

一种基于 FPGA 的 FFT 阵列处理器

植强

(中国电子科技集团第二十九研究所 成都 · 610036)

摘要:提出一种新的 FFT 信号处理器的实现方法,使用抽取算法在基于 FPGA 的 FFT 硬件处理 IP 上实现并行大点数快速傅立叶变换,由于采用专用 FFT 硬件处理与 DSP 相结合的处理结构,使处理速度大幅度提高。理论和仿真分析论证了该方法的有效性。

关键词:数字信号处理 快速傅立叶变换

A FFT Array Processor Based on FPGA

ZHI Qiang

(Southwest China Institute of Electronic Equipment ,Chengdu ,610036 ,China)

Abstract :A new method realizing FFT signal processor is presented. The method uses the sampling algorithm to achieve parallel Fast Fourier Transform of numerous data. According to particular processing structure matching FFT hardware and DSP, the processing speed is increased significantly. The method is proved effective theoretically and practically.

Key words :digital signal processing ; FFT

0 引言

在现代电子战中,数字化技术在 EW 接收机得到广泛应用。数字化接收机具有高截获概率、高精度、高灵敏度、大动态、高度灵巧性、小体积的优势。同时运用数字信号处理技术对信号进行多分辨分析获取雷达信号的原始细微特征。由于 EW 接收机需要覆盖比较宽的瞬时带宽,必须使用高速的 AD 变换器完成模拟信号的数字化,信号处理机要能处理高速的数据流,实现对雷达信号的准实时处理,提高数字化接收机的截获概率,

并提供出雷达信号更为精确的多种参数特征。这对数字化接收机的信号处理能力提出了很高的要求。因此,数字化接收机信号处理的软、硬件部分就成了整个 EW 接收机的关键部件,同时也是整个研制任务中难度最大的技术难点之一。

由于数字化接收机需要处理的数据量比较大,选择高效的算法是非常重要的。通过对数字化接收机的算法分析,我们发现,高效率的快速傅立叶变换(FFT)算法仍然是对雷达信号处理的基础和核心算法,其它的如快速相关,卷积都可以通过快速傅立叶变换(FFT)算法得到。在具体硬件

实现上,大致可分为两种方案。一种是通过通用数字信号处理器(如 TI 公司的 TMS320C6X 系列)构成多处理器系统,通过算法分解和任务调度,实现并行计算以提高处理速度。另一种方案是使用专用的 FFT 处理芯片(最为典型的是 SHARP 公司的 LH9124)作为实现算法的工具。专用 FFT 芯片本身就是一种高度集成化的并行硬件处理器,通过一些外围存储器的配合,就能实现高效的 FFT 算法。

通用 DSP 处理器构成的 FFT 处理机采用循环编码算法,程序量小,但存在大量的冗余运算,且需要许多跳转操作,处理速度较慢,不能满足数字化接收机实时性的要求。在多处理器构成的并行处理系统中,使用抽取的方法实现对输入数据的分解,达到并行处理的目的,可显著提高计算的速度,但在进行大点数 FFT 计算时,存在并行算法与 DSP 处理器的寻址能力不相适应,不能有效利用数据传输的带宽和运算能力的问题,造成硬件资源的浪费。虽然通用的 DSP 处理器在结构上已考虑了对各种算法的优化,同时具有很大的灵活性,但对 FFT 这种高度结构化的算法,其效率仍然不是很高。我们提出一种新的思路,把专用的 FFT 处理芯片的处理速度与 FPGA 芯片的灵活性结合起来,实现并行算法与硬件结构的优化配置,提高 FFT 处理速度,满足对雷达信号处理实时性的要求。

1 FFT 并行算法原理

对 N 点序列 $x(n)$, 其 DFT 变换的定义为:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{nk}$$

$$k = 0, 1, K, N-1,$$

$$W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$$

利用 W_N 的对称性和周期性可推导出其快速算法 FFT。对 $N = 2^r$ 点的 DFT 可推导出基 2 的 FFT 算法:

$$X(n_{r-1}n_{r-2}\dots n_0) = \sum_{k_0=0}^{1} \sum_{k_1=0}^{1} \dots \sum_{k_{r-1}=0}^{1} X_0(k_{r-1}, k_{r-2}, \dots, k_0) W^{2^{r-1}(n_{r-1}k_{r-1})} W^{(2n_1+n_0)2^{r-2}k_{r-2}} W^{(2^{r-1}n_{r-1}+2^{r-2}n_{r-2}+\dots+n_0)k_0}$$

完成一个 N 点的 FFT 所需的复数乘法和复数加法分别减少到 $(N/2)\log_2 N$ 和 $N\log_2 N$ 次。

当选用的专用 FFT 处理芯片计算点数为一个定值时,计算长点数大 N 点的 FFT 就必须分解为若干个小 N 点的 FFT,该方法由 Winograd 提出,利用下标映射把大点数的 DFT 分解为小点数的 DFT,具体步骤如下:

(1) 将输入序列按 $n = n_1 + N_1 n_2$ 分为 N_2 个长度为 N_1 的子序列,构成 $x(n_1, n_2)$ 的列,即

$$x(n_1 + N_1 n_2) = x(n_1, n_2) =$$

$x(0)$	$x(N_1)$	$x((N_2 - 1)N_1)$
$x(1)$	$x(N_1 + 1)$	M
M	M	M
$x(N_1 - 1)$	$x(2N_1 - 1)$	$x(N_1 N_2 - 1)$

