

基于带宽利用率的 Flexray 静态段研究*

张建军, 于萍, 张本宏

(合肥工业大学 计算机与信息学院, 合肥 230009)

摘要: 为了提高 Flexray 网络静态段带宽利用率, 对消息时隙的分配问题进行了研究。针对消息长度相差很大而导致带宽浪费的情况, 提出了将静态段的部分较长的消息分割成多个固定长度的消息时隙分配方法。该方法考虑消息分割后增加的无效比特位对带宽利用率的影响和增加的帧 ID 个数对整个网络的影响, 研究了消息长度、帧 ID 数目与带宽利用率的关系。数值实验表明, 该方法可以在使用较少帧 ID 的情况下提高带宽利用率。

关键词: Flexray 总线; 带宽利用率; 时隙分配; 静态段; 帧 ID

中图分类号: TP336 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)12-4574-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.12.045

Research about static segment of Flexray based on utilization

ZHANG Jian-jun, YU Ping, ZHANG Ben-hong

(School of Computer & Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to improve the bandwidth utilization, this paper took a research about the time distribution. It put forward a method that the long static frame would be divided into multiple frames with fixed length, and this method took extra load of division and frameID into consideration. It took a research about the relationship between the message length, frameID and the bandwidth utilization. The experiments strongly show that the method can get a better bandwidth utilization with a fewer frameID.

Key words: Flexray bus; bandwidth utilization; time division; static segment; frameID

汽车正朝着更舒适、更安全、更便捷的方向发展, 汽车上的电子控制单元每年都在不断增加, 越来越多的信息在汽车驾驶中通过总线被传递^[1]。Flexray 就是一种用于汽车的高速、可确定性的、具备故障容错能力的总线技术。

目前已有大量文献对 Flexray 网络的优化配置进行了研究。文献[2~5]主要研究了如何配置大量的 Flexray 网络参数。文献[6]提出了一种基于 Flexray 时间模型的启发式优化配置方法。文献[7]对 Flexray 的周期调度进行分析, 提出了一种基于带宽利用率的总线优化配置算法。文献[8~13]主要是对 Flexray 消息调度策略的研究以及时间性能的分析, 以提高 Flexray 响应时间。文献[14]提出了一种将静态段长数据帧分配到动态段的方法来减少带宽利用率, 但是该方法使消息发送的时间带有不确定性。文献[15]提出了一种将较长的静态段消息分割成一定长度的消息进行发送的方法, 虽然保证了消息的发送时间, 但是没有考虑分割后的消息在封装过程中产生的额外负载和帧 ID 个数的增多对整个网络的影响。本文充分考虑到文献[15]的不足, 并在此基础上基于静态段带宽利用率对消息分割进行进一步的研究。

1 Flexray 网络通信协议

1.1 Flexray 通信周期

Flexray 协议的媒体访问控制是基于一个循环的通信周

期, 如图1所示, 周期计数器为0~63。每一个通信周期由四部分组成, 即静态段(SS)、动态段(DS)、符号窗口(SW)和网络空闲时间(NIT)。

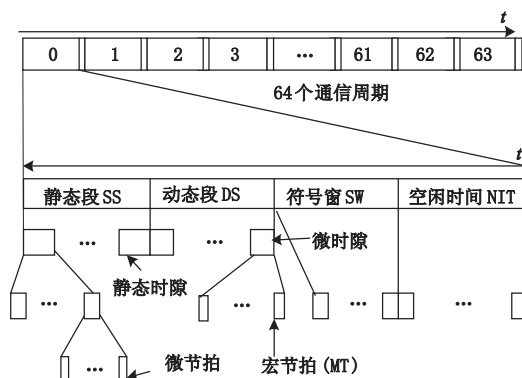


图1 Flexray协议的时间层次

静态段是由一些大小固定的静态时隙(static slot)组成, 采用时间触发的时分多址访问(TDMA)技术来传输周期性消息。动态段由若干个微时隙(minislot)组成, 采用事件触发的柔性时分多址(FTDMA)访问技术来传输非周期性消息。静态时隙和微时隙均是由若干个宏节拍 Macrotick (MT) 组成, MT 的取值为1~6 μs。一个通信周期中静态时隙的取值为4~661 MT。

收稿日期: 2012-04-07; **修回日期:** 2012-05-11 **基金项目:** 国家电子信息产业发展基金资助项目([2011]506); 安徽省自然科学基金资助项目(1208085QF118)

