所消耗的能量。

2 LA-TDMA 协议

基于已建立的太赫兹信道容量模型和能耗模

型, 提出基于网络负载状况的 TDMA 调度算法。纳米控制节点根据源节点数目动态调节一帧内的时隙数, 并依据每个源节点的业务量大小动态分配各节点可使用的时隙数, 即 LA-TDMA 协议, 这样可进一步减小网络时延, 提高信道利用率。

2.1 帧结构

本文提出的 LA-TDMA 调度算法的帧结构如图 1 所示。每一帧包括时隙申请、时隙调度和数据传输 3 个阶段。时隙申请阶段采用固定分配时隙方式, 由 U 个等长度的最小时隙组成。设每个源节点发送的控制信息大小为 1 Byte, 则时隙申请阶段的长度为发送 U 个字节数据所需时间。纳米控制节点占用时隙调度阶段, 对其采用的时隙分配策略将在第 2.2 节中详细描述。数据传输阶段包含 L 个动态变化的时隙, L 的取值由纳米控制节点根据该帧中源节点数目和每个源节点的业务量综合决定。

单个数据时隙长度

$$t_{slot} = \max(d_i / v + L_i / C_s(d_i)), i \in \{1, 2, \dots, U\} \quad (13)$$

式中: d_i 和 L_i 分别表示源节点 V_i 的传输距离和所发送数据包的长度, 本文设置所有源节点的数据包长度相同; v 为信号的传播速度, 大小为 $3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $C_s(d_i)$ 表示源节点 V_i 传输链路的信道容量, 由式(1)计算得到; $\max(\cdot)$ 表示求最大值函数。时隙长度中考虑了数据包传输距离引入的时延, 从而可以避免不同位置源节点发送的数据包在纳米控制节点处可能带来的相邻时隙部分重叠所造成的误码。

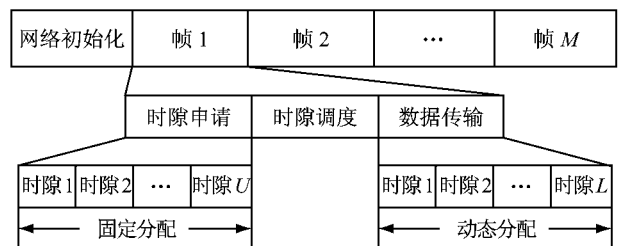


图 1 LA-TDMA 帧结构

Fig.1 Frame structure of LA-TDMA

2.2 时隙分配策略

纳米控制节点实现时隙分配策略的算法流程如图 2 所示, 具体步骤如下:

(1) 初始化一个 $U \times U$ 维二进制时隙分配矩阵 $S_0 = \mathbf{0}$.

