

面向车载 CAN 网络的多维非功能属性集成优化算法

谢 勇¹, 陈旭辉¹, 吴武飞², 张 佳³

(1. 厦门理工学院计算机与信息工程学院, 福建 厦门 361024;

2. 湖南大学信息科学与工程学院, 长沙 410082; 3. 集美大学计算机工程学院, 福建 厦门 361021)

摘 要: 为解决车载 CAN 网络设计时没有同时考虑实时性、安全性和可靠性等多维非功能属性的问题, 提出一种集成优化模型, 将可扩展性和带宽利用率作为模型的优化目标。在满足实时性、可靠性和安全性定量要求的前提下, 通过为可扩展性和带宽利用率增加权重的方式实现两者的统一优化, 进而对不同目标进行归一化, 使得在同一个值域内实现权衡优化。在此基础上, 从信号打包问题入手, 给出基于模拟退火的 CAN 系统多维非功能属性集成优化算法。在真实信号集和仿真信号集上的实验结果表明, 与不考虑多维非功能属性的集成优化情况相比, 该算法可获得较高的目标优化率。

关键词: 汽车电子系统; 车载网络; 多维非功能属性; 信号打包问题; 模拟退火

中文引用格式: 谢 勇, 陈旭辉, 吴武飞, 等. 面向车载 CAN 网络的多维非功能属性集成优化算法[J]. 计算机工程, 2016, 42(3): 29-33, 52.

英文引用格式: Xie Yong, Chen Xuhui, Wu Wufei, et al. Integrated Multi-dimensional Non-functional Properties Optimization Algorithm for Vehicle Controller Area Network[J]. Computer Engineering, 2016, 42(3): 29-33, 52.

Integrated Multi-dimensional Non-functional Properties Optimization Algorithm for Vehicle Controller Area Network

XIE Yong¹, CHEN Xuhui¹, WU Wufei², ZHANG Jia³

(1. College of Computer and Information Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen, Fujian 361024, China;

2. College of Computer Science and Electronic Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

3. College of Computer Engineering, Jimei University, Xiamen, Fujian 361021, China)

【Abstract】 In order to solve the problem that multi-dimensional non-functional properties are not taken into consideration during the design of Controller Area Network(CAN), such as real-time, security and reliability, this paper proposes an integration optimization model. The scalability and bandwidth utilization ratio are used as the optimization objectives of the model. Under the premise of meeting the requirement of real-time, reliability and safety, by means of adding weights for scalability and bandwidth utilization, the unified optimization of both is realized. Then different objectives are normalized to get the balanced optimization within the range. On this basis, starting from the signal packing problem, it presents the multi-dimensional non-functional properties integration optimization algorithm in CAN system based on Simulated Annealing(SA). Experimental results on real signal set and simulated signal set show that compared with the situation of integration optimization without considering multi-dimensional non-functional attributes, this algorithm can obtain higher objective optimization rate.

【Key words】 automotive electronic system; vehicle network; multi-dimensional non-functional properties; signal packing problem; Simulated Annealing(SA)

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2016.03.006

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61502405, 61300039, 61173076); 福建省教育厅中青年教师教育科研基金资助项目(JA15368); 厦门市科技计划基金资助项目(3502Z20131158, 3502Z20133033, 3502Z20143031); 厦门理工学院科技基金资助项目(YKJ13024R, XYK201437, YKJ15019R)。

作者简介: 谢 勇(1985-), 男, 讲师、博士, 主研方向为汽车电子系统; 陈旭辉, 教授、博士; 吴武飞, 博士研究生; 张 佳, 讲师、博士研究生。

收稿日期: 2015-09-07 **修回日期:** 2015-10-15 **E-mail:** yongxie@xmut.edu.cn.

1 概述

汽车电子系统是一个由多个电子控制单元 (Electronic Control Unit, ECU) 借助于实时网络互连形成的分布式嵌入式系统。它的安全、可靠运行和高效实现不仅要求功能的执行结果正确, 还要求功能同时满足实时性、可靠性和安全性等多维非功能属性要求^[1-2]。

