

嵌入式技术与应用丛书

# 基于BF53x DSP处理器的 $\mu$ Clinux开发详解

李云栋 编著

技术前沿，紧贴实际

结合作者多年产品开发的经验，重点阐述数字监控产品驱动程序及视频编码算法的开发流程

实例丰富，代码详尽

给出了基于BF53x处理器的网络摄像机的开发实例，且书中代码均可在华信教育资源网免费下载

线清晰，层次分明

3F53x处理器在视频监控中的应用为主线，详细地介绍了基于 $\mu$ Clinux操作系统开发产品的各步骤

 电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

嵌入式技术与应用丛书

# 基于 BF53x DSP 处理器的 $\mu$ Clinux 开发详解

李云栋 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

## 内 容 简 介

Blackfin 系列处理器是面向新兴互联网市场开发的低功耗处理器,应用于图像、语音、视频通信和数据处理等众多需要密集运算和低功耗要求的领域。Blackfin 处理器集 RSIC 处理器和 DSP 的优点于一身,既可满足密集运算的要求,又具有良好的控制功能。Blackfin 的这种特性使得它可以运行像  $\mu$ Clinux 这种复杂的操作系统,因操作系统屏蔽了硬件的复杂性,用户开发应用程序基本可以做到与硬件无关,因而有效降低了产品开发的复杂度。

本书以 Blackfin 处理器在视频监控中的应用为主线,详细介绍了基于  $\mu$ Clinux 操作系统开发产品的各个步骤,包括 Bootloader 程序、 $\mu$ Clinux 内核、驱动程序、文件系统以及 MPEG-4 视频编码算法的优化,最后给出一个网络摄像机的开发实例。

本书结合作者多年产品开发的经验,重点阐述了驱动程序及视频编码算法的开发,具有较强的实用性,适合企业研发工程师、高校研究生及高年级本科生使用,也可作为嵌入式系统培训教材使用。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

基于 BF53x DSP 处理器的  $\mu$ Clinux 开发详解/李云栋编著. —北京:电子工业出版社, 2011.7

(嵌入式技术与应用丛书)

ISBN 978-7-121-13777-8

I. ①基… II. ①李… III. ①微处理器, ARM ②Linux 操作系统 IV. ①TP332 ②TP316.89

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 106169 号

策划编辑:田宏峰

责任编辑:田宏峰

印 刷:北京天宇星印刷厂

装 订:三河市皇庄路通装订厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:18.75 字数:480 千字

印 次:2011 年 7 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:49.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zlts@phei.com.cn](mailto:zlts@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线:(010) 88258888。

# 前言

数字视频监控技术是安防监控系统的发展方向 and 趋势,是当前非常活跃的技术领域。**Blackfin** 处理器是视频监控产品主流的开发平台之一,是 ADI 公司面向新兴因特网市场开发的低功耗处理器,适合图像、语音、视频通信和数据处理等众多需要密集运算和低功耗要求的领域。**Blackfin** 处理器集 RSIC 处理器和 DSP 的优点于一身,既可满足密集运算的要求,又具有良好的控制功能。**Blackfin** 的这种特性使得它可以运行像  $\mu$ Clinux 这种复杂的操作系统,由于该操作系统屏蔽了硬件的复杂性,用户开发应用程序基本可以做到与硬件无关,因而有效降低了产品开发的复杂度。

Linux 操作系统最早是由芬兰的 Linus Torvalds 于 1991 年 8 月在芬兰赫尔辛基大学上学时发布的,后来经过众多世界顶尖的软件工程师的不断修改和完善,Linux 得以在全球普及开来,在服务器领域及个人桌面系统方面得到越来越多的应用。近年来,随着嵌入式系统的普及,Linux 操作系统的装机量呈爆炸式增长,目前已经成为全球第二大操作系统。

本书以 BF536 处理器在视频监控中的应用为主线,详细介绍了基于  $\mu$ Clinux 操作系统开发产品的各个步骤,包括 Bootloader 程序、 $\mu$ Clinux 内核、驱动程序、文件系统以及 MPEG-4 视频编码算法的优化,最后给出一个网络摄像机的开发实例。各章的安排如下:第 1 章介绍视频监控系统的概况;第 2 章介绍 **Blackfin** 处理器的体系架构;第 3 章讨论嵌入式  $\mu$ Clinux 交叉开发环境的建立;第 4 章讨论 Bootloader 程序 U-Boot 在 **Blackfin** 处理器上的移植;第 5 章和第 6 章给出  $\mu$ Clinux 操作系统内核及文件系统的构建;第 7 章重点讨论音频、视频、**Blackfin** 外设接口等驱动程序的开发;第 8 章重点研究 MPEG-4 视频编码算法的实现以及在 BF536 处理器上的优化;第 9 章介绍多媒体编解码框架 FFMPEG 在 **Blackfin** 处理器上的移植工作;第 10 章给出一个基于 BF536 处理器的网络摄像机的开发实例。

