

# 基于 TMS320C6711D 和 FPGA 的图像辅助 末制导系统设计\* 与实现\*

徐婉莹, 黄新生, 闫宇壮

(国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 长沙 410073)

**摘 要:**为满足某捷联导引头上图像辅助末制导系统的需要, 设计了以高速浮点 DSP 芯片 TMS320C6711D 和现场可编程门阵列 FPGA 为核心的高性能图像匹配处理平台。文中详述了该系统的软、硬件设计以及各模块的组成和功能, 最后通过软硬件联合测试表明, 该系统可完全满足图像导引头上处理速度快、存储容量大、实时性强的要求, 并具有小型化、低成本和集成度高的优点。

**关键词:**景象匹配; 图像末制导; TMS320C6711D; FPGA

**中图分类号:** TJ765.331 **文献标志码:** A

## Design and Implement of Image-aided Terminal Guidance System Based on TMS320C6711D and FPGA

XU Wanying, HUANG Xinsheng, YAN Yuzhuang

(College of Mechatronics Engineering and Automation, NUDT, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In order to meet the demands of image-aided terminal guidance system, a high-performance scene-matching system based on TMS320C6711D and FPGA is designed. The overall hardware and software design and the composition of all function modules are described. Experiment results show that the scheme can totally meet the demands of high-speed, large storage and real-time performance of the strapdown seeker, and also has the merits of small volume, low cost and nice stability.

**Keywords:** scene matching; image-aided terminal guidance; TMS320C6711D; FPGA

### 0 引言

在精确制导武器上加装图像导引头, 利用图像信息修正纯惯性制导系统的误差, 辅助导弹的末制导, 是提高制导武器命中精度的有效方法。当武器进入末制导阶段后, 用预先存储的目标附近模板图像与实时获取的地面图像进行匹配, 在当前图像中精确定位出目标, 并将目标信息转换成弹上制导系统所需要的参数传送给导航计算机, 以修正随时间积累的惯导误差。由于季节与气候的变化, 导引头获取的图像质量不能保证; 而捷联导引头机动范围大, 同时末制导阶段时间短, 飞行速度快, 匹配算法必须完成大范围内的快速搜索, 这就决定了图像末制导系统必须具有高度的适应性和实时性。

在现有的图像匹配处理机研制中, 一些学者作出了有益的探索。文献[1—3]中分别设计了以 TMS320C6701 和 TMS320C6402 为核心处理器的图像匹配处理机。这类方案以一片 DSP 为核心外扩各类存储器构成 DSP 核心系统, 尽管得到了较好的结果, 但功能比较单一, 且 DSP 负担较重, 除了采用更高性能的 DSP, 不能保证其实时性, 但这也会增加系统的成本和设计的复杂性。文献[4]设计了以定点 DSP TMS320C6202 为核心的多目标识别跟踪系统, 该系统由图像预处理板、DSP 信号处理板和 PCI 板三部分组成, 系统集成度不高, 而且多板之间的数据交互和传输会影响到系统的整体性能。

文中面向捷联导引头图像辅助末制导的实际要求, 设计了以 TMS320C6711D 和 FPGA 为

\* 收稿日期: 2008-11-04

作者简介: 徐婉莹(1981—), 女, 河南偃师人, 博士研究生, 研究方向: 精确制导技术。

核心的图像辅助末制导系统。该系统设计采用 250MHz 的高速浮点 DSP 作为核心控制器,并采用高性能的 FPGA 进行辅助的图像处理以提高系统的实时性。

## 1 图像辅助末制导系统设计

图像辅助末制导系统的主要任务包括:1)采集 CCD 摄像头输出的模拟视频信号并经过视频解码和 A/D 转换为数字图像信号;2) FPGA 对数字图像信号进行预处理并存入相应的图像存

储器;3)景象匹配运算过程,由 DSP 采用灰度互相关匹配算法对采集到的实时图和预先存储的基准图像进行匹配,生成目标点信息;4)输出目标点信息给导航计算机进行辅助制导。此外,系统还要能够与上位机进行交互,接收命令,导入基准图和预置信息等。因此系统组成按功能可以划分为图像采集、显示和预处理部分、DSP 核心运算部分,以及通讯与输出部分。所有的模块都在一块电路板上实现,如图 1 所示,整个系统结构清晰,功能完善。

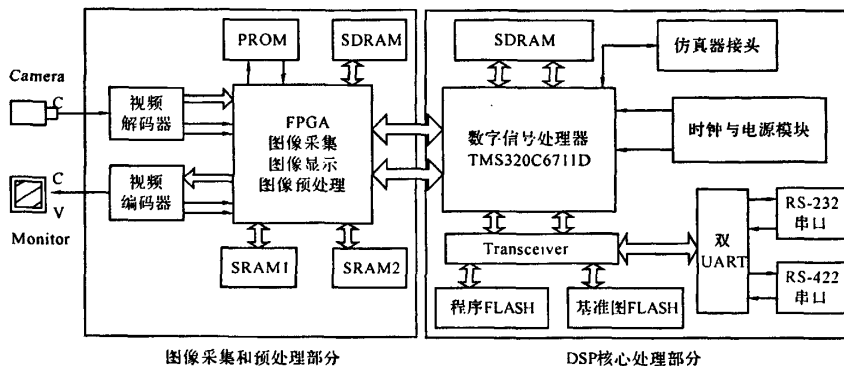


图 1 系统总体设计框架

### 1.1 图像采集、显示和预处理部分

图像采集、显示和预处理部分主要完成视频信号的采集与 A/D 转换、图像处理结果的 D/A 转换与显示输出,以及图像预处理的实现。这一部分的核心部件是 FPGA,包括 FPGA 的电源和配置 PROM、CCD 摄像机、监视器、视频编解码芯片,以及两个图像帧存储器。该部分功能模块如图 2 所示。

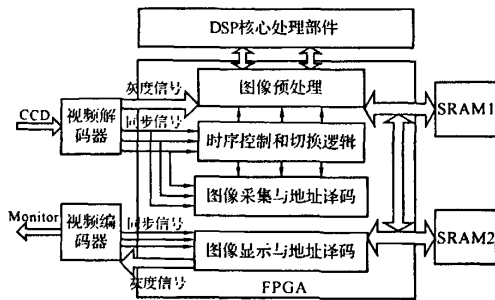


图 2 图像采集、显示与处理系统

CCD 摄像机输出的 PAL 制式模拟视频信号,经 PHILIPS 公司的增强型视频解码芯片 SAA7111A 进行解码和 A/D 转换为数字图像信

号输入到 FPGA。FPGA 根据 SAA7111A 输出的时钟和同步信号设计采样控制器和地址发生器,将有效图像信号存储到图像存储器 SRAM1 中。

从摄像头获取的实时图像不可避免地存在某些噪声和灰度失真,在图像读入 DSP 进行处理之前,先在 FPGA 中进行预处理,如灰度校正和滤波,可以有效减轻 DSP 的负担。如在 FPGA 中完成的直方图均衡化的图像预处理<sup>[6]</sup>仅需不足 13 $\mu$ s 的时间,大大提高了图像处理的实时性。

DSP 读取经过预处理后的数字图像信号,进入图像处理和匹配运算过程。处理完成后,DSP 再把处理后的数字图像传送到显示存储器 SRAM2 中。在 FPGA 中设计显示控制器,从 SRAM2 中读取图像数据送到 PHILIPS 公司的视频编码芯片 SAA7102,将数字图像信号重新编码为标准电视信号,并经 D/A 转换送到监视器输出。

作为图像预处理系统的核心部件,FPGA 除了完成采集控制、显示控制、地址译码,以及图像

预处理的功能之外,作为系统中唯一的逻辑控制器件,还负责协调 DSP 和视频编、解码芯片对两个存储芯片的分时控制,避免访问冲突。系统选用 Xilinx 公司功能强大的 Spartan3 系列 FPGA:XC3S1500,具有 150 万系统门和 4ns 的门延时。

图像采集、显示和预处理子系统实现了高性能的数据采集和预处理,不需 DSP 参与图像采集和预处理的过程,保证了 DSP 的实时信息处理能力。

### 1.2 DSP 核心运算处理部分

DSP 核心运算部分主要实现景象匹配运算、响应中断请求、接收外部信息、输出处理结果等功能。它以一片 DSP 芯片为核心,由一片程序 FLASH、两片基准图 FLASH、两片 SDRAM、4 片用于总线隔离和驱动的 16245,以及电源和复位电路组成。

由于景象匹配运算大数据量和存储量、高访问频率和高传输率的要求,在系统设计中,如何充分利用系统资源,达到设计要求,同时合理组织缓冲区数据,减少内存访问冲突是至关重要的。本系统经过合理空间分配和资源利用,得到的 EMIF 空间分配如图 3 所示。

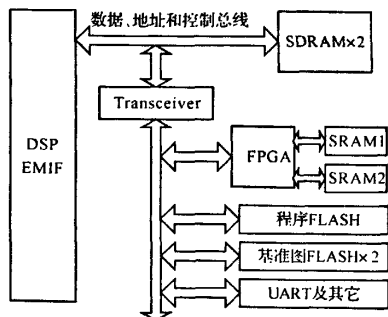


图 3 DSP EMIF 空间分配

其中一片程序 Flash Memory 用于固化程序和实现自举,映射在 DSP EMIF 的 CE1 空间;两片 SDRAM 构成  $16\text{M} \times 32\text{bit}$  的大容量动态存储器,用于 DSP 运算程序和中间数据的暂存,超大的存储容量能够满足景象匹配运算中大容量的数据暂存要求,映射在 EMIF 的 CE2 空间;两片 Flash Memory 组成  $4\text{M} \times 32\text{bit}$  的大容量基准图存储器,映射在 EMIF 的 CE3 空间,用于存储基准图数据和系统的预置数据和参数(如成像器几

何畸变校正表),在飞行任务之前由地面离线装入,掉电后不会丢失。

此外,预处理系统的两个图像存储器 SRAM1 和 SRAM2 通过 FPGA 映射在 EMIF 的 CE0 空间。这样的设计使得 DSP 可以在采集或处理完一帧图像后对图像进行整帧搬移,避免了采用 FIFO 不断对 DSP 产生中断、占用大量机时的弊端,提高了系统效率和实时性。

时钟与电源模块为 DSP 提供高质量的时钟和电源信号,并进行电压监控和提供复位脉冲。总线隔离与驱动的功能由 4 片总线收发器 16245 完成,在总线外挂存储器较多的情况下可以减轻 EMIF 的负担,提供必要的总线驱动能力。

DSP 采用 TI 公司的高性能浮点 DSP: TMS320C6711D,指令周期为 4ns,峰值处理速度  $1500\text{ MFLOPS}^{[7]}$ 。与同系列的 C670X 和 C671X 等相比速度更快,可扩展的存储空间更大,控制更灵活。

### 1.3 通讯与输出部分

图像辅助末制导系统与导航计算机之间的通讯采用 RS-422 串口通信标准,与主机 PC 机之间采用 RS-232 串口通信标准。系统采用 TI 公司的双 UART 芯片 TL16C752,通过外部存储器接口 EMIF 的并行总线扩展了两个异步串口。TL16C752 位于 CE0 空间的最后一部分。

在地面调试时,主机 PC 机根据当前的任务通过 RS-232 串口向该图像处理系统发送指令、传输基准图数据及各种预置数据、相关信息等。在执行任务的实时工作过程中,图像处理系统通过 RS-422 串口从导航计算机输入载体当前的位置、速率、姿态等信息用于图像变换和校正,图像处理和匹配完成后输出目标的高低角和方位角信息,发送给导航计算机与惯导信息进行融合。

## 2 核心软件及工作过程

图像辅助末制导系统软件部分可分为系统部分、预处理部分和匹配运算部分。系统部分包括自举程序、初始化模块、图像获取与输出模块、通讯模块等,预处理部分包括 FPGA 中的图像增强、滤波去噪,以及 DSP 中根据导航数据进行

的图像视角变换和几何校正;匹配运算部分包括最佳匹配区选择模块,景象匹配运算模块,目标高低角与方位角计算模块等。软件组成和模块划分如图4所示。

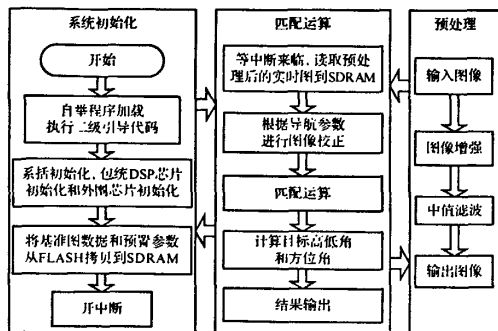


图4 软件系统模块划分

图像辅助末制导系统核心软件工作流程如下:

下:

1) 上电自举。上电后 DSP 首先通过 EDMA 方式从 CE1 空间的 FLASH 中拷贝 1KB 数据到地址 0 并开始执行,此时通过执行二级引导代码拷贝剩余的程序和数据。

2) 系统初始化。包括与中断相关的初始化、PLL 寄存器初始化、EMIF 初始化、对视频编、解码芯片的 I<sup>2</sup>C 总线初始化、串口的初始化、DMA 的初始化等等。

3) 将基准图 FLASH 中的基准图数据和预置数据拷贝到 SDRAM。

4) 开中断,等待一帧图像采集完毕的中断信号,DSP 采用 QDMA 方式从采集存储器中拷贝实时图数据,完成后产生 QDMA 中断,开始进行匹配运算。

5) 运算结束后,向串口发送匹配点信息;在原实时图上标示出目标位置,传送到图像显示存储器,通过监视器进行显示。

### 3 实验结果

采用航拍图像进行实验。图5为预先存储的目标模板图像,图6为对相邻的两帧实时图像进行匹配的结果。匹配算法采用经过改进的 FMI 算法。结果表明,该系统可以成功地采集图像并正确进行匹配和输出,验证了系统的有效性。

在实时性方面,当系统采用不同的匹配算法时,所需的时间不同。以传统比较耗时的归一化积相关算法为基准,本系统采用经过优化的 NNPROD 算法<sup>[8]</sup>,完成一幅  $90 \times$



图5 预存的目标模板图



图6 相邻的两帧实时图像中匹配得到的目标位置  $90$  的模板图与一帧  $512 \times 512$  大小的实时图匹配所需时间小于  $140\text{ms}$ ,相比于文献[2]中  $72 \times 72$  的模板图与  $320 \times 320$  的基准图匹配耗时  $100\text{ms}$ ,本系统具有较低的主频和较小的功耗,而具有更好的性能,且伴随着算法的改进和程序的优化,处理速度有可能达到更快的目标。

此外,文中设计的系统集图像采集、图像预处理、景象匹配运算、处理结果显示输出等功能于一体,不仅在功能上更为强大,而且在处理速度和存储容量 ( $64\text{MB}$ ) 上也均优于同类系统<sup>[1-4]</sup>。

### 4 结论

文中设计的基于 TMS320C6711D 和 FPGA 的图像辅助末制导系统,采用了目前市场上的主流芯片,通过巧妙的系统设计,解决了大运算量与实时性以及大数据量与存储空间有限之间的矛盾。目前该系统已经完成了硬件和软件的联合调试,试验结果表明系统运行良好,可靠稳定,能够满足图像辅助末制导大数据量、大存储量、高实时性和可靠性的实际需要,为导引头的图像辅助末制导提供了一个高速可靠的运行平台,也为巡航导弹和无人机等其它同类应用提供了参考。

(下转第 72 页)

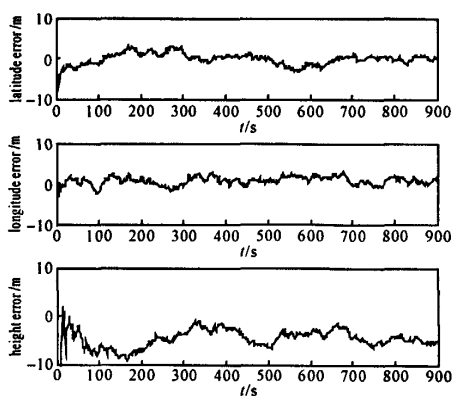


图3 UKF滤波法位置误差

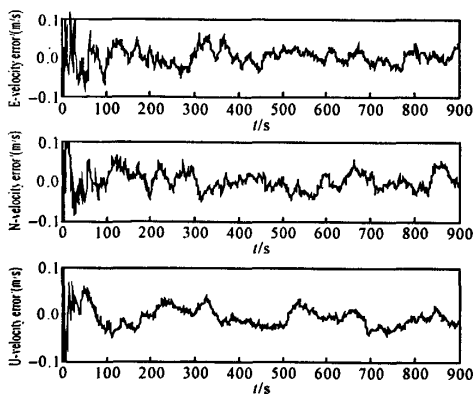


图4 UKF滤波法速度误差

系统具有更高的导航精度。将UKF应用于INS/无源北斗组合导航系统中,能有效解决量测方程为非线性的缺点。

## 4 结论

文中将UKF方法用于INS/无源北斗组合

导航系统,针对系统量测方程的非线性问题,利用一系列近似高斯分布的采样点,通过Unscented变换来进行状态与误差协方差的递推与更新,在每个更新过程中,采样点随着状态方程和非线性量测方程传播,这不仅保证了状态估计的精度,而且避免了对非线性方程的线性化处理,还具有较好的鲁棒性,充分展现了UKF方法相对其他滤波方法的优越性。从仿真结果可以看出,由于解决了量测方程的非线性问题,从而使滤波精度得到保证,对提高INS/无源北斗组合导航系统导航精度非常有效。

### 参考文献:

- [1] 赵丽,刘建业,林雪原. 双星定位系统改进方案与仿真研究[J]. 中国空间科学技术, 2002, 24(4): 18-23.
- [2] 薛红印,李景森. 北斗无源定位技术[J]. 现代防御技术, 2005, 33(4): 39-41.
- [3] 高法钦,谈展中. 无源北斗/惯导组合导航算法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(6): 903-906.
- [4] Julier S J, Uhlmann J K, Durrant-Whyten H F. A new approach for the nonlinear transformation of means and covariance in filters and estimators[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2000, 45(3): 477-482.
- [5] 王淑一,程杨,杨涛,等. UKF方法及其在跟踪问题中的应用[J]. 飞行力学, 2003, 21(3): 59-62.
- [6] 常青. 巡航导弹制导技术关键技术研究[D]. 西安:西北工业大学, 2003: 60-90.


(上接第65页)

### 参考文献:

- [1] 朱永松,国澄明,肖志涛. 基于TMS320C6701 DSP的图像匹配处理机的硬件设计[J]. 信号处理, 2002, 18(5): 453-455.
- [2] 国澄明,李铁盘,朱永松,等. 基于TMS320C6415的图像匹配处理机的设计与实现[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(4): 481-485.
- [3] 肖志涛,国澄明,朱永松. 基于TMS320C6701 DSP的图像匹配处理机的设计与实现[J]. 天津大学学报, 2002, 35(4): 487-490.
- [4] 冷何英,王敬儒,张启衡,等. 基于TMS320C6202

的实时多目标识别跟踪系统处理平台设计[J]. 信号处理, 2002, 18(2): 155-158.

- [5] Spantan-3 FPGA Family: Complete Data Sheet [Z]. Xilinx Inc. 2005, 19/8.
- [6] 徐婉莹,郑永斌,黄新生. 图像匹配预处理系统中基于FPGA的高速图像采集和快速直方图运算[J]. 传感技术学报, 2008, 21(8): 1388-1392.
- [7] TMS320C6711D Floating-Point Digital Signal Processor[Z]. Texas Instruments, 2006.
- [8] 同宇壮,王亦平,黄新生. 基于爬山法的快速图像匹配[J]. 科学导报, 2008, 26(20): 72-75.

作者: 徐婉莹, 黄新生, 闫宇壮  
作者单位: 国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 长沙, 410073  
刊名: 弹箭与制导学报   
英文刊名: JOURNAL OF PROJECTILES, ROCKETS, MISSILES AND GUIDANCE  
年, 卷(期): 2009, 29(5)  
被引用次数: 0次

## 参考文献(8条)

1. 朱永松, 国澄明, 肖志涛. 基于TMS320C6701 DSP的图像匹配处理机的硬件设计[J]. 信号处理, 2002, 18(5): 453-455.
2. 国澄明, 李铁盘, 朱永松, 等. 基于TMS320C6415的图像匹配处理机的设计与实现[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(4): 481-485.
3. 肖志涛, 国澄明, 朱永松. 基于TMS320C6701 DSP的图像匹配处理机的设计与实现[J]. 天津大学学报, 2002, 35(4): 487-490.
4. 冷何英, 王敬儒, 张启衡, 等. 基于TMS320C6202的实时多目标识别跟踪系统处理平台设计[J]. 信号处理, 2002, 18(2): 155-158.
5. Spantan-3 FPGA Familyl Complete Data Sheet[Z]. Xilinx Inc, 2005, 19/8.
6. 徐婉莹, 郑永斌, 黄新生. 图像匹配预处理系统中基于FPGA的高速图像采集和快速直方图运算[J]. 传感技术学报, 2008, 21(8): 1388-1392.
7. TMS320C6711D Floating-Point Digital Signal Pro-cessor[Z]. Texas Instruments, 2006.
8. 闫宇壮, 王亦平, 黄新生. 基于爬山法的快速图像匹配[J]. 科学导报, 2008, 26(20): 72-75.

## 相似文献(1条)

### 1. 学位论文 李晓雷 景象匹配末制导系统的关键技术研究 2008

惯导+图像制导炸弹具有很高的精度和巨大的效费比, 必将在高技术局部战争中发挥重要作用。利用图像末制导方式可以校正惯导的累计误差, 并降低对惯导的精度要求。景象匹配是一种有效的图像制导方式, 本课题以低成本捷联导引头上的图像末制导为研究背景, 对涉及景象匹配的关键问题进行了研究。景象匹配主要包括以下关键技术: 图像校正技术; 景象匹配区选择技术; 景象匹配搜索策略; 景象匹配可信度分析技术。本文在利用惯导提供位置信息的基础上, 实现了对实时图校正; 并就如何选择有利的景象匹配区位置和大小进行了深入的研究; 为了实现对目标的快速识别, 本文对当前景象匹配算法的搜索策略进行了研究, 改进了两种性能优异的搜索方式, 可满足景象匹配的实时性要求; 景象匹配的结果可能存在或大或小的误差, 对打击任务来说, 这种误差可能造成弹体偏离预定目标, 因此本文对景象匹配的结果进行了可信度分析。

论文主要从以下四个方面进行研究:

(1) 由于弹体飞行过程中三个姿态角和高度相对于基准图的拍摄条件存在较大差异, 造成实时图和基准图之间存在较大变形, 不利于景象匹配, 本文分别从摄像机光轴引起图像形变、图像旋转变形和高度引起形变三个方面推导出了有效的图像校正算法。实验结果表明, 该算法校正精度高, 对惯导误差鲁棒性强, 有利于提高景象匹配算法的定位精度。

(2) 在图像信息和相关曲面基础上构建了五类适配性指标, 利用这些指标定义了景象匹配区位置和大小选择算法, 并分析了这五类指标的计算复杂度, 以及它们的相关性。实验结果表明, 本文对适配性指标和景象匹配区判定的定义合理, 为景象匹配区的合理选取提供了理论依据。

(3) 图像制导系统对景象匹配实时性要求较高, 而传统的景象匹配算法不能满足实时性的要求, 本文提出了改进的爬山法搜索策略和遗传算法搜索策略。对保证较大搜索成功的初始爬山者数量, 以及正确匹配概率进行了定量的理论研究; 提出了“迟滞区”克服策略和自适应变异策略等改进措施。实验结果表明, 本文改进后的算法能够满足系统对实时性和精度的要求。

(4) 探讨了景象匹配结果的可信度, 本文通过建立的仿真平台生成训练样本集和测试样本集, 采用BP网络进行训练, 用离线条件下训练好的神经网络模型在线实时估计景象匹配结果的可信度; 进一步提出了基于多匹配结果的剔除和重构算法, 修正新产生的匹配点的位置坐标和可信度, 克服单次匹配可能存在较大误差的缺陷, 使匹配结果更可信。

论文的研究始终紧紧围绕景象匹配系统对速度、精度和适应性的要求, 从理论上对景象匹配系统的各个主要环节进行了较为深入的研究, 基本上达到了设计目标。

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_djydx200905016.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_djydx200905016.aspx)

授权使用: 陕西理工学院(sxlgxy), 授权号: df39c77b-87d9-4b10-9073-9df201092b8d

下载时间: 2010年9月15日