

干涉超光谱图像分析与近无损压缩 CPLD 实现

吴小华^{1,2} 李自田¹ 张 帆^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)
(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 介绍了干涉超光谱卫星遥感图像的成像特性, 计算、比较分析了干涉超光谱图象的空间维与光谱维的相关性, 提出了一种近无损压缩的局部 DPCM 算法. 选用 CPLD 在 Maxplus II 使用 VHDL 语言对该压缩算法进行了硬件描述和仿真. 仿真结果表明该压缩算法简单可行, 易由硬件实现.

关键词 干涉超光谱图象; 图象压缩; DPCM; VHDL; CPLD

中图分类号 TN919.81 **文献标识码** A

0 引言

成像光谱技术具有很高的空间分辨率和光谱分辨率. 成像光谱仪产生的数据量非常巨大, 因此在图像信息传送前必须进行压缩. 干涉超光谱图像数据不同于普通的图像数据, 它是干涉图数据作为中间结果, 必须要经过地面软件复原后才能成为用户可以直接使用的超光谱图像序列. 干涉图在压缩后, 会有一些失真, 如果丢失信息过多, 或是丢失了部分重要信息, 则无法复原出真实的光谱. 采用针对普通图像的压缩方法对干涉图进行压缩会造成较大的失真, 因此应尽可能采用无损压缩或近无损压缩, 且易于硬件实现.

数字图像可被压缩的原因是像素间有相关性, 含有信息冗余. 本文提出了一种基于局部 DPCM 的去相关光谱图像压缩方法, 并在 Maxplus II 用 VHDL 语言编程选择相应器件进行了算法仿真.

1 干涉超光谱遥感图像分析

1.1 成像原理

成像光谱仪作为一种新型航天遥感设备, 具备成像仪和光谱仪的功能, 即具有很高的空间分辨率和光谱分辨率. 使用成像光谱仪获得的遥感图像数据包含二维空间信息和一维光谱信息. 干涉光谱成像原理如图 1.

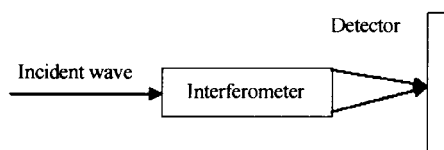


图 1 干涉光谱成像原理
Fig. 1 Interferometer scheme

由图 1 可以看到, 在成像光谱仪中, 一束入射光经过干涉仪的作用, 分解为两束具有一定光程差的光线并进行干涉叠加. 成像光谱仪采用行推扫的方式来产生图像, 并且在一行上各点处的光程差不同, 这样就在成像平面上形成了具有竖条状干涉条纹的多光谱图像, 光谱信息就存在于干涉条纹之中. 对干涉超光谱图像进行压缩, 应保证恢复出的谱特性失真尽量小, 通常要求包含谱信息的那部分图像的峰值信噪比 PSNR^[2] 大于 50 dB, 失真度-光谱相对均方误差 RQE (Relative spectral Quadratic Error)^[5] 小于 1%.

$$PSNR = 10 \log \frac{MN \times A^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [x(i, j) - y(i, j)]^2} \quad (1)$$

$$RQE = \frac{\int_0^{0.5} |\hat{S}(\tilde{f}) - S(\tilde{f})|^2 d\tilde{f}}{\int_0^{0.5} S(\tilde{f}) d\tilde{f}} \quad (2)$$

以西安光机所研制的空间分辨率为 100 m, 光谱分辨率在波长 450~950 nm 间平均为 5 nm 的干涉成像超光谱仪产生的 512×256×12Bit 干涉光谱图像为例(后同), 式(1)表示的是峰值信噪比 PSNR, 式中 A 为峰值, 采用 12bit 量化, 则峰值为 4095, x 为原始图像, y 为压缩后重建的图像. 式(2)表示的是光谱相对均方误差 RQE, 式中 S(\tilde{f}) 为原始光谱; $\hat{S}(\tilde{f})$ 为经压缩后重建的光谱; $\tilde{f} = \frac{1}{\lambda f_e}$ 为归一化频率 (0 < \tilde{f} < 0.5), λ 为波长(单位 μm), f_e 为采样频率. 上述干涉成像光谱仪提出的光谱失真度是 5%, 而光谱图像失真主要由两方面组成, 一是定标引起的, 二是压缩引起的. 参照国内定标水平由定标引起的的误差一般达到 4%, 那剩余 1% 就分配给了图像压缩, 这也就是选择图像解压后失真度 RQE 小于 1% 的原因.

