

通过上述分析可知:当给定 S_k 的前提下, U_1-U_2 是否小于 0(即,将 S_k 打包到 m_j 之中)主要取决于 m_j 的周期 T_j ,且 U_1-U_2 的大小与 T_j 成反比.因此,在对 S_k 的打包归属进行分析的时候,仅需对 S_k 是否能打包到“PLBS 大小能容纳 S_k 且周期最大的已有消息”进行分析即可,因为此时 U_1-U_2 才最有可能满足小于 0 的条件,从而不需再对 S_k 是否能打包到其他“PLBS 大小能容纳 S_k 但周期更小”的已有消息进行分析. □

推论 1. 在对 S_k 的打包归属进行分析的时候,当单个已有消息的 PLBS 不能容纳 S_k 而需将 S_k 包含的信号拆分到多个已有消息之中的时候,仅需按照周期大小降序的顺序选择“PLBS 大小之和刚好能容纳 S_k 的多个已有消息组合”,并对相应的带宽利用率进行分析即可,而不需要再对其他“PLBS 大小之和能容纳 S_k 的已有消息组合”进行分析.

上述推论 1 的证明过程与定理 1 类似,本文在此不再赘述.

如果将 S_k 打包到空消息之中更优,则按照 Next-Fit-Decreasing 策略将 S_k 中的信号依次打包到空消息之中(第 13 行~第 16 行).由于消息的负载有限,如果当前空消息满载后 S_k 中还剩下有信号,那么继续下一轮 While 循环对更新后的 S_k 的打包归属进行继续分析.如果将 S_k 打包到已有消息之中更优,则按照 Next-Fit-Decreasing 策略将 S_k 中的全部信号依次插入已有消息之中,然后结束当前的 While 循环(第 17 行~第 19 行).

当已有消息的 PLBS 大小不够容纳信号簇 S_k 的时候,按照 Next-Fit-Decreasing 策略将 S_k 中的部分信号插入空消息之中,然后继续下一轮 While 循环,对 S_k 中剩余信号的打包归属进行分析(第 21 行~第 25 行).在每个打包步骤之后,均需更新相关消息的 BLBS 和 PLBS,以备下一步的分析.在信号集打包结束后,利用文献[18]中给出的算法来对消息集 M 中的消息进行调度分析(第 29 行):如果 M 中的所有消息均可调度,直接返回 M 作为 CSP 算法的结果(第 30 行);否则,需对打包结果 M 进行相应的修改.如:对不可调度的消息进行拆分直到所有消息均可调度,然后返回修改后的消息集作为打包算法的结果(第 32 行、第 33 行).

CSP 算法主要包括两个阶段:(1) 信号分簇和排序阶段,该阶段的时间复杂度为 $O(n\log_2 n)$;(2) 信号簇打包阶段,该阶段的时间复杂度主要来源于 for 循环、while 循环以及 while 循环中信号插入已有消息的操作步骤,其时间复杂度为 $O(n^3)$.因此,CSP 算法总体的时间复杂度为 $O(n\log_2 n+n^3)$.

4 实验分析

为了验证 CSP 算法的有效性,本文分别在 CAN 子系统包含的两组信号集的基础之上与文献[7](Sak 算法)、文献[8](Pol 算法)和文献[11](Urul 算法)中提出的算法进行了对比分析,其中一组信号集符合汽车整车厂提供的真实信号集的特点,另一组信号集则按照信号的周期和大小均匀分布的特点随机生成.为保证实验结果的有效性,本文设置每组信号集中各包括 50 个信号集,相关的实验结果均是对上述 50 个信号集的实验结果求平均后得到.本文设置信号集中的信号个数由 40 个逐渐增加到 240 个,其对应的网络带宽利用率由 25% 逐渐增加到接近 100%,以实现不同的网络负载情况下的对比分析.本文在 Matlab 2013 开发环境下进行实验,运行本实验的 PC 配置如下:1.8GHz Intel Core i7,4G DDR3.

第 1 组信号集参照某汽车整车厂提供的真实 CAN 信号集生成^[19],每个信号集中信号的周期和大小的分布符合该真实信号集的特点(具体情况见表 2 和表 3).

