

文章编号: 1001-2486(2008)04-0088-06

JPEG2000 遥感图像实时压缩系统中 基于并行机制的“零时间”数据搬移策略*

杜列波, 肖学敏, 罗武胜, 魏鹏

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 为了满足 JPEG2000 遥感图像实时压缩设备的实时性要求, 提出了一种基于并行机制的“零时间”数据搬移策略。通过对 EBC 算法结构进行拆分, 并采用 EDMA 方式进行数据搬移, 使得算法运算与数据搬移过程完全并行, 搬移时间等效为零。实验结果表明, 采用新的数据搬移策略后, 编码效率可以提升到 100%, EBC 算法实现的总时间可缩短 46% 以上。该搬移机制已成功应用于 JPEG2000 星载遥感图像实时压缩系统中, 系统的实时性达到了设计要求。

关键词: 数据搬移; 并行实现; EBC 算法; DSP

中图分类号: TN919.8 **文献标识码:** A

No-time Spending Data Moving Strategy Based on Parallel Mechanism in JPEG2000 Remote Sensing Image Real-time Compression System

DU Lie bo, XIAO Xue min, LUO Wu sheng, WEI Peng

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To satisfy the real time need of JPEG2000 satellite remote image compression system, a no-time spending data moving strategy based on parallel mechanism is proposed in this paper. It is implemented by splitting the EBC algorithm and adapting EDMA transport method, which parallels the operations of the algorithm and data moving. With the new data moving strategy, the coding efficiency can achieve one hundred percent and the total time for EBC algorithm implementation has been decreased by 46%. The new data moving strategy has been applied to satellite on-board JPEG2000 image real-time compression system successfully.

Key words: data moving; parallel implementation; EBC algorithm; DSP

随着空间技术的发展, 特别是太空军事技术的发展, 对太空遥感提出了越来越高的要求, 为此空间遥感图像的数据量呈几何级数增加。由于星载固存的扩容速度以及无线信道的有限容量难以适应这样的海量数据存储以及传输要求, 高分辨率图像产生的海量数据必须进行实时压缩。JPEG2000 作为新一代的静态图像压缩标准, 可以在获得高压缩比的同时确保高图像质量, 在星载遥感图像压缩领域得到了广泛的应用^[1-3]。JPEG2000 编码算法具有复杂度高、运算量大的特点, 给星载遥感图像实时压缩设备的研制提出了巨大的挑战^[4]。为了满足实时性需求, 需要硬件配合来提升算法运算速度。目前遥感图像数据压缩的硬件实现方法最广泛采用的是基于多 FPGA 的方案或是基于专用图像芯片 ADV202。ADV202 没有军品级和宇航级, 可靠性方面存在隐患, 并不适合用于星上设备。而多 FPGA 方案虽然能够较好地满足图像压缩算法要求, 但由于编码算法复杂, 如多重 if-then-else 结构, 不利于 FPGA 实现, 为了最大程度地发挥硬件功效, 我们提出了 FPGA 和多 DSP 相结合的硬件实现方案。

DSP 非常适合于需要复杂算法的应用领域。对于图像压缩算法, 尤其是变换后的编码算法, 存在很多循环、条件、跳转等操作, 结构相当复杂, 这些都更适合于采用 DSP 实现。JPEG2000 算法分成变换 (Transform)、嵌入式块编码 (Embedded Block Coding, EBC) 和优化截断 (Optimized Truncation, OT) 三个模块,

* 收稿日期: 2008-03-11

基金项目: 国家 863 高技术计划资助项目

作者简介: 杜列波 (1980-), 男, 博士生。

其中 EBC 算法由 DSP 完成。EBC 算法的实现时间包括完成算法本身所需时间和数据搬移所需时间两个部分。如果不改变 EBC 算法的实现框架,为了满足实时性要求,只能通过缩短数据搬移时间的方法来缩短 DSP 运算总时间。通过实验仿真,我们发现这种方法取得的效果并不明显。因此,我们提出对 EBC 算法进行拆分, DSP 采用 EDMA 方式进行数据搬移,使得算法与数据搬移并行实现。在这种新的数据搬移策略下,当数据搬移过程与算法运算完全并行时, DSP 实现 EBC 算法的总时间就是完成算法本身所需时间,搬移过程就等效于零时间完成。