本书结合作者多年产品开发的经验,重点阐述了驱动程序及视频编码算法的开发,具有较强的实用性,适合企业研发工程师、高校研究生及高年级本科生使用,也可作为嵌入式系统培训教材使用。

书中实例与代码均来自于实际的网络摄像机产品开发,但是由于作者水平有限,时间仓促,书中难免存在缺点和错误,欢迎广大读者和专家批评指正。作者的联系方式为 liyundong@ncut.edu.cn。

在本书编写过程中,作者的领导、同事及家人都给予了充分的理解和支持,在此表示衷心的感谢,并对 ADI 公司在以往工作中给予的帮助表示最诚挚的感谢。另外,书中引用了许多专家学者和 Linux 自由社区工程师们的研究成果,在此一并表示深深的敬意和感谢。

李云栋

2011 年 4 月于北方工业大学

# 目 录

## CONTENTS

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 第 1 章 视频监控系统概述 .....                | 1  |
| 1.1 视频监控系统的发展阶段 .....               | 1  |
| 1.2 视频监控系统的发展趋势 .....               | 3  |
| 1.2.1 高清化 .....                     | 4  |
| 1.2.2 智能化 .....                     | 4  |
| 1.3 智能视频分析 .....                    | 5  |
| 1.4 Blackfin 处理器在智能视频监控系统中的应用 ..... | 6  |
| 第 2 章 Blackfin 处理器体系架构 .....        | 8  |
| 2.1 Blackfin 处理器基本特征 .....          | 8  |
| 2.2 Blackfin 内核架构 .....             | 9  |
| 2.2.1 Blackfin 内核结构 .....           | 10 |
| 2.2.2 内存与总线结构 .....                 | 15 |
| 2.2.3 指令的并发操作 .....                 | 17 |
| 2.3 Blackfin 系列处理器 .....            | 17 |
| 2.3.1 BF592 处理器 .....               | 18 |
| 2.3.2 BF50x 处理器 .....               | 19 |
| 2.3.3 BF51x 处理器 .....               | 20 |
| 2.3.4 BF52x 处理器 .....               | 20 |
| 2.3.5 BF531/532/533 处理器 .....       | 21 |
| 2.3.6 BF534/536/537 处理器 .....       | 22 |
| 2.3.7 BF54x 处理器 .....               | 23 |
| 2.3.8 BF561 处理器 .....               | 24 |
| 第 3 章 构建嵌入式 $\mu$ Clinux 开发环境 ..... | 26 |
| 3.1 嵌入式 $\mu$ Clinux 概述 .....       | 26 |
| 3.2 主机开发环境 .....                    | 29 |
| 3.3 建立交叉编译环境 .....                  | 34 |
| 3.3.1 安装 GCC 工具包 .....              | 34 |
| 3.3.2 GCC 编译器 .....                 | 34 |
| 3.3.3 Binutils .....                | 35 |



|       |                      |     |
|-------|----------------------|-----|
| 3.4   | 目标板                  | 36  |
| 第4章   | 移植 Bootloader 程序     | 37  |
| 4.1   | U-Boot 体系结构          | 37  |
| 4.2   | U-Boot 的编译           | 39  |
| 4.3   | U-Boot 的移植           | 39  |
| 4.3.1 | 板级配置文件               | 40  |
| 4.3.2 | PLL 设置               | 52  |
| 4.3.3 | 串口设置                 | 54  |
| 4.3.4 | SDRAM 设置             | 54  |
| 4.3.5 | Flash 的移植            | 59  |
| 4.4   | U-Boot 的启动过程分析       | 67  |
| 4.4.1 | 处理器初始化               | 68  |
| 4.4.2 | 板级初始化                | 70  |
| 4.4.3 | $\mu$ Clinux 的启动过程   | 71  |
| 4.5   | U-Boot 映像的烧写与运行      | 73  |
| 4.5.1 | 烧写 U-Boot 映像         | 73  |
| 4.5.2 | Blackfin 启动模式        | 75  |
| 4.6   | U-Boot 常用命令          | 77  |
| 第5章   | $\mu$ Clinux 的剪裁与配置  | 79  |
| 5.1   | 获取 $\mu$ Clinux 源代码  | 79  |
| 5.2   | 编译 $\mu$ Clinux      | 80  |
| 5.3   | 烧写 $\mu$ Clinux 映像   | 83  |
| 5.4   | $\mu$ Clinux 高级配置与剪裁 | 85  |
| 5.4.1 | 内核高级配置               | 85  |
| 5.4.2 | $\mu$ Clinux 驱动程序配置  | 87  |
| 5.4.3 | $\mu$ Clinux 的剪裁     | 91  |
| 5.5   | $\mu$ Clinux 启动过程分析  | 91  |
| 第6章   | 构建 $\mu$ Clinux 应用系统 | 93  |
| 6.1   | 根文件系统                | 93  |
| 6.2   | 生成根文件系统              | 95  |
| 6.3   | 配置根文件系统              | 96  |
| 6.4   | 自动运行脚本文件             | 100 |
| 第7章   | 驱动程序开发               | 102 |
| 7.1   | 如何编写驱动程序             | 103 |
| 7.2   | GPIO 驱动程序的设计         | 106 |

