

引用格式:赵天鹤,熊华钢,程子敬,等.可调度性保证的TTP总线能量有效优化方法[J].电光与控制,2018,25(6):72-77,101. ZHAO T H, XIONG H G, CHENG Z J, et al. An energy efficiency optimization method for TTP bus with guaranteed schedulability[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(6):72-77, 101.

可调度性保证的 TTP 总线能量有效优化方法

赵天鹤^{1a}, 熊华钢^{1b}, 程子敬², 李 峭^{1b}

(1. 北京航空航天大学, a. 大型飞机高级人才班; b. 电子信息工程学院, 北京 100191;

2. 北京卫星信息工程研究所国家重点实验室, 北京 100080)

摘要: 在航空电子互连的实际应用中, 时间触发协议(TTP)总线存在着一定量的空闲时段, 随着节能环保的“绿色航电”理念渗入到航电系统设计的各个层面, 提出一种以能量有效为优化目标的消息调度表生成方法, 在保证可调度性的前提下利用空闲时间资源合理降低信息码元速率。通过建立静态分片(SP)的消息分配模型, 对TTP总线的TDMA周期的调度裕量进行组合优化分配, 用以降低部分分片的码元速率, 达到节能的效果。构造消息集合案例, 设定其中的消息分属于不同节点且具有多种周期和长度参数。案例仿真计算表明, 与未采用SP和降频优化的常规方法相比, 所提方法不仅可以保证消息的可调度性, 而且有效地降低了传输能耗。

关键词: 航空电子综合; 实时系统; 能量有效; TTP总线; 静态分片

中图分类号: TP393.03 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.06.016

An Energy Efficiency Optimization Method for TTP Bus with Guaranteed Schedulability

ZHAO Tian-he^{1a}, XIONG Hua-gang^{1b}, CHENG Zi-jing², LI Qiao^{1b}

(1. Beihang University, a. School of Large Aircraft; b. School of Electronic Information Engineering, Beijing 100191, China;

2. National Key Laboratory of Beijing Satellite Information Engineering Institute, Beijing 100080, China)

Abstract: There is a certain amount of idle time in the Time Triggered Protocol (TTP) bus in practical applications of avionics interconnection. With the energy-saving “green avionics” concept penetrating into all aspects of the avionics system design, a message-scheduling table generation method is presented, in which energy efficiency is proposed as the optimization objective. On the premise of ensuring schedulability, the idle time resource is used to reduce the information symbol rate reasonably. By building a message allocation model of Static Packing (SP), the scheduling slack of the TDMA period of the TTP bus is optimized and allocated to each node to reduce the symbol rate of some of the packs, so as to save energy. A case of the message set is constructed in which messages belong to different nodes and have a variety of periods and length parameters. Case studies show that, compared with the conventional methods not using SP and frequency reduction optimization, this method can not only guarantee the schedulability of messages, but also effectively reduce the energy consumption in transmission.

Key words: avionics integration; real-time system; energy efficiency; TTP bus; static packing

0 引言

时间触发协议(Time-Triggered Protocol, TTP)是分布式容错实时系统电子模块互连的实时通信协议^[1]。TTP主要用于各种航空航天应用, 例如波音787发电

系统和环境控制、空中客车A380的机舱压力系统以及Aermacchi M-346的全权数字发动机控制(FADEC)系统等。

节能环保的“绿色航电”理念已经开始渗入到航空电子系统设计的各个层面^[2], 在实时应用条件下, 有关通信的能量有效性研究关注于能量有效调度问题; 文献[3]基于具有并行度的调度提出静态电源管理方法, 配合两个动态电源管理方法(贪婪法和空隙填补法)来节省尽可能多的能量; 文献[4]权衡了能量有效和可

收稿日期:2017-07-03 修回日期:2017-07-26

基金项目:国家自然科学基金(91538202, 61073012)

作者简介:赵天鹤(1993—), 女, 河北沧州人, 硕士, 研究方向为航空通信。

靠性,提出一种约束逻辑编程算法对比了不同动态错误下能量有效和可靠性的相互制约;文献[5]提出了一种启发式能量意识随机任务调度算法(ESTS),比过去的多种能量有效的调度方法节省更多的能量。

