http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0357

低空通信环境下基于双层博弈的LCU级视频比特分配算法

张雅霏[1,2]，刘露露[1]，于金池[1,2]，朱迪锋[1,3,*]，龚轩[1]，高毅[1]

(1. 北京航空航天大学杭州创新研究院，杭州 310051；2. 北京航空航天大学 软件学院，北京 100191；
3. 浙江越秀外国语学院，绍兴 312030)

摘　　要：针对低空通信场景下视频编码效率低与码率利用率不足的问题，提出一种基于双层混合博弈模型的最大编码单元(LCU)级比特分配(BA)优化(HGLA)算法。该算法以LCU为基本单元，依据纹理复杂度、运动强度与边缘信息进行区域划分，并构建高、低复杂度区域的差异化BA机制，其中，高复杂度区域通过非合作博弈与合作博弈相结合实现比特协调分配，低复杂度区域引入空间加权机制以提高码率利用率，并采用全局量化参数(QP)平滑策略增强视觉连续性。在4种低码率场景下进行实验验证，所提算法在峰值信噪比(PSNR)、结构相似性指数(SSIM)和主观质量方面均取得显著提升，特别是在目标码率为16 Kbit/s时，相比高效视频编码(HEVC)模型采用的码率控制(RC)算法HM-RC、基于帧级多层感知机(MLP)的BA算法、基于简化立方率失真模型的帧内RC算法、基于通用视频编码(VVC)的变分辨率RC算法4种典型算法，PSNR、SSIM和主观意见得分(MOS)分别平均提升了3.34%、2.16%和9.8%，表明其在码率利用效率和图像质量保持方面具有良好的实用性与适应性。

关 键 词：码率控制；低码率；博弈论；比特分配；低空视频可靠传输
中图分类号：V221^{+}.3; TB553
文献标志码：A　　**文章编号**：1001-5965(2026)09-3146-07

随着低空经济的快速发展，无人机等小型飞行器在低空领域的应用场景日益丰富。然而，高移动性及空地网络中信号干扰的加剧导致低空通信场景下的网络带宽波动较大，并在一定时间范围内表现出带宽资源受限的问题。近年来，无人机已广泛应用于智慧城市的公共安全、综合治理、应急响应、城市交通管理和环境监测等领域[1]。视频作为继文本、图像和音频出现之后的重要信息载体，在低空平台中的作用尤为突出[2]，同时，在无人机领域同样展现出不可或缺的重要性。无人机依靠视频传输实现远程感知与实时回传，支持监控、侦察和搜救等关键任务。然而，受限于复杂多变的低空通信环境，尤其是在带宽受限的条件下，实现低码率下的高质量视频传输仍是一项关键挑战。

解决上述问题的方法之一是码率控制(rate control, RC)中的比特分配(bit allocation, BA)算法。RC在视频编码中起着关键作用，其目标是在给定带宽条件下，优化BA和量化参数(quantization parameter, QP)选择，从而实现码率与视觉质量之间的有效平衡，并确保BA符合目标码率的要求。RC共有2个关键步骤：BA和QP选择[3]。其中，BA作为RC的关键步骤，旨在依据视频内容复杂度和重要性，在不同编码单元间合理分配有限比特资源。目前，BA主要在图像组(group of pictures,

收稿日期：2025-06-09；**录用日期**：2025-08-15；**网络出版时间**：2025-09-03 11:40
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20250903.0846.001
基金项目：浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划(2024C01079)
* **通信作者**. E-mail：zhudf@buaa.edu.cn

引用格式：*张雅霏，刘露露，于金池，等. 低空通信环境下基于双层博弈的LCU级视频比特分配算法[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(9)：3146-3152. Zhang Y F，Liu L L，Yu J C，et al. LCU-level video bit allocation algorithm based on two-layer game in low-altitude communication environment[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(9)：3146-3152 (in Chinese)*.

GOP)、帧和最大编码单元(largest coding unit, LCU)等编码层级上进行, LCU 级别由于具备更细粒度的控制能力, 在低码率场景下尤显重要。

在带宽资源有限的条件下, BA 问题本质上是资源博弈问题。博弈论是解决资源分配问题的有效建模策略, 为资源竞争建模提供了数学框架, 在解决资源分配和冲突优化中具有天然优势, 因此, 近年来被广泛引入到视频编码领域[4]。

针对博弈论与 BA 算法的融合, 相关文献[4-12]已开展了大量的实验研究及优化技术理论研究。大多数研究采用合作博弈模型以实现公平资源分配, 或采用非合作博弈模型以获取部分关键区域的性能最大化。但在低空应用场景中, 若视频内容复杂且码率资源紧张, 仅依赖单一博弈策略难以取得理想效果。合作博弈可能导致比特浪费, 非合作博弈则可能引发资源倾斜, 影响整体主观质量。

基于上述多维角度分析及综合考量, 本文提出基于双层混合博弈模型的 LCU 级 BA 优化 (LCU-level BA optimization based on two-layer hybrid game model, HGLA) 算法, 以提升低码率条件下的视频编码质量。该算法从 LCU 复杂度出发, 构建 2 级博弈结构, 首先, 根据综合复杂度因子将 LCU 划分为高复杂度区域和低复杂度区域; 其次, 在区域间构建第一层非合作博弈模型, 通过设计效用函数, 提升高复杂度区域所获比特; 最终, 在高复杂度区域内部采用合作博弈机制, 按复杂度公平分配比特。本文算法在保持整体公平性的同时兼顾关键区域质量, 有效提升了高动态、低带宽链路下的编码效率和视频主观质量。

1　相关工作

高效视频编码 (high efficiency video coding, HEVC) 的最终目的是在给定的带宽内为用户提供最佳的视频质量。为使编码码率与带宽保持更好的一致性, HEVC 中使用 RC 模块来保证视频质量。RC 技术的基本原理是综合考虑编码视频内容特性、信道带宽大小、缓存器状态等因素, 给编码视频选择一组最优的 QP。使用该组 QP 编码视频后产生的码率最接近信道带宽大小, 对应的重建视频质量最高[13]。RC 模块通常被分解为 2 步: BA 和编码参数的确定[14]。其中, BA 算法是 RC 中的关键部分, BA 算法通常根据不同编码层次进行划分, 一般分为 GOP 层、帧层及 LCU 层。但相对而言, 针对 LCU 层的研究较多, LCU 层可以结合局部复杂度指标实现更细粒度的比特资源调配。在 LCU 级别的 BA 研究中, 许多学者提出了结合人眼视觉、纹理特征、运动信息等指标进行优化的算法, 例如, 崔士明等[15]针对人眼感兴趣区域 (region of interest, ROI) 等图像内容特征, 设计了 BA 算法; Liu 等[16]基于多目标优化算法, 兼顾失真最小化、质量波动控制和码率约束 3 个方面的需求, 提出 BA 算法; He 等[17]提出一种考虑纹理和运动的时空信息的 BA 模型, 从而提升编码效率。这些算法在一定程度上提升了视频质量和比特利用率[18], 但也存在一定的局限性, 如对突变场景响应不足, 以及在低码率条件下, 非 ROI 可能存在质量严重下降等问题, 同时, 多目标优化算法计算复杂度高, 难以适应实时编码需求。尤其在低空通信场景中, 网络带宽资源有限且易受干扰波动, 使现有算法的不足更加突出。图 1 展示了低空场景下低码率视频传输的典型场景。

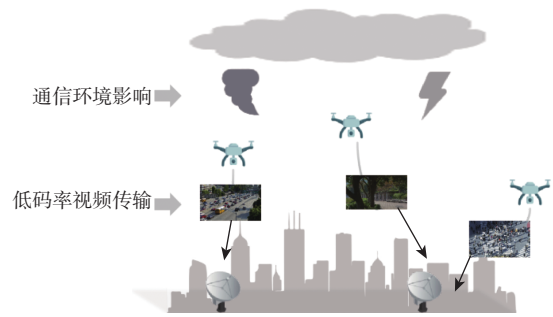

图 1　低空通信环境下低码率视频传输

Fig. 1　Low bit rate video transmission in low-altitude communication environment

近年来, 博弈论逐渐被引入到 BA 问题建模中, 以期通过模拟编码单元间的“竞争”与“协同”, 实现资源的动态高效分配。一般来说, 博弈论有 2 种不同的类型: 非合作博弈[19]和合作博弈[5,20]。在较早时期, Ahmad 等[6]首次提出将博弈模型用于 BA, 验证了其在资源调度中的适配性。后续研究则在不同编码层级探索合作与非合作博弈模型的应用。例如, Gao 等[10]将每个编码树单元(coding tree unit, CTU)视为一个独立博弈体, 基于帧内竞争分配比特资源; Zhao 等[12]基于全景图像的特征, 将博弈论引入到 360°视频编码的 RC 中, 并逐波段分配比特率; Liu 等[4]将帧划分为吸引人较多的 ROI 和非 ROI, 并结合非合作博弈进行 BA。尽管已有研究表明博弈理论在 RC 问题中的有效性, 但在面对极低码率的极端场景下, 这些方法仍显不足, 难以实现资源最优分配和视频质量保障。

在前期工作阶段, 通过文献 [2, 21], 运用主机状态感知的码率自适应算法和基于双尺度时间策略的带宽预测(dual-scale temporal strategy based bandwidth prediction, DTS-BWpredictor)算法, 成功获取了低码率条件下的码率自适应值。这些研究成果不仅为

本文奠定了坚实基础，也为实验分析提供了可靠的数据支持。此外，本文使用的实验数据均源自文献[2, 21]的实验结果，确保了研究的严谨性和科学性。

2 算法设计

在低码率的视频编码研究中，现有LCU层BA算法普遍存在2个方面不足：①区域特征建模缺乏针对性，现有算法往往忽视不同LCU在纹理复杂度和感知敏感度上的显著差异，导致比特资源配置与局部主观质量需求不匹配；②已有算法大多依赖启发式规则或单一博弈机制，缺乏区域间的竞争关系及区域内部的协同，难以在全局码率约束下实现比特利用率与视觉质量的双重最优。针对上述问题，本文构建了HGLA算法，根据博弈论进行建模，将不同区域间比特资源的动态竞争建模为非合作博弈，同时，在区域内部引入合作博弈机制以实现资源协同分配，并结合QP平滑策略以保证质量一致性。整体算法流程包含LCU复杂度计算与区域划分、区域间比特竞争的非合作博弈、区域内比特协同的合作博弈及空间领域内QP值平滑处理，具体过程如图2所示。

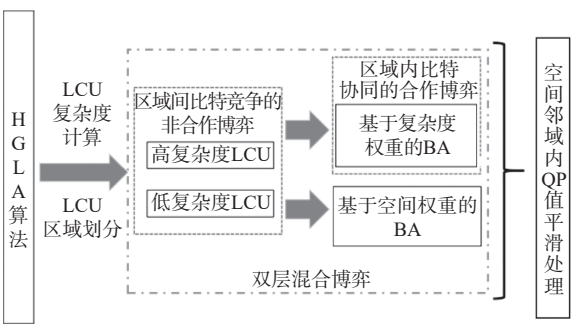

图2 HGLA算法

Fig. 2 HGLA algorithm

2.1 LCU复杂度建模与区域划分

每一帧内所有LCU的划分是后续进行双层混合博弈BA的基础和依据。视频图像帧被划分为若干LCU后，对每个LCU的内容复杂度进行建模。为充分体现亮度、纹理与运动等维度特征，本文引入多尺度加权机制构建LCU综合复杂度指标，在HEVC中LCU的尺寸为64×64。

2.1.1 LCU复杂度计算

将大小为$N\times M$的LCU划分为若干大小的LCU单元，对每个LCU构建其综合复杂度指标C_i，综合反映其结构细节和运动信息。本文采用如下加权模型进行建模：

$$C_i=\omega_1\sigma_i^2+\omega_2 G_i+\omega_3 M_i \tag{1}$$

式中：C_i为该帧内第i个LCU的综合复杂度；ω_1、ω_2和ω_3为经验值权重，设置为ω_1=0.4，ω_2=0.3，ω_3=0.3；σ_i^2为该LCU的灰度方差，反映亮度变化幅度，描述为

$$\sigma_i^2=\frac{1}{NM}\sum_{(x,y)\in L_i}(Y(x,y)-\mu_i)^2 \tag{2}$$

其中：(x,y)为第i个LCU在当前帧中的位置坐标；L_i为第i个LCU；$Y(x,y)$为像素值；μ_i为第i个LCU的平均亮度值。

G_i为第i个LCU的梯度强度均值，用于衡量纹理复杂度：

$$G_i=\frac{1}{NM}\sum_{(x,y)\in L_i}\sqrt{G_x^2+G_y^2} \tag{3}$$

式中：G_x、G_y分别为x、y轴方向梯度值。

当前LCU与上一帧对应位置LCU的平均绝对差M_i为

$$M_i=\frac{1}{NM}\sum_{(x,y)\in L_i}|Y_t(x,y)-Y_{t-1}(x,y)| \tag{4}$$

式中：t表示当前帧；t–1表示当前帧的前一帧。

2.1.2 LCU复杂度区域划分

根据2.1.1节LCU综合复杂度的计算方式，计算当前帧内所有LCU的C_i，并按照复杂度进行降序排序，取前30%的LCU作为高复杂度区域$\mathcal{H}$，则其余区域为低复杂度区域$\mathcal{L}$，表示为

$$\begin{cases}\mathcal{H}=\{L_i\mid C_i\geqslant\tau\}\\ \mathcal{L}=\{L_i\mid C_i<\tau\}\end{cases} \tag{5}$$

式中：τ为复杂度分布的70%分位数阈值。

通过以上计算，可以得到当前帧内所有LCU的分区。

2.2 双层混合博弈建模

在资源受限的编码场景中，不同复杂度区域对比特资源的需求存在显著差异。为在当前帧全局优化的框架下合理分配编码比特，本文采用分区级别的非合作博弈模型对高、低复杂度区域间的BA进行建模，而高复杂度区域内部采用合作博弈策略进一步细化其比特资源分配，以提升整体压缩效率。

2.2.1 区域间非合作博弈建模

设总比特预算为R_{T}，高、低复杂度区域请求的比特资源分别为R_{H}、R_{L}，且满足以下条件：

$$R_{\mathrm{H}}+R_{\mathrm{L}}\leqslant R_{\mathrm{T}} \tag{6}$$

为综合编码质量与系统成本，定义两者效用函数分别为

$$U_{\mathrm{H}}=\omega_{\mathrm{H}}(Q_{\max}-D_{\mathrm{H}}(R_{\mathrm{H}}))-\lambda_{\mathrm{H}}P(R_{\mathrm{H}})-\mu_{\mathrm{H}}\frac{R_{\mathrm{H}}}{R_{\mathrm{H}}+R_{\mathrm{L}}} \tag{7}$$

$$U_{\mathrm{L}}=\omega_{\mathrm{L}}\left(Q_{\max}-D_{\mathrm{L}}(R_{\mathrm{L}})\right)-\lambda_{\mathrm{L}}P(R_{\mathrm{L}})-\mu_{\mathrm{L}}\frac{R_{\mathrm{L}}}{R_{\mathrm{H}}+R_{\mathrm{L}}} \tag{8}$$

式中: $Q_{\max}$ 为最大图像质量的理想基准值; 下标 H、L 分别表示高、低复杂度区域; $D(R)=\alpha R^{-\beta}$ 为经验失真函数, α、β 为拟合参数, $P(R)=\gamma R$ 为比特资源成本函数, γ 为单位比特成本; ω 为区域复杂度的权重, 且 $\omega_{\mathrm{H}}>\omega_{\mathrm{L}}$, 即高复杂度区域更重视质量; λ 为资源惩罚系数; μ 为公平性控制项, 用于防止资源极端倾斜。

式 (7) 与式 (8) 类似, 主要关注质量的提升、资源惩罚及博弈中的公平性约束。

高复杂度区域更重视画质, 对资源使用更宽松, 即 λ_{H} 应较小。低复杂度区域偏向节省资源, 对资源消耗更敏感, 即 λ_{L} 应更大, 根据经验值设置 λ_{H}=0.05, λ_{L}=0.1。公平性控制项 μ 抑制某一方极端占用比特, 提高博弈公平性, 用于防止资源极端倾斜。高复杂度区域更强势, 若不给足够 μ_{H}, 容易主导比特资源分配, 因此, 设置 μ_{H}=0.8, μ_{L}=1.2, 使低复杂度区域有更多的博弈空间。

上述效用函数重点关注非合作博弈编码系统中的三重权衡: 编码质量、资源成本和博弈公平性。各区域参与者根据自身效用函数, 在竞争总比特预算 R_{T} 的同时, 最大化自身收益。

求解该博弈模型采用纳什均衡求解策略, 将 U_{H}、U_{L} 分别对 R_{H} 与 R_{L} 求偏导可得

$$\frac{\partial U_{\mathrm{H}}}{\partial R_{\mathrm{H}}}=-\omega_{\mathrm{H}}\frac{\mathrm{d}D_{\mathrm{H}}}{\mathrm{d}R_{\mathrm{H}}}-\lambda_{\mathrm{H}}\gamma-\mu_{\mathrm{H}}\frac{R_{\mathrm{L}}}{(R_{\mathrm{H}}+R_{\mathrm{L}})^2}=0 \tag{9}$$

$$\frac{\partial U_{\mathrm{L}}}{\partial R_{\mathrm{L}}}=-\omega_{\mathrm{L}}\frac{\mathrm{d}D_{\mathrm{L}}}{\mathrm{d}R_{\mathrm{L}}}-\lambda_{\mathrm{L}}\gamma-\mu_{\mathrm{L}}\frac{R_{\mathrm{H}}}{(R_{\mathrm{H}}+R_{\mathrm{L}})^2}=0 \tag{10}$$

对式 (9) 和式 (10) 联立, 并结合约束条件 (式 (6)), 求解最优 BA $(R_{\mathrm{H}}^{*},R_{\mathrm{L}}^{*})$。

2.2.2　高复杂度区域内的合作博弈

在获取区域间非合作博弈得到的比特预算 R_{H} 后, 高复杂度区域内部需要进一步细化分配策略, 以保证每个 LCU 在公平和效率之间达成平衡。高复杂度区域内部的 LCU 由于具备相似的编码挑战, 其目标一致, 即提高整体编码质量, 因此, 可以通过合作博弈建模该过程。合作博弈将每个参与者组建联盟, 协同优化集体利益, 并基于各自对整体的贡献进行资源分配。在高复杂度区域内部, 对所有 LCU 通过合作博弈共同争取区域内分配的比特预算 R_{H}。将各个 LCU 视为合作联盟的成员, 共同目标为最大化总体重建质量:

$$R_i=\frac{C_i}{\sum_{j\in\mathcal{H}}C_j}R_{\mathrm{H}}^{*}\qquad i\epsilon\mathcal{H} \tag{11}$$

通过归一化 LCU 的复杂度, 对所有 LCU 进行线性加权分配, 式 (11) 可以保证每个 LCU 获得的比特资源与其对视频质量的潜在贡献成正比, 从而保证在高复杂度区域内部进行 BA 的公平性。

2.3　低复杂度区域空间加权 BA

在低复杂度区域内部采用空间位置权重进行 BA。根据人眼视觉特性和图像信息分布规律, 中心区域通常更重要, 因此, 在低复杂度区域更关注中心区域的 BA。设低复杂度区域内部 LCU 的空间位置为 (x_i,y_i), 图像中心为 $(x_{\mathrm{c}},y_{\mathrm{c}})$, 定义空间权重为

$$W_i=\exp\left\{-\eta\left[(x_i-x_{\mathrm{c}})^2+(y_i-y_{\mathrm{c}})^2\right]\right\} \tag{12}$$

式中: η 为控制空间权重衰减强度的参数, 即 $\eta>0$ 时, 中心区域可以获得更多的比特, η 越大, 中心区域权重越大, 边缘区域权重更小, 根据经验值设定 η 值为 4.0。

2.4　QP 值平滑处理

RC 的 2 个关键步骤为 BA 和编码参数的确定。QP 为关键的编码参数, 本文使用 HEVC 的经典 RC 模型进行 QP 值的计算。

2.3 节已获得每个 LCU 的 BA 结果, 但 LCU 间易产生 QP 值跳变, 对视觉质量造成影响, 因此, 采用空间邻域加权平滑的策略。具体地, 设原始 QP 值为 Q_i, 其邻域 $N(i)$ 定义为与当前 LCU 共享边的 4 个邻域, 即上下左右 4 个 LCU, 则平滑后 QP 值为

$$\hat{Q}_i=(1-k)Q_i+k\frac{1}{|N(i)|}\sum_{j\in N(i)}Q_j \tag{13}$$

式中: k 为平滑系数, 控制原始 QP 与邻域均值之间的平衡, 根据经验值设定 k 值为 0.7。

3　实验与结果

3.1　实验环境与数据集

本文实验基于 Linux 系统 (Ubuntu18.04 版本) 的服务器实现, 在 HEVC 的参考软件 HM-18.0 基础上进行算法实现。测试视频序列选自 HEVC 标准测试序列集, 详细测试集序列如表 1 所示。编码配置采用低延迟 P 帧结构, GOP 长度为 8, 帧率为 30 帧/s, 码率范围设置为 16～512 Kbit/s, 覆盖典型低码率应用场景。

分别对 HGLA 算法、HEVC 模型采用的 RC 算法 HM-RC、基于帧级多层感知机 (multilayer perceptron, MLP) 的 BA 算法[22]、基于简化立方率失真模型的帧内 RC 算法[23]、基于通用视频编码 (versatile video coding, VVC) 的变分辨率 RC 算法[24] 比较。

3.2　低码率场景下实验结果

为验证本文算法在低码率场景下的 BA 效果, 分别在 4 种经典的低码率场景下进行实验对比, 码率值共分为 4 个阶段, 码率集合为 {16,128,256, 512} Kbit/s, 实验结果如表 2～表 5 所示。

表1 HEVC测试序列

Table 1 HEVC test sequence

类别	序列名称	帧数	帧率/(帧·s^{-1})
A	Traffic	150	30
A	PeopleOnStreet	150	30
A	Nebuta	300	60
A	SteamLocomotive	300	60
B	Kimono	240	24
B	ParkScene	240	24
B	Cactus	500	50
B	BasketballDrive	500	50
C	RaceHorses	300	30
C	BQMall	600	60
C	PartyScene	500	50
C	BasketballDrill	500	50
D	RaceHorses	300	30
D	BQSquare	600	60
D	BlowingBubbles	500	50
D	BasketballPass	500	50

表2 目标码率为16 Kbit/s场景下实验对比

Table 2 Experimental comparison under the target bit rate of 16 Kbit/s

算法	PSNR/dB	SSIM	MOS
文献[22]	32.50	0.869	3.14
文献[23]	33.06	0.887	3.25
文献[24]	33.53	0.891	3.45
HM-RC	32.01	0.862	3.08
本文	33.86	0.896	3.54

表3 目标码率为128 Kbit/s场景下实验对比

Table 3 Experimental comparison under the target bit rate of 128 Kbit/s

算法	PSNR/dB	SSIM	MOS
文献[22]	36.57	0.914	3.40
文献[23]	37.18	0.928	3.73
文献[24]	37.74	0.931	4.01
HM-RC	36.01	0.906	3.35
本文	37.89	0.934	4.05

表4 目标码率为256 Kbit/s场景下实验对比

Table 4 Experimental comparison under the target bit rate of 256 Kbit/s

算法	PSNR/dB	SSIM	MOS
文献[22]	38.72	0.921	3.84
文献[23]	39.18	0.936	4.06
文献[24]	39.63	0.940	4.12
HM-RC	38.27	0.918	3.68
本文	39.71	0.945	4.26

为验证本文算法在不同码率条件下的性能优势，选取目标码率为16 Kbit/s、128 Kbit/s、256 Kbit/s和512 Kbit/s这4种低码率场景下的典型带宽值，分别与现有代表性算法（文献[22-24]及HEVC官方参考模型HM-18.0的HM-RC）进行客观指标和主观评分对比。客观指标采用峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)和结构相似性指数(structural similarity index measure, SSIM)，主观评价采用主观意见得分(mean opinion score, MOS)。其中，MOS通过邀请20名无主观偏向的观众观看重建视频帧，采用1～5分等级评分，5分表示最优。实验结果如表2～表5所示。可见，本文算法相较其他4种算法，PSNR平均提升0.95 dB，SSIM平均提升0.017，MOS普遍高于其他4种算法。综上分析，本文算法在不同码率下均表现出优异的客观和主观性能，尤其在低码率条件下提升更为显著，验证了本文策略在低码率BA中的有效性和实用价值。

表5 目标码率为512 Kbit/s场景下实验对比

Table 5 Experimental comparison under the target bit rate of 512 Kbit/s

算法	PSNR/dB	SSIM	MOS
文献[22]	40.54	0.930	4.03
文献[23]	41.13	0.948	4.25
文献[24]	41.58	0.952	4.39
HM-RC	40.09	0.926	3.96
本文	41.76	0.957	4.41

为验证本文提出的各项因子对HGLA算法的影响，针对目标码率为512 Kbit/s的情况进行消融实验，分析每个因素的性能提升表现，具体分为如下5种情况：①HGLA；②无区域划分模型，移除复杂度计算与区域划分，采用统一BA；③仅非合作博弈，仅保留第一层博弈模型，在区域内部不进行合作分配；④无空间权重，移除图像中心区域的加权机制，低复杂区域比特均匀分配；⑤无QP平滑处理，直接使用BA的结果，不进行LCU间QP过渡处理。

从表6的实验结果可以看出，各关键模块对算法整体性能均具有显著贡献。与原始算法HGLA相比，在移除区域划分机制后，PSNR降至40.05 dB，

表6 本文提出的各项因子对HGLA算法的影响

Table 6 The influence of various factors proposed in this paper on the HGLA algorithm

实验配置	PSNR/dB	SSIM	MOS
HGLA	41.76	0.957	4.41
无区域划分模型	40.05	0.944	3.92
仅非合作博弈	40.49	0.948	4.01
无空间权重	41.31	0.949	4.07
无QP平滑处理	41.54	0.951	4.10

SSIM 降为 0.944, MOS 下降至 3.92, 表明区域划分对于复杂度表征与 BA 具有关键作用, 其缺失导致编码器在细节保留与视觉主观质量方面明显退化。

在仅保留非合作博弈第一层建模的情况下, PSNR 降为 40.49 dB, MOS 下降至 4.01, 说明高复杂度区域内部的合作 BA 机制在提升编码效率方面具有补充性作用。若移除空间权重机制(无空间权重), PSNR 和 SSIM 均出现轻微下降, MOS 从 4.41 降至 4.07, 说明图像中心区域权重机制在提升主观感知质量方面具备正向效益。

此外, 去除 QP 平滑处理导致 MOS 降低至 4.10, 尽管 PSNR 和 SSIM 变化较小, 但 MOS 下降达 0.31, 表明 LCU 间 QP 值过渡处理对图像自然感和连续性具有显著影响, 其缺失可能引入明显边缘断层等视觉伪影, 影响人眼感知。

综上分析可知, 各模块在不同层面提升了编码性能和视觉质量。区域划分为 BA 奠定合理结构, 双层博弈机制协同调控比特资源, 空间权重策略强化主观中心内容, 而 QP 平滑处理则优化了空间连续性与整体视觉体验。

4　结　论

1) 本文针对低空通信场景中存在的链路带宽普遍较低、码率利用率低与视频质量不稳定等问题, 研究并设计了一种面向低码率场景下的 LCU 级 BA 优化算法, 基于双层混合博弈理论构建全局 BA 模型, 结合 LCU 复杂度建模与区域划分策略, 分别对高复杂度区域引入非合作与合作博弈模型, 实现动态环境下编码资源的高效协同调度; 同时, 针对低复杂度区域引入空间加权机制与 QP 平滑处理方法, 在保证边缘视觉质量的同时, 有效抑制 QP 波动带来的视觉干扰。

2) 本文算法在不同程度低带宽下均表现出良好的自适应能力与鲁棒性, 在保证码率精度的同时, 显著提升了编码图像的主客观质量, 尤其在低比特率场景下, 具有更明显的优势。

未来工作可在本文研究基础上进一步引入跨帧博弈机制与强化学习方法, 实现帧间比特全局协同调控, 从而进一步提升编码系统在极端复杂场景下的智能感知与动态适应能力。

参考文献 (References)

[1] 余润泽, 苏敏杰, 周烨挺, 等. 低空智慧城市无人机系统网络安全分析及防护策略研究[J]. 电信工程技术与标准化, 2025, 38(3): 61-67.
Yu R Z, Su M J, Zhou Y T, et al. Analysis of network security and research on protection strategies for low altitude smart city unmanned aerial vehicle systems[J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2025, 38(3): 61-67(in Chinese).

[2] 朱迪锋, 张雅霏, 龚轩, 等. 高动态链路下基于主机状态感知的视频码率自适应算法[J/OL]. 北京航空航天大学学报, 2024 (2024-10-10)[2025-03-20]. https://link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20241009.1858.002.
Zhu D F, Zhang Y F, Gong X, et al. Host-state awareness based video bitrate adaptation algorithm in highly dynamic links[J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024 (2024-10-10)[2025-03-20]. https://link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20241009.1858.002(in Chinese).

[3] He J, Yang F Z. Efficient frame-level bit allocation algorithm for H.265/HEVC[J]. IET Image Processing, 2017, 11(4): 245-257.

[4] Liu Z Z, Pan X, Li Y M, et al. A game theory based CTU-level bit allocation scheme for HEVC region of interest coding[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2021, 30: 794-805.

[5] Gao W, Kwong S, Jia Y H. Joint machine learning and game theory for rate control in high efficiency video coding[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(12): 6074-6089.

[6] Ahmad I, Luo J C. On using game theory to optimize the rate control in video coding[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2006, 16(2): 209-219.

[7] Luo J C, Ahmad I, Sun Y. Controlling the bit rate of multi-object videos with noncooperative game theory[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2010, 12(2): 97-107.

[8] Park H, Van Der Schaar M. Bargaining strategies for networked multimedia resource management[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(7): 3496-3511.

[9] Wang X, Kwong S, Zhang Y. Applying game theory to rate control optimization for hierarchical B-pictures[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2013, 59(4): 591-601.

[10] Gao W, Kwong S, Zhou Y, et al. SSIM-based game theory approach for rate-distortion optimized intra frame CTU-level bit allocation[C]//Proceedings of the IEEE Transactions on Multimedia. Piscataway: IEEE Press, 2016: 988-999.

[11] Lin J L, Huang A P, Zhao T S, et al. λ-domain VVC rate control based on Nash equilibrium[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2023, 33(7): 3477-3487.

[12] Zhao T S, Lin J L, Song Y J, et al. Game theory-driven rate control for 360-degree video coding[C]//Proceedings of the 29th ACM International Conference on Multimedia. New York: ACM, 2021: 3998-4006.

[13] 公衍超, 王玲, 刘颖, 等. 视频主观观测实验启发的 HEVC 感知帧内码率控制[J]. 通信学报, 2021, 42(8): 90-102.
Gong Y C, Wang L, Liu Y, et al. HEVC perceptual intra-frame rate control inspired by video subjective observation experiment[J]. Journal on Communications, 2021, 42(8): 90-102(in Chinese).

[14] 李维, 杨付正, 任鹏. 考虑视频内容的 H.265/HEVC 帧层码率分配算法[J]. 通信学报, 2015, 36(9): 76-81.
Li W, Yang F Z, Ren P. H.265/HEVC frame-level bitrate allocation algorithm considering video content[J]. Journal on Communications, 2015, 36(9): 76-81(in Chinese).

[15] 崔士明, 黄新彭, 林兴斌, 等. 基于感兴趣区域及 LCU 特征的码率分配算法[J]. 工业控制计算机, 2024, 37(3): 15-17.
Cui S M, Huang X P, Lin X B, et al. Rate allocation algorithm

based on region of interest and LCU feature[J]. Industrial Control Computer, 2024, 37(3): 15-17(in Chinese).

[16] Liu F Y, Chen Z Z. Multi-objective optimization of quality in VVC rate control for low-delay video coding[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2021, 30: 4706-4718.

[17] He L Q, He X H, Xiong S H, et al. Efficient rate control in versatile video coding with adaptive spatial-temporal bit allocation and parameter updating[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2023, 33(6): 2920-2934.

[18] Biatek T, Raulet M, Travers J F, et al. Efficient quantization parameter estimation in HEVC based on ρ-domain[C]//Proceedings of the 2014 22nd European Signal Processing Conference. Piscataway: IEEE Press, 2014: 296-300.

[19] Nash J. Non-cooperative games[J]. The Annals of Mathematics, 1951, 54(2): 286.

[20] Driessen T. Cooperative games, solutions and applications[M]. Berlin: Springer, 1988.

[21] Zhu D F, Zhang Y F, Gong X, et al. DTS-BWpredictor: dual-scale temporal strategy based bandwidth prediction in highly dynamic links[J]. Computer Networks, 2025, 259: 111071.

[22] Raufmehr F, Salehi M R, Abiri E. A frame-level MLP-based bit-rate controller for real-time video transmission using VVC standard[J]. Journal of Real-Time Image Processing, 2021, 18(3): 751-763.

[23] Wang Y Z, Zhang J Q, Sun S L. Rate control for VVC intra coding with simplified cubic rate-distortion model[C]//Proceedings of the 2023 IEEE 25th International Workshop on Multimedia Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.

[24] Fu T L, Zhang K, Zhang L, et al. Rate control with resolution changes for VVC[C]//Proceedings of the 2023 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-5.

LCU-level video bit allocation algorithm based on two-layer game in low-altitude communication environment

ZHANG Yafei[1, 2], LIU Lulu[1], YU Jinchi[1, 2], ZHU Difeng[1, 3, *], GONG Xuan[1], GAO Yi[1]

(1. Hangzhou Innovation Institute of Beihang University, Hangzhou 310051, China;
2. School of Software, Beihang University, Beijing 100191, China;
3. Zhejiang Yuexiu University, Shaoxing 312030, China)

Abstract: This paper addresses the issues of low video coding efficiency and insufficient bit rate utilization in low-altitude communication scenarios by proposing an largest coding unit (LCU)-level bit allocation (BA) optimization based on two-layer hybrid game model (HGLA) algorithm. Using the LCU as the basic unit, the algorithm performs region partitioning according to texture complexity, motion intensity, and edge information, and establishes a differentiated BA mechanism for high- and low-complexity regions. In particular, a combination of cooperative and non-cooperative game models is used for high-complexity regions to achieve coordinated BA; for low-complexity regions, a global quantization parameter (QP) smoothing strategy and a spatial weighting mechanism are introduced to improve bit rate utilization efficiency and visual continuity. Finally, experimental validation under four low-bit rate scenarios demonstrates that the proposed method achieves significant improvements in peak signal-to-noise ratio (PSNR), structural similarity index measure (SSIM), and subjective quality. Specifically, at the target bit rate of 16 Kbit/s, compared with four baseline methods including the high efficiency video coding (HEVC) rate control (RC) algorithm HM-RC and the frame-level multilayer perceptron (MLP)-based BA algorithm, the intra-frame rate control algorithm based on a simplified cubic rate-distortion model, and the variable-resolution rate control algorithm based on versatile video coding (VVC), the proposed method achieves average performance gains of 3.34%, 2.16%, and 9.8% in PSNR, SSIM, and mean opinion score (MOS), respectively, demonstrating its excellent practicality and adaptability in improving bit rate utilization efficiency and preserving image quality.

Keywords: rate control; low bit rate; game theory; bit allocation; reliable transmission of low-altitude video

Received: 2025-06-09; **Accepted**: 2025-08-15; **Published Online**: 2025-09-03 11:40

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20250903.0846.001

Foundation item: Zhejiang Provincial "Pioneer" and "Leading Goose" R&D Program (2024C01079)

* **Corresponding author**. E-mail: zhudf@buaa.edu.cn