

一种面向宽带复杂信号侦察的可配置计算应用框架*

吴巨红, 陈曾平, 张银福

(国防科技大学 ATR 重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘要:可配置计算系统的优势与系统设计过程的复杂性是一对矛盾,可配置计算框架为此提供了有益的思路。但受限于适用范围与通用性考虑,已有的特别是商业框架仅支持系统的静态重构。本文针对宽带信号侦察这一特定应用领域,提出了一种功能级可配置计算应用框架 BSRRCs-RCAF,该框架将领域应用中具有共性的计算与功能模块抽取和集中起来,形成二进制比特流配置文件库,并提供构建此类系统的公共服务体系。基于公共服务体系以及配置文件库,当需要修改或者重新构建宽带信号侦察系统时,只需在现有框架下动态调用配置组件库,或者遵循框架的统一设计接口完善补充组件库中的特定功能部分,整个系统设计框架将得到方便复用,便于实现基于快速重构的多种系统功能。

关键词:可配置计算;应用框架;宽带复杂信号侦察;动态重构;混合可配置结构

中图分类号:TN95 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)02-0137-06

A kind of reconfigurable computing application framework for broadband complex signal reconnaissance

WU Juhong, CHEN Zengping, ZHANG Yinfu

(ATR Key Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The advantage of reconfigurable computing system is in conflict with its complex design, and the Reconfigurable Computing Application Framework (RCAF) supplies a rewarding approach. But by the limitation of applicability and general purpose, some RCAF (especially some commercial version) only supports the static reconfiguration. This research proposes a kind of Reconfigurable Computing Application Framework BSRRCs-RCAF for the specific application of Broadband Signal Reconnaissance, which extracts and collects the computing and function modules as the form of library of configurable files. When the system of Broadband Signal Reconnaissance needs to be modified or reconstructed, the user, who is also the designer of the system, only needs to schedule the components from the library dynamically, or complement the special functions of the system, then the framework of the system will be reused conveniently. Based on BSRRCs-RCAF, it is easily and quickly to realize the system with multi-functions.

Key words: reconfigurable computing; application framework; broadband complex signal reconnaissance; dynamic reconfiguration; hybrid reconfigurable architecture

可配置计算技术带来了系统功耗、资源合理性、多功能、可复用等方面的优势,但系统设计复杂性也使人望而却步。与其他计算技术相比,可配置计算技术在商业化方面进展缓慢,体现在缺乏兼容性很好的开发工具以及能够兼容多种体系结构的操作系统产品。可配置计算系统的设计更接近一种“手工”设计,正如文献[1]所述:利用现代工具进行基于FPGA的设计,更像一个ASIC设计过程。开发设计人员不仅需要面对硬件资源的设计开发,还要从应用的高层考虑对任务的合理分配和调度,这对设计者提出了很高的要求。

造成这种局面的根本原因在于可配置计算系统本身与硬件资源的密切相关性。一切与芯片相

关的变化都将引起重新设计。为尽可能使原来的工作得以复用、降低设计工作量,人们试图提供一些用于系统设计的中间件,很多商用IP核以及设计原语都属于这一范畴,但基于这些组件进行面向某一领域应用时,设计工作量仍很大,应用本身发生一些变化后,仍需要进行较大的设计改动、重新综合以及布局布线。此外,某些商业IP未必能够满足一些特定的需要,例如FFT计算,目前商业FFT的IP核,其最大点数到65536、最高时钟为550MHz,当来自高速ADC的数据率远大于这一指标时,将无法在某些应用的处理需求^[2]。

