

Załącznik 2

Autoreferat w języku polskim

Autoreferat

1. Imię i nazwisko: **Roman Włodzimierz Starosolski**

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe:
 - a) **Doktor nauk technicznych w dyscyplinie naukowej informatyka**
Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej, temat rozprawy doktorskiej: „Bezstratne algorytmy kompresji obrazów”, promotor: prof. dr hab. inż. Zbigniew J. Czech, recenzenci: prof. dr hab. inż. Władysław Skarbek oraz prof. dr hab. inż. Konrad Wojciechowski, rozprawa została wyróżniona, 2002
 - b) **Magister inżynier informatyk**
Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej, temat pracy dyplomowej: „Generacja obrazów stereoskopowych”, promotor: dr inż. Marek Błaszczuk, ocena: bardzo dobry, 1995

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych:
 - od 2002: Adiunkt, Instytut Informatyki, Politechnika Śląska
 - 2009 – 2014: Adiunkt, Górnośląska Wyższa Szkoła Handlowa im. W. Korfańtego w Katowicach
 - 2008 – 2009: Adiunkt, Wydział Informatyki, Śląska Wyższa Szkoła Informatyczno-Medyczna
 - 2000 – 2002: Asystent, Instytut Informatyki, Politechnika Śląska
 - 1995 – 2000: Doktorant oraz asystent (urlop bezpłatny), Instytut Informatyki, Politechnika Śląska

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):
 - a) Cykl publikacji powiązanych tematycznie, pod tytułem: *Metody poprawy efektywności algorytmów kompresji obrazów*
 - [rs1] R. Starosolski, “Simple Fast and Adaptive Lossless Image Compression Algorithm,” *Software—Practice and Experience*, vol. 37(1), pp. 65–91, doi 10.1002/spe.746, 2007. /IF=0.542, 5-year IF=0.726, 10 pkt. MNiSW/
 - [rs2] R. Starosolski, “Parallelization of an adaptive compression algorithm using the reduced model update frequency method,” *Theoretical and Applied Informatics*, vol. 19(2), pp. 103–115, 2007.
 - [rs3] R. Starosolski, “Compressing High Bit Depth Images of Sparse Histograms,” in *International Electronic Conference on Computer Science (IeCCS 2007)*, T. E. Simos and G. Psihoyios, Eds., vol. 1060 of *AIP Conf. Proc.*, pp. 269–272, doi 10.1063/1.3037069. American Institute of Physics, USA, 2008. /Web of Science, 7 pkt. MNiSW/
 - [rs4] T. Bernas, R. Starosolski, J. P. Robinson, and B. Rajwa, “Application of detector precision characteristics and histogram packing for compression of biological fluorescence micrographs,” *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 108(2), pp. 511–523, doi 10.1016/j.cmpb.2011.03.012, 2012. /IF=1.555, 5-year IF=1.589, 25 pkt. MNiSW/

- [rs5] R. Starosolski, “New simple and efficient color space transformations for lossless image compression,” *Journal of Visual Communication and Image Representation*, vol. 25(5), pp. 1056–1063, doi 10.1016/j.jvcir.2014.03.003, 2014. /IF=1.218, 5-year IF=1.420, 30 pkt. MNiSW/
- [rs6] R. Starosolski, “Application of Reversible Denoising and Lifting Steps to LDgEb and RCT Color Space Transforms for Improved Lossless Compression,” in *Beyond Databases, Architectures and Structures (12th International Conference BDAS 2016)*, S. Kozielski et al. (Eds.), vol. 613 of *Communications in Computer and Information Science*, pp. 623–632, doi 10.1007/978-3-319-34099-9_48. Springer, Switzerland, 2016. /Web of Science, 10 pkt. MNiSW/
- [rs7] R. Starosolski, “Application of Reversible Denoising and Lifting Steps with Step Skipping to Color Space Transforms for Improved Lossless Compression,” *Journal of Electronic Imaging*, vol. 25(4), pp. 043025-1–17, doi 10.1117/1.JEI.25.4.043025, 2016. /IF=0.616, 5-year IF=0.840, 20 pkt. MNiSW/
- [rs8] R. Starosolski, “Application of reversible denoising and lifting steps to DWT in lossless JPEG 2000 for improved bitrates,” *Signal Processing: Image Communication*, vol. 39(A), pp. 249–263, doi 10.1016/j.image.2015.09.013, 2015. /IF=1.602, 5-year IF=1.530, 25 pkt. MNiSW/

- b) Omówienie celu naukowego wyżej wymienionych prac i osiągniętych wyników wraz z przedstawieniem ich ewentualnego wykorzystania.

4b.1 WPROWADZENIE

Osiągnięcie habilitacyjne zostało przedstawione w postaci cyklu 8 publikacji powiązanych tematycznie. W skład cyklu wchodzi 5 artykułów w czasopismach indeksowanych w bazie Journal Citation Reports (JCR), jeden artykuł w czasopiśmie spoza tej listy oraz 2 publikacje konferencyjne uwzględnione w bazie Web of Science. Zgodnie z oświadczeniami współautorów dołączonymi do wniosku mój udział w publikacji [rs4] wynosi 40%, a pozostałe publikacje są wyłącznie mojego autorstwa. Uwzględniając procentowy udział współautorów, łączny ważony *impact factor* (IF) wymienionych prac wynosi 4.582, 5-letni IF (5-year IF) 5.152, a liczba punktów ministerialnych 112. Prace te wg Web of Science Core Collection cytowane były 42 razy (28 razy bez autocytowań). W Tabelach 1, 2 i 3 zostały zestawione wybrane dane bibliometryczne dla publikacji składających się na cykl oraz dla wszystkich moich publikacji.

Przedstawiony cykl publikacji, za wyjątkiem [rs4], dotyczy metod kompresji bezstratnej obrazów cyfrowych. W [rs4] odwracalną metodę pakowania histogramów (ang. *histogram packing*, HP) zastosowałem jako element kompresora stratnego. Celem badań opisanych w tych publikacjach była poprawa efektywności algorytmów kompresji obrazów, pod względem cech takich jak: uzyskiwane współczynniki kompresji obrazów, złożoność czasowa i pamięciowa procesów kompresji i dekompresji oraz jakość obrazu po dekompresji w przypadku kompresji stratnej. Realizując opisane badania szczególną uwagę zwracałem na praktyczną użyteczność opracowywanych metod. Dbałem o to, aby poprawa wybranej cechy algorytmu kompresji nie odbywała się kosztem istotnego pogorszenia innej, udostępniłem publicznie implementacje opracowanych metod¹, dokonałem kilku zgłoszeń patentowych i uzyskałem jeden patent.

¹implementacje są dostępne na stronie <http://sun.aei.polsl.pl/~rstaros/index.html>

Tabela 1: Zestawienie prac składających się na cykl publikacji.

	Rok wydania	Udział (%)	IF	5-year IF	Punkty MNiSW	Liczba cytowań*	Liczba cytowań**	
(1)	[rs1]	2007	100	0.542	0.726	10	21 (18)	36
	[rs4]	2012	40	1.555	1.589	25	5 (2)	7
	[rs5]	2014	100	1.218	1.420	30	9 (6)	23
	[rs7]	2016	100	0.616	0.840	20	—	0
	[rs8]	2015	100	1.602	1.530	25	0 (1)	4
(2)	[rs2]	2007	100	—	—	—	—	2
(3)	[rs3]	2008	100	—	—	7	6 (2)	10
	[rs6]	2016	100	—	—	10	0 (0)	1

(1) — publikacje w czasopismach z listy JCR
(2) — publikacja w czasopiśmie spoza listy JCR
(3) — publikacje konferencyjne
* — wg bazy Web of Science Core Collection (w nawiasie bez autocytowań); publikacja [rs7] nie jest jeszcze uwzględniona w bazie Web of Science
** — wg bazy Google Scholar

Tabela 2: Łączny impact factor wg JCR dla publikacji wchodzących w skład cyklu oraz dla wszystkich publikacji, liczony wg daty publikacji (dla [rs7] za rok 2015).

Publikacje	IF		5-year IF	
	sumaryczny	ważony	sumaryczny	ważony
Z cyklu	5.515	4.582	6.105	5.152
Wszystkie	7.036	4.962	7.693	5.549

Układ dalszej części autoreferatu jest następujący. W punkcie 4b.2 znajduje się wprowadzenie w tematykę kompresji obrazów. Punkt 4b.3 krótko przedstawia najważniejsze prace zrealizowane przed uzyskaniem doktoratu — prace te zaprezentowane są w celu wprowadzenia do kolejnego punktu autoreferatu i nie wchodzi w skład osiągnięcia habilitacyjnego. Badania dotyczące szybkiego algorytmu kompresji obrazów w stopniach szarości omówiłem w punkcie 4b.4, badania te są kontynuacją prac rozpoczętych w trakcie realizacji rozprawy doktorskiej. Punkty 4b.5–4b.7 opisują badania, które zostały rozpoczęte po zrealizowaniu rozprawy doktorskiej. W punkcie 4b.5 przedstawiłem wyniki dotyczące zastosowań metody HP. W punkcie 4b.6 omówiłem prace dotyczące metod kompresji obrazów kolorowych wywodzących się z prostych transformacji przestrzeni barw. Punkt ten między innymi przedstawia najciekawszy moim zdaniem wynik badawczy, tj. metodę odwracalnych kroków odszumiania i liftingu (ang. *reversible denoising and lifting step*, RDLS). Natomiast w punkcie 4b.7 opisałem zastosowanie RDLS do modyfikacji dyskretnej transformacji falkowej (DWT) używanej w algorytmie JPEG 2000 do kompresji obrazów w stopniach szarości. W punkcie 4b.8 zestawiałem najważniejsze oryginalne osiągnięcia opisane w publikacjach

Tabela 3: Wybrane dane bibliometryczne dla wszystkich publikacji; stan na 25 listopada 2016.

Baza	Liczba publikacji	Cytowania	Cytowania bez autocytowań	Indeks Hirscha
Web of Science Core Collection*	15	56	40	5
Google Scholar	34	174	<i>brak danych</i>	7

* — publikacja [rs7] nie jest jeszcze uwzględniona w bazie Web of Science

składających się na przedstawiony cykl. Po tym punkcie, na stronie 19 znajduje się spis cytowanej literatury (literatury obcej oraz publikacji sprzed przyznania tytułu doktora); odwołania do publikacji z cyklu oznaczane są numerem kolejnym publikacji poprzedzonym literami “rs”, np. [rs1], a odwołania do literatury numerem kolejnym pozycji bibliografii bez przedrostka, np. [1]. Natomiast opis innych prac, w tym zrealizowanych projektów badawczo-rozwojowych, znajduje się w punkcie 5. W punkcie tym znajduje się również lista cytowanych w autoreferacie moich publikacji po doktoracie, które są spoza cyklu (punkt 5a.6); odwołania do tych publikacji oznaczane są numerem kolejnym poprzedzonym literami “poz”, np. [poz1].

4b.2 Kompresja obrazów

Niniejszy punkt krótko przedstawia niektóre pojęcia dotyczące kompresji danych i obrazów. Bardziej szczegółowe omówienie podstaw kompresji danych i obrazów znaleźć można w książkach [1–4]. Celem kompresji jest zmniejszenie rozmiaru zbioru danych, danych takich jak na przykład tekst czy obraz. Algorytmy kompresji ogólnego przeznaczenia określane są mianem algorytmów uniwersalnych, algorytmy takie zazwyczaj pierwotnie przeznaczone były do kompresji tekstów. Wśród algorytmów uniwersalnych można wymienić między innymi algorytmy słownikowe, statystyczne, w tym oparte o złożone adaptacyjne modele (predykcji przez częściowe dopasowanie [5,6], ważenia drzewa kontekstów [7]), czy algorytmy wykorzystujące transformację Burrowsa-Wheelera [8,9].

