

文章编号: 1007-4619 (2005)02-0195-09

# 基于立体补偿的遥感立体像对压缩方法

李飞鹏, 马国锐, 秦前清, 李德仁

(武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079)

**摘要:** 提出研究遥感立体像对的压缩问题。主要讨论了左右影像的视差补偿和辐射补偿。针对遥感立体像对视差分布不均以及左右影像存在辐射差的特点, 提出了一种基于立体补偿的遥感立体像对压缩算法。该算法以左片为基准图像, 采用自适应视差估计计算出右片的视差矢量, 结合辐射校正和重叠块视差补偿技术得到平滑的右片的预测图像, 以右片减去预测图像得到残差图像, 然后采用小波压缩算法对残差图像进行压缩。实验结果表明, 该算法能显著提高遥感立体像对的压缩性能。

**关键词:** 遥感立体像对; 立体补偿; 自适应视差估计; 辐射补偿; 整数小波; 图像压缩

**中图分类号:** TP751.1      **文献标识码:** A

## 1 引言

遥感立体成像技术<sup>[1,2]</sup>研究始于20世纪80年代初期, 目前已经在多颗卫星上得到应用。法国的SPOT、美国的IKONOS、日本的ALOS和中国的中巴资源等卫星都已具备立体成像能力。立体成像系统的数据量在影像地面分辨率相同的情况下是单幅成像系统的1—2倍, 数据传输的压力更大。遥感立体像对之间存在很大的相关, 如果充分利用这种相关性, 可以提高立体像对的传输和存储的效率。不过, 由于各方面条件的限制, 对立体像对压缩技术的研究远不如单幅影像压缩那样深入和广泛。

1992年Perkins博士在其论文<sup>[3]</sup>中建立了立体像对压缩的率失真模型, 并提出了频域分块预测的DCTDP算法; 1996年Woo博士提出了基于MRF模型的视差补偿算法<sup>[4]</sup>; 随后Jiang博士提出了先锋块预测(Pioneer)算法<sup>[5]</sup>同时利用像间相关和像内相关以避免视差矢量的保存。这些算法都采用固定分块预测, 并用DCT变换压缩残差图像。1997年12月斯坦福大学的研究人员曾就各种立体像对压缩算法进行测试, 结果发现最好的算法在无损失压缩方面都还及不上JPEG压缩<sup>[6]</sup>, 有损压缩性能提高得也不多。

立体像对压缩算法一般包含以下几步: 以左片

(或右片)为基准图, 通过视差补偿得到右片(或左片)的预测图像; 用右片减去其预测图像得到残差图像; 保存左片和视差矢量, 并用某种方法压缩残差图像<sup>[7,8]</sup>。立体像对压缩的关键在于两个方面: (1) 预测图像的精度; (2) 残差图像的压缩效率。由于立体像对的视差补偿和视频图像的运动补偿非常相似, 视频压缩的一些新技术对于提高立体像对预测精度有很好的借鉴作用。考虑到辐射差对预测结果的影响, 在预测过程中引入辐射补偿也有助于提高预测精度; 同时, 整数小波图像压缩技术<sup>[9]</sup>的成熟也为残差图像的压缩提供了更好的方法。所以综合运用这些新技术有望使立体像对压缩取得进展。

本文从视差补偿和辐射补偿两方面来讨论遥感立体像对的压缩。提出了一种基于立体补偿的遥感立体像对压缩方法, 该方法综合了视差补偿和辐射补偿, 采用高性能整数小波图像编码器压缩残差图像, 其无损和有损压缩性能均优于以前的算法, 也强于单独的整数小波压缩。

## 2 基于立体补偿的立体像对的压缩算法原理框图

如图1, 基于立体补偿的立体像对压缩算法的基本流程如下: 以左片作为基准图像, 把右片当作左片的投影。采用块匹配算法计算右片和压缩以后重

收稿日期: 2003-06-20, 修订日期: 2004-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40204008); 测绘遥感国家重点实验室主任基金项目(No. WKL10070401)

作者简介: 李飞鹏(1975—), 男, 讲师, 博士生, 1999年毕业于武汉大学电信学院获通信与信息系统硕士学位。现工作于测绘遥感信息工程国家重点实验室, 主要从事海量数据压缩的研究。

建的左片之间的视差和灰度差,采用自适应重叠块视差补偿和辐射补偿生成右片的预测图像,并用右片减去其预测图像得到残差图像。这样左、右片经过单独像对相对定向和立体去相关后变成了 3 部

