

Prof. dr hab. inż. Bogusław Cyganek

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji

Instytut Elektroniki

cyganek@agh.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej
Pana magistra inżyniera Pawła Kowaleczko
zatytułowanej:

Super-resolution algorithms and evaluation procedures
for satellite imagery data

Wstęp

Recenzja dotyczy rozprawy doktorskiej Pana magistra inżyniera Pawła Kowaleczko pt. „*Super-resolution algorithms and evaluation procedures for satellite imagery data*”¹, która powstała w roku 2024 w Politechnice Warszawskiej. Promotorem pracy jest Pan prof. dr hab. inż. Przemysław Rokita. Przygotowanie recenzji zostało wykonane na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja, Pana prof. dra hab. inż. Jarosława Arabasa. Praca została napisana w języku angielskim. Recenzja sporządzona została w postaci odpowiedzi na pytania dotyczące rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Pawła Kowaleczko.

1. Problem badawczy i jego znaczenie

Jaki jest najważniejszy problem rozważany w rozprawie?

Dzięki łatwo dostępnym i ciągle unowocześnianym aparatom cyfrowym, choćby wbudowanym w nasze telefony komórkowe, wykonujemy mnóstwo zdjęć i filmów. Z pewnością wspólnie doświadczamy sytuacji, w których niektóre zdjęcia po prostu nie wychodzą – może to być spowodowane np. przez nieodpowiednią ekspozycję, zmienne światło, przysłonięcia obiektów, za małą rozdzielczość lub poruszenie zdjęcia ze względu na zbyt szybko przemieszczające się obiekty itd. Taką sytuację możemy łatwo rozwiązać po prostu robiąc kolejne zdjęcie, pod warunkiem że obiekt się nie oddalił, lub używając lepszego aparatu, bądź droższego telefonu. Istnieją jednak pewne fizyczne ograniczenia, takie jak długość ogniskowej, wielkość sensora, jasność obiektywu, zniekształcenia optyczne, które sprawiają że w żadnym przypadku, nawet przy zastosowaniu bardziej zaawansowanego sprzętu, nie osiągniemy dowolnie dużej rozdzielczości. Sytuacja jest jeszcze bardziej skomplikowana w przypadku zdjęć lotniczych lub satelitarnych, które mimo użycia drogich i profesjonalnych czujników wielospektralnych również wykazują liczne ograniczenia, szczególnie dotyczące rozdzielczości przestrzennej, ale również spektralnej. Dobra jakość tego typu zdjęć i sekwencji zdjęć jest kluczowa, gdyż od niej zależy do czego będą one przydatne. A przykłady zastosowań są tu liczne – są to m.in. określanie położenia obiektów

¹ Algorytmy i procedury ewaluacji metod rekonstrukcji nadrozdzielczej dla obrazów satelitarnych

Rada Naukowa Dyscypliny
INFORMATYKA TECHNICZNA
I TELEKOMUNIKACJA
Sekretariat
Data wpływu: 14.05.2025

naziemnych i nawigacja, określenie klas widocznych obiektów, analiza i śledzenia zmian ich położenia, jak również do ocena stanu pogody, wód powierzchniowych, stopnia zalesienia, czy też ocena stanu upraw w rolnictwie itd. Ze względu na koszty, jak również na istotę wymienionych pomiarów, jakość oryginalnych zdjęć, jak również możliwości ich późniejszej poprawy są pierwszoplanowe. Mimo iż istnieją techniki sprzętowe pozwalające na obejście niektórych ograniczeń fizycznych, są one często zbyt kosztowne lub po prostu niedostępne. Okazuje się jednak, że dzięki zastosowaniu odpowiednich algorytmów możliwe jest poprawienie jakości obrazów, a szczególnie zwiększenie ich rozdzielczości już po wykonaniu zdjęć. Wykorzystując wcześniej zgromadzone informacje i pewną redundancję w obrazach, algorytm jest w stanie poprawić zdjęcie, czy też szereg zdjęć, umożliwiając m.in. dostrzeżenie wcześniej niewidocznych szczegółów obserwowanych scen. Metody te oparte są na algorytmach super-rozdzielczości (ang. *super-resolution*; SR), zwanej również nad-rozdzielczością, które na podstawie zdjęcia niskiej rozdzielczości (ang. *low resolution*; LR) lub ich sekwencji, obliczają wersję o wyższej rozdzielczości. Problem ten jest jednak bardzo skomplikowany i mimo licznych badań nie istnieje jedno uniwersalne rozwiązanie. Za to istnieje wiele wersji algorytmów, które wciąż są rozwijane i udoskonalane. Najnowsze z nich bazują na przełomowych rozwiązaniach sztucznej inteligencji AI, takich jak głębokie splotowe sieci neuronowe (ang. *deep convolutional neural networks*), jak również transformery wizyjne (ang. *Visual Transformer* – ViT). Bazujące na nich metody SR mają szerokie zastosowanie między innymi we wspomnianym obrazowaniu lotniczym i satelitarnym. Jednakże charakterystyczną cechą wspomnianych najnowszych metod bazujących na AI jest konieczność zapewnienia im odpowiednio dużych i właściwie przygotowanych zbiorów danych uczących. Problem ten jest szczególnie trudny w przypadku wspomnianych i bardzo wymagających sekwencji lotniczych i satelitarnych. Okazuje się bowiem, że dostępne zbiory danych, czy też dane uzyskane w sposób sztuczny są niewystarczające do profesjonalnej oceny jakościowej algorytmów SR. Istniejące dane prowadzą przeważnie do nieprawidłowej oceny tego typu algorytmów, która przeważnie wskazuje na zbyt optymistyczne wyniki w porównaniu z warunkami rzeczywistymi. Co więcej, sam proces oceny jakości tych algorytmów wymaga głębszej analizy i udoskonalenia, tak aby uwzględniał on wymagania dotyczące warunków rzeczywistych.

