

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.02.010

FlexRay 总线动态段传输延迟概率模型

韩强, 牛德青, 李林珊, 岳曾敬
(中国兵器工业第 58 研究所 军品部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 考虑了在不同长度, 不同出现概率的消息共享 FlexRay 总线动态段数据帧的情况下, 对 FlexRay 总线动态段延时进行分析。在马尔科夫链模型的基础上, 对提出的具体问题进行了分析。以传输延迟概率度量 FlexRay 总线动态段消息帧传输延迟。在此模型基础上进行了推广, 将其应用于一个多周期的传输过程中, 通过 MATLAB 仿真, 其结果表明此模型能真实的反应 FlexRay 总线动态段数据帧的传输延迟过程。

关键词: FlexRay; 动态段; 马尔科夫链

中图分类号: TP393.02; TP391.9 **文献标志码:** A

Probabilistic Delay Model of FlexRay Dynamic Segment

Han Qiang, Niu Deqing, Li Linshan, Yue Zengjing
(Dept. of Armament Products, No. 58 Research Institute of China Ordnance Industries, Mianyang 621000, China)

Abstract: Considered the conditions that vary length and vary probability message share one FlexRay dynamic data frame. In this condition analyze the delay of FlexRay dynamic segment data frame. Base on the Markov Chain, Construct our model that uses the delay probability to measure the FlexRay dynamic delay. Spread model from one cycle to multi-cycle, and then use MATLAB simulates the model. The result shows that the model can react the process of FlexRay dynamic segment data.

Keywords: FlexRay; dynamic segment; Markov chain

0 引言

随着汽车的自动化程度越来越高, 车内的传感器、传动装置、电子控制单元和车载总线网络要传输的数据也越来越多。目前, 车载总线网络协议可分为事件触发的协议、时间触发的协议 2 类, 主要包括 CAN (Controller Area Network)、LIN (Local Interconnect Network)、TTP/C (Time-Triggered Protocol Class C)、FlexRay、MOST (Media Oriented Systems Transport) 等。

随着技术的发展, 又出现了将时间触发和事件触发相结合的混合型网络。这些车载总线网络协议包括 TTCAN (Time-Triggered CAN)、FTTCAN (Flexible Time-Triggered CAN) 和 FlexRay。其中, FlexRay 高达 10 Mbit/s 的通讯速度是 CAN 总线通讯速率的 10 倍, 并支持双通道系统。由于 FlexRay 在带宽和传输方式上的诸多优点, 很可能成为下一代车载总线标准。为了成功开发 FlexRay 总线的车载网络, 各种关于 FlexRay 总线性能和时间分析的研究是非常必要的。

在 FlexRay 协议中, FlexRay 总线通讯以周期的形式组织, 每个通信周期由 4 个部分组成: 1) 静态段 (Static Segment) 保证重要数据的实时传输; 2) 动态段 (Dynamic Segment 可选) 用于低优先级和事

件触发数据的传输; 3) 符号窗口 (Symbol Window 可选) 用于传输特殊符号; 4) 网络闲置时间 (Network Idle Time) 用于时间同步。

评价总线协议性能的典型方法是延迟分析。但由于 FlexRay 协议动态段传输的灵活性, 使得对 FlexRay 的延迟分析变得非常困难。目前, 典型的对 FlexRay 的延迟进行分析的方法有: 文献[1]中建议利用 MC (Markov Chain), 但这个模型没有考虑动态段消息变长的情况, 不能完整分析 FlexRay 网络的所有情况, 使得得到的分析结果不够严密。在文献[2]中, 对文献[1]的模型进行了改进, 建立了可变帧长度的 MC。但文献[2]中不能反应变概率的情况, 得到的分析结果也不够严密。故对文献[2]中变长等概率模型改进为变长变概率模型, 以推广应用于多周期的传输延迟分析。

1 FlexRay 通讯周期描述

为描述 FlexRay 协议的通讯周期, 建立一个只需要传输 8 个消息的简单 FlexRay 网络系统。

每个 FlexRay 通信周期包含了一个静态段和动态段。静态段和动态段的长度不要求相等, 但位置在周期中固定, 如图 1。静态段有固定的帧长度, 动态段帧长度可变。静态段和动态段都由时槽 (Slot) 组成。