分:左片、残差图像、视差和灰度差矢量。残差图像可用高性能整数小波编码器进一步压缩,视差和灰度差矢量则如 3.1 节所述先用四叉树编码,再用熵编码器进一步压缩。

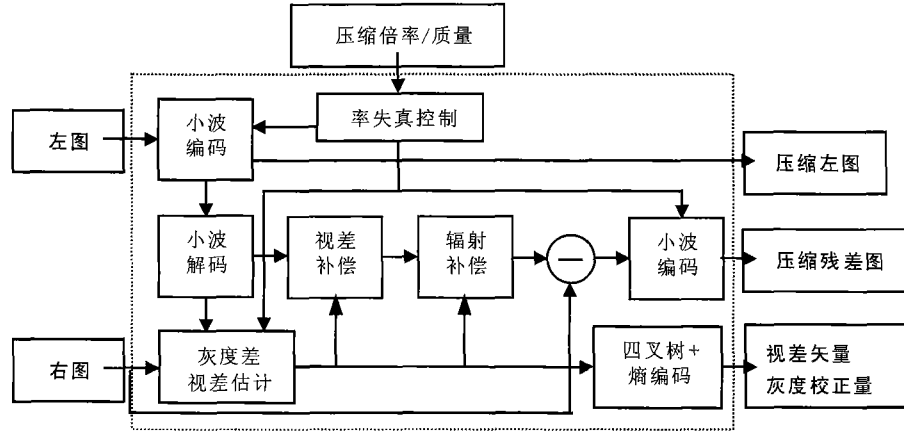


图 1 遥感立体像对压缩算法框图

Fig.1 The compression processing of remote sensing stereo image pairs

### 3 基于立体补偿的立体像对的压缩算法关键技术

#### 3.1 自适应块视差补偿

考虑到视差的分布不均匀,固定块视差预测方法其实效率并不高。较好的办法应当对视差变化平缓的区域分配较大的块,而对视差变化激烈的区域分配较小的块,这样在块的总数给定的情况下,可以从总体上达到一种平均误差较小的预测。借鉴运动矢量的检测方法<sup>[10]</sup>,本节提出基于层次结构的自适应块视差估计算法。该算法采用由粗到细逐渐逼近的方法,自上而下一次将被预测图像划分成给定数目的块。

记左、右片分别为  $L$  和  $R$ 。以左片  $L$  作为基准影像来预测右片,预测图像记为  $R'$ 。假定左、右片大小相等,且宽、高分别为  $W$  和  $H$ ,不失一般性,设  $W$  和  $H$  均为  $2^n$ 。记  $I_R(p)$  为  $R$  上点  $p(x,y)$  的灰度,  $I_{R'}(p)$  为预测图像  $R'$  上点  $p(x,y)$  的灰度,  $B_k$  为  $R$  经过第  $k$  次划分后的某一块,  $B'_k$  为预测图像  $R'$  上相应的块,则子块  $B_k$  的匹配误差

$$E(B_k) = \sum_{s \in B_k} |I_{R'}(s) - I_R(s)| \quad (1)$$

设块的总数为  $S$ 。将  $R$  均匀划分为长宽均为  $W_B(1) = 2^M$  的正方形块,对于其中的每一块  $B_0(i,j)$  ( $i,j$  分别为该块的行号和列号),在  $L$  上给定的

区域中搜索使得匹配误差  $E(B_0(i,j))$  最小的块  $B_{match}$  作为  $B_0(i,j)$  的预测图像,  $B_{match}$  和  $B_0(i,j)$  之间的位置偏移(视差矢量)记为  $d(B_0(i,j))$ 。如图 2,中间的白色实线框为右片上被预测的图像块,灰色框为与之匹配的左片上的图像块,蓝色箭头为视差矢量。

设当前为第  $k$  层划分,分块的大小为  $W_B(k) = 2^{M-k+1}$ 。如果当前分块的总数小于  $S$ ,则进一步将  $R$  中某些匹配误差较大的块细分(如图 2),规则如下:

首先将第  $k$  层所有的块细分。设有第  $k$  层某块  $B_k(i,j)$ ,被分为 4 块  $B_{k+1}(2i,2j)$ ,  $B_{k+1}(2i+1,2j)$ ,  $B_{k+1}(2i,2j+1)$  和  $B_{k+1}(2i+1,2j+1)$ ,且  $W_B(k+1) = W_B(k)/2$ 。细分以后匹配误差的减少量为

$$\Delta E(B_k(i,j)) = E(B_k(i,j)) - E(B_{k+1}(2i,2j)) - E(B_{k+1}(2i+1,2j)) - E(B_{k+1}(2i,2j+1)) - E(B_{k+1}(2i+1,2j+1))$$

记录所有的  $\Delta E$ ,并按照从大到小的顺序进行排序。从  $\Delta E$  最大的块开始,如果  $\Delta E$  大于阈值  $T_k$ ,则用更精细的块替代当前分块,否则保持当前分块不变。如此递归,直到分块的数目达到  $S$ 。

$T_k = J \cdot W_B(k)^2 k$  ( $J$  为常数)是一个与分层级数和分块大小相关的量,其作用在于限制图像被过分细分,因为每细分一次,意味着增加 3 个视差矢量,在  $\Delta E$  较小的情况下,这样做是得不偿失的。需要