|       |                             |     |
|-------|-----------------------------|-----|
| 7.2.1 | BF536 处理器的 GPIO 接口          | 106 |
| 7.2.2 | GPIO 的 $\mu$ Clinux 驱动程序    | 110 |
| 7.3   | I <sup>2</sup> C 驱动程序的设计    | 113 |
| 7.3.1 | I <sup>2</sup> C 工作原理       | 113 |
| 7.3.2 | I <sup>2</sup> C 驱动程序设计     | 115 |
| 7.4   | 图像采集驱动程序                    | 120 |
| 7.4.1 | 数字视频接口                      | 120 |
| 7.4.2 | PPI 接口                      | 124 |
| 7.4.3 | SAA7113 驱动程序                | 132 |
| 7.4.4 | CMOS 图像传感器 OV7660 驱动程序      | 145 |
| 7.4.5 | YUV 与 RGB 的转换               | 152 |
| 7.5   | SPORT 接口驱动程序                | 154 |
| 7.5.1 | SPORT 的硬件组成                 | 155 |
| 7.5.2 | SPORT 的工作模式                 | 157 |
| 7.5.3 | SPORT 的编程模式                 | 158 |
| 7.5.4 | SPORT 通信的 $\mu$ Clinux 驱动程序 | 164 |
| 7.5.5 | WM8731 音频驱动程序               | 174 |
| 7.6   | SPI 接口驱动程序                  | 195 |
| 7.6.1 | SPI 的硬件组成                   | 195 |
| 7.6.2 | SPI 内部结构及工作模式               | 196 |
| 7.6.3 | SPI 寄存器设置                   | 198 |
| 7.6.4 | SD/MMC 驱动程序                 | 202 |
| 第 8 章 | MPEG-4 视频编码的实现与优化           | 205 |
| 8.1   | MPEG-4 视频编码算法               | 205 |
| 8.1.1 | MPEG-4 的框架与级                | 206 |
| 8.1.2 | MPEG-4 编码结构                 | 207 |
| 8.2   | XVID 视频编码程序                 | 209 |
| 8.3   | 算法优化                        | 213 |
| 8.3.1 | 算法优化的基本原则                   | 213 |
| 8.3.2 | L1 存储器                      | 215 |
| 8.3.3 | Memory DMA                  | 217 |
| 8.3.4 | 视频专用指令                      | 223 |
| 8.3.5 | SAD 的优化                     | 226 |
| 8.3.6 | 插值的优化                       | 229 |
| 8.3.7 | DCT/IDCT 的优化                | 232 |
| 第 9 章 | FFMPEG 在 Blackfin 处理器上的应用   | 247 |
| 9.1   | FFMPEG 框架结构                 | 247 |

|               |                          |            |
|---------------|--------------------------|------------|
| 9.2           | FFMPEG 的编译 .....         | 248        |
| 9.3           | 基于 FFMPEG 开发视频编码程序 ..... | 253        |
| 9.4           | 基于 FFMPEG 开发视频解码程序 ..... | 262        |
| <b>第 10 章</b> | <b>网络摄像机开发实例 .....</b>   | <b>269</b> |
| 10.1          | 网络摄像机的功能 .....           | 269        |
| 10.2          | 网络摄像机硬件设计 .....          | 270        |
| 10.3          | 网络摄像机软件设计 .....          | 280        |
| 10.4          | 网络摄像机发展趋势 .....          | 288        |
| 10.4.1        | 高清化 .....                | 288        |
| 10.4.2        | 智能化 .....                | 289        |
| 10.4.3        | 标准化 .....                | 289        |
| <b>参考文献</b>   | <b>.....</b>             | <b>290</b> |



## 视频监控系统概述

安全防护系统是指利用技术手段对人民群众生命、财产安全进行防范和保护的系统工程。安防系统产品包括视频监控系统、对讲系统、门禁及停车系统和防盗报警系统四大部分，其中视频监控系统是发展最为迅速、技术最为先进的组成部分，同时也是市场份额最大的部分。

从最初的模拟监视器到现在的数字网络摄像机，视频监控系统的发展已经有几十年的历史。在视频监控的发展初期，基本以小规模应用为主，但是最近几年由于我国大力推进“平安城市”、“3111 工程”建设，视频监控系统的应用规模出现了质的飞跃，新技术层出不穷，不断出现创新型的产品。目前视频监控系统已经进入高速发展时期，产品和市场良性互动，整个产业链空前繁荣，创造出良好的社会效益和经济效益。



### 1.1 视频监控系统的发展阶段

视频监控系统类的产品占据安防系统行业 50% 左右的市场份额，是维护社会安定团结、保护人民群众生命财产安全的重要手段。近年来随着“奥运会”、“世博会”等重大工程的实施，视频监控系统得到长足的发展。视频监控系统发展到今天，已经经历了三个重要的发展阶段：模拟产品阶段、模数混合产品阶段和数字化网络视频监控阶段。

