

机载遥感系统超光谱图像分层近无损压缩

张威¹ 田峰²

(北华大学计算机科学技术学院 吉林 132021)¹

(北京航空航天大学无人驾驶飞行器设计研究所 北京 100083)²

摘要 针对机载遥感系统超光谱图像实时压缩与传输的需求,分析了超光谱图像位平面的相关特性并设计了超光谱图像分层近无损压缩方案。高位采用防误码的DPCM去相关,依据图像复杂度实时调节压缩比以适应传输带宽;低位按一致性准则进行四叉树划分并取均值,均匀量化残差图像后进行编码,得到混合码流。算法简单有效,实际压缩比和预设压缩比差别不超过5%。压缩比接近10时,复原图像PSNR值大于33,高位位平面平均相似度不低于0.98。

关键词 图像压缩,图像分层编码,超光谱图像,压缩比调节,四叉树划分

中图分类号 TP391 文献标识码 A

Layered Near-lossless Compression Scheme of Hyper-spectral Image in Airborne Remote Sensing System

ZHANG Wei¹ TIAN Feng²

(Department of Computer Science and Technology, Beihua University, Jilin 132021, China)¹

(Research Institute of Unmanned Aerial Vehicle, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)²

Abstract For real-time compression and transmission of hyper-spectral image in airborne remote sensing system, a new layered near-lossless compression scheme was proposed according to the analysis of correlations among bit-planes. An error-prevention DPCM was used in spectral decorrelation of higher bit-plane, and then compression ratio control strategy was applied based on the complexity of residual image. Lower bit-plane was uniformly quantified after quadtree splitting and removing mean. The algorithm is easy to realize and can effectively control the compression ratio. The difference between the practical compression ratio and the setting compression ratio is less than 5%. The PSNR is bigger than 33 and the XSD of higher-bit reconstructed image is bigger than 0.98 when the compression ratio is about 10.

Keywords Image compression, Layered image coding, Hyper-spectral image, Compression ratio control, Quadtree splitting

1 引言

机载遥感系统运行成本低、实时性高、执行任务灵活,在地质勘测、农业、植被遥感、海洋遥感、环境监测等方面发挥了重要作用。机载超光谱仪获取的超光谱遥感图像由上百幅波长连续的谱段图像构成,根据各谱段图像可以观察探测目标的空间分布特征,而通过分析由像元各谱段属性所构成的光谱曲线则可以辨识目标,满足了精确鉴别地物类型、细分目标的需求。但是众多的谱段带来了海量数据,而且数据中存在着大量的冗余,因此根据具体的应用需求,对图像进行适当的近无损压缩是实现图像实时传输与处理的前提。

目前普遍采用的超光谱图像近无损压缩方法分为变换和预测两类。基于变换的压缩^[1-3]易于区分图像的轮廓特征和细节信息,许多渐进式编码通过采用提升方案在一定程度上减少了运算量,但总体上来说变换编码运算时间较长,在对体积、重量、功耗和实时性的要求较高的机载环境中不便应用。

和变换法比较起来,低复杂度的预测法更适于机载遥感系统。预测法的关键是采用合理的预测器。作者在文献[4]中设计了一种结合空间预测的二阶差分预测器。文献[5]提出了一种针对超光谱图像的非线性预测器,并通过划分边界像素和非边界像素来进行基于边界的上下文预测。此外,Zhang和Liu提出了一种基于自适应谱间重排序和带反馈的前向最近邻预测方法^[6]。Aiazzi等人提出基于单纯谱间预测的S-RLP和S-FMP无损/近无损压缩算法^[7]。以上算法在预测精度、运算实时性等方面都有一定的优势,但是在机载遥感中,传输压缩图像的通信带宽是固定的,而且压缩处理器的数据输入/输出速率恒定,即图像传感器以固定的速率向压缩处理器输入数据,输出的压缩数据也要通过恒定速率的信道传输。由于不同成像地物本身的类型等因素的作用,超光谱图像中不同区域的细节、纹理等会有很大的区别,因此图像的压缩比差别也很大。限于载机体重量等限制,系统输出缓冲器的容量有限,低压缩比的复杂图像对整个系统的压缩传输速率造

到稿日期:2011-09-26 返修日期:2012-02-20 本文受国家高技术研究发展计划(863计划)(2008AA121803)和吉林市科技支撑计划(201162501)资助。

张威(1974-),女,博士,副教授,主要研究方向为图像编码与传输,E-mail:zhangweijlc@yahoo.com.cn;田峰(1979-),硕士,工程师,主要研究方向为数字通信、数字图像处理与识别。

成了影响,甚至会有数据丢失的现象^[8],所以,根据具体的图像适时调整压缩比是设计实用机载遥感系统超光谱图像压缩算法的关键。

本文根据超光谱图像的位平面特性设计了一种机载遥感系统超光谱图像分层近无损压缩方案。该算法实现简单、实时性高,能够根据图像复杂度合理调整压缩比。

2 超光谱图像的位平面特性

对于灰度级为 2^n 的图像,像素值可以写成如下形式:

$$a_{n-1}2^{n-1} + a_{n-2}2^{n-2} + \dots + a_12^1 + a_02^0 \quad (1)$$

把图像中的每个像素都按照上式将系数提取出来,一幅分辨率为 n 的多值图像就变成了 n 幅二值图像,其中每一个二值图像称为一个位平面。不同位平面表达了图像的不同特征,高位位平面描绘了图像的基本轮廓,其中全 0 或全 1 的像块较多,图像存在较强的空间相关性;对于不同谱段图像,成像对象是同一地物,图像结构非常相似,故高位位平面的谱间相关度也极大。为了不影响图像质量,考虑近无损压缩策略时要保证高位的高保真度。低位位平面内像素值比较随机,谱间相关性和空间相关性都低于高位位平面,压缩效率明显低于高位,但由于表达的是图像的细节,因此可以在不影响图像分析的基础上适度加大低位压缩比以提高算法的总体效率。

3 压缩比可调的分层近无损压缩

首先按设定的相关系数阈值划分位平面。高位做简单分组后先进行组内 DPCM 求得差分图像,接下来对每组内的首波段做条块式 JPEG-LS^[9,10] 编码并计算像块复杂度,根据压缩比与误差容限 NEAR 的关系计算各像块压缩时的 NEAR 值供后续波段使用。低位压缩时先对第一波段按照一致性准则做二叉树划分,然后对所有波段用相同的划分模式去均值,得到的残差图像均匀量化后做 LZW 编码,这样就得到了混合码流。码流中除了包含压缩像素编码外,还有高位各分组大小、波段内条块的宽度、各个条块的误差容限和低位的二叉树划分模式等附加信息。算法基本过程如图 1 所示。

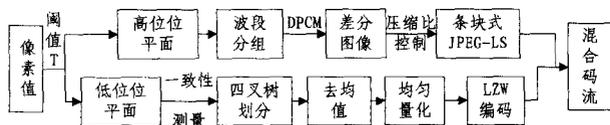


图 1 超光谱图像分层近无损压缩方案

3.1 高位压缩

对于谱间高度相关的高位位平面,简单的差分编码(DPCM)就可以去除大部分相关。设计谱间去相关公式如下:

$$\bar{x}_{i,j}^n = kx_{i,j}^{n-1} \quad (2)$$

式中, k 是高位位平面内像素均值之比, $x_{i,j}^n$ 表示第 n 波段 i 行 j 列的像素值, $\bar{x}_{i,j}^n$ 表示其空间预测值。为了避免非整数的灰度值,计算像素值时预测值统一取整后再求残差。

对第一幅图像和残差图像进行 JPEG-LS 编码, JPEG-LS 算法复杂度较低、易于硬件实现,在近无损模式下误差可调,所以可在一定程度上控制码率,这在通信带宽恒定的图像传输中显得尤为重要。通常遥感图像这类空间分辨率低的图像中大片灰度值平坦的区域很少,游程模式下容易出现短灰度

游程,需要频繁进行常规模式和游程模式的切换,这反而降低了编码效率,因此本文算法只保留了 JPEG-LS 的常规模式。

3.1.1 防误码扩散机制

上述编解码方式虽然简单,却带来了误码扩散问题,而且近无损压缩时即便没有误码产生,误差的累积效应也使得后续波段重建图像的质量大大降低,所以必须采取措施防止误码扩散。

为了减少误差累积, DPCM 预测前先进行波段分组,然后再以每个组内的第一波段为参考各组分别做 DPCM。分组以谱间相关度为依据,而且组内波段数不宜过多,鉴于超光谱图像相邻波段的相关度都很高,所以可以按照波段号直把相邻波段分为一组,如果待压缩的图像是随机选取的波段,则按下面的步骤简单分组。实验中把组内波段数的上限设定为 10,组内相关系数阈值 T 设定为 0.95,具体分组过程如下:

Step1 选取第一波段图像作为第一个待划分组的首波段,从其余波段中依次读取其他图像,测试其与现有各组的首波段图像的相关系数,不小于 T 则分为同组,否则新建分组;

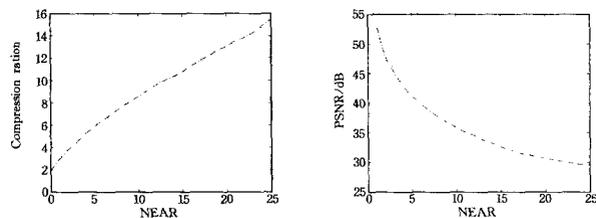
Step2 检测现有分组,如波段数大于 10 则结束该组的划分;

Step3 重复上述步骤直至所有波段划分完毕。

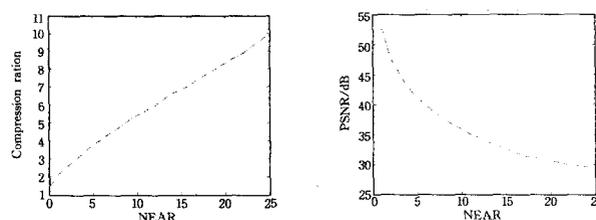
经过分组 DPCM,谱间的误差传递被控制在同一个分组内,但用 JPEG-LS 做谱内压缩时仍然利用上下文推测像素值,这一过程同样有误差传递的可能。为解决这个问题,对谱段内像素进行变相分组,即将像素划分为若干条块,把每一个条块看作一幅独立的图像,用 JPEG-LS 的常规模式单独做预测,然后再进行 Glomb 编码。条块的划分增加了算法的复杂度,也使得上下文预测的效率降低,但这却有效提升了编码系统的可靠性,在压缩比控制中,条块的划分也起到了重要作用。

3.1.2 压缩比控制

JPEG-LS 中提供了误差控制的办法,压缩前指定一个误差容限 NEAR,在压缩时忽略小于 NEAR 的像素误差,从而控制图像的压缩比。对 Lena 图像和测试超光谱图像 canal 的 191 波段采用不同的 NEAR 值进行压缩实验,结果如图 2 所示。



(a) Lena 图像压缩比与 NEAR 关系曲线 (b) Lena 压缩恢复图像 PSNR 与 NEAR 关系曲线



(c) 191 波段压缩比与 NEAR 关系曲线 (d) 191 波段压缩恢复图像 PSNR 与 NEAR 关系曲线

图 2 JPEG-LS 算法误差控制数据

可以发现,随着误差容限的扩大,图像压缩比基本呈线性

增长,而峰值信噪比 PSNR 却以近似指数级的速度在减小,这说明误差容限增大时重构图像的质量下降较快。和普通图像相比,在同样的误差容限下,超光谱图像的 PSNR 值较低,这是由于超光谱图像的纹理比较丰富,过大的误差值屏蔽掉了细节信息。因此要想对超光谱图像获得高质量的重建图像,压缩时就不能把误差值设得太大,但是这样做的一个直接后果就是压缩效率过低。其实,超光谱图像中并非所有区域都是灰度值变化频繁的边界、纹理,对于灰度变化相对平缓的区域适当放宽误差容限不会对图像质量有太大影响,所以如果能在压缩时根据图像的具体情况及时调整该上限值以控制码率,就能在保证重建图像质量的前提下取得高压缩比。但是在 JPEG-LS 中的 NEAR 是在压缩前就预设好的,压缩过程中无法动态修改,所以本文针对这一情况提出了一种实时调整码率的办法。

根据对多幅超光谱图像的压缩实验发现,当 NEAR 值超过 20 时,虽然可以达到较高的压缩率,但图像中的纹理信息基本都被平滑掉了,PSNR 下降到 30 以下,所以把 NEAR 的下限设定为 20。自适应调整分为以下几个步骤:

Step1 估测图像复杂度。

这里所说的复杂度是指图像的纹理复杂程度,纹理复杂度的判别基于这样的考虑:图像的纹理区像素值分布不均匀,所以相邻像素值之间的梯度较大,图像中不同方向的梯度和可以大致反映出图像的纹理复杂程度。因为本文算法在高位编码时用的是条块式 JPEG-LS,所以将纹理统计的基本单位定为一个条块,且在对第一波段图像做 JPEG-LS 编码时直接记录当前像素四邻域方向的梯度值,以 4 个梯度值的平均值作为最终的纹理复杂度评测函数。对于大小为 $m \times n$ 的图像条块, G_1 和 G_2 为行列梯度, G_3 和 G_4 为斜向梯度, G_t 为条块总体梯度平均值。

$$\begin{aligned} G_1 &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{n-1} \sum_{j=2}^n |x_{i,j}^n - x_{i,j-1}^n| \right) \\ G_2 &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{m-1} \sum_{i=2}^m |x_{i,j}^n - x_{i-1,j}^n| \right) \\ G_3 &= \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{n-1} \sum_{j=2}^n |x_{i,j}^n - x_{i-1,j-1}^n| \right) \\ G_4 &= \frac{1}{m-1} \sum_{i=2}^m \left(\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} |x_{i,j}^n - x_{i-1,j+1}^n| \right) \\ G_t &= \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 G_i \end{aligned} \quad (3)$$

Step2 根据图像复杂度,初步拟合 NEAR 与压缩比曲线。

对第一波段的图像分别进行无损压缩和 NEAR 值为 10、20 的压缩,计算压缩比,利用上述初值采用最小二乘法初步估计变化曲线,即

$$c_1 = a \times \text{NEAR} + b \quad (4)$$

采用式(3)分别计算该波段图像各个条块的复杂度 G_i 和总体复杂度 G ,计算 G 时将 m 、 n 值修改为整幅图像的边界,调整曲线为

$$c_2 = \frac{G_i}{G} a \times \text{NEAR} + b \times \frac{G}{G_i} \quad (5)$$

Step3 动态调整压缩比。

对超光谱图像的多个波段图像调整 NEAR 值进行图像压缩比与误差容限关系测试,发现各个波段的变化曲线基本一致。所以在压缩时按压缩比曲线计算 NEAR 的近似值,对除第一波段以外的其他波段的各个条块设置 NEAR 值做近

无损压缩。

经过两阶段的差错控制和动态压缩比调整,最终的高位输出码流由若干组波段的编码组合而成,每组编码格式为:

组内波段数,首波段条块 1 编码, ..., 首波段条块 n 编码,条块 1 误差 $\text{NEAR}_1, \text{NEAR}_2, \dots, \text{NEAR}_n$, 组内其余波段各条块编码。

3.2 低位压缩

将所有低位平面作为新的灰度图像统一压缩,利用二叉树划分来对图像进行自适应分块以找到图像中灰度分布一致的区域,对所有这样的区域用灰度均值来填充。

3.2.1 图像一致性判定

图像划分过程如图 3 所示,其中对像素分布的一致性判断像块内像素的起伏程度,即用均方误差(MSE)来衡量。当均方误差小于预设阈值时,表明像块内所有像素均匀逼近均值,此时的均值图像与原图像相比边界效应不明显,所以不会出现分块编码常见的方块效果。

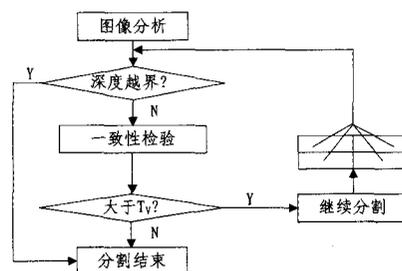


图 3 低位图像二叉树分割过程

$$MSE = \frac{1}{mn} \left(x_{i,j}^n - \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{i,j}^n \right)^2 \quad (6)$$

由于对不同的图像很难设计一个不变的阈值作为 MSE 的上限,因此具体实现时采用的测度函数是 $(MSE - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 MSE_i) / MSE \geq T$,即判断原始像块均方误差与各子块的均方误差的均值的变程度,变化超过一定的值则认为块内像素的值起伏明显,需进行划分。

划分的层次过深会增加树中的节点数,影响压缩效率,因此将像块尺寸下界设为 4×4 。

3.2.2 图像划分步骤

图像划分的过程如图 3 所示,具体步骤如下:

Step1 将原始图像视为一个整体像块,计算其像素均值 A ,用一个 5 元组 (x_1, x_2, y_1, y_2, A) 来描述像块, x_1 和 x_2 是像块的横坐标范围, y_1 和 y_2 是像块的纵坐标范围,设置队列 Q 来存储该元组;

Step2 将队头的元组出队,如果 $x_1 - x_2 > 4$,则表明该元组对应的像块为可分块,转 Step3,否则为极小块,转 Step4;

Step3 计算当前像块的均方误差 MSE 并与设定的一致性阈值 T 对比,若大于 T 则将当前像块可划分为 4 个子块,分别计算各子块的均值方误差,并将新生成的 4 个 5 元组 $(x_1, \lceil \frac{x_1+x_2}{2} \rceil, y_1, \lceil \frac{y_1+y_2}{2} \rceil, m_1)$, $(x_1, \lceil \frac{x_1+x_2}{2} \rceil, \lceil \frac{y_1+y_2}{2} \rceil, y_2, m_2)$, $(\lfloor \frac{x_1+x_2}{2} \rfloor, x_2, y_1, \lfloor \frac{y_1+y_2}{2} \rfloor, m_3)$, $(\lfloor \frac{x_1+x_2}{2} \rfloor, x_2, y_1, \lfloor \frac{y_1+y_2}{2} \rfloor, m_4)$ 入队;

Step4 判断队列长度,为空则结束划分,否则转至 Step2 继续划分。

3.2.3 残差图像编码

对第一波段的低位图像划分完毕后其余所有波段都共用同一分割模式,这样就得到了各波段低位的残差图像。为了进一步提高压缩比,还要对残差图像进行量化。残差图像中各个像块的方差分布不均匀,最好采用非均匀量化,但是这就在量化前预先标出量化的边界,并在量化过程中自动检测,这样复杂的过程很难满足实时性的要求。由于人眼对灰度值频繁的变化很难分辨,而低位图像表达的是图像的细节部分,因此可以对残差图像中灰度突变的边界做均匀量化,复原后不会对图像的主观质量产生太大的影响。考虑到动态调节压缩比的要求,残差图像压缩前先调整量化间隔计算压缩比然后再做编码。设灰度的最大和最小值分别为 g_{\max} 和 g_{\min} , K 为量化等级, r 为量化步长,则有

$$r = \frac{g_{\max} - g_{\min}}{K} \quad (7)$$

从 K 等于 4 开始,增大 K 值并计算量化步长和压缩比,直到满足指定的压缩性能。

4 实验结果与分析

为了验证算法的有效性,采用 canal 的 101~200 共 100 个波段,利用 JPEG-LS、文献[4]中提到的二阶差分预测和本文方法分别进行压缩测试,分组内波段数的上限设为 10。由于高位和低位的压缩算法不同,因此我们选定相关系数阈值为 0.9 先对图像进行位平面划分,然后再对高位和低位分别进行压缩性能的测试。对本文的 8 位实验图像位平面划分后,高位和低位的边界为 4,即每幅图像的高低位数据量各有 20000B。

4.1 压缩比调节实验

预先设定压缩比,对实验图像进行了近无损压缩测试,从表 1 中的结果发现,编解码时间随压缩比升高略有增长,但增幅较小,所以压缩比和算法的时间复杂度无明显联系。实际压缩比和预设压缩比差别不超过 5%,这说明算法中的压缩比调控设计比较合理,但是实际比值往往低于预设值,这是由于各组首波段未做谱间压缩,另外计算 NEAR 中的取整及曲线拟合准确与否也增加了压缩比调整的不可控制性。

表 1 压缩比调节与时间效率

预设压缩比	编码时间(s)	解码时间(s)	实际压缩比	压缩比误差
3	8.693	7.430	2.87	4.7%
6	8.533	7.371	5.79	3.7%
8	8.428	7.631	7.74	3.5%
9	8.435	7.548	8.69	3.3%
10	8.344	7.453	9.59	4.4%

4.2 低位压缩实验

由于低位压缩中进行了量化操作,因此是不可逆的近无损压缩,选取 181 波段低位位平面图像做二叉树划分,结果如图 4 所示。可以看到,在有些区域有尺寸较大的像块,这对提高压缩比十分有利,均值图像轮廓与原位平面图像十分接近,这说明用均方误差的均值变化度作为划分依据是可行的。

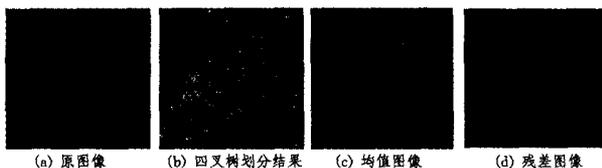


图 4 二叉树分割结果

4.3 压缩重建图像质量分析

从高位位平面重建的图像与原图像的相似度来看,对实验图像的压缩比接近 10 时,平均相似度不低于 0.98,所以重建图像边缘轮廓基本无损,对目标定位、提取等处理无影响。表 2 列出了高位重建图像 XSD。

表 2 高位重建图像 XSD

波段号	压缩比				
	2.87	5.79	7.74	8.69	9.59
120	0.99992	0.99733	0.99427	0.99265	0.98726
140	0.99984	0.99681	0.99379	0.99158	0.98524
160	0.99972	0.99523	0.99314	0.99006	0.98115
180	0.99963	0.99616	0.99287	0.98794	0.98226
200	0.99974	0.99683	0.99323	0.99283	0.98486
200 波段均值	0.99982	0.99664	0.99336	0.99128	0.98412

采用 JPEG-LS 和二阶差分预测与本文算法进行对比测试发现,随着压缩比的增加,本文算法压缩重建图像的 PSNR 有所下降,但压缩比接近 10 时 PSNR 均值仍大于 33,与 JPEG-LS 相比,压缩时间基本相当,但重建图像质量有较大提高;与二阶差分预测相比,编码时间大大降低,重建图像的 PSNR 无明显变化。表 3 给出了不同算法重建图像的 PSNR 对比。

表 3 不同算法重建图像的 PSNR 对比

JPEG-LS		二阶差分预测			本文算法			
压缩比	PSNR (dB)	编码时间 (s)	压缩比	PSNR (dB)	编码时间 (s)	压缩比	PSNR (dB)	编码时间 (s)
5.21	39.882	8.023	5.68	39.753	21.864	5.79	39.636	8.532
8.52	33.874	7.875	8.72	35.532	22.125	8.69	35.022	8.452
9.96	30.275	7.946	9.81	33.941	21.846	9.84	33.756	8.651
12.27	28.92	8.023	12.67	33.037	21.638	12.43	32.976	8.345

4.4 压缩码流分析

分别设定压缩比对选取的超光谱图像进行压缩,最终的压缩码流组成如表 4 所列,码流中分割信息和 NEAR 值所占比重不大。数据表明,相比于高位的编码,低位的均值图像和残差图像所占比重仍然很大,这主要是由于低位图像的相关性低,难以实现高压压缩比。

表 4 不同压缩比下的混合码流构成表

压缩比	高位编码	均值信息编码	残差图像编码
2.87	41.3%	42.1%	16.6%
5.79	38.1%	46.46%	15.5%
7.74	32.7%	52.1%	15.2%

结束语 本文算法通过位平面的划分有效地区分了图像中的“主要成分”(高位位平面)和“次要成分”(低位位平面)。带有防误码机制的高位高保真压缩保证了复原图像的质量,压缩比实时调控策略使得复杂度不同的图像可以在固定带宽上可靠传输,图像分层的同时也在一定程度上实现了编码渐进性。

但是相对于高位而言,算法的低位压缩比不够理想,如果能根据图像的具体内容对像块做不规则划分有可能会进一步提高低位压缩比,这也是算法进一步研究的方向。

参考文献

- [1] 陈林杰,刘学斌,刘庆飞.基于直方图变换的多光谱 3D SPIHT 压缩编码算法[J].光学技术,2007,33(1):137-140

$$C_{cr} = HX_{22}^{-1} = \begin{bmatrix} 0.0002 & -0.0049 \\ 0.0022 & -0.0009 \end{bmatrix}$$

进而还可利用 MATLAB 中 `yalmip` 工具箱,若限定 $\gamma=0.9$,依照式(37)进行优化处理,可得鲁棒 H_∞ 最优保性能指标上界 $J^* = 2.6457$,对应的控制器为

$$A_{cJ} = GX_{22}^{-1} = \begin{bmatrix} -0.4487 & -0.0014 \\ -0.0013 & -0.4473 \end{bmatrix}$$

$$B_{cJ} = Y^T / \epsilon_1 = \begin{bmatrix} 0.1520 & 0.1278 \\ -0.0372 & 0.0631 \end{bmatrix}$$

$$C_{cJ} = HX_{22}^{-1} = \begin{bmatrix} -0.0031 & -0.0025 \\ 0.0018 & -0.0019 \end{bmatrix}$$

结束语 本文针对具有时变时延及丢包的参数不确定 NCS,将丢包当作一种特殊时延,采用动态输出反馈控制律,基于时滞依赖的方法,通过构造一种新的 Lyapunov-Krasovskii 泛函,借助于积分不等式等技术,推证出使不确定 NCS 对执行器失效故障具有鲁棒 H_∞ 保性能容错能力的判别准则,同时给出了控制器的优化设计方法。最后以一仿真算例验证了本文方法的可行性和有效性。由于定理证明推证中,未进行模型转换,对时延进行分段处理,充分运用时延各种信息,并在尽可能少放大的基础上保留了有用项,因此结论具有较小保守性。同时,引入较少自由权矩阵,简化了计算,这对提高控制器设计可行性和容错满意度均是有益的。

参考文献

- [1] Zhang W, Branicky M, Phillips S. Stability of networked control systems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21: 84-99
- [2] 李洪波,孙增圻,孙富春. 网络控制系统的发展现状与展望[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(2): 238-243
- [3] Fang Hua-jing, Ye Hao, Zhong Mai-ying. Fault diagnosis of networked control systems[J]. Annual Reviews in Control, 2007, 31: 55-68
- [4] Patton R J, Kambhampati C, Casavola A, et al. Fault-tolerance as a key requirement for the control of modern systems[J]. The International Federation of Automatic Control, 2006, 6(1): 26-36
- [5] Huo Zhi-hong, Fang Hua-jing. Research on robust fault-tolerant control for networked control system with packet dropout[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2007, 18(1): 76-82
- [6] 郭一楠,张芹英,巩敦卫,等. 一类时变时延网络控制系统的鲁棒

- 容错控制[J]. 控制与决策, 2008, 23(6): 689-692
- [7] 黄鹤,韩笑冬,谢德晓,等. 网络控制系统的鲁棒 H_∞ 容错控制器设计[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2008, 38: 185-189
- [8] 朱灵波,戴冠中,康军,等. 具有传感器故障的网络化控制系统保性能可靠控制[J]. 控制与决策, 2009, 24(7): 1050-1054
- [9] 李炜,张健全,李亚洁. 基于输出反馈不确定 NCS 鲁棒容错控制[J]. 控制工程, 2009, 16(6): 576-580
- [10] Aberkane S, Sauter D, Ponsart J C. Output-Feedback H_∞ Control of a Class of Networked Fault Tolerant Control Systems[C]// 2007 Mediterranean Conference on Control and Automation. T14-007, July 2007
- [11] Li Wei, Cao Hui-chao, Wang Jun. Robust Fault-tolerant Control for Uncertain NCS Based on Dynamic Output Feedback[C]// International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA 2011). Shanghai, China, January 2011: 179-186
- [12] Lam J, Gao Hui-jun, Wang Chang-hong. Stability analysis for continuous systems with two addition time-varying delay components[J]. Systems Control Letters, 2007, 56(1): 16-24
- [13] 刘磊明,童朝南,武延坤. 一种带有动态输出反馈控制器的网络化控制系统的 Markov 跳变模型[J]. 自动化学报, 2009, 35(5): 627-731
- [14] Gu K. Integral inequality in the stability problem of time-delay systems[C]// Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control. 2009: 2805-2810
- [15] Xie L. Output feedback H_∞ control of systems with parameter uncertainties[J]. Int J of Control, 1996, 63(4): 741-750
- [16] Xie L, Carlos H, de Souza E. Robust H_∞ control for Linear Systems with Norm-bounded Time-varying Uncertainty [J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 1992, 37(8): 1188-1191
- [17] Sun Jian, Liu G P, Chen Jie, et al. Improved delay-range-dependent stability criteria for linear systems with time-varying delays[J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 2010, 46: 466-470
- [18] Gao Hui-jun, Chen T W, Lam J. A new delay system approach to network-based control[J]. Automatica, 2008, 44(1): 39-52
- [19] Ariba Y, Gouaisbaut F. Delay-dependent stability analysis of linear systems with time-varying delay[C]// Proceedings of the 46th IEEE conference on decision and control. New Orleans, USA, 2007: 2053-2058
- [20] Peng Chen, Tian Yu-chu. Delay-dependent robust control for uncertain systems with time-varying delay[J]. Information Science, 2009: 3187-3197

(上接第 296 页)

- [2] 吴家骥,吴振森,吴成柯. 超光谱图像的三维小波嵌入零块压缩编码[J]. 软件学报, 2007, 18(2): 461-468
- [3] 罗欣,郭雷,杨诸胜. 基于可逆整数变换的高光谱图像无损压缩[J]. 光子学报, 2007, 36(8): 1457-1462
- [4] 张威,戴明,尹传厉,等. 超光谱图像的二阶差分预测压缩算法[J]. 计算机科学, 2010, 37(5): 240-246
- [5] Jain S K, Adjeroh D A. Edge-based prediction for lossless compression of hyperspectral images[C]// Proc of 2007 Data Compression Conference. Snowbird, Utah, US, 2007: 153-162
- [6] Zhang Jing, Liu Gui-zhong. An efficient reordering prediction based lossless compression algorithm for hyperspectral images[J]. IEEE Geosci. & Remote Sens Letters, 2007, 4(2): 283-287

- [7] Aiazzi B, Alparone L, Baronti S. Crisp and fuzzy adaptive spectral predictions for lossless and near-lossless compression of hyperspectral imagery [J]. IEEE Geosci. & Remote Sens. Letter, 2007, 4(4): 532-536
- [8] 刘波,姜宏旭,练有品,等. 机载图像无损/近无损压缩方案及其 FPGA 实现[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(12): 1443-1447
- [9] 沈洪亮,刘金国. 基于 JPEG-L S 的遥感图像无损压缩技术[J]. 光电子技术, 2009, 29(3): 206-210
- [10] Zhang Xiao-yu, Chen Xin-kai, et al. Key Optimization Techniques In JPEG-LS IP Code Design[J]. Journal of Electronics (China), 2010, 1: 94-98