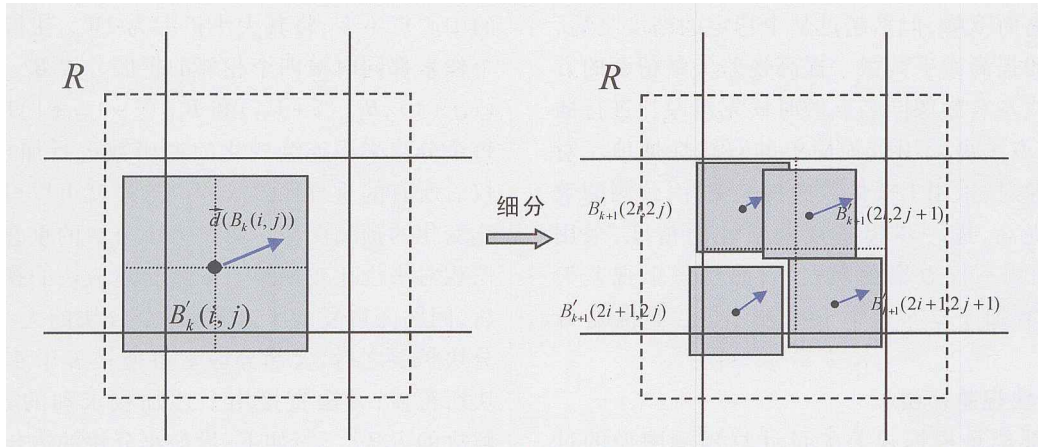


图 2 自适应块视差估计  
Fig. 2 Adaptive block disparity compensation

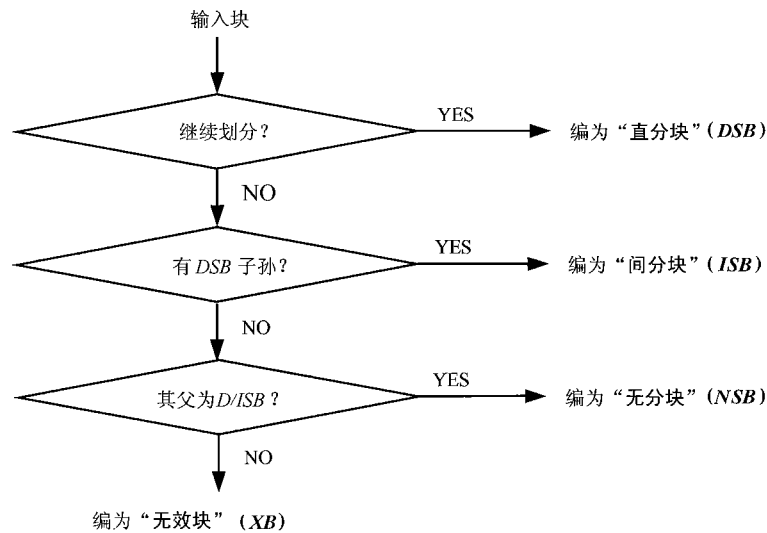


图 3 分块编码流程图  
Fig. 3 The process of block coding

说明的是,采用阈值的方法限制分块得到的划分结果从效率上看不一定是最优的,但通过调整常数  $J$  控制各种尺寸下分块的比例,可以接近最佳的分块结果,并且方法非常简单。

为高效地管理视差矢量,划分完毕以后,从最顶层到最底层所有的块按图 3 流程图分成 4 类,分别为“直分块 (DSB)”、“间分块 (ISB)”、“无分块 (NSB)”和“无效块 (XB)”。DSB 本身即被细分; ISB 本身不被细分,但其子孙中有被细分的块; NSB 及其子孙都不再被细分。DSB 由于被继续细分不用保存视差矢量; ISB 和 NSB 的视差矢量则必须保存。所有 DSB、ISB 和 NSB 采用四叉树结构予以保存,其他所有的块对于视差补偿没有用处,也无须保留。

在分块的过程中,我们引入了 ISB,这种做法与传统的划分算法有所不同。允许某些不被细分的块存在细分的子孙块虽然会造成四叉树存储效率的略微下降(因为必须在四叉树中保存一些没有视差矢量的空节点),但从总体上对于提高视差补偿的效率是有益的。原因在于,保存一个四叉树的节点平均不到一个 bit,而保存一个视差和辐射差矢量大约需要十个 bit 以上。

### 3.2 半像素视差估计

视差矢量的精度与预测的效率紧密相关,仅仅采用整数来表示位移的大小太过粗糙。用分数来表示视差矢量可以得到更好的预测效果。据 Bernd 博士 1993 年的研究<sup>[11]</sup>,预测误差通常随着视差矢量

精度的提高而下降,但是超过某个特定的精度之后,预测效率的提高微乎其微。提高视差矢量精度的方法是在寻找左右影像同名点的时候先对左片进行插值,插值的方法可采用较为简单的双线性插值。对遥感立体像对,采用  $1/2$  像素的视差估计,预测的效率有明显提高,进一步提高视差估计的精度,采用  $1/8$  像素预测不仅效率提高很小,而且每个视差矢量还额外增加了  $2 \times 2$  个 bit (左右、上下视差各 2bit)。

### 3.3 重叠块视差补偿

视差补偿是根据视差矢量计算预测图像的过程。由于不同分块的视差矢量不相等,基于块的视差补偿常常导致分块边缘图像灰度不连续,在预测图像上形成严重的方块效应,对残差图像的压缩十分不利。重叠块视差补偿技术<sup>[12-17]</sup>是克服这个缺点的有效办法。其原理很简单,假定视差估计的分块大小固定为  $W_B$ ,视差补偿的时候,保持所有分块

