

箭载无线传感器网络动态业务分配方法研究

罗煜缤¹, 李洪², 周广铭¹, 路娟¹

(1. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076; 2. 中国航天科技集团有限公司, 北京 100048)

摘要: 无线传感器网络技术是新一代火箭测量系统中的关键技术之一, 为实现箭上无线传感器节点业务动态变化场景下的信道资源无冲突分配, 提出了一种基于优先级的动态业务分配方法——基于优先级的动态占空比节能位图辅助 MAC 协议(PD-EBMA)。主要思想是利用位图辅助适应业务量的动态变化、搭载预约的方式减少控制信息开销、背包算法提高信道利用率和降低时延, 以及在流量较小时延不敏感的场景中使用动态占空比的思想降低能量开销。仿真结果表明: 相比传统固定时隙的分配方式, PD-EBMA 可以大幅提升网络灵活性, 同时能耗和时延特性也得到显著改善。

关键词: 无线传感器网络; 火箭测量系统; 动态业务; 位图辅助; 搭载; 背包算法; 动态占空比

中图分类号: TP 393

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2022.06.012

Research on Dynamic Traffic Allocation Method for Wireless Sensor Network in Rocket

LUO Yubin¹, LI Hong², ZHOU Guangming¹, LU Juan¹

(1. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China;

2. China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048, China)

Abstract: The wireless sensor network technology is one of the key technologies in the new generation rocket measurement system. In order to realize the conflict-free allocation of channel resources under the dynamic traffic scenario of wireless sensor nodes in rocket, this paper proposes a priority-based dynamic traffic allocation method, i.e., the priority-based duty-cycle-enabled energy-efficient bit-map-assisted multiple access control (PD-EBMA). The main idea is to use the bit-map-assisted (BMA) method to adapt to the dynamic changes in traffic, to reduce the control overhead by piggybacking, to use the knapsack algorithm to improve the channel utilization rate and to reduce the time delay, and to use the dynamic duty cycle in scenarios where the traffic is small and the delay is not sensitive to reduce the energy costs. The simulation results show that, compared with the traditional fixed time slot allocation method, the proposed PD-EBMA greatly improves the network flexibility, the energy consumption, and the time delay characteristics significantly.

Key words: wireless sensor network; rocket measurement system; dynamic traffic; bit-map-assisted (BMA); piggybacking; knapsack algorithm; dynamic duty cycle

0 引言

为评定火箭的飞行性能, 对其进行故障定位和优化设计, 通过传感器测量飞行过程中的敏感参数十分重要。在传统火箭测量系统中, 分布着数量众多、种类各异的传感器, 其与系统之间通过电缆进

行连接。在设计过程中, 冗长的电缆增加了火箭重量, 也常常会影响到箭体内部仪器设备的布局, 给火箭设计、总装造成一定难度^[1]。为降低箭上测量系统的重量, 提升系统的可扩展性, 在新一代火箭测量系统中引入了无线传感器网络的发展概念^[2-4]。

收稿日期: 2021-02-24; 修回日期: 2021-06-25

基金项目: 航天科技集团公司自主研发项目

作者简介: 罗煜缤(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为通信网络。

无线传感器节点使用无线通信的方式传输数据,利用自带电池完成供电,省去了传统测量系统中存在的大量传输线缆和供电线缆,具有极好的工程应用前景。

在目前搭载的箭载无线传感器网络系统中,节点的种类和数量有限,数据量较小,为保证传输的可靠性和稳定性,采用固定时隙的分配方式,即每一个节点在组网开始时就分配好一个或多个时隙,在整个网络运行期间节点都在被分配的时隙中传输数据。这样分配的好处是各节点一开始就按照最大流量来分配时隙数量,确保了节点间的无冲突传输;但缺点也很明显,如果节点的数据流量存在波动,按照最大流量分配时隙的方式就会浪费一定的信道资源,固定时隙的分配方式也无法适应新节点的加入。

随着火箭运载能力的不断提升,对参数测量的需求也在不断增加,具体表现为节点种类和数量的快速增加:现有箭载无线传感器节点种类偏少,包括振动、热流、温度、压力传感器等,对一些数据量多变的传感器还没覆盖,比如噪声、冲击、图像传感器等,传感器种类的增加导致节点产生数据的速率可能随时间而变化;传感器数量的增加导致数据流量的迅速提升,除要求提升信道容量外,也要求信道利用率应尽可能高,从而减少硬件设备的开销。为满足不同类型业务对时延的需求,优先级的设定也纳入了新一代箭载无线传感器网络的考虑范畴。为亟需或要求实时传输的数据设定高优先级以获得优先传输的权利从而降低时延,比如控制系统需用到的传感器数据。除优先级外,适应节点的快速入网也是新一代系统应具备的功能之一。由于地面试验经常存在更改测点的需求,在传统系统中每当增减测点数量都需重新配置网络,拖慢了地面试验的进度,而在增加快速入网后,测点数量的增减将不再影响其他节点的正常工作。

由于箭载系统的可靠性要求,信道资源分配方式主要考虑无冲突的分配型 TDMA 协议^[5]。近年来,该领域的研究进展为:高效 TDMA (Energy-efficient TDMA, E-TDMA) 协议^[6]在 TDMA 的基础上增加了节点访问缓存的能力,使无信息传输的节点可以在所分配的时隙内进入休眠状态以节省能量;位图辅助 (Bit-Map-Assisted, BMA) 协议^[7]率先提出使用位图辅助的方式应对节点业务需求的

动态变化,需发送数据的节点通过在控制周期中发送一条简短的消息来预约时隙;位图辅助循环 (Bit-Map-Assisted Round-Robin, BMA-RR) 协议^[8]从数据包大小不同的角度改进了 BMA 的分配方式,提高了网络的吞吐量;高效位图辅助 (Energy-efficient Bit-Map-Assisted, E-BMA) 协议^[9]率先提出使用搭载预约的方式,通过将预约请求封装搭载到传输的数据包中来减少控制信息的开销;位图辅助最小工作优先 MAC (Bitmap-assisted Shortest job first based Multiple Access Control, BS-MAC) 协议^[10]从时延的角度出发,利用最小工作优先算法对 BMA 协议进行了改进;位图辅助高效扩展 MAC (Bitmap-assisted Efficient Scalable Multiple Access Control, BEST-MAC) 协议^[11]在 BS-MAC 的基础上增加竞争接入周期和背包算法,以适应新节点的加入和提高时隙利用率;自适应位图辅助 (Adaptive Bit-Map-Assisted, A-BMA) 协议^[12]对 E-BMA 的搭载方式进行了改进,增加了可预约时隙的数量;动态占空比节能位图辅助 (Duty-Cycle-Enabled Energy-efficient Bit-Map-Assisted, DCE-EBMA) 协议^[13]提出利用 IEEE 802.15.4 ZigBee 协议^[14]中提到的动态占空比思想减少流量较小或时延不敏感场景下的能量消耗。

