

超光谱影像的分布式信源编码压缩方法

何爱香¹⁾ 朱云华²⁾ 安 凯²⁾

¹⁾(山东工商学院信电学院,烟台 264005) ²⁾(山东航天电子技术研究所,烟台 264000)

摘 要 在超光谱影像压缩领域,目前还没有一个公认的标准或已成熟的压缩方法,分布式信源编码(DSC)是一种新出现的应用机制。通过论述超光谱影像压缩中DSC的概念和意义,回顾DSC的理论基础,系统地研讨了超光谱影像压缩中DSC的主要方法,最后给出了DSC应用于超光谱影像压缩的应用前景、发展现状和技术难点。

关键词 分布式信源编码 超光谱影像 无损压缩和有损压缩

中图法分类号:TP391;TP751.1 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2009)01-0045-07

Distributed Source Coding of Hyperspectral Image Compression

HE Ai-xiang¹⁾, ZHU Yun-hua²⁾, AN Kai²⁾

¹⁾(School of Information and Electronics Engineering, Shandong Institute of Business and Technology, Yantai 264005)

²⁾(Shandong Aerospace Electro-technology Institute, Yantai 264000)

Abstract As for hyperspectral image compression, there is no standard or mature paradigm and distributed source coding (DSC) is a new scheme. In this paper, first, the concept and significance of distributed source coding in hyperspectral image compression is introduced. Second, the theoretic foundation and implementation of DSC is reviewed. Third the predominant methods of applying DSC to hyperspectral image compression are systematically discussed, and the application outlook, the current development and the technical difficulties for this technique are pointed out.

Keywords distributed source coding, hyperspectral image, lossless and lossy compression

1 引 言

超光谱成像是一种新型遥感技术,具有较高的空间分辨率和光谱分辨率。随着超光谱成像光谱仪技术的不断进步,空间分辨率和光谱分辨率不断得到提高,图像数据量将成倍增长。例如,美国国家航空航天局(NASA)的机载可见光/红外成像光谱仪(AVIRIS)系统有224个光谱通道,谱分辨率为10nm,每个像素以16bits表示,数据量达到1Gb/s。超光谱影像的数据量巨大,在图像信息传送前必须对其进行高效压缩。由于遥感图像的信息十分宝贵,应尽可能采用无损压缩或近似无损压缩算法。由于在实际应用中,压缩过程要求在星上完成,星上能源供应是受限的,所以压缩算法的复杂度要尽量

低,以利于实现实时压缩。而且传输带宽资源也是有限的,所以要求编码效率要高,以便节省传输时占用的信道容量及存储时占用的存储容量,从而提高处理、传输与存储的效率。因此,研究超光谱影像的压缩编码具有重要的应用价值。

超光谱影像实际上是一种3维立体图像,即在普通2维图像的基础上又多了1维光谱信息,其波段数一般为几十到几百个。超光谱影像的特性与普通图像不同,首先是它具有丰富的纹理信息,空间相关性较弱;其次是具有普通图像所不具有的很高的谱间相关性。若采用传统的针对普通图像的压缩方法对各个波段的图像独立地压缩,虽然运算量小,对编解码器的配置要求也不高,但是,这种独立编码、独立解码的方式显然无法解析相邻波段图像之间的相关性,不能有效地去除冗余,从而不能取得很高的

收稿日期:2007-02-05;改回日期:2007-07-23

第一作者简介:何爱香(1979~),女,讲师,2005年于北京工业大学获硕士学位。主要研究方向为数据压缩,智能信息处理等。

E-mail:haxzyh@163.com

编码效率。要想有效去除谱间冗余,最有效的方式就是对超光谱影像进行联合编解码,如采用 3 维分级数的集分割(3D-SPIHT)算法或者 3 维基于上下文的无损图像编码(3D-CALIC)算法,但是这种编码方法要求在编码时,首先在编码端存储参考信息,其编码端计算量大,编码复杂度高,对星载编码器的处理能力、存储能力以及能源供应提出了较高要求。综合考虑,既要使编码运算简单,又要解析谱间冗余,分布式信源编码(DSC)就是满足这种要求的一种编码方式。DSC 是指对一组互相关联的信号编码,各个信号的编码是单独进行的,编码后的信号送到同一个解码器进行联合解码。这种编码方法大大降低了编码端的工作量,并且在编码时解析了信源之间的信息冗余,提高了编码效率,把编码端的复杂度转移到了解码端^[1-3]。当前,DSC 作为一种对一组互相关的信源编码的方法正日益受到信号处理研究人员的重视^[4-10]。本文回顾了 DSC 的基础理论,综述了 DSC 应用于超光谱影像压缩的主要方法,以及应用前景和目前的难点。