的中心点不变,将其大小扩大为  $2W_B$ ,使得图像上每个像素都同时被四个相邻的扩展分块  $B_{exp}(i,j)$ ,  $B_{exp}(i,j+1)$ ,  $B_{exp}(i+1,j)$  和  $B_{exp}(i+1,j+1)$  所覆盖,对每个分块采用连续变化的窗函数进行加权,并对加权后所有的重叠像素求和。这样就可以得到边界连续变化的预测图像。固定大小分块的重叠块视差补偿相对来说比较简单。采用自适应块的视差补偿之后,问题变得复杂了,因为每个分块的大小不一,将分块扩展之后,大部分像素可能被多于 4 个的重叠块所覆盖,无法直接用上述加权求和的方式平滑。解决的方法<sup>[18-20]</sup>如下:设最小分块的边长为  $W_B$ ,将所有边长大于  $W_B$  的分块均匀划分为最小分块,如图 4 中的虚线网格所示,令所有子块的视差矢量(黑箭头)等于母块的视差矢量(红箭头),然后按固定大小重叠块的方式进行视差补偿。理论上“余弦”窗是最优的加权窗函数,更简单地也可以选用双线性窗。

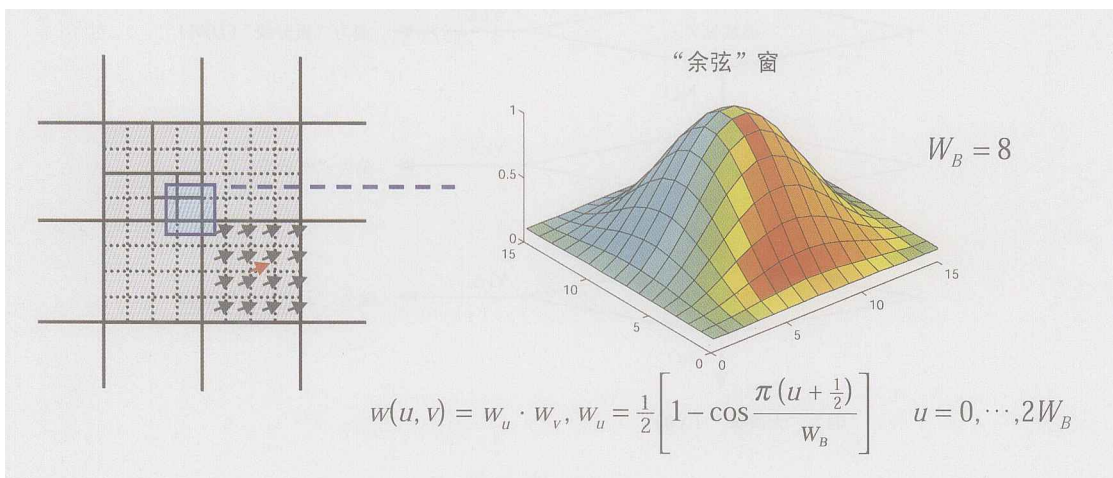


图 4 重叠块视差补偿及其窗函数

Fig. 4 Overlapped block motion compensation

### 3.4 辐射补偿

视差补偿之后,右片上绝大部分的点都能在左片上找到同名点。但是同名像点的灰度值多数情况下并不相等,有时候甚至是明显不等。造成这种现象的主要原因是由于拍摄的时候,相机的方向和太阳光对地面的入射角发生了变化,而地面的起伏更有可能加强了这种变化,使得左右影像的对应区域呈现出较大的灰度差。假如立体相对的方位元素、太阳入射角和地面高程都已知的情况下,根据著名的兰伯特漫反射定律,左右影像的这种灰度差可以在很大程度上予以纠正。实际在影像获取的时候顶多能知道前面的两项。另一方面,考虑到由遮蔽、阴

影等造成的误匹配,以及由此带来的巨大灰度差,辐射校正的问题很难用一个模型简单地解决(图 5)。

仿照视差补偿的原理,采用辐射补偿可以很好地解决这个问题。具体方法如下:在影像匹配的时候不仅保存视差矢量,也把左、右影像同名块之间的平均灰度差保存下来,并在补偿的时候加到预测图像的每个像素。如果把图像看作三维曲面,令图像的左下角为坐标原点,以每个像素相对于左下角的水平 and 垂直偏移为  $X$  和  $Y$  坐标,以图像的灰度值为  $Z$  坐标,则视差估计和灰度差估计可以统一起来。如图 6,视差估计求解同名块在  $X$  和  $Y$  方向上的偏移,灰度差估计则求解同名块在  $Z$  方向上的偏移。