综上,为适应箭载无线传感器网络中节点传输速率动态变化、高信道利用率、优先级区分传输,以及节点快速入网等需求,辅以能耗和时延方面的改进,提出了一种基于优先级的动态占空比节能位图辅助 MAC 协议 (Priority-based Duty-cycle-enabled Energy-efficient Bit-Map-Assisted Multiple Access Control, PD-EBMA),利用位图辅助、搭载预约、基于优先级的背包算法和动态占空比的思想完成信道资源的分配。

1 PD-EBMA 协议的详细设计

1.1 协议整体结构

由于 PD-EBMA 协议的时帧结构较为复杂,为便于理解,将时帧结构进行了多层次的划分,具体结果如图 1 所示,各层次分析如下:

1) 图 1 中最上层表现的是动态占空比的思想,汇聚节点根据网络流量情况设定周期阶数 C ,以更改变活跃期与非活跃期的时长比例;

2) 周期内分为活跃期与非活跃期,非活跃期内所有节点停止收发进入睡眠状态;

3) 活跃期内分为成簇阶段和稳定传输阶段,成簇阶段主要用于划分簇以及确定路由,之后进入稳定传输阶段;

4) 稳定传输阶段主要是各节点按成簇阶段规划的路由进行数据传输,包含许多相同长度的帧周期,每一帧周期内按照功能分为控制阶段、数据传输阶段以及空闲阶段;

5) 在控制阶段中包含很多小时隙组成的预约周期、接入周期以及公告周期,预约周期中每个节

点可在自己所属时隙内发送需要预约的时隙数量,未入网的节点在接入周期中通过 CSMA 的方式向汇聚节点发送入网请求^[15],之后汇聚节点在公告阶段中向预约时隙的节点及新入网的节点发送使用基于优先级的背包算法得到的分配结果;

6) 数据传输阶段中各节点在被分配的时隙内传输数据,并尝试通过搭载预约,如果预约成功则跳过下一个预约周期,在下一帧的公告周期内接收分配结果并按照分配结果进行数据传输;未能成功搭载的则在下一预约周期内视情况正常预约。

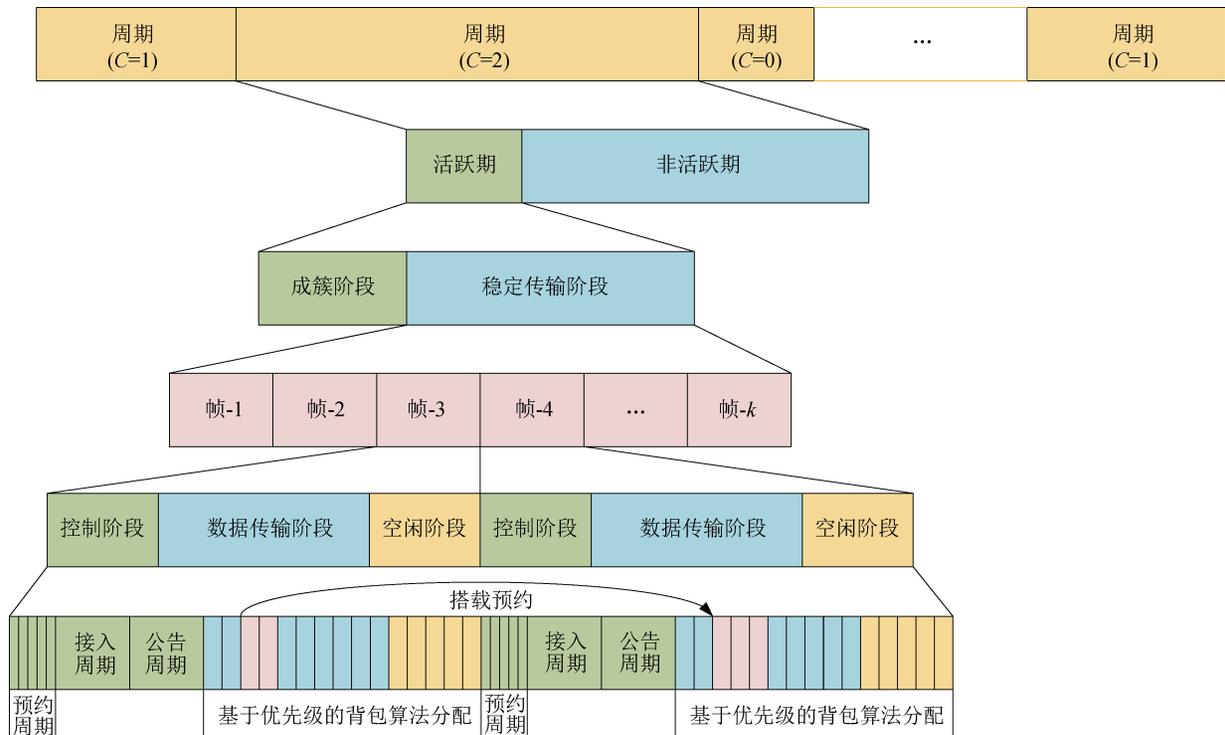


图 1 PD-EBMA 协议时帧结构

Fig. 1 Time frame structure of the PD-EBMA protocol

1.2 搭载预约实现方式

假设稳定传输阶段的每一帧中都有可能发生至多一次驱动数据传输事件,且上一帧发生事件,数据将在下一帧传输。由于驱动数据传输事件发生由图 2 可知,尽管连续 2 帧中都有事件发生,但由于上一帧驱动事件传输的数据在当前帧中传输,而当前帧中的驱动事件发生于数据开始传输之后,导致节点无法在当前帧中的数据包中进行搭载预约,而是在下一帧预约周期中进行预约。