收稿日期: 2010-08-10; 修回日期: 2010-11-12

作者简介: 韩强 (1986—), 男, 四川人, 研究生, 助理工程师, 从事 FlexRay 总线研究。

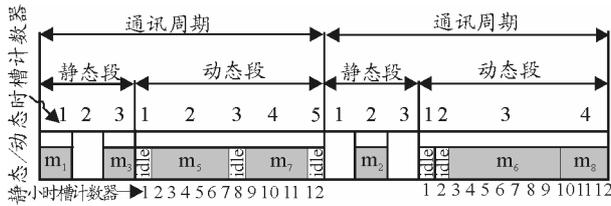


图 1 FlexRay 通信周期

静态段基于 TDMA 技术,该技术将固定时槽分配与各个节点相匹配的 ID,在这个时槽内,只允许该节点传输数据,所有时槽大小相同,静态段数据帧的传输是完全确定的。动态段基于 FTDMA 技术,其分配的时槽是比静态时槽 (Static Slots) 更小的小时槽 (minislot)。动态段的长度以 minislot 度量,其长度为分配的 minislot 的数量,此数量等于 FlexRay 的一个全局参数 gNumberOfMinislots。

动态段时槽不同于静态段时槽,其可根据传输消息的长度进行改变。如果一个消息在动态段等待传输,所需的时槽长度至少为传输消息需要的 minislots 数量。如果没有消息传输,此动态时槽的长度等于一个 minislot 的长度。例如,在图 1 中,在第一个通信周期中,动态时槽 2 的长度为 5 个 minislots,动态时槽 3 只用了 1 个 minislot。

每个 ECU (Electronic Control Unit) 都有静态时槽和动态时槽计数器。当帧 ID 与动态时槽计数器对应,带有待发消息的节点才会进行传输。在每个通信周期开始时,这些时槽计数器会被重新设置。例如,在图 1 和表 1 中,当节点动态时槽计数器变为 2 时分配给该节点的帧 ID 号为 2 的消息 m_5 在动态时槽 1 进行传输。

表 1 动态段的帧 ID 和消息长度

Message	Frame ID	Frame Length (minislots)	DYN Slot
m_4	1	3	1
m_5	2	5	2
m_6	3	7	3
m_7	4	4	4
m_8	4	3	4

当 FlexRay 在动态段提供灵活的消息传输方式时,帧延迟问题发生了。为了让一个消息在通信周期的动态段进行传输,动态段部分在动态段结束以前应该预留有足够整个消息传输的时间,否则此消息的传输将会被延迟。每个节点都会通过 minislot 计数器和 pLatestTx 的值检查是否有足够的一个动态段消息传输的 minislots 资源可用。如果 minislot 计数器的值小于 pLatestTx 的值,此时该节点传输

一个消息,否则,消息将会延迟到下一个通信周期再进行传输判断。pLatestTx 是一个 FlexRay 参数,其值意味着一个节点在此通信周期能成功传输消息帧的 minislot 计数器的最大值。

2 变长变概率 MC 模型

在 FlexRay 总线应用中,分配给一个帧 ID 的消息可能是变长的,而这些不同长度的消息出现的概率也可能不同。如图 2,分配给帧 ID a 的消息 m_a 按照其长度排序,得到一组关于长度的消息序列 ($m_a^{1st} \sim m_a^{th}$),其对应的消息出现概率分别为 ($P_a^{1st} \sim P_a^{th}$) 且 $\sum_{i=1}^L P_a^{th} = P_a \leq 1$ 。在这组序列中,最短的消息 m_a^{1st} 其长度为 l_a^1 ,最长的消息为 m_a^{th} 其长度为 l_a^a 。以 m_a^{th} 表示分配给帧 ID a 的第 i 长的消息其长度以 l_a^i 表示。