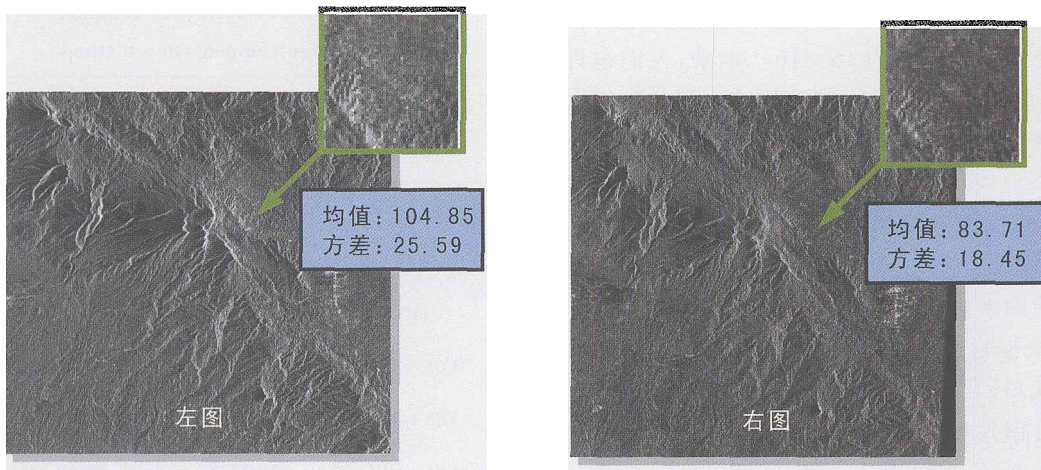


图 5 立体像对的灰度差

Fig. 5 Radiation Compensation of stereo image pairs

我们把上述视差补偿和辐射补偿合二为一称为立体补偿。

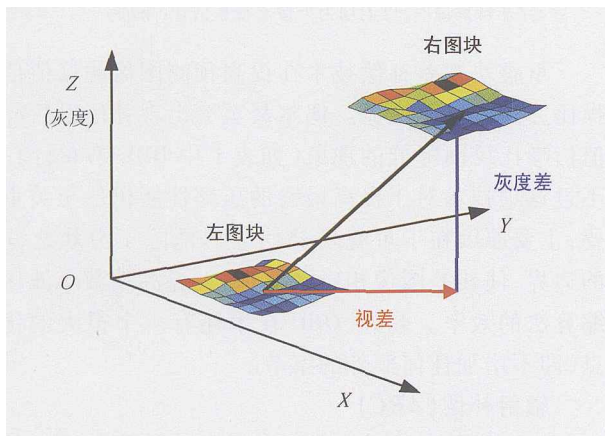


图 6 立体补偿

Fig. 6 Stereo compensation

#### 4 立体像对的压缩算法评价方法

一般采用峰值信噪比,来评估的图像整体质量(式(3)),其中  $I$  为被预测图像(右片),  $\hat{I}$  为预测图像,  $M$  和  $N$  分别为图像的宽和高,  $p$  为图像的位深度。

$$MSE = \left( \frac{1}{M \cdot N} \right) \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [I(i,j) - \hat{I}(i,j)]^2 \quad (2)$$

$$PSNR = 10 \log_{10} [(2^p - 1)^2 / MSE] \quad (3)$$

为测试立体补偿究竟在多大程度上提高了压缩效率,以没有压缩的左片为基准预测右片,在重建右片峰值信噪比相等的情况下,比较单幅压缩和立体

补偿压缩生成文件的大小。压缩效率的提高采用额外压缩率( ECR )来度量。 ECR 定义如下:

$$ECR = \frac{\text{单幅压缩码率} - \text{立体压缩码率}}{\text{单幅压缩码率}} \times 100\% \quad (4)$$

对立体图像压缩质量的评价除了可以采用单幅图像的质量评价方法外,还需考虑立体视觉特性,面向立体图像的应用,评价立体图像压缩后,对人类视觉和计算机视觉的影响。立体像对的主要用途是根据同名点的视差来获得目标的高程信息,所以对立体图像压缩,不能不考虑信息损失对求取的视差即深度信息的影响。而深度信息主要靠匹配同名点来实现,本文用 VirtuoZo 测试了立体像对压缩对匹配的影响。

#### 5 试验结果与分析

为检验上述算法的效果,我们设计了几个试验分别用于测试自适应块视差补偿、辐射补偿和重叠块补偿技术。此外,为检验算法的综合性能,将基于立体补偿的压缩结果与整数小波单独压缩和基于先锋块预测的压缩结果进行了比较。所选整数小波压缩软件 IZP 性能大致与 JPEG2000 测试软件 Kakadu 相当。最后测试了立体像对压缩对求取视差的影响。

##### 5.1 试验条件

我们选用了 3 个大小均为  $512 \times 512$  的遥感立体像对,其中 BBL 和 PEN 为光学影像, SAR 为雷达影像。雷达图像经过低通滤波降噪。影像的内容包

括山丘、建筑、平地等物,视差的分布也大不相同,既有连续变化,也有突变。

固定分块的大小设为  $16 \times 16$ 。本来,人们也许认为,既然遥感影像的压缩倍率不高,而立体像对的视差与视频图像的运动矢量相比也更复杂,遥感像对的分块理应比视频图像更密集。如果把块的边长限定为  $2^k$ ,视频图像压缩采用  $16 \times 16$  块,则遥感立体像对似乎应采用  $8 \times 8$  块。然而试验表明,就固定块预测方法而言, $16 \times 16$  预测的压缩效率最佳。 $8 \times 8$  块尽管预测图像较为精确,但由于存储的视差矢量太多,其高码率压缩效率反而不如单幅影像压缩。考虑到理想像对在现实中并不存在,设定影像匹配的搜索范围为  $[-16, -8]$  到  $[16, 8]$ 。除非特别说明,所有实验中均采用半像素视差估计。