由上述可知,不同于 E-BMA 协议在整个当前帧中发生驱动事件都能进行搭载预约,在驱动事件

生的时间是随机的,节点需根据驱动事件发生时间的不同决定是否搭载预约。在 E-BMA 中实现搭载预约的前提是连续两帧都发生事件,但在 PD-EBMA 中仅有此限制还不够,具体原因如图 2 所示。

要想搭载预约,则需驱动事件发生在当前帧中数据传输之前,如图 3 所示。由于驱动事件发生时间早于数据传输,使节点能在当前帧的数据包中增加搭载预约请求,从而跳过下一帧的预约周期以节省能量。

可能发生在帧中任意位置时 PD-EBMA 协议成功搭载预约的概率仅为 E-BMA 的一半,因此在节省

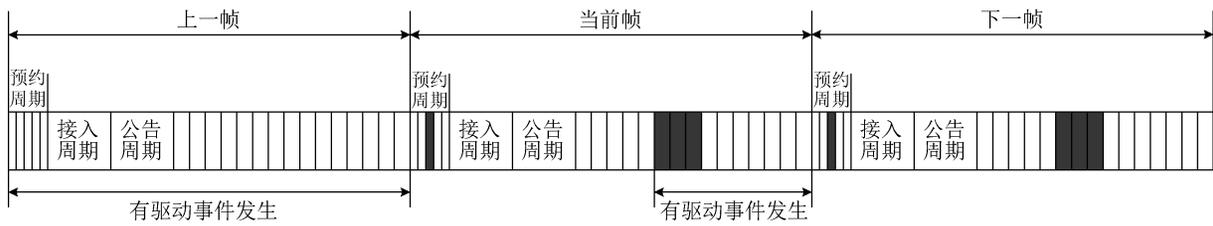


图 2 连续发生事件但不可搭载情况

Fig. 2 Schematic diagram of continuous occurrence but under unloadable situation

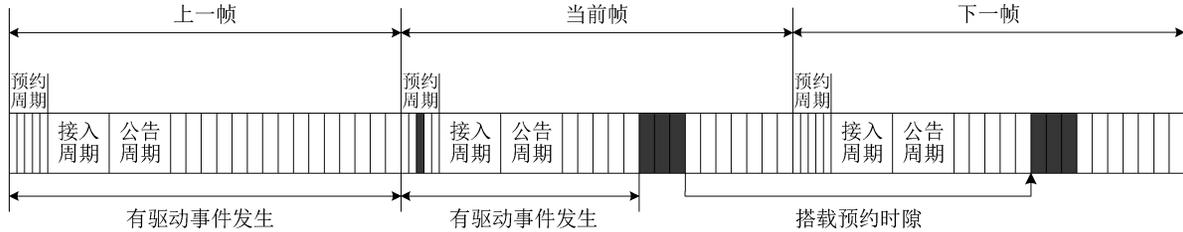


图 3 连续发生事件且可搭载情况

Fig. 3 Schematic diagram of continuous occurrence with loadability

控制信息的能量开销方面不如 E-BMA 协议。但是 PD-EBMA 协议不用额外等待一帧再传输数据,与 E-BMA 相比,极大地降低了传输时延。能耗和时延的具体计算后续有详细介绍。

1.3 基于优先级的背包算法详细设计

使用背包算法能在给定数量的传输时隙内尽可能多地传输数据包,并在排序时按照最小工作优先的原则以减小时延。基于优先级的背包算法在无优先级背包算法的基础上主要增加了以下几个步骤:

步骤 1 将业务需求按优先级从高到低进行排序,同一优先级的业务需求分配至同一组。

步骤 2 按优先级从高到低的顺序进行分配,直至分配到剩余时隙数量不足以满足某一优先级业务完全传输的需求。

步骤 3 以剩余时隙为背包使用背包算法进行分配,若仍有剩余时隙再对下一优先级使用背包算法,循环遍历至剩余时隙为 0 或所有优先级皆已遍历。剩余未分配的业务需求累加至下一轮待分配需求中,但与新需求划分开。

步骤 4 下一轮分配中依旧按优先级从高到低传输,但不同的是同一优先级不论业务大小优先传输旧业务,以此减小时延抖动。

步骤 5 当分配至剩余时隙数量不足以满足某一优先级业务完全传输的需求时,观察该优先级中的旧业务需求是否已经超过剩余时隙的承载能力,若超

过则不使用背包算法,直接全部传输旧业务;若未超过,则以满足旧业务需求后的剩余时隙作为背包,对该优先级的剩余业务使用背包算法,与步骤 3 类似。

注意背包算法只有在“待装物品总量”大于“背包剩余容量”,也就是业务需求量大于剩余时隙总数时才会使用。因为当剩余时隙总数更大时,所有的需求自然都能在当前帧中传输完成,此时仅有优先级从高到低、数据包长度由小到大进行。

通过此分配方式,可以达到的效果:高优先级业务能得到高优先传输;优先传输旧业务以保证同一节点产生数据的顺序与汇聚节点接收数据的顺序一致,且减少时延抖动;使用背包算法最大限度地提高了时隙利用率及减少空闲阶段时间。

1.4 动态占空比设定方式

动态占空比简单来说就是节点利用存储空间缓存一段时间的数据,之后再集中发送以节省控制开销。在 PD-EBMA 协议时帧设计中占空比的定义是活跃期 T_{AP} 占周期长度 T_{CD} 的比例,其由周期阶数 C 决定, C 的取值范围为自然数。活跃期的长度也叫一个基准周期长度,参考文献[10]中动态占空比的设定方式,给出 T_{AP} 与 T_{CD} 的关系式:

$$T_{CD} = T_{AP} \times 2^C \quad (1)$$

一个完整周期中除了活跃期以外都是非活跃期 T_{IAP} ,由此可得

$$T_{IAP} = T_{AP} \times (2^C - 1) \quad (2)$$

由式(2)可知,当 $C=0$ 时,整个周期将全是活跃期,没有非活跃期,此时适用于流量很大的场景;随着 C 的增大,活跃期所占的比例逐步下降,非活跃期的比例逐步上升,适用于流量较小的场景。