2 分布式信源编码的信息论基础

信源编码有两种方式,无损压缩和有损压缩。无损压缩是有损压缩的基础,有损压缩往往是在无损压缩的基础上附加一个量化器而实现的。Slepian-Wolf 理论和 Wyner-Ziv 理论分别是 DSC 无损压缩和有损压缩的理论依据。

Slepian-Wolf 理论阐述了仅在解码端存在参考信息的情况下对信源进行无损编码所能取得的编码效率问题^[2]。假定 X 和 Y 是两个互相关的离散无记忆信源, R_X 和 R_Y 表示 X 和 Y 的编码码率。如果对 X 和 Y 独立编解码,则总码率为 $R_{\text{tot}} = R_X + R_Y \geq H(X) + H(Y)$,如图 1(a)所示。如果对 X 和 Y 联合编码联合解码,则总码率为 $R_{\text{tot}} \geq H(X, Y)$,如图 1(b)所示。而图 1(c)中,两个编码器分别对 X 和 Y 编码,在解码端使用一个联合解码器解码。直观上会认为码率下限会高于图 1(b)的总码率,但是 Slepian-Wolf 理论证明了其编码效率的极限仍然是 $H(X, Y)$ 。由 Slepian-Wolf 理论,在以下条件满足时

$$R_X + R_Y \geq H(X|Y) \quad (1)$$

$$R_X \geq H(X|Y) \quad (2)$$

$$R_Y \geq H(Y|X) \quad (3)$$

互相关的两个信源 X 、 Y 可分别独立地以 R_X 和 R_Y 编码,使得解码端联合解码的差错概率任意小。换句话说,相对于联合编码而言,分布式编码并未造成性能的损失。

再看图 1(d),把 Y 作为无损压缩 X 的参考信息, Y 在不知 X 的信息的条件下以码率 $R_Y \geq H(Y)$ 编码。如果在编解码两端都可得到参考信息 Y ,那么由香农信息论可知, X 理论上的无损压缩极限是 X 在 Y 已知情况下的条件信息熵 $H(X|Y)$ 。对于只能在解码端得到参考信息的情况,Slepian-Wolf 理论指出, X 的无损压缩极限仍然是 $H(X|Y)$,即 $R_X \geq H(X|Y)$,与在编解码端都能获得参考信息的情况下所能取得的码率是一样的,即 $R_X + R_Y \geq H(Y) + H(X|Y) = H(X, Y)$ 。也就是说,只要知道 X 和 Y 的联合概率分布,编码器不需要得到参考信息就能够取得编解码端都有参考信息一样的编码效率。总之,图 1 的(b)、(c)和(d)可取得相同的编码效率,图 1(c)是对称分布式编码的情况,而图 1(d)是使用解码端参考信息的非对称分布式编码的情况。

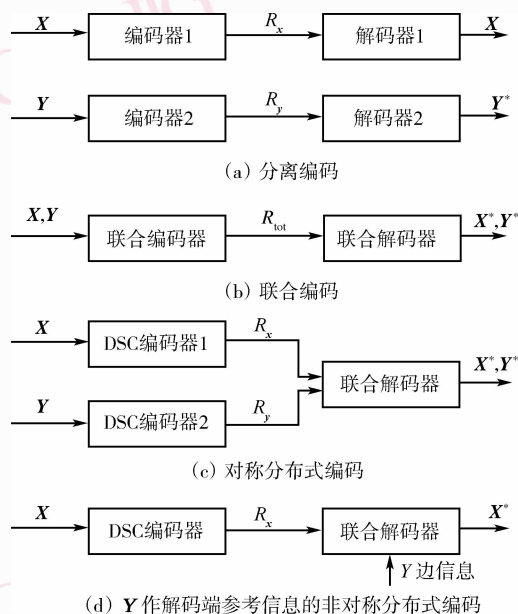


图 1 互相关信源 X 和 Y 的几种编码方案

Fig. 1 Coding schemes of correlated sources X and Y

DSC 联合解码器可如编码器那样有效利用 X 和 Y 之间的相关性。现有的大多数 DSC 方案利用这种相关性的方式都是采用“分级”技术,即信源码字空间的分割,把信源 X 的输出分成不同的组,称为陪集,这种划分使得每一陪集中的两个码字之间的最小距离尽可能大,同时保持陪集的对称性。编