## 5.2 各种补偿算法性能比较

本节比较立体补偿中用到的三项技术,分别为自适应块视差补偿(VBS)、重叠块补偿(OBC)和辐射补偿(ARC)。

### 自适应块视差补偿(VBS)

自适应块视差补偿对于提高预测图像的峰值信噪比非常有效。图 7 所示为 4 级 VBS 分块结果,最大的分块设置为  $64 \times 64$ ,最小的分块设置为  $8 \times 8$ ,分块的总数为 1024,和  $16 \times 16$  的固定分块(FSB)数目相等。但是逼近的效率显而易见相差很远(表 1)。对于地形平坦的区域,由于视差变化较小,VBS 总是采用较大的分块,而把节省下来的块用在山脊、建筑边缘、遮蔽等视差变化激烈的区域。随着分块数目的增多,VBS 和 FBS 之间的性能差距还将进一步拉大。

### 重叠块补偿(OBC)

表 1 立体补偿算法的性能比较

Table 1 Performance compare of stereo compensation method

| 视差补偿算法          | 预测图像峰值信噪比/dB |          |          |
|-----------------|--------------|----------|----------|
|                 | SAR          | BBL      | PEN      |
| 整像素 FBS         | 24.35562     | 28.4216  | 25.17074 |
| FBS             | 25.74718     | 29.12038 | 26.24711 |
| VBS             | 26.03527     | 30.33461 | 26.97232 |
| FBS + ARC       | 26.03313     | 31.68496 | 27.13437 |
| VBS + ARC       | 26.33926     | 33.40321 | 28.24475 |
| FBS + OBC       | 26.1633      | 28.88819 | 26.49001 |
| FBS + ARC + OBC | 26.44597     | 32.04595 | 27.30551 |
| VBS + ARC + OBC | 26.53067     | 33.60878 | 28.47359 |

\* FBS:固定块视差估计;VBS:自适应块视差估计;ARC:辐射补偿;OBC:重叠块补偿;

\* FBS 分块大小为  $16 \times 16$ ;VBS 的分块总数为 1024;

\* 除非特别说明,以上均为半像素视差估计(下同)。

重叠块视差补偿技术在提高预测图像的峰值信噪比方面效果不明显。偶尔甚至会出现补偿以后峰值信噪比反而降低的现象(如表 1 中 BBL 第 6 行)。不过这项技术对于提高最终的压缩性能仍然至关重要,主要原因在于重叠块补偿之后消除了分块之间的边界,使残差图像相对平滑,大大提高整数小波压缩算法的效率。此外,OBC 技术还有一个很大的优点,即不增加任何额外的字节。

### 辐射补偿(ARC)

辐射补偿是遥感立体补偿的一项重要技术。从表 1 可以发现,加入 ARC 补偿以后,预测图像的峰



图 7 自适应块视差补偿的块划分

Fig. 7 Adaptive windows for stereo image coding

值信噪比明显提高。对于某些图像如 BBL,ARC 的补偿效果甚至大大超过 VBS 和 OBC 补偿,而与两者之和相当。综合使用 ARC 和 OBC 可以使预测图像的峰值信噪比在原有基础上平均提高 2dB 左右。

VBS,ARC 和 OBC 3 种技术在原理上相互独立,结合使用可以达到综合最佳的补偿效果(表 1)。采用 VBS + ARC + OBC 对 PEN, BBL 和 SAR 进行补偿,预测图像的峰值信噪比在半像素固定块视差补偿(FBS)的基础上又提高了 2—4.5dB。由于半像素 VBS + ARC + OBC 补偿算法性能优异,随后的压缩性能实验均以此为缺省的立体补偿算法。

5.3 右片压缩性能

以原始左片为基准预测右片,并比较右片码率

的减少量。实验结果分别如表 2、表 3。和单幅压缩相比,采用立体补偿后右片的无损压缩效率平均提高了 5% 左右,和视频压缩类似,立体相对压缩相当耗时,解压缩可以达到实时处理。有损压缩的 ECR 则与压缩倍率相关,压缩倍率等于 10 倍的时候,ECR 平均为 30%;压缩倍率等于 20 倍的时候,ECR 平均超过 45%;单幅压缩 11、12 倍时的峰值信噪比(外有方框)低于立体压缩 20 倍时的峰值信噪比。图 8 是 PEN 像对右片采用不同方法压缩 20 倍时的结果对比,其中(a)和(b)分别为单幅压缩和立体补偿压缩的结果,由图 8 可以看到,(b)图的视觉效果明显要好于(a)图。显然,采用立体补偿技术可以大幅度提高遥感立体像对的压缩效率。

表 2 右片有损压缩性能对比

Table 2 Performance compare of lossy compression for right image

| CR | PSNR/dB |      |     |      |      |     |      |      |     |
|----|---------|------|-----|------|------|-----|------|------|-----|
|    | BBL     |      |     | PEN  |      |     | SAR  |      |     |
|    | 单幅      | 立体   | ECR | 单幅   | 立体   | ECR | 单幅   | 立体   | ECR |
| 2  | 57      | 66   | —   | 50.3 | 51.9 | —   | 44.2 | 45.2 | —   |
| 4  | 44.6    | 45.4 | —   | 40.7 | 41.9 | —   | 33.9 | 35.5 | —   |
| 6  | 40.9    | 42.6 | —   | 37.4 | 38.9 | —   | 30.6 | 32.3 | —   |
| 7  | 39.9    | 41.6 | —   | 36.4 | 37.8 | —   | 29.9 | 31.2 | —   |
| 8  | 38.9    | 40.8 | —   | 35.4 | 37   | —   | 29.1 | 30.5 | —   |
| 10 | 37.7    | 39.9 | 30% | 34.2 | 35.9 | 27% | 28   | 29.7 | 28% |
| 11 | 37.1    | 39.4 | —   | 33.6 | 35.4 | —   | 27.7 | 29.3 | —   |
| 12 | 36.5    | 38.9 | —   | 33   | 35.1 | —   | 27.5 | 29   | —   |
| 16 | 35.4    | 38   | —   | 31.7 | 33.9 | —   | 26.2 | 28.3 | —   |
| 18 | 34.6    | 37.5 | —   | 31.1 | 33.4 | —   | 25.9 | 28.1 | —   |
| 20 | 34.1    | 37.2 | 47% | 30.7 | 33.1 | 41% | 25.7 | 27.9 | 48% |

表 3 右片无损压缩文件大小对比

Table 3 Size compare of lossless compression for right image

|       | BBL    | PEN    | SAR    |
|-------|--------|--------|--------|
| 单幅    | 138293 | 159437 | 198809 |
| 立体    | 130451 | 152181 | 190730 |
| ECR/% | 5.7    | 4.6    | 4.1    |

5.4 压缩对匹配的影响

为测定压缩对匹配的影响,本文选用 VirtuoZo 中的实验数据:HAMMER 测区的立体像对 56—57,摄影比例尺 1:15000,扫描像素大小 50μm,4607 \* 2622 大小,采用本文方法,压缩 0—40 倍不等,0 倍

为不压缩,再用此软件的匹配功能,测定各层金字塔匹配成功率如表 4。从表 4 中可见,压缩对匹配的影响很小,因为遥感影像的纹理丰富,压缩虽然有一定的信息损失,对立体像对同名点所在小区域损失相似,所以同样可以得到大量的成功地匹配点,这样就有足够的点来解算相对定向参数,所以对相对定向的影响几乎可以不计,对于内定向而言,由于框标的基本纹理特征,几何对称性保持不变,所以立体像对压缩对他的影响一样很小。仇彤博士作了大量的实验<sup>[21]</sup>表明:在一定的压缩范围内(如不超过 30 倍),图像小波压缩对内定向和相对定向的影响并不是很大,对数字高程模型的精度也在可以接受的范围内。



图 8 PEN 像对右片压缩图像对比

Fig. 8 Performance compare of compression for right image

表 4 不同压缩倍率匹配成功率

Table 4 Ratio of good match by differ times compression

| 匹配成功率      | 0    | 4    | 8    | 12   | 16   | 24   | 32   | 40   |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 级(金字塔)/% | 89.3 | 89.2 | 88.7 | 88.5 | 88   | 87.5 | 86.2 | 85.2 |
| 1 级/ %     | 93.9 | 93.8 | 93.7 | 93.7 | 93.4 | 93.4 | 93.1 | 92.8 |
| 2 级/ %     | 94.2 | 93.9 | 93.5 | 94   | 94   | 94.3 | 93.9 | 93.9 |
| 3 级/ %     | 94.3 | 94.4 | 94.7 | 95   | 95   | 94.9 | 94.7 | 94.5 |

## 6 结 论

遥感立体像对压缩算法的性能取决于两个方面:预测算法的效率和残差图像压缩算法的效率。研究表明半像素自适应重叠块视差补偿能够很好地去除立体像对的相关,而辐射补偿技术对于提高预测图像的准确度也至关重要。本文提出了一种基于立体补偿的遥感立体像对压缩算法。该算法综合采用自适应重叠块视差补偿、辐射补偿技术去除立体像对左、右片之间的相关,利用二叉树结构高效管理视差矢量和辐射补偿量,并采用整数小波变换对残差图像进行压缩。和以前的立体像对压缩算法相比,本文算法的无损压缩效率和有损压缩效率都有较大提高。当然,就目前的水平而言,遥感立体压缩的算法离实时压缩尚有一定距离,特别是压缩时耗时较长,不过随着技术的进步,这个问题有望得到很好的解决。

## 参 考 文 献 (References)

- [1] Wang Z Z. The Principle of Photogrammetry - Continuation [M]. Beijing: Press of surveying, 1986. [王之卓. 摄影测量原理续编[M]. 北京:测绘出版社, 1986.]
- [2] Zhang Z X, Zhang J Q. Digital Photogrammetry [M]. Wuhan: Press of WTUSM, 1997. [张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学 [M]. 武汉:武汉测绘科技大学出版社, 1997.]
- [3] Perkins M G. Data.Compression of Stereopairs[J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1992, **40**:684—696.
- [4] Woo W, Ortega A. Stereo Image Compression with Disparity Compensation Using the MRF Model[A]. Proc. Visual Communications and Image Processing Conf. (VCIP)[C]. 1996.
- [5] Jiang J, Edirisinghe E A, Schroder H. Algorithm for Compression of Stereo Image Pairs [J]. *IEE Electronic Letters 5th*, 1997, **33** (12):1034—1035.
- [6] [Online]. Available: <http://www.vision.stanford.edu/~birch/re-search/pro>.
- [7] Woo W, Ortega A. Dependent Quantization for Stereo Image Coding [J]. *Proc. PW-EI-VCIP* 98.
- [8] Moellenhoff M S, Maier M W. Transform Coding of Stereo Image

- Residuals [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 1998, **7**:804—812.
- [9] Taubman D. JPEG2000 Verification Model: Version VM4. 1 [M], ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG1 N1286.
- [10] Yu Y B, Chan M H, Constantinides A G. Low Bit Rate Video Coding Using Variable Block Size Model [A]. *Proc. ICASSP* [C]. 1990, **4**:2229—2231.
- [11] Girod B. Motion-Compensating Prediction with Fractional-Pel Accuracy [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1993, **41**(4):604—612.
- [12] Nogaki S, Ohta M. An Overlapped Block Motion Compensation for High Quality Motion Picture Coding [A]. *Proc. ISCAS*, 1992.
- [13] Orchard M T, Sullivan G J. Overlapped Block Motion Compensation: An Estimation-theoretic Approach [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 1994, **3**:693—699.
- [14] Tao B, Orchard M T. Non-iterative Motion Estimation for Overlapped Block Motion Compensation [J]. *Proc. SPIE*, 1998, **3309**:1032—1040.
- [15] Tao B, Orchard M T. A Parametric Solution for Optimal Overlapped Block Motion Compensation [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2001, **10**(3):341—350.
- [16] Zhang J, Ahmad M O, Swamy M N S. Overlapped Variable Size Block Motion Compensation [J]. *Proc. IEEE ICIP*, 1997, **4**:642—645.
- [17] Woo W, Ortega A. Overlapped Block Disparity Compensation with Adaptive Windows for Stereo Image Coding [J]. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, 2000, **10**:194—200.
- [18] Zhang J, Ahmad M O, Swamy M N S. New Windowing Techniques for Variable-size Block Motion Compensation [J]. *IEE Proc. -Vis. Image Signal Process*, 1998, **145**(6):399—407.
- [19] Woo W, Ortega A. Optimal Blockwise Dependent Quantization for Stereo Image Coding [J]. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, 1999, **9**:861—867.
- [20] Su J K, Mersereau R M. Motion Estimation Methods for Overlapped Block Motion Compensation [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2000, **9**(9):1509—1521.
- [21] Qiu Tong. Wavelet-based Image Compression in Digital photogrammetry [D] Wuhan: Press of WTUSM, 1997. [仇彤. 小波理论及小波图像压缩在数字摄影测量中的应用[博士学位论文], 武汉测绘科技大学, 1997.]

## Compression of Remote Sensing Stereo Image Pairs

LI Fei-peng, MA Guo-rui, QIN Qian-qing, LI De-ren

(National Lab for Information Engineering in Surveying, Mapping & Remote Sensing  
Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** This paper addresses the problem of stereo image pair compression in remote sensing applications. Three fundamental techniques including Disparity Compensation (DC), Radiation Compensation (RC) and the compression of residual image are discussed. The main issue of stereo image compression is the estimation of disparity between the left frame and the right frame, a problem similar to the estimation of motion vectors in video coding. Since the disparity consisting in remote sensing image pairs are caused by variation in elevation rather than motion of the some objects, it is generally more universal and complex than the motion vectors. However, due to the geometrical constraint between the two frames, the vertical disparity vectors of remote sensing stereo image pairs can always be eliminated by a certain relative-orienting method. Besides stereo disparity, the average grayscale difference between corresponding blocks is also a big obstacle for creating accurate predictive image, for the two frames of a remote sensing image pair usually have considerable luminance disparity due to the changing in photograph angle and incidence angle. To fully exploit the redundancy between the two frames, a Stereo Compensation (SC) technique combining adaptive DC with RC is presented in this paper. It shows good performance in predicting the right frame from the left frame. A high-performance integer wavelet image coder is utilized for the compression of residual image. Experiments show that the SC-based compression algorithm for remote sensing stereo image pair is about 5% and 30%—45% more efficient than JPEG2000 in lossless compression and lossy compression respectively.

**Key words:** remote sensing stereo image pair; stereo compensation; adaptive disparity estimation; radiation compensation, integer wavelet; image compression