为了根据网络流量自动设定 C ,PD-EBMA采用了以下方法:汇聚节点实时统计当前周期中每一帧内业务传输所用的时隙数,等到当前周期最后一帧的时隙分配完成后,汇聚节点将当前周期用于业务传输的时隙总数与数据时隙总数相除得到一个比例:若该比例小于50%,则表示当前周期存在一半以上的空闲时间,此时应加大 C ,减小占空比,增加非活跃期的长度,为防止 C 无限制增加导致周期过长,可设定一个 C_{\max} 作为上限;若比例大于50%,则表示当前周期用于数据传输的时间较长,为避免下一周期流量增大导致可用时隙不足,此时应减小 C ,增加占空比,需注意 $C=0$ 时已不可减小,在下一周期中 C 依旧设为0。为便于理解绘制了动态占空比设置流程如图4所示。

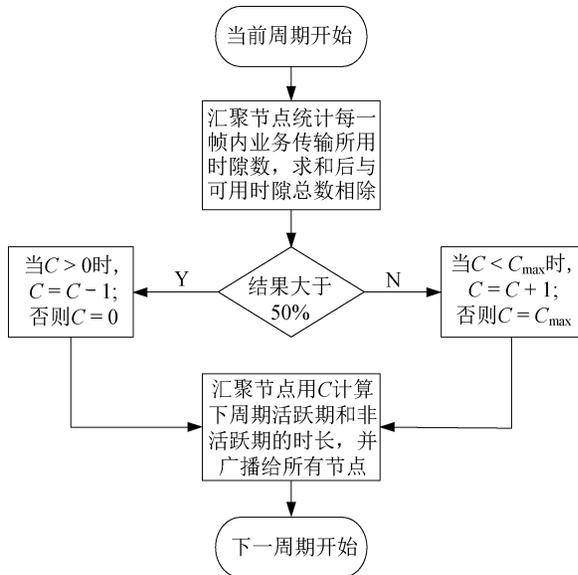


图4 动态占空比设置流程

Fig. 4 Flow chart of dynamic duty cycle setting

2 PD-EBMA 协议性能分析

无线传感器网络的能量主要消耗在稳定传输阶段,因此仅对该阶段的能耗进行分析。假设无线传感器网络中有1个汇聚节点和 N 个传感器节点,每个稳定传输阶段有 l 帧,每一帧中驱动数据传输事件发生的概率为 p ,节点在每一帧起始时检查上

一帧是否发生事件,如果发生则产生相应的数据包等待传输。假设产生的数据包大小随机,服从均匀分布,发送或接收这样一个包所需时间为 $T_{dmin} \sim T_{dmax}$,发送或接收一个控制信息所需时间为 T_c ,发送或接收1个调度信息所必须时间为 T_{sink} 。处于发送和接收模式的单位时间能耗分别为 P_t 和 P_r ,空闲侦听的单位时间能耗为 P_i 。节点在预约周期、竞争接入周期、公告周期及数据传输周期的能耗分别为 E_{res} 、 E_{cont} 、 E_{ann} 及 E_{trans} 。从能耗和时延两方面比较E-TDMA、E-BMA、BEST-MAC及PD-EBMA的性能。

2.1 E-TDMA 性能分析

E-TDMA协议只包括公告周期和数据传输周期。在公告周期中汇聚节点广播时隙分配方案给所有传感器节点,因此公告周期的能量消耗 $E_{ann-ETDMA}$ 为

$$E_{ann-ETDMA} = NP_r T_{sink} + P_t T_{sink} \quad (3)$$

每个节点1帧最多只能传输1个数据包,由于数据包大小服从均匀分布,因此数据包的平均大小为 $(T_{dmin} + T_{dmax})/2$,每一帧的数据传输周期中发送1个数据包的平均能耗为 $P_t(T_{dmin} + T_{dmax})/2$,接收1个数据包的平均能耗为 $P_r(T_{dmin} + T_{dmax})/2$ 。传感器节点没有数据发送时处于睡眠状态不消耗能量,汇聚节点在无数据传输时依旧保持侦听。由于E-TDMA中给每个节点分配1个固定时隙且时隙大小相等,因此时隙长度需取最大数据包传输时间 T_{dmax} ,汇聚节点在数据传输周期中侦听消耗的能量为 $(1-p)NP_i T_{dmax}$ 。由于一个周期有 l 帧,可得一个周期内数据传输周期的总能量消耗 $E_{trans-ETDMA}$ 为

$$E_{trans-ETDMA} = [(1-p)P_i T_{dmax} + \frac{p(P_t + P_r)(T_{dmin} + T_{dmax})}{2}] Nl \quad (4)$$

由于公告周期在每一个完整周期中只发生1次,于是E-TDMA协议1个周期内的总能量消耗 E_{ETDMA} 为

$$E_{ETDMA} = (NP_r T_{sink} + P_t T_{sink}) + [(1-p)P_i T_{dmax} + \frac{p(P_t + P_r)(T_{dmin} + T_{dmax})}{2}] Nl \quad (5)$$

在E-TDMA协议中,由于将每一帧的起始作为数据包的产生时间,因此最大传输时延为1帧时长,平均传输时延 \bar{L}_{ETDMA} 为

$$\bar{L}_{\text{ETDMA}} = (T_{\text{dmax}} + 2T_{\text{dmax}} + \dots + NT_{\text{dmax}}) / N = \frac{(N+1)T_{\text{dmax}}}{2} \quad (6)$$

2.2 E-BMA 性能分析

E-BMA 协议包括预约周期、公告周期及数据传输周期。在预约周期中,需发包的节点在未搭载的情况下将发送预约请求给汇聚节点,而前一帧中已搭载发送预约请求的节点将跳过预约周期;汇聚节点在已搭载预约节点的控制时隙内睡眠,此外,在整个预约周期中将持续侦听并进行接收。节点未搭载的概率为 $\rho(1-\rho)$,由此可得每一帧中预约周期的能量消耗 $E_{\text{res-EBMA}}$ 为

$$E_{\text{res-EBMA}} = \rho(1-\rho)(P_t + P_r)T_c N + (1-\rho)P_t T_c N \quad (7)$$

在公告周期中,汇聚节点发送调度信息,并由所有发包节点接收,由此可得每一帧中公告周期的能量消耗 $E_{\text{ann-EBMA}}$ 为

$$E_{\text{ann-EBMA}} = P_t T_{\text{sink}} + P_r T_{\text{sink}} \rho N \quad (8)$$

在数据传输周期中,需发包的节点在被分配的时隙内发送数据,并由汇聚节点接收,与 E-TDMA 相比少了汇聚节点侦听空闲时隙的能量消耗,由此可得每一帧数据传输周期的能量消耗 $E_{\text{trans-EBMA}}$ 为

$$E_{\text{trans-EBMA}} = \frac{\rho(P_t + P_r)(T_{\text{dmin}} + T_{\text{dmax}})}{2} N \quad (9)$$

由此可得 E-BMA 协议 1 个周期内的总能量消耗 E_{EBMA} 为

$$E_{\text{EBMA}} = \left[\rho(1-\rho)(P_t + P_r)T_c N + (1-\rho)P_t T_c N + P_t T_{\text{sink}} + P_r T_{\text{sink}} \rho N + \frac{\rho N(P_t + P_r)(T_{\text{dmin}} + T_{\text{dmax}})}{2} \right] l \quad (10)$$

每个数据包在传输前都需等待额外 1 帧,因此 E-BMA 的最大传输时延 2 个帧长为 $2(NT_c + T_{\text{sink}} + NT_{\text{dmax}})$,平均传输时延 \bar{L}_{EBMA} 为

$$\bar{L}_{\text{EBMA}} = 2(NT_c + T_{\text{sink}}) + 0.5(\rho N + 2N + 1)T_{\text{dmax}} \quad (11)$$

从平均时延计算公式中可以看出,相比 TDMA 来说,尽管 E-BMA 通过位图辅助去掉了 TDMA 中相邻传输时隙的间隔,但等待的额外 1 帧使得平均时延显著加大。

2.3 BEST-MAC 性能分析

BEST-MAC 协议包括预约周期、竞争接入周期、公告周期及数据传输周期。相比 E-BMA, BEST-MAC 少了搭载预约的方式,因此在预约周期中会多消耗些能量,每一帧中预约周期的能量消耗 $E_{\text{res-BEST}}$ 为

$$E_{\text{res-BEST}} = \rho(P_t + P_r)T_c N + (1-\rho)P_t T_c N \quad (12)$$

在竞争接入周期中,允许外来节点发送请求入网,此时汇聚节点将进行持续侦听。假设竞争接入的时间为 T_{cont} ,为方便与其他协议进行比较,此处不考虑外来节点的能量消耗,每一帧中竞争接入周期的能量消耗 $E_{\text{cont-BEST}}$ 主要是汇聚节点侦听的能量消耗,可表示为

$$E_{\text{cont-BEST}} = P_t T_{\text{cont}} \quad (13)$$

公告周期及传输周期的能量消耗与 E-BMA 相同,这里不再赘述。利用 4 类能量消耗可得 BEST-MAC 一个周期的总能量消耗 E_{BEST} 为

$$E_{\text{BEST}} = \left\{ \rho(P_t + P_r)T_c N + (1-\rho)P_t T_c N + P_t T_{\text{cont}} + P_t T_{\text{sink}} + P_r T_{\text{sink}} \rho N + 0.5[\rho N(P_t + P_r)(T_{\text{dmin}} + T_{\text{dmax}})] \right\} l \quad (14)$$

BEST-MAC 的最大时延与数据传输周期的长度有关,为使吞吐量最高,数据传输周期长度应设置为所有节点在一帧中传输包总时长的期望值,即 $\rho N(T_{\text{dmin}} + T_{\text{dmax}})/2$,因此最大传输时延 $L_{\text{BEST}}^{\text{MAX}}$ 为

$$L_{\text{BEST}}^{\text{MAX}} = NT_c + T_{\text{cont}} + T_{\text{sink}} + \frac{\rho N(T_{\text{dmin}} + T_{\text{dmax}})}{2} \quad (15)$$

平均传输时延的计算稍复杂,由于 BEST-MAC 使用小时隙进行数据传输,理想情况下如果时隙划分足够小,可以认为数据传输周期中不同大小数据包之间无空闲时间,在使用背包算法后会将数据包以从小到大的顺序进行发送,因此每个数据包引起的附加时延也是逐渐增大。由于每帧中发数据包节点个数的均值是 ρN ,不妨把单个数据包附加时延区间 $(T_{\text{dmin}}, T_{\text{dmax}})$ 划分为 ρN 段,每个节点的发数据包时延依次取每段的中间值,则第 k 个节点的数据包附加时延 $L_{\text{add}}^{\text{BEST}}(k)$ 为

$$L_{\text{add}}^{\text{BEST}}(k) = T_{\text{dmin}} + \left\{ k - \frac{1}{2} \right\} \frac{(T_{\text{dmax}} - T_{\text{dmin}})}{\rho N} \quad (16)$$

进而可以表示出每个节点的时延 $L(k)$:

$$\begin{cases} L(1) = NT_c + T_{\text{cont}} + T_{\text{sink}} + L_{\text{add}}^{\text{BEST}}(1) \\ L(k) = L(k-1) + L_{\text{add}}^{\text{BEST}}(k), k > 1 \end{cases} \quad (17)$$

利用数列知识易得 $L(k)$ 通项公式为

$$L(k) = NT_c + T_{\text{cont}} + T_{\text{sink}} + kT_{\text{dmin}} + \frac{k^2(T_{\text{dmax}} - T_{\text{dmin}})}{2\rho N} \quad (18)$$

可以计算出平均时延 \bar{L}_{BEST} :

$$\begin{aligned} \bar{L}_{\text{BEST}} &= \sum_{k=1}^{\rho N} \frac{L(k)}{\rho N} = NT_c + T_{\text{cont}} + \\ &T_{\text{sink}} + \frac{(\rho N + 1)T_{\text{dmin}}}{2} + \\ &\frac{(\rho N + 1)(2\rho N + 1)(T_{\text{dmax}} - T_{\text{dmin}})}{12\rho N} \quad (19) \end{aligned}$$