Ponieważ w nowoczesnej kompresji obrazów używane są przede wszystkim algorytmy statystyczne, ograniczę się do przedstawienia wybranych pojęć ich dotyczących. Algorytmy statystyczne na podstawie rozkładu prawdopodobieństw symboli kompresowanego ciągu przydzielają poszczególnym symbolom alfabetu słowa kodowe o różnej długości. Za określenie prawdopodobieństwa danego symbolu odpowiedzialny jest tzw. model danych. Model nazywany jest bezpamięciowym, jeżeli prawdopodobieństwo danego symbolu wyznacza się niezależnie od symboli go poprzedzających, model kontekstowy uwzględnia symbole poprzedzające dany, zwane kontekstem. W przeciwieństwie do uniwersalnych algorytmów kompresji statystycznej, w kompresji obrazów kontekst danego symbolu często nie składa się jedynie z symboli bezpośrednio go poprzedzających. Na podstawie sposobu, w jaki dany algorytm adaptuje się do charakterystyki przetwarzanych danych, możemy wyróżnić kilka klas algorytmów kompresji: stałe, statyczne i adaptacyjne. W algorytmach adaptacyjnych model danych budowany jest na bieżąco w miarę czytania danych, które od razu są kompresowane.

Algorytm służący do zakodowania danego symbolu na podstawie rozkładu prawdopodobieństwa symboli alfabetu określany jest mianem kodera entropijnego. Szybsze kodery entropijne oparte są o kody przedrostkowe (kody Huffmana [10], Golomba [11] itp.), które przydzielają całkowitą liczbę bitów poszczególnym symbolom. W koderze arytmetycznym pojedynczy bit może być elementem słowa kodowego dwóch lub nawet większej liczby symboli [12].

Miarą efektów kompresji jest współczynnik kompresji, który w przypadku obrazów wyrażany jest w bitach na piksel, a wyznaczany jako iloraz liczonej w bitach długości skompresowanego obrazu i liczby pikseli obrazu; wartość współczynnika jest wprost proporcjonalna do rozmiaru skompresowanego obrazu.

Do kompresji obrazów możemy zastosować algorytmy stratne, które pozwalają na uzyskanie współczynników kompresji wielokrotnie lepszych, niż w przypadku algorytmów bezstratnych. Jednak w niektórych zastosowaniach nie jest dopuszczalne, aby proces kompresji i dekompresji obrazu prowadził do utraty informacji zawartej

w obrazie, nawet gdy będące jej efektem pogorszenie jakości obrazu nie jest bezpośrednio widoczne. Kompresję bezstratną stosujemy między innymi dla obrazów medycznych używanych w celach diagnostycznych (w niektórych przypadkach kompresja stratna takich obrazów jest zakazana prawnie [13, 14]), dla obrazów traktowanych jako dokumenty, jak również w przypadku takich obrazów, których akwizycja jest kosztowna [15]. Co więcej, gdy nie znamy przeznaczenia obrazu i nie wiemy, czy dopuszczalne jest odrzucenie części informacji zawartej w obrazie, również musimy użyć kompresji bezstratnej — a z taką sytuacją mamy często do czynienia podczas transmisji obrazów, zarówno pomiędzy urządzeniami połączonymi siecią komputerową, jak i przy transmisji bezpośrednio z urządzenia akwizycji. Przedmiotem moich badań były przede wszystkim algorytmy bezstratne lub bezstratne warianty algorytmów przeznaczonych zarówno do kompresji stratnej jak i bezstratnej.

Badania opisane w przedstawionym cyklu publikacji dotyczą kompresji obrazów barwnych oraz obrazów w stopniach szarości. W przypadku tych ostatnich piksel obrazu jest nieujemną liczbą całkowitą, jej wartość interpretowana jest jako jasność piksela. Zakres wartości piksela (liczba stopni szarości, liczba poziomów jasności) na ogół nie przekracza 2^{16} . Przez obraz o głębi jasności N bitów na piksel (obraz N -bitowy) rozumiemy obraz o liczbie stopni szarości 2^N . Obrazy o głębiach 12 lub więcej bitów na piksel nazywane są obrazami o dużych głębiach jasności, a gdy głębia wynosi około 8 bitów na piksel lub mniej to obraz jest o małej głębi jasności. Dla obrazu barwnego piksel to 3-elementowy wektor określający jasności składowych obrazu, których znaczenie zależne jest od przestrzeni barw obrazu, np. dla przestrzeni RGB jest to jasność składowych kolorów podstawowych: czerwonego (R), zielonego (G) i niebieskiego (B).

Uniwersalne algorytmy kompresji, które sprawdzają się bardzo dobrze dla danych takich jak tekst, nie radzą sobie dobrze, gdy stosuje się je bezpośrednio do danych obrazowych. Przyczyn tego stanu rzeczy można dopatrywać się między innymi w tym, iż w przeciwieństwie do tekstu, obraz jest dwuwymiarowym zbiorem danych, a zakres wartości pikseli może być znacznie większy niż rozmiar alfabetu w typowym tekście. Co więcej dane obrazowe są zanieczyszczone utrudniającym modelowanie szumem pochodzącym z procesu akwizycji, a faktu, że dla większości pikseli typowego obrazu jasność piksela jest zbliżona do pikseli go otaczających, nie wykorzystuje się bezpośrednio w algorytmach uniwersalnych. W kompresji obrazów — owszem — wykorzystujemy algorytmy uniwersalne, ale jako elementy składowe bardziej złożonego algorytmu.

Aby efektywnie kompresować obraz najczęściej stosujemy kodowanie predykcyjne lub transformacyjne. W kodowaniu predykcyjnym kompresuje się błędy predykcji pikseli obrazu. Za pomocą funkcji zwanej predyktorem wyznacza się spodziewaną wartość danego piksela, np. jasność dla obrazu w stopniach szarości. Podlegający kodowaniu ciąg błędów predykcji określany jest mianem residuum, a proces jego wyznaczania to dekorelacja. Dla typowych obrazów naturalnych, tj. obrazów uzyskanych na drodze akwizycji z naturalnych scen dostępnych dla nieuzbrojonego oka ludzkiego, entropia rozkładu prawdopodobieństwa symboli residuum jest znacznie mniejsza od entropii rozkładu prawdopodobieństwa pikseli obrazu. Zastosowanie dekorelacji pozwala na konstrukcję prostych i szybkich algorytmów kompresji obrazów, jak na przykład FELICS [16], JPEG-LS [17, 18], czy opracowany przeze mnie algorytm omówiony w punkcie 4b.4.

Odmienną metodą przekształcania danych obrazowych do postaci lepiej nadającej się do kompresji względnie prostym algorytmem uniwersalnym jest zastosowanie dwuwymiarowych transformacji, takich jak dyskretna transformacja kosinusowa (DCT)

wykorzystywana w kilku standardowych algorytmach kompresji obrazów, między innymi w JPEG XR [19, 20], czy też DWT wykorzystywana w JPEG 2000 [21, 22]. W metodach transformacyjnych kodowaniu, zamiast pikseli obrazu, podlega macierz współczynników uzyskanych po transformacji przeprowadzonej na obrazie w całości bądź po dekompozycji obrazu na fragmenty; entropia przetransformowanych współczynników jest znacznie mniejsza od entropii pikseli. Piksele obrazu reprezentowane są za pomocą liczb całkowitych i również jako liczby całkowite kodowane są przetransformowane dane obrazowe, zatem kompresja bezstratna obrazów wymaga użycia odwracalnych transformacji całkowitoliczbowych. Przykład takiej transformacji (wariant DWT) pokazałem w punkcie 4b.7.

Najbardziej popularną przestrzenią barw stosowaną w składowaniu i transmisji barwnych obrazów cyfrowych jest RGB. Przestrzeń ta jest wygodna dla prezentacji obrazu na ekranie komputerowym, jednak ze względu na silną korelację jej składowych lepsze w kompresji obrazów okazują się inne przestrzenie. Zazwyczaj kompresję obrazu barwnego realizuje się traktując całe składowe obrazu (tj. obrazy zbudowane z danej składowej barwy wszystkich pikseli obrazu) jako osobne obrazy w stopniach szarości, przy czym przed kompresją przeprowadza się transformację składowych obrazu do przestrzeni barw mniej nadmiarowej niż RGB. Oczywiście w przypadku kompresji bezstratnej transformacja przestrzeni barw musi być odwracalną transformacją całkowitoliczbową; przykłady takich transformacji pokazuję w punkcie 4b.6.

4b.3 Prace przed uzyskaniem stopnia doktora

Wynikiem realizacji rozprawy doktorskiej przede wszystkim były 2 algorytmy bezstratnej kompresji obrazów w stopniach szarości o głębi jasności 8 bitów na piksel: algorytm słownikowy [23] oraz uzyskujący lepsze wyniki, a oznaczony tutaj jako FRALIC, algorytm statystyczny [24]. FRALIC uzyskiwał dobre prędkości i współczynniki kompresji, jednak nie nadawał się do obrazów o dużych głębiach jasności, czyli między innymi dla znacznej części obrazów medycznych. Inną jego wadą były niezadowalające wyniki przetwarzania obrazów zanieczyszczonych szumem.

W algorytmie FRALIC ciąg symboli residuum uzyskany z użyciem prostego predyktora liniowego kodowany był za pomocą kodera entropijnego opartego o wariant rodziny kodów przedrostkowych Golomba [11] o ograniczonej długości słowa kodowego. Adaptacyjny model danych oparty był o kontekstowy model algorytmu FELICS [16], jednak w stosunku do tego modelu był dosyć wyrafinowany. Na początku procesu kompresji wszystkie konteksty zgrupowane były w jednym zbiorczym kubelku (rozkład prawdopodobieństwa symboli modelowany był łącznie dla wszystkich symboli zgrupowanych w kubelki) — zatem model w istocie był bezpamięciowy. Po czym w miarę postępowania kompresji większe kubelki dzieliły się na mniejsze aż do osiągnięcia pewnego minimalnego rozmiaru — w miarę postępowania kompresji model przekształcał się w model kontekstowy. Dla zwiększenia prędkości kompresji zaproponowałem metodę zmniejszonej częstości aktualizacji modelu (ang. *reduced update frequency*, RUF), opisaną dalej w punkcie 4b.4.1.

Algorytm wykorzystywał kilka metod, których efekty działania wydawały się obiecujące. Jeszcze podczas realizacji rozprawy doktorskiej opracowałem ulepszoną rodzinę kodów przedrostkowych T3, w przeciwieństwie do rodziny zastosowanej w algorytmie FRALIC, dobrze nadającą się do kodowania obrazów o dużych głębiach jasności. Rodzina T3 to wariant rodziny Golomba-Rice’a [11, 25] o ograniczonej długości słowa kodowego. Wariant ten omówiony jest szczegółowo w [poz3], gdzie określony jest mianem „proposed”. Po zakończeniu realizacji rozprawy doktorskiej, poza pod-

jęciem nowych tematów badawczych, kontynuowałem również prace nad algorytmem FRALIC i użytymi w nim metodami; wyniki tych prac opisane są w punkcie 4b.4.

4b.4 Szybki bezstratny algorytm kompresji obrazów w stopniach szarości

Opisany w publikacji [rs1] szybki bezstratny oraz adaptacyjny algorytm kompresji obrazów (ang. *simple, fast and adaptive lossless image compressor*, SFALIC), to algorytm przeznaczony dla obrazów medycznych i naturalnych w stopniach szarości o głębi jasności do 16 bitów na piksel. Algorytm SFALIC opracowałem w wyniku realizowanego przeze mnie w latach 2003–2005 projektu badawczego KBN/MNiI „Analiza możliwości zastosowania adaptacyjnych algorytmów statystycznych w szybkiej oraz bezstratnej kompresji obrazów medycznych oraz naturalnych obrazów w stopniach szarości” (nr 4 T11C 032 24). Projekt ten z kolei był kontynuacją opisanych w punkcie 4b.3 prac rozpoczętych jeszcze w trakcie realizacji rozprawy doktorskiej.

W algorytmie SFALIC, podobnie jak w FRALIC, ciąg symboli residuum uzyskany z użyciem prostego predyktora liniowego kodowany jest za pomocą kodera entropijnego opartego o rodzinę kodów przedrostkowych, przy czym w SFALIC zastosowałem odmienną rodzinę (rodzinę T3). Również w algorytmie SFALIC dla zmniejszenia złożoności procesu kompresji zastosowałem metodę RUF. W wyniku późniejszych badań, przedstawionych w punkcie 4b.4.1 wykazałem, że metoda ta pozwala na dalsze przyśpieszenie algorytmu adaptacyjnego przez jego średnio- i drobnoziarniste zrównoleglenie. Algorytm SFALIC różni się od swojego poprzednika przede wszystkim zastosowaną rodziną kodów i modelem danych.