为了将面向特定领域计算中常用的模块规范化、共性化,便于复用与系统重构,有人提出了可

* 收稿日期:2012-06-12

基金项目:国家部委资助项目

作者简介:吴巨红(1968—),女,辽宁沈阳人,副教授,博士,E-mail:wujuhong92@sohu.com

配置计算应用框架(也称为可配置计算框架)^[1,3-5]。但出于适用范围的考虑,很多可配置计算应用框架依然沿用商业框架的思路,即提供源代码或者IP核级的模块,使系统重建停留在静态重构阶段,无法适应某些应用对动态重构的需求。本文提出了一种面向宽带复杂信号侦察领域应用的功能级动态重配置框架,该框架由二进制比特流文件组成配置文件库,并集成统一设计接口,为解决宽带信号侦察系统中一大类应用问题提供了系统快速重构与复用基础。

1 可配置计算应用框架

框架被广泛应用于解决面向整个或部分系统的可重用设计问题。本文中,将框架的概念延伸扩展到硬件层面,将能够支撑可配置计算系统重新构建的部分或者全部服务元素的集合,称之为“可配置计算(应用)框架”,这些服务元素可以根据具体应用背景进行提取,例如接口访问、资源分配与管理、任务调度、配置映射等。

可配置计算系统显著特点是:相比一般软件系统,软硬件结合得更加紧密,系统功能的重载将导致芯片上的逻辑功能重构。逻辑功能重构又可分为静态重构和运行时的动态重构,后者强调在系统运行过程中,可以根据计算的动态需要加载新配置,从而反复利用硬件资源,甚至完成超过芯片物理能力的任务。动态重构时可配置计算技术领域研究的主要问题,因此本文框架也主要关注支撑动态重构的服务元素。

目前人们建立实现的一些可配置计算框架,根据具体应用背景的不同各有侧重,例如,文献[1]为帮助设计者在设计可定制计算机(CCM)时发挥可配置系统硬件的可用、可视、可控等优势,提供了对定制计算机中一些特定应用的设计与Debug环境,包括应用程序的API接口、对硬件状态的管理、维护一个在电路设计部件与实际硬件之间的映射参考等。文献[3-4]针对多媒体应用中常见的以循环为主的规整型计算,在MorphoSys体系结构芯片上建立了一个用于Context管理和任务调度的粗粒度可配置计算框架。文献[5]针对混合结构,构建了由应用、操作系统、固件、体系结构以及硬件等多个层次组成的可配置计算框架,并实现从编程模型到结构模型的自动映射。文献[6]描述了一个面向图像处理的可配置计算框架,基于该框架可以实现面向多个比例(尺度)图像处理的可配置计算。

从文献综述来看,目前框架在可配置计算领

域使用得还不十分广泛,一方面由于可配置计算技术本身还不够成熟,应用理论尚处于发展阶段,另一方面,可配置计算系统可定制的特殊性,使其应用框架的实现较一般软件系统困难很多,需要在设计时从功能模块的粒度、应用自身的计算特点、目标平台的体系结构等多方面综合考虑,在框架的适用性与性能之间取得平衡。但是从公开发表的为数不多的参考文献来看,可配置计算框架的功能和作用显然得到了认可,难度在于满足各类应用需求的实现技术上。

2 宽带复杂电磁信号侦察可配置计算应用框架

本文基于商业FPGA芯片以及扩展的混合SoPC结构模型,提出并设计实现了一个面向宽带复杂电磁信号侦察应用的功能级可配置计算应用框架,以下简称BSRRCS-RCAF(Reconfigurable Computing Application Framework for the domain-specific of the Broadband Signal Reconnaissance Reconfigurable Computing System)。目的在于支撑宽带复杂信号系统在多种工作模式下的快速构建和切换,以便从多种角度获得对信号的感知和分析测量,从而获得更可靠的电子侦察情报信息。功能包括以下两个方面:

(1) 自动捕获应用需求(工作模式),并将其映射到计算平台的实现逻辑(配置文件)上,为顶层用户提供一个可视化的软硬件统一设计界面,使用户可以根据具体应用意图定制系统设计实现方案,实现“应用即设计”,屏蔽实现细节,降低使用、维护和系统扩充的门槛;