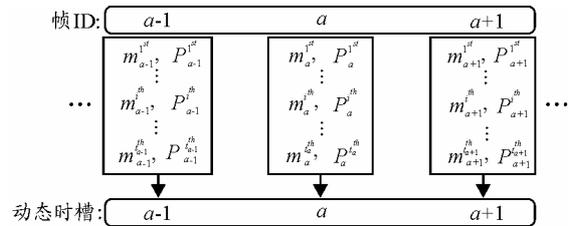


图 2 动态段系统模型

尽管一个帧 ID 能被多个消息共享,但是只有一个消息能在当前的动态段进行传输。因此,假设如果当前帧 ID a 有消息待传输而此消息是第 i 长的消息概率为 $\frac{P_a^{th}}{P_a}$,即消息按照其出现的概率比例作为加权系数共享一个帧 ID。

由于 FlexRay 动态段传输延迟概率模型是基于离散事件的,通过将文献[2]中的变长等概率模型改进为变长变概率模型,使得模型更能反应 FlexRay 的实际延迟情况。MC 模型的状态概率 $\pi(k)$ 可通过下列公式计算。

$$\pi(k) = \pi(0)P^k \quad (1)$$

其中, k 为 MC 模型的时间步骤在 FlexRay 的参数配置中反应为 gNumberOfMinislots。因此, $\pi(k)$ 是从动态段开始到第 k 个 minislot 的状态概率。MC 模型的每个状态被定义为空闲和传输状态。最后,第 k 个 minislot 的状态是空闲状态还是传输状态的概率可通过 $\pi(k)$ 计算出来。

图 3 展示了变长变概率的 FlexRay MC 模型的结构。每个状态由两个因素组成表示为 (a,b) ,其中, a 表示动态时槽的编号,范围是 0 到 minislot 的总

数(即 $gNumberOfMinislots$), 表示动态时槽的状态, $b=1$ 表示空闲状态, $b>1$ 表示传输状态。例如, (2,1) 表示动态时槽 2 的状态是空闲, (3,2) 表示动态时槽 3 处于传输状态。

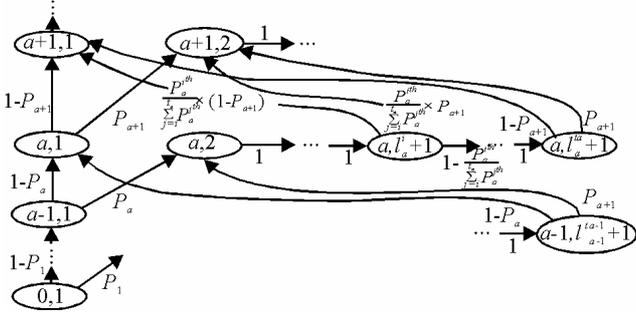


图 3 变长变概率消息的 MC 模型

在 MC 模型中, 一个状态转移到另一个状态的概率称为状态转移概率。在本文的 MC 中, 将帧 ID a 有消息待传输的概率记为 P_a 。因此, 消息在动态时槽 a 传输的概率为 P_a , 动态时槽 a 没有待发送消息(即空闲状态)的概率为 $1-P_a$ 。如果当前状态为 $(a, l_a^i + 1)$, 下一个状态跳转到 $(a+1, 1)$ 和 $(a+1, 2)$ 的概率表示如下:

$$P_1(DYN Slot a+1: I | m_a^{i^h} : T) = \frac{P_a^{i^h}}{P_a - \sum_{j=1}^{l_a} P_a^{j^h}} \times (1 - P_{a+1}) \quad \text{或}$$

$$P_1(DYN Slot a+1: I | m_a^{i^h} : T) = \frac{P_a^{i^h}}{\sum_{j=i}^{l_a} P_a^{j^h}} \times (1 - P_{a+1}) \quad (2)$$

$$P_2(DYN Slot a+1: T | m_a^{i^h} : T) = \frac{P_a^{i^h}}{P_a - \sum_{j=1}^{l_a} P_a^{j^h}} \times P_{a+1} \quad \text{或}$$

$$P_2(DYN Slot a+1: T | m_a^{i^h} : T) = \frac{P_a^{i^h}}{\sum_{j=i}^{l_a} P_a^{j^h}} \times P_{a+1} \quad (3)$$

状态从 $(a, l_a^i + 1)$ 转换到 $(a, l_a^i + 2)$ 的转移概率如下:

$$P_3(State(a, l_a^i + 2) | State(a, l_a^i + 1)) = 1 - \frac{P_a^{i^h}}{P_a - \sum_{j=1}^{l_a} P_a^{j^h}} \quad \text{或}$$

$$P_3(State(a, l_a^i + 2) | State(a, l_a^i + 1)) = 1 - \frac{P_a^{i^h}}{\sum_{j=i}^{l_a} P_a^{j^h}} \quad (4)$$

从状态 $(a, l_a^i + 1)$ 转移到其他状态的转移概率应该满足下列方程:

$$\sum P_i = 1, \text{ 其中 } i=1, 2, 3 \quad (5)$$

方程 (5) 说明上述模型满足 MC 模型的基本要

求。

帧 ID c 的消息在当前周期动态段被延迟的概率记为 $P(c)$, 计算这个概率使用通信周期结束(即 $k = gNumberOfMinislots$) 的状态 $\pi(k)$ 。 $P(c)$ 可通过下列公式进行计算:

$$P(c) = \sum_{b=2}^{l_c^t} \pi(k)_{c,b} + P_c \cdot \sum_{a=1}^{c-1} \left(\sum_{b=1}^{l_c^t+1} \pi(k)_{a,b} \right), \text{ 其中 } l_c^t > 1 \quad (6)$$

方程 (6) 由两部分概率之和组成。一部分是可用的 minislot 不足以传输整帧, 另一部分是前一帧传输时已经用完了所有的 minislot。

3 模型的推广应用

前面已经描述了 FlexRay 一个周期动态段的传输延迟模型, 而在实际应用中, FlexRay 的通讯过程由多个通讯周期组成。因此, 需要将一个周期的 MC 模型推广应用到多个周期。考虑 FlexRay 通讯过程的第 i 个周期的情况并假设共享同一帧 ID 的各消息是互斥的。在这个周期中, 待传输消息由 3 部分组成, 一部分是第 $i-1$ 周期传输延迟的消息, 一部分是在 $i-1$ 周期排列在消息队列中的消息, 另一部分是 i 周期新出现的消息这 3 部分组成。

第 $i-1$ 周期的 ID 号为 c 的帧传输延迟的概率记为 $PD_{i-1}(c)$, 其值可以通过式 (7) 进行计算:

$$PD_{i-1}(c) = P(c) \quad (7)$$

第 $i-1$ 周期消息队列中有消息的概率分为两部分, 一部分是队列中有属于 ID 为 c 的消息概率记为 $PF_{i-1}(c)$, 另一部分是队列中有两条及两条以上属于 ID 号为 c 的消息概率, 记为 $PF2_{i-1}(c)$ 。

新出现的消息概率如图 3, 分配给帧 ID a 的消息到达概率为 P_a , 其中, 各长度的概率为 $(P_a^{1st} \sim P_a^{i^h})$ 。

为计算第 i 周期的传输延迟概率, 计算第 i 周期有消息待传输的概率。第 i 周期帧 ID a 有消息待传输的概率记为 $P_{a,i}$, 其值可以通过式 (8) 进行计算:

$$P_{a,i} = 1 - (1 - PD_{i-1}(a)) \cdot (1 - PF_{i-1}(a)) \cdot (1 - P_a) \quad (8)$$

将 $P_{a,i}$ 按照不同长度消息出现的比例分配给不同长度的消息:

$$P_{a,i}^{i^h} = \frac{P_a^{i^h}}{P_a} \times P_{a,i} \quad (9)$$

将得到的各消息待传输的概率代入 MC (Markov Chain) 中, 通过方程 (6) 计算的消息传

输延迟概率，将 i 周期帧 ID a 的延迟概率记为 $PD_i(a)$ 。通过方程 (10) 计算队列概率 $PF2_i$ 和通过方程 (11) 更新队列概率 PF_i 。

$$PF2_i(a) = PF_{i-1}(a) \cdot PD_i(a) \cdot P_a + PF2_{i-1}(a) \cdot (1 - PD_i(a)) \cdot P_a + PF2_{i-1}(a) \cdot PD_i(a) \cdot (1 - P_a) \quad (10)$$

$$PF_i(a) = PD_i(a) \cdot P_a + PF_{i-1}(a) \cdot ((1 - PD_i(a)) \cdot P_a + PD_i(a) \cdot (1 - p_a)) + PF2_{i-1}(a) \cdot (1 - PD_i(a)) \cdot (1 - P_a) \quad (11)$$

计算第 i 周期动态段传输延迟概率计算流程图如图 4。

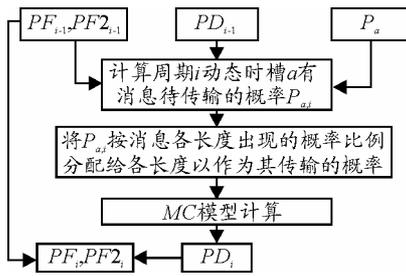


图 4 i 周期动态段传输延迟概率计算流程图

4 模型仿真及验证

模型仿真的数据来源于文献[2]，见表 2，其中有 10 个消息 $m_1 - m_{10}$ ，在 MATLAB 平台上用上述模型对表 2 中的数据进行仿真。

表 2 动态段消息设置实例

Message	Frame ID	Frame Length (minislots)	Probability
m_1	1	4	0.5
m_2	2	7	0.5
m_3	3	5	0.5
m_4	4	3	0.5
m_5	5	3	0.167
m_6	5	5	0.167
m_7	5	6	0.166
m_8	6	5	0.25
m_9	6	8	0.25
m_{10}	7	2	0.5

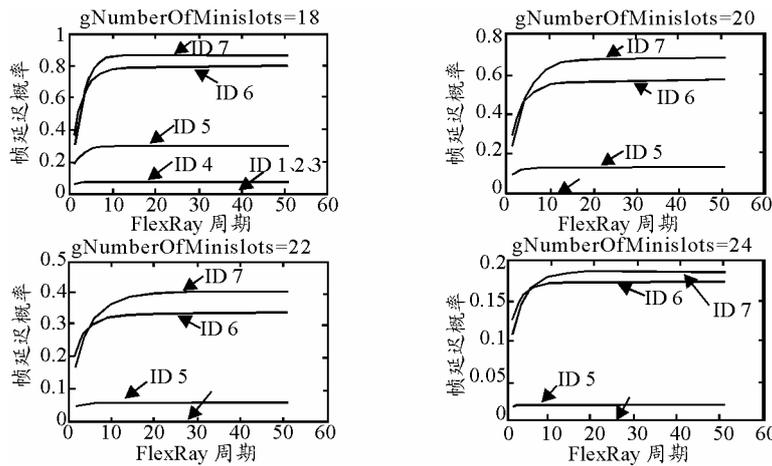


图 5 变长变概率多周期的 FlexRay 传输延迟概率

图 5 是表 2 数据的仿真结果。结果显示了动态段长度设置对传输延迟的影响，能真实反应出 FlexRay 动态段传输延迟的累积效应并最终达到一个稳态这一过程。此改进的 FlexRay 延迟模型能更有效地反应 FlexRay 的通信过程，在 FlexRay 网络设计阶段能更有效地配置动态段长度，并对配置的数据进行有效的延时分析。

5 总结

该模型综合考虑了共享帧 ID 的消息是变长变概率的情况，并推广进行了 FlexRay 总线动态段传输延迟趋势分析。仿真结果表明，该模型更能反应 FlexRay 总线动态段的延迟情况。

参考文献:

- [1] J. Nielsen, A. Handan, and H. Schwefel, "Markov chain-based performance evaluation of FlexRay dynamic segment," 6th International workshop on Real Time Networks, July 2007.
- [2] Bongjun Kim, Kiejin Park, "Probabilistic Delay Model of Dynamic Message Frame in FlexRay Protocol," IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 55, No. 1, FEBRUARY, 2009.
- [3] F. Consortium, FlexRay Communication Systems Protocol Specification Version 2.1 Revision A, FlexRay Consortium, Dec. 2005.
- [4] C. Cassandras and S. Lafortune, Introduction to Discrete Event Systems, Kluwer Academic Boston, 1999.
- [5] 许章凯, 石磊, 董承博, 等. 基于虚拟目标点的闭路制导方法误差分析[J]. 四川兵工学报, 2009(9): 60-62.