Praca naukowa oraz metody zaprezentowane w rozprawie doktorskiej Pana magistra inżyniera Pawła Kowaleczko wpisują się w ten obszar badań. Celem naukowym Pana Pawła Kowaleczko było przede wszystkim:

- (i) Opracowanie nowych zbiorów danych rzeczywistych zdjęć satelitarnych składającego się z obrazów o niskiej i wysokiej rozdzielczości zarejestrowanych przez różne satelity;
- (ii) Zaproponowanie nowych metod oceny ilościowej dla nowych zbiorów danych uwzględniających wyzwania wynikające z odmiennych źródeł danych o niskiej i wysokiej rozdzielczości;
- (iii) Opracowanie procesu generowania obrazów hiperspektralnych o większej rozdzielczości przestrzennej, zastosowanych następnie do zaawansowanych zadań monitoringu środowiska naturalnego.

Zagadnienia naukowe podjęte przez Pana magistra inżyniera Pawła Kowaleczko mają duże znaczenie zarówno w zakresie badań teoretycznych, jak i eksperymentalnych, a ich wyniki mogą mieć szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach. Praca ma charakter teoretyczno-doświadczalny.

Czy praca ma on charakter naukowy?

Wyżej zarysowane problemy mają charakter naukowy. Mimo wielu prób i światowych badań ciągle nie istnieją algorytmy i metody, które w pełni spełniałyby wymagane założenia. Dlatego istnieje potrzeba kontynuacji badań w tym zakresie, a dostarczenie nowych rozwiązań w dobie dominacji metod AI

wymaga przede wszystkim opracowania oryginalnych zbiorów danych. Niemniej istotne jest opracowanie skutecznych metod ich analizy i oceny, które uwzględniają skomplikowane zależności występujące w warunkach rzeczywistych. Zarówno zagadnienia naukowe, jak i wyzwania eksperymentalne, a co ważniejsze, sposoby ich rozwiązania zostały zaprezentowane w rozprawie doktorskiej Pana mgr inż. Pawła Kowaleczko.

Czy ma on znaczenie praktyczne?

Podjęty przez Pana mgr inż. Pawła Kowaleczko problem badawczy niewątpliwie posiada istotny walor i znaczenie praktyczne – zaprezentowane rozwiązania mogą wprost prowadzić do ich aplikacji w systemach przetwarzania i analizy sekwencji zdjęć lotniczych i satelitarnych.

2. Wkład Autora

Jaki jest najważniejszy wkład autora opisywane w rozprawie?

Główne osiągnięcia Doktoranta Pana magistra inżyniera Pawła Kowaleczko dotyczą następujących zagadnień naukowych.

1. *Opracowanie nowych zbiorów danych rzeczywistych zdjęć satelitarnych składającego się z obrazów o niskiej i wysokiej rozdzielczości zarejestrowanych przez różne satelity.*