码器只传输陪集的索引来达到数据压缩的目的。解码器搜索陪集,找到与参考信息最近的码字作为解码结果。显然,陪集的这种特性和信道码的特性十分相似,因而陪集分割和伴随式的编解码可以利用信道码来完成。

1976年 Wyner 和 Ziv 把 Slepian-Wolf 理论推广到了有损压缩领域。Wyner-Ziv 理论认为,有损压缩只在解码端可获得参考信息的情况下,可获得与在编解码两端都能获得参考信息的情况下相同的率失真^[3]。Wyner-Ziv 编码问题可看作是一个对码字的量化和 Slepian-Wolf 编码相结合的问题,如图 2 所示。

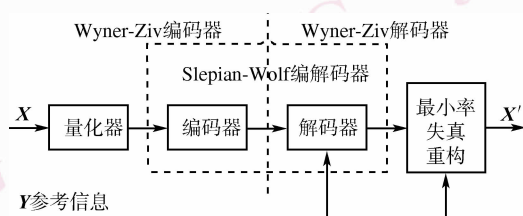


图2 Wyner-Ziv 编解码系统

Fig. 2 Wyner-Ziv codec

在量化部分中,设计一个量化器将信源码字空间分割成互不重叠的 2^{R_s} 个区间, R_s 是信源码的码字长度。对于每个区间选取一个代表码字,这组码字就构成了信源的码字空间。这样,所有的信源输出被量化成了码字空间中的一个码字。解码端的重构部分则是根据解码的码字和参考信息对解码输出重构估值。设量化后的信源码字空间为 U , 因为 X 与 Y 是密切相关的,故 U 和 Y 也是相关的,可在 U 和 Y 之间假想有一条虚拟信道 $P(Y|U)$, 信源码字空间为信道输入,而参考信息 Y 为信道输出。设信道码有 2^{R_c} 个码字, R_c 是信道码的码字长度,如果信源码字属于这组信道码,那么在解码端把参考信息 Y 看作是信源码字受信道噪声污染后的结果,这样就可利用信道码的纠错性能来恢复信源码字^[5,7]。

Wyner-Ziv 编码可以看成是一个信源信道联合编码的问题,量化部分和最小率失真重构部分是信源编码的内容,可以使用信号处理中的各种量化方法,如标量量化、网格量化等。量化后码字就构成了待分割的码字空间,在解码端的估计部分则根据码字和参考信息对编码做估值。图 2 中 Slepian-Wolf 编解码器可看成是信道编码部分,应当注意这里所进行的并不是信道编码,而是把信道码的原理应用

于信源编码。随着信道码渐进地接近信道容量, Slepian-Wolf 编码的效率渐进地接近 Slepian-Wolf 理论界限。

3 分布式信源编码的方案

虽然 DSC 理论早在 19 世纪 70 年代就已经提出,但是只给出了其编码的理论根据,并没有给出具体的实现方法。近年来,研究者开始寻找实现 DSC 的可行方法,发现了信源编码和信道编码的密切关系,如果信源编码能够渐进地接近信道容量,那么把它应用于 DSC 就能够渐进地接近 Slepian-Wolf 理论极限,人们开始把信道码的研究结果应用到 DSC 且已经取得了一定的效果,其中,Pradhan 等人提出的 DISCUS (distributed source coding using syndromes) 方案具有重要的意义^[5]。大多数 DSC 方案都建立在 DISCUS 方案的基础上。DISCUS 使用网格编码调制的信道码来分割信源,通过把信源编码为其所在信道码的伴随式取得压缩效果。

