

文章编号 1004-924X(2015)12-3500-09

## 无人机机载侦察视频的高效视频码率控制

赵春蕾<sup>1,2\*</sup>, 戴明<sup>1</sup>, 尹传历<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 长春长光众和科技有限公司, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘要:**提出了一种基于缓冲区状态及梯度算子的低延时高效视频码(HEVC)率控制方法,以解决现有的码率控制算法在无人机机载侦察系统中因比特分配不当引起的视频质量较差的问题。首先,利用剩余比特及缓冲区状态预分配帧层目标比特;然后,以视频中每帧各最大编码单元(LCU)的时空复杂度作为权重,预分配各 LCU 的目标比特;最后,通过 R- $\lambda$  模型获得目标比特下的编码参数,实现视频压缩编码,并完成模型参数更新。实验结果表明:在 8 Mbps 的带宽下,提出的算法使码率控制误差缩小到 HM16.0 的 2/5,视频中图像质量波动范围降低到 HM16.0 的 1/4 以内。提出的方法有效抑制了帧间比特消耗波动,使得缓冲区占用量能在小范围内平稳波动,图像主观质量也得到了改善,更好地满足了机载侦察系统低延时的应用需求。

**关键词:**无人机侦察系统;机载视频;视频压缩编码;HEVC 码率控制;R- $\lambda$  模型;比特分配

**中图分类号:** TN941.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152312.3500

## HEVC rate control for unmanned aerial vehicle airborne reconnaissance

ZHAO Chun-lei<sup>1,2\*</sup>, DAI Ming<sup>1</sup>, YIN Chuan-li<sup>1</sup>

(1. Changchun Changguang Zhonghe Technologies Co., Ltd., Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhaol5948020937@163.com

**Abstract:** A High Efficiency Video Coding (HEVC) rate control algorithm with a low-delay was proposed based on buffer status and a gradient operator to improve the poor video quality of the current HEVC rate control scheme caused by the improper bit allocation in Unmanned Aerial Vehicle (UAV) airborne reconnaissance. First, both the buffer state and the remained bits were used to pre-allocate the frame layer target bits. Then, the time and space complexity of the Largest Coding Unit (LCU) in each frame was taken as the weight, layer bits hierarchically with the reconnaissance video features was evaluated by a gradient value. Finally, Quantization Parameter (QP) was derived from R- $\lambda$  model, the encoder in the LCU and the model parameter updating were implemented. Experimental results show that the proposed algorithm reduces mismatch ratio to 2/5 that of the rate control scheme in

收稿日期:2015-10-02;修订日期:2015-10-15.

基金项目:空军预研基金资助项目(No. 402040205);国家自然科学基金资助项目(No. 61308099, No. 61304032)

HM16.0, and PSNR (Peak Signal-to-noise Ratio) fluctuation has been within 1/4 under the 8 Mbps bandwidth. Moreover, the proposed algorithm provides an improvement in subjective quality evaluation and has less bit fluctuation and lower, steadier buffer occupancy, which enables a lower delay of aerial photography applications.

**Key words:** Unmanned Aerial Vehicle(UAV); reconnaissance system; airborne video; video compression coding; HEVC rate control; R- $\lambda$  model; bit allocation

## 1 引言

近年来,随着航空测量技术的迅速发展,机载光学传感器的分辨率越来越高,导致传输图像的数据量呈几何级数增长,因此,视频的高质量、高效率传输已经成为制约无人机应用的重要问题。增加传输带宽理论上可以传输更多的数据量,但这样势必会带来更大的干扰噪声;虽然通过加大发射功率、提高接收灵敏度等方法可以增加无线网络的有效传输距离,改善系统的抗干扰性,但那样又会增加设备复杂度,增加系统成本<sup>[1-3]</sup>。因此,在传输带宽受限的无人机机载侦察系统中,为实现高分辨率图像的高质量实时传输,需要利用码率控制技术对机载侦察视频进行有效压缩<sup>[4]</sup>。

码率控制可用于平衡带宽和视频质量之间的矛盾,其在视频压缩中起着极其重要的作用<sup>[5]</sup>。作为新一代的视频压缩标准,由于 HEVC(High Efficiency Video Coding)采取了先进的编码技术,故其压缩性能较之前的 H.264 提高了一倍<sup>[6]</sup>。H.264 中编码单元大小固定为 16 pixel $\times$ 16 pixel<sup>[7-8]</sup>,而 HEVC 采用了灵活多变的二叉树编码单元结构,从而导致基于二项式模型的码率控制算法<sup>[9]</sup>不再准确。Wang<sup>[10]</sup>等人针对 HEVC 的新特性提出了基于  $\rho$  域的码率控制模型。JCTVC-K0103 提案<sup>[11]</sup>首先提出了基于 R- $\lambda$  模型的码率控制策略,在此基础上,JCTVC-M0257 提案<sup>[12]</sup>针对 I 帧提出了基于图片复杂度的码率控制算法,目前该算法已被添加到 HEVC 最新的标准测试模型 HM16.0<sup>[13]</sup>中。文献[14]在全 I 帧情况并考虑编码单元复杂度及缓冲区状态对码率控制影响的前提下,实现了 I 帧比特分配。文献[15]根据人眼对人脸不同区域的感兴趣程度按权重对视频会议图像进行码率分配,实现了基于感兴趣区域的码率控制策略。但以上方法只是考虑了编码效率及视频质量,并没有设计出满足低延

时应用需求的 HEVC 码率控制策略。对于机载侦察视频这类低延时视频通信系统,编码器的缓冲区大小受低延时限制,不能直接应用 HM16.0 中基于 R- $\lambda$  模型的码率控制策略。这一方面是因为该策略忽略了低延时要求下的缓冲区大小限制,容易引起缓冲区的上溢或者下溢。另一方面是由于 LCU(Largest Coding Unit)层比特分配没有充分考虑视频特性,其模型参数由上一帧相同位置数据预测获得,在剧烈运动的视频中不准确,导致 LCU 层比特分配失效。

为实现机载视频的高质量、高效率传输,本文根据机载侦察视频的特点,针对视频重建质量和图像压缩比之间的矛盾,提出了一种基于视频特性的 HEVC 码率控制方法。该算法在 JCTVC-M0257 码率控制模型的基础上,通过优化帧层和 LCU 层的比特分配过程,提升了码率控制的性能,而且在帧层比特分配过程中考虑了缓冲区状态的影响。LCU 层比特分配中使用计算复杂度低的梯度算子衡量视频中每帧各 LCU 的复杂度,按复杂度分配比特,即为复杂度高的细节区域多分配比特,而为复杂度低的平坦区域分配较少的比特,这样在有限的传输带宽下,本文所提方法可有效提高重建视频的主观和客观质量。

## 2 HEVC 码率控制技术介绍

码率控制的目标是在码率失真最小的情况下,选择一组最佳的编码参数,使得编码消耗更接近给定的目标码率。码率控制主要是为每个编码单元在  $R_s(QP) \leq R_{\max}$  的限制下寻求到合适的编码参数 QP,使得编码失真最小,也就是使公式(1)所示的率失真优化过程中的 J 最小。

$$J = D(QP) + \lambda_{\text{MODE}} \times R(QP), \quad (1)$$

其中: $D(QP)$ 为特定 QP 下的编码失真, $R(QP)$ 为该 QP 下实际消耗的比特数, $\lambda_{\text{MODE}}$ 为特定编码模式下的拉格朗日乘子。

码率控制通常分为两步,首先是对每个层次的编码单元分配合适的比特。接着利用 RQ (Rate-Quantization)模型直接或间接获得 QP,以使实际编码输出的比特数接近预分配的比特数。

目前常用的 RQ 模型主要有 3 种:(a) H. 264 常用的二次 R-Q 模型<sup>[7]</sup>; (b) 基于量化后零系数百分比  $\rho$  的  $R-\rho$  模型<sup>[8]</sup>; (c) 以及基于拉格朗日乘子  $\lambda$  的  $R-\lambda$  模型<sup>[11]</sup>。由于码率  $R$  和  $\lambda$  之间的鲁棒性更强,目前已被用于 HEVC 最新的测试模型 HM16.0 中,其表达式如公式(2)所示:

$$\lambda = \alpha \times R^\beta, \quad (2)$$

其中  $\alpha$  和  $\beta$  是模型参数,  $R$  为经码率控制的比特分配获得的目标比特数,  $\lambda$  是率失真优化中的拉格朗日乘子。式(2)可变形为:

$$R = \left( \frac{\lambda}{\alpha} \right)^{-\beta} = \alpha_1 \cdot \lambda^{\beta_1}, \quad (3)$$

由于率失真优化过程所获得的 QP 的编码复杂度较高,为了降低编码复杂度,通过大量实验获得了  $\lambda$  与 QP 之间的关系式,如公式(4)所示:

$$QP = 4.2005 \times \ln(\lambda) + 13.7122. \quad (4)$$

如图 1 所示,码率控制主要包括 GOP(Group of Picture)层、帧层及 LCU 层。

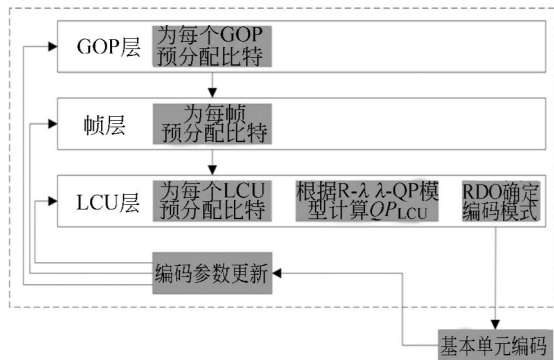


图 1 码率控制流程

Fig. 1 Rate control scheme

**GOP 层:**根据信道带宽、帧频、GOP 长度及已编码帧的比特消耗,预分配 GOP 层的比特。

**帧层:**根据 GOP 层比特的剩余情况,为每帧图片按权重预分配帧层比特。JCTVC-K0103 提案通过查表法获得每帧图片的权重;JCTVC-M0257 提案以每帧  $\lambda$  的比值作为每帧图片的权重。其中  $\lambda$  由公式(2)获得,模型参数  $\alpha$  和  $\beta$  由当前帧所在 GOP 中的位置确定,  $R$  由当前 GOP 的每像素比特数 BPP(bit per pixel)表示。

**LCU 层:**首先,根据帧层比特的剩余情况,为每个编码单元按权重预分配比特。JCTVC-K0103 提案采用平均绝对误差 (Mean Absolute Difference, MAD) 作为一帧中每个编码单元的权重,其 MAD 是由前一帧相同位置的 MAD 线性估计而来;JCTVC-M0257 提案利用由公式(3)获得的  $R$  作为一帧中每个编码单元的权重,获得当前编码单元的预分配比特。然后,通过公式(2)和(4)获得当前编码单元的  $\lambda$  和 QP。最后,将获得的  $\lambda$  与 QP 通过率失真优化过程获得最优的编码模式,完成基本单元层编码,并更新相应的参数。

### 3 自适应目标比特分配的 HEVC 码率控制

为满足机载侦察视频低延时的通信要求,编码器的缓冲区需要设置的很小,而 HM16.0 中的码率控制策略在帧层比特分配过程中忽略了缓冲区状态的影响,极易引起缓冲区的上溢或者下溢。同时,LCU 层比特分配过程中是使用通过公式(3)计算的  $R$  表示权重,其模型参数是通过上一帧相同位置预测获得的,在机载侦察这类高速飞行、剧烈运动的视频中预测不够准确,影响 LCU 层比特分配的准确性。另外,公式(3)的计算复杂度较高,不适合实时通信场合。因此, HM16.0 中的码率控制算法不能直接应用到无人机机载侦察视频中。为实现机载视频的高质量、高效率传输,本文提出了一种基于缓冲区状态的帧层目标比特分配方法。同时,采用梯度算子衡量 LCU 的空时复杂度,以完成 LCU 层目标比特分配。虽然,在 HEVC 中用梯度衡量 I 帧图像复杂度<sup>[12]</sup>已有广泛的研究,但这些方法主要针对于全 I 帧的配置,而本文主要针对航拍视频这类低延时的应用场合, GOP 的结构为 IPP...P,将提出的算法添加到 HM16.0 中完成以下步骤。

#### 3.1 帧层目标比特分配

HM16.0 中的码率控制策略仅采用当前 GOP 内剩余比特实现帧层目标比特分配,如公式(5)所示:

$$T_{\text{frm}} = R_{\text{rem}} \times \frac{\omega_k}{\omega_{\text{rem}}}, \quad (5)$$

其中:  $R_{\text{rem}}$  为一个 GOP 内剩余的比特数;  $\omega_k$  为当

前图片的权重,由当前帧所在 GOP 中的位置确定,为常量; $\omega_{rem}$ 为当前 GOP 内剩余帧的权重和。这种码率控制策略忽略了缓冲区状态的影响,而无人机机载视频传输中为保证通信的实时性,编码器的缓冲区通常设置的很小,极易引起缓冲区的上溢或者下溢。本文提出了一种基于缓冲区状态的帧层比特分配方法。帧层目标比特  $T_{frm}$  由当前 GOP 内剩余比特与当前缓冲区状态共同确定,如公式(6)所示:

$$T_{frm} = \tau \times R_{rem} \times \frac{\omega_k}{\omega_{sum}} + (1 - \tau) \times (T_{GOP} \times \frac{\omega_k}{\omega_{sum}} - \frac{B_c}{N_{left}}), \quad (6)$$

其中: $\tau$ 是调整参数, $\omega_{sum}$ 为当前 GOP 中每帧图片的权重总和, $B_c$ 为当前帧的缓冲区占用量,初始值设置为零,编码完一帧后进行更新, $T_{GOP}$ 为当前 GOP 的预分配比特,采用 JCTVC-M0257 提案方法获得。

### 3.2 LCU 层目标比特分配

通过对比图片信息熵、帧内预测与梯度 3 种图像复杂度的衡量方法,发现梯度方法具有更好的区分能力<sup>[16]</sup>,并且计算复杂度也较低,适合实时性要求较高的航拍视频。因此,本文选择梯度算子衡量图像中每个 LCU 的空间复杂度  $G_{sLCU}$ ,如公式(7)所示:

$$G_{sLCU} = \frac{1}{W \times H} \left\{ \sum_{i=0}^{W-1} \sum_{j=0}^{H-1} |I_c(i+1, j) - I_c(i, j)| + |I_c(i, j+1) - I_c(i, j)| \right\}, \quad (7)$$

其中: $I_c(i, j)$ 为当前帧位于 $(i, j)$ 点处的像素值, $W$ 和 $H$ 分别是 LCU 的宽和高。

对于视频序列,相邻两帧的残差越大,表明两帧相似程度越低,视频运动越剧烈;相反,相邻两帧的残差越小,表明两帧越相似,视频运动越平缓。因此,可采用连续两帧的绝对残差的梯度值表征视频运动的剧烈程度,即每个 LCU 的时间复杂度  $G_{tLCU}$  可表示为:

$$G_{tLCU} = \frac{1}{W \times H} \left\{ \sum_{i=0}^{W-1} \sum_{j=0}^{H-1} (|I_d(i+1, j) - I_d(i, j)| + |I_d(i, j+1) - I_d(i, j)|) \right\}, \quad (8)$$

其中: $I_d(i, j)$ 代表连续两帧的残差图像中位于 $(i, j)$ 点处的像素值,可表示为:

$$I_d(i, j) = |I_c(i, j) - I_p(i, j)|, \quad (9)$$

其中: $I_p(i, j)$ 为下一帧位于 $(i, j)$ 点处的像素值。根据当前 LCU 的空间复杂度  $G_{sLCU}$  与时间复杂

度  $G_{tLCU}$ ,可获得当前 LCU 的时空复杂度  $G_{LCU}$ ,计算公式如式(10)所示:

$$G_{LCU} = (1 - k) \times G_{sLCU} + k \times G_{tLCU}, \quad (10)$$

其中: $k$ 为时空复杂度比例系数,其值由  $G_{tLCU}$  与  $G_{sLCU}$  的比值决定。通常情况下,序列的空间复杂度大于时间复杂度。当  $G_{tLCU}/G_{sLCU}$  的值较小时,说明时间冗余大,即时间相关性更强,此时时间复杂度对当前 LCU 的影响较大, $k$ 取相对大的值;反之,空间冗余突出,空间复杂度对整个 LCU 的影响较大, $k$ 取较小值。 $k$ 的取值直接影响编码性能,通过对大量测试序列的测试发现,按照式(11)的取值可使 LCU 复杂度与比特消耗间呈较好的线性关系,进而选用  $G_{LCU}$  衡量 LCU 的复杂度特性。

$$k = \begin{cases} 0.85, & G_{tLCU}/G_{sLCU} \leq 0.2 \\ 0.7, & 0.2 < G_{tLCU}/G_{sLCU} \leq 0.35 \\ 0.5, & 0.35 < G_{tLCU}/G_{sLCU} \leq 0.5 \\ 0.3, & G_{tLCU}/G_{sLCU} > 0.5 \end{cases}. \quad (11)$$

固定量化参数对实验所用的视频序列编码,记录每个 LCU 编码过程中实际消耗的比特数,并利用公式(10)获得每个 LCU 的复杂度。图 2 显示了每个 LCU 的复杂度与其编码实际消耗的比特数间的关系,可见二者呈线性关系。因此, $G_{LCU}$ 作为 LCU 复杂度的衡量标准是有效的,当前 LCU 的目标比特数  $T_{LCU}$  可用  $G_{LCU}$  及当前编码剩余比特数估计,具体表达式如(12)所示:

$$T_{LCU} = G_{LCU}(i) \times \frac{T_{frm} - \text{Bit}_{header} - \text{Coded}_{Pic}}{\sum_{k=i}^{N_{LCU}} G_{LCU}(k)}, \quad (12)$$

其中: $N_{LCU}$ 为一帧中 LCU 的个数, $\text{Bit}_{header}$ 为当前帧帧头信息占用的比特数, $\text{Coded}_{Pic}$ 为当前帧已编码 LCU 实际消耗的比特数和,在每个 LCU 编码完成后更新公式中的各个参数。

### 3.3 获得 QP 及模型参数更新

获得 LCU 层目标比特后,根据  $T_{LCU}$  和  $N_{LCU}$  计算该 LCU 的每像素比特数  $BPP_{LCU}$ :

$$BPP_{LCU} = T_{LCU} / N_{LCU}. \quad (13)$$

将  $BPP_{LCU}$  带入公式(2)中,可获得该 LCU 对应的  $\lambda_{currLCU}$ ,如公式(14)所示:

$$\lambda_{currLCU} = \alpha \times BPP_{LCU}^\beta. \quad (14)$$

$\alpha$  和  $\beta$  值为模型参数,编码完一个 LCU 后更新。通过公式(4)获得该 LCU 相应的  $QP_{currLCU}$ 。考虑相邻块质量波动, $\lambda_{currLCU}$  及  $QP_{currLCU}$  范围设定

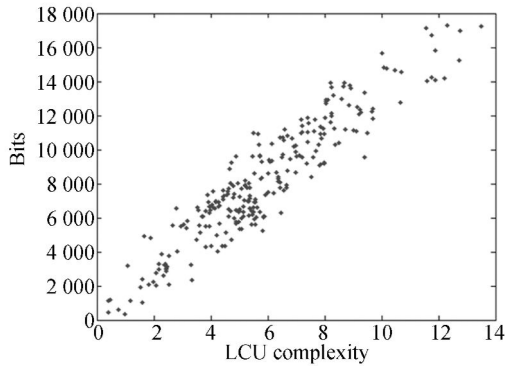


图 2 LCU 复杂度与比特消耗间的线性关系

Fig. 2 Linear relationship between LCU complexity and coding bits

为:

$$\lambda_{\text{lastLCU}} \cdot 2^{\frac{-1.0}{3.0}} \leq \lambda_{\text{currLCU}} \leq \lambda_{\text{lastLCU}} \cdot 2^{\frac{1.0}{3.0}}, \quad (15)$$

$$\lambda_{\text{currPic}} \cdot 2^{\frac{-2.0}{3.0}} \leq \lambda_{\text{currLCU}} \leq \lambda_{\text{currPic}} \cdot 2^{\frac{2.0}{3.0}}, \quad (16)$$

$$QP_{\text{lastLCU}} - 1 \leq QP_{\text{currLCU}} \leq QP_{\text{lastLCU}} + 1, \quad (17)$$

$$QP_{\text{currPic}} - 2 \leq QP_{\text{currLCU}} \leq QP_{\text{currPic}} + 2. \quad (18)$$

当一个 LCU 编码完成后,  $R-\lambda$  模型参数进行如下更新, 以便编码下一个 LCU。

$$\lambda_{\text{comp}} = \alpha_{\text{old}} \cdot bpp_{\text{real}}^{\beta_{\text{old}}}, \quad (19)$$

$$\alpha_{\text{new}} = \alpha_{\text{old}} + \delta_{\alpha} \cdot (\ln \lambda_{\text{real}} - \ln \lambda_{\text{comp}}) \cdot \alpha_{\text{old}}, \quad (20)$$

$$\beta_{\text{new}} = \beta_{\text{old}} + \delta_{\beta} \cdot (\ln \lambda_{\text{real}} - \ln \lambda_{\text{comp}}) \cdot \ln bpp_{\text{real}}. \quad (21)$$

$\lambda_{\text{real}}$  用于编码当前 LCU 的  $\lambda$ ,  $bpp_{\text{real}}$  表示实际编码一个 LCU 后获得的  $bpp$ ,  $\delta_{\alpha}$  与  $\delta_{\beta}$  为模型参数, 分别设置为 0.1 和 0.05。

一帧图片编码完成后, 缓冲区占用量按公式 (22) 更新:

$$B_c = B_{\text{old}} + R_{\text{actual}} - \frac{R_{\text{target}}}{f}, \quad (22)$$

其中:  $R_{\text{actual}}$  为当前帧的实际编码消耗,  $R_{\text{target}}$  是预先设置的信道带宽, 即初始设置的目标码率。

### 3.4 算法流程

提出的码率控制算法流程如下:

步骤 1: 按照 JCTVC-M0257 提案中的方法计算当前 GOP 的预分配比特  $T_{\text{GOP}}$ ;

步骤 2: 根据公式 (3) 获得帧层目标比特  $T_{\text{frm}}$ ;

步骤 3: LCU 的时空复杂度  $G_{\text{LCU}}$  由公式 (10) 获得;

步骤 4: 由公式 (12) 获得 LCU 的目标比特  $T_{\text{LCU}}$ ;

步骤 5: LCU 的  $\lambda_{\text{currLCU}}$  通过公式 (14) 获得, 并根据公式 (15)、(16) 限定;

步骤 6: 由公式 (4) 获得该 LCU 相应的  $QP_{\text{currLCU}}$ , 并根据公式 (17)、(18) 对  $QP_{\text{currLCU}}$  进行限定, 获得实际使用的  $QP_{\text{currLCU}}$ ;

步骤 7: 当一个 LCU 编码完成后,  $R-\lambda$  模型参数根据公式 (19)~(21) 更新, 然后返回步骤 3, 直到编码完当前帧后执行下一步。

步骤 8: 根据公式 (22) 更新缓冲区占用量  $B_c$ , 然后返回步骤 2, 直到编码完当前 GOP 后执行下一步。

步骤 9: 返回步骤 1, 直到整个序列编码完成。

## 4 实验结果与分析

将提出的算法添加到 HEVC 的标准测试模型 HM16.0 中, 并以 HM16.0 的方法为基准, 按照码率控制性能的衡量指标测试本文算法的性能。截取某型机载光电侦察平台录制的特定格式的非压缩视频, 将其转换成适合 HM16.0 处理的 YUV4:2:0 格式, 作为测试序列。

码率控制的衡量指标包括: 码率控制精度误差、视频质量波动、缓冲器状态、图像客观质量和图像主观质量。采用的配置文件为“encoder\_lowdelay\_P\_main.cfg”, 主要的编码参数设定如表 1 所示, 其它参数设置为 HM16.0 的默认值。

表 1 编码参数设定

Tab. 1 Encoding parameters

编码参数	含义	设定值
Frame rate/frame $\cdot$ s <sup>-1</sup>	帧频	30 s
Frames to be encoded	编码帧数	300
Rate control enable	码率控制开关启停	1
resolution	图像宽度 $\times$ 高度	1 000 $\times$ 1 000
Target bit rate/Mbps	目标码率	8

### 4.1 缓冲器状态

为验证所提出的算法更适合低延时应用场合, 实验中设置缓冲区容量为  $R/f$ , 这可以有效避免缓冲区出现上溢或者下溢的情况。如果缓冲区占用量过高, 编码器需要通过跳帧的方式, 降低缓冲区占用量; 如果缓冲区占用量为负数, 就会出现

缓冲区下溢的情况,造成带宽浪费。

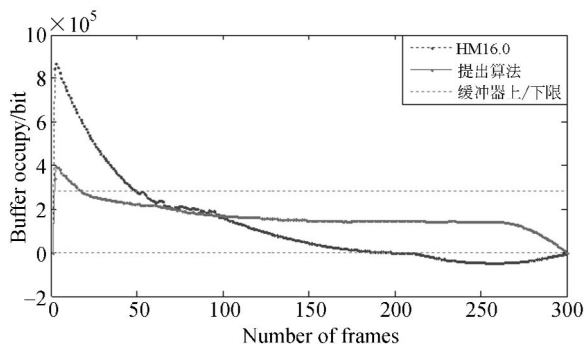


图 3 缓冲区状态  
Fig. 3 Buffer status

利用本文算法和 HM16.0 中的算法分别对测试序列编码后,获得每帧的缓冲区状态,如图 3 所示。HM16.0 中使用的方法在初始几帧时,缓冲区占用量骤然上升,经过很多帧的调整后,逐渐回落到缓冲区上限以内。这是由于算法忽视了缓冲区状态对帧层比特分配的影响,使得缓冲器状态波动明显,甚至出现了缓冲区下溢的现象。而本文所提算法在帧层比特分配时考虑了缓冲区占用量的影响,因此初始几帧的缓冲区占用量没有超出上限很多。经过几帧的调整,提出的算法使得缓冲区占用量迅速保持在缓冲区的上下限内,之后保持平稳的状态,这说明本算法更适用于低延时的航空应用场合。

4.2 瞬时码率准确性

瞬时码率准确性的直观体现为每帧比特消耗的波动情况。如图 4 所示,相比于 HM16.0 中的算法,本文算法有效抑制了帧间比特消耗的波动,每帧的编码输出趋近恒定值  $R/f$ ,这使得缓冲区能更平稳,更适合航拍视频低延时的要求。

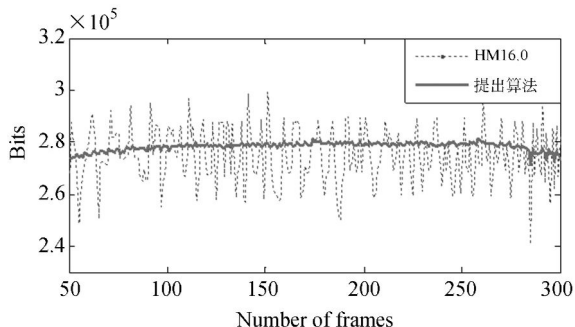


图 4 两种方法下每帧比特消耗波动曲线对比  
Fig. 4 Comparison fluctuation of frame bits cost

4.3 码率控制误差

码率控制误差体现了算法对输出码率的控制能力,误差越小,说明算法的码率控制能力越好。初始设置的目标码率与编码实际输出码率间相对误差定义为码率控制误差  $\Delta R$ ,如公式(23)所示:

$$\Delta R = \frac{|R_{target} - R_{actual}|}{R_{target}} \times 100\% \quad (23)$$

其中:  $R_{target}$  为初始设置的目标码率,  $R_{actual}$  为编码后实际的输出码率。表 2 给出了两种方法下编码实际输出的码率和相应的码率控制误差。由表可知,本文所提算法的实际输出码率更接近目标码率,码率控制误差降低到 HM16.0 的 2/5。

表 2 码率控制误差对比

Tab. 2 Comparison of rate control error

	HM16.0	本文方法
$R_{actual}/\text{kbps}$	8 391.472	8 389.776
$\Delta R/\%$	0.034	0.014

4.4 图像客观质量

重建图像与原始图像的峰值信噪比 PSNR 是广泛使用的评鉴图像客观质量的方法,以分贝 (dB) 为单位。图 5 为序列中每帧亮度分量的 PSNR 波动情况。由于序列的第一帧使用帧内编码,因此两种算法获得的 PSNR 值均较高。经过几帧编码后,提出算法的 PSNR 处于一个稳定的波动范围内,并且略高于 HM16.0 编码输出的 PSNR 值,在 150 帧以后两算法获得的 PSNR 值均下降。但整体看来,提出的算法缩小了每帧间的 PSNR 差值,降低了重建视频的图像质量波动,更适合人眼观测。

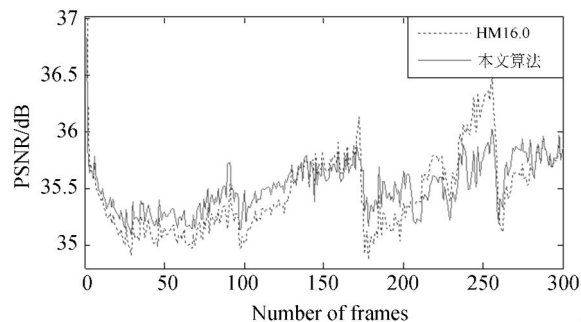


图 5 两种方法下每帧 PSNR 波动曲线对比  
Fig. 5 Comparison of PSNR fluctuation curves per frame

用 PSNR 的方差定量评价视频中图像质量

波动,如公式(24)所示:

$$Var = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (PSNR_i - \overline{PSNR})^2, \quad (24)$$

其中:  $PSNR_i$  为测试序列中第  $i$  帧的 PSNR 值,  $\overline{PSNR}$  为视频平均 PSNR,  $\overline{PSNR} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |PSNR_i|$ ,  $N$  为序列的总帧数。用  $\Delta PSNR$  定量评价图像质量增益,如公式(25)所示:

$$\Delta PSNR = \overline{PSNR}_i - \overline{PSNR}_b, \quad (25)$$

其中:  $\overline{PSNR}_b$  代表经 HM16.0 编码重建后的视频平均 PSNR,  $\overline{PSNR}_i$  表示经本文算法编码重建后的视频平均 PSNR。

表 3 对比了两种方法所得图像质量客观评价指标,虽然提出的方法对测试序列的图像质量增益仅为 0.044 dB,但有效缩小了 PSNR 的波动范围,视频中图像质量波动降低到 HM16.0 的 1/4 以内。

表 3 图像客观质量对比

	HM16.0	本文方法
$\overline{PSNR}/\text{dB}$	35.529	35.573
$\Delta PSNR/\text{dB}$	—	0.044
$Var$	0.23	0.05
PSNR 波动范围/dB	[34.86-41.35]	[35.07-36.81]

#### 4.5 图像主观质量

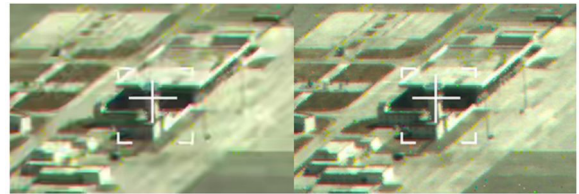
为证明提出的码率控制算法拥有更好的主观视频质量,随机选取测试视频中的某一帧进行实验分析。图 6 展示了两种方法下测试序列第 102 帧的主观质量,其中(a)为 HM16.0 中码率控制算法处理后解码重建的图像,(b)为所提算法处理后解码重建的图像。

为更好地对比两种方法下获得的重建图像质量,对图片中的相同区域局部细节进行放大比较。(c)(d)分别为图像(a)(b)中心矩形框所示区域的局部细节放大图。(e)(f)分别为图像(a)(b)左下角矩形框所示区域的局部细节放大图。

由(c)(d)的比较可见,(c)中的厂房较模糊,只能分辨出一个个方框轮廓,道路上更小的细节信息淹没到平坦区域中。而(d)中仍能看到建筑物中的窗户,十字丝右侧的公路上的路灯依然可见。这是因为提出的算法在 LCU 层比特分配



(a) HM16.0 处理的图像 (b) 本文方法处理的图像  
(a) Image processed by HM16.0 (b) Image processed by proposed method



(c) (a) 中的中心区域 (d) (b) 中的中心区域  
(c) Center area of (a) (d) Center area of (b)



(e) (a) 中的背景区域 (f) (b) 中的背景区域  
(e) Background of (a) (f) Background of (b)

图 6 测试序列第 102 帧图像主观质量对比

Fig. 6 Comparison of subjective visual quality of the 102th test sequence

时,充分考虑了视频特性的影响,因此编码重建后的图像能够更好地保留图像细节信息,有利于航空侦察时对目标的有效识别与跟踪。由 6(e)、(f) 的比较可见,两种处理方法下,获得的重建图片主观效果差别不是很大。这是因为相比于 HM16.0 中的方法,虽然分配到平坦区域的比特数较少,但由于平坦区域的视觉敏感度较低,因此平坦区域的主观质量没有受到影响。而且相比之下,经提出算法编码重建后的地貌轮廓更清晰一些,有利于航空侦查时对目标的有效定位。

由于提出的算法以每个 LCU 的复杂度为权重,预分配 LCU 层目标比特,考虑了视频特性对编码比特的影响,减少平坦区域的比特消耗,为细节丰富的区域多分配比特,因此提出的算法相比

于 HM16.0 中的算法,表现出了较好的主观质量。

综合上述实验结果可以看出:本文提出的算法有效地抑制了帧间比特消耗的波动,使得缓冲区能在一个小范围内平稳波动,能够更准确地控制输出码率,虽然图像质量增益没有显著提升,但提出的算法可以更好地抑制每帧间图像质量的波动,适合人眼观测。同时,由于 LCU 层比特分配时考虑了视频特性的影响,提出的算法相比于 HM16.0 中的算法,表现出了更好的主观质量。

## 5 结 论

本文根据无人机机载侦察视频的特性及低延

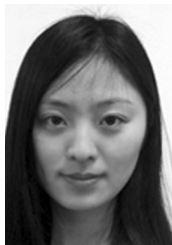
时的应用需求,提出了一种新的自适应比特分配的码率控制算法。综合考虑当前 GOP 内剩余比特与当前缓冲区状态后,合理预分配帧层比特;为了降低算法复杂度,快速、准确地获得图像复杂度,选用高效且简单的梯度算子衡量每个 LCU 的复杂度,从而为每个 LCU 分配符合自身特性的比特数。

实验结果证明:相比于 HM16.0 的方法,提出的算法对帧间比特消耗波动有很好的抑制作用,使得缓冲区占用量能在小范围内平稳波动,适用于低延时的航空侦察场合;码率控制误差降低到 HM16.0 的  $2/5$ ,能更准确地控制输出码率;视频中图像质量波动降低到 HM16.0 的  $1/4$  以内,并且有效地改善了图像主观质量。

## 参考文献:

- [1] 王源源,黄大庆. 无人机侦查图像压缩[J]. 光学精密工程,2014,22(5):1363-1370.  
WANG Y Y, HUANG D Q. Compression for UAV reconnaissance images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1363-1370. (in Chinese)
- [2] 赵文达,赵建,曲锋,等. 嵌入式千兆网高清视频传输系统设计[J]. 液晶与显示,2014,29(3):383-388.  
ZHAO W D, ZHAO J, QV F, *et al.*. Design of embedded gigabit ethernet system for transmisson of HD video [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(3): 383-388. (in Chinese)
- [3] 李艳辉,历明,周凌,等. 基于模型匹配的光电侦查无人机飞行控制器设计方法[J]. 红外与激光工程,2015,44(2):693-698.  
LI Y H, LI M, ZHOU L, *et al.*. UAV flight controller design method based on model matching used for eletro-optical reconnaissance[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 693-698. (in Chinese)
- [4] 赵春蕾,戴明,孙丽娜,等. H. 264/AVC 码率控制中初始量化参数的估计[J]. 光学精密工程,2014,22(9):2553-2564.  
ZHAO CH L, DAI M, SUN L N, *et al.*. Estimation of initial quantization parameters for H. 264/AVC rate control [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9):2553-2564. (in Chinese)
- [5] 孙乐,戴明,陈晓露,等. 基于人眼视觉系统的 H. 264/AVC 码率控制算法[J]. 光学精密工程,2014,22(4):1020-1028.  
SUN L, DAI M, CHEN X L, *et al.*. H. 264/AVC rate control algorithm based on human visual system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4): 1020-1028. (in Chinese)
- [6] SULLIVAN G J, OHM J R, HAN W J, *et al.*. Overview of the High Efficiency Video Coding (HEVC) standard [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2012, 22(12):1649-1650.
- [7] 吴笑天,鲁剑锋,王宇庆,等. 基于 DM368 的无人机视频压缩系统的设计[J]. 液晶与显示,2014,29(6):1117-1123.  
WU X T, LU J F, WANG Y Q, *et al.*. Design of UAV video encoding system based on DM368[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(6):1117-1123. (in Chinese)
- [8] 王行行. 基于 TMS320DM8168 的视频编码系统研究与实现[J]. 红外与激光工程,2014,43(5):59-64.  
WANG H H. Research and implement on video coding system based on TMS320DM8168 [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 59-64. (in Chinese)
- [9] LI Z G, PAN F, LIM K P, *et al.*. Adaptive basic unit layer rate control for JVT (JVT-G012) [C]. *Joint Video Team (JVT) 7th Meeting*, JVT-G012, 7-14 Mar, 2003.
- [10] WANG SH SH, MA S W, WANG SH Q, *et al.*. Rate-GOP based rate control for high efficiency video coding [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2013, 7(6):1101-1111.

- [11] LI B, LI H Q, LI L, *et al.*. Rate control by R-lambda model for HEVC [C]. *Joint Collaborative Team on Video Coding (JCT-VC) 11th Meeting, JCTVC-K0103*, 10-19 Oct., 2012
- [12] KARCZEWICZ M, WANG X L. Intra frame rate control based on SATD [C]. *Joint Collaborative Team on Video Coding (JCT-VC) 13th Meeting, JCTVC-M0257*, 18 - 26 Apr. 2013.
- [13] JCT-VC. JCTVC-Software (HM16.0)[OL]. [https://hevc.hhi.fraunhofer.de/svn/svn\\_HEVC-Software/tags/HM-16.0/](https://hevc.hhi.fraunhofer.de/svn/svn_HEVC-Software/tags/HM-16.0/).
- [14] WANG M H, NGAN K N, LI H L. An efficient frame-content based intra frame rate control for high efficiency video coding [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015,22(7):896-900.
- [15] XU M, DENG X, LI SH X, *et al.*. Region-of-interest based conversational HEVC coding with hierarchical perception model of face [J]. *IEEE Journal of Selected Topic in Signal Processing*, 2014,8(3):475-489.
- [16] ZHAO D D, ZHOU Y J, WANG D Y, *et al.*. An efficient intra-frame rate control algorithm for H.264/AVC video coding[J]. *Journal of Wuhan University (Science)*, 2012,17(3):243-248.

**作者简介:**

赵春蕾(1989—),女,吉林通化人,博士研究生,2011年于长春理工大学获得学士学位,主要从事视频压缩的研究。  
E-mail:zhao15948020937@163.com

**导师简介:**

戴明(1965—),男,湖北潜江人,博士生导师,研究员,1993年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光电平台稳定技术、图像稳定技术及航空光电成像技术方面的研究。E-mail: daim@vip.sina.com

(版权所有 未经许可 不得转载)