Niedostateczna rozdzielczość przestrzenna sekwencji obrazów lotniczych oraz satelitarnych stanowi znaczące ograniczenie technologiczne, które jest szczególnie dotkliwe w przypadkach gdy uzyskanie nowych pomiarów nie jest możliwe ze względu na ograniczenia fizyczne, czy też zbyt wysokie koszty. Problem ten można zaobserwować np. w przypadku danych pochodzących z satelity Sentinel-2, które co prawda są ogólnie dostępne i bez dodatkowych opłat, ale których rozdzielczość przestrzenna ograniczona jest do ok. 10 m odległości w terenie. Wykorzystując nowe metody SR możliwe jest jednak zwiększenie tej rozdzielczości, a szczególnie gdy dostępne jest wiele obrazów tego samego obszaru, które zostały zarejestrowane w kolejnych przelotach satelity. Sytuacja taka stwarza możliwość fuzji, czyli odpowiedniego połączenia, wspomnianych zdjęć właśnie w celu uzyskania lepszych parametrów. Jest to jednak pewna aproksymacja danych rzeczywistych i w celu przeprowadzenia wiarygodnych pomiarów i analiz treści obrazowych konieczne są metody oceny jakości tak otrzymanych obrazów. Z braku dostatecznie obszernych zbiorów danych do tego celu używa się przeważnie danych uzyskanych w sposób sztuczny. Tym niemniej, jest to kolejne przybliżenie, które – jak się okazuje – wykazuje nieco zbyt optymistyczne wartości gdy są one odniesione do warunków rzeczywistych. Problem ten został dostrzeżony przez Doktoranta Pana mgr inż. Pawła Kowaleczko oraz zespół naukowy do którego należy. W tym celu Doktorant wraz z zespołem stworzyli nowy zbiór danych MuS2, który może być właśnie użyty do rzeczywistej oceny nowoczesnych metod zwiększających rozdzielczość obrazów satelitarnych.

Powstanie tego zbioru danych jest odpowiedzią na niedobór zbiorów danych pochodzących ze zdjęć satelitarnych otrzymanych w warunkach rzeczywistych, a na których są testowane kolejne metody wielo-obrazowych SR (ang. MISR). Charakterystyczną cechą tego rozwiązania jest zastosowanie dwóch typów obrazów, zarówno o niskiej (LR), jak i wysokiej rozdzielczości (HR) zarejestrowanych przez różne satelity. W tym przypadku są to: Sentinel-2 i WorldView-

2, przy czym obrazy WorldView-2 służą jako odniesienie w wysokiej rozdzielczości. MuS2 jest bardzo obszerny – zawiera aż 91 różnych scen, które pokrywają przeszło 3200 km² terenów. Każda z zawartych tam scen złożona jest z co najmniej 14 obrazów MSI pochodzących z Sentinel-2, odpowiadających jednej sekwencji MSI z WorldView-2.

Ale zbiór tego typu to nie tylko samo zarejestrowanie i przechowanie danych. W celu przeprowadzenia wiarygodnych eksperymentów wymaga on żmudnego i profesjonalnego przygotowania. Pierwszy problem do rozwiązania to rozbieżność między super-rozdzielczością w obrazach LR i ich odpowiedników HR, które są wynikiem różnych charakterystyk fizycznych czujników optycznych, jak również różnic czasowych i pozostałych warunków, choćby meteorologicznych ich akwizycji. Tak jak już wspomniano, przygotowanie tak obszernego i skomplikowanego zbioru jak MuS2 wymagało zaangażowania całego zespołu naukowego, do którego należy p. mgr inż. Paweł Kowaleczko. Tym niemniej, oryginalny wkład Doktoranta jest tutaj bardzo istotny i polega m.in. na opracowaniu i implementacji odpowiedniego środowiska programowego, a następnie z jego wykorzystaniem na zbieraniu oraz przetworzeniu danych. Nie mniej istotne było tu przygotowanie odpowiednich masek uwzględniających wariację sygnału w poszczególnych scenach. Bardzo cenną informacją dla środowiska naukowego jest fakt, że zbiór MuS2 został publicznie udostępniony.

2. *Opracowanie nowych metod oceny ilościowej dla nowych zbiorów danych uwzględniających wyzwania wynikające z odmiennych źródeł danych o niskiej i wysokiej rozdzielczości.*

Od samego przygotowania danych, takich jak MuS2, niemniej istotne jest zaproponowanie naukowych metod ich oceny. Większość znanych protokołów polega na zgromadzeniu zbioru obrazów, które potraktujemy jako HR. Następnie podlegają one procesom zmniejszenia rozdzielczości oraz dodatkowych zmian – głównie zaburzeń takich jak dodatkowy szum czy zniekształcenia – w wyniku czego otrzymywany jest odpowiadający im zbiór SR. Zbiór ten następnie jest „poprawiany” z wykorzystaniem znanych algorytmów – tu często stosuje się metody oparte na głębokich sieciach neuronowych oraz nowszych transformerach wizyjnych, takich jak zastosowane przez Autora RAMS (ang. *Residual Attention MISR Network*) oraz HighRes-Net – a wynik jest porównywany z oryginalną partycją HR. Jednakże w przypadku zbiorów takich jak MuS2 konieczne jest rozszerzenie tego procesu choćby ze względu na konieczność uwzględnienia zmiennych charakterystyk sensorów optycznych oraz warunków samej akwizycji tych sekwencji – pamiętajmy że MuS2 zawiera odpowiadające sobie obrazy uzyskane z różnych satelitów. Aby sprostać tym wyzwaniom p. mgr inż. Paweł Kowaleczko opracował dedykowaną procedurę (protokół) oceny, wykorzystującą m.in. dopasowanie histogramów, jak również zastosowanie specjalnie przygotowanych masek zmian do określenia miejsc obrazowych o znacznej wariacji sygnału, która odpowiada rzeczywistym zmianom w terenie. Wspomniane maski zmian, połączone z maskami istotności, wskazują takie obszary obrazu które można skonsolidować do oceny w oparciu o miary podobieństwa obrazu na poszczególnych pikselach.