上述研究提出了信号电平和信号频率影响数字电路系统能耗公式,并加以改进,但较少关注将能量有效目标直接用于指导航空电子综合化系统的调度问题。具体到 TTP 总线网络,既有的可调度性分析方法^[6]包括静态单一消息(SM)、静态多消息(MM)、动态消息(DM)和动态分片(DP)消息分配模型。考虑文献[3-5]提出的能量有效策略,给出适合码元速率调整的静态分片(SP)分配模型,提出一种以能量有效为优化目标的消息调度表生成方法。该方法可用于计算降频节能的调度裕量,通过组合优化得到每个节点包含的调度裕量的最优分配方案,对周期消息调度表进行降频节能优化。

随着航空电子综合化设计向微小化智能系统发展,时间触发互连协议将应用于芯片之间(off-chip)甚至是芯片内部(on-chip)^[7-8],在这些应用场景中将应用主频更高的网络协议处理单元,能量消耗对于码元速率的变化更加敏感,本文方法有望对未来微小化智能航电系统的综合设计提供参考。

1 模型

1.1 TTP 节点调度模型

TTP 网络采用总线式结构将各个嵌入式节点联接为分布式系统。TTP 节点由主机、通信网络接口(CNI)和 TTP 控制器组成,其中,在一个集群中,发送节点从 CNI 接口获得带有状态信息的信息数据后,立即组帧并发送给其他需要接收的节点。每个节点的发送时间被保存在事先设定好的消息描述列表(Message Descriptor List, MEDL)中^[1]。MEDL 是 TTP/C 控制器的调度矩阵,用来描述节点数据收发消息等相关属性,存储在控制器 RAM 中,如图 1 所示。

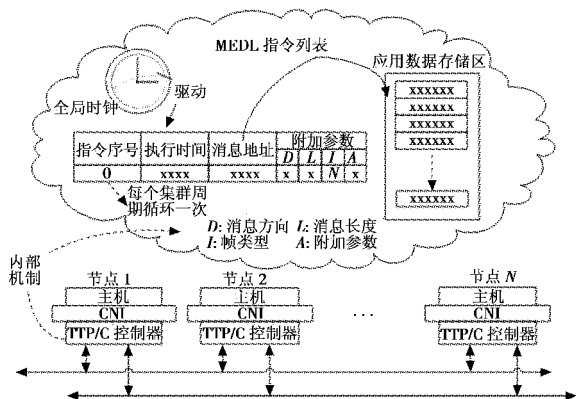


图 1 TTP 总线架构图

Fig. 1 TTP bus structure

在高安全性领域,一般采用双冗余通道互连,通过相互冗余的通信通道连接的 TTP 节点形成一个集群,采用时分多路访问(TDMA)方法组织总线通信。一个集群包含多个 TDMA round,各个 TDMA 周期的时隙划分是固定的。给定的节点可以按静态配置占据各个周期中的某个时隙,或占据集群中某个周期的固定时隙(虚拟时隙);占据时隙的节点具有在总线上发送消息的能力,其他节点可以侦听接收到总线上的消息。

当没有数据需要发送时,传统的 TTP 网络的物理层处于 MARK 状态,对应于没有被消息占据的时隙,发送方发送填充字符,以保持码元同步;在更高的协议层次,这些填充对应于 SAE AS6003 标准规定的在没有数据帧(N 帧)传输时填充发送初始化帧(I 帧)^[9],尽管此时并不需要初始化操作。

对于实用的航电互连设计,为了保证全生命周期的可扩展性,总线利用率往往留有可观的余量。可以利用时间资源余量降低传输真正数据负载的能量消耗,且保证其不超出其应占据的时隙区间,这就契合了绿色航电的设计理念,而实现的难点在于找到一种复杂度可以接受的能量有效消息组织的方法。

由上说明,由于 TTP 总线是静态调度的,余量的利用不会影响可扩展性,当新型号的总线利用率提高时,重新设计调度表就可以释放已占用的余量。

1.2 SP 静态分片模型

承载数据的 N 帧最长为 240 字节,包含不到 4 字节的协议开销(4 bit 头部 + CRC 校验 24 bit)。消息包含一个或多个应用数据单元,嵌入帧中;显然,当消息长度较长时,需要多条帧共同完成消息的发送,而数据单元的组织也为消息的分片提供了可能。TTP 网络完全通过预设的调度表控制帧的发送时刻,并在接收端识别帧的类型。

文献[6]介绍了消息调度的 4 种组织方法,其中有静态调度方法,即静态单一消息(SM)、静态多消息(MM)两种消息分配模型;另外,还有动态调度方法,即动态消息(DM)和动态分片(DP)两种消息分配模型。经过对比,认为在精确的时钟同步基准下,如果将 MM 模型进一步扩展,事先将 MM 分片,同样通过静态的调度表控制各个分片的发送时刻,不仅可以利用分片调度的灵活性进一步提高可调度性,而且不必像 DP 调度那样付出动态决策的开销。

因此,提出静态分片模型(SP),由于 TTP 帧的协议开销比例小,在调度表设计时可暂不考虑;实际工程中可以为每个时隙保留一定比例的开销余量,将仅含纯数据的消息封装为实际的帧,所以在本文中只考虑仅含纯数据的消息。SP 模型的设计思路是消息在被

发送到传输线之前,即被分成多个小分片,分别对分片进行调度组织。因为节点的时隙长度在每个 round 中都是一样的,并且时隙长度应当大于最长的消息长度,所以采用静态分片模型可以大大提高总线的利用率,并且更方便后面降频节能的实现。

1.3 能量有效消息调度

在保证通信性能的前提下动态调整数字电路的电平和频率,可以达到节能的目的^[10];考虑到总线传输抗干扰的特殊性,本文方法仅采用降频节能。

当有调度裕量存在时,传统的总线传输会用无意义的码元填充空闲时隙,这样在无效数据传输时仍然耗能。考虑到实时通信主要关注消息传输的截止时间,只要给定的消息能够在截止时间之前发送到总线上,即使拉长消息发送时间也可保证系统的性能,反之,提早完成传输没有收益而且会增加缓存的负担^[10]。所以,只要能够保证正好按时完成总线上各个消息的传输,就有望适当、合理地动态降低码元发送频率。

动态降低码元发送频率增加了发送、接收器芯片实现的复杂度,为了在能量有效和实现复杂度之间获得权衡,本文方法规定(如图 2 所示):1)当存在空闲时段,仅以偶数倍降低码元频率;2)只有在节点切换的边沿,频率才可以进行改变。

TTP 总线上的各个节点加载静态的消息调度表,在精确时钟定时下对于降频节能方案具有一致的操作。

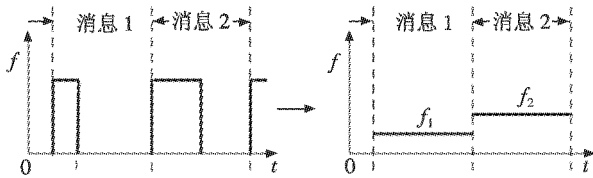


图 2 降频调度图示

Fig. 2 Illustration of down-frequency scheduling

2 能量有效 TTP 消息调度方法

2.1 设计方案

本文设计的方案流程如图 3 所示。首先要设定节点数、各个节点的消息数以及消息周期和消息长度。在 SP 模型下,计算可用于降频节能的调度裕量数。在不先考虑调度裕量时,生成周期性消息调度表,然后通过组合优化得到调度裕量分配给各个节点的最佳分配方案,生成优化后的能量有效消息调度表。

值得说明的是,设 SP 模型下可允许的最小分片时间长度 T_{\min} 由设计给定;不失一般性,令 $T_{\min} = 1$, 并以其为单位,对 round、消息周期、截止时间等参数的时间长度进行归一化。

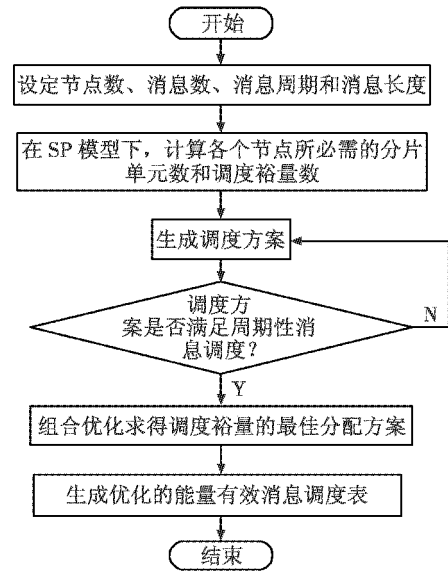


图 3 总体方案流程图

Fig. 3 Flow chart of the overall scheme

2.2 调度裕量的计算方法

降低码元的发送频率,相当于拉长消息的长度,使之最接近它们的截止时间,就可以在保障调度性能的前提下降低功耗。设 N 个节点分时共享 TTP 总线的每个 round, 记为节点 $i (i = 1, 2, \dots, N)$ 。设节点 i 的相对截止期限为 D_i , round 的时间长度记为 D^* , 集群中含有 round 的数目为 R 。设计要求 $D^* \leq \min(D_i)$ 。

由节点 i 发送的消息由二元组 $(P_{i,m}, C_{i,m})$ 表示, 其中, 参数 $P_{i,m}$ 和 $C_{i,m}$ 分别表示节点 i 的第 m 种消息的周期和长度。

对于 $\forall m$, 令 $D_i \leq P_{i,m}$, 对 $P_{i,m}$ 进行规整

$$P_{i,m}^* = \max\left(\left\lceil \frac{P_{i,m}}{D^*} \right\rceil, 1\right) \cdot D^* \quad (1)$$

对于 R 的设定应当保证所有节点的所有消息都可以执行完, 定义

$$R = \frac{lcm(P_{i,m}^*)}{D^*} \quad (2)$$

在消息静态分片模型中, 设消息是可以被分片的。以相同长度的分片大小同时对消息和时隙进行静态分片分配。分片长度 T 定义为

$$T = \frac{D^*}{2^n} \quad (3)$$

式中, $n = \lfloor \lg D^* \rfloor$, 使得 $T \in [1, 2)$, 使之尽可能接近 T_{\min} 。实际的分片长度 T 作为分配和利用调度裕量的单位, 进而对消息长度规整为

$$C_{i,m}^* = b_{i,m} \cdot T \quad (4)$$

式中, $b_{i,m} = \left\lceil \frac{C_{i,m}}{T} \right\rceil$, 为分片个数。

如果不通过降频利用调度裕量, 节点 i 在每个

round 中发送消息必需的分片数目为

$$G_i = \left\lceil \frac{\rho_i \cdot D^*}{T} \right\rceil \quad (5)$$

式中, $\rho_i = \sum_m \frac{C_{i,m}^*}{P_{i,m}^*}$, 为节点 i 的消息利用率。

可以得到 round 中可用来进行降频节能操作的调度裕量数目为

$$L = \frac{D^*}{T} - \sum_{i=1}^N G_i \quad (6)$$

2.3 周期性消息调度表生成

为了便于在加入调度裕量后选择最优的降频方案,先要在不考虑调度裕量的情况下生成消息调度表。使周期为 $P_{i,m}^*$ 的消息所处的时隙之间间隔 $p_{i,m} = \lfloor P_{i,m}^* / D^* \rfloor$ 个 round, 称 $p_{i,m}$ 为周期间隔数,它与周期值一一对应。

在 SP 模型下每条消息由 $b_{i,m}$ 个长度为 T 的分片组成,将节点 i 上具有相同周期的消息合并为类,各类的周期间隔数记为 $p_{i,k}^*$,且当 $k_1 \neq k_2$ 时, $p_{i,k_1}^* \neq p_{i,k_2}^*$ 。消息类的调度分片个数为

$$b_{i,k} = \sum_{i|p_{i,m}^*=p_{i,k}^*} b_{i,m} \quad (7)$$

则各类消息可以用二元组 $\langle p_{i,k}^*, b_{i,k} \rangle$ 表示。根据周期间隔数由小到大的次序对消息类排序,不失一般性,设排序后 $k=1,2,\dots,K$,且当 $k_1 < k_2$ 时, $p_{i,k_1}^* < p_{i,k_2}^*$ 。对于给定的节点,依次选择周期小的消息类,将它的分片分布在时隙中,关键需要确定每个消息类第一个周期内 $b_{i,k}$ 个分片的位置。

将集群周期内的 round 标记为 $r=1,2,\dots,R$,时隙内的分片位置标记为 $g=1,2,\dots,G_i$,则在节点 i 的时隙中任意分片的位置可用矩阵 $S_{r \times g}$ 表示。

节点消息分片调度安排算法如下。

Input: $\langle P_{i,k}^*, b_{i,k}^* \rangle, (i=1,2,\dots,N; k=1,2,\dots,K)$
and G_i

Output: $S_{r \times g}$,
($r=1,2,\dots,R; g=1,2,\dots,G_i$)

for $i=1$ to N do

 for $k=1$ to K do

 num = 0;

 for $j_1=1$ to $b_{i,k}^*$ do

 if $find(S_{r \times g}, p_{i,k}^*) = 0$ then

 location ← $find(S_{r \times g}, p_{i,k}^*)$;

 Update($S_{r \times g}, location, p_{i,k}^*$);

 num = num + 1;

 end

 else

 break;

 end

 end
 handle($S_{r \times g}, p_{i,k}^*, b_{i,k}^* - num$)

end

return $S_{r \times g}$

算法中,通过 $find()$ 函数进行检查,找到一组可行的位置,容纳周期性重复的分片,并使其第一个位置在可行条件下最靠近调度表的起始点。

节点消息分片调度安排如图4所示。其中,round x ($x=1,2,\dots,R$) 代表第 x 个 round。相同颜色形状的方框是同一个消息的周期性调度安排。

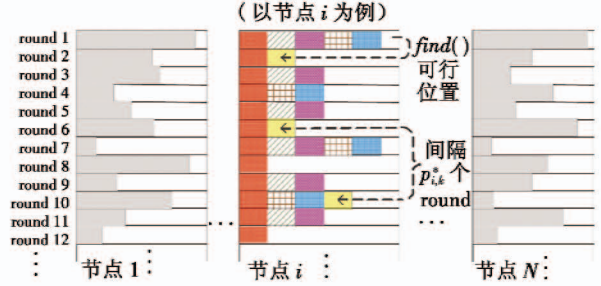


图4 节点消息分片调度安排示意图

Fig. 4 Illustration of node message SP scheduling

2.4 能耗的计算

在 SP 模型下,由式(6)求得的调度裕量分片通过组合优化分配给各个节点,设各节点获得裕量分片个数分别为 $L_1, \dots, L_i, \dots, L_N$ 。当 $L_i=0,1,\dots,L$ 时,节点 i 耗能为 E_{i,L_i} 。节点 i 在第 x 个 round 中消息分片数为 $l_{i,x}$ 。

降低时序同步逻辑数字电路的电平和主频,都可以降低其动态功耗。由于降低总线电压在实现上有一定困难,所以本文采用降频节能的方法。设节点 i 分配得到 L_i 个分片在第 x 个 round 中降频后的频率为 $f_{i,L_i,x}$,参照文献[3]的式(4),本文所讨论的 $l_{i,x}$ 和 L_i 相当于原文献中的平行度为 1 时每个调度元素的长度和分配给此调度元素的静态裕量,未降频的总线码速率即是公式中的频率 f_{\max} ,可得

$$E_{i,L_i} = C_{ef} \cdot f^3 \cdot \sum_x \left(\frac{l_{i,x}^3}{(l_{i,x} + L_i)^2} \right) \quad (8)$$

对 $l_{i,x}$ 和 L_i 以 T 为时间单位,并忽略常量 f_{\max} 和转换电容 C_{ef} ,设 e_{i,L_i} 为简化的 E_{i,L_i} ,简化的算式为

$$e_{i,L_i} = \sum_x \left(\frac{l_{i,x}^3}{(l_{i,x} + L_i)^2} \right) \quad (9)$$

虽然式(9)失去了物理量纲的意义,但并不影响组合优化问题的求解。下文中将 e_{i,L_i} 的单位统称为“能量单位”,进而可以得出所有节点的总耗能量为

$$e = \sum_i e_{i,L_i} \quad (10)$$

2.5 调度裕量组合优化分配算法

通过式(6)得到调度裕量后,问题转化为将 L 个裕量分片分配给 N 个节点的问题,共存在 $\frac{(L+N-1)!}{(N-1)!L!}$ 种分配方案。通过优化求解

$$\min \sum_i E_{i,L_i} \quad (11)$$

$$\text{s. t. } \sum_i L_i = L, e_{i,L_i} = \sum_x \left(\frac{L_{i,x}^3}{(L_{i,x} + L_i)^2} \right)$$

得到最优的调度裕量分片的分配方案。常规可以采用混合整数线性规划 (MILP) 求解最优分配,但考虑到 TTP 的调度表是离线生成的,可以采用复杂度较高但易于理解的方法,先枚举计算各个节点的 e_{i,L_i} ,然后采用树结构递归^[11]的方法求解式(11)。这里的算法伪代码如下所示。

```

Global variable: L and N and {L1, L2, ..., LN} and Minenergy
treesearch (energysum, Li, i)
    Luse ← ∑j=1i-1 Lj;
    if i < N then
        if Li <= L - Luse then
            energytemp ← energysum + ei,Li;
            if energytemp > Minenergy then
                Li = Li + 1;
                treesearch(energysum, Li, i);
            end
        else
            i ++;
            Li ← 0;
            energysum ← energytemp;
            treesearch(energysum, Li, i);
        end
    else
        if i > 1 then
            i --;
            energysum ← energysum - ei,Li;
            Li ++;
            treesearch(energysum, Li, i);
        end
    end
end
else
    if Li <= L - Luse then
        Compare and Update Minenergy and Li;
    end
end
else
    Li ++;
    treesearch(energysum, Li, i);
end
end
return {L1, L2, ..., LN}。
    
```

3 案例研究

在案例研究中,设定节点数 N 和每个节点的消息数上限 T_{\max} ,在消息数上限内随机生成节点的消息数,以及各个消息的周期值和长度;设消息周期 $P_{i,m}$ 取值为 $2^x \cdot 3^y \cdot 60$,其中非负整数 x, y 的取值范围为 $\{0, 1, 2\}$ 并等概率随机选取;为了保证消息分配后还有调度裕量用来降频节能,根据临时消息利用率的设定来选取消息长度。设定临时消息利用率的均值为: $T_{\text{ave}} = \frac{1}{6 \cdot N \cdot T_{\max}}$,临时的消息利用率 u 服从均值为 T_{ave} 的指

数分布,则消息长度为 $C_{i,m} = P_{i,m} \cdot u$ 。

为了展示以能量有效为优化目标的消息调度表生成方法,这里选取某个节点数 N 为 4 的案例作为典型算例;随后再给出扩展节点数后能量有效 TTP 总线调度表优化结果。

3.1 典型算例

设节点消息数上限为 10 条,在实验中随机生成 4 个节点的消息数以及每条消息的周期值,取 $D^* = \min D_i = \min P_{i,m}$,根据式(1)将消息周期以 D^* 为单位进行规整,如表 1 所示。

表 1 规整后的消息周期(单位 D^*)

Table 1 Regularized message cycle (the unit is D^*)

节点	消息								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	3	4	18	1	12	6	36	4	3
2	12	2	12	18	9	1			
3	36	3	2	3	3	9			
4	12	1	6	6	1				

根据式(4)将消息长度以调度分片 T 为单位进行规整,如表 2 所示,然后计算出所有消息长度所需要的分片数量以及剩余的调度分片裕量。本案例中 round 数 R 为 36,一个 round 的分片数为 32,4 个节点所需要的分片数量分别为 2,5,3,3。剩余的调度裕量 L 有 19 条。

表 2 规整后的消息长度(单位 T)

Table 2 Regularized message length (the unit is T)

节点	消息								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	1	1	1	2	1	3	1	1
2	1	1	1	4	2	1			
3	10	1	1	3	1	2			
4	2	1	1	1	1				

根据 2.3 节中节点周期性消息分片调度安排算法将节点的所有消息分片分配到各个节点时隙中。如图 5 所示的节点消息分片调度表,相同的颜色代表同一个消息类,白色表示没有消息,灰色用来分隔不同节点,每个分片中消息的高度代表频率,优化前还未降频节能,满格表示最高频率。

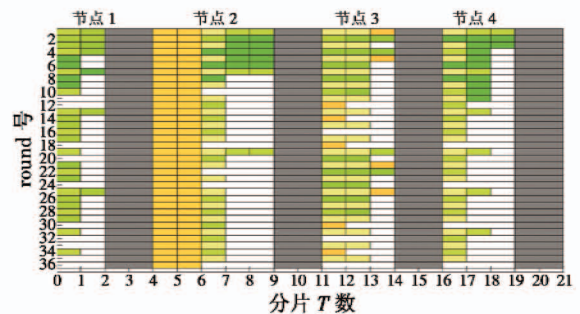


图 5 节点消息分片调度表

Fig. 5 SP scheduling of node message

通过枚举法和树结构递归法求得不同调度裕量分配方案的耗能情况,如图6所示。

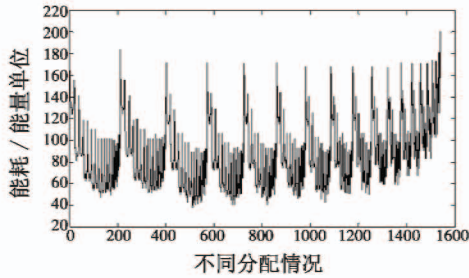


图6 不同调度裕量分配方案的耗能分布图
Fig.6 Energy consumption distribution map of different scheduling slack allocation schemes

由图6可以看出,当分配给4个节点的调度裕量 $\{L_1, L_2, L_3, L_4\} = \{2, 7, 5, 5\}$ 时,可以通过降频节能方法节省最多的能量。选择此分配方案并进行降频,得到能量有效优化节点消息调度表,如图7所示。

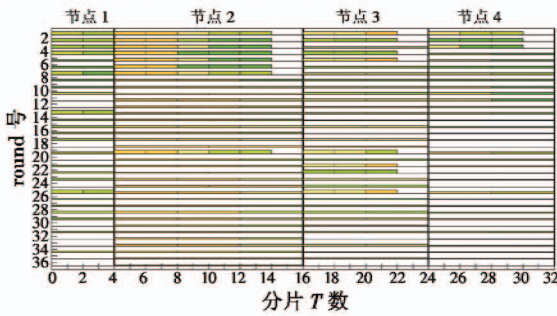


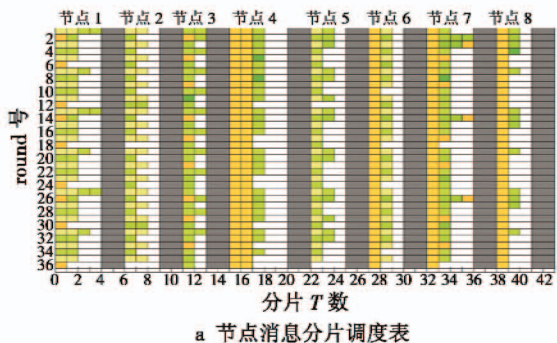
图7 能量有效优化节点消息调度表
Fig.7 Energy-efficient optimal node message scheduling

通过式(10)、式(11)可以求得采用以能量有效为优化目标的消息调度表生成方法前后的能耗分别为332.0能量单位和38.4能量单位。

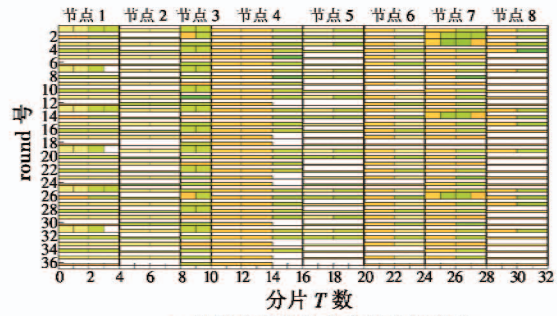
3.2 扩展案例

将典型算例中的节点个数由4节点扩展到8节点,其余不变。实验中得到调度裕量有5条,节点消息分片调度表和能量有效优化节点消息调度表如图8所示。

同样可以求得采用以能量有效为优化目标的消息调度表生成方法前后的能耗分别为367.9能量单位和181.1能量单位。



a 节点消息分片调度表



b 能量有效优化节点消息调度表

图8 8节点案例结果图

Fig.8 The case result of 8 nodes

4 结论

本文结合“绿色航电”的理念提出一种以能量有效为优化目标的消息调度表生成方法,提出了静态分片分配方法,将调度裕量组合优化以耗能最小的分配方案分配给各个节点,从而达到合理降频节能的效果,并通过了仿真案例验证。针对本文的应用对象TTP总线,该方法可以保证消息的可调度性。

微小型智能片上系统的片间甚至片内的互连有望采用类似的时间触发总线的实时通信方式^[7],降频等数字电路节能方法对于集成电路效果更加明显^[8],本文方法有望对未来微小型智能航电系统的综合设计提供參考。

参考文献

- [1] 陈长胜,刘智武,李晓庆,等. 时间触发总线时钟同步技术研究[J]. 电光与控制,2017,24(6):74-78.
- [2] TIANRAN Z, XIONG H. Design of energy-efficient hierarchical scheduling for integrated modular avionics systems [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(1):109-114.
- [3] MISHRA R, RASTOGI N, ZHU D, et al. Energy aware scheduling for distributed real-time systems [C]//International Symposium on Parallel and Distributed Processing, IEEE Computer Society, 2003. doi:10.1109/IPDPS.2003.1213099.
- [4] POP P, POULSEN K, HARBO R, et al. Scheduling and voltage scaling for energy/reliability trade-offs in fault-tolerant time-triggered embedded systems[C]//IEEE/ACM International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis, IEEE, 2007:233-238.
- [5] LI K, TANG X, LI K. Energy-efficient stochastic task scheduling on heterogeneous computing systems[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2014, 25(11):2867-2876.
- [6] POP P, ELES P, PENG Z. Bus access optimization for

(下转第101页)

议,对定位信息进行解算。

4) BD短报文解算:实时监控BD短报文指令,并执行相应指令,同时将收到的短报文指令按通讯协议发送给测控设备,下传至地面测控站显示。

5) 自主安控判断:根据解算出的定位信息实时判断无人机当前位置与安控区之间的相对位置关系,并确定安控状态。

6) 执行安控:若自主安控判断满足执行安控条件或收到地面站“安控坠毁”指令后,输出数字量信号,控制舵机离合器断电。

3 实际使用情况

2016年10月,加装了新研北斗安控器的国产大型无人机在执行某次飞行任务时因故需要及时坠毁,地面北斗便携站发送北斗短报文“安控坠毁”指令,无人机机载安控器实时收到了指令并正确执行了坠毁动作,飞行任务圆满完成。

4 结束语

基于北斗短报文通信的无人机安控系统除了实现原来基于GPS定位信息的无人机自主安控功能外,还新增加了基于北斗短报文通信的远距离被动实时安控功能,其作用距离只受北斗卫星覆盖范围限制,较好地弥补了该型无人机原有安控系统的不足,为其安全控

制提供了可靠保障。大量的地面测试和实际使用证明该方法有效可靠,并已经推广应用到同类型其他无人机安控系统中。

参考文献

- [1] 何丽,刘茹,屈冬红,等.一种基于北斗短报文通信的动态组网技术[J].科学技术与工程,2015,15(13):149-152.
 - [2] 孙方霞.基于北斗短报文通信的落水报警终端设计[J].广东轻工职业技术学院学报,2015,14(4):12-15.
 - [3] 王华东.北斗卫星导航应急通信应用研究[J].卫星与网络,2013(12):66-70.
 - [4] 谷军霞,王春芳,宋之光.北斗短报文通信信道性能测试与统计分析[J].气象科技,2015,43(3):458-462.
 - [5] 和芯星通科技(北京)有限公司.UX450用户手册[EB/OL].[2017-12-16].<http://www.unicorecomm.com>.
 - [6] 南通国芯微电子有限公司.STC15系列单片机器件手册[EB/OL].[2017-12-20].<http://www.stcmcudata.com/datasheet/stc/STC-AD-PDF/STC15.pdf>.
 - [7] 陈树学,刘萱.LabVIEW宝典[M].北京:电子工业出版社,2016.
 - [8] 徐爱钧,彭秀华.Keil Cx51 V7.0单片机高级语言编程与uVision2应用实践[M].北京:电子工业出版社,2006.
-
- (上接第65页)
- 53-57.
 - [4] U. S. Air Force. Next generation tactical aircraft(next gen TACAIR) materiel and technology concepts search[DB/OL].[2017-06-10].[https://www.fbo.gov/utills/Next_Gen_TACAIR_CRFI_\(V1_0\)_10-18-2010.doc](https://www.fbo.gov/utills/Next_Gen_TACAIR_CRFI_(V1_0)_10-18-2010.doc).
 - [5] Department of the Navy. Naval air systems command aircraft division[DB/OL].[2017-06-12].https://www.fbo.gov/utills/FA-XX_RFI.doc.
 - [6] Department of the Navy. Concept metrics[DB/OL].[2017-06-12].https://www.fbo.gov/utills/FA-XX_Concept_Metrics.xls.
 - [7] 张洋,郝欣欣.六代机的需求与技术比较[J].兵器知识,2012(9):27-33.
 - [8] 高劲松,陈峭东.对国外六代机主要特征的看法[J].国际航空,2013(3):44-45.
 - [9] TIRPAK J A. The sixth generation fighter[J]. Air Force, 2009(10):38-42.
 - [10] 张明德.猛禽的诞生[M].北京:中国市场出版社,2011.
-
- (上接第77页)
- distributed embedded systems based on schedulability analysis[C]//Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition, IEEE, 2000:567-575.
 - [7] OLIVER R S, CRACIUNAS S S. Hierarchical scheduling over off- and on-chip deterministic networks[J]. ACM SIGBED Review, 2016, 13(4):14-19.
 - [8] SCHOEBERL M. A time-triggered network-on-chip[C]//International Conference on Field Programmable Logic and Applications, IEEE, 2007:377-382.
 - [9] SAE Aerospace. SAE AS6003 TTP communication protocol[S].[S.l.]:SAE International, 2009.
 - [10] ZHAI B, BLAAUW D, SYLVESTER D, et al. The limit of dynamic voltage scaling and insomniac dynamic voltage scaling[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems, 2005, 13(11):1239-1252.
 - [11] 唐青松.深度优先算法在创建树形结构中的应用研究[J].计算机技术与发展,2014(9):226-229.