1.2 相关系数计算及分析

由于干涉光谱图像的成像原理知,干涉光谱图像不同于普通图像,以 $512 \times 256 \times 12\text{Bit}$ 干涉光谱图像为例,一行有 256 个像素,其为一个点的干涉图,具有光谱相关性;一列 512 个像素为一个光谱频率上的空间信息,具有空间相关性;那么一副图只是一条线的干涉图像,相邻各幅图是由推扫而成,是不同线的干涉图,因而相邻图之间具有空间相关性. 按式(3)^[6]来计算各相关系数.

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{(\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2)(\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2)}}$$

图 2 为 61 幅相邻干涉图(前一推扫图与后一推扫图)的 60 个相关系数,表征的是两幅相邻干涉图相关性大小,也即是帧间相关性大小. 其中横轴表示的是个数,纵轴表示的是相关系数大小. 这 61 幅干涉图相对应光谱图像序列特征是庄稼地,还做了相类似的计算,如河流、山川等其他特征的光谱序列,统计结果类似. 图 3、4 横纵轴表示类同. 图 3 表示干涉图 1. raw 的 512 行相邻行之间的 511 个相关系数,也是一幅图内空间相关系数图;图 4 表示 1. raw 的 256 列相邻列之间的 255 个相关系数,也是一幅图内光谱相关系数图. 像素连续性很高,图像的相关性也较高. 对比图 2、3、4 可看出,帧间和图内空间相关性动态范围大,这是因为遥感图像的分辨低,涉及到的目标大,其结构特征很难有整体的一致性,随机性大;而图内光谱维相关性强些,基本上都在

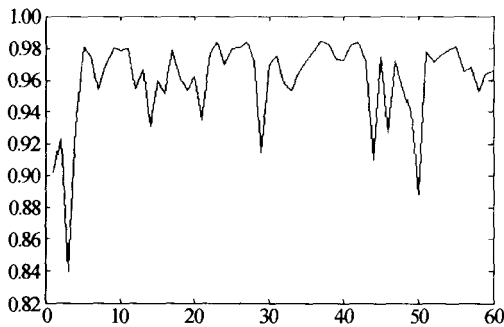


图 2 相邻干涉图的相关系数
Fig. 2 Correlation coefficients of two images

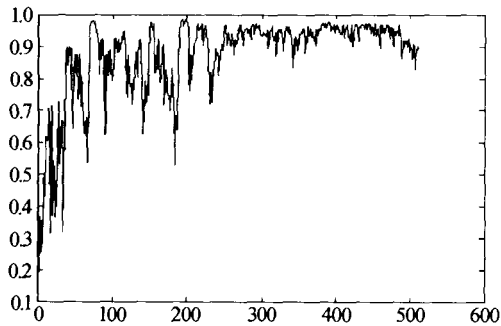


图 3 一幅干涉图空间维行间相关系数
Fig. 3 Correlation coefficients of rows in space dimension

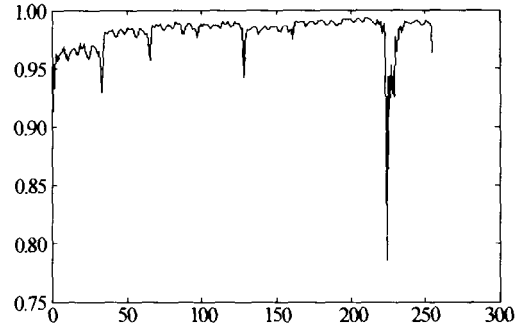


图 4 一幅干涉图光谱维列间相关系数
Fig. 4 Correlation coefficients of columns in spectral dimension

0.9 以上,这是因为干涉图是一条线空间信息在不同光谱上的反映,连续性是一致的,只是幅度的大小不同而已.