Model danych algorytmu SFALIC oparty jest o model algorytmu FRALIC [24]. W nowym modelu udało się wyeliminować pewne niedoskonałości wcześniejszego modelu, dzięki czemu dobrze nadaje się on dla obrazów o dużych głębiach jasności i dla obrazów zaszumionych, jak również mimo prostszej konstrukcji dobrze radzi sobie w początkowej fazie kompresji, przed zaadaptowaniem się do aktualnie kodowanego obrazu. Dzięki zastosowaniu innej rodziny kodów ulepszenie modelu wymagało w istocie niewielkich modyfikacji w stosunku do modelu algorytmu FRALIC. Np. po wprowadzeniu odmiennego sposobu wyboru kodu z rodziny (w sytuacjach, gdy według informacji zgromadzonych w modelu kilka kodów jest równie dobrych), możliwe okazało się zrezygnowanie ze skomplikowanego mechanizmu dynamicznego podziału zbiorczych kubełków kontekstów. Pomimo że zmiany w stosunku do wcześniejszych modeli (algorytmów FRALIC i FELICS) w istocie nie są wielkie, to właśnie dzięki nim, w połączeniu z zastosowaniem rodziny kodów T3, uzyskałem algorytm, który stosowany jest praktycznie.

W ramach projektu 4 T11C 032 24 zaprojektowałem i zrealizowałem ogólnodostępną implementację algorytmu SFALIC, która z praktycznego punktu widzenia jest moim najbardziej użytecznym oryginalnym osiągnięciem projektowym. W wyniku badań przeprowadzonych z użyciem tej implementacji na obrazach naturalnych i medycznych, stwierdziłem, że SFALIC nadaje się przede wszystkim do:

- obrazów dużych, gdyż dla nich uzyskuje bardzo duże prędkości działania — kompresja jednego bajta obrazu trwa poniżej 50 taktów procesora,
- obrazów naturalnych o głębi jasności 16 bitów na piksel, gdyż dla nich uzyskuje współczynniki kompresji jedynie nieznacznie różniące od uzyskiwanych przez algorytmy pod tym względem najlepsze,
- obrazów zawierających szum, gdyż w przeciwieństwie do innych algorytmów, zastosowanie SFALIC praktycznie nie prowadzi do ekspansji danych nawet, gdy

obraz zawiera wyłącznie szum.

Dzięki swym zaletom SFALIC znalazł przynajmniej jedno istotne zastosowanie praktyczne w przemyśle. Rozszerzona wersja algorytmu, nazwana QUIC, została włączona do protokołu (nazwanego SPICE) dostępu do zdalnego pulpitu platformy wirtualizacyjnej Red Hat Enterprise Virtualization. Dystrybuowana przez Red Hat implementacja QUIC oparta jest bezpośrednio o kod źródłowy mojej implementacji. W przeważającej części QUIC zawiera opracowany przeze mnie kod implementacji SFALIC w postaci niezmodyfikowanej; dla efektywnego przetwarzania obrazów barwnych oraz generowanych komputerowo mechanizmy SFALIC zostały rozszerzone o transformację kolorów oraz prosty tryb kodowania ciągów identycznych pikseli. Od czasu opublikowania algorytmu i udostępnienia implementacji otrzymałem kilka zapytań o możliwość zastosowania implementacji SFALIC w systemach teletransmisji i kompresji obrazów. Na zastosowanie wyrażałem zgodę, jednak za wyjątkiem wdrożenia mojej implementacji przez Red Hat, nie znam dalszych losów tych projektów.

4b.4.1 Zastosowanie metody zmniejszonej częstości aktualizacji modelu dla zrównoleglenia algorytmu adaptacyjnego

Modelowanie i kodowanie to najbardziej złożone elementy wielu adaptacyjnych algorytmów kompresji, przy czym sam proces kompresji oparty o modelowanie i kodowanie jest realizowany w sposób sekwencyjny. Rys. 1.A przedstawia przykładowy adaptacyjny algorytm kompresji oparty o bezpamięciowy model danych i parametryczną rodzinę kodów. W przykładzie tym kodowanie symbolu M polega, tak jak w SFALIC, na:

- i. wyznaczeniu na podstawie informacji zawartych w modelu danych parametru kodowania k (tj. numeru kodu z parametrycznej rodziny kodów, w ogólnym przypadku parametrem jest rozkład prawdopodobieństwa symboli alfabetu),
- ii. wygenerowaniu słowa kodowego W dla symbolu M w kodzie k , oraz na
- iii. wyprowadzeniu tego słowa na wyjście.

Każdorazowo po zakodowaniu symbolu model aktualizuje się, aby uwzględnić informacje o wszystkich wcześniej zakodowanych symbolach. Metoda RUF (Rys. 1.B) to modyfikacja zaproponowana przeze mnie w algorytmie FRALIC, która poprawia prędkość modelowania kosztem nieznacznego, z praktycznego punktu widzenia, pogorszenia jakości modelowania. Każdorazowo, po przeprowadzeniu aktualizacji modelu, wybieramy losowo (w pseudolosowy sposób, aby algorytm dekompresji mógł uczynić to samo) liczbę symboli do pominięcia przed następną aktualizacją. Przez wybór zakresu losowanych liczb zmieniamy częstość aktualizacji modelu danych. W ten sposób kontrolujemy prędkość adaptacji modelu i złożoność obliczeniową algorytmu kompresji (przy czym rząd złożoności algorytmu pozostaje ten sam). Dla SFALIC metoda pozwoliła na trzykrotne zwiększenie prędkości kompresji kosztem pogorszenia uzyskiwanego współczynnika kompresji o 0.5%.

W badaniach opisanych w publikacji [rs2] zauważyłem, iż zastosowanie RUF umożliwia zrównoleglenie algorytmu kompresji. Pomiędzy kolejnymi aktualizacjami modelu pewna liczba symboli podlega kodowaniu z użyciem modelu zawierającego takie same informacje, co pozwala na równoległą realizację większości z operacji kodowania tych symboli. Koncepcję zrównoleglenia przedstawiłem na Rys. 1.C. Badania eksperymentalne wykazały, że dzięki wykorzystaniu równoległości drobnoziarnistej dla procesora Itanium 2 i algorytmu SFALIC metoda ta pozwala na zwiększenie prędkości

```

A) loop
    read symbol  $M$ 
    using model estimate coding parameter  $k$  for symbol  $M$ 
    generate codeword  $W$  of symbol  $M$  in code of rank  $k$ 
    output codeword  $W$ 
    update model with symbol  $M$ 
endloop

B) delay := random(range)
loop
    read symbol  $M$ 
    using model estimate coding parameter  $k$  for symbol  $M$ 
    generate codeword  $W$  of symbol  $M$  in code of rank  $k$ 
    output codeword  $W$ 
    if delay = 0 then
        update model with symbol  $M$ 
        delay := random(range)
    else
        delay := delay-1
    endif
endloop

C) delay := random(range)
loop
    read symbols  $M_0 \dots M_{\text{delay}}$ 
    parfor  $i:=0$  to delay
        using model estimate coding parameter  $k_i$  for symbol  $M_i$ 
        generate codeword  $W_i$  of symbol  $M_i$  in code of rank  $k_i$ 
    endparfor
    output codewords  $W_0 \dots W_{\text{delay}}$ 
    update model with symbol  $M_{\text{delay}}$ 
    delay := random(range)
endloop

```

Rysunek 1: A) Modelowanie i kodowanie adaptacyjne, B) Metoda RUF, C) Idea drobnoziarnistego zrównoleglenia modelowania i kodowania adaptacyjnego z użyciem metody RUF.

kodowania i modelowania o około 50%. Przeprowadzone szacunki pokazały, że metoda ta pozwala również na wykorzystanie równoległości średnioziarnistej w znacznie większym stopniu.

4b.5 Zastosowania metody pakowania histogramów

Histogramy niektórych obrazów są rzadkie, tzn. liczba faktycznie występujących w takich obrazach poziomów jasności jest znacznie mniejsza niż nominalna liczba poziomów wynikająca z głębi obrazu. Między innymi dzięki pracom Pinho (np. [26, 27]), znany jest negatywny wpływ rzadkich histogramów na współczynniki kompresji obrazów o niskich głębiach jasności. Podczas badań algorytmu SFALIC zaobserwowałem, że rzadkimi histogramami charakteryzują się również pewne klasy obrazów o dużych głębiach jasności, takie jak medyczne obrazy tomografii komputerowej i rezonansu magnetycznego. Rzadkie są również histogramy obrazów naturalnych o pierwotnie

gęstych histogramach poddane przetwarzaniu, takiemu jak korekcja gamma czy zwiększenie kontrastu.

Współczynniki uzyskiwane przez predykcyjne i transformacyjne algorytmy kompresji obrazów można istotnie polepszyć przekształcając przed kompresją obrazy o rzadkich histogramach do postaci obrazów o zwartych histogramach, czyli stosując HP. Oczywiście, aby proces kompresji i dekompresji był bezstratny, wraz ze skompresowanym obrazem należy zakodować informacje pozwalające na odtworzenie oryginalnego histogramu. W ramach badań opisanych w publikacji [rs3] przeanalizowałem metody kompresji bezstratnej obrazów o rzadkich histogramach i dużych głębiach jasności. Stwierdziłem, że HP umożliwia znaczną poprawę współczynników kompresji, sięgającą nawet 50%, przy czym w przypadku obrazów o dużych głębiach istotnym problemem może być efektywne zakodowanie informacji pozwalających na odtworzenie oryginalnego histogramu. Przebadalem kilka istniejących metod kodowania i zaproponowałem własną metodę przystosowaną do obrazów o dużych głębiach.

Metodę HP zastosowałem również w kompresji stratnej obrazów o dużej głębi jasności pochodzących z mikroskopu świetlnego. Podjęcie tego tematu zaproponował mi dr Tytus Bernaś z Instytutu Biologii Doświadczalnej im. M. Nenckiego PAN. Opracował on metodę kubełkowania histogramów (ang. *histogram binning*, HB) pozwalającą na eliminację nieistotnych ze statystycznego punktu widzenia poziomów jasności w obrazie mikroskopowym. HB realizowany był z użyciem faktycznych parametrów procesu akwizycji obrazu na podstawie modelu precyzji detektora urządzenia akwizycji (ang. *detector precision characteristic*, DPC). Model DPC z kolei zbudowany był z wykorzystaniem empirycznie wyznaczonych cech urządzenia (takich jak poziom szumu addytywnego i Poissona). HB jest przekształceniem stratnym, realizowanym jednak w taki sposób, aby zminimalizować wpływ odrzucenia części informacji obrazowej na wyniki analiz obrazu poddanego temu przekształceniu. W wyniku zaproponowanego przeze mnie połączenia metody HB z HP, otrzymaliśmy algorytm kubełkowania i pakowania histogramów (ang. *histogram binning packing*, HBP) dobrze zachowujący istotną informację w obrazie mikroskopowym. Przeprowadzone badania opisane w publikacji [rs4] wykazały, że wyniki kompresji bezstratnej obrazów przetworzonych algorytmem HBP przewyższają wcześniej stosowane metody kompresji, tj. zastosowanie wprost algorytmów kompresji stratnej.

4b.6 Odwracalne transformacje składowych obrazu barwnego

Najciekawszym moim zdaniem wynikiem badawczym uzyskanym po zakończeniu realizacji rozprawy doktorskiej jest metoda RDLS (odwracalnych kroków odsumiania i liftingu). Idea RDLS zrodziła się w wyniku prac, które dotyczyły odwracalnych transformacji przestrzeni barw.