(2) 根据式(13)计算单个数据时隙长度, 其中所有源节点发送的数据包长度均为 128 Byte, 并统计来自时隙申请阶段的请求源节点数。若源节点数

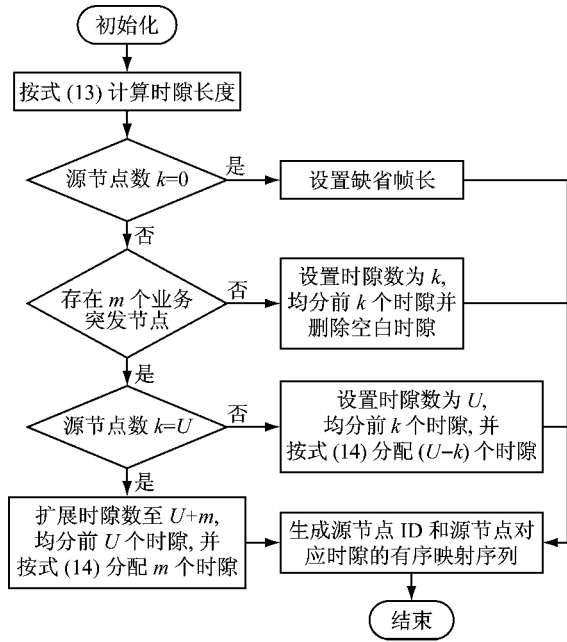


图 2 时隙分配流程

Fig. 2 Flow chart of time slot allocation

为零,则表示当前帧内无源节点有发送数据任务,但为了避免源节点频繁的请求和调度,因此定义一个缺省帧长 T_{\min} 以让所有源节点在数据传输阶段进入睡眠期。

(3) 若源节点数为 $k(0 < k \leq U)$,并且每个源节点恰好在该帧内都没有业务突发任务,即数据缓冲队列长度均为 1,则设置一帧的时隙数 L 为 k ,删除空白的 $(U-k)$ 个时隙。纳米控制节点按照平均的原则给每个源节点分配一个时隙。

(4) 若源节点数满足大于 0 且小于纳米节点总数,即 $0 < k < U$,其中存在 $m(0 < m \leq k)$ 个源节点业务量突发,即数据缓冲队列长度大于 1,此时为了兼顾数据发送公平性和减缓业务突发节点的数据缓冲压力,则设置一帧的时隙数 L 为 U 。纳米控制节点先将前 k 个时隙依次平均分配给 k 个源节点,然后根据业务量优先级顺序,按比例分配剩下的 $(U-k)$ 个时隙。每个业务突发节点额外获得的时隙数 N_{ETS} 按下式计算:

$$N_{ETS} = \left\lceil Q_i(U-k) / \sum_i^m Q_i \right\rceil, \quad Q_i > 1 \quad (14)$$

式中: N_{ETS} 表示业务突发节点 V_i 额外获得的时隙数; Q_i 表示业务突发节点 V_i 数据缓冲队列的长度。式(14)采用向上取整的方式导致 m 个业务突发节点额外获得的时隙总数超过剩余时隙总数 $(U-k)$,此时将从获得最少时隙的源节点开始,按照时隙数递增的顺序,依次减去一个时隙,直到额外获得的时隙总数等于剩余时隙总数。

(5) 若当前网络中所有纳米节点都有数据要发送,并且其中 m 个节点的业务量较大,则 $0 < m \leq U$ 。纳米控制节点将时隙数 L 扩展成 $U+m$,其中前 U 个时隙平均分给每个源节点,然后按照式(14)的计算方式分配剩下的 m 个时隙。

(6) 当纳米控制节点为所有源节点分配好时隙后,将生成一个 $U \times L$ 维二进制时隙分配矩阵。矩阵(下标从 0 开始)的行下标对应节点 ID,列下标对应时隙号,第 $(k-1)$ 行元素对应节点 V_k 的时隙占用情况。若纳米控制节点将时隙 s 分配给节点 V_k ,则将矩阵的第 $(k-1)$ 行 $(s-1)$ 列元素置 1,否则置 0。具体可表示为

$$S = (s_{ij})_{U \times L} = \begin{cases} 1, & i = k-1, j = s-1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

其中, $i \in \{0, \dots, U-1\}, j \in \{0, \dots, L-1\}$ 。

(7) 考虑到该时隙分配矩阵会占用较多的存储空间,因此进一步依次读取式(15)中每个源节点 ID 所在行,建立源节点 ID 和源节点对应时隙的键值对映射关系并存储到 hash_map 中。

2.3 调度算法的建立步骤

调度算法的建立过程包括网络初始化、时隙申请、时隙调度和数据传输 4 个阶段,具体如下所示:

(1) 网络初始化阶段。纳米控制节点广播简单的握手消息,该消息包括纳米控制节点自身的 ID、位置以及时间戳信息。源节点收到握手消息后,根据时间戳校正本地时间,并返回自身的 ID 和位置信息。纳米控制节点记录每个源节点的 ID 以及对应的位置信息,根据式(13)计算源节点在时隙申请阶段发送 1 Byte 控制信息所需要的时隙长度,然后以广播的方式告知给源节点。

(2) 时隙申请阶段。源节点收到纳米控制节点广播的时隙长度信息后,按照自身 ID 号递增顺序依次占用 U 个时隙。若源节点 V_i 有数据要发送,则在 MAC 层数据包的头部加入包含自身数据缓冲队列长度的控制信息,然后将其封装成帧继而在第 i 个时隙内发送给纳米控制节点;若没有发送数据任务,则进入睡眠状态。

(3) 时隙调度阶段。纳米控制节点根据收到的时隙申请阶段中成功发送的控制信息,将基于网络负载状况,按照如图 2 所示的流程为每个源节点动态分配时隙,最终广播一个时隙调度包。数据包结构如图 3 所示,其中头部信息包含纳米控制节点的 ID 和数据传输阶段的长度,数据部分由源节点的 ID 和

源节点对应时隙的有序映射序列组成,映射序列由式(15)得到.整个数据传输阶段的长度为 $t_{\text{slot}}L$, t_{slot} 和 L 分别由式(13)和式(15)给出.



图 3 LA-TDMA 时隙调度包结构

Fig. 3 Slot scheduling packet structure of LA-TDMA

(4) 数据传输阶段.源节点 V_i 收到纳米控制节点广播的时隙调度包后,若当前帧内无数据传输任务,则只解析时隙调度包的头部信息,继而进入持续时间为 $t_{\text{slot}}L$ 的睡眠期;若当前帧内有数据要发送,则进一步读取时隙调度包的数据部分,在自身时隙到来时传输数据.

3 仿真分析

为了验证本文所提 LA-TDMA 协议的正确性和优越性,采用 NS-3 仿真软件对 LA-TDMA 协议和传统 TDMA 协议进行仿真分析.在仿真分析中分别从单位比特能耗、平均端到端时延、平均吞吐量和网络生存期等方面进行比较分析.

3.1 仿真统计量定义

(1) 单位比特能耗

单位比特能耗是指纳米控制节点接收到单位比特数据时所有源节点所消耗的能量,其中源节点消耗的能量包括发射控制信息和数据包以及接收时隙调度包的能耗总和.

(2) 平均端到端时延

平均端到端时延定义为数据包从源节点产生到纳米控制节点成功接收所消耗的平均时间,包括处理时延、队列时延、传播时延和传输时延.平均端到端时延表示为

$$\bar{T} = T_p + \sum_{i=1}^{N_p} (T_{q_i} + d_i/v + N_b/C_i) / N_p \quad (16)$$

式中: \bar{T} 表示数据包的平均端到端时延; T_p 表示单个数据包的平均处理时延; T_{q_i} 、 d_i 和 C_i 分别表示源节点发送第 i 个数据包时的队列时延、传输距离和信道容量; N_b 表示源节点发送数据包的比特数; N_p 表示仿真实验中纳米控制节点接收的数据包总个数.

(3) 平均吞吐量

平均吞吐量定义为单位时间内目的节点成功接收到的平均比特数.

(4) 网络生存期

传感网的生存期有多种不同定义方式,本文把网络生存期定义为网络开始运行到网络中第 1 个节点死亡所经历的时间长度,表示为

$$T_w = \min\{t \mid E_V(t) \leq \eta\} \quad (17)$$

式中: T_w 表示 WNSNs 的生存期; $E_V(t)$ 表示节点 V 在时刻 t 的能量值; η 表示剩余能量的门限值,当节点能量低于该门限值时则可认为该节点死亡.

3.2 仿真设置

仿真场景为二维长方形平面(见图 4),200 个源节点独立且随机分布在该区域内,有且仅有 1 个纳米控制节点位于该二维平面的中心.在仿真实验中,每个源节点产生数据包的过程均服从泊松分布.设置源节点总数为 200 且固定不变,研究不同的包到达间隔对网络性能的影响.