从干涉图特性和相关性可以知道,由于帧间相关系数动态范围大,干涉图帧间压缩比较困难,而帧内压缩是可能的,也就是说干涉光谱图主要从帧内压缩来考虑,属于静态图像压缩. 而帧内压缩主要从光谱维来考虑,因为光谱维的相关性比空间维强. 静态图像无损压缩方法主要有 DPCM(JPEG 标准中用到的)和近来比较热的整数小波变换. DPCM 比较成熟,而整数小波变换是新一代 JPEG2000 标准中无损压缩所推荐的小波变换实现. 本文主要利用 DPCM 来实现光谱维的去相关,因为 DPCM 易于硬件实现,基本上一片 CPLD 就可实现主要算法.

2 干涉光谱图像局部 DPCM 算法

2.1 DPCM 原理

图像压缩的本质就是去相关,去相关有两种编码技术,一是预测编码,二是变换编码. 此处主要讨论预测编码原理. 在图像中,相邻像素间存在很强的相关性,可以由前面的像素值预测当前的像素值,由实际值减去预测值得到预测误差. 强相关性使得预测值比较接近实际值,因此预测误差序列是均值为零和具有更小方差的序列. 一般预测误差的一阶熵远小于原像素值的一阶熵. 对预测误差直接进行单符号的熵编码或对预测误差进行量化再进行熵编码,比直接对单像素值编码有更高的效率. 在预测编码方法中,最主要的方法是差分脉冲编码(Differential Pulse Code Modulation, DPCM)^[2].

2.2 局部 DPCM 算法

从上述图像分析可知,一行 256 个数据是由一个点的干涉而来,一列是一条空间线在某个光谱频率上的反映,可以用前一列来预测后一列,但实际上还是用一行中的前一点预测后一点,属于一维预测. 图 5 为一幅干涉图内一行相邻像素差值图,从图 5

可看出,差值是以零对称分布的,实际上计算得差值平均值也为零,那么 DPCM 预测系数可定为 1.

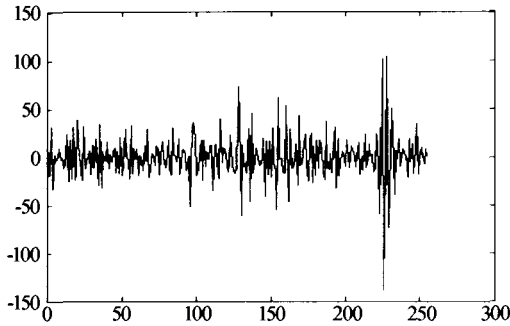


图 5 一幅干涉图内一行相邻像素差值图
Fig. 5 Difference of pixels in one row

图 4 可看出接近 226 列附近的列间相关性要小,这是因为一行干涉数据 256 点的零相位在 226 列附近,226 列附近光谱能量大,动态范围大,也是光谱信息集中区.要实现压缩又要比较完全恢复谱信息采取 DPCM 很难得到满意结果,所以采取局部压,226 点附近左右对称 28 点不压,只压 200 个点,差值采用 6bit 表示.实际中光谱仪的图像是 $512 \times 256 \times 12\text{Bit} + 128 \times 12\text{Bit}$,加号前是图像信息,加号后 $128 \times 12\text{Bit}$ 是辅助信息.采取只压图像信息,所设计的 DPCM 压缩比是 $(512 * 256 + 128) * 12 / ((512 * 56 + 128) * 12 + 512 * 200 * 6) \approx 1.64$.图 6 是设计的实际 DPCM 方框图,由于带量化器,因而是有损压缩,但可通过设计合适的非线性量化器使图像损失很小,接近无损.图 6 是改进型的 DPCM 结构,图中的预测差值反馈用的是预测差值量化值,而不是预测误差,这是为了减小图像恢复时的误差积累.关于如何减小带量化器 DPCM 图像误差积累的描述参见文献[2].

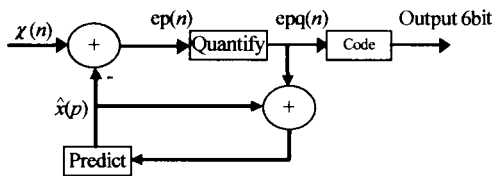


图 6 设计的 DPCM 方框
Fig. 6 Block diagram of designed DPCM

本文中改进型一维 DPCM 工作流程是,先取一幅图的第一行的第一个像素 $\chi(1)$,第二个像素 $\chi(2)$,用第二个像素 $\chi(2)$ 减去第一个像素 $\chi(1)$ 得到差值 $ep(1)$,对差值量化得到量化差值 $epq(1)$,差值量化编码 6bit $wcbm(1)$, $\hat{x}(2) = \chi(1) + epq(1)$,再取第三个像素 $\chi(3)$, $\chi(3) - \hat{x}(2) = ep(2)$, $ep(2)$ 量化得到 $epq(2)$ 和 $wcbm(2)$,依此类推计算到 201 个像素,后面 55 个像素不进行相减和量化,原样输出.一行像素经 DPCM 系统后数据变为第一个像

素和 200 个 6Bit 编码及 56 个像素.图像其他行依此类推,附加信息不进行 DPCM 压缩.图像解码是上述的逆过程,拿一行编码后数据来说,先取第一个像素 12Bit 数,再取其后 6Bit 误差编码,从查找表中查得对应量化值,第一个像素值加上量化值得到第二个像素值,再取后面 6Bit 误差编码,查得对应量化值与前面计算的第二个像素值相加得到第三个像素值,依此类推.

3 DPCM 的 CPLD 实现

3.1 参数确定与 Matlab 模拟仿真

前面描述了所设计的 DPCM 结构和 workflows,其中预测系数确定为 1,剩下的是量化器设计,也就是确定量化器的参数.

量化器设计要通过统计行相邻像素差值来确定,利用 Matlab 统计计算了上百幅 $512 \times 256 \times 12\text{Bit}$ 干涉图行相邻像素的差值有 92% 在 100(此为灰度值,后相同)以内,100 至 200 之间有 7%,200 至 300 有 1%,300 以上极少可以认为没有.由于量化器输出定为 6Bit,1 位为符号位,其余 5 位可得量化级数为 $2^5 = 32$,而量化器的范围为 $0 \sim 300$,经综合考虑和模拟优化计算确定 100 以内分 20 级,100 ~ 200 分 8 级,200 ~ 300 分 4 级,具体为 $[0, 5, 10, \dots, 100, 113, 125, 138, 150, 163, 175, 188, 200, 225, 250, 275]$,量化门限为 $[2, 7, 12, 17, \dots, 97, 106, 119, 131, 144, 156, 169, 181, 194, 212, 237, 262]$,编码为 $[00000, 00001, \dots, 11111]$,符号位 1、0、1 为负,

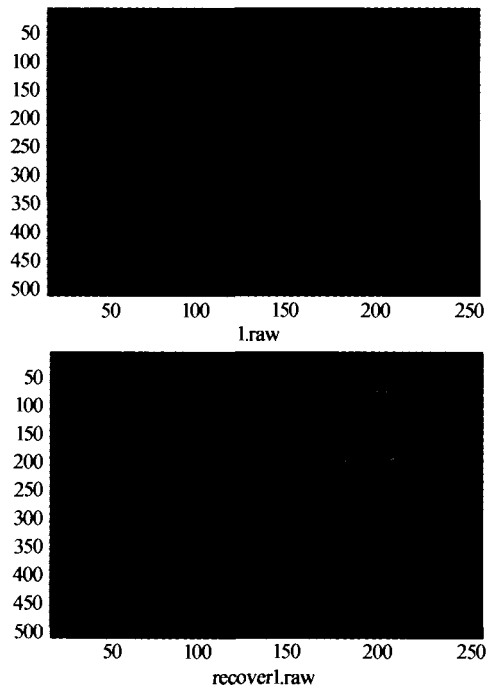


图 7 1.raw 与解压图 recoverl.raw 对比
Fig. 7 Contrast of 1.raw and recoverl.raw

0 为正, 以此量化器进行图像压缩和恢复图像. 以 1.raw 为蓝本通过 Matlab 仿真计算出编码解码后图像 recover1.raw, 对比两幅图计算得峰值信噪比 $PSNR=72\text{ dB}>50\text{ dB}$, 失真度 $RQE=0.3\%<1\%$ 符合要求. 还计算了其他大量干涉图, $PSNR$ 范围为 $70\sim 77\text{ dB}$, RQE 范围为 $0.2\%\sim 0.4\%$. 由此可知该量化器可满足设计要求. 图 7 为干涉图 1.raw 和解压图 recover1.raw.

3.2 DPCM 的 CPLD 实现

3.2.1 复杂可编程逻辑器件(CPLD)

局部 DPCM 算法的硬件实现, 此处采用复杂的可编程逻辑器件(CPLD). CPLD 是一种复杂的用户可编程逻辑器件, 由于采用连续连接结构. 这种结构易于预测延时, 从而电路仿真更加准确. CPLD 是标准的大规模集成电路产品, 可用于各种数字逻辑

系统的设计. 近年来, 由于采用先进的集成工艺和大批量生产, CPLD 器件成本不断下降, 集成密度、速度和性能大幅度提高, 一个芯片就可以实现一个复杂的数字电路系统; 再加上使用方便的开发工具, 使用 CPLD 器件可以极大地缩短产品开发周期, 给设计、修改带来很大方便.

3.2.2 算法的 VHDL 描述

在设计实现 DPCM 干涉光谱图像压缩系统前, 应知道光谱仪输出图像的数据格式. 图 8 是光谱成像仪输出给压缩子系统的数据格式图, 其中 clk_{in} 是系统时钟, syn_{in} 是帧同步信号, $data_{in}(11\text{ downto }0)$ 是数据信号. 帧同步, 高电平为正程, 低电平为逆程(回扫段), 高电平持续 512×256 个时钟, 低电平持续 128 个时钟. 帧同步在高电平时, 数据信号传送图像信息, 而在低电平时, 数据信号传送

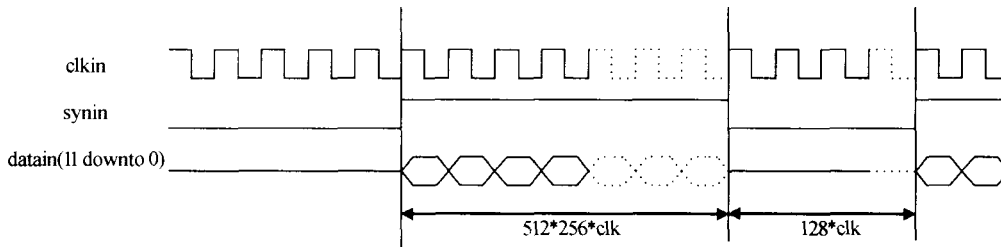


图 8 图像数据格式
Fig. 8 Image data format

辅助参数.

在 Maxplus II 软件设计环境下, 使用硬件描述语言(HDL, Hardware Description Language), 以自顶向下的方式, 描述 DPCM 算法, 实现硬件设计的软件化. DPCM 算法硬件设计关键是如何用 VHDL 语言来描述 DPCM 算法. 首先定义三个输入端, 即时钟输入(Clk)、帧同步信号(fclk)、数据信号(Input (11 down to 0)); 输出信号 5 位编码 output (4 down to 0), 符号位 cy, 反馈 latch. 此处只考虑 DPCM 的算法实现, 而没考虑实际情况中码流合并与输出(因为图像是 12bit 而差值编码是 6bit, 此硬件中用 12bit 来表示数, 6bit 编码必须用两个合并来传输). 把系统分为控制单元和数据处理单元, 控

制单元主要是记数, 通过数来控制加载数、相减、量化、反馈. 量化器的设计其实是一个选择器, 按门限范围选择对应的编码, 如当差值为正值, 大于 2 但小于等于 7 时对应 $Output=00001$, $cy=0$, 两并置最终编码为 000001.

3.2.3 DPCM 算法的系统仿真

在 Maxplus II 中对所编写的 VHDL 程序进行了调试, 创建波形文件进行仿真, 选用 ACEX1K 系列的 EP1K10TC100-1 器件进行适配, 仿真波形结果如图 9. 从图中可看出 cy 有和高和低两种情况, 正好是相邻像素差值有正有负的体现, Output 中 5 位编码也是正确的, latch 是反馈后的像素值是前面所提到的, 经验证也是正确的.

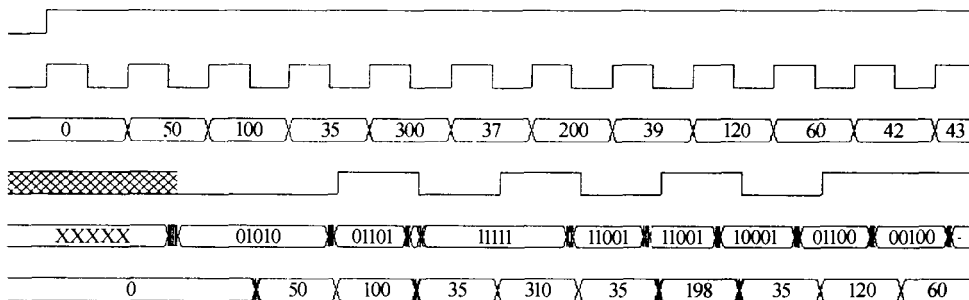


图 9 仿真结果时序
Fig. 9 Timing of emulational result

4 结论

在干涉超光谱图像分析的基础上,提出了局部DPCM算法实现光谱图像的近无损压缩,并完成了VHDL语言编程仿真,说明了该算法可用、硬件实现简单.当然,该算法的压缩比不太高,可通过进一步优化量化器结合其他编码方法如 Huffman、算术编码等来提高压缩比.

参考文献

- 1 相里斌,赵葆常.空间调制干涉成像光谱技术.光学学报,1998,18(1):18~22
Xiangli B,Zhao B C. *Acta Optica Sinica*,1998,18(1):18~22
- 2 张旭东,卢国栋,冯健.图象编码基础和小波压缩技术——原理、算法和标准.北京:清华大学出版社,2004.3
Zhang X D,Lu G D,Feng J. *Fundamentals of Image Coding and Wavelet Compressing Principles, Algorithms and*
- Standards. Beijing:Tsinghua University Press,2004.3
- 3 吴乐南.数据压缩.北京:电子工业出版社,2003.9
Wu Y N. *Data Compression*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2003.9
- 4 侯伯亨,顾新.VHDL硬件描述语言与数字逻辑电路设计.修订版.西安:西安电子科技大学出版社,2001.9
Hou B H,Gu X. *The VHDL Hardware Description Language and Design of Digital Logic Circuit*. Second Edition. Xi'an: Publishing House of Xidian University,2001.9
- 5 Mailjes C, Vermande P, Castanie F. Spectral image compression. *J Optics (Paris)*,1990,21(3):121132
- 6 孙兆林. Matlab6. χ 图像处理.北京:清华大学出版社,2002.5
Sun Z L. *Matlab6. χ Image processing*. Beijing: Tsinghua University Press,2002.5

Analysis and Near-lossless Compression Based on CPLD of Interference Hyperspectral Image

Wu Xiaohua^{1,2}, Li Zitian¹, Zhang Fan^{1,2}

¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

² Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date:2004-07-26

Abstract After introducing the interferometer scheme and calculating and analyzing correlation coefficients of interference hyperspectral images, a method of Near-lossless Compression based on part DPCM for interference hyperspectral image is proposed. Complex programmable logic device(CPLD) has been chosen as the hardware design platform, and the algorithm has been described with VHDL. The designed algorithm has been successfully fulfilled system simulation with Maxplus II software. The simulation result shows that the algorithm is simple and feasible and can be realized with hardware.

Keywords Interference Hyperspectral image; Image compression; DPCM; VHDL; CPLD

Wu Xiaohua was born in 1976 in Jiangxi Province and received the B. S. degree from Tianjin University in 1998. Now she is studying for her M. S. degree in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Her research interests are in compression and processing of digital images.