Table 2 Signal period's distribution characteristics for the first group of signal sets (ms)

表 2 第 1 组信号集中信号周期的分布规律 (ms)

信号周期 所占比例(%)	5	10	20	50	100	1 000
	16	4	2	58	10	10

Table 3 Signal size's distribution characteristics for the first group of signal sets (bit)

表 3 第 1 组信号集中信号大小的分布规律 (bit)

信号大小 所占比例(%)	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	16	20	24	32
	4	6	7	12	24	6	6	3	4	6	9	6	4	3

图 3 给出了第 1 组信号集对应的实验结果,即,与其他 3 种已有算法相比 CSP 可实现的带宽利用率优化情况.图 3 中的横坐标表示信号集包含的信号个数,纵坐标表示与其他算法相比 CSP 算法可实现的带宽利用率的优化率情况.如:CSP-Sak-Avg 和 CSP-Sak-Max 分别表示与文献[7]相比,CSP 可实现的带宽利用率的优化率的平均值和最大值,带宽利用率的优化率 U_{Opt} 可按照公式(16)进行计算:

$$U_{Opt} = \frac{U_{Sak} - U_{CSP}}{U_{Sak}} \tag{16}$$

其中, U_{Sak} 和 U_{CSP} 分别表示采用 Sak 算法和 CSP 算法对信号集打包后得到的消息集的带宽利用率.

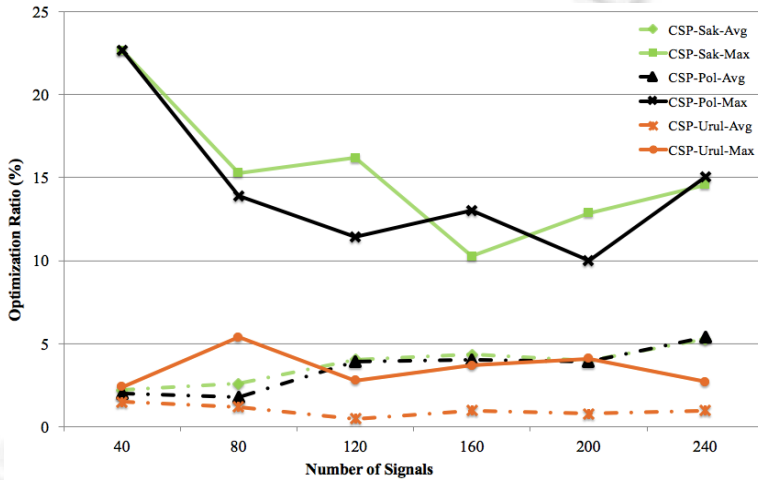


Fig.3 Optimization ratio of CSP based on the first group of signal sets

图 3 基于第 1 组信号集 CSP 算法可获得的优化率情况

为进一步验证 CSP 算法的有效性,本文采用随机生成的第 2 组信号集来进行实验.信号集中信号周期的可能取值为[5,10,20,50,100,200,250,400,500,1000](单位:ms),信号大小的可能取值为[1,2,3,4,5,6,7,8,10,12,16,20,24,32](单位:bit).与第 1 组信号集不同的是,该组信号集中信号的周期和大小取值均符合均匀分布的特点.图 4 给出了与其他 3 种已有算法相比,CSP 可实现的带宽利用率的优化情况.