作者简介: 张建军(1963-), 男, 浙江宁波人, 教授, 博士, 主要研究方向为计算机集成制造系统、汽车电子控制系统与嵌入式软件、车载信息与网络传输技术、网络化协同设计(zjj@ialab.hfut.edu.cn); 于萍(1986-), 女, 山东即墨人, 硕士研究生, 主要研究方向为汽车电子; 张本宏(1972-), 男, 安徽无为, 副教授, 博士, 主要研究方向为分布式控制、可靠性工程。

1.2 Flexray 帧格式与编码

数据帧是数据在网络中传输的最基本的数据单元。在 Flexray 通信协议中,数据帧包括帧头、有效数据和帧尾三部分,如图 2 所示,帧头部分包含 5 Byte,帧尾包含 3 Byte 的校验位,有效数据部分的长度是 0 ~ 254 Byte。

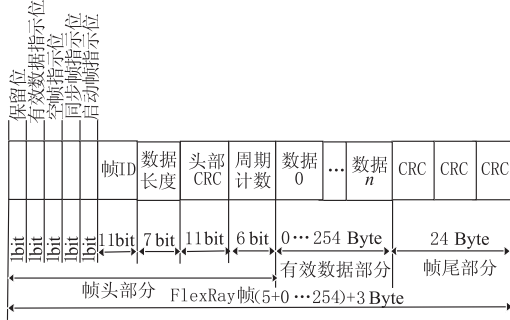


图2 Flexray帧格式

消息在总线上传输时,需要对其进行编码,即给消息添加一些必要的位。如图 3 所示,传输开始序列 TSS (transmission start sequence): 5 ~ 15 bit, 帧开始序列 FSS (frame start sequence): 1 bit, 帧结尾序列 FES (frame end sequence): 2 bit。另外,在每个字节前面都添加 1 Byte 开始序列 BSS (byte start sequence): 2 bit, 所以每个字节实际占 10 bit。当消息帧在静态段传输时,还需要添加 11 bit 的通信空闲间隔 (communication idle delimiter, CID) 时间和行动点偏移量 (action point offset) 时间 T_{APO} , 其中 T_{APO} 在静态时隙开始处, 长度为 1 ~ 63 个宏节拍时间。传输第 i 个消息的 n Byte 的数据时, 实际传输时间 T_i 可以表示为

$$T_i = (29 + 20n) \times t_{bit} + 2T_{APO} \quad (1)$$

其中: 29 包括 15 bit TSS、1 bit FSS、2 bit FES、11 bit CID, t_{bit} 则表示传输 1 bit 数据所需要的时间。第 i 个消息所占用的静态时隙长度 $S(i)$ 可以表示为

$$S(i) = \left\lceil \frac{T_i}{\text{gdMacrotick}} \right\rceil \text{gdMacrotick} \quad (2)$$

其中: gdMacrotick 表示宏节拍 MT。

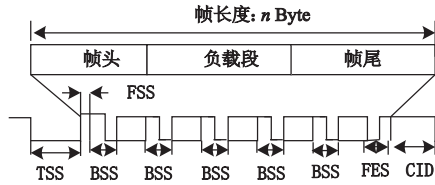


图3 静态段帧编码

2 带宽利用率

带宽利用率表示已分配的带宽有多少用于有效数据信号的传输^[15]。由于 Flexray 静态段消息的长度不尽相同,静态时隙的长度是由最长的静态消息的长度决定的。图 4 为静态段利用率。从图 4 可以看出,静态段的七个消息中,消息 d 的长度是最长的,为了使消息 d 能够正常传输,静态时隙的长度就等于消息 d 的长度,但是对于剩余的六个消息,它们并不能充分利用已分配的时隙,尤其是短消息 c 和 g , 从而导致在通信过程中静态段有很大一部分资源是浪费的。因此, Flexray 的带宽利用率 U 可表示为

$$U = \frac{l_a + l_b + l_c + l_d + l_e + l_f + l_g}{7 \times l_d} \quad (3)$$

其中: $l_a, l_b, l_c, l_d, l_e, l_f, l_g$ 分别表示消息 a, b, c, d, e, f, g 的长度。

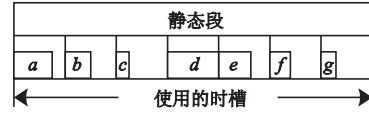


图4 静态段利用率

3 消息分割

3.1 基本思想

为了减少由于消息长度相差很大导致的带宽浪费, 本文通过分析静态时隙的最佳长度, 对要传输的部分消息进行分割。首先作如下假设^[16]:

- 在系统通信周期内没有出现消息发送失败等故障。
- 消息的周期、发送的截止时间、消息的长度都是已知的。
- 通信周期中静态段的长度是已经确定的。
- 只使用一个 Flexray 通道。

Flexray 网络中的每一个节点都有一个静态调度表, 里面存放消息的发送周期、发送时隙等相关信息。每一个消息都有一个帧 ID, 静态段有一个时隙计数器 (slot counter)。在通信周期开始时将时隙计数器初始化为 1, 当帧 ID 等于当前时隙计数器的值时, 节点就向该时隙传输消息。在实际应用中, 由于汽车中 ECU 的数目日益增多, 为了使新增的节点能够正确发送消息并且不影响已经存在的节点消息的发送, 也就是使 Flexray 网络的开发具有可扩展性, 应该在满足基本需要的前提下尽量减少帧 ID 的分配。Flexray 通信协议中规定静态段帧 ID 的范围是 2 ~ 1023。

3.2 分割方法

Flexray 网络中未被有效利用的带宽资源分为帧编码过程增加的比特数和净荷段内的无效比特数。

设静态时隙的长度为 L , f_i 表示第 i 个消息的发送频率, k 表示消息的个数, t_i 表示第 i 个消息所占的时隙长度, 则

$$t_i = \frac{T_i}{\text{gdMacrotick}} \quad (4)$$

如果将消息分割成 m 段, 则分割后的消息在编码过程中增加的比特数为 $(m-1) \times (29 \times t_{bit} + T_{APO})$, 传输这些比特位所需要的时间用 $S(m)$ 表示, 则

$$S(m) = \left\lceil \frac{(m-1)(29 \times t_{bit} + T_{APO})}{\text{gdMacrotick}} \right\rceil \text{gdMacrotick} \quad (5)$$

$X(i)$ 表示第 i 个消息分割之后净荷段内的无效比特数:

$$X(i) = \left\lceil \frac{t_i}{L} \right\rceil L - t_i \quad (6)$$

那么消息分割后的带宽利用率 U 可以表示为

$$U = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k \left(S \left(\left\lceil \frac{t_i}{L} \right\rceil \right) + X(i) \right) f_i}{\sum_{i=1}^k \left\lceil \frac{t_i}{L} \right\rceil f_i L} \quad (7)$$

分割后的消息所占用的帧 ID 个数用 F_{ID} 来表示, 则

$$F_{ID} = \sum_{i=1}^k \left\lceil \frac{t_i}{L} \right\rceil \quad (8)$$

如果单一地追求 U 最大, 必定会导致 F_{ID} 的增多, 对今后 Flexray 网络的扩展造成一定的局限性。如果想使 F_{ID} 最小, 则静态时隙的长度必然等于最长的时隙长度, 从而导致带宽利用率 U 的降低。两者之间存在反比例关系。为了同时满足分割

之后的消息对带宽利用率和帧 ID 的要求,用 W 来简单地衡量时隙长度与两者之间的关系。

$$W = \frac{U}{F_{ID}} \quad (9)$$

3.3 算法描述

为了找到 W 的最优值,本文采用如下算法进行描述求解:

- 1) 假定所有参数都已给出
- 2) 计算未分割之前 U 、 F_{ID} 、 W 且使 $\max = W$
- 3) for ($L=4$; $L<662$; $L++$)
- 4) 计算 L 所对应的 U' 、 F_{ID}' 、 W'
- 5) if ($W' > W$ & $F_{ID}' < 1023$)
- 6) $\max = W'$
- 7) else
- 8) continue
- 9) endfor
- 10) if (不存在 $W' > W$)
- 11) 所给消息不需要分割,亦消息长度分布均匀
- 12) else
- 13) 返回 W 对应的 L 、 U 、 F_{ID}

4 实例验证

为了验证本文提出的方法能够提高带宽利用率,改善网络的性能,本文采用汽车工程师协会 (SAE) 的基准数据进行验证,如表 1~4 所示。在数值计算过程中,参数取值为 $T_{APO} = 1 \text{ MT}$, $t_{bit} = 0.1 \mu\text{s/bit}$, $\text{gdMacrotick} = 1 \mu\text{s}$ 。

表1 Flexray 消息数据

大小字节	周期/ms	截止时间/ms	帧的长度 (MT 数目)			
			1 Mbps	2.5 Mbps	5 Mbps	10 Mbps
2	5	5	79	50	40	35
2	5	5	79	50	40	35
2	5	5	79	50	40	35
2	5	5	79	50	40	35
2	5	5	79	50	40	35
2	50	5	79	50	40	35
2	10	10	79	50	40	35
2	20	20	79	50	40	35
4	50	20	99	58	44	37
8	50	20	139	74	52	41
6	50	20	119	66	48	39
12	50	20	179	90	60	45
4	100	100	99	58	44	37
2	100	100	79	50	40	35
2	100	100	79	50	40	35
4	1 000	1 000	99	58	44	37
2	1 000	1 000	79	50	40	35
2	1 000	1 000	79	50	40	35

表2 分割前后静态时隙长度比较

传输速率/Mbps	消息	
	最大长度	最佳长度
1	179	79
2.5	90	58
5	60	44
10	45	41

表3 分割前后带宽利用率比较

传输速率 /Mbps	带宽利用率	
	分割前	分割后
1	0.461 5	0.957 4
2.5	0.571 6	0.843 5
5	0.678 7	0.879 1
10	0.785 7	0.843 7

表4 分割前后帧 ID 个数比较

传输速率 /Mbps	帧 ID	
	分割前	分割后
1	18	25
2.5	18	21
5	18	21
10	18	19

通过表 1~3 可以清楚地看到,静态时隙的长度并非越小越好。当传输速度比较慢时,带宽利用率提高得较快,最佳长度与最长的消息相差较大,分割得比较多。利用本文提出的方法进行消息分割之后,带宽利用率有明显提高。

5 结束语

本文在分析 Flexray 帧格式和物理传输规则的基础上计算消息传输所用的时间。在现有 Flexray 优化模型的基础上通过改变静态时隙的长度,得出时隙长度、帧 ID 个数与最佳带宽利用率的关系。最后通过实验证明静态段的消息分割方法能够在确保消息的发送时间、使用较少帧 ID 个数的同时有效提高带宽利用率。下一步的工作将对动态段消息传输的时间性能和调度规则进行研究。

参考文献:

- [1] 罗峰, 苏剑. 汽车网络与总线标准[J]. 汽车工程, 2003, 25(4): 372-376.
- [2] FlexRay Consortium. FlexRay communications system protocol specification version 2.1 [EB/OL]. (2005-05-12) [2009-02-12]. <http://www.FlexRay.com>.
- [3] CENA G, ALENZANO A. On the properties of the flexible time division multiple access technique[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2009, 2(2): 86-94.
- [4] 王锴, 王宏, 徐晓冬. 下一代车载网络 Flexray 及其应用研究[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(20): 77-79.
- [5] 赵睿, 秦贵和, 范铁虎. FlexRay 通信协议的总线周期优化[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(10): 3847-3850.
- [6] 罗峰, 陈智琦, 刘鑫, 等. 基于 Flexray 的车载网络系统开发[J]. 电子测量与仪器学报, 2009(51): 289-295.
- [7] SCHMIDT E G, SCHMIDT K. Message scheduling for the static segment of the FlexRay protocol[C]//Proc of the 16th on Signal Processing Communication and Applications Conference. 2008: 1-4.
- [8] SHAW R, JACKMAN B. An introduction to FlexRay as an industrial network[C]//Proc of IEEE International Symposium on Industrial Electronics. 2008: 1849-1854.
- [9] 刘梦阳. 基于 FlexRay/CAN 网关的汽车网络数据转换研究和实现[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- [10] KLAUS S, ECE G S. Message scheduling for the FlexRay protocol: dynamic segment[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2009, 58(5): 2160-2169.
- [11] 刘欣, 杨志家. FlexRay 通信控制器收发功能的研究和实现[J]. 微计算机信息, 2007, 23(6-2): 226-228.
- [12] 李佳, 田光宇, 钮翔, 等. FlexRay 网络通信延迟时间分析[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47(8): 1343-1346.
- [13] 陈涛, 秦贵和. FlexRay 时钟同步分析[J]. 计算机工程, 2010, 36(14): 235-237.
- [14] SCHMIDT K S, SCHMIDT E G. Message scheduling for the FlexRay protocol: the static segment[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2009, 58(5): 2170-2179.
- [15] KANG M, PARK K, KIM B. A static message scheduling algorithm for reducing flexray network utilization[C]//Proc of IEEE International Symposium on Industrial Electronics. 2009: 1287-1291.
- [16] KANG M, PARK K, KIM B. Determining the size of a static segment and analyzing the utilization of in-vehicle Flexray network[C]//Proc of the 3rd International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology. Washington DC: IEEE Computer Society, 2008: 50-53.