#### 1) 模拟监控系统

视频监控的发展初期主要采用模拟产品，称为闭路电视监控系统。系统由模拟摄像机、同轴电缆、监视器、模拟矩阵、键盘等部件组成。部署在监控现场的模拟摄像机输出的模拟视频信号通过同轴电缆直接传输到监视器进行显示，如果有多个摄像机的信号需要显示在监视器上，则中间还需要串联一个模拟矩阵，通过键盘切换分时显示各摄像机采集的画面。录像文件存储在录像带中。

模拟监控系统的局限性是显而易见的，主要包括以下几方面：

(1) 同轴电缆传输模拟信号容易造成信号损失，传输距离有限制，并且模拟信号容易受到外界环境的干扰，出现图像失真现象。

(2) 模拟系统不利于大规模部署, 通常都是单独的小系统, 远程监控更是无从谈起。

(3) 模拟系统不利于图像信息的保存和取证。图像信息是重要的证据, 模拟图像在存储方面非常不方便, 不利于图像的调取和查看历史图像。

## 2) 模数混合监控系统

既然模拟系统存在这么多的局限性, 所以基于 PC 的监控系统一经出现就得到广大用户的好评。PC 视频监控系统的出现得益于视频压缩技术的进步, 各种基于 DSP 或者 ASIC 的压缩卡的出现使得监控系统进入半数字时代。前期的混合监控系统由 PC (工控机)、视频压缩卡、摄像机、电缆等部分组成。摄像机输出的模拟视频信号通过同轴电缆传输到监控中心, 之后通过 BNC 端子进入视频压缩卡, 经过 A/D 转换为数字信号然后进行实时显示和压缩。之所以把基于 PC 的系统称为模数混合监控系统是因为前端传感器到 PC 之间的信号仍然是模拟的, 进入压缩卡后才转变为数字信号, 因此它不是纯粹的数字系统。

基于 PC 的多媒体监控系统存在的问题主要是稳定性问题。由于 PC 多采用 Windows 操作系统, 容易被病毒攻击, 运行的软件也不是唯一的, 容易出现死机现象。另外显示卡、压缩卡的兼容问题也是影响用户使用的因素。正所谓时势造英雄, 针对 PC 监控系统的固有问题, DVR (Digital Video Recorder) 应运而生。DVR 即硬盘录像机, 是基于嵌入式系统的视频采集、压缩和存储设备。由于 DVR 采用嵌入式操作系统和嵌入式处理器技术, 因此不容易出现死机现象, 彻底解决了 Windows 系统不稳定的缺陷, 设备的可靠性大大增强。DVR 使用的主流嵌入式 DSP 处理器包括 TI、ADI Blackfin、NXP Trimedia 等系列。由于 DVR 具有运行稳定、操作方便、存储功能强大等优点, 所以很快得到市场的认可, 几乎达到一统市场的盛况。即使在当今数字监控系统大行其道, 的情况下 DVR 仍然占据很大的市场份额。同样由于前端摄像机和 DVR 之间的信号仍然是模拟信号, 因此基于 DVR 的监控系统也被称为模数混合监控系统。

## 3) 数字监控系统

真正理想的数字监控系统应该是从前端图像采集单元、图像编码单元到传输线路到后端解码单元、显示单元和存储分发单元都是数字化的。不幸的是这样纯粹的数字系统还不多见, 主要是由于数字显示设备价格还比较昂贵。数字监控系统的优点是显而易见的, 信号从采集到显示、存储中间的过程中, 除掉压缩环节外信号是没有损失的 (最大的损失在于视频压缩过程)。

目前典型的数字网络视频监控系统包括以下几部分: 网络摄像机、监控 PC、IPSAM/NAS 存储设备、以太网设备等, 其中网络摄像机是核心设备。网络摄像机主要由四部分组成: 图像采集单元、数据压缩单元、网络传输单元和主控单元。图像采集单元负责获取前端图像传感器输出的数字视频信号; 压缩单元负责把原始视频信号去除相关性, 按照某种标准格式压缩为数字码流; 网络传输单元则是负责压缩码流的分发; 图像采集单元、数据压缩单元和网络传输单元在主控单元的协调下分工协作, 共同完成网络摄像机的功能。通常网络摄像机内嵌 Web 服务器, 用户可以通过设备的 IP 地址或者域名远程登录到网络摄像机, 从而实现远程查看实时视频和控制网络摄像机。视频压缩

算法是网络摄像机的核心,目前主流算法包括 MPEG-4 和 H.264,我国自主知识产权的 AVS 标准也有一定应用,但是在安防领域的应用前景尚不明朗。另外 M-JPEG 标准在交通领域和国外市场也有较普遍的应用。

数字监控系统的优点是显而易见的,主要包括以下几点:

- (1) 数字视频监控系统是基于 IP 技术的,采用普通双绞线即可完成视频图像的传输。相对于模拟时代的同轴电缆,施工方便很多,工程量大为减少。
- (2) 数字视频监控系统的抗干扰性明显优于模拟系统。
- (3) 数字视频监控获得的视频文件由于经过图像压缩过程,数据量相对较小,易于存储、分发和取证。
- (4) 基于 IP 技术的视频传输使得远程监控成为可能,而且便于大规模部署。用户可以通过有线或者无线等各种接入技术登录到设备,远程查看视频图像,真正做到信息共享。
- (5) 数字技术的采用使安防系统兼具 IT 化趋势,促进了视频监控与业务流程的融合,更好地实现监控为管理服务的目的。



## 1.2 视频监控系统的发展趋势

数字视频监控系统的典型特征是数字化和网络化,信息技术的发展为安防监控行业带来翻天覆地的变化,传统的“监视器+保安”的单机监控模式被彻底颠覆。信息技术的应用使得监控系统与被监控对象的业务流程发生融合,例如在工厂中视频监控可以和工厂的生产过程自动化系统、办公自动化系统有机结合在一起,组成功能强大的工厂调度系统。在这种新形势下,监控已不是单纯的监控,不再是“为监控而监控”,而是转变为生产服务。总之当前形势下视频监控系统呈现出明显的 IT 化倾向,成为一个多技术、多学科、多部门交叉融合的系统工程。

由于国家重大项目的实施和推动,安防市场已经进入“大安防”时代,动辄几百路甚至几千路摄像头联网已经是司空见惯,这在以前的模拟时代是难以想象的。比如国家实施的“平安城市”工程,监控范围覆盖各街道、各区和市级,摄像头多达几千个,而且在街道、分局、市级都要设置服务器,都可以远程调取任意摄像头的视频信息,这给软件工作带来很大的挑战,监控硬件设备生产厂家配套的客户端软件很难满足大系统的要求。正是在这种市场需求的促进下,市场涌现出一些专门从事软件平台开发的厂商。他们不涉及硬件设备的研发和生产,而是开发一套多级联网的视频管理平台软件,重点在于解决远程调取图像、视频分布存储、用户权限管理等方面的上层应用问题。在硬件设备的兼容性方面,管理平台软件通常在驱动程序层抽象出一个通用接口层,兼容多家主流厂商的硬件产品。

在“大安防”的市场背景下,管理平台软件和硬件设备之间的独立化趋势是很明显的。可以想象,如果平台软件和硬件设备都遵循统一的接口标准,任意厂家的监控设备都可以无缝地、即插即用接入到任意软件厂家提供的平台软件中,这将是一件多么美

好的事情！目前一些国际组织如 ONVIF、PSIA 等正致力于建立视频监控设备的标准接口，由于产品的既定事实和厂家利益等因素，统一标准之路依然任重道远。

撇开管理平台软件不谈，单是监控设备本身的技术发展就十分精彩，新技术层出不穷。视频监控设备的发展呈现出两个明显的特征，即高清化和智能化。

### 1.2.1 高清化

在讨论这个话题之前首先介绍一点关于视频标准的背景知识。通常在监控领域会接触到 D1、720P、1080P 等概念，其中 D1 是标清模拟电视的标准，其解析度对于 PAL 制式来说是  $720 \times 576$ ，对于 NTSC 制式来说是  $720 \times 480$ 。D1 采用隔行扫描技术，每帧图像分为奇偶两场，对于 PAL 制式来说场频是 50 Hz，NTSC 制式场频为 60 Hz。D1 分辨率是目前视频监控使用最为广泛的分辨率。720P 的解析度是  $1280 \times 720$ ，逐行扫描，画面清晰度明显好于 D1，称为高清视频。1080P 的解析度是  $1920 \times 1080$ ，采用逐行扫描的方式，图像清晰度好于 720P，是民用视频领域中的最高分辨率，称为全高清。

视频监控获得的图像的清晰度是至关重要的，特别是细节部分。例如在银行监控应用中，公安机关利用视频监控录像获取犯罪嫌疑人的体貌特征；在交通领域利用图像进行车牌识别。如果获取的图像清晰度不足，则视频监控系统的作用和价值无法体现，花费巨资部署的系统变成了摆设。因此图像清晰度至关重要，而安防行业广大的技术工作者们也一直在把对清晰度的追求放在工作首位。目前标清的摄像机由于采用的是隔行扫描技术，数字化后的分辨率是  $720 \times 576$ ，经过压缩后又损失一些信息，解码后的清晰度虽然可以满足大部分的应用要求，但是对于特殊应用领域是不足的。

为了获得更高的清晰度，必须提高图像传感器的成像分辨率，相应的处理器的处理能力也要适应高清的要求。随着半导体技术的发展，目前高清的传感器和视频编码器都已经量产，市场上也已经出现 720P 和 1080P 的网络摄像机。但是高清网络摄像机的应用受到带宽的限制，普通的采用 MPEG-4 或者 H.264 压缩技术的 D1 网络摄像机的带宽通常为 1.5 Mbps 左右，而 1080P 网络摄像机的带宽可以达到 4 Mbps，可见高清视频监控对网络带宽的要求是很高的。