Znanych oraz praktycznie stosowanych jest kilka odwracalnych transformacji przestrzeni barw pozwalających polepszyć współczynniki kompresji obrazów uzyskiwane przez bezstratne algorytmy kompresji. Często stosowana jest transformacja RCT zdefiniowana w standardzie JPEG 2000, przedstawiona tutaj razem z transformacją odwrotną:

$$\begin{aligned} Yr &= \lfloor (R + 2G + B)/4 \rfloor & G &= Yr - \lfloor (Ur + Vr)/4 \rfloor \\ Ur &= R - G & \iff R &= Ur + G \\ Vr &= B - G & B &= Vr + G \end{aligned}, \quad (1)$$

gdzie $\lfloor x \rfloor$ oznacza największą liczbę całkowitą nie większą od x , a Yr , Ur i Vr to składowe przestrzeni barw po transformacji RCT.

Transformacje stosowane powszechnie w algorytmach i standardach kompresji bezstratnej, w tym RCT, wywodzą się z transformacji projektowanych dla kompresji stratnej, które z kolei zazwyczaj są opracowywane w oparciu o transformację KLT (Karhunen-Loève Transformation) wyznaczaną dla reprezentatywnego zbioru obrazów. Niektóre transformacje dla kompresji bezstratnej realizowane są w arytmetyce modularnej, której zastosowanie pozwala uniknąć typowego dla większości transformacji powiększenia zakresu dynamicznego składowych i może korzystnie wpłynąć na uzyskiwane współczynniki.

Przeprowadzając transformację KLT likwidujemy korelację składowych. O ile jednak za prawdziwe można uznać ogólne stwierdzenie, że ograniczenie korelacji poprawia współczynniki kompresji, to brak jest podstaw, aby zakładać, że optymalną wartość współczynnika otrzymany sprowadzając korelację do 0. Zwłaszcza w przypadku kompresji bezstratnej istotny wpływ na współczynnik kompresji ma zawarty w składowych szum, który w typowym przypadku pochodzi przede wszystkim z procesu akwizycji i jest niezależny dla różnych składowych. W wyniku transformacji może nastąpić propagacja szumu pomiędzy składowymi. Ponieważ w przypadku większości bezstratnych algorytmów kompresji składowe następnie są kodowane niezależnie, to zwiększeniu uleg może ilość szumu, który musi być bezstratnie zakodowany podczas kompresji obrazu. Kierując się powyższymi przesłankami odszedłem od tradycyjnego sposobu konstrukcji bezstratnych transformacji przestrzeni barw w oparciu o KLT. Na podstawie analizy wyników kompresji poszczególnych składowych, nieprzetworzonych lub poddanych jedynie najprostszemu przekształceniu zaproponowałem nowe proste transformacje. Wstępne wyniki badań pokazały, że transformacja oznaczona tutaj RDgDrb:

$$\begin{aligned} R &= R & R &= R \\ Dg &= R - G & \iff G &= R - Dg \\ Drb &= R - B & B &= R - Drb \end{aligned} \quad (2)$$

dla obrazów naturalnych może prowadzić do uzyskiwania współczynników kompresji lepszych, niż znane transformacje, w tym RCT. Sposób i system przetwarzania obrazu wykorzystujący transformację RDgDrb został przez mnie opatentowany [poz16].

W ramach dalszych prac, których wyniki opisałem w publikacji [rs5], zaproponowałem między innymi transformację RDgDb:

$$\begin{aligned} R &= R & R &= R \\ Dg &= R - G & \iff G &= R - Dg \\ Db &= G - B & B &= G - Db \end{aligned} \quad (3)$$

Transformacja ta oraz jej modularny wariant mRDgDb okazały się dla standardowych zbiorów obrazów testowych i standardowych algorytmów kompresji (JPEG-LS, JPEG 2000 i JPEG XR) lepsze od porównywanych transformacji pod względem uzyskiwanych współczynników kompresji i złożoności, choć korelacja składowych jest przez nie usuwana w mniejszym stopniu niż przez RCT czy KLT. W badaniach uwzględniłem, obok standardowych transformacji przestrzeni barw oraz transformacji KLT w wariacie odwracalnym i nieodwracalnym, również proste transformacje będące złożeniem permutacji składowych przestrzeni barw i transformacji RDgDrb oraz RDgDb w wariantach prostych i modularnych. Złożyłem zgłoszenie patentowe dotyczące transformacji RDgDb [poz14]. Zgłoszenie wynalazku zostało przyjęte oraz ogłoszone w Biuletynie Urzędu Patentowego i jest obecnie przedmiotem badań merytorycznych Urzędu.

Transformacje takie, jak RCT i RDgDb realizowane są jako sekwencję tzw. kroków *liftingu* (ang. *lifting step*, LS). Każdy taki krok polega na modyfikacji wybranej

składowej piksela przez dodanie do niej kombinacji liniowej pozostałych składowych tego samego piksela, przy czym suma może zostać zanegowana. Zastosowanie LS pozwala na realizację transformacji w miejscu składowania transformowanych danych, a znalezienie transformacji odwrotnej jest trywialne. Przykładem niech będzie transformacja RCT przedstawiona jako sekwencja LS:

$$\begin{array}{ll}
\text{krok 1: } C_1 \leftarrow C_1 - C_2 & \text{krok 1: } C_2 \leftarrow C_2 - \lfloor (C_1 + C_3)/4 \rfloor \\
\text{krok 2: } C_3 \leftarrow C_3 - C_2 & \iff \text{krok 2: } C_3 \leftarrow C_3 + C_2 \\
\text{krok 3: } C_2 \leftarrow C_2 + \lfloor (C_1 + C_3)/4 \rfloor & \text{krok 3: } C_1 \leftarrow C_1 + C_2
\end{array} \quad , \quad (4)$$

gdzie C_1 , C_2 i C_3 , oznaczają odpowiednio nieprzetworzone składowe R , G i B oraz uzyskane po transformacji w ich miejscu odpowiednio składowe Ur , Yr i Vr . Propagacja szumu może nastąpić do składowej modyfikowanej w danym kroku z pozostałych składowych używanych w tym kroku. Na przykład w kroku 1, który modyfikuje C_1 w celu zmniejszenia korelacji pomiędzy C_1 i C_2 , szum z C_2 dodawany jest do C_1 (zakładamy, że szum w tych składowych jest niezależny). W uogólnieniu, LS można przedstawić jako:

$$C_x \leftarrow C_x \oplus f(C_1, \dots, C_{x-1}, C_{x+1}, \dots, C_m), \quad (5)$$

gdzie C_i to i -ta składowa piksela, C_x to składowa modyfikowana w bieżącym kroku, a m to liczba składowych w przestrzeni barw. Krok jest odwracalny, jeżeli funkcja f jest deterministyczna a operacja \oplus odwracalna.

Aby ograniczyć propagację szumu, zaproponowałem modyfikację LS przez odsumowanie argumentów funkcji f , Zmodyfikowany LS nazwałem RDLS:

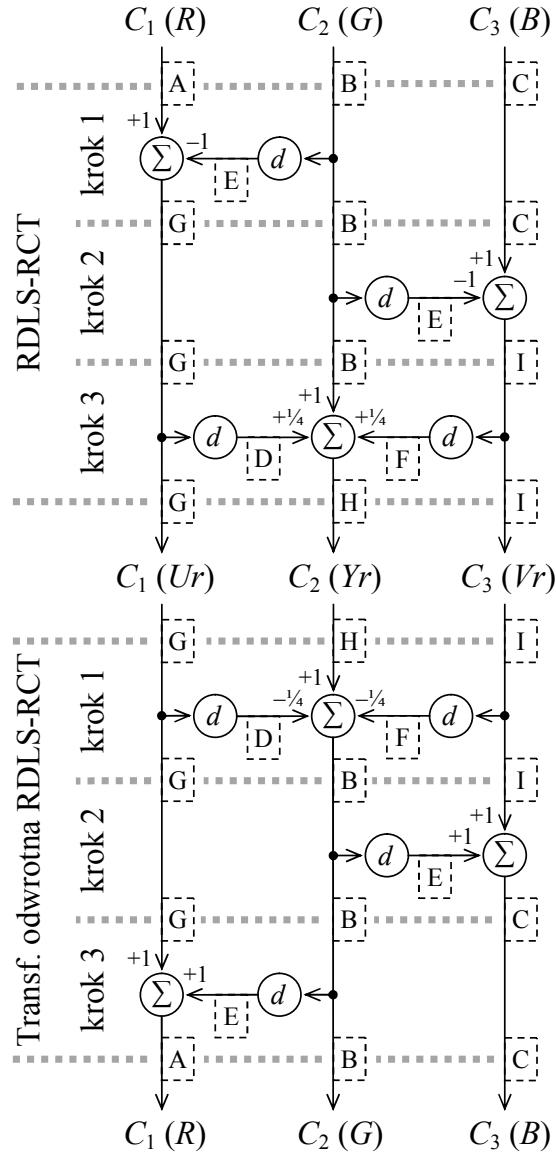
$$C_x \leftarrow C_x \oplus f(C_1^d, \dots, C_{x-1}^d, C_{x+1}^d, \dots, C_m^d), \quad (6)$$

gdzie C_i^d to odsumiona i -ta składowa piksela, przy czym odsumianie nie jest wykonywane w miejscu (tj., wyznaczenie C_i^d jako argumentu dla funkcji f nie wpływa na C_i). Do odsumiania C_i możemy użyć dowolnej składowej dowolnego piksela, za wyjątkiem C_x piksela, dla którego wykonywany jest RDLS. Na przykład zmodyfikowana za pomocą RDLS transformacja RCT, czyli transformacja RDLS-RCT, wygląda następująco:

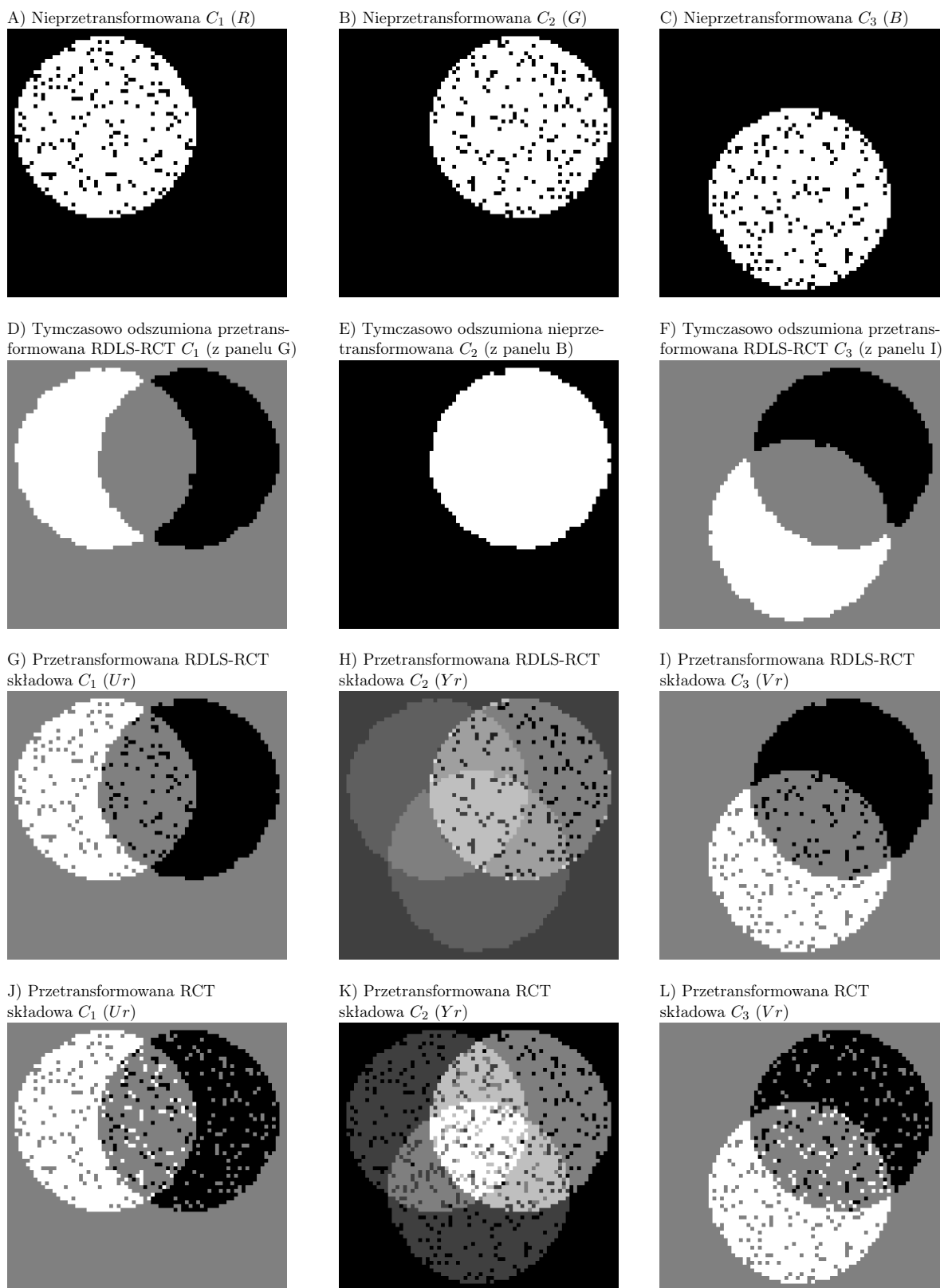
$$\begin{array}{ll}
\text{krok 1: } C_1 \leftarrow C_1 - C_2^d & \text{krok 1: } C_2 \leftarrow C_2 - \lfloor (C_1^d + C_3^d)/4 \rfloor \\
\text{krok 2: } C_3 \leftarrow C_3 - C_2^d & \iff \text{krok 2: } C_3 \leftarrow C_3 + C_2^d \\
\text{krok 3: } C_2 \leftarrow C_2 + \lfloor (C_1^d + C_3^d)/4 \rfloor & \text{krok 3: } C_1 \leftarrow C_1 + C_2^d
\end{array} \quad . \quad (7)$$

