



دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری
پژوهش‌های نوین در مهندسی برق و الکترونیک هوایی
<https://www.mreca.ir>



کنترل فازی نرخ بیت ویدئو در استاندارد HEVC چندنما

فرهاد رئوف‌مهر^{۱*}، عطیه حسینی^۲، مهدی رضائی^۳

^۱دانشگاه سیستان و بلوچستان، farhad.raufmeh@gmail.com

^۲دانشگاه سیستان و بلوچستان، atiye.hosseini@gmail.com

^۳دانشگاه سیستان و بلوچستان، mehdi.rezaei@ece.usb.ac.ir

واژگان کلیدی

نرخ بیت
کنترل
فازی
چندنما
ویدئو
استاندارد MV-HEVC

چکیده

تصاویر و ویدئوی دیجیتال، از جمله سیگنال‌های مورد مبادله در سامانه‌های ارتباطی دیجیتال هوایی می‌باشند. اما، محدودیت پهنای باند و حجم بافر، از جمله چالش‌های انتقال این دسته از سیگنال‌ها است، که برای مقابله با آن از ابزاری به نام کنترل کننده نرخ بیت استفاده می‌شود. در این مقاله، یک کنترل کننده فازی نرخ بیت (FRC) ویدئو برای استاندارد MV-HEVC پیشنهاد شده است. FRC به منظور اعمال محدودیت‌های بافرسازی رشته بیت، از بافرهای مجازی جداگانه برای هر یک از نماها بهره می‌گیرد. این روش، نرخ بیت همه‌ی نماها را از طریق تنظیم پارامتر کمی‌سازی (QP) در سطح گروه-تصویر (GOP) کنترل می‌کند. کنترل کننده پیشنهادی از نوسانات غیرضروری QP جلوگیری می‌کند زیرا این عامل، تأثیر مستقیم بر روی پایداری کیفیت ادراکی ویدئوی بازسازی شده دارد. در نهایت کنترل کننده مذکور در نرم‌افزار مرجع استاندارد پیاده‌سازی و مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج آزمایشات ثابت می‌کنند که کنترل کننده پیشنهادی با دقت ۹۹/۱۰ درصد به نرخ بیت هدف دست یافته و محدودیت‌های بافر را رعایت می‌کند. علاوه بر این، عملکرد نرخ-عوجاج FRC تنها ۰/۰۱dB با روش کدگذاری توسط پارامتر کمی‌سازی ثابت اختلاف دارد.

۱- مقدمه

حرکت، بازدهی فشرده‌سازی بالاتری نسبت به استاندارد تک‌نما دارد. اما انتقال ویدئوهای چندنما همچنان یک چالش بزرگ در مسیر خدماتی است که با محدودیت‌های از جمله پهنای باند و تأخیر بافرسازی مواجه‌اند. از این رو، طراحی یک الگوریتم کنترل نرخ بیت^۲ (RCA) متناسب با محدودیت‌های نامبرده ضروری می‌باشد. طراحی این الگوریتم باید به گونه‌ای باشد که بتواند ضمن انطباق بر محدودیت‌های بافرسازی و پهنای باند، بین بازدهی فشرده‌سازی و کیفیت ویدئو یک مصالحه برقرار سازد. کاربردهای ویدئو از منظر تأخیر قابل تحمل توسط کاربر به دو دسته کاربردهای با تأخیر کم و کاربردهای با تأخیر زیاد تقسیم می‌شوند. کاربردهای با تأخیر کم نظیر مکالمه‌ی تصویری نیازمند یک ویدئو با نرخ بیت ثابت (CBR)^۳ می‌باشند به نحوی که نرخ بیت میانگین در کوتاه مدت ثابت باشد. در مقابل

برداشت ویدئوهای چندنما، نسل جدیدی از خدمات چندرسانه‌ای را فراهم آورده که یک تجربه سه‌بعدی واقع‌گرایانه را برای تماشاگران خلق می‌کنند. از جمله‌ی این خدمات می‌توان به ویدئوهای سه‌بعدی، ویدئوهای با نقطه‌ی دید آزاد، همایش تصویری سه‌بعدی و مواردی از این قبیل اشاره نمود. این قبیل از سیگنال‌های ویدئویی، حجم عظیمی از داده را تولید می‌کنند. این پدیده از افزونگی‌های مکانی و زمانی نشأت می‌گیرد. از این رو، فشرده‌سازی ویدئوهای چندنما از طریق بهره‌گیری از افزونگی‌های مذکور به عنوان یک راه‌حل مناسب جهت تحقق محتوای سه‌بعدی معرفی شده است. MV-HEVC^۱ یک استاندارد فشرده‌سازی پیشرفته برای ویدئوهای چندنما می‌باشد [۱]. این استاندارد به دلیل بهره‌گیری از مراجع بین‌نمایی در تخمین

^۲ Rate Control Algorithm (RCA)

^۳ Constant Bit Rate (CBR)

^۱ Multi View-High Efficiency Video Coding (MV-HEVC)

کاربردهای با تأخیر زیاد مانند جاری سازی و پخش، به ویدئو با نرخ بیت متغیر (VBR)^۴ نیاز است به طوری که نرخ بیت میانگین در بلند مدت ثابت باشد. به بیانی دیگر، در کاربردهای با تأخیر زیاد، نوسانات کوتاه مدت نرخ بیت قابل پذیرش است. در حالت کلی، ویدئوهای VBR از کیفیت ادراکی بهتر و بازدهی فشرده سازی بالاتری نسبت به ویدئوهای CBR برخوردارند [۲].

در کنترل کننده های مرسوم ابتدا یک فرایند تخصیص بیت اجرا می شود. در این فرایند براساس محدودیت های عملی و ویژگی های ویدئو، تعداد بیت های مورد نیاز را برای هر بخش از ویدئو نظیر گروه تصویر (GOP)^۵، فریم^۶ و واحدهای پایه (BU)^۷ محاسبه می کند. سپس، پارامتر کمی سازی (QP)^۸ بر اساس تعداد بیت های تخصیص یافته و پیچیدگی کدگذاری محاسبه می شود. معمولاً برای انجام مراحل نامبرده از یک مدل نرخ-عوجاج (RD)^۹ استفاده می شود. پارامترهای مدل نرخ-عوجاج براساس نتایج کدگذاری به روزرسانی می شوند.

تاکنون کنترل کننده های متعددی برای استاندارد HEVC پیشنهاد شده است. اغلب این کنترل کننده ها متناسب با کاربردهای با نرخ بیت ثابت طراحی شده و از مدل نرخ-عوجاج بهره می برند [۳]. ابتدایی ترین کنترل کننده ها براساس مدل نرخ-پارامتر کمی سازی (R-Q)^{۱۰} طراحی شده اند [۳]. به عنوان مثال، در مرجع [۴] از یک مدل R-Q تربیعی استفاده شده است که بعدها مرحله تخصیص بیت آن توسط یک کنترل کننده ی فازی در مرجع [۵] اصلاح گردید. همچنین نمونه هایی از کنترل کننده های فازی PID^{۱۱} مجهز به مدل R-Q وجود دارد. علاوه بر موارد فوق، از مدل های R-Q لاپلاسی [۶] و نمائی [۷] نیز در طراحی کنترل کننده ها بهره گرفته شده است. نرخ- ρ (R- ρ)^{۱۲} مدلی دیگر است که در طراحی کنترل کننده ی نرخ بیت کاربرد دارد [۳]. ρ ، تعداد ضرایب تبدیل کمی شده ی غیرصفر را نشان می دهد [۳]. از جمله کاربردهای مدل R- ρ می توان به استفاده از نوع خطی آن در استاندارد HEVC [۹] و نوع تربیعی آن در استاندارد MV-HEVC اشاره نمود [۱۰]. اما موفق ترین مدل تا به امروز نرخ- λ (R- λ)^{۱۳} می باشد [۳]. λ شیب خط مماس بر منحنی RD را نشان می -

دهد [۳]. این مدل برای اولین بار توسط مرجع [۱۱] ارائه و بکارگیری شد. پس از آن، سایر پژوهشگران با انجام اصلاحاتی در مرحله ی تخصیص بیت و نحوه ی مدل سازی عوجاج، سعی در ارتقاء عملکرد این روش داشته اند. از جمله ی اصلاحات صورت گرفته در مرحله ی تخصیص بیت می توان به لحاظ کردن نواحی حرکت [۱۲]، پیچیدگی زمینه و تمرکز انرژی [۱۳] و اطلاعات مکان-زمان [۱۴] اشاره کرد. همچنین، می توان برای بهبود مدل سازی عوجاج، از معیارهای ادراکی نظیر شاخص تشابه ساختاری (SSIM)^{۱۴} [۱۵، ۱۶] و عوجاج قابل درک (JND)^{۱۵} [۱۷، ۱۸] بهره گرفت. یادگیری ماشین یک ترفند توانمند است که امروزه کاربرد گسترده ای در پردازش ویدئو دارد [۱۹]. از این رو می توان از یادگیری ماشین برای استخراج ویژگی های تصویر [۲۰، ۲۱] و تخمین دقیق RD [۲۲، ۲۳] بهره گرفت. با توجه به اینکه تخمین بین فریمی^{۱۶} منجر به انتشار عوجاج بر روی کل رشته ی ویدئویی می شود، عده ای از پژوهشگران اقدام به مدل سازی وابستگی کیفیت نموده تا از انتشار عوجاج در حین فرایند کنترل جلوگیری شود [۲۴، ۲۵]. در مرجع [۲۶] پژوهشگران توانستند با در نظر گرفتن وابستگی خطای کنترل در ضابطه ی کنترل، مقدار وابستگی خطا را کاهش بدهند. ضمناً، از مدل R- λ برای کنترل نرخ بیت سیگنال های ویدئویی ویژه ای نظیر ۳۶۰° [۲۷، ۲۸]، نقطه ابری^{۱۷} [۲۹]، محتوی صفحه^{۱۸} [۳۰]، مقیاس-پذیر^{۱۹} [۳۱] و سه بعدی^{۲۰} [۳۲] نیز استفاده شده است. نامی روش هایی که تاکنون مورد بررسی قرار گرفته اند، برای کنترل نرخ بیت کاربردهای VBR مناسب اند. برای اولین بار در یک پژوهش ایده کنترل نیمه فازی نرخ بیت بر روی استاندارد H.264/AVC^{۲۱} پیشنهاد گردید [۲]. با الهام گرفتن از این طرح، کنترل کننده های متناسب با کاربردهای VBR استاندارد HEVC ارائه گردید که قادرند نوسانات نرخ بیت را در سطح GOP [۳۳] و فریم [۳۴] سرکوب نمایند. نوع ارتقاء یافته ی این طرح نیز در مرجع [۳۵] به صورت یک کنترل کننده ی فازی-PID ارائه گردید. لازم به ذکر است که در برخی از مراجع کنترل کننده های فازی برای ویدئوهای مقیاس پذیر پیشنهاد شده است [۳۶، ۳۷]. الگوریتم های پیشنهاد شده در مراجع [۲، ۳۳-۳۷] عملیات کنترل را در یک گذر^{۲۱} انجام می دهند. نوع ویژه ای از کنترل کننده های VBR وجود دارند که عملیات کنترل را در دو گذر اجرا

^۴ Variable Bit Rate (VBR)

^۵ Group of Picture (GOP)

^۶ Frame

^۷ Basic Unit (BU)

^۸ Quantization Parameter (QP)

^۹ Rate-Distortion (RD)

^{۱۰} Rate-Quantization (R-Q)

^{۱۱} Proportional Integral Derivative (PID)

^{۱۲} Rate- ρ (R- ρ)

^{۱۳} Rate- λ (R- λ)

^{۱۴} Structural SIMilarity index (SSIM)

^{۱۵} Just Noticeable Distortion (JND)

^{۱۶} Inter-frame

^{۱۷} Cloud-point

^{۱۸} Screen Content

^{۱۹} Scalable

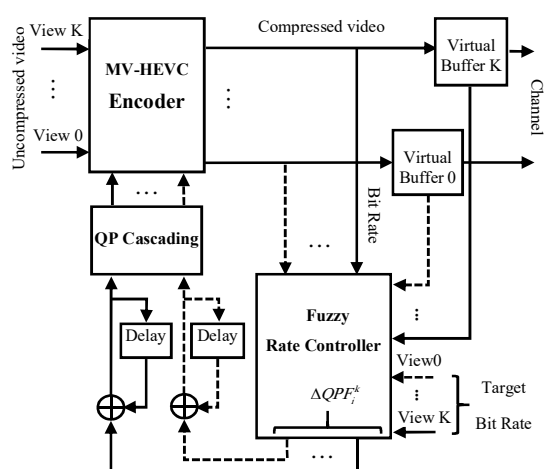
^{۲۰} ۳-Dimentional (3D)

^{۲۱} Pass

همچنین، این کنترل کننده عملکرد نرخ-اعوجاج مشابه با روش کدگذاری با پارامتر کمی سازی ثابت (CQP)^{۲۶} دارد. ادامه ی این مقاله بدین صورت مرتب شده است: بخش ۲ به جزئیات کنترل کننده ی پیشنهادی اختصاص داده شده است. بخش ۳ به بررسی نتایج پیاده سازی می پردازد. و در نهایت نتیجه گیری از مطالب این پژوهش در بخش ۴ آورده شده است.

۲- کنترل کننده ی نرخ بیت فازی پیشنهادی

در این الگوریتم، کنترل نرخ بیت از طریق تنظیم پارامتر کمی سازی در سطح گروه تصویر انجام می شود. نمودار بلوکی روش پیشنهادی در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل (۱): نمودار بلوکی کنترل کننده ی نرخ بیت پیشنهادی

اجزاء اصلی سیستم کنترلی پیشنهادی عبارتند از: ۱- کنترل کننده ی فازی و ۲- تعدادی بافر مجازی متناظر با هر نما. بافر مجازی برای اعمال محدودیت های بافر و تأخیر کدگشا بر روی رشته بیت کاربرد دارد. یک سیستم فازی نیز نرخ بیت ویدئوی را متناسب با دو سیگنال بازخورد^{۲۷} دریافتی از حجم مصرفی بافر و نرخ بیت تولیدی، کنترل می کند. فرایند محاسبه ی پارامتر کمی سازی براساس پدیده ی تشابه تصاویر پی درپی درون یک ویدئو انجام می شود. در ابتدا، پارامتر کمی سازی پایه گروه تصویر ماقبل به عنوان تخمین برای گروه تصویر کنونی مورد استفاده قرار می گیرد. سپس کنترل کننده ی فازی، میزان تغییرات پارامتر کمی سازی پایه را تعیین می کند. و در نهایت پارامتر کمی سازی پایه هر گروه تصویر براساس رابطه (۱) محاسبه می شود:

می کنند که برای کاربردهای غیربلادرنگ^{۲۲} مناسبند [۳۸-۴۰]. VVC^{۲۳} به روزترین استاندارد فشرده سازی ویدئو می باشد که در سال ۲۰۲۰ نسخه ی نهایی آن منتشر گردید [۴۱، ۴۲]. برای کاربردهای CBR و VBR این استاندارد، به ترتیب کنترل کننده هایی در مراجع [۴۳-۴۵] و [۴۶-۴۷] ارائه شده است. اغلب روش ها [۴-۹، ۱۱-۳۱، ۳۳-۴۰، ۴۳-۴۷] برای کدگذاری ویدئوهای تک نما کاربرد داشته و لذا به ویدئوهای چندنما قابل تعمیم نمی باشند. تا به امروز تعداد محدودی کنترل کننده ی نرخ بیت نیز مختص استاندارد MV-HEVC پیشنهاد شده اند. به عنوان مثال مقاله [۴۹]، کنترل کننده ی تک نما را در استاندارد MV-HEVC پیاده سازی کرده و ضمن تخمین میانگین تفاضل مطلق (MAD)^{۲۴} بین نمایی، اقدام به کنترل دقیق نرخ بیت نماهای جانبی نموده است. در مرجع [۵۰]، یک الگوریتم تخصیص بیت سطح فریم ارائه گردید. این الگوریتم براساس یک مدل نرخ-اعوجاج بازگشتی می باشد که از ویژگی های ویدئو و وابستگی های زمانی و بین نمایی بهره می برد. یک الگوریتم تخصیص بیت سطح فریم دیگر توسط مرجع [۵۱] برای MV-HEVC پیشنهاد گردید که مبنای محاسبات آن وابستگی های بین نمایی است. در این الگوریتم از اعوجاج نماهای مرجع جهت مدل سازی نرخ-اعوجاج نساویر در نماهای غیر مرجع استفاده می شود. سپس با بکارگیری این مدل نرخ-اعوجاج، تخصیص بیت بین نمایی به صورت یک مسئله ی بهینه سازی تعریف شده و در نهایت به روش ضرایب لاگرانژ حل می شود. روش های اشاره شده برای کاربردهای با نرخ بیت ثابت مناسب بوده و قابلیت پاسخ گویی به نیازمندی ها و بهره گیری از امکانات در کاربردهای با نرخ بیت متغیر را ندارند.

در این مقاله، یک الگوریتم کنترل نرخ بیت برای استاندارد MV-HEVC ارائه شده است. این الگوریتم با الهام گرفتن از مرجع [۲] طراحی شده و برای کاربردهای با نرخ بیت متغیر مناسب می باشد. الگوریتم پیشنهادی از یک کنترل کننده ی فازی برای تعیین پارامتر کمی سازی تحت محدودیت های بافر و پهنای باند استفاده می کند. الگوریتم پیشنهادی با جلوگیری از نوسانات غیرضروری پارامتر کمی سازی، نوسانات کیفیت را به حداقل رسانده و کیفیت ادراکی پایداری فراهم می آورد. کنترل کننده ی فازی پیشنهادی (FRC)^{۲۵} در نرم افزار مرجع استاندارد پیاده سازی شده و مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج آزمایشات با روش کدگذاری توسط پارامتر کمی سازی ثابت، مقایسه شده است. نتایج نشان می دهند روش پیشنهادی نرخ بیت تمامی نماها را کنترل کرده و از محدودیت های بافرسازی پیروی می کند.

^{۲۲} Non-real-time

^{۲۳} Versatile Video Coding (VVC)

^{۲۴} Mean Absolute Difference (MAD)

^{۲۵} Fuzzy Rate Controller

^{۲۶} Constant QP (CQP)

^{۲۷} Feedback

در رابطه‌ی (۳)، $O_{B_{min}}^k$ و $O_{B_{max}}^k$ به ترتیب حداکثر و حداقل میزان پری بافر در نمای k ام را نشان می‌دهند.

۲-۲- کنترل کننده‌ی فازی

کنترل کننده‌ی فازی، تغییرات پارامتر کمی‌سازی در هر گروه تصویر را براساس دو سیگنال بازخورد تعیین می‌کند. این دو سیگنال بازخورد عبارتند از بیت‌های مصرفی GOP قبلی و میزان حجم اشغال شده‌ی بافر پس از کدگذاری GOP قبلی در هر نما. به منظور همسان‌سازی مقیاس، سیگنال‌های بازخورد دریافتی نرمالیزه^{۲۸} می‌شوند. سیگنال بازخورد بافر با تقسیم بر اندازه بافر بهنجار می‌شود. همچنین، بهنجارسازی بازخورد دریافتی از تعداد بیت‌های مصرفی با تقسیم بر تعداد بیت هدف انجام می‌شود. بهنجارسازی سیگنال‌های بازخورد توسط روابط (۴) و (۵) صورت می‌گیرد:

$$X_1 = O_B^k / S_B^k \quad (4)$$

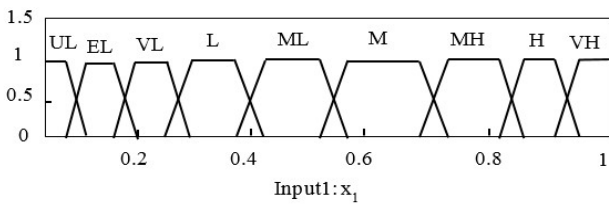
$$X_2 = \frac{B_{GOP}^k}{TR_{GOP}^k} \quad (5)$$

در رابطه‌ی (۴) اندازه‌ی بافر را نشان می‌دهد. تعداد بیت‌های مصرف شده توسط گروه تصویر ماقبل مستقر در k امین نما توسط B_{GOP}^k مشخص شده است. TR_{GOP}^k نیز تعداد بیت هدف برای گروه تصویرهای نمای k ام را مشخص می‌کند. رابطه‌ی (۶)، نحوه‌ی محاسبه‌ی تعداد بیت هدف را نشان می‌دهد:

$$TR_{GOP}^k = \frac{GOP_{Size} \times R_T^k}{F} \quad (6)$$

GOP_{Size} نماد تعداد فریم‌های گروه تصویر می‌باشد.

سیگنال‌های ورودی با توجه به توابع عضویت فازی (MSFs)^{۲۹} به مجموعه‌های فازی ورودی نگاشته می‌شوند. چنان‌که شکل (۲) نشان می‌دهد، برای ورودی اول و دوم به ترتیب به تعداد ۹ و ۷ تابع عضویت فازی دوزنقه‌ای در نظر گرفته شده است.



^{۲۸} Normalize

^{۲۹} Membership Functions (MSFs)

$$BaseQP_i^k = BaseQP_{i-1}^k + \Delta QPF_i^k \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۱)، $BaseQP_i^k$ پارامتر کمی‌سازی پایه‌ی گروه تصویر i ام مستقر در k امین نما می‌باشد. ΔQPF_i^k خروجی کنترل کننده‌ی فازی که تعیین کننده‌ی میزان تغییرات پارامتر کمی‌سازی است را نشان می‌دهد. در این مقاله به منظور جلوگیری از تجاوز از حدود بافر، ۰/۱۵ درصد و ۰/۸۵ درصد از حجم بافر به عنوان آستانه در نظر گرفته شده است. در مواقعی که مصرف بافر به آستانه پایین می‌رسد، مقدار پارامتر کمی‌سازی یک واحد آفست اضافه می‌شود. همچنین، زمانی که مصرف بافر به آستانه‌ی بالا می‌رسد، از مقدار پارامتر کمی‌سازی یک واحد آفست کاسته می‌شود. عمل افزودن و یا کاستن از پارامتر کمی‌سازی تنها یک مرتبه در هر گروه تصویر مجاز می‌باشد. در نهایت، پارامتر کمی‌سازی هر فریم، براساس نوع آن فریم و لایه‌ی زمانی^{۲۸} که در آن مستقر است، توسط ترفند پارامتر کمی‌سازی آبشاری^{۲۹} محاسبه می‌شود. جزئیات بیشتری از اجزاء اصلی کنترل کننده‌ی پیشنهادی در بخش‌های بعدی آورده شده است.

۲-۱- بافر مجازی

در این مقاله، به منظور کنترل مستقل نرخ بیت هر نما، از یک بافر مجازی مختص همان نما استفاده می‌شود. بافرهای مجازی وظیفه‌ی شبیه‌سازی فرایند بافرسازی در سمت کدگشا را بر عهده دارند. حجم اشغال شده‌ی هر بافر پس از کدگذاری هر فریم توسط طبق رابطه‌ی (۲) به‌روزرسانی می‌گردد:

$$O_B^k(i+1) = O_B^k(i) + (R_T^k / F) - B^k(i) \quad (2)$$

در رابطه‌ی (۲)، $O_B^k(i)$ میزان پر بودن بافر قبل از کدگذاری $i+1$ امین فریم مستقر در k امین نما را نشان می‌دهد. $B^k(i)$ تعداد کل بیت‌های هزینه شده جهت کدگذاری i امین فریم از نمای k ام را نمایش می‌دهد. R_T^k و F به ترتیب نمادهای نرخ بیت هدف^{۳۰} نمای k ام و نرخ فریم^{۳۱} می‌باشند. لازم به ذکر است که اندازه بافرهای مجازی براساس تأخیر اولیه‌ی بافرسازی قابل تحمل توسط کاربر تعیین می‌شود. در ابتدای فرایند کدگذاری فرض می‌کنیم که ۶۰ درصد از کل ظرفیت بافر مصرف شده است. بنابراین، تأخیر اولیه‌ی بافرسازی توسط رابطه‌ی (۳) محاسبه می‌شود:

$$Delay^k = \frac{0.6 \times (O_{B_{max}}^k - O_{B_{min}}^k)}{R_T^k} \quad (3)$$

^{۲۸} Temporal Layer

^{۲۹} QP cascading technique

^{۳۰} Target bit rate

^{۳۱} Frame rate

در رابطه‌ی (۷)، $f^k(X_1^k, X_2^k)$ خروجی سیستم فازی برای نمای k ام را نشان می‌دهد. مجموعه‌های فازی ورودی‌ها توسط نماد $\{A_i^1, A_i^2, \dots, A_i^{N_i}\}_{i=1,2}$ مشخص شده‌اند. علاوه بر این، $\{\mu_{A_i^1}(X_1)\}_{1 \leq i \leq N_1}$ و $\{\mu_{A_i^2}(X_2)\}_{1 \leq i \leq N_2}$ به ترتیب توابع تعلق فازی برای سیگنال‌های ورودی X_1 و X_2 را مشخص می‌کنند. نماد $\bar{y}^{i_1 i_2}$ مقدار مرکزی مطلوب خروجی سیستم فازی می‌باشد. جدول (۲)، مقادیر مرکزی مطلوب [۵۲] متناظر با جدول (۱) را نشان می‌دهد:

جدول (۲): مقادیر مرکزی متناظر با قوانین فازی

X_2^k	X_1^k									
		UL	EL	VL	L	ML	M	MH	H	VH
VH	۶	۶	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۰	۰
H	۶	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۰	۰	-۱
MH	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۰	-۱	-۲	-۳
M	۵	۴	۳	۲	۱	۰	-۱	-۲	-۳	-۴
ML	۴	۳	۲	۱	۰	-۱	-۲	-۳	-۴	-۵
L	۳	۲	۱	۰	-۱	-۲	-۳	-۴	-۵	-۶
VL	۲	۱	۰	-۱	-۲	-۳	-۴	-۵	-۶	-۷

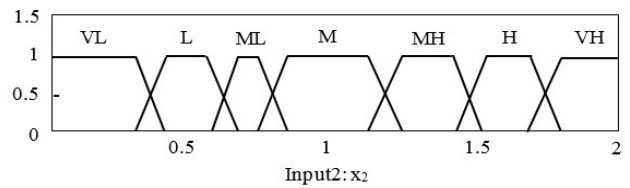
لازم به ذکر است توابع تعلق فازی و مقادیر مرکزی مطلوب، با توجه به نتایج آزمایشات و همچنین به کارگیری تجربیات فرد خبره، تعیین شده‌اند. شدت کنترل باید با محدودیت‌های بافر و محتوای ویدئوهای مختلف متناسب باشد. بدین منظور، خروجی کنترل کننده فازی در یک بهره‌ی ثابت مطابق رابطه‌ی (۸) ضرب می‌شود:

$$\Delta QPF_i^k = G_F^k \times f^k(X_1^k, X_2^k) \quad (۸)$$

در رابطه‌ی (۸)، G_F نماد بهره‌ی کنترل کننده می‌باشد که در بازه‌ی (۱، ۰/۵) تنظیم می‌شود. این بازه به صورت تجربی بدست آمده است. در مواردی که زمینه‌ی ویدئو پیچیده و یا شدت حرکت در ویدئو تند باشد، بهتر است که تغییرات QP با خروجی سیستم فازی برابر باشد. در غیر این صورت می‌توان شدت کنترل را اندکی کاهش داد.

۳- نتایج آزمایشگاهی

کنترل کننده‌ی پیشنهادی این مقاله (FRC) در نرم‌افزار مرجع استاندارد HEVC چندنما (موسوم به ۱۶۰-۱۶۰ HTM) پیاده‌سازی شده و مورد آزمایش قرار گرفته است. در این آزمایشات، روش پیشنهادی با روش کدگذاری با پارامتر کمی‌سازی ثابت (CQP) مقایسه شده است. ذکر این نکته ضروری است که CQP یک روش بدون کنترل بوده و ممکن است محدودیت‌های



شکل (۲): توابع عضویت فازی ورودی‌های سیستم فازی

سپس، خروجی‌های سیستم فازی از طریق نگاشت مجموعه‌های فازی ورودی براساس قوانین فازی بدست می‌آیند. در نهایت، خروجی‌های سیستم فازی به مقادیر حقیقی نگاشته می‌شوند. کنترل کننده فازی به منظور فراهم آوردن کیفیت ادراکی پایدار، از نوسانات غیرضروری پارامتر کمی‌سازی جلوگیری می‌کند. تمامی قوانین فازی کنترل کننده‌ی پیشنهادی در جدول (۱) آورده شده است:

جدول (۱): قوانین فازی برحسب متغیرهای زبانی

X_2^k	X_1^k									
		UL	EL	VL	L	ML	M	MH	H	VH
VH	AH	AH	AH	UH	EH	VH	H	MH	M	ML
H	AH	AH	UH	EH	VH	H	MH	M	ML	L
MH	AH	UH	EH	VH	H	MH	M	ML	L	VL
M	UH	EH	VH	H	MH	M	ML	L	VL	EL
ML	EH	VH	H	MH	M	ML	L	VL	EL	UL
L	VH	H	MH	M	ML	L	VL	EL	UL	AL
VL	H	MH	M	ML	L	VL	EL	UL	AL	AL

در جدول (۱) حروف L، M و H به ترتیب نماد «کم»، «متوسط» و «زیاد» می‌باشند. علاوه بر این، قیود زبانی توسط حروف U، E، V و A مشخص شده‌اند که به ترتیب نماد «بسیار»، «اضافی»، «فرا» و «مطلق» می‌باشند.

در طراحی کنترل کننده‌ی پیشنهادی از یک فازی‌ساز منفرد^{۳۴}، غیرفازی‌ساز میانگین مراکز^{۳۵} و موتور استنتاج فازی حاصل ضرب^{۳۶} استفاده شده است. در نتیجه، خروجی کنترل کننده فازی طبق رابطه‌ی (۷) محاسبه می‌شود [۵۲]:

$$f^k(X_1^k, X_2^k) = \frac{\sum_{i_1=1}^{N_1} \sum_{i_2=1}^{N_2} \bar{y}^{i_1 i_2} \mu_{A_{i_1}^1}(X_1^k) \cdot \mu_{A_{i_2}^2}(X_2^k)}{\sum_{i_1=1}^{N_1} \sum_{i_2=1}^{N_2} \mu_{A_{i_1}^1}(X_1^k) \cdot \mu_{A_{i_2}^2}(X_2^k)} \quad (۷)$$

^{۳۴} Singleton fuzzifier

^{۳۵} Center average defuzzifier

^{۳۶} Product inference engine

^{۳۷} Central desired value

بافر را رعایت نکند. دلیل انتخاب CQP برای مقایسه این است که این روش از کیفیت ادراکی بالایی بهره می‌برد. تمامی آزمایشات با کدگذاری ۳ نما از هر ویدئو تحت پیکربندی دستیابی تصادفی^{۳۸} انجام شده‌اند. ویدئوهای مورد استفاده در فرایند آزمایشات این بخش مطابق مندرجات جدول (۳) می‌باشد.

جدول (۳) نام و ویژگی‌های ویدئوهای مورد استفاده در آزمایشات				
ردیف	نام ویدئو	ابعاد	نرخ فریم	تعداد فریم
۱	Undo-Dancer	۱۹۲۰x۱۰۸۸	۲۵	۲۵۰
۲	GT-Fly	۱۹۲۰x۱۰۸۸	۲۵	۲۵۰
۳	Balloons	۱۰۲۴x۷۶۸	۳۰	۵۰۰
۴	Newspaper	۱۰۲۴x۷۶۸	۳۰	۳۰۰

در ابتدا تمامی ویدئوهای مندرج در جدول (۳) به روش CQP و با بکارگیری چهار پارامتر کمی‌سازی شامل (۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵) کدگذاری شده‌اند. سپس نرخ بیت حاصل از کدگذاری هر نما از ویدئوهای نامبرده، به عنوان نرخ بیت هدف در الگوریتم FRC تنظیم شده است. لازم به ذکر است که از تنظیمات پیش‌فرض استاندارد برای سایر پارامترهای کدگذاری استفاده شده است. تصاویر نوع-I^{۳۹} تنها در نمای پایه استفاده می‌شوند. به همین دلیل، اندازه‌ی بافر مورد استفاده در نمای پایه^{۴۰}، ۱/۵ برابر نرخ بیت هدف در نظر گرفته شده است. اما در سایر نماها حجم بافر برابر با نرخ بیت هدف انتخاب شده است. بهره‌ی کنترل‌کننده‌ی فازی برابر با ۰/۶۵ تنظیم شده است.

در جدول (۴) نتایج کدگذاری توسط دو الگوریتم FRC و CQP آورده شده است. در این جدول، الگوریتم‌های از نظر میانگین پارامتر کمی‌سازی، میانگین کیفیت مؤلفه‌ی شدت روشنایی بر حسب حداکثر نسبت سیگنال به نویز (PSNR)^{۴۱} مقایسه شده‌اند. علاوه بر این از معیار گرادیان مطلق میانگین (MAG)^{۴۲} برای اندازه‌گیری میزان نوسانات کیفیت، استفاده شده است. MAG براساس رابطه‌ی (۹) محاسبه می‌شود:

$$MAG(PSNR) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} |PSNR_{i+1} - PSNR_i| \quad (9)$$

در رابطه‌ی (۹)، N و i به ترتیب نماد تعداد کل فریم‌ها و شناسگر هر فریم در ترتیب نمایش، هستند. هرچه مقدار MAG بیشتر باشد، نوسانات کیفیت بیشتر است و این پدیده منجر به افت سطح کیفیت ادراکی می‌شود. براساس جدول (۴)، عملکرد روش پیشنهادی در مواردی از جمله: میانگین پارامتر کمی‌سازی، میانگین کیفیت و نوسانات کیفیت، بسیار مشابه با روش

CQP دارد. همچنین، روش پیشنهادی می‌تواند به نرخ بیت هدف تعیین شده برای هر نما دست یابد.

جدول (۴) نتایج مقایسه‌ی عددی روش پیشنهادی و کدگذاری با پارامتر کمی‌سازی ثابت

نام ویدئو	شماره نما	نام الگوریتم	میانگین QP	کیفیت PSNR			نرخ بیت (kbps)
				میانگین (dB)	نوسانات (dB)	تأخیر (S)	
Undo-Dancer	۰	CQP	۲۸/۰۸	۳۸/۸۰	۱/۳۶	۰/۲۹	۴۶۲۹/۴
		FRC	۲۸/۲۱	۳۸/۸۹	۱/۴۰	۰/۳۳	۴۶۸۵/۶
	۱	CQP	۳۱/۰۸	۳۷/۹۴	۱/۰۶	۰/۲۲	۱۰۵۱/۲
		FRC	۳۱/۱۱	۳۸/۰۱	۱/۰۸	۰/۲۴	۱۰۵۶/۲
	۲	CQP	۳۱/۰۸	۳۸/۱۱	۱/۱۰	۰/۲۲	۱۰۰۰/۵
		FRC	۳۱/۰۸	۳۸/۱۹	۱/۱۳	۰/۲۳	۱۰۱۵/۲
GT-Fly	۰	CQP	۲۸/۰۸	۴۰/۲۵	۱/۳۵	۰/۸۵	۳۶۹۹/۷
		FRC	۲۸/۰۵	۴۰/۱۸	۱/۳۷	۰/۴۰	۳۷۵۸/۳
	۱	CQP	۳۱/۰۸	۳۹/۶۵	۱/۲۱	۰/۷۷	۶۶۴/۱
		FRC	۳۱/۰۹	۳۹/۵۵	۱/۲۰	۰/۳۶	۶۶۴/۹
	۲	CQP	۳۱/۰۸	۳۹/۶۲	۱/۲۲	۰/۷۴	۶۸۴/۱
		FRC	۳۱/۱۲	۳۹/۵۱	۱/۲۲	۰/۳۵	۶۸۶/۷
Balloons	۰	CQP	۲۸/۰۸	۴۲/۰۸	۰/۷۴	۰/۳۶	۸۹۹/۴
		FRC	۲۸/۱۷	۴۲/۰۵	۰/۷۵	۰/۳۰	۹۰۲/۵
	۱	CQP	۳۱/۰۸	۴۲/۱۱	۰/۷۱	۰/۳۲	۳۷۷/۵
		FRC	۳۱/۱۳	۴۲/۰۹	۰/۷۱	۰/۲۵	۳۷۷/۲
	۲	CQP	۳۱/۰۸	۴۱/۷۹	۰/۶۷	۰/۳۱	۴۱۲/۲
		FRC	۳۱/۱۲	۴۱/۷۷	۰/۶۷	۰/۲۴	۴۱۴/۲
Newspaper	۰	CQP	۲۸/۰۸	۴۱/۳۶	۰/۴۲	۰/۳۹	۹۵۰/۴
		FRC	۲۸/۵۵	۴۱/۳۹	۰/۴۵	۰/۳۵	۹۵۳/۱
	۱	CQP	۳۱/۰۸	۴۰/۲۷	۰/۳۴	۰/۳۴	۳۵۶/۷
		FRC	۳۱/۶۵	۴۰/۲۵	۰/۳۷	۰/۳۲	۳۵۳/۰
	۲	CQP	۳۱/۰۸	۳۹/۸۶	۰/۳۲	۰/۳۹	۴۰۲/۷
		FRC	۳۱/۸۰	۳۹/۸۴	۰/۳۵	۰/۳۷	۳۹۸/۳
میانگین	۰	CQP	۲۸/۰۸	۴۰/۸۷	۰/۹۷	۰/۴۷	۲۵۴۴/۸
		FRC	۲۸/۲۵	۴۰/۸۸	۰/۹۹	۰/۳۴	۲۵۷۴/۹
	۱	CQP	۳۱/۰۸	۳۹/۹۹	۰/۸۳	۰/۴۱	۶۱۲/۴
		FRC	۳۱/۲۴	۳۹/۹۷	۰/۸۴	۰/۲۹	۶۱۲/۸
	۲	CQP	۳۱/۰۸	۳۹/۸۵	۰/۸۳	۰/۴۲	۶۲۴/۹
		FRC	۳۱/۲۸	۳۹/۸۳	۰/۸۴	۰/۳۰	۶۲۸/۶

طبق مندرجات جدول (۴)، مقدار میانگین تأخیر بافرسازی در نمای پایه در زمان به کارگیری روش پیشنهادی و روش CQP به ترتیب (S ۰/۲۹، S ۰/۴۷) می‌باشد. مقدار این کمیت برای نماهای ۱ و ۲ نیز به ترتیب عبارت است از: (S ۰/۲۹، S ۰/۴۱) و (S ۰/۲۹، S ۰/۴۱). اعداد اخیر حاکی از آن

^{۳۸} Random Access (RA) configuration

^{۳۹} I-Frame

^{۴۰} Base view

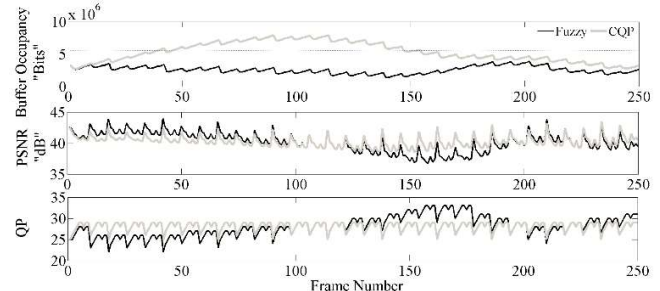
^{۴۱} Peak Signal to Noise Ratio (PSNR)

^{۴۲} Mean Absolute Gradient (MAG)

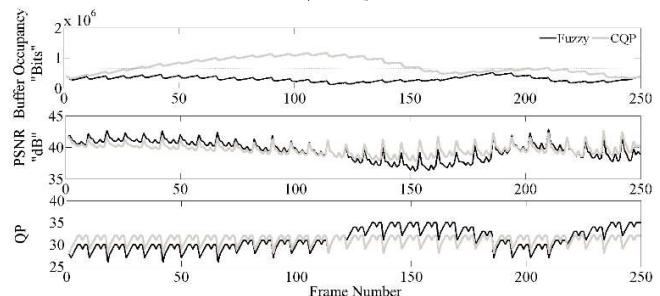
است که روش پیشنهادی در مقایسه با CQP توانسته است تأخیر بافرسازی کمتری فراهم آورد.

علاوه بر این، عملکرد نرخ-عوجاج روش پیشنهادی و CQP با بکارگیری معیار Bjøntegaard مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که میزان افت کیفیت روش پیشنهادی در مقایسه با CQP در نمای پایه، نمای ۱ و نمای ۲ به ترتیب ۰/۰۱۳ dB، ۰/۰۰۹ dB و ۰/۰۱ می‌باشد. این پدیده ناشی از تغییرات پارامتر کمی‌سازی در حین فرایند کنترل، می‌باشد.

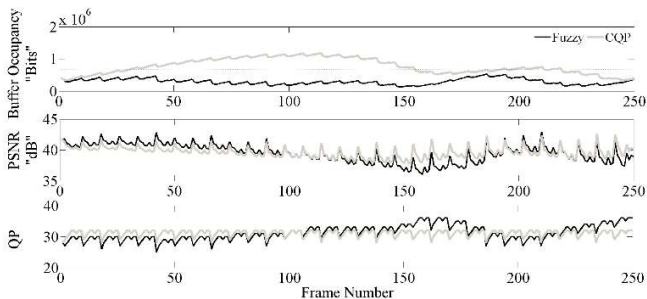
نتایج آزمایشات ثابت می‌کنند که روش پیشنهادی ضمن سرکوب نوسانات لحظه‌ای نرخ بیت به نرخ بیت هدف دست می‌یابد و همچنین از تجاوز از مرزهای بافر جلوگیری می‌کند. نتایج مقایسه‌ی گرافیکی روش‌های نامبرده بر روی ویدئوی GT-Fly در شکل (۳)، (۴) و (۵) نمایش داده شده است. در این اشکال، روش پیشنهادی و CQP از منظر: تغییرات پری بافر، تغییرات پارامتر کمی‌سازی و تغییرات کیفیت، مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.



شکل (۳) نمودار تغییرات پری بافر، تغییرات کیفیت و تغییرات پارامتر کمی‌سازی در نمای پایه



شکل (۴) نمودار تغییرات پری بافر، تغییرات کیفیت و تغییرات پارامتر کمی‌سازی در نمای ۱



شکل (۵) نمودار تغییرات پری بافر، تغییرات کیفیت و تغییرات پارامتر کمی‌سازی در نمای ۲

چنان‌که نمودار وضعیت بافر نشان می‌دهد، روش پیشنهادی محدودیت‌های بافر را رعایت کرده و از سرریز و پاریز بافر در تمامی نماها جلوگیری می‌کند. این در حالی است که روش CQP منجر به رخداد سرریز در برخی از حالات می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

محدودیت پهنای باند و حجم بافر از جمله چالش‌های انتقال ویدئو در سامانه‌های ارتباط دیجیتال هوایی می‌باشد. کنترل کننده‌ی نرخ بیت ابزاری سودمند برای مقابله با این نوع از چالش‌ها است. MV-HEVC، یک استاندارد چندنما می‌باشد که در آن کنترل نرخ بیت و سطح بافر در تمامی نماهای ویدئو ضرورت دارد. در این مقاله، با در نظر گرفتن چالش‌ها و ضرورت‌های فوق، یک کنترل کننده‌ی نرخ بیت ارائه گردید. روش پیشنهادی این مقاله که به اختصار FRC نام دارد، منطبق بر محدودیت‌های کاربردهای VBR می‌باشد. FRC، از QP مورد استفاده در GOP پیشین به عنوان تخمین استفاده نموده و سپس آن را با توجه به سیگنال‌های فیدبک به آرامی اصلاح می‌کند. اصلاح QP توسط یک کنترل کننده‌ی فازی صورت می‌گیرد که سیگنال‌های فیدبک، ورودی‌های آن می‌باشند. رشته بیت مصرفی و حجم بافر، دو سیگنال ورودی کنترل کننده را تشکیل می‌دهند. روش پیشنهادی در نرم‌افزار مرجع استاندارد پیاده‌سازی شده و مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج آزمایشات نشان می‌دهند که FRC نوسانات نرخ بیت را سرکوب کرده و با دقت ۹۹/۱۰ درصد، به نرخ بیت هدف دست یافته است. در ضمن، وضعیت حجم بافر نیز به درستی مدیریت شده و هیچ‌گونه تجاوزی از حدود بافر رخ نداده است. تحلیل RD نیز گواه آن است که عملکرد FRC تنها ۰/۰۱ dB با روش CQP فاصله دارد.

- [۲۱] Sun X, Yang X, Wang S, Liu M (۲۰۲۰) Content-aware rate control scheme for HEVC based on static and dynamic saliency detection. *Neurocomputing* ۴۱۱:۳۹۳-۴۰۰
- [۲۲] Zhang Z, Jing T, Han J, Xu Y, Zhang F (۲۰۱۷) A new rate control scheme for video coding based on region of interest. *IEEE Access* ۵:۱۳۶۷۷-۱۳۶۸۸
- [۲۳] Gao W, Kwong S, Jia Y (۲۰۱۷) Joint machine learning and game theory for rate control in high efficiency video coding. *IEEE Trans Image Process* ۲۶(۱۲):۶۰۷۴-۶۰۸۹
- [۲۴] Guo H, Zhu C, Xu M, Li S (۲۰۱۹) Inter-block dependency-based CTU level rate control for HEVC. *IEEE Trans Broadcast* ۶۶(۱):۱۱۳-۱۲۶
- [۲۵] Zhang M, Zhou W, Wei H, Zhou X, Duan Z (۲۰۲۰) Frame level rate control algorithm based on GOP level quality dependency for low-delay hierarchical video coding. *Signal Process: Image Commun* ۸۸:۱۱۵۹۶۴
- [۲۶] Chen Z, Pan X (۲۰۱۹) An optimized rate control for low-delay H. ۲۶۵/HEVC. *IEEE Trans Image Process* ۲۸(۹):۴۵۴۱-۴۵۵۲
- [۲۷] Li L, Yan N, Li Z, Liu S, Li H (۲۰۱۹) λ -Domain Perceptual Rate Control for λ -Degree Video Compression. *IEEE J Sel Top Signal Process* ۱۴(۱):۱۳۰-۱۴۵
- [۲۸] Nien Y-C, Tang C-W (۲۰۲۱) Region-level bit allocation for rate control of λ -degree videos using cubemap projection. *J Vis Commun Image Represent* ۹۹:۱۰۳۲۴۲
- [۲۹] Li L, Li Z, Liu S, Li H (۲۰۲۰) Rate Control for Video-Based Point Cloud Compression. *IEEE Trans Image Process* ۲۹:۶۲۳۷-۶۲۵۰
- [۳۰] Yang Y, Shen L, Yang H, An P (۲۰۱۹) A content-based rate control algorithm for screen content video coding. *J Vis Commun Image Represent* ۶۰:۳۲۸-۳۳۸
- [۳۱] Peng Z et al (۲۰۲۱) Inter-layer correlation-based adaptive bit allocation for enhancement layer in scalable high efficiency video coding. *Signal Process: Image Commun* ۹۵:۱۱۶۲۵۶
- [۳۲] Harshalatha Y, Biswas PK (۲۰۲۱) Structural similarity-based rate control algorithm for λ D video. *Multimed Tools Appl* ۸۰(۱۷):۲۵۸۹۷-۲۵۹۰۸
- [۳۳] Fani D, Rezaei M (۲۰۱۶) A GOP-level fuzzy rate control algorithm for high-delay applications of HEVC. *SIViP* ۱۰(۷):۱۱۸۳-۱۱۹۱
- [۳۴] Kamran R, Rezaei M, Fani D (۲۰۱۶) A frame level fuzzy video rate controller for variable bit rate applications of HEVC. *J Intell Fuzzy Syst* ۳۰(۳):۱۳۶۷-۱۳۷۵
- [۳۵] Fani D, Rezaei M (۲۰۱۷) Novel PID-Fuzzy Video Rate Controller for High-Delay Applications of the HEVC Standard. *IEEE Trans Circuits Syst Video Technol* ۲۸(۶):۱۳۷۹-۱۳۸۹
- [۳۶] Raufmehar F, Rezaei M (۲۰۱۸) Fuzzy logic-based scalable video rate control algorithm for highdelay applications of scalable high-efficiency video coding. *J Electron Imaging* ۲۷(۴):۰۴۳۰۱۳
- [۳۷] Shojaei M, Rezaei M (۲۰۲۰) FJND-based fuzzy rate control of scalable video for streaming applications. *Multimed Tools Appl* ۶۹(۱۹-۲۰):۱۳۷۵۳-۱۳۷۷۳
- [۳۸] Zupancic I, Naccari M, Mrak M, Izquierdo E (۲۰۱۶) Two-pass rate control for improved quality of experience in UHD TV delivery. *IEEE J Sel Top Signal Process* ۱۱(۱):۱۶۷-۱۷۹
- [۳۹] Wang S, Rehman A, Zeng K, Wang J, Wang Z (۲۰۱۶) SSIM-motivated two-pass VBR coding for HEVC. *IEEE Trans Circuits Syst Video Technol* ۲۷(۱۰):۲۱۸۹-۲۲۰۳
- [۴۰] Nakhaei A, Rezaei M (۲۰۲۰) Scene-level two-pass video rate controller for H. ۲۶۵/HEVC standard. *Multimed Tools Appl* ۸۰:۷۰۲۳-۷۰۳۸
- [۴۱] Hamidouche W et al (۲۰۲۲) Versatile video coding standard: A review from coding tools to consumers deployment. *IEEE Consumer Electronics Magazine* ۱۱(۵):۱۰-۲۴
- [۴۲] Bross B, Chen J, Ohm J-R, Sullivan GJ, Wang Y-K (۲۰۲۱) Developments in international video coding standardization after AVC,
- [۱] G. Tech, K. Wegner, Y. Chen, M. Hannuksela and J. Boyce, "MV-HEVC Draft Text ۹," JCT-۳V Doc., JCT۳V-I-۱۰۰۲, Sapporo, JP, Jul. ۲۰۱۴.
- [۲] Rezaei, M., Hannuksela, M.M., and Gabbouj, M.: 'Semi-fuzzy rate controller for variable bit rate video', *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, ۲۰۰۸, ۱۸, (۵), pp. ۶۳۳-۶۴۵
- [۳] Ahmad I, Swaminathan V, Aved A, Khalid S (۲۰۲۱) An overview of rate control techniques in HEVC and SHVC video encoding. *Multimed Tools Appl* ۸۱(۲۴):۲۴۹۱۹-۲۴۹۵۰
- [۴] Choi H, Yoo J, Nam J, Sim D, Bajić IV (۲۰۱۳) Pixel-wise unified rate-quantization model for multilevel rate control. *IEEE J Sel Top Signal Process* ۷(۶):۱۱۱۲-۱۱۲۳
- [۵] Sun Y, Childers R, Hilton J (۲۰۲۱) New bufferless rate control for high efficiency video coding. *Multimed Tools Appl* ۸۰:۲۸۷۶۱-۲۸۷۷۶
- [۶] Hou Y, Wang P, Xiang W, Gao Z, Hou C (۲۰۱۵) A novel rate control algorithm for video coding based on fuzzy-PID controller. *SIViP* ۹(۴):۸۷۵-۸۸۴
- [۷] Seo C-W, Moon J-H, Han J-K (۲۰۱۳) Rate control for consistent objective quality in high efficiency video coding. *IEEE Trans Image Process* ۲۲(۶):۲۴۴۲-۲۴۵۴
- [۸] Fang M, Han Y, Wen J (۲۰۲۰) Genetic Algorithm Based Rate Control for AV1. *IEEE Signal Process Lett* ۲۷:۵۲۰-۵۲۴
- [۹] Wang S, Ma S, Wang S, Zhao D, Gao W (۲۰۱۳) Rate-GOP based rate control for high efficiency video coding. *IEEE J Select Top Signal Process* ۷(۶):۱۱۰۱-۱۱۱۱
- [۱۰] Yan T, Ra I-H, Wen H, Weng M-H, Zhang Q, Che Y (۲۰۲۰) CTU Layer Rate Control Algorithm in Scene Change Video for Free-Viewpoint Video. *IEEE Access* ۸:۲۴۵۴۹-۲۴۵۶۰
- [۱۱] Li B, Li H, Li L, Zhang J (۲۰۱۴) λ -domain rate control algorithm for High Efficiency Video Coding. *IEEE Trans Image Process* ۲۳(۹):۳۸۴۷-۳۸۵۴
- [۱۲] Wang P, Ni C, Li Z, Zhang G (۲۰۱۹) Optimal CTU-level bit allocation in HEVC for low bit-rate applications. *Multimedia Tools Appl* ۷۸:۲۳۳۳۳-۲۳۳۴۷
- [۱۳] Li Q, Nie J, Yu D (۲۰۲۱) Space-domain-based CTU layer rate control for HEVC. *SIViP* ۱۵(۸):۱۸۷۳-۱۸۸۰
- [۱۴] Zhao Z, Xiong S, Sun W, He X, Zhang F (۲۰۲۰) An improved R- λ rate control model based on joint spatial-temporal domain information and HVS characteristics. *Multimed Tools Appl* ۸۰:۲۴۵۰-۲۴۶۶
- [۱۵] Li Y, Mou X (۲۰۲۱) Joint Optimization for SSIM-Based CTU-Level Bit Allocation and Rate Distortion Optimization. *IEEE Trans Broadcast* ۶۷(۲):۵۰۰-۵۱۱
- [۱۶] Yuan H, Wang Q, Liu Q, Huo J, Li P (۲۰۲۱) Hybrid Distortion-Based Rate-Distortion Optimization and Rate Control for H. ۲۶۵/HEVC. *IEEE Trans Consum Electron* ۶۷(۲):۹۷-۱۰۶
- [۱۷] Lim W, Sim D (۲۰۲۰) A perceptual rate control algorithm based on luminance adaptation for HEVC encoders. *SIViP* ۱۴(۵):۸۸۷-۸۹۵
- [۱۸] Zhou M, Wei X, Kwong S, Jia W, Fang B (۲۰۲۰) Just noticeable distortion-based perceptual rate control in HEVC. *IEEE Trans Image Process* ۲۹:۷۶۰۳-۷۶۱۴
- [۱۹] Liu D, Chen Z, Liu S, Wu F (۲۰۱۹) Deep learning-based technology in responses to the joint call for proposals on video compression with capability beyond HEVC. *IEEE Trans Circuits Syst Video Technol* ۳۰(۵):۱۲۶۷-۱۲۸۰
- [۲۰] Marzuki I, Lee J, Sim D (۲۰۲۰) Optimal CTU-Level Rate Control Model for HEVC Based on Deep Convolutional Features. *IEEE Access* ۸:۱۶۵۶۷۰-۱۶۵۶۸۲

- with an overview of Versatile Video Coding (VVC). Proc IEEE 119(9):1463–1473
- [43] Li Y, Chen Z (2018) Rate Control for VVC. JVET-K1290, 11th Meeting, Ljubljana, Slovenia
- [44] Hyun MH, Lee B, Kim M (2020) A Frame-Level Constant Bit-Rate Control Using Recursive Bayesian Estimation for Versatile Video Coding. IEEE Access 8:227200–227219
- [45] Liu F, Chen Z (2021) Multi-Objective Optimization of Quality in VVC Rate Control for Low-Delay Video Coding. IEEE Trans Image Process 30:4706–4718
- [46] Raufmehrer F, Salehi MR, Abiri E (2021) A frame-level MLP-based bit-rate controller for real-time video transmission using VVC standard. J Real-Time Image Proc 18(3):701–713
- [47] Raufmehrer F, Salehi MR, Abiri E (2021) A neural network-based video bit-rate control algorithm for variable bit-rate applications of versatile video coding standard. Signal Process: Image Commun 96:116317
- [48] Raufmehrer F, Salehi MR, Abiri E (2022) A neuro-fuzzy QP estimation approach for H.266/VVC-based live video broadcasting systems. Signal Process: Image Commun 83(19), 06423:06443
- [49] Lim W, Bajic IV, Sim D ‘QP initialization and interview MAD prediction for rate control in HEVC-based multi-view video coding’, In: Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2012 IEEE International Conference on, IEEE, pp 2040–2043, 2012.
- [50] Fiengo A, Chierchia G, Cagnazzo M, Pesquet-Popescu B Convex optimization for frame-level rate allocation in MV-HEVC. In: Image Processing (ICIP), 2016 IEEE International Conference on, 2016. IEEE, pp 2107–2111
- [51] Yuan H, Kwong S, Wang X, Gao W, Zhang Y (2010) Rate distortion optimized inter-view frame level bit allocation method for MV-HEVC. IEEE Transactions on Multimedia 11(12):2134–2146
- [52] Ross TJ (2000) Fuzzy logic with engineering applications. John Wiley & Sons