即便高清视频监控的应用还处于刚刚开始阶段，仅仅是在一些特殊的行业应用，但是随着网络带宽的改善，高清设备会有较大规模的增长，高清化是视频监控系统发展的重要趋势。

### 1.2.2 智能化

读者也许在电影镜头中能够看到当某个目标出现在摄像头监控范围内时系统会报警或者摄像头会跟踪目标移动的场景，这其实已是属于智能视频分析的范畴。传统视频监控系统的流程是采集、传输、显示、存储。显然中间只有信息的获取，并没有对获取的信息进行理解。传统的视频监控系统是依靠值班人员盯住视频画面，发现异常并处理的。这对值班人员

是个挑战，特别是监控系统的规模日益庞大，实时发现异常并报警变得越来越不可能，只能事后通过录像进行追溯。智能视频分析正是为解决这个问题而出现的先进技术。智能视频监控系统相比传统监控系统最大的不同在于增加了对信息的理解和分析环节，并根据预设的规则产生联动报警，从而实现实时报警和主动报警。

理论上信息理解和分析可以发生在数据流的各个阶段，也就形成了不同的智能分析解决方案。信息理解和分析在前端采集单元执行，赋予摄像机以智能，形成智能摄像机，包括模拟摄像机和网络摄像机；信息理解和分析在中间单元执行，形成智能 DVR 设备；信息理解和分析当然也可以在后端服务器执行，形成集中式智能监控系统。

不同解决方案有不同的特点，对系统设计的要求也不尽同。相对于中、后端的集中式部署，前端处理、分布式计算更具有竞争优势，原因如下：

#### 1) 处理器处理能力的问题

智能分析需要对图像像素逐点分析，运算量巨大，当输入视频路数较多时如果依然采用集中式分析的方式，对处理器运算速度要求很高，处理器的带宽无法支撑。分布式处理虽然单个处理器能力并不强大，但是仅处理一路带宽还是足够的。

#### 2) 网络带宽问题

集中式处理需要所有视频数据都传输到服务器上，而分布式处理则可以根据分析结果选择性传输。

#### 3) 成本问题

分布式处理可以在原来硬件的基础上不增加成本或者仅增加很少成本即可实现智能分析，相同视频路数显然集中式处理增加的成本更多。

综上所述，前端视频编码设备是智能视频分析理想的搭载平台，因此智能化也是视频监控发展的重要趋势之一。



## 1.3 智能视频分析

20 世纪 90 年代，由美国国防高级研究项目署主导的视觉监控重大项目 VSAM (Visual Surveillance Monitoring) 吸引了众多高校科研机构的参与，从而拉开了智能视频分析技术研究应用的序幕。至今，智能视频分析技术已经有近 20 年的应用，世界范围内已经部署了很多在运行的智能分析系统。但是应该看到过去的智能视频分析应用基本属于集中式应用，大多是基于 PC 的应用。直到近二三年来随着网络视频监控系统的部署和众多大型监控项目的上马，基于嵌入式设备的智能分析系统才开始得到更多关注和应用。

智能分析的高层应用主要包括区域防范、行为理解、物体识别、烟雾火焰识别、PTZ 跟踪、交通管理等。目前市场上智能分析的应用大多局限于区域防范，包括入侵检测、绊线检测等，其他更复杂的工程应用还不多见。一方面笔者认为智能分析是视频监控发



展的重要方向之一，另一方面也应该看到智能分析的工程实践还面临很多问题。

究其原因，首先是技术方面的原因，智能分析是技术而绝对不是科学，它的成功实施需要多方面的配合，而智能分析技术也处于发展过程中；其次国内企业在技术积累方面做得不够，大多数 OEM 国外公司的算法，真正掌握核心算法的国内企业没有几家，很难针对具体场景作出算法上的调整。

智能分析技术可以根据底层建模和高层建模两部分进行划分。底层建模包括背景建模、目标检测、目标跟踪、特征提取等基本算法，高层建模则是根据预设规则进行判断，生成分析结果。

智能分析技术是图像处理、人工智能、机器视觉等多学科、多领域的交叉应用，基本算法包括背景建模、目标检测、运动跟踪、特征提取、规则判断等步骤，如图 1.1 所示。如何有效、准确地检测出前景目标是智能视频分析算法的关键，目前主流的方法包括差分法、背景模型法、光流法等。差分法的优点是实时性好，对场景的变化适应快，缺点是目标检测不完整，中间有空洞，抗干扰性差，树叶摇动、水波纹等都可能被误认为是前景目标。光流法的优点是目标检测准确，而且可用于动态背景下的目标检测；缺点是运算量巨大，不适于嵌入式设备的实时实现。基于混合高斯模型的背景建模法是经过实际应用验证的效果较好的方法，它是一种多模态的建模方法，对树叶摇动、水波纹、雨、雪等干扰具有