其中,信源码字的陪集分割是一个关键问题,要使得分割之后各个陪集内的码字之间的距离尽可能远。这样,解码器才能够在解码端通过观察参考信息 Y 在陪集中找到距离参考信息最近的码字作为解码结果。而这种陪集码的特点正好跟信道码符合。假定信源 X 和 Y 是二值符号串,分组长度设定为 n 。 X 的 2^n 个码字可以划分为 2^{n-k} 个陪集 C_i , $i = 1, \dots, 2^{n-k}$, 每个陪集包含 2^k 个元素,选择 k 满足

$$\frac{n-k}{n} \geq H(X|Y) \quad (4)$$

编码 X 传输的是 X 所属陪集 C^* 的索引,这只要 $n-k$ 个比特就足够了,从而节省了 k 个比特。解码时,联合解码器把 C^* 中的元素与参考信息 Y 进行比较,并挑选 C^* 中最接近 Y 的元素作为 X^* 的估计。随着 $n \rightarrow \infty$, $P(X \neq X^*) \rightarrow 0$, 从而获得完美的无损压缩效果,而设计这样的陪集码需要 $H(X|Y)$ 的先验知识。上述陪集码正好与 (n, k) 信道码相似,后者是所有码长为 n 的 2^n 个序列中的 2^k 个序列,这 2^n 个序列中共有 2^{n-k} 组性能相同的信道码。每组性能相同的信道码组成一个陪集,陪集索引对应着该组信道码的伴随式。这样,信源码字分割就可看成是在所有码长为 n 的码字序列中选取距离尽可能大的 2^k 个序列。而每个信道码都有一个生成

矩阵 G 和一个校验矩阵 H 。在编码过程中,只要把待编码的码字看作上述码长为 n 的码字序列中的一个元素,然后找出该码字所在的信道码,再传输该组信道码的索引,信道码的索引就是该组信道码的伴随式,因此可以利用公式 $S = CH'$ (S 为伴随式, C 是码长为 n 的码字序列, H' 是校验矩阵 H 的转置)求得伴随式,然后把伴随式传输到解码端。在解码端,接收到的编码码字所属的陪集的伴随式 S ,并且有参考信息 Y ,解码的任务就是在伴随式 S 所指示的信道码中找到与参考信息 Y 距离最近的码字,可以利用信道码的解码工具来进行搜索。即把参考信息看成是信道码被信道污染后的信号,利用信道解码来恢复原始信源码字。

Turbo 码和低密度奇偶校验 (LDPC) 码是目前最先进的信道码,最近提出了许多应用 Turbo 码和 LDPC 码的 Slepian-Wolf 编码方案^[4,6,8,9,11,12],这些方案都是以伴随式 DISCUS 方案为基础的。目前利用信道码对分布式信源编码的研究在不断发展之中。

4 遥感图像的分布式信源编码

4.1 应用前景

DSC 可应用到那些包含多个信息源的系统,也可用于只有一个信息源但可分成多个相关子信源的系统。遥感图像系统的多个处理阶段都存在着相关性。因此, DSC 在遥感图像压缩领域具有可观的应用前景。下面用图 3 详述 DSC 在遥感图像压缩的潜在应用。图 3 是遥感系统的数据成像和存储传输

系统的简图。遥感卫星携带一组不同的遥感器,如采集信号 X_1 的光学遥感器,采集信号 X_2 的合成孔径雷达,等等。传输系统把遥感器采集到的数据向下传到地面站。地面站接收和存档系统存储之前由光学仪器、SAR 等遥感器获取的各种图像 W , Z 和 V 。

超光谱遥感图像压缩采用 DSC 方式的应用前景主要有^[13]:

(1) DSC 可以实现计算复杂度由编码端向解码端的转移,把复杂计算从遥感平台转移到位于地面站的解码器上进行;在有限的传输带宽和传输功率下,实现高效的数据压缩;对于由信道传输错误造成的丢包具有健壮性。卫星遥感平台的电源供应是受到限制的,因此,一般只能采用压缩效率不高但相对简单的技术以满足能耗要求,特别是为了减少星上处理的计算量和存储量,通常没有去除谱间冗余。如果利用 DSC 在编码端对各波段图像独立进行 2 维压缩,而在解码端利用其波段之间的相关性联合解码,则有可能获得与 3 维压缩相同的编码效率,还通过把系统大部分计算量转移到解码端降低星上压缩的复杂度。另外,由于编码端不必执行 3 维解相关,在有多个处理单元的情况下可实现编码过程并行化,在性能不降低的条件下可大大减小延时。