(2) 基于商业EDA设计工具以及标准化的设计接口,建立面向领域应用的规范化、标准化设计流程,并基于不断完善的算法库,实现系统功能级的模块化、可组合、可复用,降低再设计难度。

2.1 扩展SoPC混合可配置结构模型

BSRRCS-RCAF基于以下扩展SoPC混合可配置结构模型,见图1,其中RFs(Reconfigurable Fabrics)表示具有可配置结构的计算资源。该结构模型中嵌入式CPU(eCPU)是整个系统的配置控制器,它对系统内所有RFs资源进行统一管理、调度和使用。该结构的优势是:①eCPU与RF资源具有不同程度的耦合关系,能够支持系统对多种灵活配置的需要;②同时拥有片内和片外可扩展RFs资源,能够根据需求选择不同的通信延迟开销;③具有独立的数据和配置路径,从物理上确保计算与配置的并行。

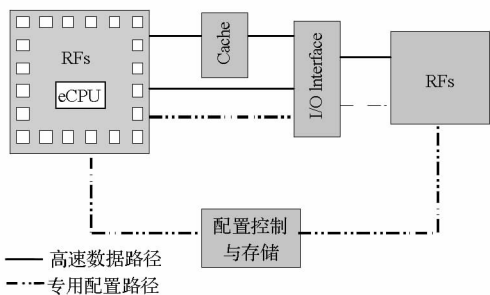


图 1 扩展 SoPC 混合可配置结构模型

Fig. 1 The extended hybrid reconfigurable structure model based on SoPC

结构模型中扩展的片外存储器,能够满足信号侦察系统中对大尺寸、功能(算法)级任务模块的保存,支持可组合应用的阶段可配置信号处理流程,为构建 BSRRCS-RCAF 配置组件库提供了必要的存储保障。

2.2 BSRRCS-RCAF 的层次结构

为了更合理组织 BSRRCS-RCAF 的公共服务体系与配置组件库,本文建立了基于模型、视图与控制器(Model-View-Controller, MVC)机制的层次化可配置计算应用框架。MVC 是一种成熟固化的设计模式,其本质是将数据及其处理、接口以及运行控制分离并且使每一部分构件化、标准化,当系统中的一部分发生改变时,仍可以以同样的方式与其他部分发生联系。基于 MVC 设计的系统具有模块化、可复用、便于升级扩展等优点。

基于 MVC 的 BSRRCS-RCAF 在应用与计算部件之间搭起了一座桥梁,见图 2,它将宽带复杂电磁信号侦察这一大类应用问题收纳其中,建立一致的设计接口、可不断扩充的组件库、具有灵活智能的控制机制以及兼顾应用与平台结构的计算模型。基于该框架,可实现在一大类应用领域中,根据需要快速灵活地构建系统,实现资源与设计复用,方便系统升级和扩展。该框架组成如下:

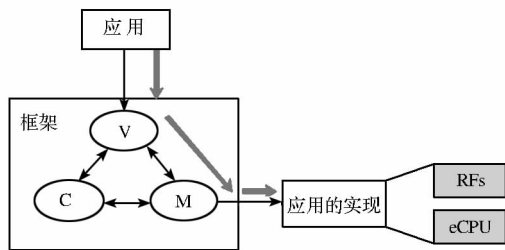


图 2 BSRRCS-RCAF 的作用

Fig. 2 The function of BSRRCS-RCAF as a bridge between application and system realization

1) 应用:是整个框架的输入,当来自应用的输入信息发生变化时,在系统的底层将对应一个

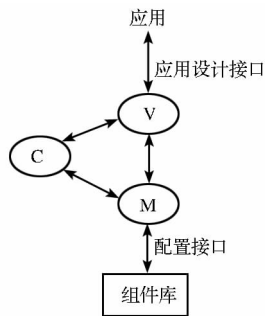


图 3 BSRRCS-RCAF 的层次结构

Fig. 3 The hiberarchy of BSRRCS-RCAF

不同的实现;

