



申请代码	F020507
受理部门	
收件日期	
受理编号	

国家自然科学基金 申 请 书

(2015 版)

资助类别： 面上项目

亚类说明：

附注说明： 常规面上项目

项目名称： 前向纠错编码的寄存器传输级形式化验证和自动对偶综合

申 请 人： 沈胜宇 电 话： 0731-84573678

依托单位： 中国人民解放军国防科学技术大学

通讯地址： 湖南长沙 国防科技大学 计算机学院 计算机研究所 641教研室

邮政编码： 410073 单位电话： 0731-84572314

电子邮箱： syshen@nudt.edu.cn

申报日期： 2015年01月17日

国家自然科学基金委员会



基本信息

申请人信息	姓名	沈胜宇	性别	男	出生年月	1975年11月	民族	汉族
	学位	博士	职称	副研究员	每年工作时间(月)	12		
	电话	0731-84573678		电子邮箱	syshe@nudt.edu.cn			
	传真	0731-82586236		国别或地区	中国			
	个人通讯地址	湖南长沙 国防科技大学 计算机学院 计算机研究所 641教研室						
	工作单位	中国人民解放军国防科学技术大学/计算机学院						
	主要研究领域	计算机辅助设计; 电子设计自动化; 形式化方法						
依托单位信息	名称	中国人民解放军国防科学技术大学						
	联系人	贾学卿	电子邮箱	kejichu@nudt.edu.cn				
	电话	0731-84572314	网站地址	www.nudt.edu.cn				
合作研究单位信息	单位名称							
项目基本信息	项目名称	前向纠错编码的寄存器传输级形式化验证和自动对偶综合						
	英文名称	Formal Verification and Complementary Synthesis for Forward Error Correction Code at Register Transfer Level						
	资助类别	面上项目				亚类说明		
	附注说明	常规面上项目						
	申请代码	F020507				F040204		
	基地类别							
	研究期限	2016年01月 -- 2019年12月				研究方向: 电子设计自动化		
	申请经费	87.0800万元						
中文关键词		形式验证; 对偶综合; 前向纠错编码; 寄存器传输级						
英文关键词		Formal Verification; Complementary Synthesis ; Forward Error Correction Code; Register Transfer Level						



中文摘要	<p>为了提升通讯和多媒体芯片的设计效率和质量，本项目负责人沈胜宇于2009年提出了对偶综合的概念和算法，以从任意编码器自动产生其对应的解码器。然而近年来，被广泛应用于100G以太网等新型传输协议的前向纠错编码(FEC)技术，对包括对偶综合在内的形式化方法提出了严峻挑战。</p> <p>为此，基于我们在对偶综合和形式化方法方面的研究基础，我们提出通过增量式的构造Gröbner basis以提升有限域算术和布尔逻辑混合推理的效率；基于cyclic 编码的对称性削减算法以降低搜索算法的复杂性；通过模板抽象，将FEC的解码器构造问题转变为参数空间的搜索问题，以降低算法复杂性并改善解码器的规则度和复杂度。</p> <p>本项目的研究成果将极大的提升FEC的形式化验证和对偶综合效率，并对有限域领域的其他形式化方法产生强有力的推动作用。</p>
英文摘要	<p>To improve the design efficiency and quality of communication and multimedia chips, we propose complementary synthesis in 2009 to automatically generate the decoder of a particular encoder. In recent years, Forward Error Correction(FEC) mechanism is widely employed in new transmission standards, such as 100G Ethernet, to resolve high frequency attenuation that leads to degraded error rate. And the finite field operators in FEC pose significant challenges to all formal methods including complementary synthesis.</p> <p>So based on our works on complementary synthesis and formal methods, we propose incremental algorithm to construct Gröbner basis to boost the combined reasoning algorithm of finite field and Boolean logic; We also reduce the complexity of searching algorithm by symmetry reduction based on cyclic code; We further reduce the algorithm complexity and improve the generated decoder's regularity by constructing template, and then transforming the decoder construction problem to searching on parameter space.</p> <p>The result of this project will significantly boost the formal verification and complementary synthesis of FEC, and will also significantly help other related finite field formal methods.</p>



项目组主要参与者（注：项目组主要参与者不包括项目申请人）

编号	姓名	出生年月	性别	职 称	学 位	单位名称	电话	电子邮箱	证件号码	每年工作 时间（月）
1	秦莹	1974-11-19	女	副研究员	硕士	中国人民解放军国防 科学技术大学	13786125601	yingqin@nudt.edu .cn	340603197411190622	12
2	张鹤颖	1976-10-12	女	副研究员	博士	中国人民解放军国防 科学技术大学	13755120141	heyinzhang@nudt .edu.cn	610125197610120842	10
3	张建民	1979-11-20	男	助理研究员	博士	中国人民解放军国防 科学技术大学	13786126649	jmzhang@nudt.edu .cn	142401197911201413	10

总人数	高级	中级	初级	博士后	博士生	硕士生
4	3	1	0	0	0	0



国家自然科学基金项目资金预算表（定额补助）

项目名称：前向纠错编码的寄存器传输级形式化验证和自动对偶综合

项目负责人：沈胜宇

金额单位：万元

序号	科目名称	金额	备注
	(1)	(2)	(3)
1	一、项目资金支出	87.0800	/
2	（一）直接费用	73.4000	
3	1、设备费	5.0000	
4	（1）设备购置费	5.0000	PC, 服务器等
5	（2）设备试制费	0.0000	
6	（3）设备改造与租赁费	0.0000	
7	2、材料费	0.0000	
8	3、测试化验加工费	0.0000	
9	4、燃料动力费	4.0000	电力，空调，暖气
10	5、差旅费	19.2000	国内调研
11	6、会议费	4.8000	会议注册和组织
12	7、国际合作与交流费	8.0000	国际会议
13	8、出版/文献/信息传播/知识产权事务费	20.0000	专利和论文
14	9、劳务费	10.8000	研究生
15	10、专家咨询费	1.6000	研究生开题，中期检查，论文预审和答辩
16	11、其他支出	0.0000	
17	（二）间接费用	13.6800	
18	其中：绩效支出	3.4200	
19	二、自筹资金	0.0000	



预算说明书

(1) 设备费

按照我们的预期研究成果,我们将培养4名研究生。每名学生需要1台PC机用于日常的文档阅读、写作和编程,开支6000元。为了运行较大规模的程序,将购买一台高端服务器,预计开支2万元。外加6000元用于损耗性设备,共开支 $0.6 \times 4 + 2 + 0.6 = 5$ 万元。

(2) 材料费

本项目偏向于理论和算法研究,不存在此类开支。

(3) 测试化验加工费

本项目偏向于理论和算法研究,不存在此类开支。

(4) 燃料动力费

按照往年经验,安排每年1万元用于电力(包括PC和服务器)、空调等能源开支。一共4万元。

(5) 差旅费

出差主要用于访问国内同行。一共4年,每年出差8次,共32次。每次出差2人,每人来回机票/火车票各1000元,住宿2天,每天住宿费300元,交通费200元,则每次出差开支 $(1000 \times 2 + (300 + 200) \times 2)$ 元/人 $\times 2$ 人=6000元。总共开支差旅费19.2万元。

(6) 会议费

一共4年,每年参加国内会议2次,一共8次。每次会议的差旅开支已经包含在上述差旅费用中,论文版面费已经包含在下述的出版费用中,额外的会议注册和组织费用预算每人3000元,每次会议两人。总共开支为 $3000 \times 2 \times 8 = 4.8$ 万元。

(7) 国际合作与交流费

预计我们每年至少在FMCAD、DAC、ICCAD、DATE和ASPDAC等顶级EDA国际会议发表一篇论文并参会。上述会议召开的地址通常为美国旧金山、圣何塞、奥斯汀、盐湖城、西雅图,以及欧洲法兰克福、慕尼黑、格朗诺贝尔。

每年一次出国开会,每次1人。按照往返机票每人1万元,会议注册费5000元,住宿和其他开支5000元计算。总共开支为 $(1 + 0.5 + 0.5) \times 1 \times 4 = 8$ 万元。

(8) 出版/文献/信息传播/知识产权事务费

按照我们的预期研究成果,我们将申请2项国际专利,每项开支6万元。8项国内专利,每项开支5000元。在顶级国际会议和期刊上发表8篇论文,每篇版面费5000元。总共开支为 $6 \times 2 + 0.5 \times 8 + 0.5 \times 8 = 20$ 万元。

(9) 劳务费

按照我们的预期研究成果,我们将每年培养一名研究生。在整个项目执行的4年时间中,每年在读研究生的数量是1,2,3,3。其中在前三年每年增加一名学生,而在最后一年,第一名入学的学生已经毕业,因此只有3人在读。按照每人每月1000元计算,共开支 $1000 \times 12 \times (1 + 2 + 3 + 3) = 10.8$ 万元。

(10) 专家咨询费

预期将为每一名在读研究生的论文开题,中期检查、论文预审和答辩分别聘请2位专家。每名专家的咨询费为500元。总共开销为 $500 \times 2 \times 4 \times 4 = 1.6$ 万元。



报告正文

前向纠错编码的寄存器传输级形式 化验证和自动对偶综合

1. 立项依据与研究内容:

1.1. 项目的立项依据

1.1.1. 研究意义:

通讯和多媒体应用是半导体工业的主要推动力。这两个领域日新月异的发展,带来了传输带宽永无止境的追求。这也导致每一代新的传输标准都会采用全新的编码方案,以克服在高频信号衰减方面的挑战。因此,在通讯和多媒体芯片设计项目中,最为关键且困难的工作之一是设计和验证特定的物理层编码器和解码器。

为此,在本项目负责人沈胜宇的上一个自然科学基金项目“面向通讯应用的自动对偶综合方法研究”中,我们首创了对偶综合的概念并提出了相关算法,以在寄存器传输级(RTL),从任意编码器的源代码自动产生其对应的解码器代码[1][2][3][4][5][6]。这些工作有效的解决了 10G以太网[40]和PCI Express[41]等常见传输标准的解码器自动产生问题。

然而近两年来,随着 100G以太网[35]、128G光纤通道[36]和InfiniBand EDR[37]的出现,单通道传输带宽达到 25~32Gbps,从而导致高频衰减在标准的背板传输距离上超过了 30dB,并使其无法达到以太网标准要求的 10^{-12} 误码率[43]。而工业界最新的实验性 56Gbps 串行传输技术仅能在 11 英寸以内的距离上保证 10^{-12} 误码率[39]。

为了克服上述误码率问题,基于有限域(Galois field)[21]的前向纠错编码(FEC)[53]被广泛采用于 100G以太网[35]、128G光纤通道[36]和InfiniBand EDR[37]等全新的传输标准中。该纠错机制的特点及其对目前的对偶综合算法的挑战如下:



1. 前向纠错编码设计者和集成电路工程师之间在知识背景和抽象层次上的差异，导致无法很好的协作完成纠错码的集成电路实现。一方面，前向纠错编码设计者专注于有限域等抽象数学领域，使用诸如singular[28]等数学工具，在抽象数学的层面上对FEC进行推理。然而，将上述抽象的数学对象映射到集成电路的寄存器传输级描述的工作，需要由集成电路工程师完成。而后者关注的是流水线分级、布尔逻辑功能和物理时序等工程细节。这种知识背景和抽象层次上的差异，有可能在前向纠错编码(FEC)的集成电路实现上产生潜在的缺陷。因此就带来了在寄存器传输级上，对前向纠错编码(FEC)进行形式化验证和对偶综合的强烈需求。
2. 前向纠错编码(FEC)中的有限域算术操作无法使用布尔逻辑推理引擎进行高效推理。包括对偶综合在内的绝大多数形式化方法依赖于高效的布尔逻辑推理引擎，包括命题逻辑可满足求解器(SAT)[15]和二叉判决图(BDD)[14]。而在将有限域算术操作映射到布尔逻辑的过程中，会产生大量的异或操作。这极大的削弱了SAT和BDD的效率。近年来致力于验证纠错编码的多篇论文均指出了这一点[3] [7] [8] [10]。
3. 前向纠错编码(FEC)中的长帧将导致对偶综合的巨大运算开销。现有的对偶综合算法[1][2][3][4][5][6]通过逐步的扩大迁移关系的展开长度，以找到一个特定大小的移动窗口，使得该窗口内的输出序列能够唯一决定当前的输入字符。在我们使用的多个工业界标准编码器中，该窗口大小均不超过5。然而在FEC中，为了尽量减小校验码所占用的带宽，通常会选择很长的FEC帧尺寸。比如在IEEE 802.3bj定义的100G以太网中[42]，每个FEC帧包含5280个比特。在典型的250~260位数据路径宽度上，这将导致移动窗口的尺寸至少为20。这超出了目前为止所有对偶综合算法的处理能力。
4. 前向纠错编码(FEC)的非对称结构和阻塞式的解码算法，导致现有的对偶综合算法无法产生规则而高效的解码器结构。正如我们将在下文中指出的，FEC解码算法的复杂性远比编码高得多，而且并不存在线性流水线式的实现，必须在一个完整的FEC帧上经过多次迭代处理方能完成。这和我们现有对偶综合框架中，对解码器结构的线性流水线假设有很大区别。

应对并解决这些困难和挑战，将极大的推进FEC的形式化验证和对偶综合方面的研究，并进而提升面向通讯和多媒体的集成电路芯片设计质量，并缩短设计周期。同时，本项目所提出的算法，也将极大的推动与有限域相关的其他领域，如密码学的形式化方法研究。



有一个问题需要在这里特别指出并进行回答: 上述基于有限域算术的前向纠错机制(FEC)已经在学术界和工业界得到了数十年的广泛应用, 为何今天才具备了对他们进行形式化验证和对偶综合的必要性?

1. 首先, 以Reed-Solomon编码[22]为代表的前向纠错编码技术, 从上世纪 60 年代早期提出, 一直到 80 年代, 仅被应用于航天和军事领域, 如 1977 年发射的旅行者探测器[48]。此类应用并不需要设计大规模生产的集成电路芯片, 而是使用通用计算机或者由分立元件搭建的专用电路。受限于这些物理条件, 当时能够设计出来的FEC编码器和解码器并不具备很大的规模和很复杂的结构。因此并没有很强烈的进行形式化验证的需求。
2. 其次, 上世纪 80 年代开始到本世纪初, 消费类多媒体电子设备和存储应用的发展, 如CD[49]和DVD[50]等, 第一次催生了大规模生产的前向纠错编码 (FEC)芯片。不过此类应用的特点决定了其FEC的复杂性仍然不高。如CD采用的FEC结构[51]为两层嵌套的Reed-Solomon编码, 有限域尺寸分别为(32,28)和(255,251)。这对应 32 个byte长度的帧尺寸和 2 个byte的纠错能力。全部的组合只有 $32 \times 31 \times 2^{16}$ 种情形, 完全可以使用动态模拟完成验证。
3. 最后, 本世纪初以来, 随着Gbps级别高速数据通讯尤其是以太网的高速发展和广泛使用, 真正复杂且需要大规模生产的前向纠错编码 (FEC)芯片开始出现。此时简单的采用动态模拟已经不足以完成验证任务[7][8]。这就对形式化验证技术产生了需求。而另一方面, 相关的形式化验证技术也只有到了 2001 年以后, 随着高性能的SAT求解器的出现[26]才日渐成熟。

综上所述, 无论是从需求方面还是相关的使能技术方面来看, 目前是研究前向纠错编码(FEC)的形式化验证和对偶综合的最佳时机。

1.1.2. 国内外研究现状及发展动态分析

本节将介绍我们在对偶综合领域的研究工作, 以及国际学术界在纠错编码的形式化验证方面的相关研究工作。

对偶综合

如上所述, 在通讯和多媒体芯片设计项目中, 最为关键且困难的

工作之一是设计和验证特定的物理层编码器和解码器。

针对该需求,我们在发表于ICCAD'09的论文[6]中首次提出了对偶综合算法,以在寄存器传输级上,从任意编码器的源代码自动产生其解码器。该工作成为我们后来所有其他研究成果的基础,并使得国立台湾大学的江介宏教授及其研究小组也在该领域做出了出色的研究工作[9][10][11]。两个研究小组之间产生了良性的互动和相互促进。

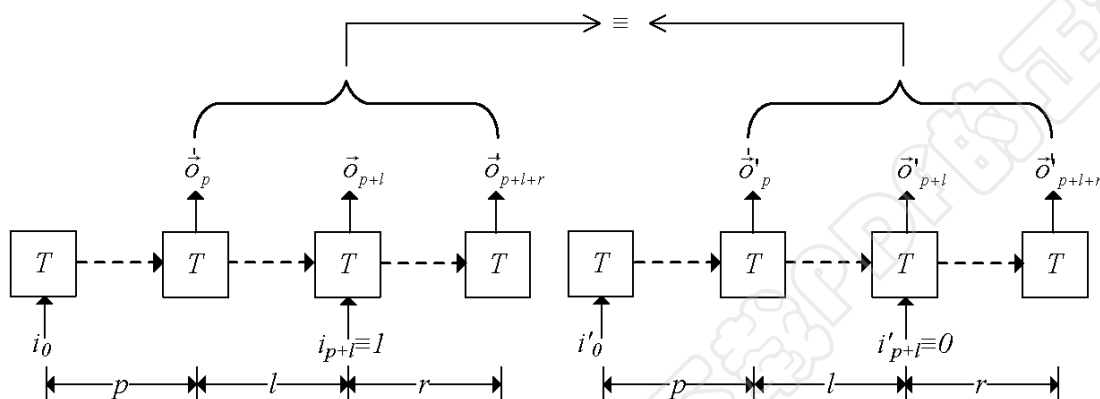


图1 判定输入 i 能够被输出序列唯一决定

算法[6]的基本原理为:

1. 首先,该算法将编码器表示为一个有限状态机 $M = \langle S, I, O, T \rangle$ 。其中 S, I 和 O 分别是其状态变量,输入变量和输出变量集合。而 $T: 2^I \times 2^S \rightarrow 2^O \times 2^S$ 则是状态迁移关系,将输入字符 $i \in 2^I$ 和当前状态 $s \in 2^S$ 映射到输出字符 $o \in 2^O$ 和下一状态 $s' \in 2^S$ 。
2. 其次,如图1所示,该算法迭代的展开状态迁移关系 T ,以找到一个特定的移动窗口 $\langle p, \dots, p+l+r \rangle$,使得当前的输入字符 i_{p+l} 能够被输出序列 $\langle o_p, \dots, o_{p+l+r} \rangle$ 唯一决定。判定该条件的方法是将该展开的迁移关系序列、 $\langle o_p, \dots, o_{p+l+r} \rangle \equiv \langle o'_p, \dots, o'_{p+l+r} \rangle$ 和 $i_{p+l} \neq i'_{p+l}$ 三个条件的合取转换为CNF公式,并使用SAT求解器求解。当结果为不可满足时,代表 i_{p+l} 能够被 $\langle o_p, \dots, o_{p+l+r} \rangle$ 唯一决定。
3. 最后,对于 i_{p+l} 中的每一位,使用SAT求解器的解遍历算法,找到使其为1的输出序列 $\langle o_p, \dots, o_{p+l+r} \rangle$ 的赋值。该集合的析取即为该位的解码器函数。

在我们2010年发表于IEEE Transactions on CAD of Integrated Circuits and Systems的论文[3]中,针对通讯电路中大量异或操作导致论文[6]中解遍历算法效率较低的问题,提出了异或操作的推导和压缩算法,极大地提升了算法效率。

同时,国立台湾大学的Hsiou-Yuan Liu在发表于ICCAD'11的论文[11]中,通过使用Craig插值[12]求解解遍历问题,进一步提升了算法效率。



在我们 2011 年发表于IEEE Transactions on CAD of Integrated Circuits and Systems的论文[2]中,针对算法[6]在解码器不存在的情形下不能停机的问题,通过在移动窗口中检测环形路径的方法,将解码器不存在的限界证明推广到非限界情形,从而首次得到了算法[6]的停机版本。

于此同时,国立台湾大学的Hsiou-Yuan Liu在发表于ICCAD'11的论文[11]中也提出了类似的停机算法。

在我们发表于ICCAD'11的论文[4]中,针对用户需要手工给出断言以剔除非法输入模式的困难,我们提出了自动推导该断言的算法,极大地降低了用户的使用难度。

进一步的,在我们 2012 年发表于IEEE Transactions on CAD of Integrated Circuits and Systems的论文[1]中,我们首次发现在不同的输入模式断言下,存在完全不同的多个解码器。我们采用基于Craig插值[12]的函数依赖算法,为每个可能的解码器推导其前提条件。实验结果表明,该条件仅包含了少量的输入变量,用户可以非常容易的通过研究这些前提条件选择正确的解码器。

另外,国立台湾大学的Hsiou-Yuan Liu在 2012 年发表于IEEE Transactions on CAD of Integrated Circuits and Systems的论文[10],首次讨论了纠错编码电路的对偶综合问题。然而由于大量异或操作导致SAT求解器运算效率降低,导致该算法只能处理一位错情形,而无法处理更复杂的多位错误情形。该缺陷也是本项目的研究动机之一。

国立台湾大学的Kuan-Hua Tu在发表于DAC'13的论文[9]中,首次将传统对偶综合算法的限界历史依赖假设放松为非限界假设,使得对偶综合可以仅考虑编码器的可达状态集合。

上述工作有效的解决了 10G以太网[40]和PCI Express[41]等常见传输标准的解码器自动产生问题。

而本项目是上述工作的自然延伸,以解决新一代传输标准中前向纠错编码(FEC)的对偶综合问题。

纠错编码的形式化验证方法

在纠错编码中大量使用了有限域 $GF(q^m)$ 的算术操作,其布尔逻辑实现包含大量的异或操作。而在形式化方法中常用的SAT[15]和BDD[14]推理引擎,无法高效处理此类电路[3] [7] [8] [10]。

国立台湾大学的Hsiou-Yuan Liu在 2012 年发表于IEEE Transactions on CAD of Integrated Circuits and Systems的论文[10],首次讨论了纠错编码电路的对偶综合问题。然而由于大量异或操作导致SAT求解器运算效率降低,导致该算法只能处理最简单的一位错情形,而无法处理多位错误的情形。该缺陷也是本项目的研究动机之一。



另一个处理一位错误的工作来自于Eli Arbel发表于 2014 年 ICCAD的论文[16]。该算法首先通过随机模拟找到所有可能的parity信号集合, 然后使用SAT求解器从中筛选出确实满足parity要求(即任意输入翻转均能导致信号翻转)的信号子集。然后通过结构分析找到所有受到该信号保护的寄存器列表, 并在这些寄存器上添加一位错误注入逻辑, 最后使用传统的形式化工具验证在一位错误情形下, 该信号确实能保护上述寄存器列表。

Alexey Lvov在 2012 年发表于 FMCAD的论文[8]和 2014 年发表于Formal Methods in System Design 的论文[7]首次提出了能够处理多位错的算法。该论文首先指出基于SAT和BDD的算法很难扩展到超过 24 位的纠错电路上。为了解决该问题, Alexey Lvov[8] [7]通过符号模拟, 将错误校验电路的输出表示为其输入的多项式。然后将有待验证的有限域断言的反, 转换为有限域多项式组的可满足问题。最后使用Buchberger[24]算法求解Gröbner basis[25]以确定该多项式组是否可解。相对于将有限域算术展开成布尔逻辑的传统方法, 该算法极大的降低了运算复杂性。该方法的问题在于, 当处理布尔算术和有限域算术的混合推理问题时, 需要针对每一个布尔变量进行case splitting, 即分别处理每个布尔变量的 0 和 1 两种情形。这带来了一个潜在的状态空间爆炸问题。而且该算法面对的问题规模也相对较小, 帧长度只有 1024 位。而在 100G以太网FEC中采用的帧长度为 5280 位。

上述相关研究指出, 面向新型传输标准的 FEC 形式化验证和对偶综合, 是具有重大意义的新颖研究课题。

1.1.3. 参考文献

- [1].ShengYu Shen, Ying Qin, Kefei Wang, Zhengbin Pang, Jianmin Zhang, Sikun Li: Inferring Assertion for Complementary Synthesis. IEEE Trans. on CAD of Integrated Circuits and Systems 31(8): 1288-1292 (2012)
- [2].ShengYu Shen, Ying Qin, Liquan Xiao, Kefei Wang, Jianmin Zhang, Sikun Li: A Halting Algorithm to Determine the Existence of the Decoder. IEEE Trans. on CAD of Integrated Circuits and Systems 30(10): 1556-1563 (2011)
- [3].ShengYu Shen, Ying Qin, Kefei Wang, Liquan Xiao, Jianmin Zhang, Sikun Li: Synthesizing Complementary Circuits Automatically. IEEE Trans. on CAD of Integrated Circuits and Systems 29(8): 1191-1202 (2010)
- [4].ShengYu Shen, Ying Qin, Jianmin Zhang: Inferring assertion for complementary synthesis. ICCAD 2011: 404-411



- [5].ShengYu Shen, Ying Qin, Jianmin Zhang, Sikun Li: A halting algorithm to determine the existence of decoder. FMCAD 2010: 91-99
- [6].ShengYu Shen, Jianmin Zhang, Ying Qin, Sikun Li: Synthesizing complementary circuits automatically. ICCAD 2009: 381-388
- [7].Alexey Lvov, Luis Alfonso Lastras-Montano, Barry M. Trager, Viresh Paruthi, Robert Shadowen, Ali El-Zein: Verification of Galois field based circuits by formal reasoning based on computational algebraic geometry. Formal Methods in System Design 45(2): 189-212 (2014)
- [8].Alexey Lvov, Luis Alfonso Lastras-Montano, Viresh Paruthi, Robert Shadowen, Ali El-Zein: Formal verification of error correcting circuits using computational algebraic geometry. FMCAD 2012: 141-148
- [9].Kuan-Hua Tu, Jie-Hong R. Jiang: Synthesis of feedback decoders for initialized encoders. DAC 2013: 49
- [10]. Hsiou-Yuan Liu, Yen-Cheng Chou, Chen-Hsuan Lin, Jie-Hong R. Jiang: Automatic Decoder Synthesis: Methods and Case Studies. IEEE Trans. on CAD of Integrated Circuits and Systems 31(9): 1319-1331 (2012)
- [11]. Hsiou-Yuan Liu, Yen-Cheng Chou, Chen-Hsuan Lin, Jie-Hong R. Jiang: Towards completely automatic decoder synthesis. ICCAD 2011: 389-395
- [12]. Kenneth L. McMillan: Interpolation and SAT-Based Model Checking. CAV 2003: 1-13
- [13]. Ron Roth. Introduction to Coding Theory. Cambridge University Press, 2007.
- [14]. Randal E. Bryant: Graph-Based Algorithms for Boolean Function Manipulation. IEEE Trans. Computers 35(8): 677-691 (1986)
- [15]. Matthew W. Moskevich, Conor F. Madigan, Ying Zhao, Lintao Zhang, Sharad Malik: Chaff: Engineering an Efficient SAT Solver. 530-535
- [16]. Eli Arbel, Shlomit Koyfman, Prabhakar Kudva, Shiri Moran: Automated detection and verification of parity-protected memory elements. ICCAD 2014: 1-8
- [17]. Alexander Zeh, Christian Senger: A link between Guruswami-Sudan's list-decoding and decoding of interleaved Reed-Solomon codes. ISIT 2010: 1198-1202
- [18]. V. Guruswami and M. Sudan, "Improved Decoding of Reed-Solomon Codes and Algebraic Geometry Codes," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 45, no. 6, pp. 1757-1767, September 1999.
- [19]. R. Kötter, On Algebraic Decoding of Algebraic-Geometric and Cyclic Codes, Linkoping Studies in Science and Technology, no. 419 (Ph.D. Dissertation, Department of Electrical Engineering),



- Linköping U., 1996.
- [20]. R. Roth and G. Ruckenstein, "Efficient Decoding of Reed-Solomon Codes beyond Half the Minimum Distance," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 46, no. 1, pp. 246–257, January 2000.
- [21]. Mullen, Gary L.; Panario, Daniel (2013), *Handbook of Finite Fields*, CRC Press, ISBN 978-1-4398-7378-6
- [22]. Reed, Irving S.; Solomon, Gustave (1960), "Polynomial Codes over Certain Finite Fields", *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM)* 8 (2): 300–304, doi:10.1137/0108018
- [23]. Bose, R. C.; Ray-Chaudhuri, D. K. (March 1960), "On A Class of Error Correcting Binary Group Codes", *Information and Control* 3 (1): 68–79, doi:10.1016/s0019-9958(60)90287-4, ISSN 0890-5401
- [24]. Buchberger, B. (August 1976). "Theoretical Basis for the Reduction of Polynomials to Canonical Forms". *ACM SIGSAM Bull. (ACM)* 10 (3): 19–29. doi:10.1145/1088216.1088219. MR 0463136.
- [25]. William W. Adams, Philippe Lounstaunau (1994). *An Introduction to Gröbner Bases*. American Mathematical Society, Graduate Studies in Mathematics, Volume 3. ISBN 0-8218-3804-0
- [26]. Matthew W. Moskwicz, Conor F. Madigan, Ying Zhao, Lintao Zhang, Sharad Malik: Chaff: Engineering an Efficient SAT Solver. *DAC 2001*: 530-535
- [27]. Dilip V. Sarwate, Zhiyuan Yan: Modified Euclidean algorithms for decoding Reed-Solomon codes. *ISIT 2009*: 1398-1402
- [28]. Christoph Lossen: Singular: A Computer Algebra System *CISE*, 5 (4), 45-55, 2003.
- [29]. Jeong-In Park, Hanho Lee, Seongsoo Lee: An area-efficient truncated inversionless Berlekamp-Massey architecture for Reed-Solomon decoders. *ISCAS 2011*: 2693-2696
- [30]. Venkatesan Guruswami, Chaoping Xing: Optimal rate algebraic list decoding using narrow ray class fields. *J. Comb. Theory, Ser. A* 129: 160-183 (2015)
- [31]. Niklas Eén, Niklas Sörensson: Temporal induction by incremental SAT solving. *Electr. Notes Theor. Comput. Sci.* 89(4): 543-560 (2003)
- [32]. Ruben Martins, Saurabh Joshi, Vasco M. Manquinho, Inês Lynce: Incremental Cardinality Constraints for MaxSAT. *CP 2014*: 531-548
- [33]. Shamim Ripon, Alice Miller: Verification of Symmetry Detection using PVS. *ECEASST* 35 (2010)
- [34]. Forney, Jr., G. (October 1965), "On Decoding BCH Codes", *IEEE Transactions on Information Theory* 11 (4): 549–557, doi:10.1109/TIT.1965.1053825, ISSN 0018-9448
- [35]. www.ieee802.org/3/bj



- [36]. http://en.wikipedia.org/wiki/Fibre_Channel
- [37]. <http://en.wikipedia.org/wiki/InfiniBand>
- [38]. “Baseline Proposal for 100G Backplane Specification using PAM2”.http://www.ieee802.org/3/bj/public/mar12/dudek_01a_0312.pdf
- [39]. http://media.wix.com/ugd/720847_e2386823f3ab4d09aba4a4c2d144a6e7.pdf
- [40]. IEEE. 2012. IEEE Standard for Ethernet SECTION FOURTH. (2012). Retrieved January 25, 2013 from http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.3-2012_section4.pdf
- [41]. PCI-SIG. 2009. PCI Express Base 2.1 Specification. (2009). Retrieved January 25, 2013 from [http://www.pcisig.com/members/downloads/specifications/pciexpress/PCI Express Base r2 1 04Mar09.pdf](http://www.pcisig.com/members/downloads/specifications/pciexpress/PCI%20Express%20Base%20r2.1%2004Mar09.pdf)
- [42]. “Backplane NRZ FEC Baseline Proposal ”. http://www.ieee802.org/3/bj/public/mar12/gustlin_01_0312.pdf
- [43]. “Should the FEC be Optional for the NRZ PHY?”. http://www.ieee802.org/3/bj/public/mar12/meghelli_01a_0312.pdf
- [44]. “Alignment Marker Lock State Machine for NRZ 100G-KR”. http://www.ieee802.org/3/bj/public/may12/wang_01_0512.pdf
- [45]. “256b/257b Transcoding for 100 Gb/s Backplane and Copper Cable “ . http://www.ieee802.org/3/bj/public/mar12/cideciyan_01a_0312.pdf
- [46]. “ Transmitter and Receiver Architecture Without Self-Synchronizing Rx Scrambler ” . http://www.ieee802.org/3/bj/public/may12/cideciyan_02_0512.pdf
- [47]. “Scrambling scheme and FEC bits performance”. http://www.ieee802.org/3/bj/public/jul12/anslow_01a_0712.pdf
- [48]. http://en.wikipedia.org/wiki/Voyager_program
- [49]. http://en.wikipedia.org/wiki/Compact_disc
- [50]. <http://en.wikipedia.org/wiki/DVD>
- [51]. http://en.wikipedia.org/wiki/Reed–Solomon_error_correction
- [52]. http://en.wikipedia.org/wiki/Buchberger%27s_algorithm
- [53]. http://en.wikipedia.org/wiki/Forward_error_correction



1.2. 项目的研究内容、研究目标，以及拟解决的关键科学问题

1.2.1. 研究目标

本项目的目标为，以我们在对偶综合领域的工作为基础，研究全新的理论，算法和工具，以在寄存器传输级上，解决前向纠错机制的形式化验证和自动对偶综合问题。

1.2.2. 背景知识

有限域代数、Gröbner basis 和 Buchberger 算法

群(G, \cdot)是指集合 G 及其上的二元算子 \cdot ，满足条件(1)闭包：对于任意 $a, b \in G$ ，有 $a \cdot b \in G$ ；(2)结合律：对于任意 $a, b, c \in G$ ，有 $a \cdot (b \cdot c) \equiv (a \cdot b) \cdot c$ ；(3)幺元：存在 $1 \in G$ ，使得对任意 $a \in G$ ，有 $1 \cdot a \equiv a \cdot 1 \equiv a$ ；(4)反元：对于任意 $a \in G$ ，存在 $a^{-1} \in G$ ，使得 $a \cdot a^{-1} \equiv a^{-1} \cdot a \equiv 1$ 。

交换群是指对于任意 $a, b \in G$ ，有 $a \cdot b \equiv b \cdot a$ 。记 $a^n = a \cdot a \dots \cdot a$ ，即 n 个 a 。**循环群** G 是指存在 $a \in G$ ，使得 G 的任意元素均能表示 a^m ，其中 m 为非负整数。对于最小的 n ，使得 $a^n \equiv 1$ ，称 n 为 a 的order。

环($R, *, +$)是指在非空集合 R ，及其上的两个二元算子 $*$ 和 $+$ ，满足条件(1)($R, +$)是交换群；(2) $*$ 满足结合律；(3)分配律：对任意 $a, b, c \in R$ ， $a * (b + c) \equiv (a * b) + (a * c)$ 且 $(b + c) * a \equiv b * a + c * a$ 。

其中 $+$ 在群($R, +$)上的幺元也称为($R, *, +$)的**零元**，记为 0 。任意 $x \in R$ 在($R, +$)上的反元记为 $-x$ 。若一个环($R, *, +$)使得 $*$ 满足交换律，且有幺元 1 ，则称为**整环**。

域：当一个整环($R, *, +$)使得对任意 $a \in R$ 在 $*$ 上存在反元 a^{-1} ，则称为域。**有限域** $GF(p)$ 为($P, *_p, +_p$)，其中 p 为质数， $P = \{0, 1, \dots, p-1\}$ ， $a +_p b = (a +_Z b) \bmod p$ ， $a *_p b = (a *_Z b) \bmod p$ 。其中 $+_Z$ 和 $*_Z$ 分别是正整数集合 Z 上的加法和乘法。通过特定的操作可以将 $GF(p)$ 扩展为扩展域 $GF(p^m)$ ，为简明起见，不再赘述。

多项式：对于有限域 F ，多项式如 $a(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i$ 所示，其中 $a_i \in F$ ，则 $\deg a = n$ 。而每个 $a_i x^i$ 称为一个单项式。 F 上的所有此类多项式集合记为 $F[x]$ 。定义 $(F[x], *_F[x], +_F[x])$ ，其中 $a(x) +_F[x] b(x) = \sum_{i=0}^n (a_i +_F b_i) x^i$ ，而 $a(x) *_F[x] b(x) = \sum_{i=0}^{2n} c_i x^i$ ，其中 $c_i = \sum_{j=0}^i a_j b_{i-j}$ 。很明显 $(F[x], *_F[x], +_F[x])$ 是整环。



上述在一个变量 x 上的多项式可以扩展为在多个变量 $\{x_1, \dots, x_n\}$ 上的多项式。此时所有此类多项式的集合记为 $F[x_1, \dots, x_n]$ 。

Ideal $I \subseteq F[x_1, \dots, x_n]$ 满足 (1) $0 \in I$; (2) 对任意 $f, g \in I$, 有 $f+g \in I$; (3) 面对任意 $f \in I$ 和 $h \in F[x_1, \dots, x_n]$, 有 $hf \in I$ 。对于 $f_1, \dots, f_s \in F[x_1, \dots, x_n]$, 很明显 $\langle f_1, \dots, f_s \rangle = \left\{ \sum_{i=1}^s h_i f_i : h_1, \dots, h_s \in F[x_1, \dots, x_n] \right\}$ 是一个 ideal。

Hilbert Basis定理: $F[x_1, \dots, x_n]$ 的任何 ideal 均可以表示为有限个 $f_1, \dots, f_s \in F[x_1, \dots, x_n]$ 组成的 $\langle f_1, \dots, f_s \rangle$ 。 f_1, \dots, f_s 称为该 ideal 的基 (Basis)。

然而, 对于特定的 $f \in F[x_1, \dots, x_n]$, 有可能可以分解成为 f_1, \dots, f_s 上的两个不同组合: $f = \sum_{i=1}^s a_i f_i = \sum_{i=1}^s b_i f_i$ 。而 Gröbner basis 则能保证这种分解是唯一的。而从任意 f_1, \dots, f_s 中产生 Gröbner basis 的算法称为 **Buchberger 算法** [24]。该算法的粗略介绍如下:

首先给出一个单项式的排序规则, 如按照 x_1, \dots, x_n 顺序的字典序规则, 以及按照 degree 排序的规则。以 $F[x]$ 为例, 任意多项式可以表示为 $f = \sum_{i=1}^s a_i x^i$ 。则 $LT(f) = a_s x^s$, $LM(f) = x^s$, $LE(f) = s$ 。

对于两个多项式 f 和 g , 定义 $LM(f)$ 和 $LM(g)$ 的最小公倍数为 $\gamma = \max(LE(f), LE(g))$ 。而 $S(f, g) = \frac{x^\gamma}{LT(f)} f - \frac{x^\gamma}{LT(g)} g$ 。很明显, $S(f, g)$ 将消去 f 和 g 的最高阶单项式。而对于基 G , $\overline{S(f, g)}^G$ 是 $S(f, g)$ 在 G 上的余数。则 **Buchberger 算法** [24] 的流程如下所示。

```

Input:  $F = (f_1, \dots, f_s)$ 
Output: a Groebner basis  $G = (g_1, \dots, g_t)$  for  $I$ , with  $F \subset G$ 

 $G := F$ 
REPEAT
     $G' := G$ 
    FOR each pair  $\{p, q\}$ ,  $p \neq q$  in  $G'$  DO
         $S := \overline{S(p, q)}^{G'}$ 
        IF  $S \neq 0$  THEN  $G := G \cup \{S\}$ 
UNTIL  $G = G'$ 

```

图 2 Buchberger 算法

典型的 FEC: Reed-Solomon 编码

在讨论 FEC 的概念时, 我们需要以下的系统架构模型:

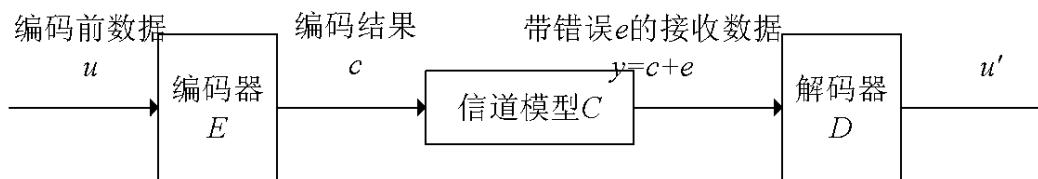


图 3 系统架构模型

Reed-Solomon编码是广泛应用于数据存储和通讯领域的前向纠错编码。如上图所示，一个纠错编码 $[n,k,d]$ 的原理是，在编码器 E 编码过程中，将每个长度为 k 的输入 $u=(u_0, \dots, u_{k-1})$ ，映射至长度为 n 的输出 $c=(c_0, \dots, c_{n-1})$ ，使得任意两个 c 和 c' 的汉密尔顿距离至少为 $d=n-k+1$ 。在传输和存储过程中，假设在信道模型 C 上有不多于 $(d-1)/2$ 个符号被损坏，同时假设加性噪声为 $e=(e_0, \dots, e_{n-1})$ ，则使得 $|e_i| \neq 0$ 的 i 的个数不超过 $(d-1)/2$ 。此时通过信道得到的接收数据 $y=c+e$ 。则在解码器 D 上解码时，可以通过多项式插值从 y 中恢复出正确的原始数据 u 。

其中， n 通常由用户愿意付出的编码空间和时间复杂性决定。其中空间复杂性是指硬件实现的电路面积或者软件实现需要的存储开销。而时间复杂性是指用于解码的时间延迟，通常是串行传输延迟的2~3倍。 $n-k+1$ 或者 d 通常由通讯信道与存储介质的原始误码率 p 和用户期望达到的误码率 p' 决定。该值越大则能得到的误码率提升 p'/p 就越高。

为了兼容尽量多的Reed-Solomon编码的变种，我们使用文献[13]的一般性记法(Generalized Reed-Solomon, 简称为GRS)。

对于有限域 F ，假设 a_1, \dots, a_n 为 F 中不同的非0元素，而 v_1, \dots, v_n 和 v'_1, \dots, v'_n 为 F 中非0元素(不要求不同)。在 F 上的GRS码是一个线性 $[n,k,d]$ 码 C_{GRS} 。其产生矩阵为：

$$G_{GRS} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \alpha_1 & \alpha_2 & \dots & \alpha_n \\ \alpha_1^2 & \alpha_2^2 & \dots & \alpha_n^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_1^{k-1} & \alpha_2^{k-1} & \dots & \alpha_n^{k-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v'_1 & & & \\ & v'_2 & & 0 \\ 0 & & \ddots & \\ & & & v'_n \end{pmatrix} \quad (1)$$

对于输入 $u=(u_0, \dots, u_{k-1})$ ，其编码结果 $c=(c_0, \dots, c_{n-1})$ 为

$$c = u G_{GRS} \quad (2)$$

假设 F 上的 k 阶多项式记为 $F_k[x]$ 。则可以将 u 视为一个 F 上的 k 阶多项式 $u(x)=u_0+u_1x+\dots+u_{k-1}x^{k-1} \in F_k[x]$ 。则 C_{GRS} 的编码可记为：

$$c = u G_{GRS} = (v'_1 u(a_1), v'_2 u(a_2), \dots, v'_n u(a_n)) \quad (3)$$



对于上述 C_{GRS} ，其对应的校验矩阵 H_{GRS} 记为：

$$H_{GRS} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \alpha_1 & \alpha_2 & \dots & \alpha_n \\ \alpha_1^2 & \alpha_2^2 & \dots & \alpha_n^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_1^{d-2} & \alpha_2^{d-2} & \dots & \alpha_n^{d-2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 & & & \\ & v_2 & & 0 \\ 0 & & \ddots & \\ & & & v_n \end{pmatrix} \quad (4)$$

(1)-(4)满足如下关系：

$$H_{GRS}G_{GRS}^T = 0 \quad (5)$$

由该关系，在已知 G_{GRS} ，即 a_1, \dots, a_n 和 v'_1, \dots, v'_n 的前提下，可以求出未知数 v_1, \dots, v_n ，从而得到校验矩阵 H_{GRS} 。反之也可以从 H_{GRS} 得到产生矩阵 G_{GRS} 。

假设 c 经过噪声信道后，受到加性噪声 $e=(e_1, \dots, e_n)$ 的干扰，则解码器的输入 $y=(y_1, \dots, y_n)$ 为：

$$y=c+e \quad (6)$$

由(5)和(6)可知

$$H_{GRS}y^T = H_{GRS}e^T \quad (7)$$

假设 J 为错误位置集合，我们有：

$$e_k \neq 0 \Leftrightarrow k \in J \quad (8)$$

很明显 $|J| \leq (d-1)/2$ 。

C_{GRS} 的解码过程要比其编码过程复杂得多，一般分为以下几步：

第一步，计算 Syndrome 如下：

$$\begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ \vdots \\ S_{d-2} \end{pmatrix} = H_{GRS}y^T \quad (9)$$

若将其视为 F 上的多项式，则为：

$$S(x) = \sum_{\ell=0}^{d-2} S_\ell x^\ell \quad (10)$$

由(7)和(10)可知

$$S_\ell = \sum_{j \in J} e_j v_j \alpha_j^\ell, \quad \ell = 0, 1, \dots, d-2 \quad (11)$$



将(11)代入(10)有:

$$S(x) = \sum_{\ell=0}^{d-2} x^\ell \sum_{j \in J} e_j v_j \alpha_j^\ell = \sum_{j \in J} e_j v_j \sum_{\ell=0}^{d-2} (\alpha_j x)^\ell \quad (12)$$

考虑环 $F[x]/x^{d-1}$, 即 F 上多项式针对 x^{d-1} 的模组成的环。在该环中所有不能被 x 整除的元素在该环的乘性算子下组成一个群。多项式 $1 - \alpha_j x$ 在该群中的反元为 $\sum_{\ell=0}^{d-2} (\alpha_j x)^\ell$, 因为:

$$(1 - \alpha_j x) \sum_{\ell=0}^{d-2} (\alpha_j x)^\ell = 1 - (\alpha_j x)^{d-1} \equiv 1 \pmod{x^{d-1}} \quad (13)$$

因此(12)可以改写为:

$$S(x) \equiv \sum_{j \in J} \frac{e_j v_j}{1 - \alpha_j x} \pmod{x^{d-1}} \quad (14)$$

收集(14)的所有分母有:

$$\Lambda(x) = \prod_{j \in J} (1 - \alpha_j x) \quad (15)$$

将(15)的右侧乘上(14)的右侧, 得到:

$$\Gamma(x) = \sum_{j \in J} e_j v_j \prod_{m \in J \setminus \{j\}} (1 - \alpha_m x) \quad (16)$$

因此我们有以下三个约束:

$$\gcd(\Lambda(x), \Gamma(x)) = 1 \quad (17)$$

$$\deg \Gamma < \deg \Lambda \leq (d-1)/2 \quad (18)$$

$$\Lambda(x) S(x) \equiv \Gamma(x) \pmod{x^{d-1}} \quad (19)$$

第二步, (17)-(19)可以使用参数 $a(x) = x^{d-1}$ 和 $b(x) = S(x)$ 调用以下经典的Euclid算法[27]进行求解:

```

 $r_{-1}(x) \leftarrow a(x); r_0(x) \leftarrow b(x);$ 
 $s_{-1}(x) \leftarrow 1; s_0(x) \leftarrow 0;$ 
 $t_{-1}(x) \leftarrow 0; t_0(x) \leftarrow 1;$ 
for ( $i \leftarrow 1; r_{i-1}(x) \neq 0; i++$ ) {
     $q_i(x) \leftarrow r_{i-2}(x) \operatorname{div} r_{i-1}(x);$ 
     $r_i(x) \leftarrow r_{i-2}(x) - q_i(x) r_{i-1}(x);$ 
     $s_i(x) \leftarrow s_{i-2}(x) - q_i(x) s_{i-1}(x);$ 
     $t_i(x) \leftarrow t_{i-2}(x) - q_i(x) t_{i-1}(x);$ 
}

```

正如[52]所指出的, 该Euclid算法是上述Buchberger算法在一元多项式环上的特例。最终的解为



$\Lambda(x)=t_h(x)$	(20)
$\Gamma(x)=r_h(x)$	(21)

其中 h 是最小的 i 使得 $r_i < (d-1)/2$ 。

第三步，错误位置和错误值使用Forney算法[34]得出：

$$e_j = \begin{cases} -\frac{\alpha_j}{v_j} \cdot \frac{\Gamma(\alpha_j^{-1})}{\Lambda'(\alpha_j^{-1})} & \text{if } \Lambda(\alpha_j^{-1}) = 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (22)$$

从上述的第一步到第三步可知，Reed-Solomon码的解码是阻塞式的，即需要在每一步保存完整的 $y=(y_1, \dots, y_n)$ ，并在其上进行多轮迭代。假设 y 在信道上的传输时间是 T ，则相对于非纠错的情形，上述三步需要额外的 $2T$ 时间。如果还要标记错误个数超出 $(d-1)/2$ 的情形的话，还需要另一个额外的 T 。根据我们在新一代天河超级计算机项目中的经验，这将带来大约150纳秒的额外延时。

Reed-Solomon及其变种是一个非常广大的研究领域，我们不可能在这里给出完整的描述。上述算法仅仅是为了给本申请书提供一个简单的入门式介绍。该介绍无论是在一般性还是在特殊性方面都是不完备的。为此，我们在下面对该领域内的其他相关工作给出简单介绍。

首先，在实际应用中存在Reed-Solomon编码的多种变种，每一种都与上面的“标准”描述有或多或少的差别。比如，在公式(1)中的 a_i 和 v_i 有多种可能的选择，如当 v_i 全部为1时，称为normalized RS码，当 $a_i \equiv v_i$ 时称为狭义RS码。当 u 和 c 不像(2)(3)那样被视为多项式参数，而是被视为特定多项式在 F 上的取值时，则能得到systematic RS码，使得 u 成为 c 的一部分。

其次，还存在其他的高效求解(17)-(19)的方法，如Berlekamp-Massey算法[13]。另外，Guruswami-Sudan算法[18]则将纠错能力扩展到了半径为 $(d-1)/2$ 的圆之外，从而提升了纠错效率。Kötter[19]和 Roth-Ruckenstein[20]则进一步改善了该算法的复杂性。

1.2.3. FEC 的形式化验证和对偶综合算法框架

在介绍具体的研究内容之前，我们首先需要介绍用于形式化验证和对偶综合的模型和流程。

假设我们的工具将使用如下所示的系统结构：

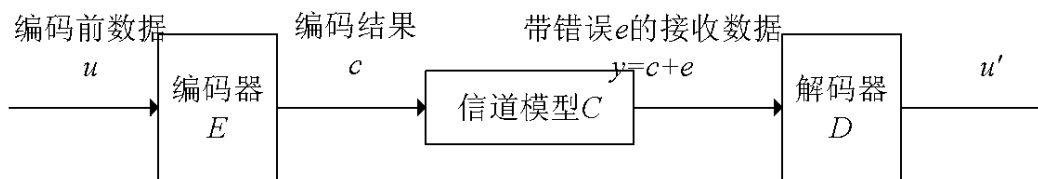


图 4 系统架构模型

其中编码器 E 使用常见的寄存器传输级硬件描述语言Verilog或VHDL描述。我们使用现有的EDA工具,如Synopsys的Design Compiler将其展开为门级网表形式,以便使用现有的语法分析器[6]得到所需的状态迁移关系 T_E 。 T_E 将被用于图1中的对偶综合。和现有对偶综合不同的是,我们需要在该过程中保留所有的有限域算术操作,以便使用singular[28]进行相应的有限域运算。同时,假设编码器需要 n 周期才能完成一个FEC帧的处理,因此我们还需要借助类似[8][7]的符号模拟算法,将 T_E 展开 n 次,以得到如公式(2)所示的从编码前输入 u 到编码结果 c 的映射 $c=uG_{GRS}$ 。

对于解码器 D ,在进行形式化验证的情形下,我们假设已经得到了 D 的Verilog或者VHDL描述,我们将采用类似于 E 的处理方法,以得到如公式(4)所示的 H_{GRS} ,以及如公式(22)所示的错误修正。这些将被用于验证最后经过错误修正的输出 u' 是否等于 u 。而在进行对偶综合的情形下, T_D 将由对偶综合算法产生,并转换成为Verilog或者VHDL描述。

信道模型 C 将负责产生所有可能的出错组合,包括在长度为 n 的向量 c 上产生最多 $(d-1)/2$ 个错误,以及每个错误位置上所有可能的错误值。

对于形式化验证流程,其算法流程如下:

1. 通过符号模拟,将恢复的原始数据 u' 表示为原始数据 u 和所有可能的错误组合 e 的多项式。
2. 将 $u \neq u'$ 表示展开为多项式组。
3. 使用Singular工具[28]提取相应的Gröbner basis[25],以确认该多项式组是否可解。

对于对偶综合流程,其算法流程类似于传统的对偶综合,主要区别在于所使用的推理引擎不再是纯粹的布尔逻辑推理引擎,而是混合了布尔逻辑和有限域算术的混合推理引擎。同时,传统对偶综合中的编码器将被图4中的 $E+C$ 代替,以便将出错情形考虑在内。

1.2.4. 研究内容

基于上述的模型和流程,以及FEC对现有形式化方法提出的挑



战，我们将研究以下内容：

第一个研究内容为：高效的有限域算术和布尔逻辑混合推理。如前所述，在将前向纠错机制中的有限域算术映射到布尔逻辑的过程中，会产生大量的异或操作。这将极大的削弱SAT和BDD的效率[8]。Alexey Lvov [8][7]首次提出了有限域算术和布尔逻辑的混合推理算法。然而该算法使用的case splitting导致了状态空间爆炸问题。因此，高效的有限域算术和布尔逻辑混合推理算法是提高整体算法效率的关键。

第二个研究内容为：面向有限域的对称性削减算法。如前所述，为了尽量减小校验码所占用的带宽，通常会为编码器的编码结果 c 选择很大的帧尺寸，其中包含数百个有限域元素。从语义角度看，一个FEC帧 $c=(c_0, \dots, c_{n-1})$ 内部的各个元素 c_i 之间存在一定的对称性；然而从语法角度看，公式(2)中指出 c 中的各个元素 c_i 是不对称的，需要处理的组合个数是 $C_n^{\frac{d-1}{2}} 2^{\frac{d-1}{2}}$ ，其中 t 是每个 c_i 占用的比特数。因此，弥合两者的差异将极大地减少需要处理的组合数量。

第三个研究内容为：基于模板的对偶综合算法。从公式(17)-(19)的求解过程可知，FEC解码器从原理上来说阻塞式的，需要在 y 上进行多次迭代。如果任由推理引擎自由搜索整个状态空间，不仅时间开销很大，而且会产生非常不规则和高冗余的解码器结构。而另一方面，现有的研究指出了多种高度规则和低复杂性的解码器结构，如Euclid算法[27]、Berlekamp-Massey算法[13]和Guruswami-Sudan算法[18]等。因此，我们将研究如何从上述结构中提取参数化的模板，然后将解码器的综合问题变为参数空间的搜索问题。

我们将在以下各个小节中给出对这些问题的预期解决方案。

1.2.5. 拟解决的关键科学问题

针对上述研究内容，我们拟解决下述相应的关键科学问题：

第一个关键科学问题是：增量式低开销的 Gröbner basis 提取算法。

如上所述，提取Gröbner basis[25]是在有限域上进行形式化推理的关键步骤。由于有待验证的FEC结构非常复杂，产生的多项式组的尺



寸将会非常巨大。这将导致每次提取Gröbner basis的运算时间开销也将会非常巨大。

而在由图 4 所示的信道模型中,生成的多个错误位置组合和错误值之间,存在高度的重叠和相似性。以 100G以太网[42]为例,对长度为 $n=528$ 的 $c=(c_0, \dots, c_{527})$,可能的出错位置最多为 7 个。则两个出错位置组合 $\{0, \dots, 5, 6\}$ 和 $\{0, \dots, 5, 7\}$ 有很大的重叠。同时,对于同一个出错位置组合,不同的错误值之间也有很大的重叠。

这种重叠提供了这样一种可能性,即从一种情形的 Gröbner basis 中,增量式的产生另一种情形的 Gröbner basis,而仅仅引入很小的计算开销。

第二个关键科学问题是: 基于 cyclic code 的对称性削减问题。

如上所述,所有可能的错误组合的个数为 $C_n^{\frac{d-1}{2}} 2^{\frac{d-1}{2}}$,这对于形式化验证工具来说是一个非常大的搜索空间。需要使用合适的对称性削减技术来减少可能的组合个数。

公式(1)展示的是一般性的Reed Solomon编码的产生矩阵。而日常使用的Reed-Solomon编码是cyclic的,即任意 c 的右移和左移版本都仍然是合法的编码结果。同时Reed-Solomon编码在公式(1)中使用 $a_i=a^{i-1}$ 和 $v_i=a^{b(i-1)}$,其中 a 是有限域 $GF(q^m)$ 的generator。

这就带来了削减对称性的可能。对于两个错误向量 e 和 e' ,当 e' 是 e 的左移或者右移版本时,在计算他们的 Gröbner basis 时,也存在一定的对称关系。这种对称关系可以用于快速的从 e 的 Gröbner basis 中计算出 e' 的 Gröbner basis。

第三个关键科学问题是: 解码算法的模板结构设计和参数提取

常用和高效的解码算法,如Euclid算法[27]、Berlekamp-Massey算法[13]和Guruswami-Sudan算法[18],他们中的每一个都不是完整定义的算法,而仅仅代表了一大类算法的共同核心特点。在每一大类内部,还有很多不同的变种。如Berlekamp-Massey算法[13]提出于上世纪 60 年代,但是近年仍然有新的变种出现,如reformulated inversionless Berlekamp-Massey[29]。而Guruswami-Sudan算法[18]作为近年出现的全新研究方向,也在不断的产生新的研究成果[30]。

因此,如何为每一类算法,设计一个合适的模板,以涵盖各种可能的情形,将是我们需要重点解决的一个关键问题。而另一方面,过于一般化的模板,有可能带来求解复杂性的提升,甚至有可能导致不可解。因此,需要在通用性和求解复杂性之间取得良好折中。



1.3. 拟采取的研究方案及可行性分析

我们将按照下图所示的流程安排本项目的研究方案：

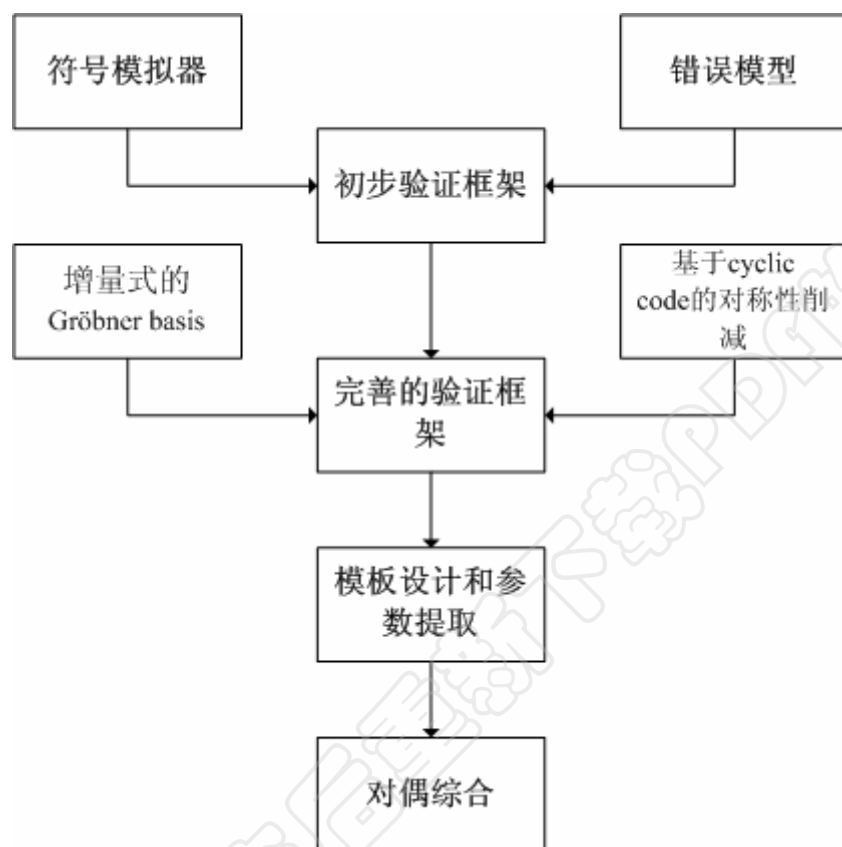


图 4 项目流程

各个关键技术的详细描述如下：

1.3.1. 面向有限域算术操作的符号模拟器

该模拟器的目的在于从 FEC 的 Verilog 或 VHDL 源代码，产生其对应的网表。该网表可以视为一个有向无环图 $G=\langle V,E\rangle$ 。其中 V 是节点列表，每种节点完成不同的逻辑功能，包括布尔逻辑中的与门 AND 和反向器 INV。此外，和传统的纯布尔逻辑网表不同， V 中还包含主要的有限域算术操作，如加法、乘法、求反、平方、平方根、标准基上的投影和重映射等。

纯布尔逻辑网表的产生可以直接使用现有的商用 EDA 工具，如 Synopsys 的 Design Compiler。而对于有限域算术操作，在源代码中通常会使用单独的模块完成。我们将在使用 Design Compiler 时指明这些模块不能被展平。这样最终产生的网表中将明确的包含对有限域算术操作的引用。



进一步的,通过读入上述产生的网表,并从输出开始,向输入进行回溯。如果在回溯过程中遇到状态单元,则递归的对他们的状态迁移函数进行回溯。在回溯过程中收集被遍历到的节点集合,以及他们之间的连接关系。如此即可将 FEC 的输出表示为输入的有限域多项式。

1.3.2. 信道错误模型的符号表示

如图 4 所示的系统架构可以被视为一个完整的网表,其中分别包含编码器 E 和解码器 D 的两个网表。而解码器的输入为 y ,而编码器的输出为 c 。他们之间的关系由 $y=c+e$ 表示。

n 个 e 中最多有 $(d-1)/2$ 个不为 0,该约束可以表示为额外的 CNF 公式,并和上述网表进行合取。如此即可涵盖所有可能的错误组合。

1.3.3. 初步的验证框架

将上述图 3 所示的网表、错误模型约束和 $u \neq u'$ 转变成有限域多项式组,并使用 singular[28] 计算其 Gröbner basis[25],以确定其是否可解。

原理上说,该算法能够解决 FEC 的形式化验证问题。然而正如前面指出的,该算法存在状态空间爆炸问题。需要进行以下的研究,以改善算法复杂性。

1.3.4. 增量式的 Gröbner basis 产生算法

有限域代数工具,如 singular[28] 中,通常使用如图 2 所示的 Buchberger[24] 算法求解 Gröbner basis[25]。而该算法并不考虑多个相似的 ideal $\langle f_1, \dots, f_s \rangle$ 和 $\langle g_1, \dots, g_s \rangle$ 之间的相似性。

为了将这种相似性考虑进来,我们将参考近年来在增量式 SAT[31] 求解方面的研究进展,开发能增量式产生 Gröbner basis 的算法。

同时,在错误模型中的“最多不超过 $(d-1)/2$ 个错误”这样的约束是很明显的 Cardinality 约束。这类问题的求解在 MaxSAT[32] 中有很长的研究历史和很丰富的成果积累。我们也将借鉴这些研究成果改进我们的算法。

最后,Cardinality 约束和抽象代数中的 degree, rank 和 dimension 等概念有着内在的联系。这将直接决定特定多项式组的可解性。而特定约束集合的不可解是对偶综合中的重要组成部分。我们也将探索他



们之间的这种关系能否用于加速对偶综合算法。

1.3.5. 基于 cyclic code 的对称性削减算法

由于 cyclic code 本身所具有的特殊代数结构, 使得其编解码的算法的复杂性和硬件实现开销大大降低。所以 cyclic code 成为 Reed-Solomon 的标准实现。

同时, 该特性也为削减我们算法中的对称性提供了可能。首先, 针对图 4 中的 y 和 u , 需要针对他们的每一个子元素 y_i 和 u_i , 检查他们和其他 y_j 和 u_j 是否存在移位的关系。该过程中, 由于输出的对称集合是明确的, 同时输入对称集合内部的对应关系也是明确的, 因此并不存在传统对称性检测算法[33]中的搜索过程, 故整个算法是多项式复杂性的。

1.3.6. 解码算法的模板结构设计和参数提取

该步骤的关键在于两部分:

首先, 我们将致力于研究每一种主要的 FEC 解码算法, 如 Euclid 算法[27]、Berlekamp-Massey 算法[13]和 Guruswami-Sudan 算法[18]等。并从中提取结构特征和可调节的参数, 用于后继的搜索算法。

其次, 我们将基于上述的结构和参数, 开发用于参数搜索的算法。

这两方面的工作是紧密相关的。从通用性方面来看, 我们需要尽量通用的结构模型, 以便覆盖尽量多的解码器类型。而反过来, 过于一般性的结构, 将导致第二步中的算法复杂性恶化甚至不可解。上述两个方面之间的折中将是我们研究的重点。

1.4. 本项目的特色与创新之处;

首先, 本项目首次提出了针对 FEC 中多位错的验证算法。

其次, 本项目首次提出了针对有限域算术和 FEC 的对偶综合算法。

再次, 从手段上首次提出了有限域上的增量式 Gröbner basis 构造算法, 能够有效提升其他有限域形式化方法的效率。

最后, 从手段上首次提出了有限域上的对称性削减算法, 能够有



效提升其他有限域形式化方法的效率。

1.5. 年度研究计划及预期研究结果

研究计划安排如下：

起始时间	结束时间	研究内容
2016/1	2016/2	符号模拟器
2016/3	2016/4	错误模型
2016/5	2016/6	初步验证框架
2016/6	2017/6	增量式的 Gröbner basis 算法
2017/7	2018/6	基于 cyclic code 的对称性削减
2018/7	2019/6	模板设计和参数提取
2019/7	2019/10	对偶综合算法
2019/11	2019/12	总结和撰写结题报告

预期研究成果：

预期申请国际专利 2 项，国内专利 8 项，培养研究生 4 名，并在下列集成电路和形式化方法领域的顶级国际会议和期刊上发表论文 8 篇：

IEEE Transactions On Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems(TCAD)
ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems(TODAES)
International Conference on Formal Methods in Computer-Aided Design(FMCAD)
Design Automation Conference(DAC)
International Conference on Computer Aided Design(ICCAD)
Design, Automation, and Test in Europe(DATE)
Asia and South Pacific Design Automation Conference(ASPDAC)

2. 研究基础与工作条件

2.1. 工作基础

本项目组的工作基础包括：

首先，本项目负责人的所在单位国防科技大学计算机学院是国际领先的超级计算机研制单位，本项目负责人沈胜宇从 2009 年开始负责了两代天河超级计算机的物理编码层和前向纠错机制的设计，为天河超级计算机荣获四次 TOP500 第一名奠定了坚实基础，并以此工作获得国家科技进步特等奖一项。同时，在 863 项目“40Gbps 串行端口



控制器”中，负责设计针对 40Gbps 信道的 FEC 编码器和解码器。

其次，在本项目负责人沈胜宇的上一个自然科学基金项目”面向通讯应用的自动对偶综合方法研究”中，我们首创了对偶综合的概念并提出相关算法，以从任意编码器的Verilog源代码自动产生其对应的解码器代码[1] [2] [3] [4] [5][6]。这些工作有效的解决了 10G以太网[40]和PCI Express[41]等常见传输标准的解码器自动产生问题。

再次，本项目负责人沈胜宇长期以来致力于形式化方法的研究，在该方面具有深厚的理论基础和广泛的兴趣范围。

2.2. 工作条件

本项目负责人所在的国防科技大学计算机学院，是国际领先的超级计算机研制单位。在高速信号传输技术方面具备多年的技术积累、强大的人才储备和先进的测量设备。

同时，项目负责人沈胜宇在形式化方法和对偶综合领域进行了多年的艰苦卓绝而富有成效的研究工作，并对相关的背景知识和最新进展充分了解。积累了大量可供重用的代码。

所有这些都为我们完成本项目的研究工作奠定了坚实基础。

2.3. 承担科研项目情况

项目负责人沈胜宇目前没有承担包括自然科学基金在内的科研项目。但是作为主要骨干参与下列科研项目：

名称	经费来源	起止年月	负责的内容
片上多核处理器验证理论与关键技术	国家自然科学基金重点项目	2012.1-2016.12	对偶综合
40Gbps 高速串行接口控制器关键技术研究	863 项目	2013.1-2015.12	FEC 设计

2.4. 完成国家自然科学基金项目情况

上一个项目是面上项目"面向通讯应用的自动对偶综合方法研究"，项目编号 61070132。已经于 2014 年 1 月结题。在结题后，我们继续进行后继研究，专注于对 FEC 和相关有限域代数的研究。这些研究成为本项目申请书的基础。

上一项目的研究工作总结摘要：



1. 在我们发表于 ICCAD09 的原始对偶综合算法基础上,增加对环形路径条件的检测公式,将解码器在有限长度上不存在的结论,扩展到无限长路径上,从而解决了原始算法不停机的问题。研究成果第一作者发表于 ShengYu Shen: A Halting Algorithm to Determine the Existence of the Decoder. IEEE Trans. on CAD of Integrated Circuits and Systems 30(10): 1556-1563 (2011)。
2. 提出了自动推导外部断言的算法,以减少用户手工工作。该算法迭代的运行成果 1 的算法,使用每次迭代中产生的 SAT 公式,求解并剔除解码器不存在的外部断言。有限状态假设保证了该算法的停机性。研究成果第一作者发表于 ShengYu Shen: Inferring assertion for complementary synthesis. ICCAD 2011: 404-411。
3. 提出了全新算法以发掘多个同时存在的解码器及其对应断言。该算法迭代的构造函数依赖问题的 SAT 公式,以检查当现有已发掘的解码器集合具有相同的输出时,是否能够导致所有潜在解码器的混合 SAT 公式具有不同的输出。若是,则表明仍然存在尚未被发掘的解码器,而混合 SAT 公式在外部配置信号集合的解上的投影,即为新的解码器的迁移关系。该算法迭代运行直至函数依赖问题的 SAT 公式不可满足为止。研究成果发表于 ShengYu Shen: Synthesizing Complementary Circuits Automatically. IEEE Trans. on CAD of Integrated Circuits and Systems 29(8): 1191-1202 (2010)。
4. 提出基于 Craig 插值的特征化算法,以加快生成解码器的速度。该算法构造迁移关系的不可满足 SAT 公式,并从 SAT 求解器产生的 resolution 序列中产生解码器的布尔函数。该算法也发表于 ShengYu Shen: Synthesizing Complementary Circuits Automatically. IEEE Trans. on CAD of Integrated Circuits and Systems 29(8): 1191-1202 (2010)。
5. 由于本小组的开创性工作,使得对偶综合引起了国际学术界的关注和跟进研究。自 2011 年以来,在 EDA 领域的顶级会议 ICCAD[11]和 DAC[9],以及顶级期刊 IEEE Transaction on CAD of Integrated Circuits and Systems[10]上共发表了 3 篇来自其他研究小组的论文。这些工作给出了意想不到的发现,是对我们研究工作的巨大推进和有益补冲。

相关成果的详细目录:

1. ShengYu Shen, Ying Qin, Kefei Wang, Zhengbin Pang, Jianmin Zhang, Sikun Li: Inferring Assertion for Complementary Synthesis. IEEE Trans. on CAD of Integrated Circuits and Systems 31(8): 1288-1292 (2012)



2. ShengYu Shen, Ying Qin, Liquan Xiao, Kefei Wang, Jianmin Zhang, Sikun Li: A Halting Algorithm to Determine the Existence of the Decoder. IEEE Trans. on CAD of Integrated Circuits and Systems 30(10): 1556-1563 (2011)
3. ShengYu Shen, Ying Qin, Kefei Wang, Liquan Xiao, Jianmin Zhang, Sikun Li: Synthesizing Complementary Circuits Automatically. IEEE Trans. on CAD of Integrated Circuits and Systems 29(8): 1191-1202 (2010)
4. ShengYu Shen, Ying Qin, Jianmin Zhang: Inferring assertion for complementary synthesis. ICCAD 2011: 404-411
5. ShengYu Shen, Ying Qin, Jianmin Zhang, Sikun Li: A halting algorithm to determine the existence of decoder. FMCAD 2010: 91-99
6. ShengYu Shen, Jianmin Zhang, Ying Qin, Sikun Li: Synthesizing complementary circuits automatically. ICCAD 2009: 381-388

3. 资金预算说明

无需购置 5 万元以上固定资产及设备。

4. 其他需要说明的问题

无



沈胜宇 简历

中国人民解放军国防科学技术大学，计算机学院，副研究员

教育经历（按时间倒排序）：

2000/4 - 2005/6，国防科技大学，计算机学院，博士，导师：李思昆

1997/9 - 2000/3，国防科技大学，计算机学院，硕士，导师：李国宽

1993/9 - 1997/7，国防科技大学，计算机学院，学士

工作经历（科研与学术工作经历，按时间倒序排序）：

2009/12 - 至今，国防科技大学，计算机学院，副研究员

2005/06 - 2009/12，国防科技大学，计算机学院，助理研究员

曾使用证件信息（限3个）

军官证，222152

主持或参加科研项目及人才计划项目情况（按时间倒序排序）：

1、国家自然科学基金重点项目，61133007、片上多核处理器验证理论与关键技术、2012/01-2016/12、270万元、在研、参加。

2、863项目，40Gbps高速串行接口控制器关键技术研究、2013/01-2015/12、750万元、在研、参加。

3、国家自然科学基金面上项目，61103083、基于字级求解的电路错误自动定位方法研究、2012/01-2014/12、20万元、已结题、参与。

4、国家自然科学基金面上项目，61070132、面向通讯应用的自动对偶综合方法研究、2011/01-2013/12、33万元、已结题、主持。

5、国家自然科学基金面上项目，60603088、基于反例压缩的自动程序修正方法研究、2007/01-2009/12、27万元、已结题、主持。

6、国家自然科学基金面上项目，60573173、覆盖率驱动的VLSI功能验证理论与方法、2006/01-2006/12、8万元、已结题、参与。



秦莹简历(参加者)

国防科技大学计算机学院, 国产基础软件工程中心, 副研究员

教育经历:

2010/03 - 至今, 国防科技大学, 计算机学院, 博士, 导师: 贾焰

1997/09 - 2000/03, 国防科技大学, 计算机学院, 硕士, 导师: 杨晓东

1993/09 - 1997/07, 国防科技大学, 计算机学院, 学士。

工作经历:

2009/12-至今, 国防科技大学, 计算机学院, 副研究员

2000/12-2009/12, 国防科技大学, 计算机学院, 助理研究员

曾使用证件信息

军官证, 222227

主持或参加科研项目及人才计划项目情况(按时间倒排序):

1、国家自然科学基金面上项目, 61070132、面向通讯应用的自动对偶综合方法研究、2011/01-2013/12、33 万元、已结题、参加。



张鹤颖简历(参加者)

国防科技大学计算机学院, 计算机研究所, 副研究员

教育经历(从大学本科开始, 按时间倒排序):

1998/06 - 2004/06, 国防科技大学, 计算机学院, 博士, 导师: 窦文华

1994/09 - 1998/06, 国防科技大学, 自动控制学院, 学士

工作经历(科研与学术工作经历, 按时间倒排序):

2009/12-至今, 国防科技大学, 计算机学院, 副研究员

2004/06-2009/12, 国防科技大学, 计算机学院, 助理研究员

曾使用证件信息(限3个)

军官证, 222151

主持或参加科研项目及人才计划项目情况(按时间倒排序):

1、国家自然科学基金面上项目, 60905032、网络攻击行为的高效在线机器学习技术研究、2009/01-2011/12、30 万元、已结题、参与。

2、国家自然科学基金面上项目, 60603064、路由器支持的网络拥塞控制理论与算法研究、2007/01-2009/12、24 万元、已结题、主持。



张建民简历(参加者)

国防科技大学计算机学院, 计算机研究所, 助理研究员

教育经历:

- 2004/03 - 2009/06, 国防科技大学, 计算机学院, 博士, 导师: 李思昆
2001/09 - 2004/03, 国防科技大学, 计算机学院, 硕士, 导师: 李思昆
1997/09 - 2001/07, 国防科技大学, 计算机学院, 学士。

工作经历:

2009/12-至今, 国防科技大学, 计算机学院, 助理研究员

曾使用证件信息

军官证, 222310

主持或参加科研项目及人才计划项目情况(按时间倒排序):

- 1、国家自然科学基金重点项目, 61133007、片上多核处理器验证理论与关键技术、2012/01-2016/12、270 万元、在研、参加。
- 2、国家自然科学基金面上项目, 61103083、基于字级求解的电路错误自动定位方法研究、2012/01-2014/12、22 万元、已结题、主持。
- 3、国家自然科学基金面上项目, 61070132、面向通讯应用的自动对偶综合方法研究、2011/01-2013/12、33 万元、已结题、参加。
- 4、国家自然科学基金面上项目, 60603088、基于反例压缩的自动程序修正方法研究、2007/01-2009/12、27 万元、已结题、参加。



近5年（2010年1月1日以后）代表性研究成果列表

- 1、 Shen, ShengYu^(*), Qin, Ying, Wang, KeFei, Pang, ZhengBin, Zhang, JianMin, Li, SiKun, Inferring Assertion for Complementary Synthesis, IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2012, 31 (8) : 1288-1292。 0, SCI 期刊论文
- 2、 Shen, ShengYu^(*), Qin, Ying, Xiao, LiQuan, Wang, KeFei, Zhang, JianMin, Li, SiKun, A Halting Algorithm to Determine the Existence of the Decoder, IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2011, 30 (10) : 1556-1563。 2, SCI 期刊论文
- 3、 Shen, ShengYu^(*), Qin, Ying, Wang, KeFei, Xiao, LiQuan, Zhang, JianMin, Li, SiKun, Synthesizing Complementary Circuits Automatically, IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2010, 29 (8) : 1191-1202。 7, SCI 期刊论文
- 4、 Shen, ShengYu^(*), Qin, Ying, Zhang, JianMin, 对偶综合的断言推导, IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD), 404-411, San Jose, CA, 2011.11.7-2011.11.10。 0, ISTP 会议论文



附件信息

序号	附件名称	备注	附件类型
1	TCAD10	发表于IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2010第8期的 Synthesizing Complementary Circuits Automatically	代表性论著
2	TCAD11	发表于IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2011第10期的 A Halting Algorithm to Determine the Existence of the Decoder	代表性论著
3	TCAD12	发表于IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2012第8期的 Inferring Assertion for Complementary Synthesis	代表性论著
4	FMCAD10	发表于FMCAD '10的A Halting Algorithm to Determine the Existence of Decoder	代表性论著
5	ICCAD11	发表于ICCAD11的Inferring Assertion for Complementary Synthesis	代表性论著
6	ICCAD09	发表于ICCAD09的Synthesizing Complementary Circuits Automatically	代表性论著

**签字和盖章页(此页自动生成, 打印后签字盖章)**

申请人: 沈胜宇

依托单位: 中国人民解放军国防科学技术大学

项目名称: 前向纠错编码的寄存器传输级形式化验证和自动对偶综合

资助类别: 面上项目

亚类说明:

附注说明: 常规面上项目

申请人承诺:

我保证申请书内容的真实性。如果获得资助, 我将履行项目负责人职责, 严格遵守国家自然科学基金委员会的有关规定, 切实保证研究工作时间, 认真开展工作, 按时报送有关材料。若填报失实和违反规定, 本人将承担全部责任。

签字:

项目组主要成员承诺:

我保证有关申报内容的真实性。如果获得资助, 我将严格遵守国家自然科学基金委员会的有关规定, 切实保证研究工作时间, 加强合作、信息资源共享, 认真开展工作, 及时向项目负责人报送有关材料。若个人信息失实、执行项目中违反规定, 本人将承担相关责任。

编号	姓名	工作单位名称	证件号码	每年工作时间(月)	签字
1	秦莹	中国人民解放军国防科学技术大学	340603197411190622	12	
2	张鹤颖	中国人民解放军国防科学技术大学	610125197610120842	10	
3	张建民	中国人民解放军国防科学技术大学	142401197911201413	10	
4					
5					
6					
7					
8					
9					

依托单位及合作研究单位承诺:

已按填报说明对申请人的资格和申请书内容进行了审核。申请项目如获资助, 我单位保证对研究计划实施所需要的人力、物力和工作时间等条件给予保障, 严格遵守国家自然科学基金委员会有关规定, 督促项目负责人和项目组成员以及本单位项目管理部门按照国家自然科学基金委员会的规定及时报送有关材料。

依托单位公章

日期:

合作研究单位公章1

日期:

合作研究单位公章2

日期: