



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104244017 A

(43) 申请公布日 2014. 12. 24

(21) 申请号 201410482379. 4

(22) 申请日 2014. 09. 19

(71) 申请人 重庆邮电大学

地址 400065 重庆市南岸区黄桷垭崇文路 2 号

(72) 发明人 陈善学 郑文静 张佳佳 杨亚娟

(74) 专利代理机构 重庆市恒信知识产权代理有限公司 50102

代理人 刘小红

(51) Int. Cl.

H04N 19/94 (2014. 01)

H04N 19/154 (2014. 01)

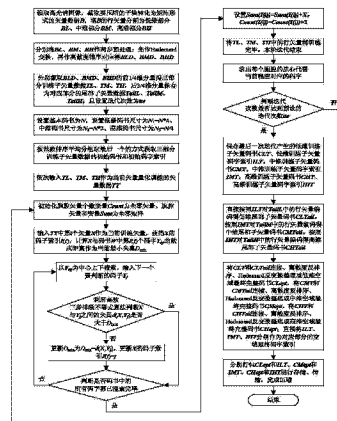
权利要求书2页 说明书17页 附图4页

(54) 发明名称

压缩编码高光谱遥感图像的多层次码书矢量量化方法

(57) 摘要

本发明公开一种压缩编码高光谱遥感图像的多层次码书矢量量化方法,涉及图像处理技术领域,该方法根据失真情况将高光谱图像的光谱矢量分割为低维、中维、高维三个部分,然后对失真较大的低维部分采用大尺寸码书,失真不大的中维部分采用中尺寸码书,失真较小的高维部分采用小尺寸码书,这样采用多层次码书,并结合离散度排序后仅提取低维部分四分之一分量训练编码索引的方式,能在相同压缩比下,达到有效降低高光谱图像的量化失真的同时,明显减少各项计算量的目标。本发明能在较小的计算复杂度条件下,以更快的速度实现高光谱图像更高质量的压缩编码,具有实际应用的价值,是一种压缩性能较好的高光谱图像有损、近无损压缩方案。



1. 一种压缩编码高光谱遥感图像的多层次码书矢量量化方法,其特征在于,读取高光谱图像三维数据,截取要压缩的子块转化为二维矩阵形式的原始矢量数据,将原始矢量数据分割为低维部分、中维部分、高维部分;然后对三部分矢量数据分别作哈达玛 Hadamard 变换和离散度排序预处理,得到预处理后的三部分矢量数据;对预处理后的三部分矢量数据分别截取矢量数据的前  $1/4$  维分量组成低维部分、中维部分、高维部分训练子矢量数据,剩余的  $3/4$  维分量作为对应部分的尾部子矢量数据;设置码书尺寸为多层次码书,对各部分训练子矢量数据进行矢量量化,得到迭代的训练子矢量码字索引和训练子矢量码书;根据训练子矢量码字索引分别对三部分尾部子矢量数据编码,得到三部分尾部子矢量码书和码字索引;分别整理各部分码书,得到三部分空域最终完整码书和最终码字索引,完成高光谱图像数据块的压缩编码。

2. 根据权利要求 1 所述的方法,其特征在于,所述分割原则为:三部分矢量的维数分别都满足 2 的整数次幂,若不满足则在矢量末尾补零将维数扩展为最接近 2 的整数次幂,三部分矢量维数之和等于或接近原矢量维数。

3. 根据权利要求 1 所述的方法,其特征在于,预处理具体为:对三部分矢量数据分别作 Hadamard 变换,将各部分矢量数据中每个行矢量右乘一个相同维数的 Hadamard 方阵;根据某维分量的最大值与最小值计算各部分矢量数据中该维分量的离散度;将各部分矢量的离散度值分别进行降序排序,记录排序索引,按照排序索引分别重新排列对应部分矢量数据的各维分量。

4. 根据权利要求 1 所述的方法,其特征在于,设定码书尺寸为多层次码书具体为,根据基本码书尺寸  $N$  设定低维部分训练子矢量码书尺寸  $N_1$ 、中维部分训练子矢量码书尺寸  $N_2$ 、高维部分训练子矢量码书尺寸  $N_3$ ,其中, $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$  为  $N$  的倍数, $N_1 > N_2 > N_3$ 。

5. 根据权利要求 1 所述的方法,其特征在于,进行矢量量化进一步包括:搜索每个训练子矢量的最佳匹配码字,并将训练子矢量划分到对应的胞腔中,记录对应的码字索引,直到所有的训练子矢量都训练完成,以各胞腔的质心代替原来胞腔对应的码字,保存最后一次迭代产生的低维训练子矢量码书和码字索引、中维训练子矢量码书和码字索引、高维训练子矢量码书和码字索引。

6. 根据权利要求 1 所述的方法,其特征在于,进行矢量量化进一步包括:获取初始码书和初始码字索引,计算训练矢量集中的各训练子矢量的 2 范数,并将其按升序排序,记录排序索引,按照该索引重新排序各训练子矢量,对各训练子矢量平均分组后取每组最后一个组成初始码书,各训练子矢量的分组号作为其对应的初始码字索引。

7. 根据权利要求 1 所述的方法,其特征在于,得到三部分尾部子矢量码书和码字索引具体为:将三部分训练子矢量码字索引作为对应部分的尾部子矢量编码索引,按照编码索引将所有尾部子矢量分配到各个胞腔中,以各胞腔的质心作为码字,得到各部分尾部子矢量码书。

8. 根据权利要求 1 所述的方法,其特征在于,整理各部分码书具体包括,将训练子矢量码书作为前  $1/4$  维分量,尾部子矢量码书作为后  $3/4$  维分量,连接成对应部分的 Hadamard 变换域完整码书;再对各部分 Hadamard 变换域完整码书进行离散度反排序,Hadamard 反变换得到各部分空域最终完整码书,将训练子矢量码字索引作为空域最终码字索引。

9. 根据权利要求 5 所述的方法,其特征在于,搜索每个训练子矢量的最佳匹配码字进

一步包括：按照当前训练矢量  $X$  对应的码字索引  $I(i)$  找到码书  $W$  中第  $I(i)$  个码字  $Y_{op}$ ，

计算  $X$  与  $Y_{op}$  之间的欧式距离作为当前最小失真  $D_{\min} = \sum_{k=1}^m (X_k - Y_{op})^2$ ，按照  $Y_{op}$  为中心

上下搜索，输入当前判断码字  $Y_j$ ；计算  $D_1 = (\text{Norm}_X - \text{Norm}_Y(j))^2$ ，其中  $\text{Norm}_X$  为  $X$  的 2 范数， $\text{Norm}_Y(j)$  为当前判断码字  $Y_j$  的 2 范数，若  $D_1 \geq D_{\min}$ ，且  $\text{Norm}_X \geq \text{Norm}_Y(j)$ ，则排除码字  $Y_k$  ( $k = 1, \dots, j$ )，若  $\text{Norm}_X \leq \text{Norm}_Y(j)$ ，则排除码字  $Y_k$  ( $k = j, \dots, N$ )；若不满足  $D_1 \geq D_{\min}$ ，计算  $D_2 = (X_1 - Y_{j1})^2 + (V_X - V_Y(j))^2$ ，若不等式  $D_2 \geq D_{\min}$  成立，则排除码字  $Y_j$ ，否则，计算  $X$  与  $Y_j$  的累积

失真  $D_q(X, Y_j) = \sum_{k=1}^q (X_k - Y_{jk})^2$  ( $q = 2, \dots, m$ )，若不等式  $D_q(X, Y_j) \geq D_{\min}$  成立，则排除码

字  $Y_j$ ，如直到  $q = m$ ，不等式  $D_q(X, Y_j) \geq D_{\min}$  均不成立，则当前码字  $Y_j$  为训练矢量  $X$  对应的最匹配码字，其中， $k$  表示第  $k$  维分量， $m$  表示训练矢量  $X$  的维数， $N$  为码书  $W$  的尺寸， $V_X$  为当前训练矢量  $X$  的方差， $V_Y(j)$  为当前码字  $Y_j$  的方差， $X_k$  为  $X$  的第  $k$  维分量， $X_1$  为  $X$  的第一维分量， $Y_{j1}$  为  $Y_j$  的第一维分量。

## 压缩编码高光谱遥感图像的多层次码书矢量量化方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于高光谱遥感图像处理领域,具体涉及一种压缩编码高光谱遥感图像的多层次码书矢量量化方案。

### 背景技术

[0002] 近年来,传统的二维彩色图像已经远远不能满足人们的需求,取而代之的是高光谱图像的应用越来越广泛。高光谱图像是高光谱成像光谱仪以纳米级的波段宽度,在几百个谱带上对目标进行连续的光谱成像而形成的光谱图像,被定义为二维空间域和一维光谱域组成的三维立体数据。这种特殊的图像不同于普通的二维灰度图像和彩色图像,它具有以下一些特点:1) 细节丰富、纹理复杂。每个相同空间位置的地面目标都对应几百个光谱波段的像素值,这些像素值是传感器在某特定波长所接收到的强度返回值,可以细致精确地反映出地物目标在该波段的光谱特征。2) 具有很高的谱间分辨率,谱间相关性强。高光谱图像的波段数目多达几百个,光谱分辨率达纳米级,如此高的光谱分辨率使得相邻波段相同地物目标的光谱特性十分接近,所以谱间相关性很高,大部分相邻两个波段的互相关系数都接近 1。3) 空间分辨率相对较低,空间相关性较普通图像弱。这是因为高光谱图像的空间分辨率一般为几米,地面目标可能只占几个或更少的像元,使相同波段像素值的连续性差。4) 特性相似的地物具有相似的光谱曲线。每一个相同空间位置的地物目标都对应一组像素值,把这些像素值按波长大小的顺序组合起来就可以构成应该空间位置地物目标的一条光谱曲线,曲线的精确形状是严格依赖于该空间位置地物的类型和性质的,所以从光谱曲线的相似程度可以确定地物目标的分类。

[0003] 由于高光谱图像比一般图像含有更为丰富的信息,使得它们在很多领域都发挥了重要的作用,例如,地质勘探、农业科研、水文监测、生物医学、植被研究、军事侦察等,而且其应用前景十分广阔。但是,随着高光谱遥感技术的发展,高光谱遥感成像光谱仪在空间和谱间分辨率指标不断提高,这使得高光谱图像的数据量也在急剧增长。为了保证海量高光谱数据得到高效的采样、传输、存储和应用,迫切需要研究出高质量的高光谱图像压缩编码技术。

[0004] 现有的高光谱图像压缩方法,基本可以分为三大类:1) 基于预测技术的压缩方法。其原理是利用临近像素的相关性,用某种顺序扫描图像,同时用已经编码过的临近像素的线性组合来预测当前像素,然后只传递预测误差到接收端,原始图像就可以通过误差图像得到精确的地恢复。可以看出基于预测技术的压缩方法一般用于无损压缩。该类方法对高光谱图像的压缩流程一般是:波段排序、预测和编码。2) 基于变换技术的压缩方法。基于变换技术的压缩方法既可以用于有损压缩也可以用于无损压缩,其原理是将图像数据映射到变换域,以去除像素间的相关性,使图像的大部分能量集中在少数幅值较大的变换系数上,而其他幅值较小的变换系数表示的是图像相对一些不重要的细节分量,通过利用较少的码字描述幅值较大的系数所代表的主要能量成分,而量化掉幅值较小的变换系数所代表的细节分量达到压缩的目的。3) 基于矢量量化技术的方法。矢量量化主要用于有损或者

近无损压缩,它将输入信号分块重组为矢量数据,然后直接对矢量数据进行量化编码,是一种十分高效的压缩手段。自从1980年Linde等人提出LBG(Linde Bazo Gray)算法以来,矢量量化技术得到了不断发展和完善,压缩质量和计算复杂度都得到了很大改善。图3是传统的LBG方法流程框图,图4是矢量维数分割量化的超光谱图像压缩方法流程图。

[0005] 三大类方法中基于预测技术的压缩方法压缩质量高,但是压缩比低;基于变换技术的压缩方法可以按要求实现不同程度的压缩,甚至可以完全重构原图像,但是变换改变了图像原有的特性,且有的变换需要非常大的计算量;基于矢量量化技术的压缩方法压缩比高、编解码简单,能快速地实现高光谱图像的有损或者近无损压缩,有效降低高光谱图像的数据量,但图像恢复质量低,且其矢量量化方案均采用统一的码书量化各维分量,缺乏对数据的适应性。

### 发明内容

[0006] 本发明针对现有高光谱图像各种压缩方法,或压缩质量高但计算复杂度大,或计算量小但图像恢复质量低,且其矢量量化方案均采用统一的码书量化各维分量,缺乏对数据的适应性的问题,提出了一种压缩编码高光谱遥感图像的多层次码书矢量量化方案。该方案根据失真情况,将高光谱图像的光谱矢量分割为低维部分、中维部分、高维部分三个部分,然后对失真较大的低维部分采用大尺寸码书,失真不大的中维部分采用中尺寸码书,失真较小的高维部分采用小尺寸码书。相同压缩比下,该方案能在有效提高高光谱图像的压缩质量的同时,大幅度降低计算复杂度,快速高效地完成高光谱遥感图像的有损或近无损压缩。

[0007] 一种压缩编码高光谱遥感图像的多层次码书矢量量化方法,读取高光谱图像三维数据,截取要压缩的子块转化为二维矩阵形式的原始矢量数据,将原始矢量数据分割为低维部分、中维部分、高维部分;然后对三部分矢量数据分别作哈达玛Hadamard变换和离散度排序预处理,得到预处理后的三部分矢量数据;对预处理后的三部分矢量数据分别截取矢量数据的前1/4维分量组成低维部分、中维部分、高维部分训练子矢量数据,剩余的3/4维分量作为对应部分的尾部子矢量数据;根据基本码书尺寸设置码书尺寸为多层次码书,对各部分训练子矢量数据进行矢量量化,得到迭代的训练子矢量码字索引和训练子矢量码书;根据训练子矢量码字索引分别对三部分尾部子矢量数据编码,得到三部分尾部子矢量码书和码字索引;分别整理各部分码书,得到三部分空域最终完整码书和最终码字索引,完成高光谱图像数据块的压缩编码。所述分割原则为:三部分矢量的维数分别都满足2的整数次幂,若不满足则在矢量末尾补零将维数扩展为最接近2的整数次幂,三部分矢量维数之和等于或接近原矢量维数。预处理具体为:先作Hadamard变换,将各部分矢量数据中每个行矢量右乘一个相同维数的Hadamard方阵;计算各部分矢量数据中每维分量的离散度,某维分量的离散度等于该维分量的最大值与该维分量的最小值的差值;将各部分矢量的离散度值分别进行降序排序,记录排序索引,按照排序索引分别重新排列对应部分矢量数据的各维分量。设定码书尺寸为多层次码书具体为,根据基本码书尺寸N设定低维部分训练子矢量码书尺寸 $N_1$ 、中维部分训练子矢量码书尺寸 $N_2$ 、高维部分训练子矢量码书尺寸 $N_3$ , $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ 为N的倍数,其中, $N_1 > N_2 > N_3$ 。进行矢量量化进一步包括:搜索每个训练子矢量的最佳匹配码字,并将训练子矢量划分到对应的胞腔中,记录对应的码字索引,直到所有的训

训练子矢量都训练完成,以各胞腔的质心代替原来胞腔对应的码字,保存最后一次迭代产生的低维训练子矢量码书和码字索引、中维训练子矢量码书和码字索引、高维训练子矢量码书和码字索引。进行矢量量化进一步包括:获取初始码书和初始码字索引,计算训练矢量集中的各训练子矢量的 2 范数,并将其按升序排序,记录排序索引,按照该索引重新排序各训练子矢量,对各训练子矢量平均分组后取每组最后一个组成初始码书,各训练子矢量的分组号作为其对应的初始码字索引。得到三部分尾部子矢量码书和码字索引具体为:将三部分训练子矢量码字索引作为对应部分的尾部子矢量编码索引,按照编码索引将所有尾部子矢量分配到各个胞腔中,以各胞腔的质心作为码字,得到各部分尾部子矢量码书。整理各部分码书具体包括,将训练子矢量码书作为前 1/4 维分量,尾部子矢量码书作为后 3/4 分量,连接成对应部分的 Hadamard 变换域完整码书;再对各部分 Hadamard 变换域完整码书进行离散度反排序、Hadamard 反变换得到各部分空域最终完整码书,将训练子矢量码字索引作为空域最终码字索引。

[0008] 搜索每个训练子矢量的最佳匹配码字进一步包括:按照当前训练矢量  $X$  对应的码字索引  $I(i)$  找到码书  $W$  中第  $I(i)$  个码字  $Y_{op}$ , 计算  $X$  和  $Y_{op}$  之间的欧式距离作为

当前最小失真  $D_{\min} = \sum_{k=1}^m (X_k - Y_{opk})^2$ , 按照  $Y_{op}$  为中心上下搜索,输入下一个要判断

的码字  $Y_j$ ; 计算  $D_1 = (\text{Norm}_X - \text{Norm}_Y(j))^2$ , 其中  $\text{Norm}_X$  为  $X$  的 2 范数,  $\text{Norm}_Y(j)$  为当前判断码字  $Y_j$  的 2 范数, 若  $D_1 \geq D_{\min}$ , 且  $\text{Norm}_X \geq \text{Norm}_Y(j)$ , 则排除码字  $Y_k (k = 1, \dots, j)$ , 若  $\text{Norm}_X \leq \text{Norm}_Y(j)$ , 则排除码字  $Y_k (k = j, \dots, N)$ ; 若不满足  $D_1 \geq D_{\min}$ , 计算  $D_2 = (X_1 - Y_{j1})^2 + (V_X - V_Y(j))^2$ , 若不等式  $D_2 \geq D_{\min}$  成立, 则排除码字  $Y_j$ , 否则, 计算  $X$  与  $Y_j$  的累积失真

$D_q(X, Y_j) = \sum_{k=1}^q (X_k - Y_{jk})^2 (q = 2, \dots, m)$ , 若不等式  $D_q(X, Y_j) \geq D_{\min}$  成立, 则排除码

字  $Y_j$ , 如直到  $q = m$ , 不等式  $D_q(X, Y_j) \geq D_{\min}$  均不成立, 则当前码字  $Y_j$  为训练矢量  $X$  对应的最匹配码字, 其中,  $k$  表示第  $k$  维分量,  $m$  表示训练矢量  $X$  的维数,  $N$  为码书  $W$  的尺寸,  $V_X$  为当前训练矢量  $X$  的方差,  $V_Y(j)$  为当前码字  $Y_j$  的方差,  $X_k$  为  $X$  的第  $k$  维分量,  $X_1$  为  $X$  的第一维分量,  $Y_{j1}$  为  $Y_j$  的第一维分量。

[0009] 该方案的实现过程主要包括以下几个阶段:

[0010] 训练子矢量数据获取阶段: 读取高光谱图像三维数据, 截取要编码的子块转化为二维矩阵形式的矢量数据, 然后将矢量数据分割为低维、中维、高维三个部分; 对分割出的三部分矢量分别作两步预处理, 即先作 Hadamard (哈达玛) 变换、再作离散度排序, 得到预处理后的三部分矢量数据; 分别截取预处理后的三部分矢量数据的前四分之一维分量组成各部分训练子矢量数据并保存, 剩下的后四分之三维分量保存为尾部子矢量数据。

[0011] 训练子矢量数据矢量量化阶段: 设定码书尺寸为多层次码书; 设置迭代次数或失真阈值作为训练结束的条件; 按照训练子矢量范数排序, 平均分组取最后一个的方式获取各部分训练子矢量初始码书, 分组号即为训练子矢量的初始码字索引; 对各部分训练子矢量进行迭代训练, 可利用高效三步排除不等式算法快速搜索每个训练子矢量的最佳匹配码字, 并将训练子矢量划分到对应的胞腔中, 记录对应的码字索引, 直到所有的训练子矢量都训练完成时, 本次迭代结束, 更新码书, 以各胞腔的质心代替原来胞腔对应的码字; 判断是

否满足迭代结束的条件,若满足则终止训练,并保存最后一次迭代产生的各部分训练子矢量码书和训练子矢量码字索引,否则,继续下一轮训练。

[0012] 尾部子矢量数据编码阶段:直接将三部分训练子矢量码字索引作为对应部分的尾部子矢量数据编码索引,按照编码索引将所有尾部子矢量分配到各个胞腔中,以各胞腔的质心作为码字,得到各部分尾部子矢量码书。

[0013] 码书连接整理阶段:直接将训练子矢量码书作为前 1/4 维分量,尾部子矢量码书作为后 3/4 分量,连接成对应部分的哈达玛 Hadamard 变换域完整码书;再对各码书进行离散度反排序、Hadamard 反变换得到各部分空域最终完整码书和最终码字索引,从而完成整个图像的压缩。

[0014] 通过上述过程可以看出,采用矢量量化对数据进行压缩编码,编码后只需要传输最终码书以及各个训练矢量对应的码字索引,压缩比大,解码过程只需要在接收端根据码字索引值在码书中查找到对应的码字代替训练矢量,解码过程简单。且用矢量量化压缩高光谱图像可以充分利用高光谱图像的很强的谱间相关性。但是,高光谱图像的矢量量化性能还能得到进一步提升,因为实验发现失真随着维数升高而基本呈现递减的趋势,即低维部分失真大,高维部分失真小,且高维部分随着码书的增大,对图像的压缩质量的提高很小;而低维部分失真相对较大,随着码书增大,图像的压缩质量提高比较明显,如果各维分量都采用统一大小的码书量化就会造成存储量的浪费。因此,提出多层次码书矢量量化用于压缩高光谱图像,对矢量进行分割采用不同大小的码书进行量化,低维部分码书大,高维部分码书小,可以有效提高高光谱图像的压缩性能。

#### 附图说明:

[0015] 图 1 是美国喷气实验室提供的高光谱图像 Lunar Lake 压缩质量与压缩比关系;

[0016] 图 2 是美国喷气实验室提供的高光谱图像 Cuprite 压缩质量与压缩比关系;

[0017] 图 3 是传统的 LBG 方法流程框图;

[0018] 图 4 是矢量维数分割量化的超光谱图像压缩方法;

[0019] 图 5 是本发明方案流程图。

#### 具体实施方式

[0020] 以下使用具体事例和附图对本发明方案作进一步说明。图 5 所示为本发明方案流程图。本发明提出的压缩编码高光谱遥感图像的多层次码书矢量量化方案,主要包括以下几个阶段:

[0021] 训练子矢量数据获取阶段:读取高光谱图像三维数据,截取要编码的子块转化为二维矩阵形式的矢量数据,然后将矢量数据分割为低维、中维、高维三个部分;对分割出的三部分矢量分别作两步预处理,即先作 Hadamard(哈达玛)变换、再作离散度排序,得到预处理后的三部分矢量数据;分别截取预处理后的三部分矢量数据的前四分之一维分量组成各部分训练子矢量数据并保存,剩下的后四分之三维分量保存为尾部子矢量数据。

[0022] 训练子矢量数据矢量量化阶段:设定码书尺寸为多层次码书;设置迭代次数或失真阈值作为训练结束的条件;按照训练子矢量范数排序,平均分组取最后一个的方式获取各部分训练子矢量初始码书,分组号即为训练子矢量的初始码字索引;对各部分训练子矢

量进行迭代训练,利用高效三步排除不等式算法快速搜索每个训练子矢量的最佳匹配码字,并将训练子矢量划分到对应的胞腔中,记录对应的码字索引,直到所有的训练子矢量都训练完成时,本次迭代结束,更新码书,以各胞腔的质心来代替原来胞腔对应的码字;判断是否满足迭代结束的条件,若满足则终止训练,并保存最后一次迭代产生的各部分训练子矢量码书和训练子矢量码字索引,否则,继续下一轮训练。

[0023] 尾部子矢量数据编码阶段:直接将三部分训练子矢量码字索引作为对应部分的尾部子矢量数据编码索引,按照编码索引将所有尾部子矢量分配到各个胞腔中,以各胞腔的质心作为码字,得到各部分尾部子矢量码书。

[0024] 码书连接整理阶段:直接将训练子矢量码书作为前 1/4 维分量,尾部子矢量码书作为后 3/4 分量,连接成对应部分的 Hadamard 变换域完整码书;再对各码书进行离散度反排序、Hadamard 反变换得到各部分空域最终完整码书和最终码字索引,从而完成整个图像的压缩。

[0025] 以下举例进一步说明本发明的实施具体包括:

[0026] 读取三维的高光谱图像数据,截取要编码的子块,转化为二维矩阵形式的矢量数据 B,转化的方式可为把同一空间位置的各个像素值按照波段序号从小到大按顺序组成一个行矢量数据,存入 B 中。

[0027] 将 B 分割为低维、中维、高维三部分,分割原则为:三部分矢量的维数都满足 2 的整数次幂,如果某部分不满足,则在矢量末尾补零将维数扩展到最接近的 2 的整数次幂;低维部分矢量维数较少,中维部分矢量维数居中,高维部分矢量维数较多;三部分矢量维数之和等于(或尽量接近)原矢量维数。

[0028] 对分割出的三部分矢量分别作两步预处理,即先作 Hadamard 变换,将每个行矢量右乘一个相同维数的 Hadamard 方阵;再作离散度排序,计算每一维分量的离散度等于该维分量的最大值与该维分量的最小值的差值,将各部分矢量的离散度值进行降序排序,记录三部分离散度排序索引,并按照这三个索引分别重新排序对应部分矢量的各维分量,得到预处理后的各部分矢量数据。

[0029] 分别截取预处理后的三部分矢量数据的前四分之一维分量作为对应部分的训练子矢量数据并保存,剩下的后四分之三维分量保存为不参与训练的尾部子矢量数据。

[0030] 设定码书尺寸为多层次码书,首先设定基本码书尺寸 N 的值,然后设定低维部分训练子矢量码书尺寸、中维部分训练子矢量码书尺寸、高维部分训练子矢量码书尺寸,设置迭代次数 ite 或失真阈值 e 作为训练结束的条件。如设定低维部分训练子矢量码书尺寸为基本码书尺寸 N 的四倍,即  $N_1 = 4 \times N$ ,设定中维部分训练子矢量码书尺寸为基本码书尺寸 N 的二倍,即  $N_2 = 2 \times N$ ,设定高维部分训练子矢量码书尺寸为基本码书尺寸 N 的四分之一,即  $N_3 = N/4$ 。

[0031] 分别计算三部分训练子矢量的 2 范数,并按升序排序,记录排序索引,然后按照排序索引分别重排序对应部分的训练子矢量,对重排序后的各部分训练子矢量按照设定的码书尺寸进行平均分组,依次选取每组最后一个组成各部分初始码书,且将每个训练子矢量的分组号作为其初始码字索引。

[0032] 对各部分训练子矢量进行迭代训练,搜索每个训练子矢量的最佳匹配码字,并将训练子矢量划分到对应的胞腔中,记录对应的码字索引,直到所有的训练子矢量都训练完



成时,本次迭代结束,更新码书,以各胞腔的质心来代替原来胞腔对应的码字。

[0033] 判断迭代次数  $ite$  是否已经达到预先设定的值,或者判断本次迭代产生的平均失真与前一次迭代产生的平均失真之间的相对误差是否小于设定的失真阈值  $e$ 。若满足迭代结束的条件,则终止训练,并保存最后一次迭代产生的三部分训练子矢量码书和码字索引;否则,继续进行下一迭代。

[0034] 直接将三部分训练子矢量码字索引作为对应部分的尾部子矢量编码索引,按照编码索引将所有尾部子矢量分配到各个胞腔中,以各胞腔的质心作为码字,得到各部分尾部子矢量码书。

[0035] 直接将训练子矢量码书作为前  $1/4$  维分量,尾部子矢量码书作为后  $3/4$  分量,连接成对应部分的 Hadamard 变换域完整码书;再对各部分 Hadamard 变换域完整码书进行离散度反排序、Hadamard 反变换得到各部分空域最终完整码书,将训练子矢量码字索引直接作为空域最终码字索引。打包各部分空域最终完整码书和空域最终码字索引进行存储和传输,从而完成整个图像的压缩。

[0036] 搜索每个训练子矢量的最佳匹配码字具体可为:

[0037] 准备阶段:计算码书中所有码字的 2 范数并按升序排序,记录排序索引,然后将码书  $W$  中的码字按照该排序索引重排序,得到新的码书  $W$ ,且按该排序索引调整训练子矢量码字索引  $I$  中的值与新的码书  $W$  对应,再按照当前训练子矢量  $X$  对应的码字索引  $I(i)$  找到码书  $W$  中第  $I(i)$  个码字  $Y_{op}$ ,计算  $X$  和  $Y_{op}$  之间的欧式距离作为当前最小失真

$D_{\min} = \sum_{k=1}^m (X_k - Y_{op})^2$ 。按照  $Y_{op}$  为中心上下搜索的顺序,输入下一个要判断的码字  $Y_j$ 。

[0038] 第一步排除不等式:计算  $D_1 = (\text{Norm}_X - \text{Norm}_Y(j))^2$ ,其中  $\text{Norm}_X = \sqrt{\sum_{k=1}^m X_k^2}$  为  $X$

的 2 范数,  $\text{Norm}_Y(j) = \sqrt{\sum_{k=1}^m Y_{jk}^2}$  为当前判断码字  $Y_j$  的 2 范数,  $X_k$  表示训练子矢量  $X$  的第  $k$

维分量,  $k$  表示当前维数,  $m$  表示训练子矢量  $X$  的维数。判断不等式  $D_1 \geq D_{\min}$  是否成立,若成立则进一步判断  $\text{Norm}_X$  与  $\text{Norm}_Y(j)$  的关系,若  $\text{Norm}_X \geq \text{Norm}_Y(j)$ ,则排除码字  $Y_k (k = 1, \dots, j)$ ;若  $\text{Norm}_X \leq \text{Norm}_Y(j)$ ,则排除码字  $Y_k (k = j, \dots, N)$ ,  $N$  为码书  $W$  的尺寸。若不等式  $D_1 \geq D_{\min}$  不成立,则进入第二步排除不等式判断。

[0039] 第二步排除不等式:计算  $D_2 = (X_1 - Y_{j1})^2 + (V_X - V_Y(j))^2$ ,其中  $V_X = \sqrt{\sum_{k=2}^m X_k^2}$  为当前

训练子矢量  $X$  的方差,  $V_Y(j) = \sqrt{\sum_{k=2}^m Y_{jk}^2}$  为当前码字  $Y_j$  的方差,  $k$  表示第  $k$  维分量,  $m$  表示训

练子矢量  $X$  的维数,  $X_1$  为  $X$  的第一维分量,  $Y_{j1}$  为  $Y_j$  的第一维分量,  $k$  表示第  $k$  维分量,  $m$  表示训练子矢量的维数。判断不等式  $D_2 \geq D_{\min}$  是否成立,若成立,则排除码字  $Y_j$ ,否则进入第三步排除不等式判断。

[0040] 第三步排除不等式：采用 PDS 搜索（部分失真搜索，partial distortion search）。即计算  $X$  与  $Y_j$  的累积失真  $D_q(X, Y_j) = \sum_{k=1}^q (X_k - Y_{jk})^2$  ( $q = 2, \dots, m$ )，其中  $k$

表示第  $k$  维分量， $m$  是训练矢量  $X$  的维数。 $q$  从 2 逐渐变化到  $m$  的过程可以构成  $m-1$  个部分失真不等式，若其中有某一步不等式  $D_q(X, Y_j) \geq D_{\min}$  成立，则排除码字  $Y_j$ ，否则  $q$  增加 1 继续进行判断，直到  $q = m$ ，若还未排除码字  $Y_j$ ，则当前码字  $Y_j$  为训练矢量  $X$  对应的新的失真最小的码字，即最匹配码字，并把  $X$  对应的码字索引更新为  $IT(i) = j$ ，把  $X$  对应的最小失真  $D_{\min}$  更新为当前码字  $Y_j$  和  $X$  之间的欧式距离  $D_{\min} = d(X, Y_j) = \sum_{k=1}^m (X_k - Y_{jk})^2$ 。

[0041] 实验中使用的是高光谱图像 Lunar Lake 和 Cuprite 的第一场景，来源于美国喷气实验室提供的免费高光谱数据集 AVIRIS，这些数据源被绝大多数研究者使用，研究结果具有可比性。Lunar Lake 图像和 Cuprite 图像的尺寸为  $512 \times 614 \times 224$ ，表示图像含有 512 行 614 列和 224 个光谱波段。为了处理方便，分别截取 Lunar Lake 图像和 Cuprite 图像第一场景中前 256 行前 256 列和所有 224 光谱波段的图像，组成  $256 \times 256 \times 224$  的子图像块数据，提取此子图像块每一相同空间位置对应的 224 个波段的像素值按波段从小到大组合成一个行矢量数据依次存在二维矩阵  $B$  中，如此，将三维子图像块数据转化为二维矩阵数据  $B(65536, 224)$ ， $B$  的每一行代表一个 224 维的原始行矢量数据，对应一个空间位置， $B$  的每一列表示一个光谱波段，对应相同空间位置一幅完整的  $256 \times 256$  的二维图像。

[0042] 分割原始矢量数据为三个部分

[0043] 将原始矢量数据  $B$  分割为三个部分：低维矢量数据  $BL$ 、中维矢量数据  $BM$ 、高维部分矢量数据  $BH$ ，分割原则为：分割原则为：三部分矢量的维数都满足 2 的整数次幂，如果某部分不满足，则在矢量末尾补零将维数扩展到最接近的 2 的整数次幂；低维部分矢量维数较少，中维部分矢量维数居中，高维部分矢量维数较多；三部分矢量维数之和尽量接近原矢量维数。

[0044] 实验中矢量数据  $B$  的维数为 224，按照分割原则将  $B$  分割为矢量维数为 32、64、128 的三个部分，即  $BL(65536, 32)$  为截取  $B$  的 1-32 维分量所得， $BM(65536, 64)$  为截取  $B$  的 33-96 维分量所得， $BH(65536, 128)$  为截取  $B$  的 97-224 维分量所得。

[0045] 对分割出的三部分矢量数据分别作作 Hadamard 变换

[0046] 对一个维数为  $m$  的行矢量进行 Hadamard 变换的方式为将矢量右乘一个规格为  $m \times m$  的 Hadamard 方阵。因此，对分割出的三部分矢量数据分别作 Hadamard 变换，即对分割出的低维部分矢量数据  $BL$ 、中维部分矢量数据  $BM$ 、高维部分矢量数据  $BH$  中的每个行矢量都右乘一个相同维数的 Hadamard 方阵，得到 Hadamard 变换域的部分三部分矢量数据  $BLH$ 、 $BMH$ 、 $BHH$ 。

[0047] 实验中，根据数据情况，对分割出的三部分矢量数据分别作 Hadamard 变换的具体操作为：将  $BL(65536, 32)$  中每个行矢量右乘一个 Hadamard 方阵  $H(32 \times 32)$  得  $BLH$ ；将  $BM(65536, 64)$  中每个行矢量右乘一个 Hadamard 方阵  $H(64 \times 64)$  得  $BMH$ ；将  $BH$  中每个行矢量右乘一个 Hadamard 方阵  $H(128 \times 128)$  得  $BHH$ 。

[0048] 矢量的 Hadamard 变换具有变换计算量小，变换速度快的优势。这是因为 Hadamard

方阵中只含有 1 和 -1 两种元素, 变换仅需简单的加减运算不需要乘法运算, 且矢量的 Hadamard 变换有快速算法。

[0049] 矢量的 Hadamard 变换的具有如下性质: 令  $H_m$  为  $m \times m$  的 Hadamard 矩阵,

$$H_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, \quad H_{m+1} = \begin{bmatrix} H_m & H_m \\ H_m & -H_m \end{bmatrix},$$

记  $x$  为空域中维数为  $m$  的行矢量,  $X$  为矢量  $x$  经

Hadamard 变换后的矢量, 则  $x$  的 Hadamard 变换定义为  $X = xH_m$ , 则矢量 Hadamard 变换的性质可以表述为:

[0050]  $X_1 = s_x$ ,  $s_x$  是空域中矢量  $x$  各维分量之和,  $X_1$  是  $x$  经 Hadamard 变换后所得矢量  $X$  的第一维分量, 即 Hadamard 域中矢量的第一维分量是对应空域中矢量各分量的和值;

[0051]  $L_x^2 = ml_x^2 = m \sum_{i=1}^m x_i^2$ ,  $l_x^2$  表示空域中矢量  $x$  的范数,  $L_x^2$  表示  $x$  经 Hadamard 变

换后所得矢量  $X$  的范数, 即 Hadamard 域中矢量范数是对应空域中矢量范数的  $m$  倍;

[0052]  $D(X, Y_j) = md(x, y_j)$ ,  $d(x, y_j)$  为空域中矢量  $x$  和码字  $y_j$  的欧氏距离,  $D(X, Y_j)$  是对应的 Hadamard 域中矢量  $X$  和码字  $Y_j$  的欧氏距离, 即 Hadamard 域中的矢量失真是空域中失真的  $m$  倍, 由此看出, 在 Hadamard 域搜索最佳码字和在空域搜索是等价的。

[0053] 分别获取三部分训练子矢量数据

[0054] 对 Hadamard 变换域的部分矢量数据 BLH、BMH、BHH 分别计算离散度对应得到低维离散度  $disL$ , 中维离散度  $disM$ , 高维离散度  $disH$ , 某维分量的离散度等于该维分量的最大值与该维分量的最小值的差值。分别对  $disL$ 、 $disM$ 、 $disH$  中的值作升序排序对应得到低维离散度索引  $ILdis$ 、中维离散度索引  $IMdis$ 、高维离散度索引  $IHdis$ 。将 Hadamard 变换域的低维部分矢量数据 BLH 的各维分量按  $ILdis$  重新排序得 BLD, 将 Hadamard 变换域的中维部分矢量数据 BMH 的各维分量按  $IMdis$  重新排序得 BMD, 将 Hadamard 变换域的高维部分矢量数据 BHH 的各维分量按  $IHdis$  重新排序得 BHD。分别截取 BLD、BMD、BHD 的前 1/4 维分量组成低维训练子矢量数据 TL、中维训练子矢量数据 TM、高维训练子矢量数据 TH, 剩余的后 3/4 维分量保存为对应的低维尾部子矢量数据 TailL、中维尾部子矢量数据 TailM、高维尾部子矢量数据 TailH。

[0055] 实验中, 根据数据情况, 截取离散度排序后的低维矢量数据 BLD(65536, 32) 的前 8 维组成低维训练子矢量数据 TL(65536, 8), 剩下的 24 维分量保存为低维尾部子矢量数据 TailL(65536, 24)。截取离散度排序后的中维部分矢量数据 BMD(65536, 64) 的前 16 维组成中维训练子矢量数据 TM(65536, 16), 剩下的 48 维分量保存为中维尾部子矢量数据 TailM(65536, 48)。截取离散度排序后的高维部分矢量数据 BHD(65536, 128) 的前 32 维组成高维训练子矢量数据 TH(65536, 32), 剩下的 96 维分量保存为高维尾部子矢量数据 TailH(65536, 96)。

[0056] 设定码书尺寸和迭代结束的条件

[0057] 设定码书尺寸为多层次码书, 首先设定基本码书尺寸  $N$  的值, 然后, 设定低维码书尺寸  $N_1$  为  $N$  的四倍, 即  $N_1 = 4 \times N$ , 中维码书尺寸为  $N$  的二倍, 即  $N_2 = 2 \times N$ , 高维码书尺寸为  $N$  的四分之一, 即  $N_3 = N/4$ 。

[0058] 设置迭代次数为  $ite$  或设置失真阈值为  $e$  作为训练结束的条件。

[0059] 获取三部分训练子矢量数据的初始码书和初始码字索引

[0060] 计算低维训练子矢量数据 TL 中行矢量的范数 NormLT 并按升序排序得排序索引 ILNorm, 并按 ILNorm 重新排序 TL 中行矢量得 BLNorm, 将 BLNorm 中的行矢量按低维码书尺寸平均分成  $N_1$  组, 依次选取每组最后一个组成低维训练子矢量初始码书 CLTs, 且将每个行矢量的分组号作为其初始码字索引得低维训练子矢量初始码字索引 ILTs。计算中维训练子矢量数据 TM 中行矢量的范数 NormMT 并按升序排序得排序索引 IMNorm, 并按 IMNorm 重新排序 TM 中行矢量得 BMNorm, 将 BMNorm 中的行矢量按中维码书尺寸平均分成  $N_2$  组, 依次选取每组最后一个组成中维训练子矢量初始码书 CMTs, 且将每个行矢量的分组号作为其初始码字索引得中维训练子矢量初始码字索引 IMTs。计算高维训练子矢量数据 TH 中行矢量的范数 NormHT 并按升序排序得排序索引 IHNorm, 并按 IHNorm 重新排序 TH 中行矢量得 BHNorm, 将 BHNorm 中的行矢量按高维码书尺寸平均分成  $N_3$  组, 依次选取每组最后一个组成高维训练子矢量初始码书 CHTs, 且将每个行矢量的分组号作为其初始码字索引得高维训练子矢量初始码字索引 IHTs。

[0061] 对三部分训练子矢量数据进行矢量量化训练

[0062] 对三部分训练子矢量数据 TL、TM、TH 中的行矢量, 分别利用高效三步排除不等式算法快速搜索每个训练子矢量的最佳匹配码字, 并将训练子矢量划分到对应的胞腔中, 记录对应的码字索引, 直到所有的训练子矢量都训练完成时, 本次迭代结束, 更新码书, 以各胞腔的质心来代替原来胞腔对应的码字; 判断是否满足迭代结束的条件, 若满足则终止训练, 并保存最后一次迭代产生的低维训练子矢量码书 CLT 和码字索引 ILT、中维训练子矢量码书 CMT 和码字索引 IMT、高维训练子矢量码书 CHT 和码字索引 IHT。

[0063] 对三部分尾部子矢量数据进行编码

[0064] 直接将低维训练子矢量码字索引 ILT 作为低维尾部子矢量编码索引, 按照编码索引将低维尾部子矢量数据 TailL 中的行矢量分配到各个胞腔中, 以各胞腔的质心作为码字得低维尾部子矢量码书 CLTail。直接将中维训练子矢量码字索引 IMT 作为中维尾部子矢量编码索引, 按照编码索引将中维尾部子矢量数据 TailM 中的行矢量分配到各个胞腔中, 以各胞腔的质心作为码字得中维尾部子矢量码书 CMTail。直接将高维训练子矢量码字索引 IHT 作为高维尾部子矢量编码索引, 按照编码索引将高维尾部子矢量数据 TailH 中的行矢量分配到各个胞腔中, 以各胞腔的质心作为码字得高维尾部子矢量码书 CHTail。

[0065] 对三部分码书进行连接整理

[0066] 直接将训练子矢量码书作为前 1/4 维分量, 尾部子矢量码书作为后 3/4 分量, 连接成对应部分的 Hadamard 变换域完整码书; 再对各部分 Hadamard 变换域完整码书进行离散度反排序、Hadamard 反变换得到各部分空域最终完整码书, 如果该部分矢量数据在数据预处理阶段作了添加零扩维处理, 则 Hadamard 反变换后去除码字末尾添加零的那几维。将训练子矢量码字索引直接作为空域最终码字索引。

[0067] 根据数据情况, 直接将低维训练子矢量码书 CLT 作为前 8 维分量, 低维尾部子矢量码书 CLTail 作为后 24 维分量, 连接成低维部分 Hadamard 变换域完整码书 CLw ( $N_1, 32$ )。直接将中维训练子矢量码书 CMT 作为前 16 维分量, 中维尾部子矢量码书 CMTail 作为后 48 维分量, 连接成中维部分 Hadamard 变换域完整码书 CMw ( $N_2, 64$ )。直接将高维训练子矢量码书 CHT 作为前 32 维分量, 高维尾部子矢量码书 CHTail 作为后 96 维分量, 连接成高维部分

Hadamard 变换域完整码书  $CHw(N_3, 128)$ 。将  $CLw$ 、 $CMw$ 、 $CHw$  分别进行离散度反排序、Hadamard 反变换得到低维空域最终完整码书  $CLept$ 、中维空域最终完整码书  $CMept$ 、高维空域最终完整码书  $CHept$ 。将  $ILT$  直接作为低维空域最终码字索引, 将  $IMT$  直接作为中维空域最终码字索引, 将  $IHT$  直接作为高维空域最终码字索引。

[0068] 在 MATLAB7.9 软件平台下结合附图对本发明方案的实例进行详细说明。

[0069] 使用的实验数据是高光谱图像 Lunar Lake 和 Cuprite, 规格为  $512 \times 614 \times 224$ , 其每个像素用两个字节的带符号整数表示。仿真实验对全搜索 LBG 方法、矢量维数分割量化的超光谱图像压缩方法和本发明方案 3 种方法进行了仿真对比。仿真中, 矢量维数分割量化的超光谱图像压缩方法对各部分矢量数据采用统一尺寸的码书, 即设定的基本码书  $N$ , 以下将该方法简称为统一码书方法。

[0070] 以下举例说明本方案的实施:

[0071] 训练子矢量数据获取阶段:

[0072] 步骤 1: 在路径中准备好要编码的高光谱图像, 使用 MATLAB 函数库中的 `fopen` 函数和 `fread` 函数快速读取出要编码的高光谱图像, 得到三维的高光谱数据矩阵  $Cubic(512, 614, 224)$ , 表示高光谱图像含有 512 行、614 列和 224 个光谱波段。

[0073] 步骤 2: 截取  $Cubic$  的前 256 行、前 256 列和所有 224 个波段的数据得到要压缩的数据子块  $Cubic\_sub(256, 256, 224)$ 。

[0074] 步骤 3: 将  $Cubic\_Sub$  转化为矩阵形式的矢量数据  $B(65536, 224)$ 。转化方式为将  $Cubic\_Sub$  的前 2 维按顺序扫描为  $B$  的第 1 维,  $Cubic\_Sub$  的第 3 维扫描为矩阵  $B$  的第 2 维,  $B$  的每一行代表一个行矢量数据。

[0075] 步骤 4: 截取  $B$  的 1-32 维分量组成低维矢量数据  $BL(65536, 32)$ 、截取  $B$  的 33-96 维分量组成中维矢量数据  $BM(65536, 64)$ 、截取  $B$  的 97-224 维分量组成高维矢量数据  $BH(65536, 128)$ 。

[0076] 步骤 5: 将  $BL$  中的每个行矢量右乘一个 32 维的 Hadamard 方阵  $H(32, 32)$  得到  $BLH(65536, 32)$ , 将  $BM$  中每个行矢量右乘一个 64 维的 Hadamard 方阵  $H(64, 64)$  得  $BMH$ , 将  $BH$  中每个行矢量右乘一个 128 维的 Hadamard 方阵  $H(128, 128)$  得  $BHH$ 。

[0077] 步骤 6: 计算  $BLH$  中行矢量各维分量的离散度  $disL(1, 32)$ , 计算  $BMH$  中行矢量各维分量的离散度  $disM(1, 64)$ , 计算  $BHH$  中行矢量各维分量的离散度  $disH(1, 128)$ , 某维分量的离散度等于该维分量的最大值与该维分量的最小值的差值。对  $disL$  中的值作升序排序得排序索引  $ILdis$ , 将  $BLH$  中行矢量的各维分量按  $ILdis$  重排序得  $BLD$ , 对  $disM$  中的值作升序排序得排序索引  $IMdis$ , 将  $BMH$  中行矢量的各维分量按  $IMdis$  重排序得  $BMD$ , 对  $disH$  中的值作升序排序得排序索引  $IHdis$ , 将  $BHH$  中行矢量的各维分量按  $IHdis$  重排序得  $BHD$ 。

[0078] 步骤 7: 截取  $BLD$  的前 8 维组成低维训练子矢量数据  $TL(65536, 8)$ , 剩下的 24 维分量保存为低维尾部子矢量数据  $Tai1L(65536, 24)$ 。截取  $BMD(65536, 64)$  的前 16 维组成中维训练子矢量数据  $TM(65536, 16)$ , 剩下的 48 维分量保存为中维尾部子矢量数据  $Tai1M(65536, 48)$ 。截取  $BHD$  的前 32 维组成高维训练子矢量数据  $TH(65536, 32)$ , 剩下的 96 维分量保存为高维尾部子矢量数据  $Tai1H$ 。

[0079] 训练子矢量数据矢量量化阶段:

[0080] 步骤 1: 设定基本码书尺寸  $N$  的值, 然后设定低维码书尺寸  $N_1 = 4 \times N$ , 设定中维码

书尺寸  $N_2 = 2 \times N$ , 设定高维码书尺寸  $N_3 = N/4$ 。设置迭代次数为  $ite = 10$ 。

[0081] 步骤 2: 计算 TL 中行矢量的 2 范数  $NormLT$  并按升序排序得  $ILNorm$ , 并按  $ILNorm$  重新排序 TL 中行矢量得  $BLNorm$ , 将  $BLNorm$  中的行矢量平均分成  $N_1$  组, 依次选取每组最后一个组成低维训练子矢量初始码书  $CLTs$ , 每个行矢量的分组号作为其初始码字索引得低维训练子矢量初始码字索引  $ILTs$ 。计算 TM 中行矢量的 2 范数  $NormMT$  并按升序排序得  $IMNorm$ , 并按  $IMNorm$  重新排序 TM 中行矢量得  $BMNorm$ , 将  $BMNorm$  中的行矢量按平均分成  $N_2$  组, 依次选取每组最后一个组成中维训练子矢量初始码书  $CMTs$ , 每个行矢量的分组号作为其初始码字索引得中维训练子矢量初始码字索引  $IMTs$ 。计算 TH 中行矢量的 2 范数  $NormHT$  并按升序排序得排序索引  $IHNorm$ , 并按  $IHNorm$  重新排序 TH 中行矢量得  $BHNorm$ , 将  $BHNorm$  中的行矢量按平均分成  $N_3$  组, 依次选取每组最后一个组成高维训练子矢量初始码书  $CHTs$ , 每个行矢量的分组号作为其初始码字索引得高维训练子矢量初始码字索引  $IHTs$ 。

[0082] 步骤 3: 依次输入 TL、TM、TH 作为当前训练矢量数据 TT。

[0083] 步骤 4: 计算 TT 中行矢量的范数  $NormTT(65536, 1)$ ,  $NormTT(i) = \sqrt{\sum_{k=1}^m X_{ik}^2}$

代表 TT 中的第  $i$  个行矢量  $X$  的范数; 计算 TT 中行矢量的方差  $VXTT(65536, 1)$ ,

$VXTT(i) = \sqrt{\sum_{k=2}^m X_{ik}^2}$  代表 TT 中的第  $i$  个行矢量  $X$  的方差。其中  $k$  表示第  $k$  维分量,  $m$  表

示 TT 中行矢量的维数。

[0084] 步骤 5: 输入当前训练矢量数据 TT 对应的初始码书  $Ws$  和初始码字索引  $Is$ , 设定训练过程中的码书变量为  $W$ 、码字索引变量为  $I$ , 令  $W = Ws$ ,  $I = Is$ 。

[0085] 步骤 6: 初始化胞腔训练矢量之和的变量  $Sum(N, m)$  为零矩阵, 初始化胞腔训练矢量个数的变量  $Count(1, N)$  为零矢量,  $m$  表示训练矢量数据 TT 中训练矢量的维数,  $N$  为当前训练矢量数据 TT 对应的码书尺寸。

[0086] 步骤 7: 计算码书  $W$  中所有码字的 2 范数并按升序排序, 记录排序索引  $IWnorm$ , 然后将  $W$  中的码字按照  $IWnorm$  重排序得到新的码书  $W$ 。按  $IWnorm$  调整码字索引  $I$  中的值与新码书  $W$  对应。

[0087] 步骤 8: 计算  $W$  中码字的范数  $NormW(N, 1)$ ,  $NormW(j) = \sqrt{\sum_{k=1}^m Y_{jk}^2}$  代表码书  $W$  中

的第  $j$  个码字  $Y_j$  的范数; 计算  $W$  中码字的方差  $VWTT(N, 1)$ ,  $VWTT(j) = \sqrt{\sum_{k=2}^m Y_{jk}^2}$  代表  $W$  中

第  $j$  个码字  $Y_j$  的方差。其中  $k$  表示第  $k$  维分量,  $m$  表示  $W$  中码字的维数,  $N$  为当前训练矢量数据 TT 对应的码书尺寸。

[0088] 步骤 9: 按顺序输入 TT 中第  $i$  个行矢量  $X$  作为当前训练矢量, 按照  $X$  对应的码字索引  $I(i)$  找到码书  $W$  中第  $I(i)$  个码字  $Y_{op}$ , 计算  $X$  和  $Y_{op}$  之间的欧式距离作为当前最小失

$$\text{真}D_{\min} = \sum_{k=1}^m (X_k - Y_{op})^2。$$

[0089] 步骤 10 :按照  $Y_{op}$  为中心上下搜索的顺序,输入下一个要判断的码字  $Y_j$ 。计算  $D_1 = (\text{NormTT}(i) - \text{NormW}(j))^2$ ,其中  $\text{NormTT}(i)$  为  $X$  的范数,  $\text{NormW}(j)$  为码字  $Y_j$  的范数。判断不等式  $D_1 \geq D_{\min}$  是否成立,若成立,则进一步判断  $\text{NormTT}(i)$  与  $\text{NormW}(j)$  的关系,若  $\text{NormTT}(i) \geq \text{NormW}(j)$ ,则排除码字  $Y_k (k = 1, \dots, j)$ ,若  $\text{NormTT}(i) \leq \text{NormW}(j)$ ,则排除码字  $Y_k (k = j, \dots, N)$ ,  $N$  为当前训练矢量数据  $TT$  对应的码书尺寸;若不等式  $D_1 \geq D_{\min}$  不成立,则进入训练子矢量数据矢量量化阶段步骤 11 进行下一步判断。

[0090] 步骤 11 :计算  $D_2 = (X_1 - Y_{j1})^2 + (VXTT(i) - VWTT(j))^2$ ,其中  $VXTT(i)$  为  $X$  的方差,  $VWTT(j)$  为码字  $Y_j$  的方差,  $X_1$  为  $X$  的第一维分量,  $Y_{j1}$  为  $Y_j$  的第一维分量。判断不等式  $D_2 \geq D_{\min}$  是否成立,若成立,则排除码字  $Y_j$ ,否则进入训练子矢量数据矢量量化阶段步骤 12 进行下一步判断。

[0091] 步骤 12 :PDS 搜索 :

[0092] 1.1 令变量  $q = 2$  ;

[0093] 1.2 计算  $X$  与码字  $Y_j$  的累积失真  $D_q(X, Y_j) = \sum_{k=1}^q (X_k - Y_{jk})^2$ ,  $k$  表示第  $k$  维分量 ;

量 ;

[0094] 1.3 判断不等式  $D_q(X, Y_j) \geq D_{\min}$  是否成立,若成立则排除码字  $Y_j$ ,转入训练子矢量数据矢量量化阶段步骤 13 ;否则执行  $q = q + 1$ ,转入下一步 ;

[0095] 1.4 判断  $q \leq m$  是否成立,  $m$  表示  $TT$  中行矢量的维数,若成立则转入训练子矢量数据矢量量化阶段步骤 12 中的 b) 继续判断 ;否则认为  $Y_j$  为  $X$  对应的新的失真最小的码字,即最匹配码字,并把  $X$  对应的码字索引更新为  $I(i) = j$ ,把  $X$  对应的最小失真  $D_{\min}$  更新为  $Y_j$

和  $X$  之间的欧式距离  $D_{\min} = d(X, Y_j) = \sum_{k=1}^m (X_k - Y_{jk})^2$ 。

[0096] 步骤 13 :判断是否  $W$  中的码字都已经比较完毕,若完毕则转入下一步 ;否则转入训练子矢量数据矢量量化阶段步骤 10。

[0097] 步骤 14 :将  $X$  划分到对应的胞腔  $I(i)$  中,即把  $X$  对应胞腔  $I(i)$  的训练矢量之和变量  $\text{Sum}(I(i), :)$  更新为  $\text{Sum}(I(i), :) = \text{Sum}(I(i), :) + X$ ,同时把  $X$  对应胞腔的训练矢量个数变量更新为  $\text{Count}(I(i)) = \text{Count}(I(i)) + 1$ 。

[0098] 步骤 15 :判断是否当前训练矢量数据  $TT$  中的行矢量都已经训练完毕,若训练完毕则本轮迭代结束,更新码书  $W$ ,以各胞腔的质心代替原来胞腔对应的码字,即更新  $W$  为  $W(k, :) = \text{Sum}(k, :) / \text{Count}(k)$ ,  $k \in \{1, 2, \dots, N_1\}$  代表第  $k$  个胞腔,然后转入下一步 ;否则转入训练子矢量数据矢量量化阶段步骤 9。

[0099] 步骤 16 :判断迭代次数是否已经达到设定的次数  $\text{ite} = 10$ ,若已经达到则转入下一步 ;否则转入训练子矢量数据矢量量化阶段步骤 6 继续下一次迭代。

[0100] 步骤 17 :分别保存最后一次迭代产生的低维训练子矢量码书  $CLT$  和码字索引  $ILT$ 、中维训练子矢量码书  $CMT$  和码字索引  $IMT$ 、高维训练子矢量码书  $CHT$  和码字索引  $IHT$ 。

[0101] 尾部子矢量数据编码阶段 :

[0102] 步骤 1:直接将 ILT 作为低维尾部子矢量数据编码索引,按照 ILT 将 TailL 中所有行矢量分配到各个胞腔中,以各胞腔的质心作为码字,得低维尾部子矢量码书 CLTail。

[0103] 步骤 2:直接将 IMT 作为中维尾部子矢量数据编码索引,按照 IMT 将 TailM 中所有行矢量分配到各个胞腔中,以各胞腔的质心作为码字,得中维尾部子矢量码书 CMTail。

[0104] 步骤 3:直接将 IHT 作为高维尾部子矢量数据编码索引,按照 IHT 将 TailH 中所有行矢量分配到各个胞腔中,以各胞腔的质心作为码字,得高维尾部子矢量码书 CHTail。

[0105] 码书连接整理阶段:

[0106] 步骤 1:直接将 CLT 作为前 8 维分量,CLTail 作为后 24 维分量,连接成低维部分 Hadamard 变换域完整码书 CLw(N<sub>1</sub>, 32)。

[0107] 步骤 2:直接将 CMT 作为前 16 维分量,CMTail 作为后 48 维分量,连接成中维部分 Hadamard 变换域完整码书 CMw(N<sub>2</sub>, 64)。

[0108] 步骤 3:直接将 CHT 作为前 32 维分量,CHTail 作为后 96 维分量,连接成高维部分 Hadamard 变换域完整码书 CHw(N<sub>3</sub>, 128)。

[0109] 步骤 4:将 CLw、CMw、CHw 分别进行离散度反排序、Hadamard 反变换得到低维空域最终完整码书 CLept、中维空域最终完整码书 CMept、高维空域最终完整码书 CHEpt。将 ILT 直接作为低维空域最终码字索引,将 IMT 直接作为中维空域最终码字索引,将 IHT 直接作为高维空域最终码字索引。压缩结束。

[0110] 只需分别打包 CLept 和 ILT,CMept 和 IMT,CHEpt 和 IHT 进行传输。在接收端只需按照 ILT 将 CLept 中的码字排列起来得到 BL\_Re,按照 IMT 将 CMept 中的码字排列起来得到 BM\_Re,按照 IHT 将 CHEpt 中的码字排列起来得到 BH\_Re。再将 BL\_Re 作为低维部分、BM\_Re 作为中维部分、BH\_Re 作为高维部分直接连接起来,得到空域最终恢复的矢量数据 B\_Re,最后经过维数变换即可得到恢复的三维高光谱图像数据块。

[0111] 高光谱图像的压缩性能主要用峰值信噪比 (PSNR, 单位: dB)、信噪比 (SNR, 单位: dB)、压缩比 (CR)、以及计算复杂度三个指标来进行评价,这 3 个指标的具体计算方式如下:

[0112] ① PSNR 计算公式:

$$[0113] \quad PSNR = 10 * \log_{10} \left( \frac{(Peak\ signal)^2}{MSE} \right) (dB)$$

[0114] 其中, Peaksignal 表示原高光谱图像所有像素值中的最大像素值, MSE 表示整个高光谱图像的均方误差;

[0115] MSE 计算公式:

$$[0116] \quad MSE = \left( \sum_{i=1}^{row} \sum_{j=1}^{col} (B(i, j) - B\_Re(i, j))^2 \right) / Pixel\_Count$$

[0117] 其中, B 是原始矢量数据矩阵, B\_Re 是压缩后恢复的矢量数据矩阵, Pixel\_Count 表示原高光谱图像的像素总个数, row 和 col 分别表示 B 的总行数和总列数。

[0118] ② SNR 计算公式:

$$[0119] \quad SNR = 10 * \log_{10} \left( \frac{Power\_Aver}{MSE} \right) (dB)$$



[0120] 其中, Power\_Aver 表示原高光谱图像的平均功率, MSE 表示整个高光谱图像的均方误差;

[0121] Power\_Aver 计算公式:

$$[0122] \quad Power\_Aver = \left( \sum_{i=1}^{row} \sum_{j=1}^{col} B(i, j)^2 \right) / Pixel\_Count$$

[0123] 其中, row 和 col 分别表示原矢量数据矩阵 B 的总行数和总列数。

[0124] ③ CR 计算公式:

[0125]

$$CR = \frac{Pixel\_Count \times 16}{(N_1 \times m_1 \times 16 + N_2 \times m_2 \times 16 + N_3 \times m_3 \times 16) + row \times (\log_2(N_1) + \log_2(N_2) + \log_2(N_3))}$$

[0126] 其中, Pixel\_Count 表示原高光谱图像的像素总个数,  $N_1$  为低维部分矢量数据的码书尺寸,  $N_2$  为中维部分矢量数据的码书尺寸,  $N_3$  为高维部分矢量数据的码书尺寸,  $m_1$  为恢复的低维部分矢量数据 BL\_Re,  $m_2$  为恢复的低维部分矢量数据 BM\_Re,  $m_3$  为恢复的低维部分矢量数据 BH\_Re, 每个像素值用 2 个字节即 16bit 存储, row 表示原矢量数据矩阵 B 的总行数, 即矢量总个数。

[0127] ④ 计算复杂度计算公式:

[0128]

$$\text{计算复杂度} = \frac{ComputeCount_i}{Vector\_Count \times ite} \quad (i \in \{1, 2, 3, 4\})$$

[0129] 其中, ComputeCount<sub>1</sub> 表示比较计算 (com) 总次数, ComputeCount<sub>2</sub> 表示乘法计算 (×) 总次数, ComputeCount<sub>3</sub> 表示加法计算 (±) 总次数, ComputeCount<sub>4</sub> 表示开平方计算 (sqrt) 总次数, ite 表示编码中训练过程的迭代次数, Vector\_Count 表示原矢量数据矩阵 B 中的矢量个数。

[0130] 以高光谱图像 Lunar Lake 和 Cuprite 的第一场景的部分数据作为仿真测试数据, 设置迭代次数 ite = 10 次, 其他参数设置相同, 通过以上四个评价指标对 LBG 方法、矢量维数分割量化的超光谱图像压缩方法和本发明方案进行了实验对比, 实验结果如下:

[0131] 表 1 列出了 Lunar Lake 图像经过 3 种方法处理后的压缩质量比较; 表 2 列出了 Cuprite 图像经过 3 种方法处理后的压缩质量比较; 表 3 列出了 Lunar Lake 图像经过 3 种方法处理后的计算复杂度; 表 4 列出了 Cuprite 图像经过 3 种方法处理后的计算复杂度; 表 5 列出了 Lunar Lake 图像经过 3 种方法处理后的计算量分析; 表 6 列出了 Cuprite 图像经过 3 种方法处理后的计算量分析。

[0132] 表 1. Lunar Lake 图像经过 3 种方法处理后的压缩质量比较

[0133]

基本码书尺寸	LBG 方法			统一码书方法			本文方案		
	PSNR (dB)	SNR (dB)	MSE	PSNR (dB)	SNR (dB)	MSE	PSNR (dB)	SNR (dB)	MSE
64	47.14	35.32	3168.3	49.26	37.45	1941.2	51.63	39.81	1128.7
128	48.63	36.81	2248.2	51.19	39.38	1245.5	53.27	41.46	772.1
256	49.99	38.17	1643.7	52.86	41.05	847.7	54.87	43.06	534.1
512	51.29	39.47	1218.5	54.34	42.52	603.7	56.31	44.50	384.5
1024	53.14	41.32	795.8	56.01	44.20	410.2	57.57	45.76	287.2

[0134] 表 2. Cuprite 图像经过 3 种方法处理后的压缩质量比较

[0135]

基本码书尺寸	LBG 方法			统一码书方法			本文方案		
	PSNR (dB)	SNR (dB)	MSE	PSNR (dB)	SNR (dB)	MSE	PSNR (dB)	SNR (dB)	MSE
64	48.48	36.79	1343.4	50.22	38.53	900.0	52.76	41.07	501.8
128	49.56	37.87	1045.6	52.15	40.46	576.1	54.43	42.73	341.9
256	50.78	39.09	791.0	54.01	42.32	375.5	55.78	44.09	250.5
512	52.26	40.57	562.3	55.62	43.93	259.3	57.02	45.33	188.2
1024	53.86	42.17	389.3	56.87	45.18	194.3	58.10	46.41	146.6

[0136] 表 3. Lunar Lake 图像经过 3 种方法处理后的各项计算量比较

[0137]

方法	基本码书尺寸	Lunar Lake 图像平均每个矢量每次迭代的各项计算次数(次)			
		Com	×	±	sqrt
LBG 方法	64	63	14336	28832	0
	128	127	28672	57440	0
	256	255	57345	114656	0
	512	511	114689	229088	0
	1024	1023	229379	457952	0
统一码书方法	64	371.4	386.8	1114.4	0.28
	128	548.3	458.2	1261.8	0.28
	256	885.6	592.9	1547.7	0.28
	512	1432.2	807.3	1993.9	0.30
	1024	2288.7	1143.5	2693.7	0.32
本文方案	64	246.5	98.0	408.0	0.55
	128	358.1	117.0	456.8	0.56
	256	537.9	145.6	532.1	0.57
	512	838.7	192.5	656.4	0.59
	1024	1335.9	267.7	858.3	0.60

[0138] 表 4. 图像经过 3 种方法处理后的各项计算量比较

[0139]

方法	基本码书尺寸	Cuprite 图像平均每个矢量每次迭代的各项计算次数(次)			
		Com	×	±	sqrt
LBG 方法	64	63	14336	28832	0
	128	127	28672	57440	0
	256	255	57345	114656	0
	512	511	114689	229088	0
	1024	1023	229379	457952	0
统一码书方法	64	476.3	434.2	1211.0	0.28
	128	790.9	565.0	1480.3	0.28
	256	1278.7	766.1	1895.0	0.28
	512	2069.5	1087.7	2559.7	0.30
	1024	3382.2	1611.2	3645.6	0.32
本文方案	64	248.9	100.6	413.1	0.55
	128	364.7	121.3	465.9	0.56
	256	564.5	156.3	555.5	0.57
	512	899.0	212.1	701.2	0.59
	1024	1457.5	301.8	938.3	0.60

[0140] 表 5. Lunar Lake 图像经过 3 种方法处理后的计算量分析

[0141]

其它方法	本文方案与其它方法的比较计算次数平均比值	本文方案与其它方法的乘法计算次数平均比值	本文方案与其它方法的加法计算次数平均比值	本文方案相比其它方法的开平方计算平均增加次数
LBG 方法	1.67	0.0018	0.0033	0.57
统一码书方法	0.60	0.2422	0.3661	0.282

[0142] 表 6. Cuprite 图像经过 3 种方法处理后的计算量分析

[0143]

其它方法	本文方案与其它方法的比较计算次数平均比值	本文方案与其它方法的乘法计算次数平均比值	本文方案与其它方法的加法计算次数平均比值	本文方案相比其它方法的开平方计算平均增加次数
LBG 方法	1.78	0.0020	0.0035	0.57
统一码书方法	0.44	0.2000	0.2849	0.282

[0144] 从实验结果可以看出：压缩质量方面，本文提出的压缩方案相比于其它两种方法（LBG 方法和统一码书方法），在不同基本码书尺寸下，压缩质量有不同程度的提升。以峰值性噪比指标为例。与 LBG 方法相比：Lunar Lake 图像最少提高 4.36dB 在基本码书尺寸为 1024 时，最多提高 4.90dB 在基本码书尺寸为 512 时，平均提高 4.62dB；Cuprite 图像最少提高 4.25dB 在基本码书尺寸为 1024 时，最多提高 5.00dB 在基本码书尺寸为 256 时，平均

提高 4.63dB。与统一码书方法相比:Lunar Lake 图像最少提高 1.49dB 在基本码书尺寸为 1024 时,最多提高 2.25dB 在基本码书尺寸为 64 时,平均提高 1.93dB ;Cuprite 图像最少提高 1.24dB 在基本码书尺寸为 1024 时,最多提高 2.54dB 在基本码书尺寸为 64 时,平均提高 1.85dB。总之,本文提出的压缩方案相比于 LBG 方法峰值信噪比平均提高 4.62dB,而和统一码书方法相比,峰值信噪比平均提高 1.89dB。从图 1 和图 2,高光谱图像压缩质量与压缩比关系中也就可以看出,在相同压缩比条件下,本文压缩方案的压缩质量明显优于其它两种方法。

[0145] 计算复杂度方面,本文提出的压缩方案相比于其它两种方法(LBG 方法和统一码书方法),在不同基本码书尺寸下,计算复杂度总体上有较大地降低。与 LBG 方法相比:Lunar Lake 图像和 Cuprite 图像的比较计算次数都略有增加,开平方计算次数平均增加 0.57 次,基本可忽略不计,但是本文方案的乘法计算次数平均仅为 LBG 方法的约 2/1000,加法计算次数平均仅为 LBG 方法的约 3/1000,计算复杂度的主要部分,乘法和加法计算次数得到大幅度减少。与统一码书方法相比:Lunar Lake 图像和 Cuprite 图像的比较计算次数平均为统一码书方法的约 1/2,开平方计算次数平均增加 0.28 次,基本可忽略不计,乘法计算次数平均仅为统一码书方法的约 1/5,加法计算次数平均仅为统一码书方法的约 3/10。总之,本文方案与 LBG 方法相比,比较计算略有增加,但是计算复杂度的主要部分,乘法计算和加法计算的次数都得到大幅度降低;本文方案与统一码书方法相比,比较、乘法和加法计算次数得到较大幅度减少。本文压缩方案的计算复杂度总体上明显低于其它两种方法。

[0146] 综上所述,本文提出的压缩方案,与 LBG 方法和统一码书方法相比较,在相同压缩比条件下,明显降低了计算复杂度,提高了恢复图像的质量。能更快速有效地实现高光谱图像更高质量的压缩编码。高光谱图像信息丰富、应用价值大,但波段数多、数据量巨大,本文提出的压缩方案计算量更少,压缩失真更小,且操作流程较简单,具有实际应用的价值,可以作为高光谱图像的一种完整的快速的有损、近无损压缩方案。

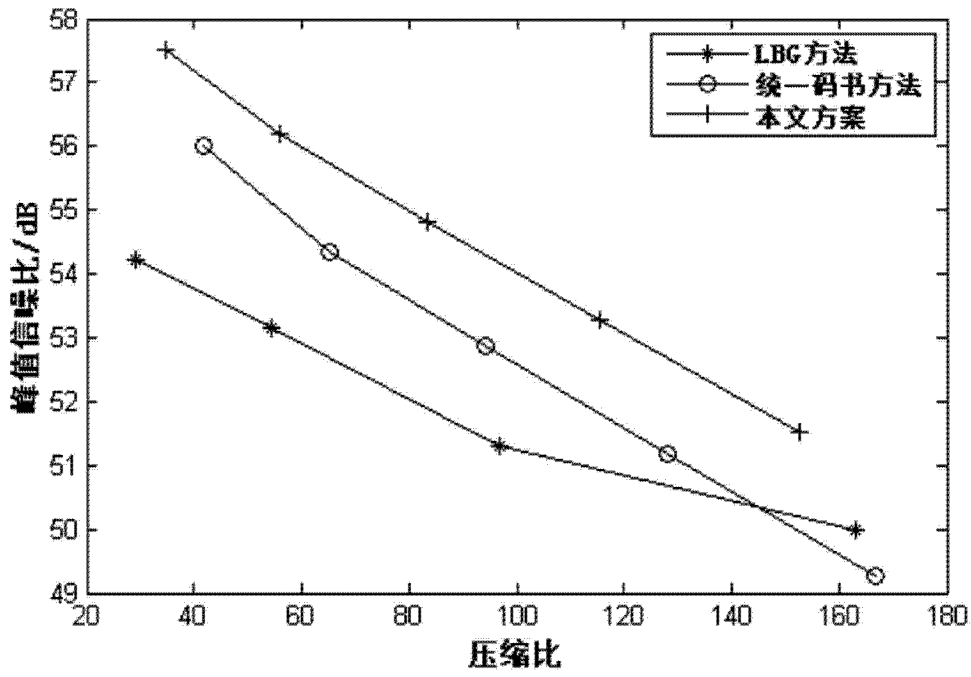


图 1

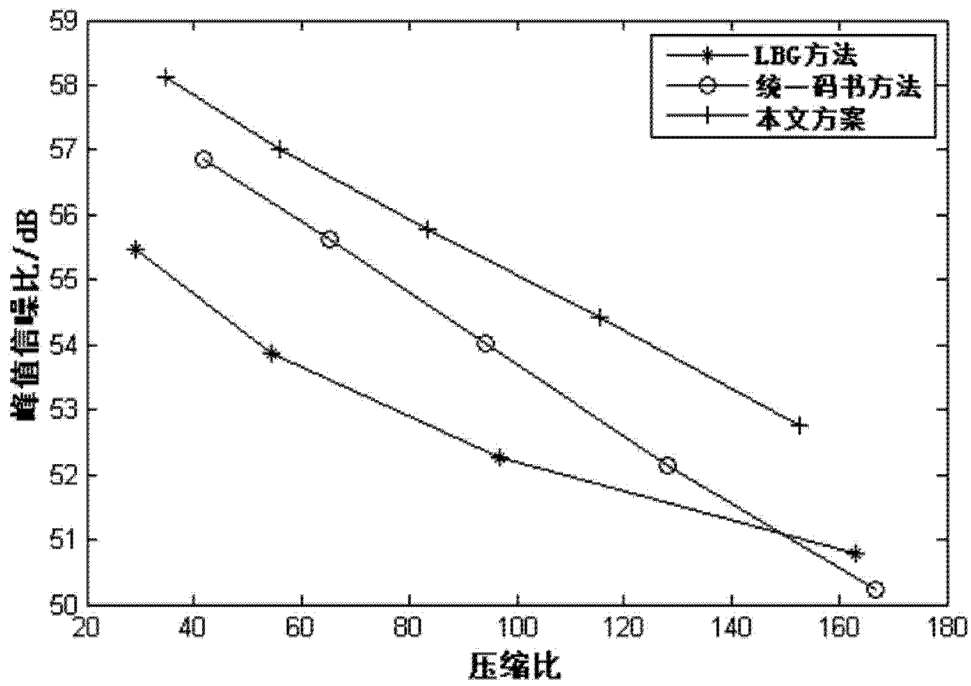


图 2

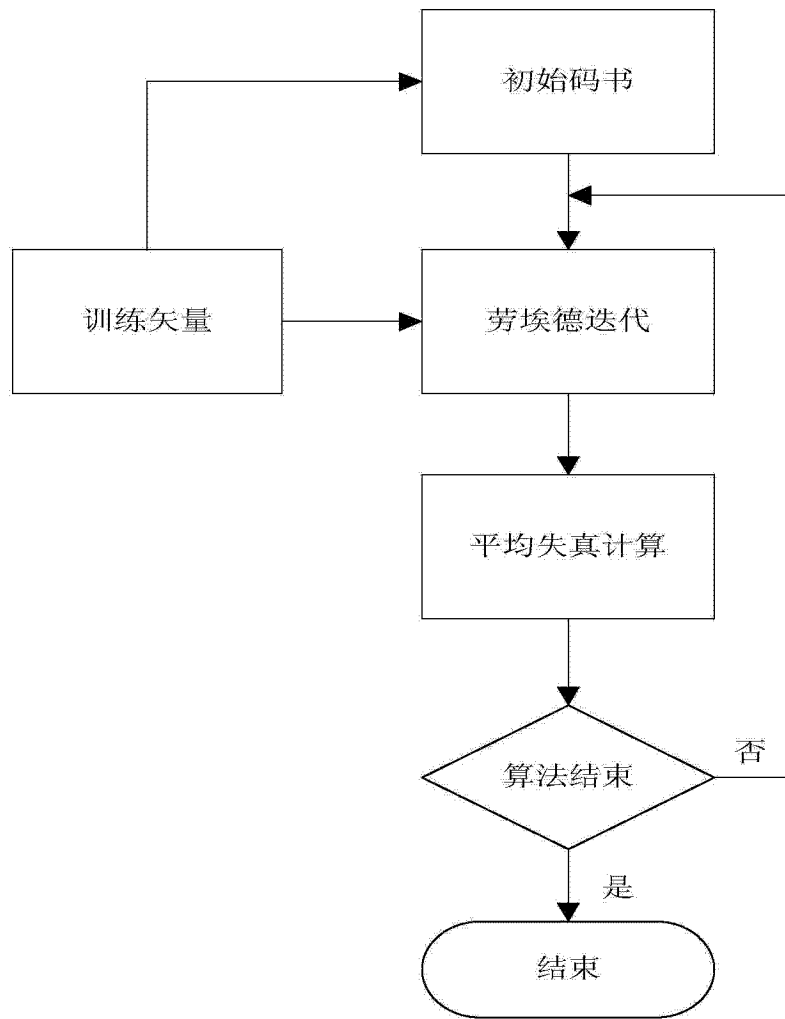


图 3

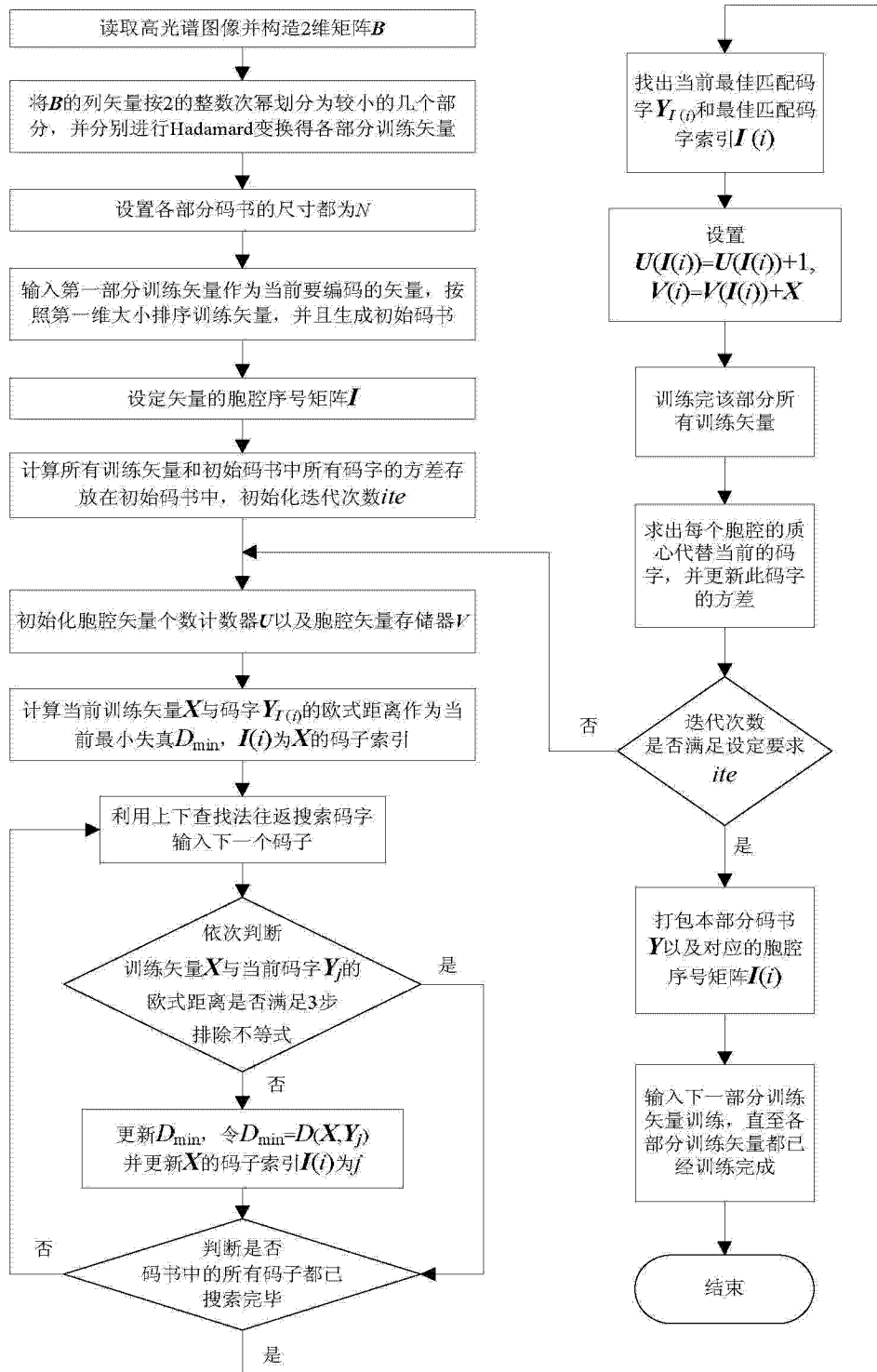


图 4

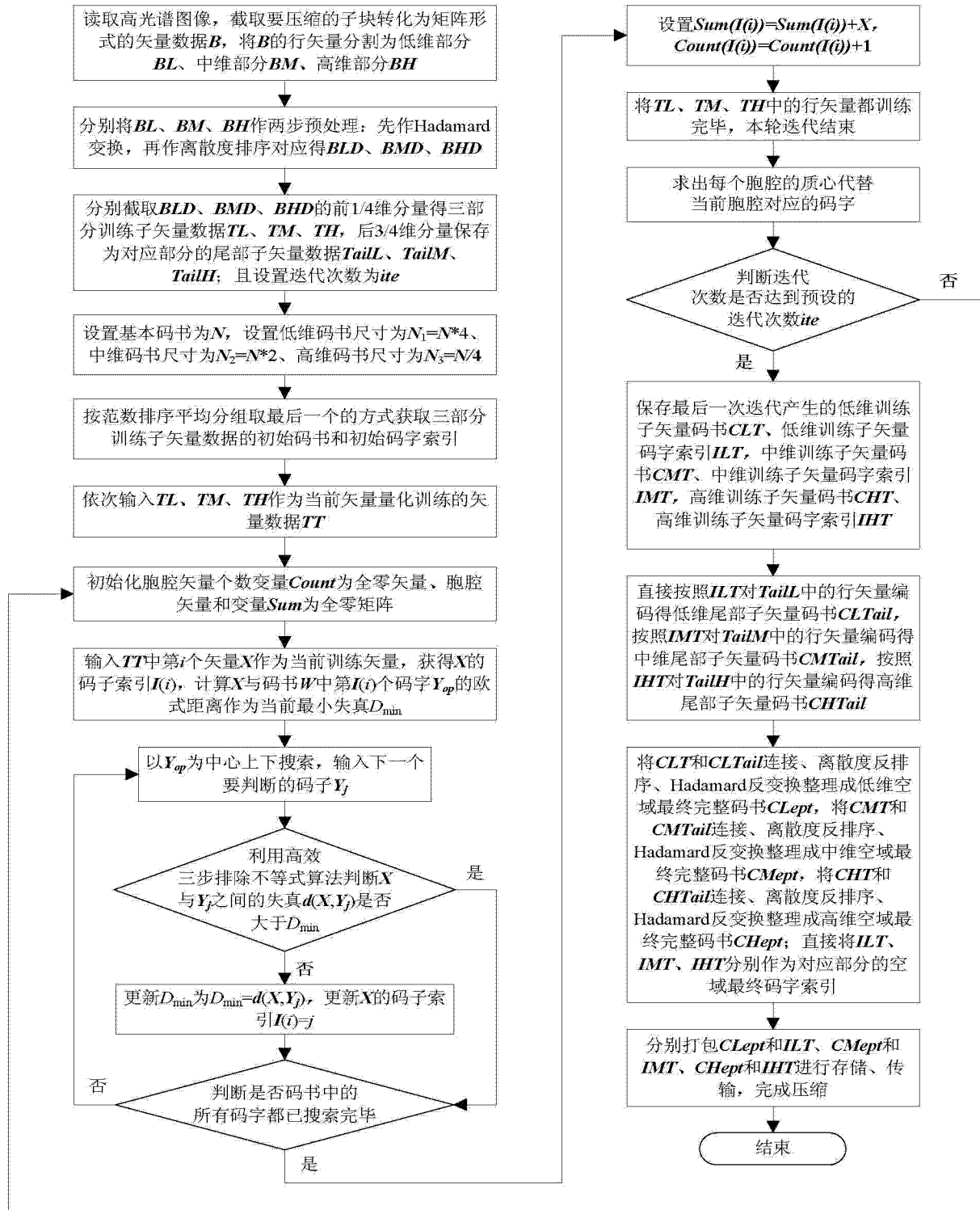


图 5