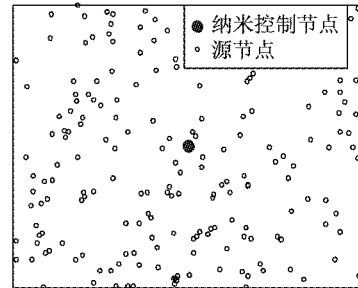


图 4 网络拓扑结构

Fig. 4 Network topology

仿真实验设置信道环境中的水分子含量为 10%,此时式(11)中噪声功率谱密度为 $1.42 \times 10^{-21} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1}$,式(8)中接收端要保证的信噪比 S_{NR} 为 10,式(17)中的剩余能量门限为 $1 \times 10^{-16} \text{ J}$,该值表示传输距离为 0.01 m 时源节点接收单位比特数据所需要的能量.根据式(13)设置如图 1 所示的帧结构中时隙申请阶段、时隙调度阶段和单个数据传输时隙的长度分别为 24 ns、72 ns 和 15 ns,缺省帧长 T_{min} 设为 3 μs .具体的 NS-3 仿真参数设置如表 1 所示.

3.3 仿真结果分析

(1) 单位比特能耗

图 5 是单位比特能耗随包到达间隔变化.由图 5 可见,2 种协议的单位比特能耗几乎不随包到达间隔的变化而变化.这是因为当包到达间隔变小时,源节点单位时间内产生的数据包个数增多从而网络负载增加,但此时源节点发送控制信息和接收时隙调度包所消耗的总能量也增大.由于 LA-TDMA 协议增加了源节点在每一帧内发送控制信息和接收时隙调度包的开销,因此在能耗上较 TDMA 协议稍差.

表 1 NS-3 仿真参数设置

Tab.1 Setting of NS-3 simulation parameters

仿真参数	数值
仿真场景/(mm×mm)	16×12
源节点个数	200
纳米控制节点个数	1
物理层脉冲宽度/fs	100
物理层脉冲间隔/ps	10
数据包长度/Byte	128
数据包平均到达间隔/ μ s	1~10
源节点通信范围/m	0.01
纳米控制节点通信范围/m	0.02
源节点初始能量/ μ J	1
仿真时间/s	1

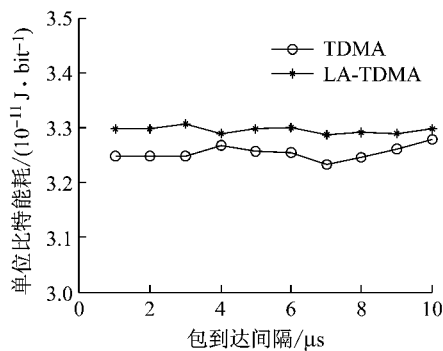


图 5 单位比特能耗与包到达间隔关系

Fig.5 Relationship between unit bit energy consumption and packet arrival interval

值得一提的是, 由于实现了数据的无碰撞传输并且根据传输距离自适应地调整节点的传输功率, LA-TDMA 和 TDMA 协议都是高效节能的。

(2) 平均端到端时延

图 6 是平均端到端时延随包到达间隔变化。随着包到达间隔增大, 2 种协议的平均端到端时延都减小。这是因为包到达间隔越大, 源节点的数据缓存压力越小, 数据包在源节点缓冲队列的等待时间越小。LA-TDMA 协议根据源节点业务量的优先级顺序动态分配时隙, 无数据发送源节点不分配时隙, 为

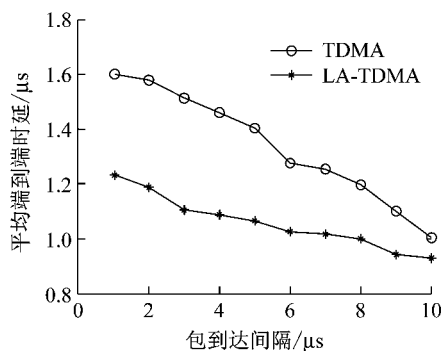


图 6 平均端到端时延与包到达间隔关系

Fig.6 Relationship between average end-to-end delay and packet arrival interval

业务突发源节点提供更多时隙, 因此在减小端到端时延上较 TDMA 表现出明显的优势。

(3) 平均吞吐量

图 7 是平均吞吐量随包到达间隔变化。从图 7 可以看出, 随着包到达间隔增大, 网络负载减少的同时数据包的端到端时延也在减小, 并且端到端时延的减小幅度更显著, 因此 2 种协议的平均吞吐量都呈上升趋势。由于 LA-TDMA 协议能更好地缩短端到端时延, 在平均吞吐量上较 TDMA 协议更好。

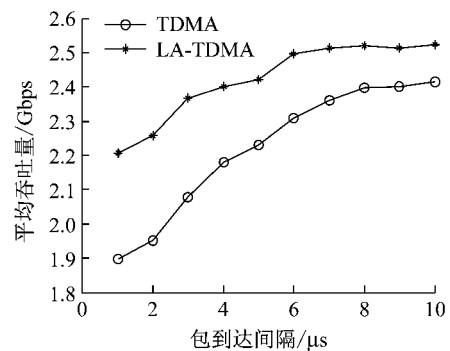


图 7 平均吞吐量与包到达间隔关系

Fig.7 Relationship between average throughput and packet arrival interval

(4) 网络生存期

图 8 是网络生存期随包到达间隔变化。由图 8 可见, 随着平均包到达间隔增大, 2 种协议的网络生存期都得以延长。这是因为包到达间隔越大, 在相同的仿真时间内源节点产生的数据包越少, 数据传输消耗的能量也越小, 从而延长了源节点的存活时间。由于 LA-TDMA 协议中源节点增加了额外的控制开销, 其网络生存期略小于 TDMA 协议, 但当包到达间隔增大时, 源节点的额外开销变小, 因此两者网络生存期的差距逐渐减小。值得一提的是, 为了缩短仿真运行时间, 设置包到达间隔的单位级别为 μ s,

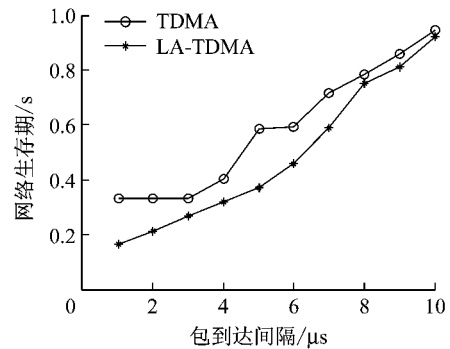


图 8 网络生存期与包到达间隔关系

Fig.8 Relationship between network lifetime and packet arrival interval

从图 8 可以看出,仿真得到的网络生存期数量级为 0.1 s. 在大多数实际应用场景中,源节点产生数据包的间隔通常是以 s 为单位,此时网络生存期的数量级可达到 10^5 s,这是符合实际意义的.

4 结语

针对基于 TS-OOK 调制的通信系统存在数据传输连续碰撞以及负载不均衡的实际应用场景,提出一种负载感知的动态 TDMA 协议. 该协议根据当前网络中源节点数目、源节点业务量大小以及太赫兹信道的传输特性,在 TDMA 基础上实现动态分配时隙. 仿真结果表明,该协议是能量高效的,在平均端到端时延和平均吞吐量方面均具有明显的优势,可以应用于时延要求较苛刻的网络场景中.

参考文献:

- [1] AKYILDIZ I F, JORNET J M. Terahertz band: next frontier for wireless communications [J]. *Physical Communication*, 2014, 12:16.
- [2] JORNET J M, PUJOL J C, PARETA J S. PHLAME: a physical layer aware MAC protocol for electromagnetic nanonetworks in the Terahertz band [J]. *Nano Communication Networks*, 2012, 3(1):74.
- [3] ISLAM N, MISRA S, MAHAPATRO J, *et al.* Catastrophic collision in bio-nanosensor networks: does it really matter? [C]//IEEE 15th International Conference on e-Health Networking, Applications and Services. [S.l.]: IEEE, 2013: 371-376.
- [4] ALSHEIKH R, AKKARI N, FADEL E. Grid based energy-aware MAC protocol for wireless nanosensor network [C]//IEEE International Conference on New Technologies, Mobility and Security. [S.l.]: IEEE, 2016:1-5.
- [5] SALVATORE D, GALLUCCIO L, MORABITO G, *et al.* A timing channel-based MAC protocol for energy-efficient nanonetworks [J]. *Nano Communication Networks*, 2015, 6(2):39.
- [6] WANG P, JORNET J M, MALIK M G A, *et al.* Energy and spectrum-aware MAC protocol for perpetual wireless nanosensor networks in the Terahertz band [J]. *Ad Hoc Networks*, 2013, 11(8): 2541.
- [7] RIKHTEGAR N, KESHTGARI M, RONAGHI Z. EEWNSN: energy efficient wireless nano sensor network MAC protocol for communications in the Terahertz band [J]. *Wireless Personal Communications*, 2017, 97(1): 521.
- [8] JORNET J M, AKYILDIZ I F. Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the Terahertz band [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(10): 3211.
- [9] PIEROBON M, JORNET J M, AKKARI N, *et al.* A routing framework for energy harvesting wireless nanosensor networks in the Terahertz band [J]. *Wireless Networks*, 2014, 20(5): 1169.
- [10] AKYILDIZ I F, BRUNETTI F, BLÁZQUEZ C. Nanonetworks: a new communication paradigm [J]. *Computer Networks*, 2008, 52(12): 2260.
- [11] LIU Jingbo, WANG Zhenyu, DU Xiuli, *et al.* Three dimensional visco elastic artificial boundaries in time domain for wave motion problems [J]. *Engineering Mechanics*, 2005, 22(6): 46.
- [12] 刘晶波, 吕彦东. 结构-地基动力相互作用问题分析的一种直接方法 [J]. *土木工程学报*, 1998(3):55.
- [13] LIU Jingbo, LÜ Yandong. A direct method for analysis of dynamic soil-structure interaction [J]. *China Civil Engineering Journal*, 1998(3): 55.
- [14] 陈波, 吕西林, 李培振, 等. 均匀土-桩基-结构相互作用体系的计算分析 [J]. *地震工程与工程振动*, 2002, 22(3): 91.
- [15] CHEN Bo, LÜ Xilin, LI Peizhen, *et al.* Computational analysis of dynamic homogeneous soil-pile-structure interaction [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2002, 22(3): 91.
- [16] 楼梦麟, 潘旦光, 范立础. 土层地震反应分析中侧向人工边界的影响 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2003, 31(7):757.
- [17] LOU Menglin, PAN Danguang, FAN Lichu. Effect of vertical artificial boundary on seismic response of soil layer [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2003, 31(7):757.
- [18] 齐文浩, 薄景山, 刘红帅. 水平成层场地基本周期的估算公式 [J]. *岩土工程学报*, 2013, 47(4):779.
- [19] QI Wenhao, BO Jingshan, LIU Hongshuai. Fundamental period formula for horizontal layered soil profiles [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 47(4):779.
- [20] 冀昆, 温瑞智, 任叶飞. 中国抗震规范强震记录选取的初选条件研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2016(1): 44.
- [21] JI Kun, WEN Ruizhi, REN Yefei. Study on the initial of selection criteria strong motion records for Chinese seismic code [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2016(1): 44.
- [22] 杨溥, 李英民, 赖明. 结构时程分析法输入地震波的选择控制指标 [J]. *土木工程学报*, 2000, 33(6):33.
- [23] YANG Pu, LI Yingmin, LAI Ming. A new method for selecting inputting waves for time-history analysis [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2000, 33(6):33.
- [24] 楼梦麟, 王文剑, 马恒春, 等. 土-桩-结构相互作用体系的振动台模型试验 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2001, 29(7):763.
- [25] LOU Menglin, WANG Wenjian, MA Hengchun, *et al.* Study on soil-pile-structure interaction system by shaking table model test [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2001, 29(7):763.

(上接第 1478 页)