(2) 对 $x(n_1, n_2)$ 的每一行求 N_2 点的 FFT,共 N_1 个 N_2 点 FFT 得 $g(n_1, k_2)$ 。

(3) 对 $g(n_1, k_2)$ 的第 n_1 行第 k_2 列元素 $g(n_1, k_2)$ 乘以因子构成新矩阵

$$\hat{g}(n_1, k_2) = g(n_1, k_2) W_N^{n_1 k_2}$$

(4) 对矩阵 $\hat{g}(n_1, k_2)$ 的第一列求 N_1 点 FFT,共 N_2 个 N_1 点 FFT 得 $X(k_1, k_2)$ 。

(5) 由 $X(k_1, k_2)$ 和 $k = N_2 k_1 + k_2$ 即可求出 $X(k)$,

$$X(k) = X(k_1, k_2) =$$

$X(0)$	$X(1)$	$X(N_2 - 1)$
$X(N_2)$	$X(N_2 + 1)$	M
M	M	M
$X((N_1 - 1)N_2)$	$X(N_1 N_2 - 1)$	

可见重复算法实质上是将一 N 点 FFT 分解为 N_1 个 N_2 点 FFT 和 N_2 个 N_1 点 FFT 以及 N 次与 $W_N^{n_1 k_2}$ 的乘积。

2 基于 FPGA 的 FFT 处理器

传统的专用 FFT 处理器采用 ASIC 电路来实现,受到应用范围的局限,已经逐渐跟不上半导体工艺的发展,有的已停止了生产,越来越多的设计开始转移到可编程逻辑电路上实现。由于在性能、成本、灵活性和功耗等方面的优势,基于 FPGA (现场可编程逻辑阵列)的信号处理器已进入各种电子战、通信设备中。FPGA 提供了极强的灵活性,可让设计者开发出满足多种要求的产品。

大多数 FPGA 厂商都提供了可配置的逻辑核 (CORE) 实现各种算法功能,在 XILINX 公司的

Vertex 系列器件中,一个 24×24 bit 复数乘法器,完成一次复数计算所需的时间为 10ns,除此之外,在器件中我们还能构造一条能够精确匹配所需算法的数据通道,使数字信号处理的算法效率得到极大的提高。Xilinx 公司的 1024 点复数 FFT 逻辑核 (Logicore),可在其 X2V300 以上的器件中配置,对 16 位精度的复数执行一次 1024 点的复数 FFT 可在 $10\mu\text{s}$ 内完成,包括位倒序转换在内。而一个先进的软件 DSP 计算一次的时间约为 $60\mu\text{s}$,还不包括位倒序转换。该 FFT 逻辑核的方框图如图 1 所示。

Xilinx 公司的 FFT 逻辑内核采用标准的基 4 Cooley - Tukey 算法,一个计算单元可分配到每个蝶形阵列,一个 1024 点的 FFT 可在 1024 个时钟周期内完成,若采用 100MHz 的时钟,变换时间为 $10\mu\text{s}$ 。上述 1024 点的 FFT 占用 Vertex 系列 FPGA 器件约 1900 个逻辑单元,还可以利用 FPGA 提供的高速 IO 带宽,片上存储器和逻辑等多种资源,从而使 FFT 的高度并行处理成为现实。比较 FP-

GA DSP 和其它 DSP 系统时,一个极为重要的系统参数是输入/输出 (I/O) 带宽,FPGA 上几乎所有的引脚均可提供给用户使用,这使得 FPGA 信号处理方案具有非常高性能的 I/O 带宽。大量可灵活配置的 I/O 引脚和片上存储器可获得优越的并行处理能力。随着 FPGA 供应商和第三方 IP 设计商提供越来越多的 FPGA IP 内核,我们利用这些资源,就能将精力集中在系统设计上,而无须关心底层模块的细节,这样可极大地缩短产品开发周期。

3 FFT 阵列处理器的设计方案

在 FFT 阵列处理器中,使用 Xilinx 公司的 1024 点 FFT 逻辑内核构成阵列处理器的一个处理单元,采用第 1 节中介绍的下标映射原理把大点数的输入数据分解为多个 1024 点的数据由 FFT 处理单元并行计算,计算结果存入缓冲存储器,最后进行数据合并处理。FFT 阵列处理器的结构框图如图 2 所示。