由计算结果可知, BEST-MAC 的时延相比 E-BMA 小很多, 且与固定分配的 E-TDMA 相比, 多了控制阶段的时延, 但数据传输阶段的时延显著减少。

2.4 PD-EBMA 性能分析

PD-EBMA 同 BEST-MAC 一样包括预约周期、竞争接入周期、公告周期及数据传输周期。同前面协议不同的是, PD-EBMA 协议的动态占空比思想必须要在事件发生概率 p 动态变化的时候才能发挥作用, 假设 p 的变化范围为 (p_{\min}, p_{\max}) , 服从均匀分布, 则周期阶数 C 的变化范围为 $[0, \log_2(p_{\max}/p_{\min})]$, 且不超过 C_{\max} , C 在不同取值情况下对应的事件发生概率 $p \in (p_{\max}/2^{C+1}, p_{\max}/2^C)$ 。为保证 $p = p_{\max}$ 时数据能够完全传输, 不至于缓存溢出, 同时保证最大吞吐量, 则数据传输阶段时长应设为 $p_{\max}N(T_{\text{dmin}} + T_{\text{dmax}})/2$ 。下面计算一帧中各周期的能耗。

在预约周期, 由于动态占空比的影响, 有 2^C 个基准周期的数据将堆叠到 1 个基准周期长度的活跃期内传输, 设 2^C 个基准周期内第 k 个周期的事件发生概率为 p_k , 其影响可等价于活跃期的事件发生概率 p_{AP} 变为 2^C 个 p_k 的叠加, 可计算 p_{AP} 的期望值 \bar{p}_{AP} (此计算方法仅适用于 p_{\min} 乘以 2 的整数次方等于 p_{\max} 的情形, 否则需对最后一段概率区间单独求解, 在本文中不考虑):

$$\begin{aligned} \bar{p}_{\text{AP}} &= E\left(\sum_{k=1}^{2^C} p_k\right) = \sum_{k=1}^{2^C} E(p_k) = 2^C \times \left\{ \frac{p_{\max}}{2^{C+1}} + \right. \\ &\left. \frac{p_{\max}}{2^C} \right\} / 2 = \frac{3}{4} p_{\max} \quad (20) \end{aligned}$$

接着, 由于成功搭载要求连续两帧发生事件且在当前帧中事件应发生在数据传输之前。驱动事件可能发生在帧中的任意位置, 可认为当前帧中事件发生在数据传输之前的概率为 0.5, 搭载成功概率为 $\bar{p}_{\text{AP}}^2/2$, 由此可得预约周期的能量消耗 $E_{\text{res-PD}}$:

$$\begin{aligned} E_{\text{res-PD}} &= \bar{p}_{\text{AP}} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \bar{p}_{\text{AP}} \right\} (P_t + P_r) T_c N + \\ &(1 - \bar{p}_{\text{AP}}) P_i T_c N \quad (21) \end{aligned}$$

竞争接入周期的能量消耗同 BEST-MAC, 公告周期和数据传输周期的能量消耗表达式与 E-BMA 的类似, 只是需将 p 替换成 \bar{p}_{AP} , 可得 PD-EBMA 在一个完整周期内的总能量消耗 E_{PD} 为 (注意该周期包含 2^C 个基准周期):

$$\begin{aligned} E_{\text{PD}} &= \left\{ \bar{p}_{\text{AP}} \left(1 - \frac{1}{2} \bar{p}_{\text{AP}} \right) (P_t + P_r) T_c N + \right. \\ &(1 - \bar{p}_{\text{AP}}) P_i T_c N + P_i T_{\text{cont}} + P_i T_{\text{sink}} + \\ &P_r T_{\text{sink}} \bar{p}_{\text{AP}} N + \\ &\left. \frac{\bar{p}_{\text{AP}} N (P_t + P_r) (T_{\text{dmin}} + T_{\text{dmax}})}{2} \right\} l \quad (22) \end{aligned}$$

PD-EBMA 的最大时延与最大周期阶数 C_{\max} 有关, 当 C 取最大值时, 活跃期的占空比最小, 整个周期长度最大, 可以表示出最大传输时延:

$$L_{\text{PD}}^{\max} = 2^{C_{\max}-1} p_{\max} N (T_{\text{dmin}} + T_{\text{dmax}}) \quad (23)$$

而平均时延的计算由于优先级和占空比的双重影响变得较为复杂。假设数据包有 N_p 个优先级, 产生每个优先级数据包的概率相同, 同一优先级内使用背包算法进行分配, 则在活跃期内, 每一优先级的数据包数量为 $\bar{p}_{\text{AP}} N / N_p$, N_p 个优先级的数据传输可以看作是 N_p 个小传输周期的依次排列, 每一传输周期内的时延分析类似 BEST-MAC, 且每一小段传输周期附加的传输时延 $L_{\text{add}}^{\text{PD}}$ 大小相等, 将 $\bar{p}_{\text{AP}} N / N_p$ 替换式 (19) 的 pN 可得

$$\begin{aligned} L_{\text{add}}^{\text{PD}} &= \frac{(\bar{p}_{\text{AP}} N / N_p + 1) T_{\text{dmin}}}{2} + \\ &\frac{(\bar{p}_{\text{AP}} N / N_p + 1) (2\bar{p}_{\text{AP}} N / N_p + 1) (T_{\text{dmax}} - T_{\text{dmin}})}{12\bar{p}_{\text{AP}} N / N_p} \quad (24) \end{aligned}$$

而每一小段传输周期的平均长度为 $(\bar{p}_{\text{AP}} N / N_p) \times (T_{\text{dmin}} + T_{\text{dmax}}) / 2$, 于是用与 BEST-MAC 类似的求法, 则第 k 个优先级对应的时延 $L_{\text{AP}}^{\text{PD}}(k)$ 可表示为

$$\begin{cases} L_{AP}^{PD}(1) = NT_c + T_{cont} + T_{sink} + L_{add}^{PD} \\ L_{AP}^{PD}(k) = L_{AP}^{PD}(k-1) + \frac{\bar{p}_{AP}N(T_{dmin} + T_{dmax})}{2N_p} \end{cases} \quad (25)$$