2) MVC,是 BSRRCS-RCAF 的核心。M 是所有与宽带复杂信号侦察相关的数据以及数据处理;V 是从应用顶层所见的系统设计,是 M 的可视化体现;C 是 MVC 中最主动活跃的部分,它控制通过视图捕获应用、启动模型运行、控制各级映射、调度和管理任务与资源、响应来自统一设计接口的通信等;

3) 统一设计接口,是服务于“软硬件统一设计”的各类规范接口,针对同一类通信使用相同类型的接口,包括一些虚拟接口;

4) 可配置组件库:包括框架内所有可复用、可组合的部分,例如阶段可配置流程、配置点任务模块、接口 IP 核以及构成这些组件的基本构件(原语或者驱动模块等)。

2.3 BSRRCS-RCAF 公共服务体系

为系统快速构建与复用,BSRRCS-RCAF 提供了以下四类公共服务体系,基于该公共服务体系,系统可以进行组件化的装配、管理和使用。

1) 设计视图、控制代理与资源管理器

BSRRCS-RCAF 将 GUI 中体现用户系统设计需求的部分称为“设计视图”,每一个设计视图都是可配置系统向用户开放的系统设计集合的子集。框架通过设计视图,截获顶层用户需求,用户通过设计视图参与完成满足当前应用的系统设计,控制器控制截获应用需求,并转化为设计视图中的元素。

控制器由一组控制代理组成,负责控制截获应用需求,生成设计视图,根据设计视图生成数据集,该数据集被用于驱动计算到平台的映射。

资源管理器负责对组件模块的组合使用,构建符合需求的计算模块,并管理和维护计算资源的使用状态。

2) 基于扩展 SoPC 混合可配置结构的统一设计接口

在统一设计接口规范之下,针对同一类型的通信,使用相同类型的接口,这样做的好处是:所有同类型组件遵循同类接口规范,便于规范管理各类通信,便于组件库的丰富扩展以及系统的动态重构。

基于商业 FPGA,必须使用芯片对用户开放的访问接口,虽然性能上不如某些特别定制的可配置芯片,但具有标准规范、访问控制简单的优势,特别是依托现有成熟可复用的接口控制 IP,使实现接口控制的难度极大降低。

BSRRCS-RCAF 中用到的设计接口分为数据接口和配置接口,其中数据接口用于系统中各类计算模块之间的数据交换,包括 SoPC 与其他 RFs 芯片之间的通信接口和片上静态逻辑之间,或者静态逻辑与动态逻辑之间的通信接口;配置接口用于完成对配置数据流的访问、加载和存储。BSRRCS-RCAF 统一设计接口见表 1 所示(包括

了两个方向的接口)。

3) 多层次动态配置策略

复杂电磁信号侦察领域信号处理的特点是以高速串行计算任务为主。当接收机能够覆盖大的带宽时,电磁环境更加密集复杂,多种体制信号交织混叠,此时能够满足多种应用需求、支持多种工作模式的信号侦察系统将更加适用。针对这一特点,BSRRCS-RCAF 提供了参数级、局部模块级以及整体芯片级的多种动态配置策略。表 2 列出各种动态配置策略的实现特点以及使用条件。

4) 面向 BSRRCS 特定领域的组件库

BSRRCS-RCAF 将复杂信号侦察中典型的信号处理流程、关键算法等预先设计、实现,生成模块化的配置比特流文件,保存在片外存储器上,根据需要进行组合应用。对这些模块的数据交换和模块封装遵从表 1 中规定的设计接口。嵌入式处理器根据具体调度算法实现对模块的使用调度。

表 1 BSRRCM-RCAF 统一设计接口列表

Tab. 1 The list of unified design interfaces of BSRRCM-RCAF

接口类型	接口名称	接口功能
数据接口	ProtoBus	嵌入式处理器与片上总线接口
	IPtoBus	各类 IP 资源与总线之间接口,提供各类片上静态逻辑通过总线与 eCPU 及其他各类静态逻辑之间的接口
	DataIO	用于 SoPC 与其他可配置芯片、或者可配置芯片之间的高速数据交换
	SMtoRM	用于片上静态逻辑与动态逻辑之间的双向数据接口
配置接口	Conf_port_par	提供局部动态配置比特流加载到 RFs 配置存储器的芯片内部接口
	Conf_port_glob	提供对 FPGA 芯片进行全局配置的配置接口
	Conf_port_Para	提供对开放设计参数进行配置的接口
	Mem_port	提供对保存在片外存储器上配置文件的存储访问接口

表 2 BSRRCS-RCAF 多层次动态配置策略

Tab. 2 The multi-level strategies of dynamic reconfiguration of BSRRCM-RCAF

配置策略	使用配置接口	适用情况
参数级	Conf_port_Para	用于整个系统处理流程以及信号处理算法不发生变化,但算法适用条件、处理精度或者处理效果等发生变化的情况
局部模块级	Conf_port_par	在信号处理流程不变的情况下,某些关键算法改变
整体芯片级	Conf_port_glob	由应用需求以及工作模式引起的信号处理流程的变化

3 在宽带信号侦察领域中的应用

3.1 应用背景

早期的信号侦察系统都具有明确单一的应用意图,通过与特定频段内已知信号比对来发现和

识别威胁信号,生成电子情报。这类信号侦察系统处理流程是“单一的和确定的”^[7],很难随着信号环境的变化具有灵活适应性,且对于先验知识有很强依赖性^[8],对未知信号或者瞬态信号缺乏处理能力。随着辐射源数量的增多、体制的多样化以及不断向宽带化发展,电磁信号环境变得越

来越密集复杂,在某些频段内雷达和通信信号交织混叠现象严重,传统方法难以分辨。可配置的信号侦察系统支持非确定型信号处理流程,能根据信号环境的变化有针对性地动态选择工作模式和配置算法,具有多功能和灵活适应性,能够适应现代宽带复杂信号侦察系统的应用需求。本文提出和设计的 BSRRCs-RCAF 为宽带复杂信号侦察系统的快速设计与重构复用提供了有力的支撑。

3.2 阶段流程、配置点算法以及设计参数

该系统基于“多阶段可配置信号处理流程及有限配置点”的设计思想,所有阶段流程以及配置点算法模块都预先保存在配置组件库中。BSRRCs-RCAF 支持多层次动态配置策略,可通过组合复用阶段流程、配置点算法以及给系统设置不同参数,实现工作在多种模式下的应用设计。

配置组件库中的阶段流程由静态和动态逻辑两部分构成,静态逻辑主要包含服务于该典型流程的结构、接口和通信等主要功能,也可包括一些复用程度较高的典型功能算法,动态逻辑主要是构成信号处理流程的关键典型算法(即“配置点模块”)。下面分别介绍多种配置策略的应用。

1) 阶段可配置信号处理流程

阶段可配置处理流程通过组合、复用可以支撑多种应用下的信号处理流程。例如多种工作模式下都需要数字下变频(DDC)和 FFT 计算,将 DDC、FFT 计算模块以及一些必要的控制、通信接口一起封装、实现,保存成配置比特流形式,以便组合复用、支持多种应用需求下的工作模式,见图 5。对阶段可配置信号处理流程进行动态配置时,采用的配置策略是整体芯片级的动态配置。

2) 配置点模块

在典型信号处理流程上预留配置点,以便对关键算法进行动态配置,这样做的好处是能够在同一种流程下方便地对系统能力进行调整和更新,使系统具有灵活性与适应性。通过配置点算法,系统能够在不改变工作模式时根据外部电磁环境或者应用的需求快速变换更加适用的算法。