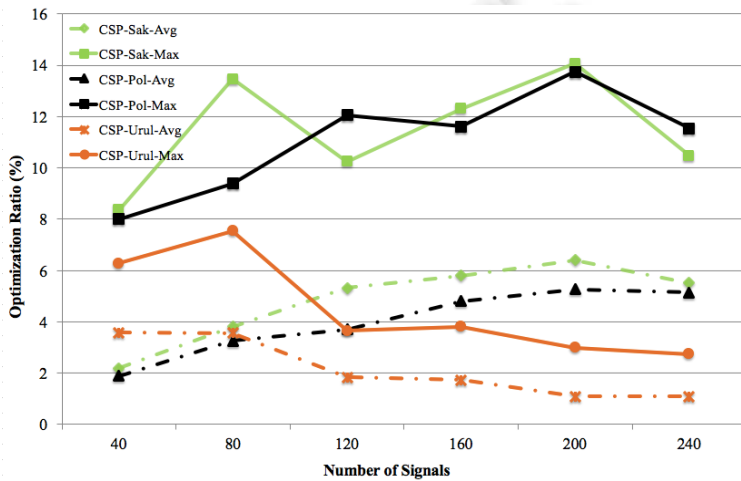


Fig.4 Optimization ratio of CSP based on the second group of signal sets

图 4 基于第 2 组信号集 CSP 算法可获得的优化率情况

图 3 和图 4 中,分别用虚线和实线表示优化率的平均值和最大值,同颜色的一组虚线和实线对应于与同一种算法的对比结果.

通过上述分析可知:CSP 在带宽利用率优化方面最优,Urul 算法次之,Pol 算法排第 3,Sak 算法最差.具体对数据集 1 而言,CSP 可实现的带宽利用率的优化率的平均值范围分别为[2.21%,5.29%](相比较于 Sak 算法),[1.81%,5.41%](相比较于 Pol 算法),[0.5%,1.5%](相比较于 Urul 算法);最大值范围分别为[10.28 %,22.65%](相比较于 Sak 算法),[10.01%,22.65%](相比较于 Sak 算法),[2.4%,5.4%](相比较于 Urul 算法).对数据集 2 而言,CSP 可实现的带宽利用率的优化率的平均值范围分别为[2.19%,6.4%](相比较于 Sak 算法),[1.89%,5.27%](相比较于 Pol 算法),[1.09%,3.58%](相比较于 Urul 算法);最大值范围分别为[8.37%,14.07%](相比较于 Sak 算法),[8%,13.75%](相比较于 Sak 算法),[2.74%,7.54%](相比较于 Urul 算法).在上述两组实验中,CSP 算法、Sak 算法、Pol 算法和 Urul 算法的执行时间分别约为 80s,60s,60s 和 80s.

为了验证 CSP 算法打包后得到的消息集的可调度性,本文采用文献[18]中的算法对上述两组信号集打包后得到的消息集进行了调度分析.图 5 以第 1 组信号集中的某个信号集为例,给出了信号打包调度后的最差反应时间(worst case response time,简称 WCRT)和 Deadline 情况,图中的信号按照周期大小升序的顺序进行编号.该信号集共包含 300 个信号,打包后得到的消息集的带宽利用率约为 94.3%.图 5(a)给出了信号集中全部信号的 WCRT 和 Deadline 情况,为使实验结果清晰可见,图 5(b)给出了信号集中周期大小前 100 的信号的 WCRT 和 Deadline 情况.从图 5 可知:即使当 CAN 网络接近满负荷的时候,CSP 算法仍可保证打包后得到的消息集可调度.

5 总 结

针对车联网环境下车载 CAN 网络因数据量急剧增长而造成的带宽受限问题,本文研究了 CAN 网络系统设计方面的信号打包问题,提出了带宽高效的启发式信号分簇打包算法 CSP.与现有研究成果不同的是:该算法以周期大小相等的信号组成的信号簇而不是单个信号作为打包分析的基本单元,并提出了两个空闲带宽评价指标来引导启发式算法选择得到带宽高效的打包方案,从而实现带宽利用率的优化.通过分别在接近真实情况的信号集和模拟信号集上与其他 3 个研究成果进行的对比分析可知:CSP 算法在带宽利用率优化方面最优,且能保证打包后得到的消息集可调度.由于汽车工业具备批量生产的特点,即使 1% 的 CAN 网络带宽利用率优化也可能带来很大的经济效益.因此,本文提出的 CAN 信号打包算法可为 CAN 网络系统的优化设计提供理论上的借鉴,具有一定的实用价值.车联网环境下车载网络通信的可靠性和信息安全问题是汽车电子系统设计需解决的关键问题,因此,下一步作者将对 CSP 算法在可靠性和信息安全方面进行考虑和扩展.