(2) DSC 可以利用新获取图像和存档图像的相关性。遥感卫星收集的数据量通常非常巨大,由于功率效率的原因,只有卫星和地面站在视线内才可以进行数据传输,因而可用传输时间非常少。使用传统压缩算法不能从根本上解决这个问题,然而以 DSC 的角度看,要压缩的图像与以前获取的同一地物的保存在地面站图库的图像是相似的。因此,利用它们之间的相关性设计的 DSC 压缩算法可使得卫星只需传送表示新图像和存档图像间的差别的新数据,比传送新图像所有信息数据要经济得多,从而可显著降低所需下行链路比特率,节省带宽,即可以在相同的时帧内传送更多的图像。从图 3 看, DSC 可以利用信源 X_1 与其地面站存档图像 W_1 或 Z_1 之间的相关性。

(3) DSC 可利用多模态图像的相关性。例如,就环境卫星系统 (ENVISAT) 而言,不同的仪器设备 (例如星载 SAR 和光学相机) 获取的图像的相关性也可通过 DSC 加以利用,从而节省数据传输的比特速率,而不致引入有关的计算开销。从图 3 看, DSC 利用的是 X_1 和 X_2 的相关性。

(4) DSC 可减少图像存档所需的存储空间。在

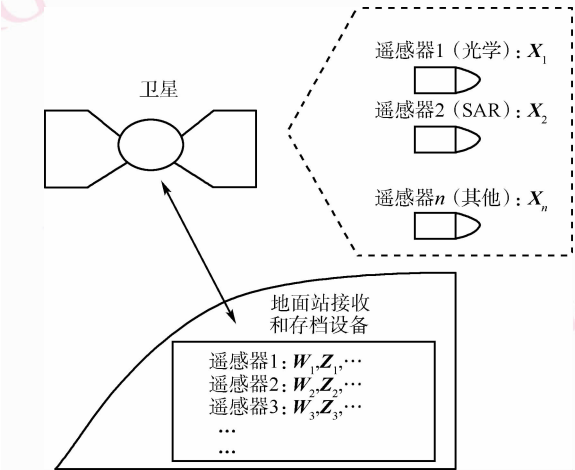


图 3 可应用 DSC 的遥感系统的组成结构
Fig. 3 Several elements of a remote sensing system to which DSC can be applied

遥感影像库中,不同时间获取的同一地物的多幅图像一般都保存下来。为减小存储需求,可利用 DSC 设计一种地面站压缩系统。这种系统中一幅地物图像以全比特率压缩,而与之相关的图像使用 DSC 原理以较低的比特率编码。对图像解码时,解码器使用其他相关图像作为参考信息以去除压缩图像的模糊歧义性。这样可显著降低存储需求,减小存档系统的运营成本。在编码过程利用这种相关性不需要对图像进行实际的“比较”,因而不会导致存档系统额外的计算负担。从图 3 看,DSC 利用的是 W_1 和 Z_1 的相关性,以及它们与 W_2 和 Z_2 等的相关性。

4.2 发展现状

当前的 Slepian-Wolf 编解码器大多数都是从信道编码的观点发展而来的,近年大量的针对 DSC 的复杂信道编码技术被提出。普遍被看好的是使用 Turbo 码、LDPC 码或 IRA (Irregular repeat-accumulate) 码的 DSC 机制。这些机制结合传统的数据压缩技术被应用到了超光谱遥感图像的压缩研究之中,目前国内这方面的研究极少,而国外的研究主要集中在用 DSC 方式降低遥感图像星上压缩处理的复杂度方面^[14-19]。

预测方法是最古老也是最成功的压缩方法之一,是无损压缩的一个重要发展方向。研究预测方法的 DSC 方式有望获得较好的遥感图像压缩性能。基于上下文的自适应无损图像编码 (CALIC) 算法是目前无损压缩效率最好的算法之一^[20],JPEG 专家组把 CALIC 作为 JPEG 无损压缩标准的候选算法^[20,21]。文献[15]研究了应用 2D-CALIC 算法如何进行超光谱影像 Slepian-Wolf 编码的问题,提出了一种名为 DSC-CALIC 的超光谱影像压缩算法。编码时,DSC-CALIC 算法先用 CALIC 生成预测残差,去除图像的空域相关性,接着根据前一波段图像的残差估计需要对残差值分解的位平面个数,对每个位平面采用基于 LDPC 码的 Slepian-Wolf 编码,即由图像的条件熵选用合适码率的 LDPC,把位平面的伴随式写入压缩文件传输到解码端。解码时,由前一波段的图像解析当前波段图像的参考信息,然后与收到的伴随式组合起来用可信度传播算法译码恢复当前波段的图像数据。DSC-CALIC 算法的编码效率好于 2D-CALIC 和 JPEG 无损或近无损图像压缩新标准 (JPEG-LS) 等 2 维压缩算法^[22],但是比 3D-CALIC 要差,编解码复杂度也比较高。不过,通过优化 LDPC 码的奇偶校验阵可降低编码复杂度。