Schemat realizacji RDLS-RCT pokazany jest na Rys. 2, a Rys. 3 przedstawia porównanie efektów RCT i RDLS-RCT dla syntetycznego obrazu zanieczyszczonego szumem impulsowym. Do odsumiania użyto filtra medianowego z oknem 3×3 pikseli; rysunek 3 prezentuje również składowe odsumione, które są tymczasowo generowane podczas transformacji RDLS-RCT. Jak widać składowe po transformacji RDLS-RCT (Rys. 3.G–I) zawierają istotnie mniej szumu, niż po oryginalnej transformacji RCT (Rys. 3.J–L), dzięki czemu można spodziewać się uzyskania dla nich lepszych współczynników kompresji.

Wstępny etap badań polegający na zastosowaniu RDLS do prostej transformacji RDgDb opisałem w raporcie technicznym [poz12]. Złożyłem zgłoszenie patentowe dotyczące zastosowania transformacji wykorzystujących RDLS [poz15] w kompresji. Zgłoszenie zostało ogłoszone w Biuletynie Urzędu Patentowego i jest obecnie przedmiotem badań merytorycznych Urzędu. W publikacjach [rs6] i [rs7] opisałem badania



Rysunek 2: Transformacja RDLS-RCT i transformacja odwrotna. Σ — suma ważona składowych, d — odszumianie składowej, linie przerywane otaczają etykiety paneli z Rys. 3 zawierających transformowane składowe przykładowego obrazu.



Rysunek 3: Efekty transformacji RCT i RDLS-RCT dla składowych zaszumionego obrazu. (A–C) nieprzetworzone składowe oryginalnego obrazu, (D–F) składowe otrzymane tymczasowo podczas wyznaczania RDLS-RCT, (G–I) składowe po transformacji RDLS-RCT i (J–L) składowe po transformacji RCT. Obrazy o rozmiarach 74×71 pikseli, zakres dynamiczny składowych po transformacji znormalizowany do zakresu oryginalnych składowych.

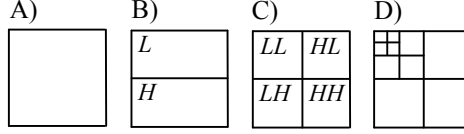
dotyczące wielu transformacji przestrzeni barw zmodyfikowanych za pomocą RDLS (RCT, YCoCg-R [28], RDgDb, LDgEb [rs5]), jak również metod efektywnego doboru filtrów odsumiających dla danego obrazu w oparciu o zaproponowane: heurystykę i szybki entropijny estymator współczynnika kompresji przetransformowanej składowej. Najlepsze wyniki uzyskałem dla zmodyfikowanej za pomocą RDLS transformacji RDgDb (RDLS-RDgDb) stosując liniowe filtry odsumiające. W ten sposób, na 6 przebadanych zbiorów obrazów testowych, dla dwóch zbiorów uzyskałem poprawę współczynnika kompresji o ponad 5%. Zbiory te zawierały nieprzetworzone lub przetworzone w minimalnym stopniu obrazy w rozdzielczościach optycznych urządzeń akwizycji.

Zastosowanie RDLS to modyfikacja daleko idąca. Zmodyfikowana transformacja nie jest już transformacją przestrzeni barw (którą dla danego piksela można wykonać niezależnie od pozostałych pikseli), a jej realizacja wymaga doboru odpowiednich filtrów odsumiających i przekazania ich do dekodera. Transformacja zmodyfikowana za pomocą RDLS ma charakter bardziej ogólny niż oryginalna transformacja. Zastosowanie odpowiednich filtrów może prowadzić do uzyskania, jako przypadku szczególnego transformacji zmodyfikowanej za pomocą RDLS, niezmodyfikowanej oryginalnej transformacji lub nawet do pominięcia transformacji, przy czym niezmodyfikowane lub pominięte mogą zostać wszystkie lub wybrane kroki transformacji. RDLS łączy dziedziny do tej pory odrębne: kompresję bezstratną i ze swej natury nieodwracalne odsumianie. Jest to moim zdaniem najciekawsza i najbardziej zaskakująca cecha RDLS. Co więcej, zastąpienie LS przez RDLS jest metodą ogólną dającą się zastosować do innych, niż transformacje przestrzeni barw, transformacji realizowanych jako sekwencje LS. W następnym podpunkcie omawiam zastosowanie RDLS do DWT.

Planuję dalsze badania zastosowań RDLS do transformacji składowych obrazu barwnego. Praktycznie istotną dalszą poprawę wyników spodziewam się uzyskać dobierając dla danego obrazu nie tylko filtry odsumiające, ale również modyfikowaną przez RDLS transformację przestrzeni barw. Szczególnie obiecująca wydaje się kompresja plików RAW, tj. plików zawierających nieprzetworzone dane obrazowe z macicy światłoczułej, które zapisywane są przez cyfrowe aparaty fotograficzne wraz z informacją o parametrach procesu akwizycji. Zamiast heurystycznego wyznaczania filtrów odsumiających planuję dla plików RAW zastosowanie filtrów opartych o parametry akwizycji obrazu oraz model podobny do DPC (badania nad takim filtrem już prowadziłem we współpracy z dr. Bernasim [poz1]). Spośród różnych zbiorów obrazów testowych najlepsze efekty zastosowania RDLS uzyskałem dla obrazów o charakterystyce pod wieloma względami zbliżonej do plików RAW, pliki RAW zawierają dane niezbędne do zastosowania modelu DPC oraz są duże i przeznaczone do dalszego przetwarzania, a więc warto je kompresować bezstratnie.

4b.7 Zastosowanie odwracalnych kroków odsumiania i liftingu do dyskretnej transformacji falkowej

Transformacja DWT w algorytmach kompresji wykorzystywana jest do dekompozycji danych obrazowych na kodowane osobno i zazwyczaj niezależnie podpasma reprezentujące detale obrazu o różnych orientacjach i wielkościach. Poniżej ograniczę się jedynie do krótkiego omówienia sposobu realizacji odwracalnej transformacji całkowitoliczbowej DWT z filtrem falkowym Cohen Daubechies Faveau (5,3) za pomocą LS. Transformacja ta używana jest między innymi w standardzie JPEG 2000 do kompresji bezstratnej obrazów. Szerzej o tym oraz innych wariantach DWT oraz o ich zastosowaniu w JPEG 2000 traktują publikacje [21, 22, 29–32].



Rysunek 4: 2D-DWT rzędu 1 obrazu (A–C) i 2D-DWT rzędu 3 (D).

Jednowymiarowa DWT (1D-DWT) transformuje w miejscu dyskretny sygnał $S = s_0 s_1 s_2 \dots s_{l-1}$ o skończonej długości l do dwóch podpasn:

- podpasma L , tj. sygnału po filtrowaniu dolnoprzepustowym, które reprezentuje niskoczęstotliwościowe składniki zawarte w S ;
- podpasma H zawierającego wysokoczęstotliwościowe składniki S , które razem z podpasmem L pozwala na idealną rekonstrukcję S .

S jest transformowany w trzech krokach. Najpierw, podczas kroku predykcji, wykonujemy górnoprzepustowe filtrowanie próbek nieparzystych (pojęcie parzystości próbki odnosi się tutaj i w dalszej części autoreferatu do jej położenia a nie do jej wartości) przez zastosowanie do każdej z nich następującego LS:

$$s_x \leftarrow s_x - \lfloor (s_{x-1} + s_{x+1})/2 \rfloor. \quad (8)$$

W następnym kroku, kroku uaktualnienia, do każdej próbki parzystej stosujemy odmienny LS:

$$s_x \leftarrow s_x + \lfloor (s_{x-1} + s_{x+1} + 2)/4 \rfloor. \quad (9)$$

Ostatecznie, w kroku przemieszczenia, umieszczamy parzyste próbki w początkowej części oryginalnego sygnału, zachowując ich uporządkowanie (próbka s_x jest umieszczana w miejscu $s_{x/2}$), a nieparzyste — w końcowej części sygnału. Otrzymujemy oddzielne podpasma oznaczane odpowiednio L i H .

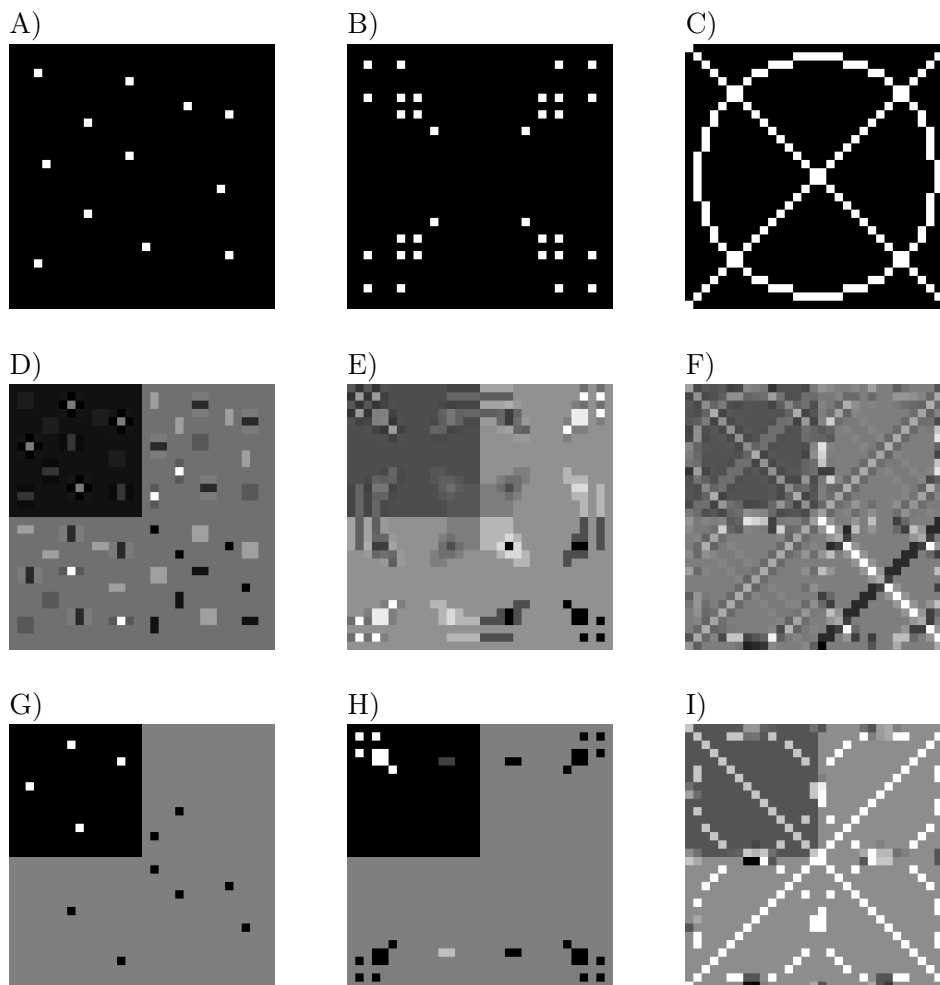
Dwuwymiarowa DWT (2D-DWT) jest dla obrazu uzyskiwana przez zastosowanie najpierw 1D-DWT do każdej kolumny obrazu, czego efektem jest dekompozycja obrazu na podpasma L i H . Następnie stosując 1D-DWT do każdego wiersza uzyskujemy 2D-DWT rzędu 1 obrazu, składającą się z podpasn LL i HL (uzyskanych z transformacji podpasma L) oraz LH i HH (z transformacji podpasma H). Transformację rzędu 1 ilustruje Rys. 4.A-C. Transformacje wyższych rzędów, pozwalające na wielorozdzielczą reprezentację obrazu, uzyskiwane są za pomocą dekompozycji Mallata [32]. Transformację rzędu $t + 1$ uzyskujemy stosując transformację rzędu 1 do podpasma LL transformacji rzędu t (Rys. 4.D).

LS stosowany w krokach predykcji i uaktualnienia prowadzi do propagacji szumu pomiędzy podpasmami, tj. szum pierwotnie nałożony na pojedynczą próbkę zostaje przez DWT powielony do wszystkich powstających podpasn. Zjawisko to może pogorszyć efekty kompresji kodowanych niezależnie podpasn, ponieważ informacja o szumie kodowana jest wielokrotnie. Aby ograniczyć propagację szumu w [rs8] zaproponowałem zastąpienie LS w krokach predykcji (Eq. 8) i uaktualnienia (Eq. 9) przez zbudowane na ich podstawie RDLS, tj. odpowiednio

$$s_x \leftarrow s_x - \lfloor (s_{x-1}^d + s_{x+1}^d)/2 \rfloor \text{ i} \quad (10)$$

$$s_x \leftarrow s_x + \lfloor (s_{x-1}^d + s_{x+1}^d + 2)/4 \rfloor, \quad (11)$$

gdzie s_i^d to odsumiona próbka s_i .



Rysunek 5: Wpływ szumu impulsowego i ostrych linii na dwuwymiarowe transformacje DWT i RDLS-DWT rzędu 1. (A–C) Oryginalne obrazy (32×32 piksele), (D–F) obrazy po DWT, (G–I) obrazy przetransformowane za pomocą RDLS-DWT. Zakres dynamiczny obrazów po transformacji znormalizowany do zakresu obrazów oryginalnych.

Porównanie efektów transformacji DWT i DWT zmodyfikowanej za pomocą RDLS (RDLS-DWT) dla syntetycznego obrazu zanieczyszczonego szumem impulsowym oraz obrazu zawierającego ostre linie prezentuje Rys. 5; do odsumiania użyto filtra medianowego z oknem 3×3 próbek.

Ze względów praktycznych (szerzej objaśnionych w [rs8]) w przykładzie na Rys. 5 jak również w dotychczasowych badaniach nad RDLS-DWT do odsumiania danej próbki używałem jedynie próbek o takiej samej parzystości. Jak widać, zanieczyszczenie pojedynczego piksela szumem skutkuje pojawieniem się zniekształceń we wszystkich podpasmach obrazu po DWT. Co więcej, sąsiedztwo zaszumionego piksela, które w oryginalnym obrazie jest wolne od szumu, po transformacji zostaje zniekształcone we wszystkich lub niektórych podpasmach (zależnie od parzystości zaszumionego piksela). Ostre linie wpływają na wyniki DWT podobnie, tj. skutkując zniekształconymi sąsiedztwami linii — co wynika ze sposobu w jaki 2D-DWT jest realizowana za pomocą 1D-DWT. Np. pozioma linia w obrazie wpływa na 1D-DWT wykonywaną dla kolumny obrazu w taki sam sposób jak zanieczyszczenie pojedynczego piksela szumem impulsowym. Dzięki odsumianiu, podpasma po RDLS-DWT prawie całkowicie

wolne są od opisanych powyżej problemów.

W publikacji [rs8] opisałem badania nad zastosowaniem RDLS-DWT w kompresji bezstratnej JPEG 2000 obrazów w stopniach szarości. Znaczne i praktycznie istotne poprawy współczynników kompresji, średnio o 14%, uzyskałem stosując heurystykę do adaptacyjnego doboru prostych nieliniowych filtrów odsumiających dla obrazów niefotograficznych. Obrazy niefotograficzne to obrazy inne niż obrazy naturalne, czyli na przykład obrazy przygotowane za pomocą komputera, obrazy skomponowane z innych (w tym z obrazów naturalnych), oraz obrazy przedstawiające zawartość ekranu roboczego komputera. Warto nadmienić, że obecnie rośnie zainteresowanie kompresją takich obrazów, znanych w literaturze anglojęzycznej pod nazwą screen content; najnowszy standard kompresji wideo i obrazów HEVC [33, 34] posiada rozszerzenie przeznaczone właśnie do kodowania obrazów screen content.

Prowadzę dalsze badania nad możliwościami poprawy efektów kompresji algorytmów opartych o DWT. W badaniach opisanych w poprzednim akapicie dopuszczałem pomijanie całości transformacji RDLS-DWT, gdyż w przypadku niektórych obrazów RDLS-DWT (jak i DWT) prowadzi do pogorszenia współczynników kompresji. W badaniach nad zmodyfikowanymi za pomocą RDLS transformacjami przestrzeni barw, opisanymi w punkcie 4b.6, korzystałem również z częściowego pomijania transformacji, tj. z pomijania wybranych jej kroków. Wybrane kroki transformacji pomijałem stosując filtr odsumiający nazwany w [rs7] null, dla którego $s_x^d = s_x$. W przypadku RDLS-DWT za pomocą filtra null doprowadzić można do pominięcia kroków predykcji i uaktualnienia (gdyż są to LS), ale nie kroku przemieszczenia. Moje dotychczasowe badania, opisanie w raporcie technicznym [poz13] (obecnie złożonym do czasopisma PLOS ONE i oczekującym na powtórzną recenzję po wprowadzeniu poprawek sugerowanych przez recenzentów /major revision/), wykazały, że dopuszczając pomijanie LS i kroku przemieszczenia można poprawę współczynnika kompresji dla obrazów niefotograficznych powiększyć do 17.5%. Co ciekawe, stosując jedynie pomijanie kroków, poprawy współczynnika zbliżone do 14% raportowanych w publikacji [rs8] można uzyskać kosztem nieznacznego wzrostu złożoności obliczeniowej procesu kompresji i w ramach już istniejących rozszerzeń standardu JPEG 2000 (opisanych w aneksach F i H standardu [29]). Poprawa współczynnika o około 14% odbywa się kosztem zwiększenia czasu kompresji jedynie o 3% w stosunku do niezmodyfikowanego JPEG 2000.

Uważa się, że zastosowanie dekorrelacji nie wspartej dodatkową wiedzą (jak np. wiedzą o występowaniu symetrii w obrazach medycznych) nie prowadzi do istotnej poprawy uzyskiwanych współczynników kompresji dla podpasem uzyskanych po DWT, co potwierdza na przykład Bruylants [31]. Jednak charakterystyka podpasem po RDLS-DWT jest istotnie inna, niż po DWT. Uzyskałem bardzo dobre wstępne wyniki badań nad zastosowaniem predykcji do podpasem RDLS-DWT z dopuszczonym pomijaniem kroku przemieszczenia. Zachęcające efekty uzyskałem również stosując zaproponowane przeze mnie metody w kompresji wolumetrycznych obrazów medycznych algorytmem JP3D [35].

Opisane w tym punkcie wyniki uzyskałem stosując metodykę analogiczną do użytej podczas opisanych w [rs7] badań nad zastosowaniem RDLS do transformacji przestrzeni barw. Wykorzystałem podobne heurystyki doboru filtrów dla RDLS i (za wyjątkiem badań opisanych w [rs8]) entropijne estymatory efektów kompresji transformowanych danych. Pozytywne efekty metodyki uzyskane dla istotnie różnych transformacji i klas danych świadczą o pewnym stopniu jej ogólności.

4b.8 Zestawienie najważniejszych oryginalnych osiągnięć

Za najważniejsze ze swoich oryginalnych osiągnięć uważam:

- zaproponowanie RDLS i opracowanie metody poprawy efektów odwracalnych transformacji składających się z LS polegającej na zastąpieniu LS przez RDLS; metoda ta umożliwia uzyskanie transformacji bardziej ogólnych i lepiej dostosowanych do różnych klas danych oraz łączy dziedziny do tej pory odrębne: kompresję bezstratną i odszumianie; wypracowanie metodyki doboru filtrów dla RDLS;
- zastosowanie RDLS do odwracalnych transformacji przestrzeni barw i uzyskanie praktycznie użytecznych wyników dla obrazów w rozdzielczościach urządzeń akwizycji;
- zastosowanie RDLS do DWT i uzyskanie praktycznie użytecznych wyników dla obrazów niefotograficznych;
- opracowanie, w wyniku kontynuacji prac rozpoczętych w trakcie realizacji rozprawy doktorskiej, szybkiego algorytmu bezstratnej kompresji obrazów SFALIC nadającego się do kompresji dużych obrazów, obrazów o dużych głębiach jasności oraz obrazów zanieczyszczonych przez szum; opracowaną implementację algorytmu uznaję za moje najważniejsze oryginalne osiągnięcie projektowe; algorytm ten znalazł istotne zastosowanie praktyczne w przemyśle;
- zwrócenie uwagi na nieprawidłowość podejścia do konstrukcji odwracalnych transformacji przestrzeni barw, polegającego na opieraniu się na transformacji nieodwracalnej minimalizującej korelację składowych; zaproponowanie transformacji skonstruowanych w sposób odmienny i pokazanie skuteczności takiego podejścia; uzyskanie patentu na zastosowanie jednej z zaproponowanych transformacji.

LITERATURA

- [1] W. Skarbek, *Metody reprezentacji obrazów cyfrowych*, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, 1993.
- [2] W. Skarbek, ed., *Multimedia algorytmy i standardy kompresji*, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, 1998.
- [3] A. Drozdek, *Wprowadzenie do kompresji danych*, WNT, 1999.
- [4] K. Sayood, *Kompresja danych wprowadzenie*, WNT, 2002.
- [5] J. Cleary and I. Witten, "Data compression using adaptive coding and partial string matching," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 32, no. 4, pp. 396–402, April 1984.
- [6] A. Moffat, "Implementing the ppm data compression scheme," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 38, no. 11, pp. 1917–1921, November 1990.
- [7] F. Willems, Y. Shtarkov, and T. Tjalkens, "The context tree weighting method: Basic properties," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 41, pp. 653–664, May 1995.
- [8] M. Burrows and D. Wheeler, "A block-sorting lossless data compression algorithm," May 1994, SRC Research Report 124, Systems Research Center, Digital Equipment Corporation.
- [9] S. Deorowicz, "An analysis of second step algorithms in the burrows-wheeler compression algorithm," *Software — Practice and Experience*, vol. 38, no. 2, pp. 99–111, February 2002.

- [10] D. Huffman, “A method for the construction of minimum-redundancy codes,” *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, vol. 40, no. 9, pp. 1098–1101, 1952.
- [11] S. Golomb, “Run-length encodings,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. IT-12, pp. 399–401, 1966.
- [12] A. Moffat, R. Neal, and I. Witten, “Arithmetic coding revisited,” *ACM Transactions on Information Systems*, vol. 16, no. 3, pp. 256–294, 1998.
- [13] D. Clunie, “What is different about medical image compression?,” *IEEE Communications Society MMTC E-Letter*, vol. 6, no. 7, pp. 31–37, July 2011.
- [14] US Food and Drug Administration, “The mammography quality standards act final regulations: Modifications and additions to policy guidance help system no. 9,” 2006.
- [15] B. Carpentieri, M. Weinberger, and G. Seroussi, “Lossless compression of continuous-tone images,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 88, no. 11, pp. 1797–1809, 2000.
- [16] P. Howard and J. Vitter, “Fast and efficient lossless image compression,” in *Proceedings DCC '93 Data Compression Conference*, pp. 351–360. IEEE Comput. Soc. Press, 1993.
- [17] ISO/IEC and ITU-T, *Information technology – Lossless and near-lossless compression of continuous-tone still images – Baseline*, 2006, ISO/IEC International Standard 14495-1 and ITU-T Recommendation T.87.
- [18] M. J. Weinberger, G. Seroussi, and G. Sapiro, “The LOCO-I lossless image compression algorithm: Principles and standardization into JPEG-LS,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 9, no. 8, pp. 1309–1324, 2000.
- [19] ISO/IEC and ITU-T, *Information technology – JPEG XR image coding system – Image coding specification*, 2012, ISO/IEC International Standard 29199-2 and ITU-T Recommendation T.832.
- [20] F. Dufaux, G. J. Sullivan, and T. Ebrahimi, “The JPEG XR image coding standard,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 26(6), pp. 195–199, 204, 2009.
- [21] ISO/IEC and ITU-T, *Information technology – JPEG 2000 image coding system: Core coding system*, 2004, ISO/IEC International Standard 15444-1 and ITU-T Recommendation T.800.
- [22] D. S. Taubman and M. W. Marcellin, *JPEG2000 Image Compression Fundamentals, Standards and Practice*, Springer US, 2004.
- [23] R. Starosolski, “Fast and adaptive lossless grayscale image compression using the lzw algorithm,” *Theoretical and Applied Informatics*, vol. 11(2), pp. 171–93, 1999.
- [24] R. Starosolski, “Fast, robust and adaptive lossless image compression,” *Machine Graphics and Vision*, vol. 8(1), pp. 95–116, 1999.
- [25] R. F. Rice, “Some practical universal noiseless coding techniques – part iii,” 1979, Jet Propulsion Laboratory tech. report JPL-79-22.
- [26] A. J. Pinho, “On the impact of histogram sparseness on some lossless image compression techniques,” in *Proc. ICIP 2001*, vol. III, pp. 442–445. 2001.
- [27] A. J. Pinho, “An online preprocessing technique for improving the lossless compression of images with sparse histograms,” *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 9, no. 1, pp. 5–7, 2002.
- [28] H. S. Malvar, G. J. Sullivan, and S. Srinivasan, “Lifting-based reversible color transformations for image compression,” in *Applications of Digital Image Processing XXXI*, vol. 7073 of *Proc. SPIE*, p. 707307. 2008.

- [29] ISO/IEC and ITU-T, *Information technology – JPEG 2000 image coding system: extensions*, 2004, ISO/IEC International Standard 15444-2 and ITU-T Recommendation T.801.
- [30] I. Daubechies and W. Sweldens, “Factoring wavelet transforms into lifting steps,” *Journal of Fourier Analysis and Applications*, vol. 4, pp. 247–269, 1998.
- [31] T. Bruylants, A. Munteanu, and P. Schelkens, “Wavelet based volumetric medical image compression,” *Signal Processing: Image Communication*, vol. 31, pp. 112–133, 2015.
- [32] S. Mallat, “A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 11, pp. 674–693, 1998.
- [33] ISO/IEC and ITU-T, *Information technology – High efficiency coding and media delivery in heterogeneous environments – Part 2: High efficiency video coding*, 2015, ISO/IEC International Standard 23008-2 and ITU-T Recommendation H.265.
- [34] G. Sullivan, J. Ohm, W. Han, and T. Wiegand, “Overview of the high efficiency video coding (hevc) standard,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 22, no. 12, pp. 674–693, 2012.
- [35] ISO/IEC and ITU-T, *Information technology – JPEG 2000 image coding system: extensions for three-dimensional data*, 2011, ISO/IEC International Standard 15444-10 and ITU-T Recommendation T.809.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych.

a) Osiągnięcia naukowe

Poza pracami opisanymi w przedstawionym cyklu publikacji, realizowane przeze mnie badania dotyczyły następujących zagadnień: (i) zastosowania modelu DPC w odsumianiu obrazów, (ii) metod użytych w algorytmie SFALIC, (iii) zastosowania HP w kompresji różnych klas obrazów oraz (iv) wyszukiwania obrazów na podstawie ich reprezentacji w dziedzinie falkowej. Badania te są omówione w kolejnych punktach autoreferatu, a w punkcie 5a.6 przedstawiona jest lista wybranych prac, które opublikowałem po uzyskaniu stopnia doktora, a które nie weszły w skład cyklu stanowiącego osiągnięcie habilitacyjne.

5a.1 ZASTOSOWANIE MODELU PRECYZJI URZĄDZENIA AKWIZYCJI W ODSZUMIANIU OBRAZÓW

Zastosowanie modelu DPC w kompresji stratnej przedstawiłem w punkcie 4b.5 i w publikacji [rs4]. Model ten opisuje ilość szumu w obrazie, a naturalnym zastosowaniem takiej informacji jest odsumianie obrazu. Współpracę w badaniach nad algorytmem odsumiania opartym o model DPC zaproponował mi dr Bernaś. W artykule [poz1] zaproponowaliśmy nowy algorytm odsumiania w dziedzinie falkowej oparty o model DPC i przedstawiliśmy wyniki badań tego algorytmu. Efektywność zaproponowanego algorytmu zależy od ilości szumu w obrazie, lecz w każdym przypadku jest lepsza w porównaniu z innymi znanymi algorytmami odsumiania, do których porównaliśmy nasz algorytm: AdaptShrink, BivarShrink i OraclShrink. Mój udział w tej pracy szacuję na 25%, uczestniczyłem w projektowaniu i badaniu algorytmu, analizie i interpretacji otrzymanych wyników jak również w redagowaniu artykułu; byłem autorem korespondencyjnym artykułu.

5a.2 BADANIA METOD UŻYTYCH W ALGORYTMIE SFALIC

Badania zastosowanej w SFALIC rodziny kodów, przeprowadzone w znacznej części przed uzyskaniem doktoratu, obok już wspomnianej publikacji [rs1] opisałem w [poz2] i [poz3]. Wyniki tych badań doprowadziły do wyboru rodziny kodów dla algorytmu SFALIC i miały wpływ na postać jego modelu danych. Użyta w modelu danych metoda RUF zastosowałem do uniwersalnego kompresora słownikowego LZW, co opisałem w [poz4]. W wyniku badań stwierdziłem, że metoda RUF pozwala na kilkudziesięcioprocentowe zwiększenie prędkości algorytmu LZW kosztem pogorszenia uzyskiwanych przez algorytm współczynników kompresji o kilka procent, a zatem jest użyteczna praktycznie, choć w stopniu niższym niż w przypadku statystycznego algorytmu kompresji obrazów SFALIC.

5a.3 ZASTOSOWANIA METODY PAKOWANIA HISTOGRAMÓW

Przedstawione w publikacji [rs4] wyniki zastosowania HP do kompresji stratnej to najciekawszy wynik badawczy uzyskany dla tej metody. Jednak nie jest to wynik jedyny. Raport ze wstępnego etapu badań nad zastosowaniem HP do obrazów o dużych głębiach jasności, opisanych następnie w publikacji [rs3], przedstawiłem na konferencji organizacji SPIE [poz5]; o zastosowaniu HP do obrazów o dużych głębiach, medycznych i naturalnych traktuje również przeglądowy referat wygłoszony na konferencji BDAS [poz6]. Natomiast we współpracy z dr. Schaeferem z Loughborough University prowadziłem badania nad poprawą za pomocą HP efektów kompresji barwnych obrazów medycznych dna oka oraz obrazów termograficznych. W [poz7] opisaliśmy badania przeprowadzone dla obrazów dna oka, przy czym dla poprawy efektów kompresji wykorzystaliśmy HP oraz transformację przestrzeni barw. Istotną poprawę współczynnika kompresji dzięki HP, o kilkanaście procent, zaobserwowaliśmy jedynie dla jednej z czterech badanych grup obrazów. Podobnej wielkości poprawę współczynników, lecz średnio dla wszystkich przebadanych obrazów, uzyskaliśmy dla obrazów termograficznych, których histogramy również w pewnym stopniu są rzadkie; badania opisaliśmy w [poz8].

5a.4 WYSZUKIWANIE OBRAZÓW W DZIEDZINIE FALKOWEJ

Zajmowałem się również wyszukiwaniem obrazów w skompresowanych zbiorach obrazów za pomocą metod działających w dziedzinie falkowej. Algorytmy takie umożliwiają przeprowadzenie wyszukiwania bez dekompresji obrazu, gdy obraz skompresowany jest za pomocą algorytmu transformacyjnego wykorzystującego DWT, np. algorytmu zgodnego ze standardem JPEG 2000. Prace te prowadzone były we współpracy z dr. Schaeferem, w ramach grantu „Compressed domain retrieval of medical images” (WAR/342/44), który uzyskaliśmy z British Council. Badania prowadzone były dla medycznych obrazów termograficznych. W badaniach wzięło udział dwóch moich dyplomantów, którzy w ramach swoich prac magisterskich zaimplementowali wybrane algorytmy, jak również brali udział w eksperymentach i przygotowaniu publikacji. Prace te opisane są w rozprawach magisterskich dyplomantów oraz w [poz9], [poz10] i [poz11]. Prac tych nie kontynuowałem, gdyż nie dotyczyły one bezpośrednio mojego podstawowego obszaru zainteresowań badawczych, tj. kompresji.

5a.5 PODSUMOWANIE

Po uzyskaniu stopnia doktora byłem autorem bądź współautorem 36 publikacji, z czego 8 weszło w skład cyklu publikacji stanowiących osiągnięcie habilitacyjne. W punkcie 5a.6 znajduje się lista 16 publikacji wybranych spośród tych, które nie weszły w skład cyklu. Lista, poza recenzowanymi publikacjami naukowymi cytowanymi w punkcie 5 autoreferatu, obejmuje również dwa raporty techniczne udostępnione publicznie w sposób trwały i bezpłatny w repozytorium arXiv ([poz12] i [poz13]), dwa zgłoszenia patentowe złożone do Urzędu Patentowego RP i oczekujące na decyzję Urzędu ([poz14] i [poz15]) oraz jeden przyznany patent [poz16]. Publikacje te podsumowują badania, które realizowałem zarówno samodzielnie, jak i w ramach różnego rodzaju prac zespołowych — wśród nich znalazły się zarówno finansowane projekty badawczo-rozwojowe (wymienione dalej w punkcie 5b), jak i projekty realizowane niezależnie w ramach indywidualnej współpracy którą nawiązałem z dr. Bernasem i dr. Schaeferem. Sumaryczny impact factor wg JCR wszystkich moich publikacji po doktoracie wynosi około 7.0, 5-letni impact factor – około 7.7, współczynnik Hirscha – 5 (Rys. 6), natomiast sumaryczna liczba punktów MNiSW – 317.

5a.6 LISTA WYBRANYCH PUBLIKACJI SPOZA CYKLU

- [poz1] T. Bernas, R. Starosolski, and R. Wójcicki, “Application of detector precision characteristics for the denoising of biological micrographs in the wavelet domain,” *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 19, pp. 1–13, doi 10.1016/j.bspc.2015.02.010, 2015. /IF=1.521, 5-year IF=1.588, 25 pkt. MNiSW/
- [poz2] R. Starosolski, “Odwrócenie kolejności kodów w rodzinie Rice’a (Reversing the order of codes in the Rice family),” *Studia Informatica*, vol. 23(4), pp. 7–14, 2002. /1 pkt MNiSW/
- [poz3] R. Starosolski and W. Skarbek, “Modified Golomb-Rice Codes for Lossless Compression of Medical Images,” in *Proc. International Conference on E-health in Common Europe (Cracow, 5-6 Jun. 2003)*, K. Zieliński and M. Duplaga (Eds.), pp. 423–437. Cyfronet, Poland, 2003.
- [poz4] R. Starosolski, “Zastosowanie metody zmniejszonej częstości aktualizacji słownika w uniwersalnym algorytmie kompresji LZW (Application of the reduced dictionary update frequency method to the LZW universal data compression algorithm),” *Studia Informatica*, vol. 31(3), pp. 5–22, 2010. /6 pkt. MNiSW/
- [poz5] R. Starosolski, “Compressing images of sparse histograms,” in *Proc. SPIE International Conference on Medical Imaging (Warsaw, 31 Oct - 01 Sept. 2005)*, A. Kowalczyk, A. F. Fercher, and V. V. Tuchin (Eds.), vol. 5959 of *Proceedings of SPIE*, pp. 209–217, doi 10.1117/12.624489. SPIE—The International Society for Optical Engineering, Bellingham, USA, 2005. /4 pkt. MNiSW/
- [poz6] R. Starosolski, “Lossless Compression of Medical and Natural High Bit Depth Sparse Histogram Images,” in *Beyond Databases, Architectures and Structures (11th International Conference BDAS 2015)*, S. Kozielski et al. (Eds.), vol. 521 of *Communications in Computer and Information Science*, pp. 363–376, doi 10.1007/978-3-319-18422-7_32. Springer, Switzerland, 2015. /Web of Science, 10 pkt. MNiSW/
- [poz7] R. Starosolski and G. Schaefer, “Lossless compression of color medical retinal images,” in *Proc. 20th European Conference on Modelling and Simulation (ECMS2006)*, W. Borutzky, A. Orsoni, and R. Zobel. (Eds.), pp. 437–444. Bonn, 2006. /3 pkt. MNiSW/

Web of Science™ InCites™ Journal Citation Reports® Essential Science Indicators™ EndNote™ Sign In Help English

WEB OF SCIENCE™

THOMSON REUTERS™

Search Return to Search Results My Tools Search History Marked List

Citation Report: 15

(from Web of Science Core Collection)

You searched for: **Article Group for: Starosolski, R ...More**

This report reflects citations to source items indexed within Web of Science Core Collection. Perform a Cited Reference Search to include citations to items not indexed within Web of Science Core Collection.

Published Items in Each Year

Year	Items
2005	1
2006	2
2007	1
2008	5
2009	0
2010	0
2011	0
2012	1
2013	0
2014	1
2015	3
2016	1

The latest 20 years are displayed.

Citations in Each Year

Year	Citations
2005	1
2006	3
2007	2
2008	1
2009	3
2010	3
2011	3
2012	5
2013	6
2014	4
2015	14
2016	10

The latest 20 years are displayed.

Results found: 15

Sum of the Times Cited [?]: 56

Sum of Times Cited without self-citations [?]: 40

Citing Articles [?]: 46

Citing Articles without self-citations [?]: 39

Average Citations per Item [?]: 3.73

h-index [?]: 5

Sort by: Times Cited -- highest to lowest Page 1 of 2

	2013	2014	2015	2016	2017	Total	Average Citations per Year
Use the checkboxes to remove individual items from this Citation Report or restrict to items published between 1945 and 2017 Go	6	4	15	10	0	56	4.67
<input type="checkbox"/> 1. Simple fast and adaptive lossless image compression algorithm By: Starosolski, Roman SOFTWARE-PRACTICE & EXPERIENCE Volume: 37 Issue: 1 Pages: 65-91 Published: JAN 2007	2	2	1	2	0	21	2.10
<input type="checkbox"/> 2. New simple and efficient color space transformations for lossless image compression By: Starosolski, Roman JOURNAL OF VISUAL COMMUNICATION AND IMAGE REPRESENTATION Volume: 25 Issue: 5 Pages: 1056-1063 Published: JUL 2014	0	2	4	3	0	9	3.00
<input type="checkbox"/> 3. An evaluation of lossless compression algorithms for medical infrared images By: Schaefer, Gerald; Starosolski, Roman; Zhu, Shao Ying Book Group Author(s): IEEE Conference: 27th Annual International Conference of the IEEE-Engineering-in-Medicine-and-Biology-Society Location: Shanghai, PEOPLES R CHINA Date: AUG 31-SEP 03, 2005 Sponsor(s): IEEE Engrn Med & Biol Soc; Chinese Acad Engrn Sci 2005 27TH ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE IEEE ENGINEERING IN MEDICINE AND BIOLOGY SOCIETY, VOLS 1-7 Book Series: PROCEEDINGS OF ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE IEEE ENGINEERING IN MEDICINE AND BIOLOGY SOCIETY Pages: 1673+ Published: 2005	2	0	2	0	0	9	0.75
<input type="checkbox"/> 4. Compressing High Bit Depth Images of Sparse Histograms By: Starosolski, Roman Edited by: Simos, TE; Psihoyios, G Conference: International Electronic Conference on Computer Science Location: ELECTR NETWORK Date: NOV 30-DEC 10, 2007 Sponsor(s): European Soc Computat Methods Sci & Engrn INTERNATIONAL ELECTRONIC CONFERENCE ON COMPUTER SCIENCE Book Series: AIP Conference Proceedings Volume: 1060 Pages: 269+ Published: 2008	1	0	4	1	0	6	0.67
<input type="checkbox"/> 5. Application of detector precision characteristics and histogram packing for compression of biological fluorescence micrographs By: Bernas, Tytus; Starosolski, Roman; Robinson, J. Paul; et al. COMPUTER METHODS AND PROGRAMS IN BIOMEDICINE Volume: 108 Issue: 2 Pages: 511-523 Published: NOV 2012	1	0	2	2	0	5	1.00

Rysunek 6: Raport cytowań wg Web of Science Core Collection, sporządzony 25 listopada 2016.

- [poz8] R. Starosolski, G. Schaefer, and S. Y. Zhu, "Performance evaluation and optimisation of lossless image compression algorithms applied to medical infrared images," in *Proc. of 9th Medical Image Understanding and Analysis Conference (MIUA2005)*, pp. 47–50. British Machine Vision Association, Bristol, 2005. /3 pkt. MNiSW/
- [poz9] G. Schaefer and R. Starosolski, "A comparison of two methods for retrieval of medical images in the compressed domain," in *Proc. of 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS2008)*, pp. 402–405, doi 10.1109/IEMBS.2008.4649175. IEEE, Piscataway, 2008. /Web of Science, 7 pkt. MNiSW/
- [poz10] G. Schaefer, R. Starosolski, D. Pawlak, and S. Y. Zhu, "Wavelet based retrieval of medical thermograms," in *Proc. of 5th Int. Conference on Technology and Applications in Biomedicine (ITAB2008)*, pp. 135–137, doi 10.1109/ITAB.2008.4570596. IEEE, Piscataway, 2008. /Web of Science, 7 pkt. MNiSW/
- [poz11] R. Starosolski, G. Schaefer, M. Molęda, and S. Y. Zhu, "Retrieval of medical images in wavelet compression domain," in *Proc. of 5th Int. Conference on Technology and Applications in Biomedicine (ITAB2008)*, pp. 157–159, doi 10.1109/ITAB.2008.4570597. IEEE, Piscataway, 2008. /Web of Science, 7 pkt. MNiSW/
- [poz12] R. Starosolski, "Reversible denoising and lifting based color component transformation for lossless image compression," *arXiv:1508.06106 [cs.MM]*, <http://arxiv.org/abs/1508.06106>, 2016.
- [poz13] R. Starosolski, "Skipping Selected Steps of DWT Computation in Lossless JPEG 2000 for Improved Bitrates," *arXiv:1608.00613 [cs.MM]*, <http://arxiv.org/abs/1608.00613>, 2016.
- [poz14] R. Starosolski, "Sposób i system przetwarzania obrazu barwnego, zwłaszcza w urządzeniach akwizycji, przetwarzania i składowania lub transmisji obrazów przeprowadzających kompresję obrazów cyfrowych (Method and system of color image processing, especially in image acquisition, processing, and storage or transmission devices compressing digital images)," zgłoszenie patentowe nr P.394125, złożone 2011.03.07, opublikowane 2012.09.10, w rozpatrywaniu, Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, Warszawa. /Web of Science, 10 pkt. MNiSW/
- [poz15] R. Starosolski, "Sposób przetwarzania obrazów barwnych i multispektralnych, a także danych wolumetrycznych, zwłaszcza w urządzeniach akwizycji, przetwarzania i składowania lub transmisji wykonujących kompresję danych zawierających znaczne ilości szumu (Method of color and multispectral image processing, as well as of volumetric data processing, especially in acquisition, processing, and storage or transmission devices compressing data containing significant amount of noise)," zgłoszenie patentowe nr P.396766, złożone 2011.10.25, opublikowane 2013.04.29, w rozpatrywaniu, Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, Warszawa. /Web of Science, 10 pkt. MNiSW/
- [poz16] R. Starosolski, "Sposób i system przetwarzania obrazu barwnego w urządzeniach akwizycji, przetwarzania i składowania lub transmisji obrazów wykorzystujących kompresję obrazów cyfrowych (Method and system of color image processing in image acquisition, processing, and storage or transmission devices exploiting digital image compression)," patent przyznany 2016.08.24 (zgłoszenie patentowe nr P.393036, złożone 2010.11.24, opublikowane 2012.06.04), Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, Warszawa. /Web of Science, 35 pkt. MNiSW/

b) Projekty badawcze oraz badawczo-rozwojowe

1. „Analiza możliwości zastosowania adaptacyjnych algorytmów statystycznych w szybkiej oraz bezstratnej kompresji obrazów medycznych oraz naturalnych obrazów w stopniach szarości (An analysis of fast and adaptive lossless image compression algorithms applied to medical and natural continuous tone images)”, 2003–2005, grant KBN/MNiI (nr 4T11C 032 24), pełniona funkcja: kierownik projektu.
2. „Virtual Electronic Poem”, 2004–2005, grant w ramach programu ramowego UE Culture 2000, realizowany przez konsorcjum w składzie: Virtual Reality and Multi Media Park (Turyn, Włochy), Technischen Universitaet of Berlin (Niemcy), University of Bath (Wielka Brytania), Politechnika Śląska (Gliwice, Polska), pełniona funkcja: kierownik zespołu realizującego projekt w Politechnice Śląskiej i koordynator regionalny - "kontraktor".
3. „Compressed domain retrieval of medical images”, 2005–2007, grant British Council oraz MNiI (nr WAR/342/44), projekt realizowany przez: Roman Starosolski (Instytut Informatyki, Politechnika Śląska) oraz Gerald Schaefer (School of Engineering and Applied Science, Aston University, Birmingham).
4. Projekty Indywidualnych Badań Własnych (BW) Instytutu Informatyki Politechniki Śląskiej, 2002-2004, pełniona funkcja: kierownik projektów.
5. Projekty Badań Statutowych (BK) Instytutu Informatyki Politechniki Śląskiej, 2002 i 2005-2016, pełniona funkcja: wykonawca zadań badawczych w zespole pod kierownictwem prof. dr hab. inż. Zbigniewa J. Czecha.
6. Rektorski Grant Habilitacyjny nr 02/020/RGH15/0060, 2015–2016, przyznany przez Rektora Politechniki Śląskiej.

c) Informacje dodatkowe

Od 2014 roku wykonałem recenzje dla 17 manuskryptów (dla niektórych wielokrotnie) nadsyłanych następujących do czasopism z listy JCR:

- i) IEEE Transactions on Image Processing /IF: 3.735, 5-year IF: 4.786/
- ii) Expert Systems With Applications /IF: 2.981, 5-year IF: 2.879/
- iii) SPIE Journal of Biomedical Optics /IF: 2.556, 5-year IF: 2.603/
- iv) IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology /IF: 2.254, 5-year IF: 2.617/
- v) IEEE Signal Processing Letters /IF: 1.661, 5-year IF: 1.852/
- vi) IET Image Processing /IF: 0.860, 5-year IF: 1.048/
- vii) Color Research and Application /IF: 0.847, 5-year IF: 1.173/
- viii) Journal of Electronic Imaging (SPIE) /IF: 0.616, 5-year IF: 0.840/
- ix) Journal of Imaging Science and Technology /IF: 0.316, 5-year IF: 0.397/

Ponadto opracowałem materiały do prowadzonych przeze mnie przedmiotów między innymi na kierunku Informatyka oraz na Makrokierunku (w języku angielskim), prowadziłem również wykłady dla doktorantów. Byłem promotorem około 40 prac dyplomowych magisterskich i 10 inżynierskich.