车载 CAN 网络 (Controller Area Network) 是在汽车上应用最为广泛的一种实时网络技术, 如宝马 7 系的中央控制子系统、安全辅助子系统等均使用它来实现 ECU 之间的通信和协作^[3-4]。近年来, 汽车电子系统的复杂化和智能化给 CAN 网络的设计提出了严峻挑战。一方面, 汽车电子系统的电子化、智能化和集成化发展使得车内网络通信的数据量激增。另一方面, 为满足可靠性、安全性等非功能属性要求而采取的保护措施带来了一定的带宽开销, 如文献[5]在消息中加入消息认证码 (Message Authentication Code, MAC) 保障 CAN 通信的安全性。但是 CAN 的带宽非常有限 (其最大带宽仅为 1 Mb/s), 因此在 CAN 网络系统的设计过程中, 如何对实时性、可靠性和安全性等多维非功能属性进行集成优化是汽车电子系统设计亟待解决的关键问题。针对该问题, 本文就 CAN 网络设计需考虑的多维非功能属性进行定量分析和分类, 提出多维非功能属性的集成优化模型。在系统设计时对多维非功能属性进行权衡和优化, 在信号打包过程融入非功能属性, 给出基于模拟退火 (Simulated Annealing, SA) 算法的集成优化算法, 在保障系统安全、可靠运行的前提下, 实现 CAN 网络系统的优化设计。

2 相关工作

本文提出从 CAN 信号打包开始即对多维非功能属性进行考虑, 以实现 CAN 网络系统的优化设计。首先概述 CAN 信号打包问题在多维非功能属性的分析和优化方面的研究进展。

CAN 的带宽受限使得带宽利用率成为其设计首先关注的非功能属性。文献[6]依据 Deadline 对信号进行排序, 按照 Next Fit Decreasing 策略进行信号打包。文献[7]按照带宽利用率对信号进行排序, 然后交替对信号队列的头和尾进行处理以增加周期相近信号打包到同一个消息的机会。文献[8]根据带宽利用率的定量分析判断是否将当前信号插入已有消息之中, 并基于此提出基于 Next Fit Decreasing 策略的信号打包算法。在实时性方面, 文献[9]提出 CAN 消息的调度分析算法, 文献[10]对该算法进行了改进。文献[11]综述了 CAN 消息调度分析的研究进展情况。在可靠性方面, 文献[12]基于给定的

消息失效模型, 对可靠性和实时性进行集成分析。文献[13]提出 CAN 的失效概率定量分析方法, 基于此计算出消息的重传次数。文献[14]对 CAN 网络可靠性相关的研究进行了描述。在安全性方面, 文献[5]将基于 MAC 的安全性提升策略引入到信号打包过程之中, 并通过将该问题转化成混合整数线性规划问题进行求解, 文献[2]综述了 CAN 安全性提升策略的相关研究进展和面临的挑战。在可扩展性方面, 文献[15]提出启发式信号打包算法, 在可扩展性和带宽利用率之间取得权衡。文献[16]提出了可扩展的 CAN 消息优先级分配算法, 以提升已有消息集在接纳未来新增消息方面的可扩展性。通过上述分析可知, CAN 信号打包问题的现有研究存在以下不足: (1) 局限于 1 种或 2 种非功能属性的考虑, 未就多维非功能属性进行集成优化; (2) 主要从消息层对非功能属性进行考虑, 未从信号打包过程即进行考虑, 将带来较大的带宽、实时性开销等。

3 系统模型和假设前提

假设汽车电子系统中包含的 ECU 集合可表示为: $E = \{E_1, E_2, \dots, E_k, \dots, E_{|E|}\}$, 每个 ECU 中包含一个需发送的信号集。由于信号打包是以单个 ECU 中包含的信号集为基础, 为了简化描述, 本文对信号的标识符进行简化, 假设 ECU 中包含的信号集为: $S = \{s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_{|S|}\}$ 。

3.1 实时性模型

CAN 信号的实时属性可通过如下三元组进行描述 $s_i: \{ST_i, SC_i, SD_i\}$, 分别表示信号的周期 (单位为 μs)、大小 (单位为 bit) 和最终时限 (Deadline, 单位为 μs), 本文假设 $ST_i = SD_i$ ^[7]。信号需先打包成消息才能在网络中进行调度和传输, 假设信号集 S 打包后得到的消息集为: $M = \{m_1, m_2, \dots, m_j, \dots, m_{|M|}\}$ 。消息的实时属性可描述为 $m_j: \{MT_j, MC_j, MD_j\}$, 分别表示周期 (单位为 μs)、大小 (单位为 μs) 和 Deadline (单位为 μs)。本文允许周期不同的信号打包到同一个消息之中^[15], 消息的属性可按照如下公式进行计算:

$$MT_j = \min(ST_i), s_i \in m_j \quad (1)$$

$$MC_j = \left\lceil 55 + 10 \times \left\lfloor \frac{\sum_{s_i \in m_j} SC_i}{8} \right\rfloor \right\rceil \times \tau_{bit} \quad (2)$$

$$MD_j = \min(D_i), s_i \in m_j \quad (3)$$

即消息大小等于所包含的信号大小之和, 消息的周期 (或 Deadline) 等于所包含信号的周期 (或 Deadline) 的最小值。其中, τ_{bit} 表示比特位的传输时间, 当带宽为 500 Kb/s 时 $\tau_{bit} = 2 \mu s$ 。消息的带宽利用率可按照式(4)进行计算:

$$U_j = MC_j / MT_j \quad (4)$$

由于本文主要考虑CAN信号打包问题,打包得到的消息优先级分配和调度分析将参考现有的相关研究^[10,17]来完成。

3.2 安全性模型

在安全性方面,本文拟通过在消息中加入MAC的方式保障消息通信的安全性^[2,5]。根据该机制,攻击者在未获取公匙的前提下只能通过遍历猜测的方式发起攻击,该攻击获得成功的概率为 2^{-H} ,其中, H 表示公匙的长度^[5]。本文假设已知功能需满足安全性要求,其包含的信号需满足的安全性要求与之相等(假设 SS_i),那么消息需满足的安全性要求 SM_j 等于其包含的所有信号需满足的安全性要求的最大值。式(5)可用来计算消息需满足的安全性要求,式(6)可用来计算消息为满足安全性所需采用的公匙长度 H_i :

$$SM_j = \max(SS_i), s_i \in m_j \quad (5)$$

$$H_i = \lg \frac{1}{PS_i} \quad (6)$$

3.3 可靠性模型

本文采取消息重传的方式应对可能发生的瞬时失效事件,消息重传的次数取决于其需满足的可靠性要求。根据功能安全标准ISO 26262中的相关定义,本文假设已知各个关键级功能包含的信号需满足的可靠性要求。由于打包到同一个消息之中的信号可能归属于不同的功能,因此消息需满足的可靠性要求(RM_j)等于其包含信号需满足的可靠性要求(RS_i)的最大值。 RM_j 可按照式(7)进行计算:

$$RM_j = \max(RS_i), s_i \in m_j \quad (7)$$

本文假设消息发生瞬时失效的概率服从泊松分布^[12]。当瞬时失效事件按照恒定速率 λ 到达且事件之间相互独立时,消息在时间段 $[0, t]$ 内发生 r ($r \geq 0$)个瞬时失效事件的概率为:

$$Failure_r(t) = \frac{e^{-\lambda t} \times (\lambda t)^r}{r!} \quad (8)$$

消息传输过程中只要发生一次瞬时失效事件,消息的传输即失败,因此本文假设 $\lambda = 1$ 。消息的到达具有周期性特点,只需在消息周期内对可靠性进行分析即可,即 $t = MT_j$ 。当时间段 $[0, t]$ 内消息未发生瞬时失效,消息的传输成功,此时 $r = 0$ 。因此,可根据式(9)计算 m_j 在其传输周期 MT_j 内传输成功的概率为:

$$Success_{r=0}(m_j, MT_j) = e^{-MT_j} \quad (9)$$

假设 m_j 需重传 f_j 次才能满足可靠性要求,在 $(f_j + 1)$ 次的传输过程之中,只要有一次传输成功,则认为消息的传输是成功的。那么在时间段 $[0, MT_j]$ 内, m_j 传输 $(f_j + 1)$ 次成功的概率为:

$$Success(m_j, MT_j) = 1 - (1 - e^{-MT_j})^{f_j+1} \quad (10)$$

综上所述,当已知 m_j 需满足的可靠性要求 RM_j 时,可由式(11)计算其重传次数 f_j :

$$f_j = \log_{1-e^{-MT_j}}(1 - RM_j) - 1 \quad (11)$$

3.4 可扩展性模型

系统功能扩展在CAN网络中主要表现为消息大小增长($Ext_{est,j}$)和新增消息($Ext_{new,j}$)2个方面。本文通过对消息现有大小在最大负载范围(8 Byte)内的剩余空间进行定量分析的方式对 $Ext_{est,j}$ 进行评估, $Ext_{est,j}$ 可按照下式进行分析:

$$Ext_{est,j} = \frac{8 - \left\lfloor \frac{\sum_{s_i \in m_j} SC_i}{8} \right\rfloor}{8} \quad (12)$$

从实时性方面对CAN网络容纳新增消息的能力进行考量,即 $Ext_{new,j}$ 表示 m_j 在满足Deadline的前提下能容纳的新增消息个数与系统能容纳的消息最大个数的比值。 $Ext_{new,j}$ 可按照下式进行分析:

$$Ext_{new,j} = (MD_j - R_j) \times (1/WCTT_{TYP}) \times (1/2048) \quad (13)$$

其中, $MD_j - R_j$ 表示在保证满足Deadline的前提下, m_j 的最差反应时间 R_j 可允许的增长范围; $WCTT_{TYP}$ 表示所有已有消息的 $WCTT$ 的平均值。因此, $(MD_j - R_j) \times (1/WCTT_{TYP})$ 可近似表示 m_j 能容纳的新增消息个数。标准CAN消息采用11位二进制表示其优先级,所以CAN网络中能容纳的消息最大个数是2048。

3.5 多维非功能属性集成优化模型

从信号打包问题出发,研究CAN网络系统设计在实时性、可靠性等5种非功能属性方面的集成优化问题。该问题是一个典型的多目标优化问题,为了降低复杂性,对多维非功能属性进行分类。通过上述非功能属性模型的分析可知,CAN网络在可靠性、安全性和实时性方面的设计原则是满足设定要求。在实时性方面如安全气囊功能,在碰撞时其启动的时间不能太迟也不能太早,太迟保护不了驾驶员,太早也会对驾驶员造成伤害。因此,如果在上述非功能属性方面进行过度设计的话,将带来不必要的资源和成本开销。在可扩展性和资源开销方面,则应采取越优越好的原则,即应该尽量提高资源利用率和系统的可扩展性。根据上述分析,本文将实时性、可靠性和安全性3种非功能属性作为多维非功能属性集成优化模型中的限制条件进行考虑,将可扩展性和带宽利用率作为该模型的优化目标。因此,将CAN网络系统的多维非功能属性集成优化问题定义为“在满足实时性、可靠性和安全性方面定量要求的前提下,实现CAN信号打包在可扩展性和带宽资源利用率之间的权衡优化问题”。

可扩展性和带宽利用率是2个相互冲突的优化

目标,通过为可扩展性和带宽利用率增加权重的方式实现两者的统一优化,并对不同目标进行归一化实现不同目标在同一个值域内的权衡优化。本文定义 CAN 信号打包问题的优化目标如下^[15]:

$$Obj = (w_1 \times Ext_{est} + w_2 \times Ext_{new} + w_3 \times U) / (w_1 + w_2 + w_3) \quad (14)$$

其中, Ext_{est} 和 Ext_{new} 分别表示系统在容纳消息大小增长和新增消息方面的可扩展性,上述 2 个值的大小通过对所有消息的对应值取平均后得到; U 表示所有消息的带宽利用率之和; w_1 , w_2 和 w_3 分别代表 2 个可扩展性指标和带宽利用率的权重。

4 CAN 网络的多维非功能属性集成优化算法

由于 SA 算法在信号打包问题相关研究中^[15]表现出的良好性能,将它融入信号打包过程之中实现 CAN 网络系统的多维非功能属性的集成优化。本文提出的基于 SA 的 CAN 网络系统多维非功能属性集成优化算法如下:

输入 Signal Set S

输出 Message Set M

```

1. M = Initial_Packing( S );
2. obj = Objective_Analysis( M );
3. step = 0;
4. While step <= Max_Step do
5.   SA_Heuristic_Searching( M );
6.   f = Reliability_Enhancement( M );
7.   H = Security_Enhancement( M );
8.   M = Message_Set_Extension( M );
9.   Priority_Assignment( M );
10.  Schedulability_Analysis( M );
11.  if M is not schedulable do
12.    return the current heuristic searching step;
13.  else
14.    obj' = Objective_Analysis( M );
15.    if obj' > obj do
16.      accept the current heuristic searching step;
17.    elseif exp( obj-obj' ) > PA do
18.      accept the current heuristic searching step;
19.    else
20.      return the current heuristic searching step;
21.    end if
22.  end if
23.  step + +;
24. end while

```

该算法首先进行信号集打包的初始化(第 1 行)。该初始化打包可采取 2 种方法:(1)松弛方案,即每个信号都对应生成一个消息。(2)紧凑的方案,即在不考虑任何非功能属性限制的前提下,采取整数线性规划方法实现信号打包,并以最小化消息个数为目标^[5]。通过实验分析可知,从紧凑方

案出发可获得更好的优化结果。基于初始化的打包结果,计算该结果对应的目标值(第 2 行),然后设定启发式步骤的初始值(第 3 行)。接下来将在 While 循环中采取基于 SA 算法的启发式搜索过程进行目标优化(第 4 行~第 24 行)。该搜索过程包括 3 种启发式步骤,分别是消息间的信号交换、消息拆分和消息间的信号迁移(第 5 行),但是上述步骤需保证消息负载中剩余足够的空间来容纳 MAC。在启发式调整后,需就消息的安全性和可靠性进行分析,并分别计算其对应的 MAC 长度 H 和重传次数 f (第 6 行~第 7 行),然后根据 H 和 f 对消息集进行扩充。如在消息负载中加入 MAC,在消息集中加入消息的重传副本等。紧接着,根据已有方法对消息集进行调度分析以验证是否满足实时性要求^[10](第 9 行~第 10 行)。如果通过启发式步骤调整后的消息集不可调度,则不接受该调整而直接回退到之前的打包结果(第 11 行~第 12 行)。如果通过当前步骤调整后的消息集可调度,则对调整后的消息集对应的目标值进行分析,以确定是否接受当前的搜索结果(第 14 行)。如果目标值得到了优化,则直接接受当前的调整(第 15 行~第 16 行)。如果目标值未得到优化,则以概率 PA 判断是否接受当前的调整(第 17 行~第 20 行)。当前搜索步骤结束之后,计数器加 1,继续下一次搜索直到设定的搜索步骤次数到达(第 23 行~第 24 行)。

5 实验结果与分析

分别在如下 2 组数据集上开展实验以验证算法的有效性。其中一组是由汽车整车厂商提供的真实信号集^[18],它包括 65 个信号,信号大小范围为 1 bit ~ 8 bit,信号周期的范围为 10 ms ~ 1 000 ms。另外一组信号集是由仿真工具 Netcarbench 生成,它包括 100 个信号,信号大小范围为 1 bit ~ 8 bit,信号周期的范围为 10 ms ~ 4 000 ms。实验参照工业界的建议设置了优化目标中的权重^[17],其中, $w_1 = 10$; $w_2 = 8$; $w_3 = 10$ 。实验设置 $PA = 0.95$,启发式步骤的迭代次数上限为 10^6 次。在 Matlab 2013 开发环境下进行实验,运行实验的 PC 的配置如下:1.8 GHz Intel Core i7,4 GB DDR3。

首先在真实信号集上开展实验对 2 种不同的初始化信号打包结果对优化目标的影响进行对比分析,该实验不考虑非功能属性的集成优化,具体的实验结果如表 1 所示。其中,one-to-one_ini 和 MILP_ini 分别表示采取松弛方案和紧凑方案得到的打包结果。从表中可知,松散方案得到的消息集的带宽利用率较大,消息在融合大小增长方面的可扩展性较优。但是由于信号打包结果过于松散,导致消息

的最差反应时间较大,因此在容纳新增消息方面的可扩展性较差。表中的 one-to-one_opt 和 MILP_opt 分别表示从初始打包结果出发利用本文提出的集成优化算法可实现的目标优化结果。通过对比可知,从 MILP_ini 对应的初始打包结果出发可获得更好的优化结果,且获得的优化幅度更大。

表 1 初始化信号打包结果对优化目标值的影响

属性	U	Ext_{est}	Ext_{new}	Obj
one-to-one_ini	0.317 1	0.937 8	0.325 1	15.150 5
MILP_ini	0.162 1	0.915 4	0.584 4	15.450 3
one-to-one_opt	0.187 6	0.858 7	0.740 5	16.387 6
MILP_opt	0.162 4	0.919 5	0.979 8	18.658 0

分别在真实信号集和仿真信号集的基础之上开展 2 组实验。实验假设信号集中 1/3 的信号需通过重传来满足可靠性要求,且重传的次数为 1。为满足安全性要求,所有的消息中均需加入 MAC,且 MAC 的长度分别设定为 1 bit,2 bit,4 bit。基于上述配置得到的实验结果如表 2 和表 3 所示。从表中可知,对于给定的 2 个信号集,当 MAC 长度分别设置为 1 bit,2 bit,4 bit 时,与不考虑多维非功能属性的集成优化相比,通过本文算法可实现的目标优化率分别为:12.10%,11.54%,10.97% 和 6.02%,5.93%,5.50%。基于上述 2 个信号集进行的实验运行时间均小于 2 min。

表 2 真实信号集对应的目标优化结果

MAC 值	属性	U	Ext_{est}	Ext_{new}	Obj
1	MILP_ini	0.261 3	0.906 3	0.515 4	15.798 6
	MILP_opt	0.261 7	0.908 3	0.751 2	17.710 1
2	MILP_ini	0.266 3	0.890 6	0.501 7	15.582 9
	MILP_opt	0.266 7	0.889 1	0.727 9	17.381 1
4	MILP_ini	0.278 8	0.861 6	0.463 4	15.111 0
	MILP_opt	0.279 2	0.859 9	0.672 2	16.768 2

表 3 仿真信号集对应的目标优化结果

MAC 值	属性	U	Ext_{est}	Ext_{new}	Obj
1	MILP_ini	0.287 2	0.880 1	0.872 2	18.650 7
	MILP_opt	0.282 4	0.877 4	0.922 0	19.774 2
2	MILP_ini	0.293 1	0.864 5	0.847 2	18.317 3
	MILP_opt	0.287 9	0.860 8	0.989 7	19.404 2
4	MILP_ini	0.305 6	0.833 3	0.792 5	17.728 7
	MILP_opt	0.303 2	0.832 4	0.918 5	18.704 5

6 结束语

为解决车载 CAN 系统设计在多维非功能属性方面的集成优化问题,本文针对实时性、安全性、可扩展性和可靠性方面的要求进行形式化的定量分

析和分类,从而提出多维非功能属性的集成优化模型。基于该模型,提出基于 SA 的多维非功能属性集成优化算法,在保证满足实时性和可靠性要求的前提下,实现了可扩展性和带宽利用率的权衡。分别在真实信号集和仿真信号集上与不考虑多维非功能属性的集成优化情况进行比较,结果表明,该算法的目标优化率分别可达 10.97% ~ 12.10% 和 5.50% ~ 6.02%。

参考文献

- [1] Zurawski R. Industrial Communication Technology Handbook[M]. 2nd ed. [S.l.]:CRC Press,2013.
- [2] Studnia I, Nicomette V, Alata E, et al. Security of Embedded Automotive Networks; State of the Art and a Research Proposal[Z]. 2013.
- [3] Kellerman G, Nemeth D, Kostelecky D, et al. Electrical and Electronic System Architecture [J]. Atzextra Magazine, 2008, 13(8): 30-37.
- [4] 王志颖, 马卫东, 熊光泽, 等. 面向安全关键系统的 CAN 总线应用研究综述[J]. 计算机系统应用, 2011, 28(4): 1216-1220.
- [5] Lin Chung-wei, Zhu Qi, Phung C, et al. Security-aware Mapping for CAN-based Real-time Distributed Automotive Systems[C]//Proceedings of International Conference on Computer-aided Design. New York, USA: ACM Press, 2013: 115-121.
- [6] Sandstrom K, Norstrom C, Ahlmark M. Frame Packing in Real-time Communication [C]//Proceedings of International Conference on Real-time Computing Systems and Applications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2000: 399-403.
- [7] Saket R, Navet N. Frame Packing Algorithms for Automotive Applications [J]. Journal of Embedded Computing, 2006, 2(1): 93-102.
- [8] Polzlbauer F, Bate I, Brenner E. Optimized Frame Packing for Embedded Systems [J]. IEEE Embedded Systems Letters, 2012, 4(3): 65-68.
- [9] Tindell K W, Hansson H, Wellings A J. Analysing Real-time Communications: Controller Area Network (CAN)[C]//Proceedings of Real-time Systems Symposium. Washington D. C., USA: IEEE Press, 1994: 259-263.
- [10] Davis R, Burns A, Bril R J, et al. Controller Area Network (CAN) Schedulability Analysis: Refuted, Revisited and Revised [J]. Journal of Real-time Systems, 2007, 35(3): 239-272.
- [11] Mary G I, Alex Z C, Jenkins L. Response Time Analysis of Messages in Controller Area Network: A Review [EB/OL]. (2012-12-12). <http://www.hindawi.com/journals/jenc/2013/148015>.
- [12] Hansson A, Nolte T, Norstrom C, et al. Integrating Reliability and Timing Analysis of CAN-based Systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2002, 49(6): 1240-1250.

(下转第 52 页)

参考文献

- [1] 中国电子科技集团公司第三十八研究所. BWDSP 100 软件用户手册[Z]. 2014.
- [2] 吴曼青. 中国研发新型雷达系统打破西方技术垄断[EB/OL]. [2015-02-11]. http://news.xinhuanet.com/18cpenc/2012-11/13/c_113679376.htm.
- [3] 孟占红, 赵保军. 基于 DSP 的实时图像压缩软件优化技术研究[J]. 电子学报, 2006, 34(9): 1558-1561.
- [4] 李世军. JPEG 图像压缩编码算法的 DSP 优化实现[J]. 微计算机信息, 2012, (9): 193-195.
- [5] Kharin A, Vityazev S, Vityazev V, et al. Parallel FFT Implementation on TMS320c66x Multicore DSP[C]//Proceedings of the 6th European Embedded Design in Education and Research Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 46-49.
- [6] Qian Zhihong, Cao Lei, Su Weilian, et al. Recent Advances in Computer Science and Information Engineering[M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2012.
- [7] Sasanka R, Cook J J, Das A, et al. Analyzing Potential Benefits of Vectorization: USA, US20140258677_A1[P]. 2014-09-11.
- [8] Turkington D A. Generalized Vectorization, Cross-products, and Matrix Calculus[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [9] Yang Yangzhao, Gu Naijie, Zhao Zeng, et al. IPRAR: A DFG-based Approach to Instruction Clustering for Multi-cluster VLIW DSP Processor with SIMD Structure[J]. Journal of Computational Information Systems, 2014, 10(3): 1257-1269.
- [10] Cooley J W, Tukey J W. An Algorithm for the Machine Calculation of Complexes Fourier Series[J]. Mathematics of Computation, 1965, 19(19): 297-301.
- [11] Lin T, Chen S, Kuo Yuting, et al. Design and Implementation of a High-performance and Complexity-effective VLIW DSP for Multimedia Applications[J]. Journal of Signal Processing Systems, 2007, 51(3): 209-223.
- [12] Rao K R, Yip P. Discrete Cosine Transform: Algorithms, Advantages, Applications[M]. [S. l.]: Academic Press, 2014.
- [13] 葛 珊, 徐书文. TMS320C64x 系列 DSP 的软件优化技术[J]. 电视技术, 2014, 38(13): 70-71.
- [14] Bryant R, O' Hallaron D R. Computer Systems: A Programmer's Perspective[M]. [S. l.]: Addison-Wesley, 2010.
- [15] 顾乃杰, 李 凯, 陈国良, 等. 基于龙芯 2F 体系结构的 BLAS 库优化[J]. 中国科学技术大学学报, 2008, 38(7): 854-859.
- [16] Yang Yangzhao, Gu Naijie, Ren Kaixin, et al. An Approach to Enhance Loop Performance for Multicore VLIW DSP Processor[C]//Proceedings of the 27th International Conference on Architecture of Computing Systems. Luebeck, Germany: VDE VERLAG GMBH, 2014: 1-8.
- [13] Gujarati A, Brandenburg B B. When is CAN the Weakest Link? A Bound on Failures-in-Time in CAN-based Real-time Systems[C]//Proceedings of the 36th IEEE Real-time Systems Symposium. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 1-12.
- [14] Mary G I, Alex Z C, Jenkins L. Reliability Analysis of Controller Area Network Based Systems—A Review[J]. International Journal of Communication Network and System Sciences, 2013, 6(4): 155-166.
- [15] Polzlbauer F, Bate I, Brenner E. On Extensible Networks for Embedded Systems[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Engineering of Computer Based Systems. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2013: 69-77.
- [16] Schmidt K W. Robust Priority Assignment for Extending Existing Controller Area Network Applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 10(1): 578-585.
- [17] 郝 勃, 刘衍珩, 曲良东, 等. CAN 网络的分组合并策略研究及实现[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(9): 2137-2143.
- [18] Xie Yong. Worst-case Response Time Analysis for Messages in Controller Area Network with Gateway[J]. IEICE Transactions on Information Systems, 2013, 96(7): 1467-1477.

编辑 金胡考

编辑 顾逸斐

(上接第 33 页)