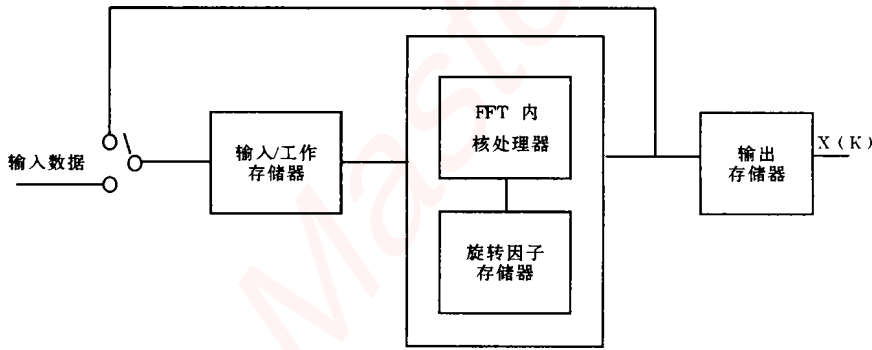


图 1 FPGA FFT 结构简图

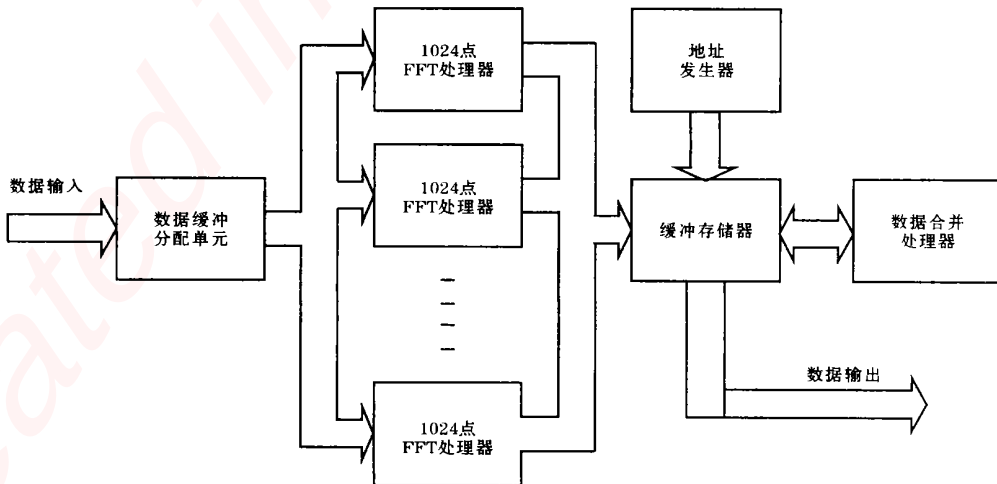


图 2 FPGA FFT 阵列处理器结构简图

在数字接收机中,模数转换器产生的数字信号由数据缓冲、分配单元按一定的顺序抽取(即输入数据从一维到二维的映射),输入到每个FFT处理单元的输入存储器中,输入数据分配完成后,启动FFT处理单元进行并行的1024点计算。经过1024个时钟周期,完成对一次小点数的FFT计算,这时,即可进行下一轮的数据分配过程。各FFT处理单元的输出存储器在地址发生器的作用下,实现数据矩阵的重构并存储于缓冲存储器中,当一次计算的所有数据的中间值得到后,就由数据合并处理单元对重构的数据矩阵的每一列数据进行新的FFT,最终的结果仍旧存储在缓冲存储单元中等待输出。从以上分析可以看到,并行计算主要集中在第一级1024点的FFT,第二级FFT(相当于对数据矩阵的列)由于受输入数据长度的影响,FFT的长度不固定,不能实现并行处理,可使用一片通用DSP芯片,使用软件计算以增加对数据的适应性。

由于基于FPGA的FFT阵列处理器采用定点方式计算,为了防止计算溢出,计算中使用逐级移位的块浮点方式处理,输入精度为16bit,输出精度为32bit。输入数据要求为1024的 2^n 倍,不足部分的采用补零的方法对齐数据,这对基于硬件的FFT处理器是最好的办法,对计算效率影响不大。考虑到对高速存储器容量的限制,最大处理的数据长度限制为256k。

在高速FPGA芯片中,已经能在单周期内完成一次复数乘法和加法,对数据传输时间的要求也就同样重要,理论上的一些优化算法如分裂基、WFTA算法在结构上带来的复杂性对数据传输产生了不利的影响。规范的结构和高速的数据传输带宽对FFT性能的影响也是至关重要的。在基于FPGA的FFT阵列处理器中,高速的硬件FFT处理单元与数据通道的结合可带来性能上的飞速提

高。下面以256k点的数据为例分析一下它的性能:

假定FFT阵列处理器中包含16个1024点的FFT单元,系统时钟为100MHz,则第一级FFT就需要进行 $256k/16k=16$ 次,每次所需的时间为 $41\mu s$;一次计算未完成时下一批数据必须等待传送,不能按流水线方式工作,进行256k数据传送的时间为 $256k/100M=2.56ms$ 必须另外记入;第一级FFT得到的结果存入缓冲存储器可以和输入数据同时进行,则不需再算;第二级为1024个256点的FFT,假定一个256点的FFT计算时间为 $10\mu s$ (对TI的TMS320C64X器件是容易达到的),就可以得出处理时间为:

$$16 \times 0.041 + 2.56 + 1024 \times 0.01 = 13.456 \text{ ms}$$

与之对照的是在P800的计算机上,需要约1500ms的时间。

3 结束语

本文分析说明了基于FPGA的FFT阵列处理器的工作原理与实现方法,可以看出,采用FPGA的LogiCore实现并行处理电路具有速度快、集成度高、高可靠等优点,可以满足电子战接收机在信号处理中实时性的要求,实际应用中值得推广使用。

参考文献

- 1 胡广书. 数字信号处理 - 理论、算法与实现[M]. 北京:清华大学出版社,1997
- 2 E. O. 布莱姆. 快速傅立叶变换[M]. 上海科学技术出版社,1979
- 3 High - Performance 1024 - point Complex FFT/ IFFT [Z]. Xilinx. inc
- 4 一种基于数字信号处理器的有效FFT实现[J]. 西安电子科技大学学报,1998

嵌入式资源免费下载

总线协议:

1. [基于 PCIe 驱动程序的数据传输卡 DMA 传输](#)
2. [基于 PCIe 总线协议的设备驱动开发](#)
3. [CANopen 协议介绍](#)
4. [基于 PXI 总线 RS422 数据通信卡 WDM 驱动程序设计](#)
5. [FPGA 实现 PCIe 总线 DMA 设计](#)
6. [PCI Express 协议实现与验证](#)
7. [VPX 总线技术及其实现](#)
8. [基于 Xilinx FPGA 的 PCIE 接口实现](#)
9. [基于 PCI 总线的 GPS 授时卡设计](#)
10. [基于 CPCI 标准的 6U 信号处理平台的设计](#)
11. [USB30 电路保护](#)
12. [USB30 协议分析与框架设计](#)
13. [USB 30 中的 CRC 校验原理及实现](#)
14. [基于 CPLD 的 UART 设计](#)
15. [IPMI 在 VPX 系统中的应用与设计](#)
16. [基于 CPCI 总线的 PMC 载板设计](#)
17. [基于 VPX 总线的工件台运动控制系统研究与开发](#)
18. [PCI Express 流控机制的研究与实现](#)
19. [UART16C554 的设计](#)
20. [基于 VPX 的高性能计算机设计](#)
21. [基于 CAN 总线技术的嵌入式网关设计](#)
22. [Visual C 串行通讯控件使用方法与技巧的研究](#)
23. [IEEE1588 精密时钟同步关键技术研究](#)
24. [GPS 信号发生器射频模块的一种实现方案](#)
25. [基于 CPCI 接口的视频采集卡的设计](#)
26. [基于 VPX 的 3U 信号处理平台的设计](#)
27. [基于 PCI Express 总线 1394b 网络传输系统 WDM 驱动设计](#)
28. [AT89C52 单片机与 ARINC429 航空总线接口设计](#)
29. [基于 CPCI 总线多 DSP 系统的高速主机接口设计](#)
30. [总线协议中的 CRC 及其在 SATA 通信技术中的应用](#)
31. [基于 FPGA 的 SATA 硬盘加解密控制器设计](#)
32. [Modbus 协议在串口通讯中的研究及应用](#)
33. [高可用的磁盘阵列 Cache 的设计和实现](#)
34. [RAID 阵列中高速 Cache 管理的优化](#)

邀请注册码



关注论坛公众号

35. [一种新的基于 RAID 的 CACHE 技术研究与实现](#)
36. [基于 PCIE-104 总线的高速数据接口设计](#)
37. [基于 VPX 标准的 RapidIO 交换和 Flash 存储模块设计](#)
38. [北斗卫星系统在海洋工程中的应用](#)
39. [北斗卫星系统在远洋船舶上应用的研究](#)
40. [基于 CPCI 总线的红外实时信号处理系统](#)
41. [硬件实现 RAID 与软件实现 RAID 的比较](#)
42. [基于 PCI Express 总线系统的热插拔设计](#)
43. [基于 RAID5 的磁盘阵列 Cache 的研究与实现](#)
44. [基于 PCI 总线的 MPEG2 码流播放卡驱动程序开发](#)
45. [基于磁盘阵列引擎的 RAID5 小写性能优化](#)
46. [基于 IEEE1588 的时钟同步技术研究](#)
47. [基于 Davinci 平台的 SD 卡读写优化](#)
48. [基于 PCI 总线的图像处理及传输系统的设计](#)
49. [串口和以太网通信技术在油液在线监测系统中的应用](#)
50. [USB30 数据传输协议分析及实现](#)
51. [IEEE 1588 协议在工业以太网中的实现](#)
52. [基于 USB30 的设备自定义请求实现方法](#)
53. [IEEE1588 协议在网络测控系统中的应用](#)
54. [USB30 物理层中弹性缓冲的设计与实现](#)
55. [USB30 的高速信息传输瓶颈研究](#)
56. [基于 IPv6 的 UDP 通信的实现](#)
57. [一种基于 IPv6 的流媒体传送方案研究与实现](#)
58. [基于 IPv4-IPv6 双栈的 MODBUS-TCP 协议实现](#)
59. [RS485CAN 网关设计与实现](#)
60. [MVB 周期信息的实时调度](#)
61. [RS485 和 PROFINET 网关设计](#)
62. [基于 IPv6 的 Socket 通信的实现](#)
63. [MVB 网络重复器的设计](#)
64. [一种新型 MVB 通信板的探究](#)
65. [具有 MVB 接口的输入输出设备的分析](#)
66. [基于 STM32 的 GSM 模块综合应用](#)
67. [基于 ARM7 的 MVB CAN 网关设计](#)
68. [机车车辆的 MVB CAN 总线网关设计](#)
69. [智能变电站冗余网络中 IEEE1588 协议的应用](#)
70. [CAN 总线的浅析 CANopen 协议](#)
71. [基于 CANopen 协议实现多电机系统实时控制](#)
72. [以太网时钟同步协议的研究](#)
73. [基于 CANopen 的列车通信网络实现研究](#)
74. [基于 SJA1000 的 CAN 总线智能控制系统设计](#)
75. [基于 CANopen 的运动控制单元的设计](#)
76. [基于 STM32F107VC 的 IEEE 1588 精密时钟同步分析与实现](#)

邀请注册码



关注论坛公众号

77. [分布式控制系统精确时钟同步技术](#)
78. [基于 IEEE 1588 的时钟同步技术在分布式系统中应用](#)
79. [基于 SJA1000 的 CAN 总线通讯模块的实现](#)
80. [嵌入式设备的精确时钟同步技术的研究与实现](#)
81. [基于 SJA1000 的 CAN 网桥设计](#)
82. [基于 CAN 总线分布式温室监控系统的设计与实现](#)
83. [基于 DSP 的 CANopen 通讯协议的实现](#)
84. [基于 PCI9656 控制芯片的高速网卡 DMA 设计](#)
85. [基于以太网及串口的数据采集模块设计](#)
86. [MVB1 类设备控制器的 FPGA 设计](#)
87. [MVB 接口彩色液晶显示诊断单元的显示应用软件设计](#)
88. [IPv6 新型套接字的网络编程剖析](#)
89. [基于规则的 IPv4 源程序到 IPv6 源程序的移植方法](#)
90. [MVB 网络接口单元的 SOC 解决方案](#)
91. [基于 IPSec 协议的 IPv6 安全研究](#)
92. [具有 VME 总线的车载安全计算机 MVB 通信板卡](#)
93. [SD 卡的传输协议和读写程序](#)
94. [基于 SCTP 的 TLS 应用](#)
95. [基于 IPv6 的静态路由实验设计](#)
96. [基于 MVB 的地铁列车司机显示系统研究](#)
97. [基于参数优化批处理的 TLS 协议](#)
98. [SSD 数据结构与算法综述](#)
99. [大容量 NAND Flash 文件系统中的地址映射算法研究](#)
100. [基于 MVB 总线的动车组门控系统的设计与仿真研究](#)