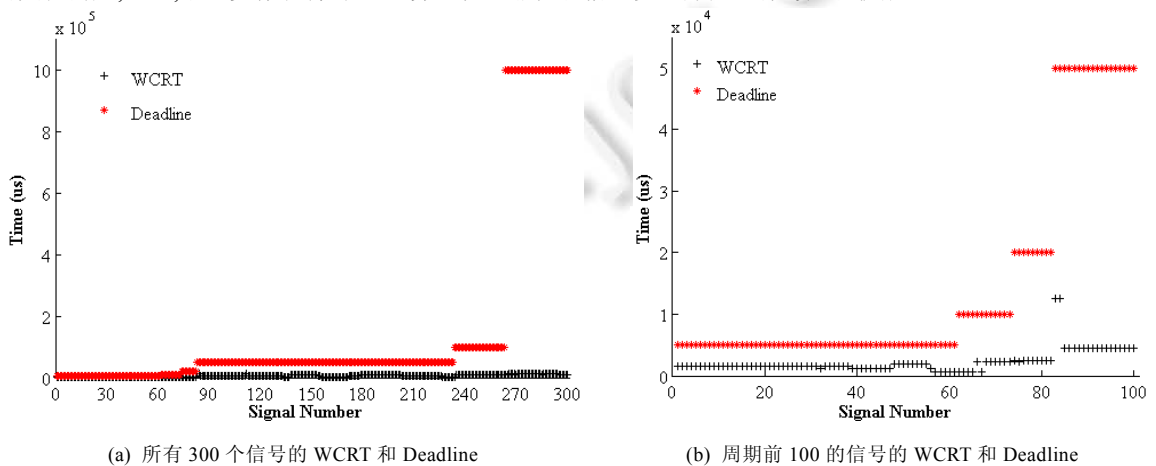


Fig.5 CAN signal's WCRT and Deadline after packing and schedulability analysis

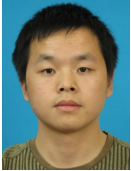
图 5 CAN 信号打包调度后的 WCRT 和 Deadline

References:

- [1] Yang FC, Wang SG, Li JL, Liu ZH, Sun QB. An overview of internet of vehicles. *China Communications*, 2014,11(11):1–15. [doi: 10.1109/CC.2014.6969789]
- [2] Tuohy S, Glavin M, Hughes C, Jones E, Trivedi M, Kilmartin L. Intra-Vehicle networks: A review. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 2015,16(2):534–545. [doi: 10.1109/TITS.2014.2320605]
- [3] McCue TJ. 108 MPG with 2013 ford fusion energi plus 25 gigabytes of data. 2013. <http://www.forbes.com/sites/tjmccue/2013/01/01/108-mpg-with-ford-fusion-energi-plus-25-gigabytes-of-data/>
- [4] Kellerman G, Nemeth J, Kosteletzky K, Barbehon KL, EI-Dwaik F, Hochmuth L. Electrical and electronic system architecture-communication network, power distribution system, central services and wiring harness. In: *Proc. of the ATZextra Magazine*. 2008. 30–37. <http://www.atzonline.com>
- [5] Natale MD, Zeng HB, Giusto P, Ghosal A. *Understanding and Using the Controller Area Network Communication Protocol: Theory and Practice*. New York: Springer-Verlag, 2012. 5–7. [doi: 10.1007/978-1-4614-0314-2]
- [6] Sandstrom K, Norstrom C, Ahlmark M. Frame packing in real-time communication. In: *Proc. of the 7th IEEE Int'l Conf. on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications (RTCSA)*. Cheju Island: IEEE Computer Society, 2000. 399–403. [doi: 10.1109/RTCSA.2000.896418]
- [7] Saket R, Navet N. Frame packing algorithms for automotive applications. *Journal of Embedded Computing*, 2006,2(1):93–102.
- [8] Polzlbauer F, Bate I, Brenner E. Optimized frame packing for embedded systems. *IEEE Embedded Systems Letters*, 2012,4(3): 65–68. [doi: 10.1109/LES.2012.2208094]
- [9] Polzlbauer F, Bate I, Brenner E. On extensible networks for embedded systems. In: *Proc. of the 20th IEEE Int'l Conf. and Workshops on the Engineering of Computer Based Systems (ECBS)*. Scottsdale: IEEE Computer Society, 2013. 69–77. [doi: 10.1109/ECBS.2013.32]
- [10] Xie Y, Liu LJ, Li RF, Hu JQ, Han Y, Peng X. Security-Aware signal packing algorithm for CAN-based automotive cyber-physical systems. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2015,2(4):248–257. [doi: 10.1109/JAS.2015.7296537]
- [11] Urul G. A frame packing method to improve the schedulability on CAN and CAN FD [MS. Thesis]. Ankara: The Middle East Technical University, 2015.
- [12] Bordoloi UD, Samii S. The frame packing problem for CAN-FD. In: *Proc. of the IEEE Real-Time Systems Symp. (RTSS)*. Rome: IEEE Computer Society, 2014. 284–293. [doi: 10.1109/RTSS.2014.8]
- [13] Wang H, Du QH, Yin HJ, Shan RG. Development of CAN system in electric vehicles. *Chinese Journal of Automotive Engineering*, 2011,1(2):147–152 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3969/j.issn.2095-1469.2011.02.010]
- [14] Hao B, Liu YH, Qu LD, Wei D. Research and implementation of grouping-merging strategy for CAN networks. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012,33(9):2137–2143 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3969/j.issn.0254-3087.2012.09.031]
- [15] Ayed H, Mifdaoui A, Fraboul C. Frame packing strategy within gateways for multi-cluster avionics embedded networks. In: *Proc. of the IEEE 17th Conf. on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*. Krakow: IEEE Computer Society, 2012. 1–8. [doi: 10.1109/ETFA.2012.6489577]
- [16] Ayed H, Mifdaoui A, Fraboul C. Hierarchical traffic shaping and frame packing to reduce bandwidth utilization in the AFDX. In: *Proc. of the 9th IEEE Int'l Symp. on Industrial Embedded Systems (SIES)*. Pisa: IEEE Computer Society, 2014. 77–86. [doi: 10.1109/SIES.2014.6871190]
- [17] Schlesinger R, Springer A, Sauter T. Improving profinet IRT frame packing using ethernet control character. In: *Proc. of the IEEE World Conf. on Factory Communication Systems (WFCS)*. Palma de Mallorca: IEEE Computer Society, 2015. 1–4. [doi: 10.1109/WFCS.2015.7160570]
- [18] Davis R, Burns A, Bril R, Lukkien J. Controller area network (CAN) schedulability analysis: Refuted, revisited and revised. *Journal of Real-Time Systems*, 2007,35(3):239–272. [doi: 10.1007/s11241-007-9012-7]
- [19] Xie Y, Zeng G, Chen Y, Kurachi R, Takada H, Li RF. Worst-Case response time analysis for messages in controller area network with gateway. *IEICE Trans. on Information Systems*, 2013,E96-D(7):1467–1477. [doi: 10.1587/transinf.E96.D.1467]

附中文参考文献:

- [13] 王欢,杜全辉,尹华军,单荣明.纯电动轿车 CAN 总线系统开发.汽车工程学报,2011,1(2):147-152. [doi: 10.3969/j.issn.2095-1469.2011.02.010]
- [14] 郝勃,刘衍珩,曲良东,魏达.CAN 网络的分组合并策略研究及实现.仪器仪表学报,2012,33(9):2137-2143. [doi: 10.3969/j.issn.0254-3087.2012.09.031]



谢勇(1985-),男,湖南衡阳人,博士,讲师,主要研究领域为嵌入式系统,汽车电子系统,CPS.



吴克寿(1975-),男,博士,教授,主要研究领域为嵌入式系统安全,软件体系结构.



梁伟(1978-),男,博士,副教授,主要研究领域为嵌入式系统,车联网.



洪朝群(1984-),男,博士,副教授,主要研究领域为高性能嵌入式计算,视频图像处理.



李仁发(1965-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为嵌入式系统,CPS.