1 图像实时压缩设备系统结构及工作原理

1.1 系统结构

图像实时压缩设备采用基于 FPGA 和 4 个 DSP 的硬件平台来实现 JPEG2000 静态图像压缩算法,系统结构如图 1 所示。

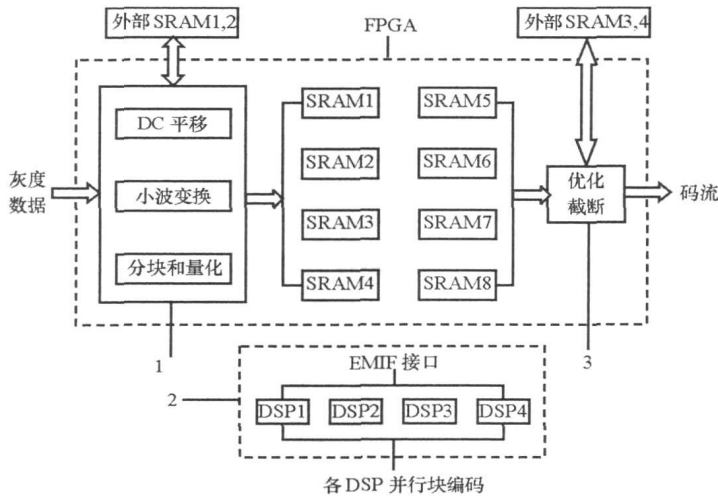


图 1 基于 FPGA 与多 DSP 的 JPEG2000 压缩系统结构

Fig. 1 JPEG2000 compression system based on FPGA and multir DSPs

JPEG2000 算法中的 Transform 模块和 OT 模块由 VirtexII3000 系列的 FPGA 来完成, EBC 由 4 个 C6000 系列的 DSP 共同来完成。图中的 4 片外部存储器分别用作 Transform 模块和 OT 模块的中间缓存。另外,在 FPGA 内部还开辟了 8 块双口缓存区,用来在 Transform 和 EBC 模块之间以及 EBC 和 OT 模块之间交互数据。其中 4 块用来存放变换后的数据,另外 4 块用来存放块编码后的数据。每个 DSP 通过各自独立的 EMIF 总线接口与 FPGA 内部的两块 SRAM 相连,如 SRAM1 和写 SRAM5 同时挂在 DSP1 的 EMIF 总线上, DSP1 对这两块中的任何一块都能进行读写操作,并通过高位地址来区分是对哪块进行操作。

1.2 工作原理

从相机或相机模拟源输出的灰度图像数据经过 Transform 模块处理后,得到量化好的 256 个 $64 \times 64 \times 16\text{bit}$ 小波系数块,并将相应的小波系数块写入 FPGA 内部的 SRAM1~4 中;4 个 DSP 分别从 SRAM1~4 中读出与之相对应的小波系数块,并行块编码,然后将块编码后的结果分别相应写入 FPGA 内部 SRAM5~8 中;OT 模块读出 SRAM5~8 中的数据,放入外部 SRAM3 或 4 中,直到读完 256 个块即一个 Tile 的编码数据后,才根据质量控制算法对整个 tile 的编码数据作优化截断处理,得到最终的码流并输出。

在压缩系统中,由 DSP 实现的 EBC 算法与由 FPGA 实现的 Transform 和 OT 算法按照流水线机制运行,即 Transform 算法在处理第 $N+2$ 个 Tile 时, EBC 算法处理第 $N+1$ 个 Tile, OT 处理第 N 个 Tile。

2 基于并行机制的“零时间”数据搬移策略

为了满足实时性要求, EBC 算法和 OT 算法必须在 Transform 算法处理第 $N+2$ 个 Tile 的时间段内完成对各自 Tile 的处理。而 EBC 算法要比 OT 算法复杂许多^[5],因此,压缩系统中最有可能会出现实时性瓶

颈的算法模块便是 EBC 模块,这也是系统采用 4 个 DSP 共同完成 EBC 算法的原因所在。

EBC 算法涉及的数据搬移过程有两个:(1) 将小波数据块从内部 SRAM1~4 搬移到 DSP1~4 的内部缓存区中;(2) 将编码后的数据块从 DSP1~4 的内部缓存搬移到内部 SRAM5~8 中。

设 T_E 为每个 DSP 的 EBC 算法运算需要的时间, T_R 为搬移过程(1)需要的时间, T_W 为搬移过程(2)需要的时间,则每一次块编码所需要的时间为

$$T_{\text{总}} = T_R + T_E + T_W \quad (1)$$

为了对搬移时间有一个直观合理的评价,引入一个评价指标。定义 DSP 的 EBC 编码效率为

$$\eta = \frac{T_E}{T_{\text{总}}} = \frac{T_E}{T_E + T_R + T_W} \times 100\% \quad (2)$$

在 T_E 为定值时,从(2)式中不难看出,数据搬移时间越短,编码效率越高;反过来,编码效率越高,则说明数据搬移时间也越短。所以,可以用编码效率来衡量数据搬移机制的优异程度。在本文的实验部分,将用该指标来评价本文设计的数据搬移机制。

2.1 EDMA 数据搬移方式

DSP 可以用指令方式或者 EDMA 方式实现数据搬移,指令方式因其操作简单常被采纳。采用这种方式搬移一个数据块,只需要写一个读写循环程序即可。但是,此方式搬移数据的效率非常低,需要多个时钟周期才能搬移一个数据。虽然 EDMA 搬移方式操作比较复杂,需要配置很多的参数寄存器,但是其搬移过程独立于 CPU,不占用其资源,CPU 下达启动命令后,搬移过程就在后台独立运行。只要参数配置恰当,可实现 100% 的搬移效率,即在一个时钟周期内搬移一个数据。

由于 C6000 系列的 DSP 有多个 EDMA 通道,所以,要实现 EDMA 数据搬移,首先要选择搬移过程所占用的通道,然后对该通道的参数寄存器组和 EDMA 控制寄存器组进行配置。需要配置的参数寄存器组分别为:选择参数寄存器(OPT)、源地址寄存器(SRC)、目的地址寄存器(DST)、索引寄存器(IDX)、传输长度寄存器(CNT)和参数重载寄存器(RLD)。需要配置的控制寄存器组分别为:中断使能寄存器(CIER)、通道链使能寄存器(CCER)、事件使能寄存器(EER)、事件清除寄存器(ECR)、事件设置寄存器(ESR)和事件极性寄存器(EPR)。如果用查询方式,则不需要对 CIER 进行配置了,而是在使用过程中根据中断挂起寄存器(CIPR)中的内容来确定当前的 EDMA 传输是否完成。

2.2 EBC 算法的拆分

EBC 算法是 EBCOT^[6-7] 算法中的一部分,算法由位平面扫描和算术编码两部分完成。在 JPEG2000 的标准中,EBC 算法的实现可用图 2 中的流程图来描述。位平面扫描按照从高到低的顺序扫描完小波系数块的所有位平面,在每一个位平面上需要对一个小波系数块的全部样本扫描,每次扫描 4 个样本,然后更新上下文并输出符号类,算术编码器编码输出的符号类得到相应的码流。

搬移过程(1)读出小波系数块后,将其存放在 DSP 的存储器 A 中,经算术编码后将码流存放在 DSP 的存储器 B 中,由搬移过程(2)取走。从拆分前的算法流程图可以看出,EBC 算法分多次循环完成,扫描算法与编码算法串行于循环内,即每次循环既有扫描算法,又有算术编码。每次循环对存储器 A 和 B 均有操作,但仅是对其部分存储区操作,而两次搬移过程分别是一次将数据全部写入和读出存储器 A 和 B。因此,完成一次搬移过程(1)后,需要等到扫描算法、算术编码和搬移过程(2)全部完成后,才能够开始下一轮的搬移;同样,完成一次搬移过程(2)后,需要等到搬移过程(1)、扫描算法和算术编码全部完成后,才能够开始下一轮的搬移。两个搬移过程与算法运算串行执行。

要使算法的运算过程与搬移过程可并行执行,必须满足两个条件:(1) 循环算法的每一次循环中不同时对存储器 A 和 B 操作;(2) 搬移过程能够在后台独立运行。EDMA 搬移方式可以保证条件(2),为了让条件(1)也满足要求,就必须让扫描算法与编码算法串行于循环外。为此,本文提出了一个算法拆分方案:在 DSP 内开辟一个存储器 C,在此基础上,把实现 EBC 算法的一个循环分成两个循环:扫描循环和编码循环。拆分后算法流程如图 3 所示,扫描循环从存储器 A 中读入数据,处理后将结果写入存储器 C;编码循环从存储器 C 中读出数据,处理后将结果写入存储器 B 中。编码循环要等到扫描循环完成后

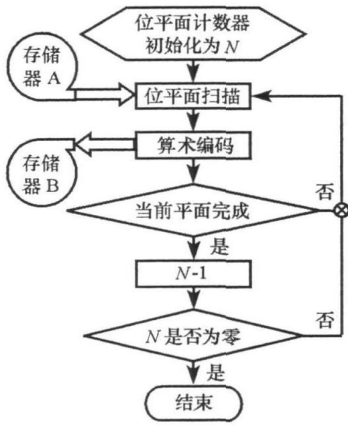


图2 拆分前 EBC 算法流程

Fig. 2 Flow chart of EBC algorithm before splitting

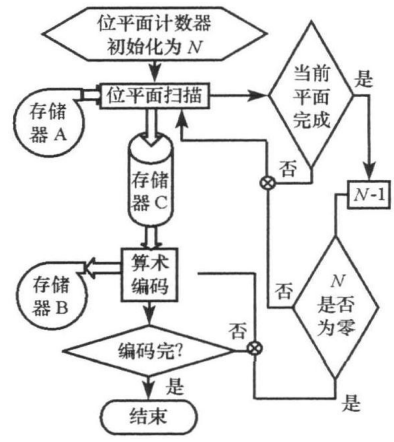


图3 拆分后 EBC 算法流程

Fig. 3 Flow chart of EBC algorithm after splitting

才开始,因此,扫描循环执行的时间段内可同时执行搬移过程(2)。同样,编码循环执行的时间段内也可以同时执行搬移过程(1)。算法拆分后,两个搬移过程与 EBC 算法完全执行,算法实现结构如图 4 所示,虚线框表示搬移过程在后台执行,不占用 CPU 时间。

算法拆分后,设位平面扫描所用时间为 T_s , 算术编码所用时间为 T_c , 搬移过程(1)和(2)所用时间仍然用 T_R 和 T_W 表示。则实现 EBC 算法的时间为

$$T_{\text{总}} = \text{MAX}(T_s, T_w) + \text{MAX}(T_c, T_R) \quad (3)$$

由于算法拆分后,并未改变算法的运算量,所以

$$T_E = T_s + T_c \quad (4)$$

结合式(2)~(4)可发现,在引入新的搬移机制后,EBC 算法中的运算时间没有改变,但是实现的总时间缩短,所以编码效率必然会提高。特别是当搬移过程(1)和(2)所用时间分别短于扫描算法和算术编码所用时间时,式(3)可等价于

$$T_{\text{总}} = T_s + T_c = T_E \quad (5)$$

根据式(2)可计算出编码效率为 100%, 等效于零时间搬移。

3 实验结果及分析

将图像模拟源与本文所采用的 JPEG2000 星载图像压缩平台对接,进行硬件仿真,模拟源发送的图片为如图 5 所示的遥感样本图片。压缩系统中, DSP 的 EMIF 接口时钟为 70MHz, DSP 的主频为 840MHz。算法的搬移时间以及运算时间通过调用 DSP 开发系统中的计时函数获得,计时单位为时钟周期数。在后面的结果中,直接将其换算成时间。

图 6 是测试新旧搬移机制实现 EBC 总时间得到的实验数据,坐标横轴表示样本图的分块序号,总共 256 个分块;纵轴为实现 EBC 算法的总时间。采用新的搬移机制后,256 个分块的 EBC 算法实现时间要比旧搬移机制下对应分块 EBC 算法实现时间缩短很多。图 6 中编码块 EBC 算法实现时间呈四层阶梯状,这是由于处于不同小波变换级数的编码块的小波系数复杂度差异较大,其分块所对应的 EBC 算法实现的时间会有较大的差异。图 7 是根据 EBC 算法运算时间和新旧搬移机制 EBC 算法实现总时间而计算出来的编码效率,与旧搬移机制相比,新搬移机制中 EBC 的编码效率要高将近 2 倍。从图中还可看出,采用新搬移机制后,256 个分块的编码效率均达到 100%。这是因为遥感样本图片的复杂度较

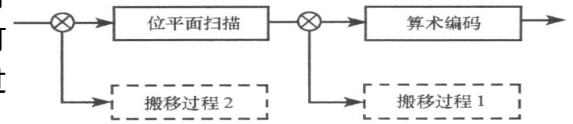


图4 搬移过程与 EBC 并行执行结构

Fig. 4 The parallel architecture of data moving and EBC executing

高, EBC 算法运算中的扫描算法和编码算法所需要的运算时间都远大于 EDMA 搬移一个分块数据所要的时间。因此, 在新的搬移机制中, 当搬移过程与算法运算完全并行时, 搬移过程就等效于零时间完成了。

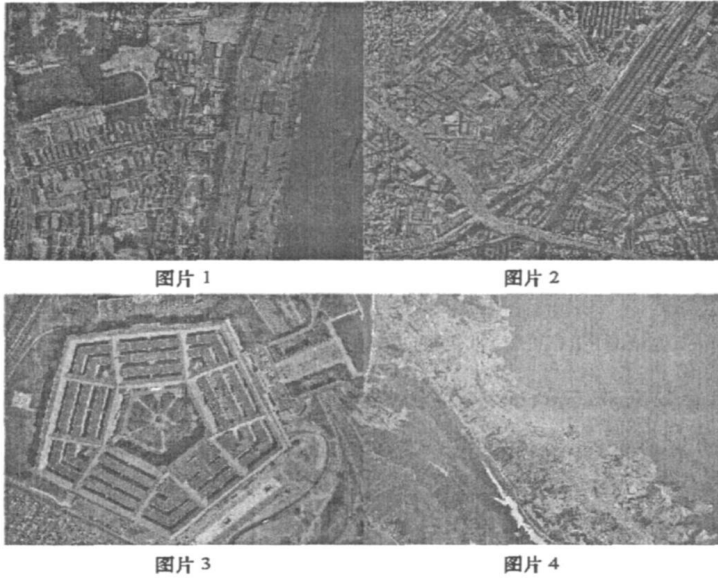


图 5 遥感图像测试样本图片

Fig. 5 Satellite remote sense images for test

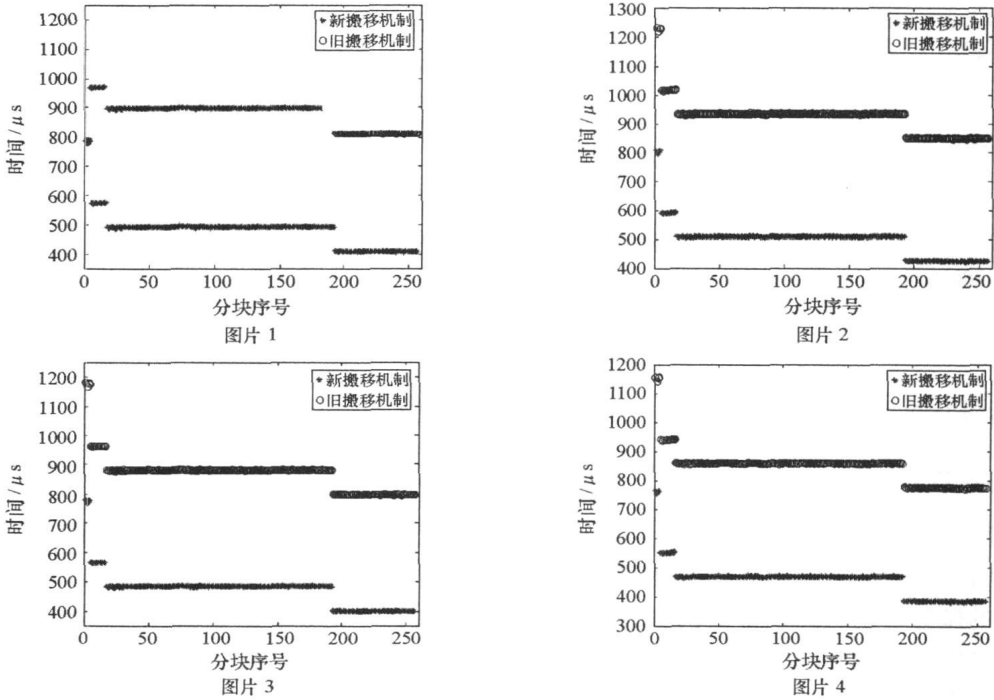


图 6 新旧搬移机制 EBC 算法实现时间比较

Fig. 6 Comparison of the time for EBC between the original and improved data moving strategies

将 256 个分块的 EBC 算法实现总时间累加, 可得到单个 DSP 实现整幅样本图片的 EBC 算法的时间。表 1 给出了新旧搬移策略下四幅样本图片 EBC 算法实现所需时间的比较结果。从中可以看出, 改进数据搬移策略后, EBC 算法实现的时间缩短了 46% 以上, 系统的实时性能得到了很大的提升。

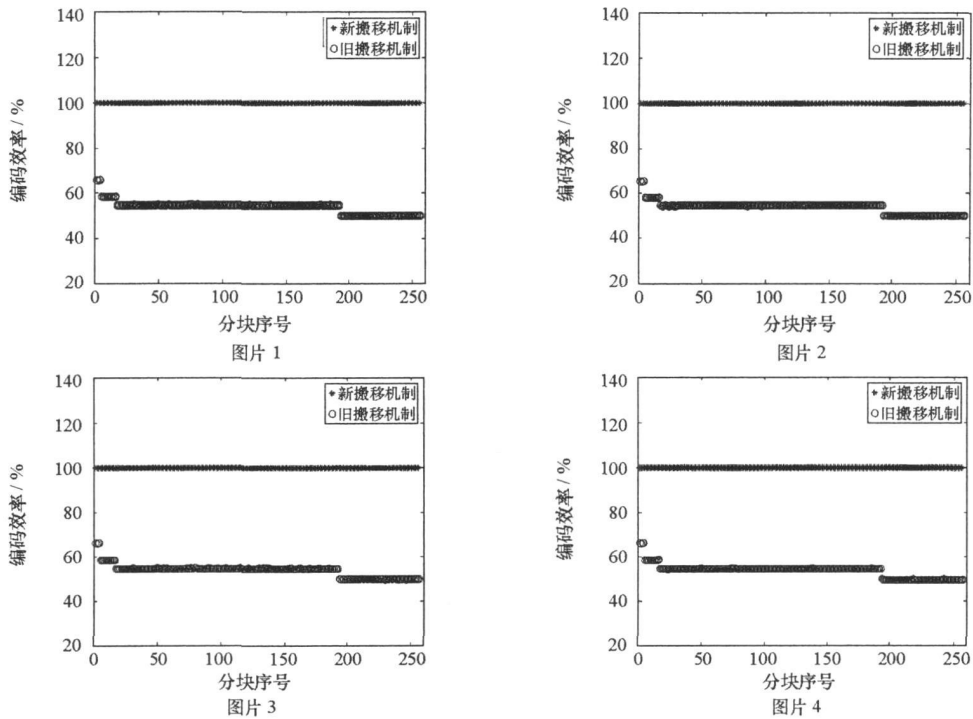


图7 新旧搬移机制 EBC 编码效率比较

Fig. 7 Comparison of EBC coding efficiency between the original and improved data moving strategies

表1 数据搬移策略改进前后 EBC 算法实现时间比较

Tab. 1 Comparison of the time for EBC between the original and improved data moving strategies

样本图片名称	改进前 EBC 算法 实现时间(ms)	改进后 EBC 算法 实现时间(ms)	改进后 EBC 算法 实现时间缩短百分比
图片 1	226.9	122.6	46.0
图片 2	236.4	127.3	46.2
图片 3	222.8	120.4	46.0
图片 4	217.1	117.1	46.1

4 结论

通过对 EBC 算法进行拆分, DSP 采用 EDMA 方式进行数据搬移, 使得算法与数据搬移并行实现。在这种新的数据搬移策略下, 搬移过程与 EBC 算法运算完全并行, 大大提高了 EBC 的编码效率和系统的实时性, 对于复杂度较高的遥感图像, 编码效率可以提升到 100%。该搬移机制已成功应用于 JPEG2000 星载遥感图像压缩系统中, 系统的实时性完全达到了设计要求。

参考文献:

- [1] Nicholson D. An Effective Satellite On Board JPEG2000 Image (De) Coding Implementation Based on PIRANHA Systematic DSP [C]// 20th AIAA International Communication Satellite Systems Conference and Exhibit, 2002: 1-6.
- [2] Trenchel T, Bretschneider T, Leedham G. Using JPEG2000 On Board Mini Satellites for Image Driven Compression [C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003: 2033-2035.
- [3] 赵清, 林宝军, 张善从. JPEG2000 遥感图像实时压缩系统[J]. 计算机仿真, 2007(3): 180-183.
- [4] Whlie H J, Moira. JPEG2000 Image Compression: A Real-time Processing Challenge [J]. Advanced Imaging, 2003, 18(4): 14-43.
- [5] Lian C J, Chen K F. Analysis and Architecture Design of Block coding Engine for EBCOT in JPEG2000 [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, 13(3): 219-230.
- [6] JPEG2000 Part1 Final Committee Draft Version 1.0 [S]. ISO/IEC JTC1/SC29/WG1 N1646R, 2000.
- [7] Taubman D S. JPEG2000: Image Compression Fundamentals, Standards and Practice [M]. Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, 2002.