图 1.1 智能视频分析技术原理

天生的抗干扰性。

目前市场上智能分析设备提供的功能主要包括：摄像头异常诊断（信号丢失、光圈关闭、镜头遮挡、镜头移动等）、入侵检测（区域入侵、绊线检测）、遗失物检测、物品移除检测、违章停车、徘徊检测、PTZ 跟踪等功能。



## 1.4 Blackfin 处理器在智能视频监控系统中的应用

Blackfin 处理器是 ADI 公司推出的适用于通信、视频、语音等领域的低功耗嵌入式处理器，包括单核和双核多种型号。所有的 Blackfin 处理器都是基于同样的 Blackfin 内核，该内核是基于 ADI 与 Intel 联合开发的微信号 (MSA) 架构，集 RISC 处理器与 DSP 的优点于一身，既适合密集性运算，又适合做控制使用。Blackfin 处理器具有较强的并行处理能力，同时具有专门的视频操作指令，配合片上 SRAM 存储器和 DMA 操作，可以大大提高算法运行效率，非常适合视频通信领域。

Blackfin 处理器被广泛地应用在视频监控领域，如硬盘录像机、视频服务器和网络摄像机，国内几大领先厂商曾经一度使用 BF561 处理器开发硬盘录像机，也有多家网络摄像机厂商基于 BF53x 或者 BF561 开发视频服务器和网络摄像机设备。随着 SOC 的出



现, 包括 Blackfin 在内的通用 DSP 处理器在视频编码领域的市场份额逐步下降, 因为 SOC 处理器具有更低的价格和更低的技术门槛。SOC 之所以大行其道, 和视频编码标准的成熟是息息相关的。其实不仅在视频监控领域, 在其他信息技术领域同样如此, 当某个技术逐渐成熟形成稳定而统一的标准后, 通用的可编程处理器必将被专用处理器所代替, 以获得更高的性价比。即便受到 SOC 的大力冲击, 由于低端 Blackfin 53x 处理器在功耗和性价比方面具有的优越性, BF53x 仍然广泛地应用在网络摄像机和视频服务器产品中。

智能视频分析技术的出现为通用可编程 DSP 提供了新的用武之地。前面已经提到智能视频分析的最佳载体是嵌入式设备, 如网络摄像机。目前市场上主流的网络摄像机硬件平台包括 DSP 和 SOC 两大阵营。DSP 包括 TI Davinci 系列 (ARM+DSP, 也可认为是 SOC)、ADI Blackfin 系列、NXP 系列等。SOC 主要包括 TI DM355、海思 3510/3511/3512、Grain FIC8120/8161/8180 等。这几款方案各有其特点, 都可以满足普通网络摄像机的要求。但对于搭载智能分析算法的智能网络摄像机而言, 并不是所有的方案都能够满足要求。究其原因, 还是智能网络摄像机对硬件平台有更高的要求。一个理想的智能网络摄像机硬件平台应该满足以下两方面的要求:

#### 1) 运算能力强

智能分析过程包括背景建模、连通计算、形态学处理等过程, 基本上是对像素逐点进行运算, 而且要保证每秒 10 帧以上的处理能力, 运算量非常之大。所以强大的处理能力是智能网络摄像机硬件平台的基本要求。在这一点上 DSP 明显优于 SOC 处理器。目前 SOC 多是 ARM 架构的, ARM 处理器的特点是低功耗和体积小, 指令优化能力有限。DSP 处理器一般具有较强的指令并行处理能力, 同时针对像素字节运算具有专门的指令。充分利用 DSP 的并行处理能力、专用视频指令和高速片上内存以及合理安排 DMA 操作, 可以大大提高算法的运算效率。

#### 2) 编程灵活性好

现阶段智能视频分析技术处于发展过程中, 同时智能视频监控系统的实施依赖于具体场景。智能视频分析没有标准的算法, 更多的是多算法的融合和对特定场景的调整。因此良好的可编程性是处理器必须具备的条件。

基于以上原因, DSP 处理器比 SOC 处理器更适合于智能视频分析。另外, Blackfin 处理器支持  $\mu$ Clinux 操作系统, 使得应用程序的开发更加方便、简捷, 特别是稳定、可靠的 TCP/IP 网络通信协议族, 因此 Blackfin 处理器是搭载智能视频分析引擎的理想平台。

## Blackfin 处理器体系架构

ADI 公司是全球重要的通用 DSP 产品供应商，其 DSP 产品占据通用 DSP 市场的 40% 份额。ADI 公司提供的 DSP 产品包括 Shark 系列、TigerShark 系列和 Blackfin 系列，其中 Blackfin 系列处理器是面向新兴因特网市场开发的低功耗处理器，适合图像、语音、视频通信和数据处理等众多需要密集运算和低功耗要求的领域。本章描述 Blackfin 处理器的基本特征、内核结构和 BF53x 处理器的概况。