可求得 $L_{AP}^{PD}(k)$ 的通项公式并计算活跃期的平均时延 \bar{L}_{AP}^{PD} :

$$\begin{cases} L_{AP}^{PD}(k) = NT_c + T_{cont} + T_{sink} + \\ (k-1) \frac{\bar{p}_{AP}N(T_{dmin} + T_{dmax})}{2N_p} + L_{add}^{PD} \\ \bar{L}_{AP}^{PD} = \sum_{k=1}^{N_p} \frac{L_{AP}^{PD}(k)}{N_p} = NT_c + \\ T_{cont} + T_{sink} + L_{add}^{PD} + \\ (N_p - 1) \frac{\bar{p}_{AP}N(T_{dmin} + T_{dmax})}{4N_p} \end{cases} \quad (26)$$

此时求得的 \bar{L}_{AP}^{PD} 是将整个周期产生的数据包放到活跃期传输的平均时延,以活跃期起始作为数据包产生原点,若想求整个周期的平均时延,还应把数据包产生原点分别放置于非活跃期中各基准周期的原点,最后求期望。

首先,表示出基准周期的长度 T_{BASE} :

$$T_{BASE} = [NT_c + T_{cont} + T_{sink} + p_{max}N(T_{dmin} + T_{dmax})/2]l \quad (27)$$

然后,计算不同原点处的时延 L_{CD}^{PD} ,以活跃期的起点作为第 1 个原点,则第 k 个原点处产生数据包的时延为

$$\begin{cases} L_{CD}^{PD}(1) = \bar{L}_{AP}^{PD} \\ L_{CD}^{PD}(k) = L_{CD}^{PD}(k-1) + T_{BASE} = \\ \bar{L}_{AP}^{PD} + (k-1)T_{BASE} \end{cases} \quad (28)$$

与上面同样的解法,求得完整周期的平均时延:

$$\bar{L}_{AP}^{PD} = \sum_{k=1}^{2^C} \frac{L_{CD}^{PD}(k)}{2^C} = \bar{L}_{AP}^{PD} + \frac{2^C - 1}{2} T_{BASE} \quad (29)$$

3 网络仿真及结果分析

根据性能分析模型,使用 Matlab 仿真了 PD-EBMA 协议的平均能耗和平均时延 2 个性能参数,并与 E-TDMA、E-BMA 及 BEST-MAC 进行了对比及分析。实验仿真参数的设置参考了 TI 公司较新的超低功耗无线微控制器 CC 2420,具体参数见表 1。

仿真场景分为了 3 类,分别探究节点数量、事件发生概率以及最大周期阶数对网络性能的影响。

表 1 实验仿真参数

Tab. 1 Experimental simulation parameters

参数	取值
发送能耗 P_t /mW	54
接收能耗 P_r /mW	50
空闲能耗 P_i /mW	50
数据传输速率/(kbit·s ⁻¹)	20
事件发生概率 p	0.062 5~0.5
节点数目 N	50
每一轮中帧数目 l	10
数据包大小/B	50~200
控制包大小/B	5
调度包大小/B	50
优先级数目 N_p	3
最大周期阶数 C_{max}	2
竞争接入周期长度 T_{cont} /s	0.1

3.1 节点数量对性能的影响

不同节点数量下的能量消耗情况和平均时延如图 5 所示。

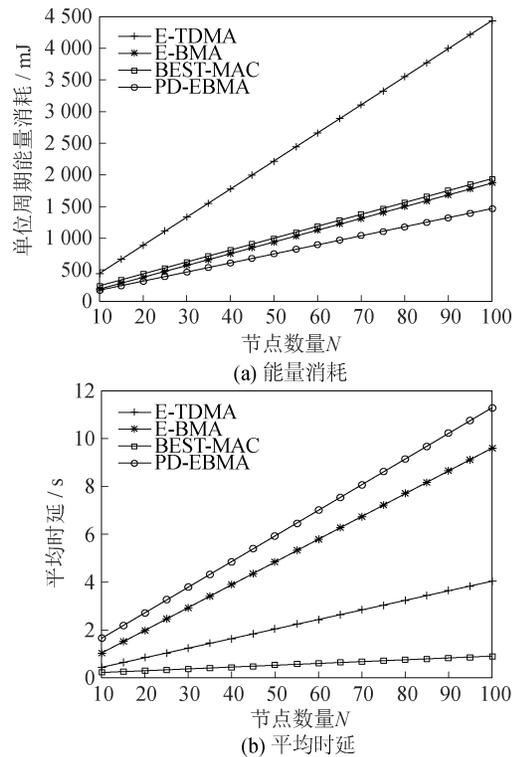


图 5 不同节点数量下的能量消耗和平均时延对比

Fig. 5 Comparison of energy consumption and average time delay under different node numbers

由图 5 可知,在事件发生概率变化且无最大周期阶数限制的场下,动态占空比思想发挥的作用较大,使得 PD-EBMA 在不同节点数目下的能耗表现较为突出,但同样由于动态占空比的影响,时延方面的表现不尽如人意,略高于 E-BMA。

3.2 事件发生概率对性能的影响

不同事件发生概率下的能量消耗情况和平均时延如图 6 所示。此场景下的事件发生概率固定,动态占空比无法发挥作用,主要是搭载预约和基于优先级的背包算法产生影响。

从结果中可知:搭载预约的程度不如 E-BMA,能耗介于 BEST-MAC 和 E-BMA 之间;由于数据优先级的影响,PD-EBMA 的时延略高于 BEST-MAC,但差距不大。

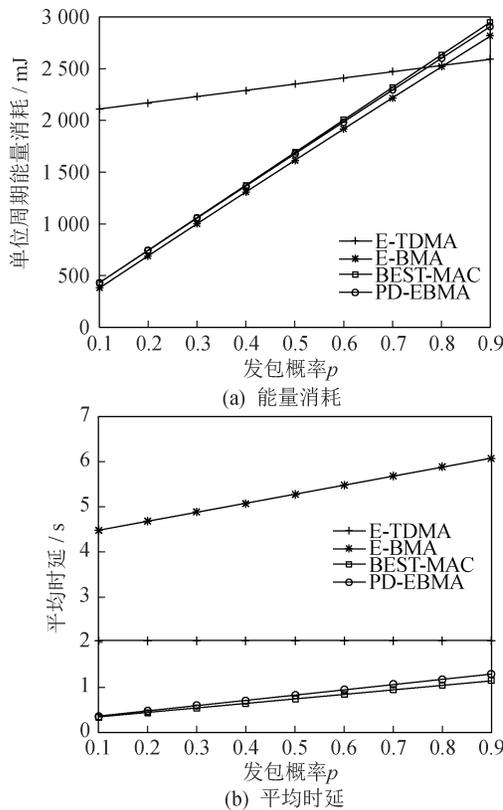


图 6 不同发包概率的能量消耗和平均时延对比

Fig. 6 Comparison of energy consumption and average time delay under different transmit probabilities