另外,DSC-CALIC 在编码端假定信源条件熵 $H(X|Y)$ 是已知的。

基于像素的超光谱影像分布式压缩方法因运算简单也在最近受到重视^[13,16]。文献[16]提出了使用简单多值标量码 (multilevel scalar code) 的 DSC 压缩方案,称为标量 DSC (s-DSC)。编码时,编码器把图像分割成大小为 $n \times m$ (例如为 16×16) 的互不重叠的像块,对每个像块分别估计其与参考信息 (前一波段图像相应像块) 的相关噪声,以此确定需要保留的低有效位 (LSB) 比特个数 k 。像素的 k 个最低位可以看成是其所属陪集的索引,写入压缩文件;每个陪集都由具有 k 个相同最低位的灰度级形成,其余的高有效位 (MSB) 则是像素所属码字的标识,在编码端丢弃。为了保证解码端图像能无损重构,在编码后的数据附加循环冗余校验 (CRC) 码。解码器尝试多个预测器,从参考信息中恢复当前像素可能的 MSB,这些 MSB 与保留的 LSB 组合起来计算 CRC 码,如果其值与压缩文件中的 CRC 序列相同,则获得了无损重构。

s-DSC 算法是按像素处理的,即传输每个像块像素的若干个低位,高位通过解码端获得的参考信息恢复,编码简单,编码效率甚至可与 DSC-CALIC 媲美。文献[23]在 s-DSC 的基础上提出了一种新的算法向量 DSC (v-DSC)。v-DSC 使得信源码字陪集中两个元素间的最小距离增加,因而抵御相关性噪声的能力比标量码要强。陪集索引由两部分组成,前一部分是直接保留像块 $k-1$ 个 LSB 位平面获得的,而后一部分是对像块第 k 个位平面用 BCH (bose chaudhuri hooquenghem) 码进行信道编码获得的伴随式。解码时与标量编码基本相同,只是第 k 个位平面是通过把伴随式以及参考信息组合起来用 BCH 解码算法获得的。虽然 v-DSC 的编码效率比 s-DSC 略有提高,但是其编码和解码的计算量都大大增加。对 AVIRIS 的几幅地物图像的压缩实验表明,s-DSC 和 v-DSC 编解码器的比特率比 JPEG-LS 和 2D-CALIC 节省约 1bpp,而比 3D-CALIC 多约 1bpp。另一方面,s-DSC 编码的计算时间大约分别是 3D-CALIC 的 $1/10$,2D-CALIC 的 $1/5$,JPEG-LS 的约 2 倍,而其解码计算时间是后 3 种算法的好几倍。

变换是传统遥感图像压缩中的重要方法之一,而小波变换是该领域内最活跃的方法。遥感图像压缩中基于小波变换的 DSC 编码方式也正在研究中,

文献[19]研究了基于小波的超光谱影像的 Wyner-Ziv 压缩方案,对小波变换后的系数使用 SPIHT 算法提取位平面,第一波段的位平面进行谱内编码和解码,并作为联合解码器的参考信息。由于相邻波段图像的位平面是相关的,接着使用基于 LDPC 码的 Slepian-Wolf 编码方法对其他波段的相应位平面进行谱间编码,而在解码端用和积算法联合解码。该算法对某些 AVIRIS 波段图像的压缩效率比单独使用 SPHIT 算法有较大改善,还支持图像数据的多级重构和累进传输,但是编解码复杂度都比单独 SPHIT 算法要高。文献[19]提出了一种基于集合论的超光谱影像的 Wyner-Ziv 编码算法,该算法的性能比现有的谱内有损压缩方法(如 JPEG2000)要差。

4.3 需要解决的主要问题

现有的大多数 DSC 算法是基于高斯平稳信号设计并检验的,仿真实验结果与 Wyner-Ziv 界的差距还不到 1dB,然而由于模型与实际情况不符,在实际图像压缩应用中会导致性能损失。DSC 应用于超光谱影像压缩需要解决的技术难题主要有以下几点:

(1)实际图像数据是非平稳信号,把现有信道码应用到这种非平稳信号有两种方法。一种方法是把数据分割成大分组,使用纠错能力接近信道容量的信道码。但这些信道码是针对白色平稳信道设计的,用于实际非平稳信道会导致性能下降;另一种方法是把数据分割成小分组,可使联合解码器在搜索合适的参考信息时具有更强的“适应性”,但是使用的信道码性能相对较差。此外,实际的图像信号不是平稳信号,也不是高斯分布信号,在 Wyner-Ziv 理论框架下,要求 X 与 Y 间的差异信息满足高斯分布且独立于 $Y^{[5]}$,对于 Slepian-Wolf 编码来说,联合编码和分布式编码的等价性不取决于信号的分布。

(2)大多数信道码是针对二值数据优化的,虽然通过把数据分割成多个位平面可用于 16 位数据(大多数超光谱数据都是这种数据,对每个位平面都应用二值码),但是这种方法不能利用位平面间的相关性。虽然使用性能优越的多值码可以解决这个问题,但在现有信道码中几乎找不到这样的多值码。当然,在信道解码器的概率模型中考虑位平面间的相关性也是一种可能的解决办法^[24]。

(3)DSC 理论指出联合编码与分布式编码等价的前提是编码端知道信源的条件熵 $H(X|Y)$ 。

$H(X|Y)$ 是一个很关键的统计参数,跟给定信源 X 和 Y 的分级(binining)方案有关(如式(4)所示)。 $H(X|Y)$ 用于确定如何精准地分割信源码字空间以便解码器能无错地恢复原始数据。如果 DSC 编码器知道 $H(X|Y)$,就会选择合适的码率,使得 X 的伴随式的比特率等于 $H(X|Y)$,若不知道 $H(X|Y)$ 就要一些别的机制来保证能够确定合适的码率。如何在编码端估计 $H(X|Y)$ 是 DSC 在超光谱影像压缩中面临的主要难题之一^[25]。

(4)Slepian-Wolf 编码和 Wyner-Ziv 编码都使用信道码,信源信号相关性很强时需要码率非常高的信道码,如码率为 0.99 的码。但性能好的高码率码基本上没有现成可用的,因为信道编码常采用的是中低码率信道码(如 1/2 或者 1/3 码率),这样就限制了 Slepian-Wolf 编码在实际应用的性能。另外,传统的纠错码是针对高斯白噪声信道设计的,待编码的遥感图像间的依赖关系通常会偏离了这种模型,需要寻找新的策略解决这个问题。

总的说来,DSC 技术在实际应用于遥感图像压缩时所遇到关键问题是相关性模型,因为不同波段图像的相关性噪声需要按照预先设计好的相关性级别进行分级,分级后的像块根据相关性在不同级别上应用相应的信道编码方法。遥感图像 DSC 技术的关键技术是信道编码,好的信道编码技术能在相关性信息不断变化的情况下仍保持高效性。

5 结 论

超光谱遥感图像数据量庞大,图像信息十分珍贵,要求在星上实现实时无损压缩或近无损压缩,需要采用压缩效率高的算法,同时算法的复杂度不能过高。若对超光谱影像使用 2 维压缩,则不能充分利用其谱间冗余,压缩效率低,对下行链路带宽形成很大压力,但若对超光谱影像采用 3 维压缩方法,比如 3D-SPIHT、3D-CALIC 及 3D-SPECK,又由于编码复杂度高、运算量大,处理时间长而对星上电源供应和处理器提出了过高要求。因此,如何平衡编码效率和编码复杂度之间的矛盾是当前超光谱影像压缩需要迫切解决的问题。分布式信源编码系统编码端运算简单,在解码端解析关联信号的冗余,可取得与联合编码相同的编码效率。虽然该技术的表现不一定能超越传统的 3 维压缩技术,但其编码器轻巧可并行化的特点非常适合超光谱遥感图像的压缩。

本文回顾了分布式信源编码的理论基础,总结了遥感图像压缩领域应用分布式信源编码的主要方法,以及应用的前景和仍待解决的主要难题。当前,对于超光谱遥感图像的分布式信源编码方式的研究还不是很成熟,在向实用化的发展过程中还有很多理论和工程方面的问题需要解决,超光谱遥感图像的分布式信源编码是一项非常具有实际意义和挑战性的工作,对于研发先进的遥感系统具有重要的意义。

参考文献 (References)

- Xiong Z, Liveris A, Cheng S. Distributed source coding for sensor networks[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2004, **21** (5): 80-94.
- Slepian D, Wolf J K. Noiseless coding of correlated information sources[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1973, **7**(19): 471-480.
- Wyner A, Ziv J. The rate-distortion function for source coding with side information at the decoder[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1976, **1**(22): 1-10.
- Liveris A D, Xiong Z, Georgiades C N. Distributed compression of binary sources using conventional parallel and serial concatenated convolutional codes[A]. In: Proceedings of IEEE Data Compression Conference[C], Piscataway, NJ USA, 2003: 193-202.
- Pradhan S S, Chou J, Ramchandran K. Duality between source coding and channel coding and its extension to the side information case[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, **5** (29): 1181-1203.
- Gastpar M, Dragotti P L, Vetterli M. On compression using the distributed Karhunen-Loeve transform[A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing [C], Montreal, Canada, 2004: 901-905.
- Pradhan S S, Ramchandran K. Distributed source coding using syndromes (DISCUS): Design and construction [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, **3**(49): 626-643.
- Garcia-Frias J, Zhao Y. Compression of correlated binary sources using turbo codes[J]. IEEE Communications Letters, 2001, **10** (5): 417-419.
- Yang Y, Cheng S, Xiong Z, *et al.* Wyner-Ziv coding based on TCQ and LDPC codes [A]. In: Proceedings of Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers [C], Pacific Grove, CA USA, 2003: 825-829.
- Wang H, Ortega A. Scalable predictive coding by nested quantization with layered side information [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing [C], Singapore, 2004: 1755-1758.
- Liveris A, Xiong Z, Georgiades C. Compression of binary sources with side information at the decoder using LDPC codes [J]. IEEE Communications Letters, 2002, **10** (6): 440-442.
- Cheung N M, Wang H, Ortega A. Correlation estimation for distributed source coding under information exchange constraints [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing [C], Genoa, Italy, 2005: 682-685.
- Magli E, Barni M, Abrardo A, *et al.* Applying Distributed Source Coding Principles to Remote Sensing Image Compression [A]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing [C], Seoul, Korea, 2005: 613-616.
- Tang X, Pearlman W A. Lossy-to-lossless block-based compression of hyperspectral volumetric data [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP) [C], Singapore, 2004: 401-404.
- Nonnis A, Grangetto M, Magli E, *et al.* Improved low-complexity intraband lossless compression of hyperspectral images by means of slepian-wolf coding [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing [C], Genoa, Italy, 2005: 829-832.
- Barni M, Papini D, Abrardo A, *et al.* Distributed source coding of hyperspectral images [A]. In: Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) [C], Seoul, Korea, 2005: 25-29.
- Tang C, Cheung N M, Ortega A, *et al.* Efficient inter-band prediction and wavelet-based compression for hyperspectral imagery: distributed source coding approach [A]. In: Proceedings of IEEE Data Compression Conference [C], Genoa, Italy, 2005: 156-160.
- Magli E, Olmo G, Quacchio E. Optimized onboard lossless and near-lossless compression of hyperspectral data using calic [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2004, **1** (1): 21-25.
- Li X. Distributed coding of multispectral images: a set theoretic approach [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing [C], Singapore, 2004: 3105-3108.
- Wu X, Memon N. Context-based, adaptive, lossless image coding [J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, **4**(45): 437-444.
- Wu X, Memon N. Context-based lossless interband compression-extending CALIC [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, **6**(9): 994-1001.
- Weinberger M J, Seroussi G, Sapiro G. The LOCO-I lossless image compression algorithm: Principles and standardization into JPEG-LS [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, **8** (9): 1309-1324.
- Magli E, Barni M. Performance Evaluation of Distributed Source Coding for Lossless Compression of Hyperspectral Images [A]. In: Proceedings of IEEE Data Compression Conference, [C], Genoa, Italy, 2005: 2408-2412.
- Cheng S, Xiong Z. Successive refinement for the Wyner-Ziv problem and layered code design [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, **8**(53): 3269-3281.
- Cheung N M, Wang H, Ortega A. Correlation estimation for distributed source coding under information exchange constraints [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing [C], Genoa, Italy, 2005: 682-687.