### 2.1 Blackfin 处理器基本特征

Blackfin 处理器是一类专为满足当前嵌入式音频、视频和通信应用的计算要求和功耗约束条件而设计的 16 位嵌入式处理器，具有以下特点：

(1) Blackfin 处理器基于 ADI 和 Intel 合作开发的微信号结构 (Micro Signal Architecture, MSA)，有机地把 32 位 RISC 精简指令集、双 16 位 MAC 乘法累加功能和通用微处理器的易用性结合在一起。Blackfin 处理器集 RISC 处理器和 DSP 的优点于一身，即可满足密集运算的要求，又具有良好的控制功能。Blackfin 的这种 RISC 处理器的特性使得它可以运行像 uClinux 这种复杂的操作系统，操作系统屏蔽了硬件的复杂性，使得用户开发应用程序基本可以做到硬件无关，同时操作系统提供的诸如网络通信协议等 API 函数库能够有效降低用户开发工作的复杂度。

(2) Blackfin 处理器内嵌动态电源管理控制器 (Dynamic Power Management Controller, DPMC)，可以动态调节内核电压。Blackfin 处理器通过三种方法降低功耗：改变工作模式、关闭闲置外设时钟和动态调节内核电压。Blackfin 处理器支持四种工作模式，分别是全速运行模式、活动模式、睡眠模式和深度睡眠模式，功耗依次降低。由于功耗与内核电压的平方成正比，因此降低内核工作电压可以有效地降低功耗。处理器功耗包括静态电流和动态电流两部分消耗，主频为 500 MHz 的 BF53x 处理器内核工作电压范围为 0.8~1.32 V，在 25℃ 时的静态电流如表 2.1 所示，可见动态调节内核电压对于降低处理器功耗是非常有效的。

表 2.1 主频为 500 MHz 的 BF53x 处理器内核静态电流对比表

|           |     |      |      |      |      |      |      |      |       |       |
|-----------|-----|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| 内核电压 (V)  | 0.8 | 0.85 | 0.9  | 0.95 | 1.0  | 1.05 | 1.1  | 1.2  | 1.3   | 1.32  |
| 静态电流 (mA) | 35  | 39.2 | 44.3 | 50.8 | 56.1 | 63.3 | 69.1 | 84.7 | 104.5 | 109.1 |

(3) Blackfin 处理器具有优秀的代码密度和并行处理能力,支持单指令多数据 (Single Instruction Multiple Data, SIMD) 操作。Blackfin 处理器基于 10 级流水线架构,指令集包括 16 位和 32 位长度。Blackfin 内核指令总线的宽度为 64 位,单个时钟周期可以读取 64 位长度的指令,单指令周期可以执行 1 个 32 位指令和 2 个 16 位指令,即单指令可以并发执行 3 条指令。

(4) Blackfin 内核包括 4 个 8 位的算术逻辑运算单元 (Arithmetic Logic Unit, ALU),专门用于视频数据的操作,这是因为图像处理领域参与运算的图像数据多是 8 位的数据。Blackfin 处理器设计了专门的视频处理指令,例如 SAA 指令用于绝对差和 (Sum of Absolute Difference, SAD) 的计算。这些特性都是针对视频应用进行优化设计的。

(5) Blackfin 处理器具有多个高效的、独立的 DMA 控制器。DMA 控制器分为两类:外设 DMA 和内存 DMA。外设 DMA 负责外设和存储器之间的数据传输,包括 UART、SPI、SPORT、PPI 等。内存 DMA 负责存储器之间的数据搬移,BF53x 处理器有两个内存 DMA 控制器。

(6) Blackfin 处理器具有三级存储器结构:L1、L2 和 L3。L1 是片内高速 SRAM,以内核时钟运行,具有最快的读写速度。L2 是片内大容量存储器,只有双核处理器才配备 L2 存储器。L3 是指外部存储器,以系统时钟 SCLK 运行,读写周期长,是算法执行运行的瓶颈。使用好片内 L1 存储器和 DMA 控制器,可以获得最优的计算性能,是算法优化的关键。

(7) Blackfin 系列处理器基于完全相同的内核,代码具有非常好的兼容性和可重用性,这对用户的开发工作是非常有利的。

Blackfin 处理器特殊的体系结构使其兼具运算能力强和低功耗的优点,非常适合那些对计算能力和功耗均有较高要求的应用,如手持媒体播放器、手持测量设备、移动图像处理设备等。从某种意义上说,Blackfin 处理器的特点介于传统 DSP 处理器和 ARM 处理器之间,既有传统 DSP 的强大运算能力,又具备 ARM 处理器的低功耗特性,这是 Blackfin 处理器的最大特点,也是低端 Blackfin 处理器具有强大生命力的原因。



## 2.2 Blackfin 内核架构

Blackfin 处理器基于改进的哈佛总线结构,以 Blackfin BF534/536/537 处理器为例,处理器的结构如图 2.1 所示,包括内核、存储器、DMA 控制器、中断控制器、外部总线接口、JTAG 调试接口、内核电压调节器、外设等部分,其中外设包括看门狗、RTC、CAN 总线、高速串行口 (Synchronous Serial Peripheral Port, SPORT)、外设并行总线 (Parallel Peripheral Interface, PPI)、通用异步串行接口 (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter,