

Politechnika Poznańska  
Wydział Elektroniki i Telekomunikacji  
Katedra Telekomunikacji Multimedialnej i Mikroelektroniki

Autoreferat rozprawy doktorskiej

**Zaawansowane Algorytmy Adaptacji  
Kodowania Arytmetycznego w Hybrydowej  
Kompresji Sekwencji Wizyjnych**

Damian Karwowski

Promotor: prof. dr hab. inż. Marek Domański

Poznań, 2008



# Spis treści

Spis treści	3
<b>Zakres i cel rozprawy</b>	
1. Zakres rozprawy	5
2. Cele i teza rozprawy	7
<b>Zasadnicze wyniki rozprawy</b>	
1. Poprawa efektywności kodowania entropijnego w kodeku wizyjnym MPEG-4 AVC	9
2. Metodologia eksperymentów	14
3. Złożoność zaawansowanych technik adaptacji w kodowaniu arytmetycznym	16
4. Implementacja zaawansowanych kodeków entropijnych	19
<b>Podsumowanie i wnioski</b>	
1. Oryginalne osiągnięcia rozprawy	23
2. Wnioski końcowe	25
Spis literatury zamieszczony w rozprawie	29

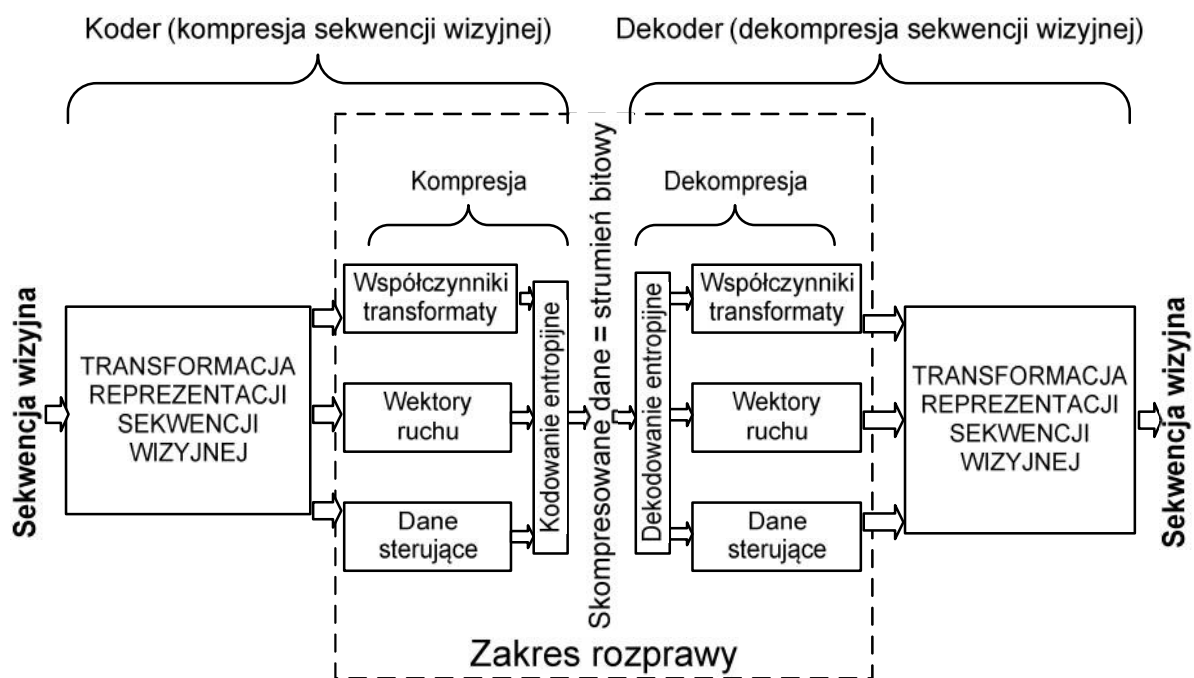


# Zakres i cel rozprawy

## 1. Zakres rozprawy

Kompresja cyfrowych sekwencji wizyjnych zyskała ogromne znaczenie w wielu dziedzinach telekomunikacji oraz technik informacyjnych, włączając w to telewizję cyfrową, nagrywanie filmów na płytach CD i DVD, nadzór wizyjny, wizyjne bazy danych, kino cyfrowe, obrazowanie medyczne itd. Wiele różnych technik kompresji sygnałów wizyjnych zostało przedstawionych w literaturze [Bovik00, Doma98, Flier04, Jack05, Mual02, Ohm04, Richa02, Richa03, Skarb93, Skarb98, Woot05]. Największą popularność zyskały techniki kodowania hybrydowego, które są powszechnie wykorzystywane w systemach telekomunikacyjnych, w tym w najbardziej zaawansowanych. Technologia hybrydowej kompresji cyfrowych sekwencji wizyjnych jest podstawą wszystkich znaczących współczesnych międzynarodowych i komercyjnych standardów kodowania sekwencji wizyjnych [MPEG-1, MPEG-2, H263, AVC, VC-1, AVS]. Co więcej, technologia hybrydowej kompresji cyfrowych sekwencji wizyjnych jest ciągle przedmiotem większości prac badawczych nad kompresją sekwencji wizyjnych. Dlatego **niniejsza rozprawa również dotyczy hybrydowej kompresji sygnałów wizyjnych.**

Hybrydowe kodery wizyjne usuwają redundancję danych wizyjnych poprzez zastosowanie predykcji międzyobrazowej z kompensacją ruchu oraz kodowania transformatowego [Doma98, Skarb93, Bovik00, Richa03, Ohm04]. Kodery takie wytwarzają trzy strumienie, które reprezentują obraz w znacznie bardziej zwarty sposób w stosunku do reprezentacji oryginalnej. Tymi trzema strumieniami są: współczynniki transformaty błędu predykcji, wektory ruchu oraz dane sterujące (patrz rysunek 1).



Rysunek 1. Zakres merytoryczny rozprawy

Niemniej jednak, te trzy strumienie danych ciągle wykazują redundancję statystyczną. W celu zredukowania tej nadmiarowości na wyjściu koderu hybrydowego zawsze stosuje się kodowanie entropijne. Kodowanie entropijne jest zatem bardzo ważne, ponieważ dodatkowo redukuje wielkość strumienia na wyjściu koderu wizyjnego.

**Niniejsza rozprawa dotyczy zaawansowanych technik kodowania entropijnego, które mogą znaleźć zastosowanie w hybrydowej kompresji sekwencji wizyjnych. W szczególności rozprawa skupia się na zwiększeniu efektywności kodowania entropijnego, a w konsekwencji na zwiększeniu efektywności koderów hybrydowych najnowszej generacji.**

Wyższa efektywność koderu oznacza albo zdolność do uzyskania mniejszej prędkości transmisji na wyjściu koderu przy danej jakości zdekodowanej sekwencji wizyjnej, albo zdolność koderu do uzyskania lepszej jakości zdekodowanej sekwencji wizyjnej przy danej prędkości transmisji. Ponieważ rozprawa dotyczy tylko bezstratnej kompresji entropijnej, to wzrost efektywności kompresji oznacza redukcję prędkości transmisji przy niezmienionej jakości obrazu zdekodowanego. Celem jest więc wzrost współczynnika kompresji rozumianego jako iloraz długości oryginalnego łańcucha danych oraz długości łańcucha danych po kompresji.

Przedstawione w rozprawie badania zostały przeprowadzone w kontekście adaptacyjnego kodowania arytmetycznego stosowanego w zaawansowanych koderach

wizyjnych najnowszej generacji. Punktem wyjścia do badań stał się algorytm kontekstowego adaptacyjnego binarnego kodowania arytmetycznego (ang. *Context-based Adaptive Binary Arithmetic Coding* – CABAC) [Marp02a, Marp02b, Marp03a], który jest częścią nowego ogólnościowego standardu zaawansowanego kodowania sekwencji wizyjnych MPEG-4 AVC (ang. *Advanced Video Coding* – AVC) (ISO MPEG-4 AVC oraz ITU-T Rec. H.264) [AVC, Schw02a, Wieg03a, Richa03, Oster04, Sull05, Marp05a, Marp05b, Marp06b, Wieg07]. Należy podkreślić, iż algorytm CABAC jest odzwierciedleniem aktualnego stanu techniki i nauki w zakresie kodowania entropijnego stosowanego w kompresji sekwencji wizyjnych.

Zastosowanie bardziej efektywnych ale i bardziej złożonych technik modelowania statystycznego danych z pewnością zwiększa złożoność kodeka entropijnego oraz wpływa na złożoność całego kodeka sekwencji wizyjnych. Autor zbadał w jakim stopniu złożoność kodera i dekodera entropijnego zwiększą się po zastosowaniu bardziej zaawansowanych mechanizmów estymacji statystyki danych. Ponadto, autor zbadał również jak zastosowanie bardziej zaawansowanych technik estymacji statystyki danych wpływa na złożoność całego kodera i dekodera MPEG-4 AVC.

## **2. Cele i teza rozprawy**

Koder entropijny jest istotnym elementem kodera sekwencji wizyjnych, ponieważ usuwa on korelację jaka występuje w strumieniach zawierających współczynniki transformaty błędu predykcji, wektory ruchu oraz dane sterujące. Początkowo, w koderach sekwencji wizyjnych starszej generacji [MPEG-1, MPEG-2] stosowano relatywnie proste, nieadaptacyjne techniki kodowania Huffmana [Huff52]. W koderach wizyjnych nowszej generacji [H263, Rijk96, Gard98, AVC] zaczęto stosować bardziej efektywne techniki kodowania arytmetycznego [Witt87, Said04]. Jak już stwierdzono, najbardziej zaawansowaną i najbardziej efektywną techniką kodowania entropijnego stosowaną w koderach wizyjnych jest technika kontekstowego adaptacyjnego binarnego kodowania arytmetycznego CABAC [Marp01, Marp02a, Marp02b, Marp03a] wykorzystywana w kodeku wizyjnym MPEG-4 AVC [AVC]. Technika CABAC wykorzystuje kodowanie arytmetyczne i dużo bardziej zaawansowane techniki modelowania statystycznego danych w porównaniu z innymi koderami entropijnymi stosowanymi w kompresji sekwencji wizyjnych.

**Głównym celem rozprawy było zbadanie możliwości poprawy efektywności adaptacyjnych koderów entropijnych stosowanych we współczesnych zaawansowanych koderach wizyjnych.** Takie badania są bardzo ważne w kontekście ustalenia standardów dla koderów wizyjnych nowej generacji. Prace nad nowym standardem H.265 zostały już zainicjowane przez ITU-T oraz jej grupę roboczą Video Coding Experts Group (VCEG, tj. SG16/Q.6) [VCEG07].

Celem badań było ulepszenie technik adaptacji koderów arytmetycznych, które są stosowane w koderach sekwencji wizyjnych najnowszej generacji. **W szczególności, celem było zwiększenie efektywności adaptacyjnego kodowania arytmetycznego poprzez zastosowanie bardziej zaawansowanych mechanizmów estymacji prawdopodobieństw warunkowych.** Dodatkowo, zbadany został związek pomiędzy poprawą efektywności kodowania a zwiększeniem złożoności kodera i dekodera entropijnego.

Teza rozprawy jest następująca:

*Poprawa mechanizmów adaptacji kodowania entropijnego stosowanego we współczesnych zaawansowanych koderach sekwencji wizyjnych prowadzi do sensownego wzrostu współczynnika kompresji kodowania entropijnego kosztem zwiększenia złożoności kodera i dekodera wizyjnego.*

Dla udowodnienia tezy przyjęto następujący sposób postępowania. Opracowane przez autora dokładniejsze mechanizmy modelowania statystycznego zostały zaimplementowane i wykorzystane w najbardziej obecnie zaawansowanym algorytmie kontekstowego adaptacyjnego binarnego kodowania arytmetycznego CABAC [Marp03a]. W celu uzyskania wiarygodnych wyników eksperymentów, autor zaimplementował koder oraz dekodek wykorzystujący zaproponowane bardziej zaawansowane techniki estymacji statystyki danych. Efektywność zmodyfikowanego kodera entropijnego CABAC działającego w ramach kodera wizyjnego MPEG-4 AVC została zbadana oraz porównana z efektywnością oryginalnego kodera entropijnego CABAC. Złożoność zmodyfikowanego kodeka wizyjnego (koder oraz dekodek) została zbadana i porównana ze złożonością oryginalnego kodeka wizyjnego.



# Zasadnicze wyniki rozprawy

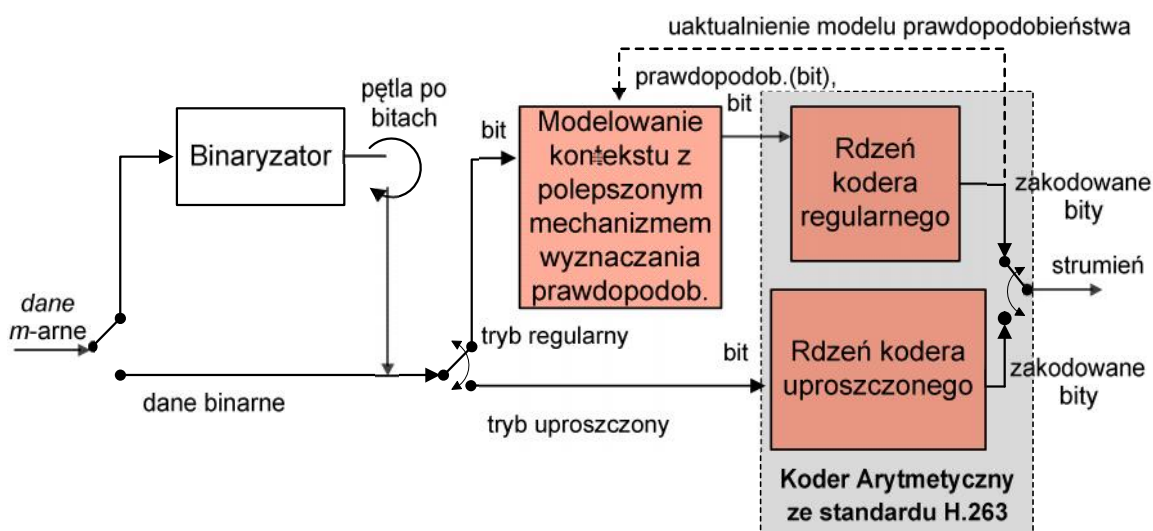
## **1. Poprawa efektywności kodowania entropijnego w kodeku wizyjnym MPEG-4 AVC**

Głównym celem rozprawy była poprawa efektywności zaawansowanego adaptacyjnego kodera entropijnego CABAC poprzez zastosowanie w nim bardziej zaawansowanych mechanizmów estymacji prawdopodobieństw kodowanych symboli. **Największym osiągnięciem rozprawy jest opracowanie autorskiej techniki wyznaczania prawdopodobieństw warunkowych kodowanych symboli, która wykorzystuje technikę ważenia drzew kontekstów (ang. *Context-Tree Weighting* – CTW) i może być wykorzystana w zaawansowanym kodowaniu entropijnym.** Kodek kontekstowego adaptacyjnego binarnego kodowania arytmetycznego CABAC działający w strukturze kodeka wizyjnego MPEG-4 AVC został uzupełniony przez autora o zaproponowany mechanizm modelowania statystycznego. Co prawda, relatywnie prosty mechanizm modelowania statystycznego wykorzystujący w algorytmie CABAC technikę ważenia drzew kontekstów CTW pojawił się już wcześniej [Hong04], jednak metoda estymacji zaproponowana przez autora jest dużo bardziej zaawansowana. Autor zbadał efektywność zmodyfikowanego kodera CABAC oraz porównał ją z efektywnością oryginalnego kodera CABAC. Badania przeprowadzone zostały dla różnej głębokości  $D$  drzew kontekstów z użyciem kilku sekwencji testowych. **Zaproponowany przez autora w algorytmie CABAC mechanizm estymacji statystyki danych pozwolił zredukować prędkość transmisji o 1,5%-4,5% w stosunku do oryginalnego kodera CABAC.** Autor wyznaczył również optymalną z punktu widzenia efektywności i złożoności kodeka entropijnego głębokość  $D = 8$  drzew kontekstów.

**Autor zaproponował również dwa inne mechanizmy wyznaczania prawdopodobieństw kodowanych symboli, które wykorzystują:**

- wariant „A” techniki predykcji z częściowym dopasowaniem (ang. *Prediction with Partial Matching* – PPMA);
- autorską propozycję łącznego wykorzystania techniki ważenia drzew kontekstów CTW oraz techniki predykcji z częściowym dopasowaniem PPMA.

Opracowane mechanizmy estymacji prawdopodobieństw warunkowych zostały również wykorzystane w kodeku CABAC. W ten sposób autor przygotował implementacje trzech zmodyfikowanych kodeków CABAC (koder i dekodek), które realizują zaproponowane przez autora metody modelowania statystycznego. Ogólną strukturę zmodyfikowanych koderów CABAC przedstawia rysunek 2.



Rysunek 2. Schemat blokowy nowego kodeka entropijnego (kolorem zaznaczono bloki zmodyfikowane przez autora)

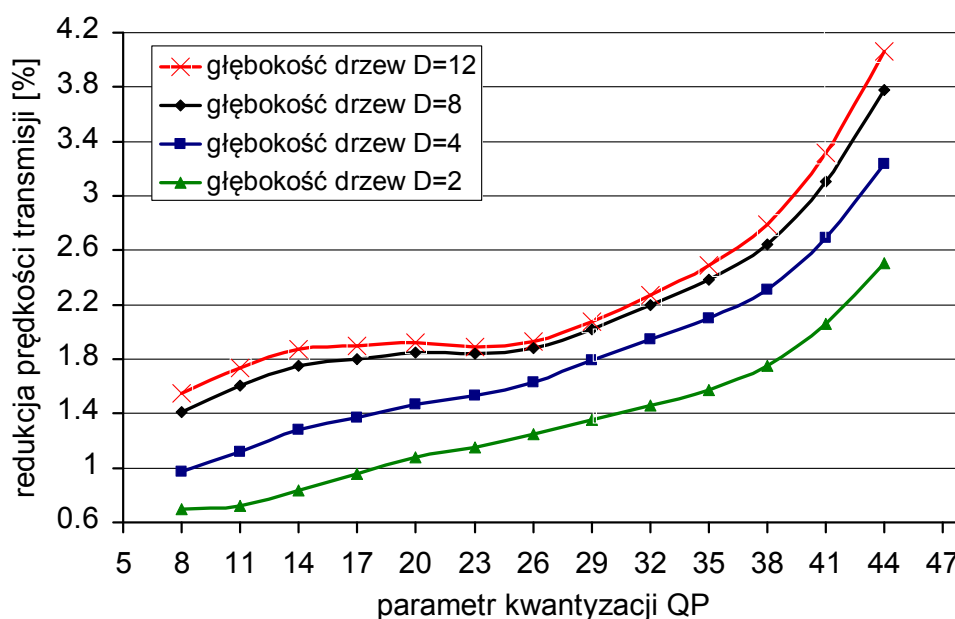
Efektywność trzech zmodyfikowanych koderów CABAC została eksperymentalnie zbadana i porównana z efektywnością oryginalnego koder CABAC. W pełnej wersji rozprawy doktorskiej zamieszczono w sumie kilkadziesiąt stron wykresów z wynikami badań. **Wyniki eksperymentów pokazały, że zastosowanie zaproponowanych dokładniejszych technik estymacji statystyki danych w zaawansowanych adaptacyjnych koderach arytmetycznych prowadzi do wzrostu efektywności współczesnych zaawansowanych koderów wizyjnych.**

Autor wyraźnie wskazał, która z zaproponowanych technik prowadzi do największego wzrostu efektywności kodowania entropijnego. Najlepsze wyniki uzyskano dla zmodyfikowanych koderów CABAC, które korzystały z opracowanych mechanizmów estymacji wykorzystujących technikę ważenia drzew kontekstów CTW. Najmniejszą

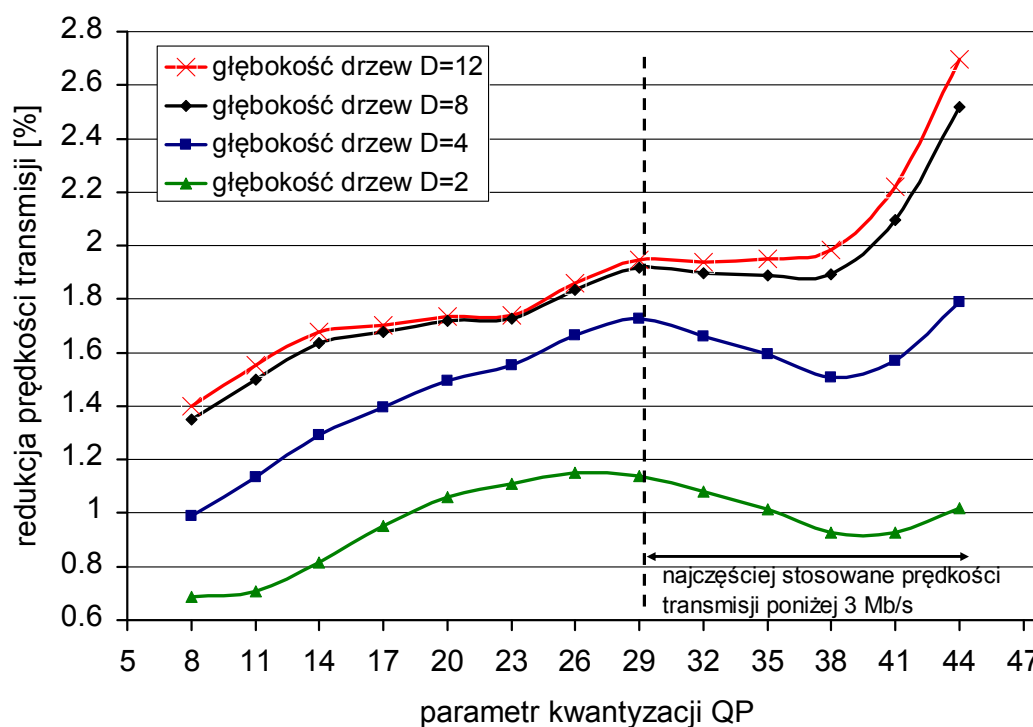
efektywnością cechował się zmodyfikowany koder CABAC, którego mechanizm adaptacji wykorzystywał technikę predykcji z częściowym dopasowaniem PPMa.

Zdaniem autora uzyskana dla zmodyfikowanych koderów CABAC kilkuprocentowa redukcja prędkości transmisji w stosunku do efektywnego kodera CABAC jest bardzo dobrym rezultatem. Dla przykładu, w standardzie kodowania sekwencji wizyjnych H.263 opcjonalny, bardziej zaawansowany koder entropijny bazujący na kodowaniu arytmetycznym pozwala zredukować prędkość transmisji o około 5% w stosunku do prędkości transmisji uzyskanej przy użyciu prostszego kodera Huffmana [Côté98, Erol98] i stał się częścią międzynarodowego standardu. A przecież dalsza poprawa efektywności coraz bardziej zaawansowanych koderów entropijnych jest zadaniem coraz trudniejszym.

Biorąc pod uwagę zarówno złożoność, jak i efektywność zmodyfikowanych koderów CABAC, najlepszy kompromis osiągnięto dla zmodyfikowanego kodera CABAC realizującego zaproponowaną metodę modelowania statystycznego wykorzystującą technikę ważenia drzew kontekstów CTW. Średnią redukcję prędkości transmisji uzyskaną dla tego kodera dla dwóch różnych struktur grupy obrazów przedstawia rysunek 3 oraz rysunek 4. Redukcję prędkości transmisji przedstawiono w funkcji parametru kwantyzacji QP sterującego pracą kodera wizyjnego i odpowiedzialnego za jakość zdekodowanej sekwencji wizyjnej. Eksperymenty przeprowadzono dla różnej głębokości  $D$  drzew kontekstów.



Rysunek 3. Redukcja prędkości transmisji wynikająca z zastosowania zmodyfikowanego kodera CABAC w stosunku do oryginalnego kodera CABAC dla całej sekwencji dla struktury GOP: I29P (średnia dla 4 sekwencji testowych: CITY, CREW, ICE i HARBOUR)



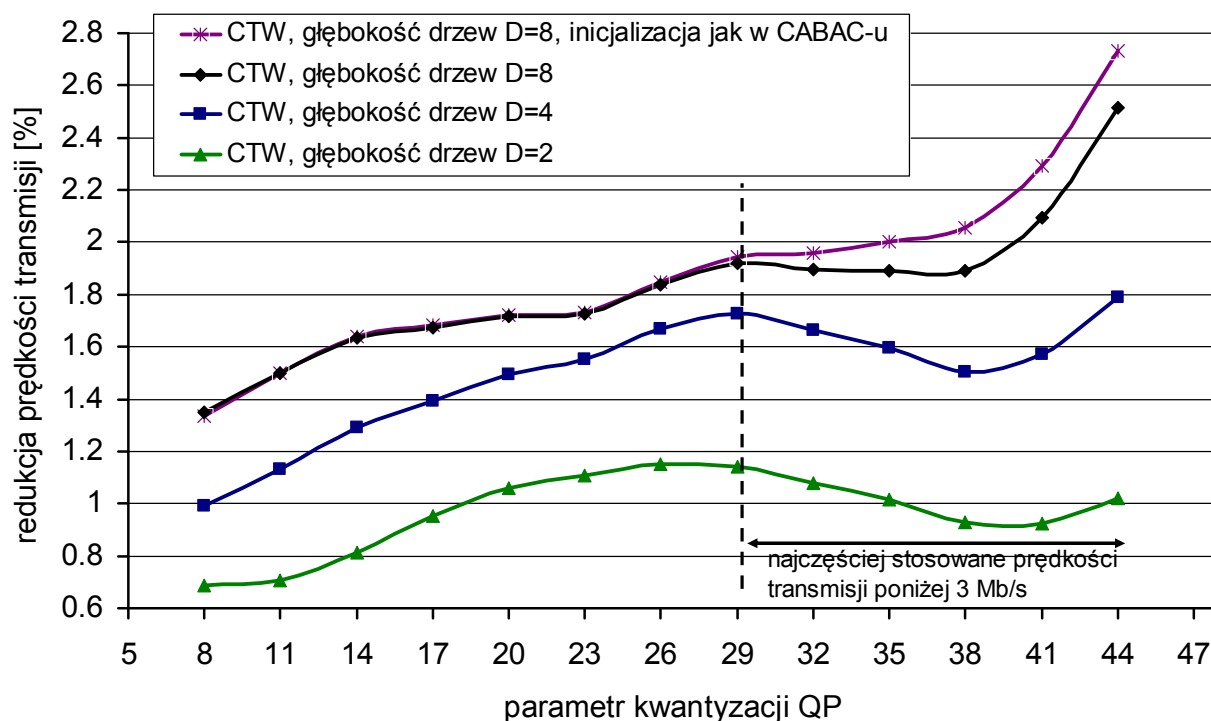
Rysunek 4. Redukcja prędkości transmisji wynikająca z zastosowania zmodyfikowanego kodera CABAC w stosunku do oryginalnego kodera CABAC dla całej sekwencji dla struktury GOP: IBBPBBP... (średnia dla 4 sekwencji testowych: CITY, CREW, ICE i HARBOUR)

Wyniki eksperymentów udowodniły, że zastosowanie w zmodyfikowanym koderze CABAC drzew kontekstów o większej głębokości prowadzi do większej efektywności kodera entropijnego. Niemniej jednak, przy pewnej głębokości drzew kontekstów dalsze zwiększanie głębokości drzew nie prowadzi już do wyraźnego wzrostu efektywności kodowania, rośnie natomiast złożoność kodeka entropijnego. Autor eksperymentalnie wyznaczył głębokość drzew kontekstów równą  $D = 8$  stanowiącą najlepszy kompromis pomiędzy zyskiem kodowania a złożonością kodeka entropijnego.

Zmodyfikowany koder CABAC wykorzystujący ulepszony mechanizm estymacji prawdopodobieństw warunkowych bazujący na technice ważenia drzew kontekstów CTW został poddany dalszym badaniom mającym na celu poprawę efektywności kodowania. Zbadano, w jakim stopniu zastosowany na początku plastra (ang. slice) algorytm inicjalizacji drzew kontekstów wpływa na efektywność zmodyfikowanego kodeka entropijnego. W tym celu w zmodyfikowanym koderze CABAC użyto dwóch różnych mechanizmów inicjalizacji drzew kontekstów:

- prostszy mechanizm inicjalizacji drzew kontekstów polegający na zerowaniu liczników liczby zer i jedynek;
- bardziej zaawansowany mechanizm inicjalizacji drzew kontekstów zapożyczony z algorytmu CABAC, w którym liczniki zer i jedynek były inicjowane wartościami początkowymi, które zależą od wartości parametru kwantyzacji QP oraz typu plastra.

Zbadano efektywność zmodyfikowanego kodera CABAC wykorzystującego prostszą oraz bardziej zaawansowaną metodę inicjalizacji drzew kontekstów. Wyniki przedstawia rysunek 5.



Rysunek 5. Wpływ metody inicjalizacji drzew kontekstów na efektywność kodowania zmodyfikowanego kodera CABAC (wykorzystującego technikę CTW). Wyniki dotyczą struktury grupy obrazów IBBPBBP... (średnia dla 4 sekwencji testowych: CITY, CREW, ICE i HARBOUR)

Uzyskane wyniki eksperymentów jednoznacznie wykazały, iż zastosowanie bardziej zaawansowanych metod inicjalizacji drzew kontekstów prowadzi do zwiększenia efektywności kodera entropijnego. Istotny wzrost efektywności kodowania zaobserwowano dla mniejszych prędkości transmisji, co odpowiada większym wartościom parametru kwantyzacji QP. Tak więc **autor wykazał, że możliwe jest dalsze zwiększenie efektywności**

**zmodyfikowanego kodera CABAC stosując bardziej zaawansowany mechanizm inicjalizacji drzew kontekstów.**

Należy zaznaczyć, iż rdzeń kodeka arytmetycznego użytego w algorytmie CABAC został przygotowany do pracy z ograniczonym zbiorem tylko 128 wcześniej zdefiniowanych skwantowanych wartości prawdopodobieństw. Dlatego, w zmodyfikowanych kodekach CABAC autor użył tradycyjnego rdzenia kodeka arytmetycznego zdefiniowanego w standardzie kodowania sekwencji wizyjnych H.263 [H263]. Pojawiło się zatem pytanie: w jakim stopniu zastosowanie w zmodyfikowanych koderach CABAC innego rdzenia kodeka arytmetycznego wpływa na zysk kodowania w stosunku do oryginalnego kodera CABAC? Aby jednoznacznie odpowiedzieć na to pytanie, w Rozdziale 7 rozprawy autor zbadał i porównał efektywności kodowania obu rdzeni kodeków arytmetycznych działających w ramach kodeka wizyjnego MPEG-4 AVC. Badania zostały przeprowadzone dla szerokiego zakresu przepływności bitowych, którym odpowiadają sekwencje wizyjne zarówno o bardzo dobrej, jak i bardzo słabej jakości. Wyniki eksperymentów wykazały, że efektywność badanych rdzeni jest porównywalna, a **uzyskana różnica efektywności pomiędzy zmodyfikowanymi koderami CABAC a oryginalnym koderem CABAC jest wynikiem zastosowania innych technik estymacji statystyki danych.**

## ***2. Metodologia eksperymentów***

W celu zbadania efektywności zmodyfikowanych koderów CABAC działających w ramach kodera wizyjnego MPEG-4 AVC przyjęto następujący sposób postępowania. Efektywność zmodyfikowanych koderów CABAC została zbadana oraz porównana z efektywnością oryginalnego kodera CABAC poprzez przeprowadzenie serii eksperymentów z użyciem sekwencji testowych. W celu wykonania powyższego autor zaimplementował oraz zastosował zaproponowane nowe techniki estymacji statystyki danych w algorytmie CABAC działającego w oprogramowaniu referencyjnym JM 10.2 [AVCSofT] kodeka wizyjnego MPEG-4 AVC. W celu uzyskania wiarygodnych wyników eksperymentów, autor przygotował implementacje zarówno kodera jak i dekodera sekwencji wizyjnych realizującego zaproponowane nowe metody modelowania statystycznego. Należy podkreślić, że implementacja tak zmodyfikowanych kodeków wizyjnych MPEG-4 AVC była zadaniem bardzo trudnym i bardzo czasochłonnym. Oprogramowanie referencyjne JM 10.2 [AVCSofT] kodeka sekwencji wizyjnych MPEG-4 AVC zawiera około 90 tys. linii kodu napisanego w

języku programowania C [Kern88] (około 58 tys. linii kodu programu dla kodera MPEG-4 AVC oraz około 32 tys. linii kodu programu dla dekodera MPEG-4 AVC). Funkcje kodeka entropijnego CABAC (koder oraz dekodek) zawierają około 6 tys. linii kodu programu napisanego w języku C, jednakże liczba ta nie uwzględnia kodu programu niezbędnego do wywołania poszczególnych funkcji kodeka CABAC w wielu miejscach kodeka MPEG-4 AVC. W praktyce, zastosowanie w algorytmie CABAC zaproponowanych technik modelowania statystycznego wymagało zmodyfikowania znacznej części kodera i dekodera MPEG-4 AVC liczonej w wielu tysiącach linii kodu programu napisanego w języku C.

Efektywność zmodyfikowanych koderów MPEG-4 AVC została wyrażona poprzez procentową redukcję prędkości transmisji w stosunku do prędkości transmisji uzyskanej dla tej samej sekwencji testowej zakodowanej z użyciem oryginalnego kodera MPEG-4 AVC z algorytmem CABAC przy tej samej konfiguracji kodera. Badania efektywności zmodyfikowanych oraz oryginalnego kodera MPEG-4 AVC zostały przeprowadzone dla trzech scenariuszy:

#### **Scenariusz 1:**

- Użyto sekwencji testowych w formacie 4CIF (rozdzielczość przestrzenna  $704 \times 576$ ) i rozdzielczości czasowej 60 Hz;
- Założono strukturę grupy obrazów GOP I29P;
- Eksperymenty przeprowadzono dla szerokiego zakresu wartości parametru kwantyzacji QP, od QP=8 do QP=44 z krokiem co 3 (parametr kwantyzacji QP jest głównym elementem sterującym jakością zakodowanej sekwencji wizyjnej). Dla danej wartości parametru kwantyzacji QP, eksperyment polegał na pełnym zakodowaniu oraz zdekodowaniu każdej z sekwencji testowych;
- Optymalizacja „przepływność-zniekształcenie” (ang. *rate distortion* – RD) została wyłączona w testowanych koderach wizyjnych. Sterowanie przepływnością zostało również wyłączone.
- Eksperymenty przeprowadzono dla różnej głębokości  $D$  drzew kontekstów.

#### **Scenariusz 2:**

- Warunki eksperymentu takie same jak w **Scenariuszu 1** z jednym wyjątkiem: użyto sekwencji testowych w formacie CIF (rozdzielczość przestrzenna  $352 \times 288$ ).

#### **Scenariusz 3:**

- Warunki eksperymentu takie same jak w **Scenariuszu 1** z jednym wyjątkiem: założono strukturę GOP IBBPBBP....

Eksperymenty przeprowadzono z użyciem czterech sekwencji testowych: CITY, CREW, ICE i HARBOUR. Użyte sekwencje testowe są powszechnie stosowane do oceny algorytmów kodowania sekwencji wizyjnych wysokiej jakości, jak również zostały zaadoptowane przez grupy ekspertów MPEG (ISO/IEC JTC1/SC29/WG11) oraz JVT (połączona grupa MPEG oraz ITU-T VCEG) do oceny efektywności nowych technik kodowania. Kodery wizyjne zostały przebadane w serii eksperymentów dla różnych konfiguracji koderów. W ten sposób efektywność zaproponowanych metod została zbadana przy różnych konfiguracjach kodera, jak również dla różnych parametrów sterujących nowych technik estymacji prawdopodobieństw.

Złożoność zmodyfikowanego kodera i dekodera MPEG-4 AVC (z algorytmem CABAC oraz zaproponowanym mechanizmem estymacji wykorzystującym technikę CTW) została również zmierzona. W tym celu dokonano pomiaru czasów kodowania, dekodowania dla zmodyfikowanego kodeka wizyjnego MPEG-4 AVC dla szerokiego zakresu przepływności bitowych. Otrzymane wyniki eksperymentów zostały odniesione do złożoności oryginalnego kodeka wizyjnego MPEG-4 AVC zmierzonej w ten sam sposób. Ponadto, zbadano również złożoność zmodyfikowanego kodera i dekodera entropijnego.

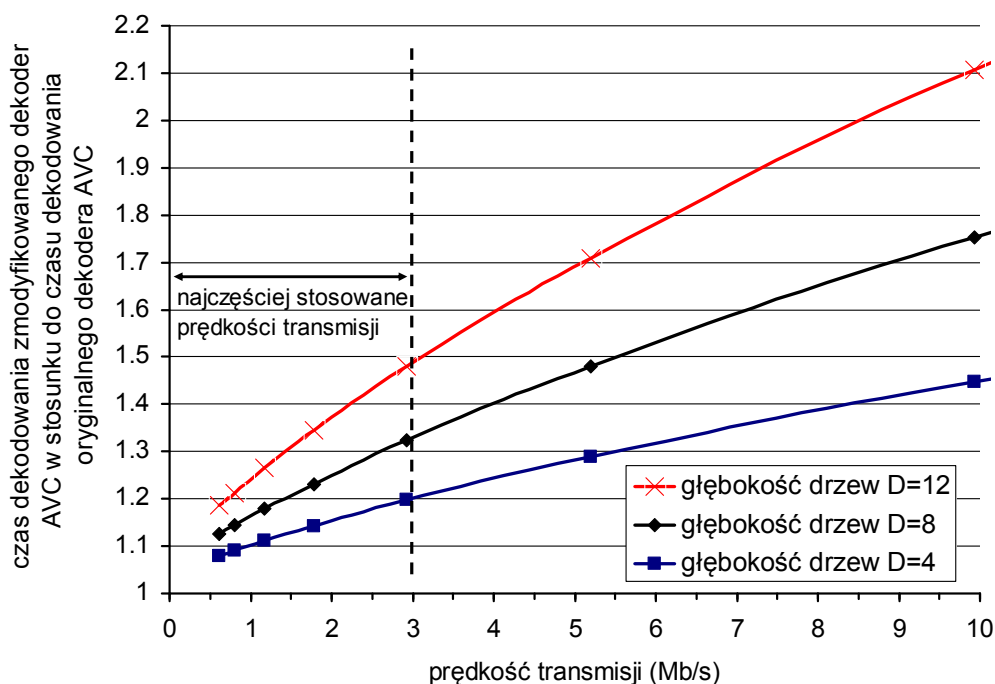
### ***3. Złożoność zaawansowanych technik adaptacji w kodowaniu arytmetycznym***

Wyższa efektywność zmodyfikowanych koderów MPEG-4 AVC (w stosunku do oryginalnego kodera MPEG-4 AVC) okupiona jest wyższą złożonością zarówno kodera, jak i dekodera wizyjnego. Wyższa złożoność zmodyfikowanych kodeków MPEG-4 AVC jest wynikiem zastosowania w algorytmie CABAC bardziej zaawansowanych technik modelowania statystycznego. **W pracy zbadano związek pomiędzy poprawą efektywności kodera entropijnego a zwiększeniem złożoności kodera i dekodera entropijnego.** Badania złożoności przeprowadzono tylko dla zmodyfikowanego kodeka CABAC realizującego zaproponowany mechanizm estymacji, który wykorzystuje technikę ważenia drzew kontekstów CTW, ponieważ dla tego kodeka uzyskano najwyższą efektywność kodowania. W rozprawie złożoność kodera i dekodera jest wyrażana czasem kodowania, dekodowania sekwencji mierzonym na tym samym komputerze. Uzyskane wyniki złożoności odniesiono do złożoności oryginalnego kodeka CABAC oraz kodeka CABAC pracującego z rdzeniem



kodeka arytmetycznego z H.263. Badania złożoności przeprowadzono dla różnej głębokości  $D$  drzew kontekstów oraz szerokiego zakresu wartości parametru kwantyzacji QP. Szczegółowe wyniki badań przedstawiono w rozprawie doktorskiej.

Autor zbadał również złożoność zmodyfikowanego kodeka MPEG-4 AVC z algorytmem CABAC oraz z zaproponowanym mechanizmem estymacji wykorzystującym technikę ważenia drzew kontekstów CTW, który został przygotowany na bazie oprogramowania referencyjnego JM 10.2 kodeka wizyjnego MPEG-4 AVC. Złożoność zmodyfikowanego kodeka MPEG-4 AVC została porównana ze złożonością oryginalnego kodeka MPEG-4 AVC z algorytmem CABAC oraz złożonością kodeka MPEG-4 AVC z algorytmem CABAC pracującym z rdzeniem kodeka arytmetycznego z H.263. Eksperymenty przeprowadzono dla szerokiego zakresu wartości parametru QP oraz różnej głębokości  $D$  drzew kontekstów. Złożoność kodera i dekodera wyrażona została poprzez czas potrzebny na zakodowanie, zdekodowanie sekwencji wizyjnej. Przykładowe wyniki badań (dla sekwencji CITY) pokazujące wpływ zastosowania w algorytmie CABAC zaproponowanego mechanizmu estymacji na złożoność całego kodeka MPEG-4 AVC przedstawia rysunek 6 oraz rysunek 7.



Rysunek 6. Zwiększenie czasu dekodowania dla zmodyfikowanego dekodera MPEG-4 AVC w stosunku do czasu dekodowania dla dekodera MPEG-4 AVC z algorytmem CABAC i rdzeniem dekodera arytmetycznego z H.263

Rysunek 7. Zwiększenie czasu kodowania dla zmodyfikowanego kodera MPEG-4 AVC w stosunku do czasu kodowania dla kodera MPEG-4 AVC z algorytmem CABAC i rdzeniem kodera arytmetycznego z H.263

Zastosowanie w algorytmie CABAC zaproponowanej dokładniejszej techniki estymacji statystyki danych zwiększa złożoność zarówno kodera, jak i dekodera wizyjnego. Wzrost czasu kodowania i czasu dekodowania dla zmodyfikowanego kodeka MPEG-4 AVC zależy od wielkości przepływności docelowej oraz głębokości  $D$  drzew kontekstów. Dla głębokości drzew kontekstów równych  $D = 8$  i prędkości transmisji mniejszych niż 10 Mb/s, czas kodowania zwiększa się do 2,5%, a czas dekodowania zwiększa się do 80% w stosunku do czasów uzyskanych dla oryginalnego kodeka MPEG-4 AVC działającego z rdzeniem kodeka arytmetycznego stosowanego w H.263.

Autor ma świadomość tego, że wpływ zastosowania w algorytmie CABAC nowej techniki modelowania statystycznego na złożoność kodera i dekodera wizyjnego MPEG-4 AVC zależy od procentowego udziału kodowania entropijnego w procesie kodowania MPEG-4 AVC. Udział ten z kolei zależy od konkretnej i  ma ne g

## **4. Implementacja zaawansowanych kodeków entropijnych**

### **4.1. Programowa implementacja kodeka CABAC wykorzystującego technikę CTW**

Współczesne adaptacyjne kodery entropijne znacząco poprawiają efektywność koderów wizyjnych. Wysoka efektywność zaawansowanych koderów entropijnych jest wynikiem zastosowania efektywnego kodowania arytmetycznego oraz efektywnych mechanizmów modelowania statystycznego. Odzwierciedleniem aktualnego stanu techniki i nauki w zakresie kodowania entropijnego jest algorytm CABAC. Wysoka efektywność kodeka CABAC została osiągnięta kosztem wysokiej złożoności kodera oraz dekodera. Implementacja kodeka CABAC jest również dużo trudniejsza i dużo bardziej czasochłonna w stosunku do jakiegokolwiek innego kodeka entropijnego stosowanego w hybrydowych koderach sekwencji wizyjnych.

**Autor był członkiem zespołu przygotowującego w latach 2003-2004 implementację szybkiego dekodera MPEG-4 AVC. Według wiedzy autora, była to pierwsza implementacja dekodera MPEG-4 AVC w Polsce i jedna z pierwszych na całym świecie. Szybki dekodery MPEG-4 AVC stał się częścią odbiornika telewizji cyfrowej, który został sprzedany przez firmę Advanced Digital Broadcast (ADB) [ADB] na całym świecie w kilkuset tysiącach sztuk. Autor był również członkiem zespołu, który w latach 2004-2005 przygotował implementację zoptymalizowanego kodera MPEG-4 AVC. Koder ten jest obecnie wykorzystywany przez firmę ADB dla celów testowych.**

W ramach tych projektów autor w pełni zaimplementował koder i dekodery CABAC w języku programowania C [Kern88]. Trudność i nakład pracy w zaimplementowaniu kodera i dekodera CABAC są porównywalne. Autorska implementacja zoptymalizowanego kodeka CABAC (koder i dekodery) zawiera około 5200 linii kodu napisanego w języku C. Rdzeń binarnego kodeka arytmetycznego zawiera około 380 linii kodu programu. Zatem, z punktu widzenia implementacji kodeka CABAC, rdzeń kodeka arytmetycznego stanowi około 7% całkowitej implementacji kodeka CABAC. Dla porównania, w implementacji kodeka CABAC w kodeku wizyjnym x264 [x264Soft] rdzeń kodeka arytmetycznego stanowi około 9% implementacji kodeka CABAC, a w implementacji kodeka CABAC w oprogramowaniu referencyjnym JM 10.2 [AVCSOft] rdzeń kodeka arytmetycznego stanowi około 12% całkowitej implementacji kodeka CABAC. W każdej z rozważanych implementacji kodeka

CABAC implementacja schematów binaryzacji, mechanizmu modelowania kontekstu oraz estymacji i uaktualnienia prawdopodobieństw stanowią około 90% całkowitej implementacji kodeka CABAC. Blok modelowania statystycznego stanowi zatem istotną część implementacji współczesnych kodeków entropijnych i w coraz większym stopniu decyduje on o złożoności i efektywności kodeka entropijnego.

Złożoność kodera i dekodera CABAC są porównywalne. Zakodowanie bądź zdekodowanie symbolu binarnego z użyciem kodeka CABAC wymaga dużej ilości obliczeń. Autor brał udział w projekcie wdrożeniowym implementacji szybkiego dekodera MPEG-4 AVC dedykowanego dla platform z procesorem sygnałowym. Pomiarzy złożoności szybkiego dekodera MPEG-4 AVC z algorytmem CABAC pokazały, że wydajny procesor sygnałowy TMS320DM642 [TI642] (z częstotliwością zegara 600 MHz) jest w stanie zdekodować w czasie rzeczywistym jedynie strumień wizyjny o przepływności do 4 Mb/s. Zdekodowanie jednego symbolu binarnego przez dekoder CABAC zajmuje około 75 cykli procesora TMS320DM642. W autorskiej implementacji dekodera CABAC sam rdzeń binarnego dekodera arytmetycznego wymaga około 30 cykli procesora aby zdekodować symbol binarny. Oznacza to, że modelowanie statystyczne pochłania aż 60% całkowitego czasu dekodowania entropijnego. Współczesne adaptacyjne kodowanie entropijne stanowi zatem duże wyzwanie nawet dla dzisiejszych procesorów o wysokiej wydajności. Dekodowanie entropijne strumieni w czasie rzeczywistym dla prędkości transmisji większych niż 10 Mb/s jest zadaniem bardzo trudnym. Niemniej jednak powszechnie wiadomo, że platformy sprzętowe FPGA (ang. *Field Programmable Gate Arrays*) cechują się znacznie większą wydajnością obliczeniową w stosunku do procesorów sygnałowych. Dlatego czasochłonne techniki adaptacyjnego kodowania entropijnego mogą być efektywnie realizowane na platformach sprzętowych.

## **4.2. Implementacja autorskiego mechanizmu modelowania statystycznego w algorytmie CABAC wykorzystującego technikę CTW**

Zaproponowana przez autora bardziej zaawansowana metoda estymacji statystyki danych wykorzystująca technikę ważenia drzew kontekstów CTW została zaimplementowana w języku programowania C w koderze oraz dekodерze CABAC w oprogramowaniu referencyjnym JM 10.2 kodeka MPEG-4 AVC. Implementacja autorskiej metody modelowania statystycznego dodaje około 500 linii kodu programu do implementacji kodeka CABAC. Podana wielkość nie uwzględnia jednak deklaracji tablic LUT oraz kodu programu, który wywołuje funkcje nowej metody estymacji statystyki danych w wielu miejscach kodeka CABAC.

Zastosowanie w algorytmie CABAC autorskiego mechanizmu modelowania statystycznego zwiększa złożoność kodeka entropijnego. Zmodyfikowany kodek entropijny CABAC stawia zatem jeszcze większe wymagania na moc obliczeniową w porównaniu z oryginalnym kodekiem CABAC.

### 4.3. Sprzętowa implementacja dekodera CABAC

**Autor zaprojektował i zaimplementował sprzętową wersję dekodera CABAC.** Sprzętowa wersja dekodera CABAC realizuje dekodowanie symboli binarnych z zastosowaniem przetwarzania potokowego (więcej szczegółów w Rozdziale 9.2.1 rozprawy). Pozwala to na znaczące skrócenie czasu dekodowania symbolu binarnego.

**Sprzętowy dekodery CABAC został zsyntezowany na platformie FPGA Virtex 5 [Virtex-5] przy użyciu oprogramowania ISE 9.2i [XilinxISE]. Maksymalna częstotliwość zegara dla dekodera CABAC wynosi około 192 MHz. Dekoder zajmuje około 1600 komórek (ang. slices) układu Virtex 5, przy czym pojedyncza komórka zawiera cztery rejestry oraz cztery tablice LUT. Sprzętowa implementacja dekodera CABAC zawiera około 5500 linii kodu programu napisanego w języku opisu sprzętu Verilog [Verilog].** W związku z tym, że dla danego układu można uzyskać około trzykrotnie większą prędkość działania realizując go jako układ specjalizowany ASIC [Kuon07], autorski dekodery CABAC zrealizowany w postaci układu ASIC może pracować z maksymalną częstotliwością około 600 MHz przy użyciu tego samego procesu technologicznego co układ FPGA.

Autor zbadał wydajność sprzętowego dekodera CABAC na zbiorze 100 tys. symboli binarnych. Wyniki eksperymentów pokazały, że **sprzętowy dekodery CABAC potrzebuje na zdekodowanie symbolu binarnego średnio 7,5 cykli zegara.** Dla porównania, wydajny procesor sygnałowy TMS320DM642 wymaga około 75 cykli zegara aby zdekodować symbol binarny z użyciem autorskiej programowej implementacji dekodera CABAC. Tak więc, aby zdekodować symbol binarny sprzętowa wersja dekodera CABAC wymaga 10 razy mniej cykli zegara w porównaniu z programową wersją dekodera CABAC. Sprzętowa wersja dekodera CABAC nie została jeszcze uzupełniona o zaproponowany przez autora nowy mechanizm modelowania statystycznego wykorzystujący technikę CTW. Dlatego trudno określić wydajność obliczeniową sprzętowej wersji dekodera CABAC realizującego autorską metodę estymacji prawdopodobieństw kodowanych symboli. Niemniej jednak uzupełnienie sprzętowego dekodera CABAC o zaproponowaną bardziej zaawansowaną technikę modelowania statystycznego może być przedmiotem przyszłych prac.



# Podsumowanie i wnioski

## 1. Oryginalne osiągnięcia rozprawy

Głównym osiągnięciem rozprawy jest zaproponowanie oryginalnego rozszerzenia dla algorytmu CABAC, które znacznie poprawia efektywność kodera entropijnego. **Autor opracował efektywną technikę estymacji statystyki danych dla algorytmu CABAC, która w dokładniejszy sposób wyznacza prawdopodobieństwa kodowanych symboli wykorzystując technikę ważenia drzew kontekstów CTW (Rozdział 5.4.1 w rozprawie).** Opracowany przez autora mechanizm estymacji statystyki danych został wykorzystany w kontekstowym adaptacyjnym binarnym kodku arytmetycznym CABAC działającym w kodku wizyjnym MPEG-4 AVC. Efektywność zmodyfikowanego kodera CABAC została dokładnie zbadana oraz porównana z efektywnością oryginalnego kodera CABAC. Autor zbadał efektywność zmodyfikowanego kodera CABAC dla różnej głębokości  $D$  drzew kontekstów oraz szerokiego zakresu prędkości transmisji. Uzyskane wyniki eksperymentów pokazały, że w zależności od głębokości drzew kontekstów **zaproponowany w algorytmie CABAC mechanizm modelowania statystycznego pozwala zredukować prędkość transmisji o 2%-4,5% w stosunku do oryginalnego kodera CABAC.** Dla zaproponowanej techniki estymacji prawdopodobieństw warunkowych pracującej w algorytmie CABAC autor na drodze eksperymentalnej wyznaczył głębokość drzew kontekstów równą  $D = 8$ , która stanowi najlepszy kompromis pomiędzy efektywnością a złożonością kodeka entropijnego. Ponadto **autor wskazał możliwość dalszej poprawy efektywności zmodyfikowanego kodera CABAC stosując bardziej zaawansowany mechanizm inicjalizacji drzew kontekstów.**

Zmodyfikowany koder CABAC wykorzystujący zaproponowany przez autora efektywny mechanizm estymacji prawdopodobieństw warunkowych kodowanych symboli został przedstawiony na 35-tym spotkaniu grupy roboczej Video Coding Experts Group

(VCEG, tj. SG16/Q.6) [VCEG07], jako propozycja kodeka entropijnego dla przyszłego standardu kompresji sekwencji wizyjnych H.265. Zaproponowany przez autora kodek entropijny został opisany w dokumencie [VCEG-AI15]. Według wiedzy autora zmodyfikowany koder CABAC wykorzystujący autorski mechanizm modelowania statystycznego jest jednym z najbardziej efektywnych koderów entropijnych na całym świecie.

Autor zaproponował i zbadał również dwie inne techniki adaptacji kodowania arytmetycznego w koderze CABAC wykorzystujące:

- a) predykcję z częściowym dopasowaniem (ang. *Prediction with Partial Matching*) (Rozdział 5.4.2 w rozprawie);
- b) autorską metodę łącznego użycia techniki ważenia drzew kontekstów oraz techniki predykcji z częściowym dopasowaniem (Rozdział 5.4.3 w rozprawie).

Zaproponowane rozszerzenia kodera entropijnego CABAC mogą zostać użyte do poprawy efektywności współczesnych koderów wizyjnych, jak również mogą znaleźć zastosowanie w koderach wizyjnych następnej generacji [VCEG07].

**Ważnym osiągnięciem** rozprawy jest odpowiedź na pytanie: jak użycie zaproponowanych bardziej zaawansowanych mechanizmów estymacji wpływa na efektywność współczesnych adaptacyjnych koderów entropijnych. Poza tym rozprawa wyraźnie wskazuje, która technika estymacji statystyki danych pozwala osiągnąć największą poprawę efektywności kodera entropijnego. Rozprawa odpowiada również na inne ważne pytanie: w jakim stopniu zastosowanie dokładniejszych technik modelowania statystycznego danych wpływa na złożoność zmodyfikowanego kodeka entropijnego oraz zmodyfikowanego kodeka wizyjnego MPEG-4 AVC.

**Innymi oryginalnymi wynikami** rozprawy są:

- Zbadanie efektywności zmodyfikowanych koderów entropijnych CABAC (wykorzystujących zaproponowane mechanizmy estymacji prawdopodobieństw) oraz porównanie ich efektywności z efektywnością oryginalnego kodera CABAC (Rozdział 6 w rozprawie);
- Zbadanie wpływu zastosowanej metody inicjalizacji statystyki danych na efektywność zaawansowanych koderów entropijnych (Rozdział 6 w rozprawie);



- Zbadanie i porównanie efektywności dwóch rdzeni kodera arytmetycznego: M-kodera oraz rdzenia kodera arytmetycznego stosowanego w standardzie H.263 (Rozdział 7.4 w rozprawie);
- Porównanie czasów kodowania oraz czasów dekodowania dla oryginalnego kodeka entropijnego CABAC oraz zmodyfikowanego kodeka CABAC z zaproponowanym mechanizmem estymacji wykorzystującym technikę ważenia drzew kontekstów CTW (Rozdział 8.3 oraz Rozdział 8.4.3 w rozprawie);
- Porównanie czasów kodowania oraz czasów dekodowania dla oryginalnego kodeka MPEG-4 AVC oraz zmodyfikowanego kodeka MPEG-4 AVC z algorytmem CABAC i autorską metodą estymacji wykorzystującą technikę ważenia drzew kontekstów CTW (Rozdział 8.6.2 w rozprawie);
- Propozycja i implementacja oryginalnej architektury programowej wersji kodera i dekodera CABAC oraz sprzętowej wersji dekodera CABAC. Zbadanie szybkości działania programowej oraz sprzętowej wersji dekodera CABAC (Rozdział 9.1 oraz Rozdział 9.2 w rozprawie);
- Porównanie efektywności algorytmu CABAC oraz algorytmu UVLC (ang. *Universal Variable-Length Coding*) wykorzystującego kodowanie Exp-Golomba oraz kontekstowe adaptacyjne kodowanie o zmiennej długości słowa (ang. *Context-Adaptive Variable Length Coding – CAVLC*) (Rozdział 4.3.1 w rozprawie);
- Zbadanie i porównanie złożoności dekodera entropijnego CABAC oraz autorskiego zoptymalizowanego dekodera UVLC (Rozdział 4.3.2 w rozprawie).

## 2. Wnioski końcowe

Rozprawa doktorska odpowiada na ważne pytanie, o ile można zwiększyć efektywność współczesnych adaptacyjnych koderów arytmetycznych stosowanych w zaawansowanych koderach wizyjnych stosując bardziej zaawansowane techniki adaptacji kodowania arytmetycznego. Eksperymenty przeprowadzono z użyciem najbardziej obecnie zaawansowanego kontekstowego adaptacyjnego binarnego kodera arytmetycznego CABAC stosowanego w kodeku wizyjnym MPEG-4 AVC. Co więcej, rozprawa przedstawia szczegóły dotyczące implementacji adaptacyjnych koderów i dekoderek entropijnych w zastosowaniu do hybrydowej kompresji sekwencji wizyjnych.

Uzyskane wyniki eksperymentów pokazały, że poprawa technik adaptacji współczesnych koderów arytmetycznych stosowanych w kompresji sekwencji wizyjnych prowadzi do wzrostu efektywności kodowania entropijnego. Zmodyfikowany koder CABAC pracujący z zaproponowanym mechanizmem estymacji statystyki danych wykorzystującym technikę ważenia drzew kontekstów CTW pozwala na 2%-4,5% redukcję prędkości transmisji w porównaniu z oryginalnym koderem CABAC. Zdaniem autora jest to bardzo dobry rezultat. Dla porównania w standardzie kompresji sekwencji wizyjnych H.263 opcjonalny, bardziej efektywny koder arytmetyczny pozwala na uzyskanie prędkości transmisji o 5% mniejszej niż prędkość transmisji uzyskana przy użyciu prostszego kodera entropijnego o zmiennej długości słowa (ang. *Variable Length Coding* – VLC) [Côté98, Erol98]. Mimo tego koder arytmetyczny został włączony do standardu. Ponadto dalsza poprawa efektywności współczesnych adaptacyjnych koderów entropijnych jest zadaniem coraz trudniejszym.

Wyższą efektywność zmodyfikowanego kodera CABAC (w stosunku do oryginalnego kodera CABAC) uzyskano nawet stosując uproszczony algorytm inicjalizacji drzew kontekstów, w porównaniu z algorytmem inicjalizacji kontekstów stosowanym w oryginalnym algorytmie CABAC. Przeprowadzone eksperymenty pokazały, że efektywność zmodyfikowanych koderów CABAC można dodatkowo poprawić stosując bardziej zaawansowane techniki inicjalizacji drzew kontekstów.

Przyrost efektywności zmodyfikowanych koderów CABAC w stosunku do efektywności oryginalnego kodera CABAC ściśle zależy od:

- treści sekwencji wizyjnej, która wpływa na rozkład prawdopodobieństwa kodowanych danych;
- wartości parametru kwantyzacji QP, który określa statystykę danych poddawanych kodowaniu oraz rozmiar danych w ramach jednego plastra (ang. slice);
- głębokości  $D$  drzew kontekstów, która określa liczbę symboli poprzednio zakodowanych branych pod uwagę przy estymacji prawdopodobieństwa warunkowego kolejnego symbolu.

Wzrost kompresji w adaptacyjnych koderach entropijnych jest uzyskiwany kosztem większej złożoności zarówno kodera, jak i dekodera entropijnego. Złożoność zmodyfikowanego kodeka CABAC z zaproponowanym mechanizmem estymacji wykorzystującym technikę ważenia drzew kontekstów CTW ściśle zależy od głębokości  $D$  drzew kontekstów. Zastosowanie w zmodyfikowanym kodeku CABAC drzew kontekstów o głębokości  $D = 8$  daje dobre rezultaty i zwiększa czas kodowania całego kodera MPEG-4

AVC do 2,5% oraz czas dekodowania dekodera MPEG-4 AVC do 80% (dla przepływności bitowych do 10 Mb/s).

Uzyskane w rozprawie wyniki eksperymentów odpowiadają wynikom uzyskanym w innych ostatnio prowadzonych pracach nad ulepszeniem kodowania entropijnego. Porównując dwie najbardziej obecnie zaawansowane techniki kodowania entropijnego w zaawansowanym hybrydowym kodowaniu sekwencji wizyjnych (technika UVLC oraz technika CABAC) wiadomo, że wyższa efektywność algorytmu CABAC w stosunku do algorytmu UVLC (redukcja prędkości transmisji pomiędzy 6% a 20%) została osiągnięta przez znaczące zwiększenie złożoności kodeka entropijnego. Czas dekodowania dekodera CABAC jest 30% - 130% razy większy od czasu dekodowania dekodera UVLC. Co prawda takie zwiększenie złożoności prowadzi do większego wzrostu efektywności kodowania, niemniej jednak dalsza poprawa coraz bardziej zaawansowanych koderów entropijnych jest coraz trudniejsza.

W rozprawie doktorskiej pokazano, że kodery entropijne stosowane we współczesnych koderach wizyjnych wymagają znacznych ilości obliczeń w celu zakodowania i zdekodowania pojedynczego symbolu. Wysoka złożoność zaawansowanych koderów entropijnych jest głównie wynikiem zastosowania złożonych mechanizmów estymacji prawdopodobieństw warunkowych. Powoduje to, że kodowanie i dekodowanie entropijne realizowane w czasie rzeczywistym dla sekwencji wizyjnych wysokiej jakości (ang. *High Definition Television* – HDTV) i prędkości transmisji większych niż 10 Mb/s jest zadaniem bardzo trudnym nawet dla współczesnych procesorów o wysokiej wydajności. Dlatego, zaproponowanie zoptymalizowanej architektury dla zaawansowanych koderów entropijnych zdolnych do przetwarzania w czasie rzeczywistym strumieni binarnych o przepływnościach rzędu dziesiątki Mb/s jest trudnym zadaniem i stanowi wyzwanie dla projektantów oprogramowania.



# Spis literatury zamieszczony w rozprawie

- [Åberg97] J. Åberg, and Y. M. Shtarkov, Text Compression by Context Tree Weighting. IEEE Data Compression Conference, pp. 377-386, March 1997.
- [Achar05a] T. Acharya, and A. K. Ray, Image Processing. Principles and Applications. New Jersey, John Wiley & Sons, 2005.
- [Achar05b] T. Acharya, and P. S. Tsai, JPEG 2000 Standard for Image Compression. Concepts, Algorithms and VLSI Architectures. New Jersey, John Wiley & Sons, 2005.
- [ADB] Advanced Digital Broadcast, [www.adbglobal.com](http://www.adbglobal.com).
- [Apos85] A. Apostolico, and A. S. Fraenkel, Robust transmissions of unbounded strings using Fibonacci representations. Technical Report CS85-14, Dpt of Applied Mathematics, The Weizmann Institute of Science, Rehovot Israel, 1985.
- [AVC] ISO/IEC 14496-10, Generic Coding of Audio-Visual Objects, Part 10: Advanced Video Coding, March 2006.
- [AVCSofT] H.264/AVC software coordination site – <http://bs.hhi.de/~suehring/tml>.
- [AVS] Audio Video Coding Standard Workgroup of China (AVS), The Standards of People's Republic of China GB/T 20090.2-2006, Information Technology – Advanced Coding of Audio and Video – Part 2:Video, 2006.
- [Bar04] V. Baronchini, and T. Oelbaum, Subjective test results for the CfP on scalable video coding technology. Doc. ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 M10737, Munich, March 2004.
- [Beg104] R. Begleiter, R. El-Yaniv, and G. Yona, On Prediction Using Variable Order Markov Models. Journal of Artificial Intelligence Research, Vol. 22 (2004), pp. 385-421, December 2004.
- [Bely06] E. Belyaev, M. Gilmutdinov, and A. Turlikov, Binary Arithmetic Coding System with Adaptive Probability Estimation by “Virtual Sliding Window”. IEEE International Symposium on Consumer Electronics, pp. 1-5, 2006.
- [Bloom98] C. Bloom, Solving the Problems of Context Modeling,

- [Bonc06] C. Boncelet, Lossless Image Compression with BCTW. IEEE International Conference on Image Processing 2006, pp. 2281-2284, 8-11 October, 2006.
- [Bovik00] A. Bovik (Editor), Handbook of Image and Video Processing. Canada, Academic Press, A Harcourt Science and Technology Company, 2000.
- [Boy04] J. M. Boyce, Weighted Prediction in the H.264/MPEG AVC Video Coding Standard. International Symposium on Circuit and Systems (ISCAS) 2004, pp. 789-792, Canada, 23-26 May 2004.
- [bzip2] J. Seward, Bzip2 and libbzip2, Version 1.0.3. A program and library for data compression. <http://www.bzip.org>.
- [Clear84] J. G. Cleary, and I. H. Witten, Data Compression Using Adaptive Coding and Partial String Matching. IEEE Transactions on Communication, Vol. 32, No. 4, pp. 396-402, April 1984.
- [Clear93] J. G. Cleary, and W. J. Teahan, Unbounded Length Contexts for PPM. Computer Journal, Vol. 36, No. 5, pp. 1-9, 1993.
- [Côté98] G. Côté, B. Erol, M. Gallant, and F. Kossentini, H.263+: Video Coding at Low Bit Rates. IEEE Transactions on Circuit and Systems for Video Technology, Vol. 8, No. 7, pp. 849-866, November 1998.
- [Doma98] M. Domański, Zaawansowane techniki kompresji obrazów i sekwencji wizyjnych. Poznań, 1998.
- [Ekstr96] N. Ekstrand, Lossless Compression of Grayscale Images via Context Tree Weighting. Data Compression Conference 1996, pp. 132-139, 31 March – 3 April 1996.
- [Elias75] P. Elias, Universal Codeword Sets and Representation of the Integers. IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 21, No. 2, pp. 194-203, 1975.
- [Erol98] B. Erol, M. Gallant, G. Côté, and F. Kossentini, The H.263+ Video Coding Standard: Complexity and Performance. Data Compression Conference, pp. 259-268, 30 March-1 April 1998.
- [Fan04] L. Fan, S. Ma, and F. Wu, Overview of AVS Video Standard. IEEE International Conference on Multimedia and Expo 2004 (ICME), pp. 423-426, Taipei, Taiwan, 27-30 June 2004.
- [Fere03] C. Feregrino, High Performance PPMC Compression Algorithm. Fourth Mexican International Conference on Computer Science 2003, pp. 135-142, 8-12 September, 2003.
- [Firo06] M. H. Firooz, and M. S. Sadri, Improving H.264/AVC Entropy Coding Engine Using CTW method. Picture Coding Symposium, April 2006.

- [Flier04] M. Flierl, and B. Girod, Video Coding with Superimposed Motion-Compensated Signals. Applications to H.264 and Beyond, United States of America, Kluwer Academic Publisher, 2004.
- [Gall75] R. G. Gallager, and D. Van Voorhis, Optimal Source Codes for Geometrically Distributed Integer Alphabets. IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 21, pp. 228-230, March IT-1975.
- [Gall78] R. G. Gallager, Variations on a Theme by Huffman. IEEE Transactions on Information Theory, Vol. IT-24, No. 6, pp. 668-674, 1978.
- [Gard98] T. R. Gardos, H.263+, The New ITU-T Recommendation for Video Coding at Low Bit Rates. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. 6, pp. 3793-3796, 12-15 May 1998.
- [Ghan04] M. Ghandi, M. M. Ghandi, and M. B. Shamsollahi, A Novel Context Modeling Scheme for Motion Vectors Context-Based Arithmetic Coding. IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering (CCECE04), May 2-5, 2004, Ontario, Canada.
- [Golo66] S. W. Golomb, Run-Length Encoding. IEEE Transactions on Information Theory, Vol. IT-12, pp. 399-401, 1966.
- [Graj05] T. Grajek i D. Karwowski, Złożoność Obliczeniowa i Efektywność Kodowania Entropijnego w Standardzie H.264/AVC. Krajowa Konferencja Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji, str. 377-380, Kraków, 15-17 Czerwca 2005.
- [gzip] GZIP Homepage, <http://www.gzip.org>.
- [H263] ITU-T Rec. H.263, Video Coding for Low Bit Rate Communication, August 2005.
- [Hong04] D. Hong, M. van der Schaar, and B. Pesquet – Popescu, Arithmetic Coding with Adaptive Context-Tree Weighting for the H.264 Video Coders. Visual Communications and Image Processing 2004, Vol. 5308, pp. 1226-1235, January 2004.
- [Howa92] P. G. Howard, and J. S. Vitter, Practical Implementations of Arithmetic Coding. Image and Text Compression, Storer, Ed., pp. 85-112, Kluwer Academic, 1992.
- [Howa93] P. G. Howard, The Design and Analysis of Efficient Lossless Data Compression Systems, PhD Dissertation, Department of Computer Sciences, Brown University, 1993.
- [Huff52] D. A. Huffman, A Method for the Construction of Minimum-Redundancy Codes. Proceedings of the I. R. E, pp. 1098-1101, September, 1952.
- [IntelComp] Intel C++ Compiler for Windows, <http://www.intel.com>.

- [Jack05] K. Jack, Video Demystified. A Handbook for the Digital Engineer, fourth edition. Newnes, 2005.
- [Jain81] J. R. Jain, and A. K. Jain, Displacement Measurement and Its Application in Interframe Image Coding. IEEE Trans. Commun. Vol. COM-29, pp. 1799-1808, 1981.
- [JBIG] ISO/IEC 11544 and ITU-T Rec. T.82, Information Technology – Coded Representation of Pictures and Audio Information – Progressive Bi-Level Image Compression, March 1993.
- [JBIG2] ISO/IEC 14492 and ITU-T Rec. T.88, JBIG2 Bi-Level Image Compression standard, 2000.
- [JPEG] ISO/IEC 10918-1 and ITU-T Rec. T.81, Information Technology – Coded Representation of Picture and Audio Information – Digital Compression and Coding of Continuous-Tone Still Images (JPEG standard), 1993.
- [JPEGLS] ISO/IEC 14495-1 and ITU-T Rec. T.87, Information Technology – Lossless and Near Lossless Compression of Continuous – Tone still Images, 1999.
- [JPEG2000] ISO/IEC 15444-1 and ITU-T Rec. T.800, Information Technology – JPEG 2000 image coding system, 2000.
- [JSVM07] JSVM Software Manual, Joint Video Team/ISO/IEC, June 2007.
- [Kalv07] H. Kalva, and J. B. Lee, The VC-1 Video Coding Standard. IEEE Multimedia, October-December 2007, Vol. 14, No. 4, pp. 88-91.
- [Kam03] N. Kamaci, and Y. Altunbasak, Performance Comparison of the Emerging H.264 Video Coding Standard with the Existing Standards. IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME), Vol. 1 (6-9), pp. 345-348, 2003.
- [Karw04a] D. Karwowski, Kodowanie Entropijne w Standardzie H.264/AVC. Krajowa Konferencja Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji, str. 471-474, Warszawa, 16-18 czerwca 2004.
- [Karw04b] D. Karwowski, An Efficient Architecture of H.264/AVC CAVLC Decoder. 11<sup>th</sup> International Workshop on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), pp. 151-154, Poznań, Poland, September 13-15, 2004.
- [Karw06] D. Karwowski, Ulepszone Adaptacyjne Kodowanie Arytmetyczne w Zaawansowanym Koderze Wizyjnym H.264/AVC Wykorzystujące Ważenie Drzew Kontekstów (CTW). V Sympozjum Naukowe “Techniki Przetwarzania Obrazu”, str. 469-475, Serock, Listopad 2006.



- [Karw07a] D. Karwowski, Improved Arithmetic Coding in H.264/AVC Using Context-Tree Weighting and Prediction by Partial Matching. European Signal Processing Conf. EUSIPCO 2007, pp. 1270-1274, September 2007, Poznań, Poland.
- [Karw07b] D. Karwowski, and M. Domański, Improved Arithmetic Coding In H.264/AVC Using Context-Tree Weighting Method. Picture Coding Symposium PCS 2007, November 2007, Lisboa, Portugal.
- [Kern88] W. Kernighan, and M. Ritchie, C Programming Language (2nd Edition). Prentice Hall Software, 1988.
- [Kuon07] I. Kuon, and J. Rose, Measuring the Gap Between FPGAs and ASICs. IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst., Vol. 26, No. 2, p. 203, February 2007.
- [Krich81] R. E. Krichevsky, and V. K. Trofimov, The Performance of Universal Encoding, IEEE Transactions on Information Theory, Vol. IT-27, pp. 199-207, March 1981.
- [Lange06] R. Lange, Multiresolution Representation of Motion Vectors in Video Compression, PhD Dissertation, Poznań University of Technology, 2006.
- [Lam06] P. Lambert, W. Neve, P. Neve, I. Moerman, P. Demeester, and R. Walle, Rate-Distortion Performance of H.264/AVC Compared to State-of-the-art Video Codecs. IEEE Transactions on Circuit and Systems for Video Technology, Vol. 16, issue 1, pp. 134-140, January 2006.
- [Luo03] Y. Luo, and R. K. Ward, Removing the Blocking Artifacts of Block-Based DCT Compressed Images. IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 12, No. 7, pp. 838-842, July 2003.
- [Mah05] M. Mahoney, Adaptive Weighting of Context Models for Lossless Data Compression. Florida Tech. Technical Report CS-2005-16, 2005.
- [Marp01] D. Marpe, G. Blättermann, G. Heising, and T. Wiegand, Video Compression Using Context-Based Adaptive Arithmetic Coding. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP'01), Thessaloniki, Greece, September 2001.
- [Marp02a] D. Marpe, G. Blättermann, G. Heising, and T. Wiegand, Efficient Entropy Coding for Video Compression by Using Context-Based Adaptive Binary Arithmetic Coding. 4th International ITG Conference on Source and Channel Coding (ICSCC'02), Berlin, Germany, January 2002.
- [Marp02b] D. Marpe, H. Schwarz, G. Blättermann, G. Heising, and T. Wiegand, Context-Based Adaptive Binary Arithmetic Coding in JVT/H.26L. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP'02), Rochester, NY, USA, September 2002.
- [Marp03a] D. Marpe, H. Schwarz, and T. Wiegand, Context-Based Adaptive Binary Arithmetic Coding in the H.264/AVC Video Compression Standard. IEEE

Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Vol. 13, No. 7, pp. 620-636, July 2003.

- [Marp03b] D. Marpe, and T. Wiegand, A highly Efficient Multiplication-Free Binary Arithmetic Coder and Its Application in Video Coding. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP'03), Barcelona, Spain, September 2003.
- [Marp04] D. Marpe, Adaptive Context-Based and Tree-Based Algorithms for Image Coding and Denoising. Doctoral Dissertation, Universität Rostock, Rostock 2004.
- [Marp05a] D. Marpe, S. Gordon, and T. Wiegand, H.264/MPEG4-AVC Fidelity Range Extensions: Tools, Profiles, Performance, and Application Areas. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP'05), Genova, Italy, September 2005.
- [Marp05b] D. Marpe, The H.264 / MPEG4-AVC Standard, Core Coding technology and Recent Extensions. Proc. IWSSIP 2005, Chalkida, Greece, September 22-24, 2005.
- [Marp06a] D. Marpe, G. Marten, and H. L. Cycon, A Fast Renormalization Technique for H.264/MPEG4-AVC Arithmetic Coding. 51st Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Technische Universität Ilmenau, September 2006.
- [Marp06b] D. Marpe, T. Wiegand, and G. J. Sullivan, The H.264/MPEG4 Advanced Video Coding Standard and its Applications. IEEE Image Communications Magazine, Vol. 44, Is. 8, pp. 134-143, August 2006.
- [Marp06c] D. Marpe, H. Kirchhoffer, and G. Marten, Fast Renormalization for H.264/MPEG4-AVC Arithmetic Coding. Proc. 14th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2006), Florence, Italy, September 4-8, 2006.
- [Mila06] S. Milani, and G. A. Mian, An Improved Context Adaptive Binary Arithmetic Coder for the H.264/AVC Standard. Proc. of European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2006), September 4-8, 2006, Florence, Italy.
- [Moff90] A. Moffat, Implementing the PPM Data Compression Scheme. IEEE Transactions on Communications, Vol. 38, No. 11, pp. 1917-1921, November 1990.
- [MPEG-1] ISO/IEC 11172-2, Coding of Moving Pictures and Associated Audio for Digital Storage Media up to about 1.5 Mbit/s, Part 2: Video. (MPEG-1), November 1993.
- [MPEG-2] ISO/IEC 13818-2 and ITU-T Rec. H.262, Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio Information – Part 2: Video. (MPEG-2), November 1994.
- [MP2AAC] ISO/IEC 13818-7, Information Technology – Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio, Part 7: Advanced Audio Coding, 1997.

- [MP4AAC] ISO/IEC 14496-3, Information Technology – Coding of Audio Visual Objects – Audio, 2001.
- [Mrak03a] M. Mrak, D. Marpe, and S. Grgic, Comparison of Context-Based Adaptive Binary Arithmetic Coders in Video Compression. Proc. EC-VIP-MC'03, July 2003.
- [Mrak03b] M. Mrak, D. Marpe, and T. Wiegand, Application of Binary Context Trees in Video Compression. Picture Coding Symposium (PCS'03), St. Malo, France, April 2003.
- [Mrak03c] M. Mrak, D. Marpe, and T. Wiegand, A Context Modeling Algorithm and its Application in Video Coding. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP'03), Barcelona, Spain, September 2003.
- [Mual02] M. E. Al-Mualla, Video Coding for Mobile Communications. Efficiency, Complexity, and Resilience. United States of America, Academic Press, An Elsevier Science Imprint, 2002.
- [Ohm04] J. –R. Ohm, Multimedia Communication Technology. Representation, Transmission and Identification of Multimedia Signals, Springer. 2004.
- [Oster04] J. Ostermann, J. Bormans, P. List, D. Marpe, M. Narroschke, F. Pereira, T. Stockhammer, and T. Wedi, Video Coding with H.264/AVC: Tools, Performance, and Complexity. IEEE Circuits and Systems Magazine, Vol. 4, No. 1, pp. 7-28, April 2004.
- [Pas76] R. Pasco, Source Coding Algorithms for Fast Data Compression. Doctoral Dissertation, Stanford University, 1976.
- [Penn88] W. B. Pennebaker, J. L. Mitchell, G. G. Langdon, and R. B. Arps, An Overview of the Basic Principles of the Q-coder Adaptive Binary Arithmetic Coder. IBM Journal of research and development, Vol. 32, No. 6, pp. 771-726, November 1998.
- [PNG] ISO/IEC 15948, Information technology – Computer Graphics and Image Processing – Portable Network Graphics (PNG): Functional specification, 2003.
- [Przel05] A. Przelaskowski, Kompresja danych. Wydawnictwo BTC, Warszawa, Polska, 2005.
- [Raja04] G. Raja, and M. J. Mirza, Performance Comparison of Advanced Video Coding H.264 Standard with Baseline H.263 and H.263+ Standards. International Symposium on Communications and Information Technologies, pp. 743-746, Sapporo, Japan, October 26-29, 2004.
- [Ran95] X. Ran, and C. Choo, Syntax-Based Arithmetic Video Coding for Very Low Bitrate Visual Telephony, International Conference on Image Processing, Vol. 2, pp. 410-413, October 1995.

- [Rice79] R. F. Rice, Some Practical Universal Noiseless Coding Techniques. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, JPL Publication 79-22, March 1979.
- [Richa02] I. E. G. Richardson, Video Codec Design. Developing Image and Video Compression Systems. John Wiley & Sons, 2002.
- [Richa03] I. E. G. Richardson, H.264 and MPEG-4 Video Compression. John Wiley & Sons, 2003.
- [Rijk96] K. Rijkse, H.263: Video Coding for Low-Bit-Rate Communication. IEEE Communication Magazine, Vol. 34, pp. 42-45, December 1996.
- [Riss76] J. J. Rissanen, Generalized Kraft Inequality and Arithmetic Coding. IBM Journal of Research and Development, Vol. 20, pp. 198-203, May 1976.
- [Riss79] J. J. Rissanen, and G. G. Langdon, Arithmetic Coding. IBM Journal of Research and Development, Vol. 23, No. 2, pp. 149-162, March 1979.
- [Ryab96] B. Y. Ryabko, Imaginary Sliding Window as a Tool for Data Compression. Problems of information transmission, pp. 156-163, January 1996.
- [Said04] A. Said, Introduction to Arithmetic Coding – Theory and Practice. Imaging systems Laboratory, HP Laboratories Palo Alto, April 21, 2004.
- [Salom06] D. Salomon, Data Compression. The Complete Reference – 4th Edition. Springer-Verlag, 2006.
- [Salom07] D. Salomon, Variable-Length Codes for Data Compression. Springer-Verlag, 2007.
- [Sayo00] K. Sayood, Introduction to Data Compression, 2<sup>nd</sup> ed. Morgan Kaufmann, 2000.
- [Schäf03] R. Schäfer, T. Wiegand, and H. Schwarz, The Emerging H.264/AVC Standard. EBU Technical Review, Special Issue on “Best of 2003”, January 2003.
- [Schw02a] H. Schwarz, and T. Wiegand, The Emerging JVT/H.26L Video Coding Standard. International Broadcast Convention (IBC'02), Amsterdam, Netherlands, July 2002.
- [Schw02b] H. Schwarz, D. Marpe, and T. Wiegand, CABAC and slices, Joint Video Team of ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 & ITU-T SG16/Q.6 Doc. JVT-D020, Klagenfurt, Austria, July 2002.
- [Schw07] H. Schwarz, D. Marpe, and T. Wiegand, Overview of the Scalable Video Coding Extension of the H.264/AVC Standard, IEEE Transactions on Circuit and Systems for Video Technology, Vol. 17, No. 9, pp. 1103-1120, September 2007.
- [Shan48] C. E. Shannon, A Mathematical Theory of Communications. Bell System Technical Journal, Vol. 27, pp. 379-423, 623-656, 1948.

- [Shkar02] D. Shkarin, PPM: One Step to Practicality. Data Compression Conference 2002, pp. 202-211, 2-4 April 2002.
- [Skarb93] W. Skarbek, Metody Reprezentacji Obrazów Cyfrowych. Warszawa, 1993.
- [Skarb98] W. Skarbek, Multimedia. Algorytmy i Standardy Kompresji. Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa, 1998.
- [Stock03] T. Stockhammer, and T. Wiegand, H.264/AVC for Wireless Applications. IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications (MoMuC), Munich, Germany, October 2003.
- [Sull04] G. Sullivan, P. Topiwala, and A. Luthra, The H.264/AVC Advanced Video Coding Standard: Overview and Introduction to the Fidelity Range Extensions, SPIE Conference on Applications of Digital Image Processing XXVII, August, 2004.
- [Sull05] G. Sullivan, and T. Wiegand, Video Compression - From Concepts to the H.264/AVC Standard. Proceedings of the IEEE, Special Issue on Advances in Video Coding and Delivery, Vol. 93, No. 1, pp. 18-31, January 2005.
- [Sunna05] P. Sunna, AVC/H.264 – An Advanced Video Coding System for SD and HD Broadcasting, EBU Technical Review No. 302, April 2005.
- [Taub02] D. S. Taubman, and M. W. Marcellin, JPEG2000 Image Compression Fundamentals. Standards and Practice, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2002.
- [Teuh78] J. Teuhola, A Compression Method for Clustered Bit-Vectors. Information Processing Letters, Vol. 7, pp. 308-311, October 1978.
- [TIFF] Adobe Systems Incorporated, TIFF, revision 6.0. Final – June 3, 1992.
- [TI642] Texas Instrument, TMS320DM642 Video/Imaging Fixed-Point Digital Signal Processor. [www.ti.com](http://www.ti.com), July, 2002.
- [Tri02] G. A. Triantafyllidis, D. Tzovaras, and M. G. Strintzis, Blocking Artifact Detection and Reduction in Compressed Data. IEEE Transactions on Circuit and Systems for Video Technology, Vol. 12, No. 10, pp. 877-890, October 2002.
- [Tzir94] G. Tziritas, C. Labit, Motion Analysis for Image Sequence Coding. Amsterdam, Elsevier 1994.
- [VCEG-AI15] ITU-T VCEG SG 16 Q.6, Doc. VCEG-AI15, Improved Context-based Adaptive Binary Arithmetic Coding using Context-Tree Weighting, 35rd VCEG Meeting, Berlin, Germany, 16-18 July 2008.
- [VCEG07] ITU-T VCEG SG 16 Q.6, Doc. VCEG-AG01, 33rd VCEG Meeting Report, Shenzhen, China, 20 October 2007.

- [VC-1] Society of Motion Picture and Television Engineers, VC-1 Compressed Video Bitstream Format and Decoding Process, SMPTE 421M-2006, 2006.
- [Verilog] IEEE Standard Hardware Description Language Based on the Verilog Hardware Description Language, IEEE Std 1364-1995, IEEE, 1995.
- [Virtex-5] Virtex-5 FPGA Family Datasheet. Xilinx, Inc., San Jose, CA, 2007, <http://www.xilinx.com/>.
- [Volf98] P. A. J. Volf, and F. M. J. Willems, Switching Between Two Universal Source Coding Algorithms. Data Compression Conference, pp. 491–500, Snowbird, Utah, March 30 – April 1 1998.
- [Volf99] P. A. J. Volf, F. M. J. Willems, and Tj. J. Tjalkens, Complexity Reducing Techniques for the CTW Algorithm. In Symp. on Inform. Theory in the Benelux, Vol. 20, pp. 25–32, Haasrode, Belgium, May 27-28 1999.
- [Volf02] P. A. J. Volf, Weighting Techniques in Data Compression: Theory and Algorithms. Doctoral Dissertation, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven 2002.
- [Wan04] Q. Wang, D. Zhao, S. Ma, Y. Lu, Q. Huang, and W. Gao, Context-Based 2D-VLC for Video Coding. IEEE International Conference on Multimedia and Expo 2004 (ICME), pp. 89-92, Taipei, Taiwan, 27-30 June 2004.
- [Welch84] T. A. Welch, A Technique for High-Performance Data Compression. IEEE Computer, pp. 8-19, June 1984.
- [Wieg03a] T. Wiegand, G. J. Sullivan, G. Bjontegaard, and A. Luthra, Overview of the H.264/AVC Video Coding Standard. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Vol. 13, No. 7, pp. 560-576, July 2003.
- [Wieg03b] T. Wiegand, H. Schwarz, A. Joch, F. Kossentini, and G. J. Sullivan, Rate-Constrained Coder Control and Comparison of Video Coding Standards. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Vol. 13, No. 7, pp. 688-703, July 2003.
- [Wieg07] T. Wiegand, and G. J. Sullivan, The H.264/AVC Video Coding Standard {Standards in a nutshell}, IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 24, No. 2, March 2007.
- [Will06] F. M. J. Willems, T. J. Tjalkens, and T. Ignatenko, Context-Tree Weighting and Maximizing: Processing Betas. Inaugural Workshop ITA (Information Theory and its Applications), UCSD Campus, La Jolla, Febr. 6 - 10, 2006.
- [Will95] F. M. J. Willems, Y. M. Shtarkov, and Tj. J. Tjalkens, The Context-Tree Weighting Method: Basic Properties. IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 41, No. 3, pp. 653-664, May 1995.

- [Will97a] F. M. J. Willems, and Tj. J. Tjalkens, Complexity Reduction of the Context-Tree Weighting Algorithm: A study for KPN research. Technical Report EIDMA-RS.97.01, Euler Institute for Discrete Mathematics and its Applications, Eindhoven University of Technology, 1997.
- [Will97b] F. M. J. Willems, and Tj. J. Tjalkens, Complexity Reduction of the Context-Tree Weighting Method. In Symp. on Inform. Theory in the Benelux, Vol. 18, pp. 123–130, Veldhoven, The Netherlands, May 15-16 1997.
- [Will98a] F. M. J. Willems, The Context-Tree Weighting Method: Extensions. IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 44, No. 2, pp. 792-797, March 1998.
- [Will98b] F. M. J. Willems, and Tj. J. Tjalkens, Reducing Complexity of the Context-Tree Weighting Method. Proc. IEEE International Symposium on Information Theory, p. 347, Cambridge, Mass., August 16-21, 1998.
- [Witt87] I. H. Witten, J. G. Cleary, and R. Neal, Arithmetic Coding for Data Compression. Commun ACM., no. 6, pp. 520-540, June 1987.
- [Woot05] C. Wootton, A Practical Guide to Video and Audio Compression. From Sprockets and Rasters to Macro Blocks, Focal Press, 2005.
- [Wysz82] G. Wyszecki, and W. S. Styles, Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae. Second Edition, Wiley 1982.
- [Xiao06] S. Xiao, and C. G. Boncelet, On the Use of Context-Weighting in Lossless Bilevel Image Compression. IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 15, No. 11, November 2006.
- [XilinxISE] Xilinx ISE 9.2i software manuals, <http://www.xilinx.com/>.
- [x264Soft] x264 Project. <http://www.videolan.org/developers/x264.html>.
- [Ziv77] J. Ziv, and A. Lempel, A Universal Algorithm for Data Compression. IEEE Transactions on Information Theory, Vol. IT-23, No. 3, pp. 337-343, May 1977.
- [Ziv78] J. Ziv, and A. Lempel, A Universal Algorithm for Data Compression. IEEE Transactions on Information Theory, Vol. IT-24, No. 5, pp. 530-536, September 1978.