邀请注册码



关注论坛公众号

VxWorks:

1. [基于 VxWorks 的多任务程序设计](#)
2. [基于 VxWorks 的数据采集存储装置设计](#)
3. [Flash 文件系统分析及其在 VxWorks 中的实现](#)
4. [VxWorks 多任务编程中的异常研究](#)
5. [VxWorks 应用技巧两例](#)
6. [一种基于 VxWorks 的飞行仿真实时管理系统](#)
7. [在 VxWorks 系统中使用 TrueType 字库](#)
8. [基于 FreeType 的 VxWorks 中文显示方案](#)
9. [基于 Tilcon 的 VxWorks 简单动画开发](#)
10. [基于 Tilcon 的某武器显控系统界面设计](#)
11. [基于 Tilcon 的综合导航信息处理装置界面设计](#)

12. [VxWorks 的内存配置和管理](#)
13. [基于 VxWorks 系统的 PCI 配置与应用](#)
14. [基于 MPC8270 的 VxWorks BSP 的移植](#)
15. [Bootrom 功能改进经验谈](#)
16. [基于 VxWorks 嵌入式系统的中文平台研究与实现](#)
17. [VxBus 的 A429 接口驱动](#)
18. [基于 VxBus 和 MPC8569E 千兆网驱动开发和实现](#)
19. [一种基于 vxBus 的 PPC 与 FPGA 高速互联的驱动设计方法](#)
20. [基于 VxBus 的设备驱动开发](#)
21. [基于 VxBus 的驱动程序架构分析](#)
22. [基于 VxBus 的高速数据采集卡驱动程序开发](#)
23. [Vxworks 下的冗余 CAN 通讯模块设计](#)
24. [WindML 工业平台下开发 S1d13506 驱动及显示功能的实现](#)
25. [WindML 中 Mesa 的应用](#)
26. [VxWorks 下图形用户界面开发中双缓冲技术应用](#)
27. [VxWorks 上的一种 GUI 系统的设计与实现](#)
28. [VxWorks 环境下 socket 的实现](#)
29. [VxWorks 的 WindML 图形界面程序的框架分析](#)
30. [VxWorks 实时操作系统及其在 PC104 下以太网编程的应用](#)
31. [实时操作系统任务调度策略的研究与设计](#)
32. [军事指挥系统中 VxWorks 下汉字显示技术](#)
33. [基于 VxWorks 实时控制系统中文交互界面开发平台](#)
34. [基于 VxWorks 操作系统的 WindML 图形操控界面实现方法](#)
35. [基于 GPU FPGA 芯片原型的 VxWorks 下驱动软件开发](#)
36. [VxWorks 下的多串口卡设计](#)
37. [VxWorks 内存管理机制的研究](#)
38. [T9 输入法在 Tilcon 下的实现](#)
39. [基于 VxWorks 的 WindML 图形界面开发方法](#)
40. [基于 Tilcon 的 IO 控制板可视化测试软件的设计和实现](#)
41. [基于 VxWorks 的通信服务器实时多任务软件设计](#)
42. [基于 VXWORKS 的 RS485MVB 网关的设计与实现](#)
43. [实时操作系统 VxWorks 在微机保护中的应用](#)
44. [基于 VxWorks 的多任务程序设计及通信管理](#)
45. [基于 Tilcon 的 VxWorks 图形界面开发技术](#)
46. [嵌入式图形系统 Tilcon 及应用研究](#)
47. [基于 VxWorks 的数据采集与重演软件的图形界面的设计与实现](#)
48. [基于嵌入式的 Tilcon 用户图形界面设计与开发](#)
49. [基于 Tilcon 的交互式多页面的设计](#)
50. [基于 Tilcon 的嵌入式系统人机界面开发技术](#)
51. [基于 Tilcon 的指控系统多任务人机交互软件设计](#)
52. [基于 Tilcon 航海标绘台界面设计](#)
53. [基于 Tornado 和 Tilcon 的嵌入式 GIS 图形编辑软件的开发](#)

邀请注册码



关注论坛公众号

54. [VxWorks 环境下内存文件系统的应用](#)
55. [VxWorks 下的多重定时器设计](#)
56. [Freescale 的 MPC8641D 的 VxWorks BSP](#)
57. [VxWorks 实验五\[时间片轮转调度\]](#)
58. [解决 VmWare 下下载大型工程.out 出现 WTX Error 0x100de 的问题](#)
59. [基于 VxWorks 系统的 MiniGUI 图形界面开发](#)
60. [VxWorks BSP 开发中的 PCI 配置方法](#)
61. [VxWorks 在 S3C2410 上的 BSP 设计](#)
62. [VxWorks 操作系统中 PCI 总线驱动程序的设计与实现](#)
63. [VxWorks 概述](#)
64. [基于 AT91RM9200 的 VxWorks END 网络驱动开发](#)
65. [基于 EBD9200 的 VxWorks BSP 设计和实现](#)
66. [基于 VxWorks 的 BSP 技术分析](#)
67. [ARM LPC2210 的 VxWorks BSP 源码](#)
68. [基于 LPC2210 的 VxWorks BSP 移植](#)
69. [基于 VxWorks 平台的 SCTP 协议软件设计实现](#)
70. [VxWorks 快速启动的实现方法\[上电到应用程序 1 秒\]](#)

Linux:

1. [Linux 程序设计第三版及源代码](#)
2. [NAND FLASH 文件系统的设计与实现](#)
3. [多通道串行通信设备的 Linux 驱动程序实现](#)
4. [Zsh 开发指南-数组](#)
5. [常用 GDB 命令中文速览](#)
6. [嵌入式 C 进阶之道](#)
7. [Linux 串口编程实例](#)
8. [基于 Yocto Project 的嵌入式应用设计](#)
9. [Android 应用的反编译](#)
10. [基于 Android 行为的加密应用系统研究](#)
11. [嵌入式 Linux 系统移植步步通](#)
12. [嵌入式 C++ 语言精华文章集锦](#)
13. [基于 Linux 的高性能服务器端的设计与研究](#)
14. [S3C6410 移植 Android 内核](#)
15. [Android 开发指南中文版](#)
16. [图解 Linux 操作系统架构设计与实现原理（第二版）](#)
17. [如何在 Ubuntu 和 Linux Mint 下轻松升级 Linux 内核](#)
18. [Android 简单 mp3 播放器源码](#)
19. [嵌入式 Linux 系统实时性的研究](#)

邀请注册码



关注论坛公众号

20. [Android 嵌入式系统架构及内核浅析](#)
21. [基于嵌入式 Linux 操作系统内核实时性的改进方法研究](#)
22. [Linux TCP IP 协议详解](#)
23. [Linux 桌面环境下内存去重技术的研究与实现](#)
24. [掌握 Android 7.0 新增特性 Quick Settings](#)
25. [Android 应用逆向分析方法研究](#)
26. [Android 操作系统的课程教学](#)
27. [Android 智能手机操作系统的研究](#)
28. [Android 英文朗读功能的实现](#)
29. [基于 Yocto 订制嵌入式 Linux 发行版](#)
30. [基于嵌入式 Linux 的网络设备驱动设计与实现](#)
31. [如何高效学习嵌入式](#)
32. [基于 Android 平台的 GPS 定位系统的设计与实现](#)
33. [LINUX ARM 下的 USB 驱动开发](#)
34. [Linux 下基于 I2C 协议的 RTC 驱动开发](#)
35. [嵌入式下 Linux 系统设备驱动程序的开发](#)
36. [基于嵌入式 Linux 的 SD 卡驱动程序的设计与实现](#)
37. [Linux 系统中进程调度策略](#)
38. [嵌入式 Linux 实时性方法](#)
39. [基于实时 Linux 计算机联锁系统实时性分析与改进](#)
40. [基于嵌入式 Linux 下的 USB30 驱动程序开发方法研究](#)
41. [Android 手机应用开发之音乐资源播放器](#)
42. [Linux 下以太网的 IPv6 隧道技术的实现](#)
43. [Research and design of mobile learning platform based on Android](#)
44. [基于 linux 和 Qt 的串口通信调试器调的设计及应用](#)
45. [在 Linux 平台上基于 QT 的动态图像采集系统的设计](#)
46. [基于 Android 平台的医护查房系统的研究与设计](#)
47. [基于 Android 平台的软件自动化监控工具的设计开发](#)
48. [基于 Android 的视频软硬解码及渲染的对比研究与实现](#)
49. [基于 Android 移动设备的加速度传感器技术研究](#)
50. [基于 Android 系统振动测试仪研究](#)
51. [基于缓存竞争优化的 Linux 进程调度策略](#)
52. [Linux 基于 W83697 和 W83977 的 UART 串口驱动开发文档](#)
53. [基于 AT91RM9200 的嵌入式 Linux 系统的移植与实现](#)
54. [路由信息协议在 Linux 平台上的实现](#)
55. [Linux 下 IPv6 高级路由器的实现](#)
56. [基于 Android 平台的嵌入式视频监控系统设计](#)

邀请注册码



关注论坛公众号

Windows CE:

WeChat ID: kontronn

1. [Windows CE.NET 下 YAFFS 文件系统 NAND Flash 驱动程序设计](#)
2. [Windows CE 的 CAN 总线驱动程序设计](#)
3. [基于 Windows CE.NET 的 ADC 驱动程序实现与应用的研究](#)
4. [基于 Windows CE.NET 平台的串行通信实现](#)
5. [基于 Windows CE.NET 下的 GPRS 模块的研究与开发](#)
6. [win2k 下 NTFS 分区用 ntldr 加载进 dos 源代码](#)
7. [Windows 下的 USB 设备驱动程序开发](#)
8. [WinCE 的大容量程控数据传输解决方案设计](#)
9. [WinCE6.0 安装开发详解](#)
10. [DOS 下仿 Windows 的自带计算器程序 C 源码](#)
11. [G726 局域网语音通话程序和源代码](#)
12. [WinCE 主板加载第三方驱动程序的方法](#)
13. [WinCE 下的注册表编辑程序和源代码](#)
14. [WinCE 串口通信源代码](#)
15. [WINCE 的 SD 卡程序\[可实现读写的源码\]](#)
16. [基于 WinCE 的 BootLoader 研究](#)
17. [Windows CE 环境下无线网卡的自动安装](#)
18. [基于 Windows CE 的可视电话的研究与实现](#)
19. [基于 WinCE 的嵌入式图像采集系统设计](#)
20. [基于 ARM 与 WinCE 的掌纹鉴别系统](#)
21. [DCOM 协议在网络冗余环境下的应用](#)
22. [Windows XP Embedded 在变电站通信管理机中的应用](#)
23. [XPE 在多功能显控台上的开发与应用](#)
24. [基于 Windows XP Embedded 的 LKJ2000 仿真系统设计与实现](#)
25. [虚拟仪器的 Windows XP Embedded 操作系统开发](#)
26. [基于 EVC 的嵌入式导航电子地图设计](#)
27. [基于 XPEmbedded 的警务区 SMS 指挥平台的设计与实现](#)
28. [基于 XPE 的数字残币兑换工具开发](#)
29. [Windows CENET 下 ADC 驱动开发设计](#)
30. [Windows CE 下 USB 设备流驱动开发与设计](#)
31. [Windows 驱动程序设计](#)
32. [基于 Windows CE 的 GPS 应用](#)
33. [基于 Windows CE 下大像素图像分块显示算法的研究](#)
34. [基于 Windows CE 的数控软件开发与实现](#)
35. [NAND FLASH 在 WINCENET 系统中的应用设计](#)

邀请注册码



关注论坛公众号

PowerPC:

WeChat ID: kontronn

1. [Freescale MPC8536 开发板原理图](#)
2. [基于 MPC8548E 的固件设计](#)
3. [基于 MPC8548E 的嵌入式数据处理系统设计](#)
4. [基于 PowerPC 嵌入式网络通信平台的实现](#)
5. [PowerPC 在车辆显控系统中的应用](#)
6. [基于 PowerPC 的单板计算机的设计](#)
7. [用 PowerPC860 实现 FPGA 配置](#)
8. [基于 MPC8247 嵌入式电力交换系统的设计与实现](#)
9. [基于设备树的 MPC8247 嵌入式 Linux 系统开发](#)
10. [基于 MPC8313E 嵌入式系统 UBoot 的移植](#)
11. [基于 PowerPC 处理器 SMP 系统的 UBoot 移植](#)
12. [基于 PowerPC 双核处理器嵌入式系统 UBoot 移植](#)
13. [基于 PowerPC 的雷达通用处理机设计](#)
14. [PowerPC 平台引导加载程序的移植](#)
15. [基于 PowerPC 嵌入式内核的多串口通信扩展设计](#)
16. [基于 PowerPC 的多网口系统抗干扰设计](#)
17. [基于 MPC860T 与 VxWorks 的图形界面设计](#)
18. [基于 MPC8260 处理器的 PPMC 系统](#)
19. [基于 PowerPC 的控制器研究与设计](#)
20. [基于 PowerPC 的模拟量输入接口扩展](#)
21. [基于 PowerPC 的车载通信系统设计](#)
22. [基于 PowerPC 的嵌入式系统中通用 IO 口的扩展方法](#)
23. [基于 PowerPC440GP 型微控制器的嵌入式系统设计与研究](#)
24. [基于双 PowerPC 7447A 处理器的嵌入式系统硬件设计](#)
25. [基于 PowerPC603e 通用处理模块的设计与实现](#)
26. [嵌入式微机 MPC555 驻留片内监控器的开发与实现](#)
27. [基于 PowerPC 和 DSP 的电能质量在线监测装置的研制](#)
28. [基于 PowerPC 架构多核处理器嵌入式系统硬件设计](#)
29. [基于 PowerPC 的多屏系统设计](#)
30. [基于 PowerPC 的嵌入式 SMP 系统设计](#)
31. [基于 MPC850 的多功能通信管理器](#)
32. [基于 MPC8640D 处理系统的技术研究](#)
33. [基于双核 MPC8641D 处理器的计算机模块设计](#)
34. [基于 MPC8641D 处理器的对称多处理技术研究](#)

邀请注册码



关注论坛公众号

ARM:

1. [基于 DiskOnChip 2000 的驱动程序设计及应用](#)
2. [基于 ARM 体系的 PC-104 总线设计](#)
3. [基于 ARM 的嵌入式系统中断处理机制研究](#)
4. [设计 ARM 的中断处理](#)
5. [基于 ARM 的数据采集系统并行总线的驱动设计](#)
6. [S3C2410 下的 TFT LCD 驱动源码](#)
7. [STM32 SD 卡移植 FATFS 文件系统源码](#)
8. [STM32 ADC 多通道源码](#)
9. [ARM Linux 在 EP7312 上的移植](#)
10. [ARM 经典 300 问](#)
11. [基于 S5PV210 的频谱监测设备嵌入式系统设计与实现](#)
12. [Uboot 中 start.S 源码的指令级的详尽解析](#)
13. [基于 ARM9 的嵌入式 Zigbee 网关设计与实现](#)
14. [基于 S3C6410 处理器的嵌入式 Linux 系统移植](#)
15. [CortexA8 平台的 \$\mu\$ C-OS II 及 LwIP 协议栈的移植与实现](#)
16. [基于 ARM 的嵌入式 Linux 无线网卡设备驱动设计](#)
17. [ARM S3C2440 Linux ADC 驱动](#)
18. [ARM S3C2440 Linux 触摸屏驱动](#)
19. [Linux 和 Cortex-A8 的视频处理及数字微波传输系统设计](#)
20. [Nand Flash 启动模式下的 Uboot 移植](#)
21. [基于 ARM 处理器的 UART 设计](#)
22. [ARM CortexM3 处理器故障的分析与处理](#)
23. [ARM 微处理器启动和调试浅析](#)
24. [基于 ARM 系统下映像文件的执行与中断运行机制的实现](#)
25. [中断调用方式的 ARM 二次开发接口设计](#)
26. [ARM11 嵌入式系统 Linux 下 LCD 的驱动设计](#)
27. [Uboot 在 S3C2440 上的移植](#)
28. [基于 ARM11 的嵌入式无线视频终端的设计](#)
29. [基于 S3C6410 的 Uboot 分析与移植](#)
30. [基于 ARM 嵌入式系统的高保真无损音乐播放器设计](#)
31. [UBoot 在 Mini6410 上的移植](#)
32. [基于 ARM11 的嵌入式 Linux NAND FLASH 模拟 U 盘挂载分析与实现](#)
33. [基于 ARM11 的电源完整性分析](#)
34. [基于 ARM S3C6410 的 uboot 分析与移植](#)
35. [基于 S5PC100 移动视频监控终端的设计与实现](#)
36. [UBoot 在 AT91RM9200 上的移植简析](#)
37. [基于工控级 AT91RM9200 开发板的 UBoot 移植分析](#)
38. [基于 ARM11 和 Zigbee 的人员定位防丢器](#)

邀请注册码



关注论坛公众号

Hardware:

1. [DSP 电源的典型设计](#)
2. [高频脉冲电源设计](#)
3. [电源的综合保护设计](#)
4. [任意波形电源的设计](#)
5. [高速 PCB 信号完整性分析及应用](#)
6. [DM642 高速图像采集系统的电磁干扰设计](#)
7. [使用 COMExpress Nano 工控板实现 IP 调度设备](#)
8. [基于 COM Express 架构的数据记录仪的设计与实现](#)
9. [基于 COM Express 的信号系统逻辑运算单元设计](#)
10. [基于 COM Express 的回波预处理模块设计](#)
11. [基于 X86 平台的简单多任务内核的分析与实现](#)
12. [基于 UEFI Shell 的 PreOS Application 的开发与研究](#)
13. [基于 UEFI 固件的恶意代码防范技术研究](#)
14. [MIPS 架构计算机平台的支持固件研究](#)
15. [基于 UEFI 固件的攻击验证技术研究](#)
16. [基于 UEFI 的 Application 和 Driver 的分析与开发](#)
17. [基于 UEFI 的可信 BIOS 研究与实现](#)
18. [基于 UEFI 的国产计算机平台 BIOS 研究](#)
19. [基于 UEFI 的安全模块设计分析](#)
20. [基于 FPGA Nios II 的等精度频率计设计](#)
21. [基于 FPGA 的 SOPC 设计](#)
22. [基于 SOPC 基本信号产生器的设计与实现](#)
23. [基于龙芯平台的 PMON 研究与开发](#)
24. [基于 X86 平台的嵌入式 BIOS 可配置设计](#)
25. [基于龙芯 2F 架构的 PMON 分析与优化](#)
26. [CPU 与 GPU 之间接口电路的设计与实现](#)
27. [基于龙芯 1A 平台的 PMON 源码编译和启动分析](#)
28. [基于 PC104 工控机的嵌入式直流监控装置的设计](#)
29. [GPGPU 技术研究与实现](#)
30. [GPU 实现的高速 FIR 数字滤波算法](#)
31. [一种基于 CPUGPU 异构计算的混合编程模型](#)
32. [面向 OpenCL 模型的 GPU 性能优化](#)
33. [基于 GPU 的 FDTD 算法](#)
34. [基于 GPU 的瑕疵检测](#)
35. [基于 GPU 通用计算的分析与研究](#)
36. [面向 OpenCL 架构的 GPGPU 量化性能模型](#)
37. [基于 OpenCL 的图像积分图算法优化研究](#)
38. [基于 OpenCL 的均值平移算法在多个众核平台的性能优化研究](#)
39. [基于 OpenCL 的异构系统并行编程](#)
40. [嵌入式系统中热备份双机切换技术研究](#)

邀请注册码



关注论坛公众号

41. [EFI-Tiano 环境下的 AES 算法应用模型](#)
42. [EFI 及其安全性研究](#)
43. [基于 UEFI Shell 的 PreOS Application 的开发与研究](#)
44. [UEFI Bootkit 模型与分析](#)

Programming:

1. [计算机软件基础数据结构 - 算法](#)
2. [高级数据结构对算法的优化](#)
3. [零基础学算法](#)
4. [Linux 环境下基于 TCP 的 Socket 编程浅析](#)
5. [Linux 环境下基于 UDP 的 socket 编程浅析](#)
6. [基于 Socket 的网络编程技术及其实现](#)
7. [数据结构考题 - 第 1 章 绪论](#)
8. [数据结构考题 - 第 2 章 线性表](#)
9. [数据结构考题 - 第 2 章 线性表 - 答案](#)
10. [基于小波变换与偏微分方程的图像分解及边缘检测](#)
11. [基于图像能量的布匹瑕疵检测方法](#)
12. [基于 OpenCL 的拉普拉斯图像增强算法优化研究](#)
13. [异构平台上基于 OpenCL 的 FFT 实现与优化](#)
14. [数据结构考题 - 第 4 章 串](#)
15. [数据结构考题 - 第 4 章 串答案](#)
16. [用 IPv6 编程接口实现有连接通信的方法](#)

邀请注册码



关注论坛公众号

FPGA / CPLD:

1. [一种基于并行处理器的快速车道线检测系统及 FPGA 实现](#)
2. [基于 FPGA 和 DSP 的 DBF 实现](#)
3. [高速浮点运算单元的 FPGA 实现](#)
4. [DLMS 算法的脉动阵结构设计及 FPGA 实现](#)
5. [一种基于 FPGA 的 3DES 加密算法实现](#)
6. [可编程 FIR 滤波器的 FPGA 实现](#)
7. [基于 FPGA 的 AES 加密算法的高速实现](#)
8. [基于 FPGA 的精确时钟同步方法](#)
9. [应用分布式算法在 FPGA 平台实现 FIR 低通滤波器](#)
10. [流水线技术在用 FPGA 实现高速 DSP 运算中的应用](#)

RT Embedded <http://www.kontronn.com>

11. [基于 FPGA 的 CAN 总线通信节点设计](#)
12. [基于 FPGA 的高速时钟数据恢复电路的实现](#)
13. [基于 FPGA 的高阶高速 FIR 滤波器设计与实现](#)
14. [基于 FPGA 高效实现 FIR 滤波器的研究](#)
15. [FPGA 的 VHDL 设计策略](#)
16. [用 FPGA 实现串口通信的设计](#)
17. [GPIB 接口的 FPGA 实现](#)

邀请注册码



关注论坛公众号