以信号的调制类型分析算法为例,当信号环

境以通信信号为主时,可在配置点上动态加载通信信号调制类型分析算法,当信号环境以雷达信号为主时,则可将算法快速配置为雷达信号的分析算法。或者根据信号噪声条件、应用对实时性的需求等,有选择性地配置相应算法。对配置点模块进行动态配置时,采用局部动态配置策略。

3) 关键设计参数

当系统工作模式确定、信号处理流程明确时,可以根据应用需求对某些系统关键设计参数进行动态改变,以满足对算法适用条件以及系统对处理精度或者处理效果的设计要求,例如 FFT 点数的变化可以改变频率分辨率,信道化带宽可以改变信号的瞬时分析带宽,信号检测的时域或者频域门限将改变接收机所适用的噪声条件等。对这些设计参数的动态变化,可以采用参数级动态配置策略。

3.3 基于 BSRRCs-RCAF 构建可配置宽带信号侦察系统设计流程

基于 BSRRCs-RCAF 框架,用户在设计构建一个具体的宽带信号侦察系统时,可以通过 GUI 视图,引导用户一步步进入设计视图,通过工作模式、关键算法以及关键设计参数的选择,完成基于图 1 所示的扩展 SoPC 混合可配置结构平台的宽带复杂信号侦察系统的快速设计。当某特定应用所需要的配置不在配置组件库中时,需要遵循 BSRRCs-RCAF 统一设计接口补充设计生成配置文件,除此之外的系统构建全部是基于动态配置的快速过程,其设计过程见图 4。

3.4 动态配置性能

由于 BSRRCs-RCAF 基于商业 FPGA 平台,其性能主要取决于商业标准化设计接口,其性能主要通过配置时间来衡量。表 3 根据具体测试实验^[9]整理了参数级、局部模块级以及整体芯片级的动态配置策略时间开销,以说明不同配置策略下的配置时间量级。根据表 3,基于图 5 的系统快速重构过程最多是秒量级,即当系统从一种工作模式切换到另一种工作模式下,只需要秒量级的动态重构时间,具有很好的系统级重构性能。

表 3 BSRRCs-RCAF 多层次动态配置时间开销

Tab. 3 The time overhead of multi-level strategies of dynamic reconfiguration of BSRRCM-RCAF

配置策略	配置时间	配置时间说明
参数级动态配置策略	几百纳秒	含 eCPU 控制读写时间
模块级局部动态配置策略	几百毫秒	含 eCPU 调度时间,模块尺寸为 KByte 量级
整体芯片级动态配置策略	数百毫秒至 1、2 秒,平均配置速度为 290ms/MByte	与芯片整体容量相关

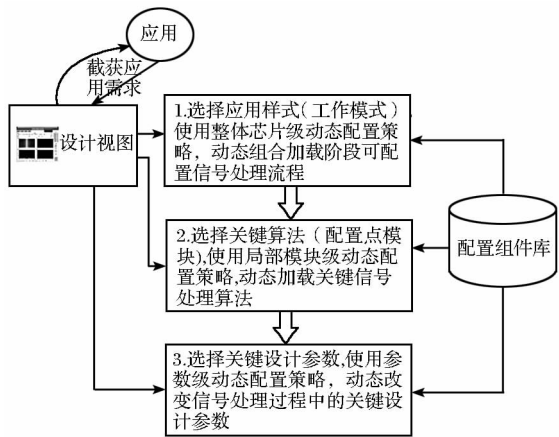


图4 基于BSRRCs-RCAF的可配置计算系统设计使用流程
 Fig. 4 The design & use flow of reconfigurable computing system based on BSRRCs-RCAF

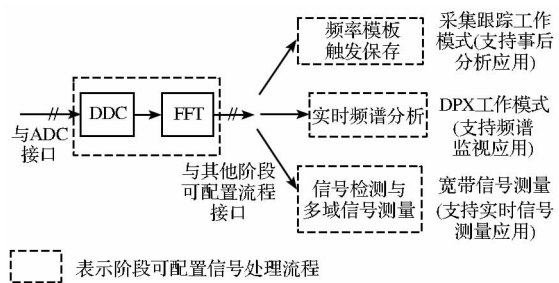


图5 阶段可配置流程的组合复用
 Fig. 5 The combination and reuse of staged reconfigurable processing

4 结论

由带宽和辐射源数量增加、体制多样化所带来的电磁信号环境日益密集复杂、雷达信号与通信信号交织混叠、瞬态信号大量存在的特点,使得宽带复杂信号侦察系统的设计实现必须要能够灵活适应多种应用模式需求,要能够支持非确定型的多种信号处理流程,能够根据信号环境的变化有针对性地动态选择关键算法和设计参数,可配置计算技术为实现上述灵活性提供了很好的解决方案,但是可配置计算系统设计的难度与复杂度成为制约瓶颈。本文提出和设计实现了一种面向宽带复杂信号侦察领域的功能级可配置计算框架BSRRCs-RCAF,该框架将领域应用中具有共性的计算与功能模块抽取和集中起来,形成二进制比特流配置文件库,并提供构建宽带信号侦察系统的公共服务体系,基于公共服务体系以及配置文件库,当需要修改应用模式或者重新构建宽带信

号侦察系统时,只需要在现有框架下动态调用配置组件库,或者遵循框架的统一设计接口完善补充组件库中的特定功能部分,整个系统设计框架将得到快速方便复用。性能测试表明基于BSRRCs-RCAF的宽带信号侦察系统的动态重构开销只需要秒量级时间开销,具有良好的系统级动态重构能力。

参考文献 (References)

[1] Slade A L, Nelson B E, Hutchings B L. Reconfigurable computing application frameworks [C]// Proceedings of the 11th Annual IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM'03), 2003; 251 - 262.

[2] 张家钢. 大时宽带宽积雷达信号脉冲压缩技术研究及实现 [D]. 长沙:国防科技大学, 2010; 15 - 16.
 ZHANG Jiagang. Study and implementation of pulse compression in large time-bandwidth product radar [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010; 15 - 16. (in Chinese)

[3] Maestre R, Kurdahi F J, Fernandez M, et al. A framework for reconfigurable computing: task scheduling and context management [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2001, 9(6): 858 - 873.

[4] Maestre R, Fernandez M, Hermida R, et al. A framework for scheduling and context allocation in reconfigurable computing [C]// Proceeding of the 12th International Symposium on System Synthesis, ISSS '99, IEEE Computer Society Washington, DC, USA, 1999; 134 - 140.

[5] Wu Q, Xie W, Wang W. An architecture and programming frame work for dynamic reconfigurable computing systems [C]// CASES '01 Proceedings of the 2001 international conference on Compilers, architecture, and synthesis for embedded systems, ACM New York, 2001; 116 - 125.

[6] Porter R, Frigo J, Conti A, et al. A reconfigurable computing framework for multi-scale cellular image processing [J]. Microprocessors & Microsystems, 2007, 31(8): 546 - 563.

[7] Zain-ul-Abdin, Bertil Svensson. Evolution in architectures and programming methodologies of coarse-grained reconfigurable computing [J]. Microprocessors and Microsystems, 2009, 33: 161 - 178.

[8] 张国柱. 雷达辐射源识别技术研究 [D]. 长沙:国防科技大学, 2005; 1 - 3.
 ZHANG Guozhu. Research on emitter identification [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005; 1 - 3. (in Chinese)

[9] 吴巨红. 复杂电磁信号侦察处理机可配置计算关键技术研究 [D]. 长沙:国防科技大学, 2012; 80 - 89.
 WU Juhong. Research on key technology of reconfigurable computing on complex electromagnetic signal reconnaissance processor [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012; 80 - 89. (in Chinese)