3.3 最大周期阶数对性能的影响

不同最大周期阶数下的能量消耗情况和平均时延如图 7 所示。此场景下的事件发生概率变化但

有最大周期阶数限制,从而限制动态占空比的影响。

从仿真结果来看,随着最大周期阶数的增大,PD-EBMA 协议的节能效果越来越好,但时延也逐步提升。由于事件发生概率变化范围的限制,此场景起作用的最大周期阶数为 2。

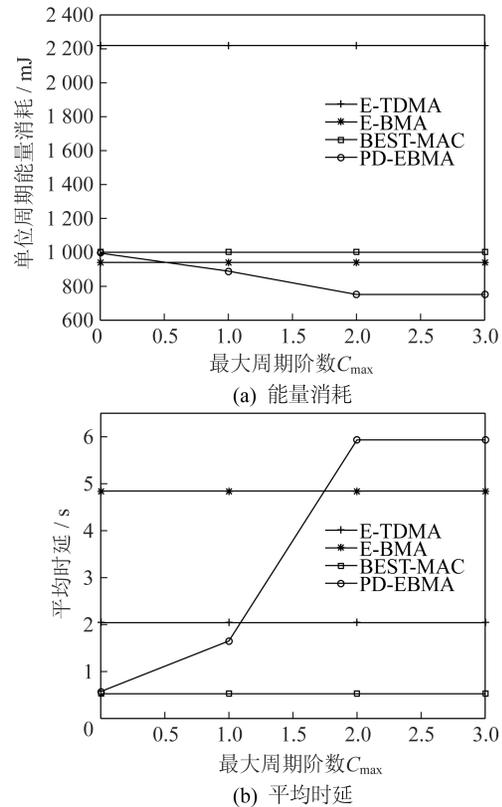


图 7 不同最大周期阶数下的能量消耗和平均时延对比

Fig. 7 Comparison of energy consumption and average time delay under different maximum cycle orders

对上述所有仿真结果进行总结:改进后的搭载预约方式在不影响时延的情况下节省了一些控制开销带来的能量消耗,且节省能耗的效果随事件发生概率的增大而增大;优先级的引入虽然做到了区分传输,但在一定程度上会增大数据包的平均时延,因为时隙分配会先考虑优先级而不是背包算法;动态占空比思想为能耗和时延之间的转换提供了途径,但转换效果随动态占空比的变化幅度较大,可通过最大周期阶数限制动态占空比带来的时延影响,从而得到一个较为均衡的能耗和时延。总的来看,在动态占空比设置合理的条件下,PD-EBMA 相比于传统固定分配的 E-TDMA 在能耗和时延方面得到了显著改善。

4 结束语

以箭载无线传感器网络业务传输的信道资源分配作为研究对象,针对业务量动态变化、高信道利用率、优先级区分传输以及节点快速入网等需求,设计了一种动态业务分配方法 PD-EBMA,相比传统固定分配的 TDMA 协议在极大提升业务灵活性的同时还辅以能耗和时延的改进。其中用到的动态占空比思想是一把双刃剑,需根据能耗和时延的取舍结合工程背景进行合理配置。

参考文献

- [1] 王玮,张众,陈振知,等.现役运载火箭运载能力提升措施研究[J].上海航天(中英文),2020,37(增刊2):59-64.
- [2] 路娟,王颖,刘丙太,等.基于火箭测量系统的无线传感器网络技术研究[J].宇航计测技术,2015,35(4):44-47.
- [3] 罗煜缤,李洪,周广铭,等.新一代箭载无线传感器网络系统架构综述[J].宇航计测技术,2020,40(4):1-6.
- [4] 王塞博,刘素凯,毛先柏.无线传感器网络综述[J].信息通信,2014(8):2.
- [5] PHILIPOSE A, RAJESH A. Performance analysis of an improved energy aware MAC protocol for railway systems [C]//2015 2nd International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS). Washington D.C., USA: IEEE Press, 2015: 233-236.
- [6] CHANG C L, HO K Y. Slot assignment for TDMA MAC in industrial wireless sensor network [C]//2016 IEEE/ACIS 15th International Conference on Computer and Information Science (ICIS). Washington D.C., USA: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [7] LI J, LAZAROU G Y. A bit-map-assisted energy-efficient MAC scheme for wireless sensor networks [C]//Proceedings of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks. Washington D.C., USA: IEEE Press, 2004: 55-60.
- [8] HSU T H, YEN P Y. Adaptive time division multiple access-based medium access control protocol for energy conserving and data transmission in wireless sensor networks [J]. IET Communications, 2011, 5 (18) : 2662-2672.
- [9] SHAFIULLAH G M, AZAD S A, ALI A B M S. Energy-efficient wireless MAC protocols for railway monitoring applications [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 14 (2) : 649-659.
- [10] ALVI A N, BOUK S H, AHMED S H, et al. Enhanced TDMA based MAC protocol for adaptive data control in wireless sensor networks [J]. Journal of Communications and Networks, 2015, 17 (3) : 247-255.
- [11] ALVI A N, BOUK S H, AHMED S H, et al. BEST-MAC: bitmap-assisted efficient and scalable TDMA-based WSN MAC protocol for smart cities [J]. IEEE Access, 2016, 4: 312-322.
- [12] TOLANI M, SINGH R K. Energy efficient adaptive bit-map-assisted medium access control protocol [J]. Wireless Personal Communications, 2019, 108 (3) : 1595-1610.
- [13] TOLANI M, SINGH R K. Adaptive duty-cycle-enabled energy-efficient bit-map-assisted MAC protocol [J]. SN Computer Science, 2020, 1(3): 1-11.
- [14] BARONTI P, PILLAI P, CHOOK V W C, et al. Wireless sensor networks: a survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards [J]. Computer Communications, 2007, 30(7): 1655-1695.
- [15] JIANG L, WALRAND J. A distributed CSMA algorithm for throughput and utility maximization in wireless networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2009, 18(3): 960-972.