Dodatkowo gruntownie przeanalizowane oraz zrewidowane zostały miary oceny jakości rekonstrukcji obrazów, takie jak dobrze znane PSNR (ang. *Peak Signal-to-Noise Ratio*) oraz SSIM (ang. *Structural Similarity Index Measure*), jak również stosunkowo nowa LPIPS (ang. *Learned Perceptual Image Patch Similarity*), która bazuje na ocenie z wykorzystaniem semantycznych cech pochodzących z głębokich warstw sieci neuronowych. Dzięki dogłębnemu zbadaniu właściwości każdej z tych oraz innych, nie wymienionych tutaj z nazwy miar, oraz wyodrębnieniu ich indywidualnych zalet oraz wad, p. mgr inż. Paweł Kowaleczko

zapropował nową miarę będącą ich hybrydowym połączeniem, w którym wpływ każdej kontrolowany jest odpowiadającym normalizacyjnym.

Praca ta została wykonana przez p. mgr inż. Pawła Kowaleczko przy współpracy z zespołem naukowym, do którego należy. Zarówno metodyka przygotowania zbioru MuS2, jak również opracowane schematy ewaluacyjne oraz ich wyniki zostały opublikowane m.in. w ważnej publikacji, w której p. mgr inż. Paweł Kowaleczko jest pierwszym z autorów:

P. Kowaleczko, T. Tarasiewicz, M. Ziaja, D. Kostrzewa, J. Nalepa, P. Rokita, and M. Kawulok, "A real-world benchmark for Sentinel-2 multi- image super-resolution," Scientific Data , Vol. 10, no. 1, 2023 (IF=5,8)

3. *Opracowaniu metody generowania obrazów hiperspektralnych o większej rozdzielczości przestrzennej, zastosowanej następnie do zaawansowanego monitoringu środowiska naturalnego.*

Kolejnym osiągnięciem p. mgr inż. Pawła Kowaleczko jest opracowanie procesu SR dla zdjęć satelitarnych PRISMA i TROPOMI i w kontekście praktycznych zastosowań. Zaadaptowane zostały dwie metody SISR – Bi-3DQCNN i HAT w celu ulepszenia obrazów wielospektralnych PRISMA. Z kolei zastosowana metoda fuzji z wykorzystaniem sieci Fusion-Net była zastosowany do integracji danych hiperspektralnych PRISMA i TROPOMI. Dzięki temu otrzymane zostały dane wyjściowe SR o wysokiej rozdzielczości, zarówno przestrzennej jak i spektralnej. Było to istotne wyzwania wynikające z różnic między wielospektralnymi i hiperspektralnymi źródłami danych. Zaproponowane metody SR zostały zweryfikowane za pomocą standardowych metod walidacyjnych potwierdzając ich skuteczność.

Otrzymane w ten sposób sekwencje SR zostały następnie wykorzystane przez p. mgr inż. Pawła Kowaleczko wraz z zespołem naukowym, do zadania monitoringu środowiska naturalnego, w tym m.in. do oceny jakości wody, szacowania zawartości azotu w glebie oraz analizy zanieczyszczenia powietrza. Co ciekawe, zostało wykazane że w wielu przypadkach wyniki walidacyjne były między sobą rozbieżne. Świadczy to o konieczności stosowania różnych podejść do problemu SR i jego walidacji – w tym kontekście dość niezależne okazały się wyniki walidacji z wykorzystaniem metody HyperTransformer gdyż ocena w tym przypadku odbywała się z wykorzystaniem gęstszych i dokładniejszych siatek pokrycia obserwowanej sceny.

Wyniki tych prac zostały opublikowane w niedawnej pracy, w której p. mgr inż. Paweł Kowaleczko jest drugim z autorów:

M. Kawulok, **P. Kowaleczko**, M. Ziaja, J. Nalepa, D. Kostrzewa, D. Latini, D. De Santis, G. Salvucci, I. Petracca, V. La Pegna, Z. Bartalis, and F. Del Frate, "Hyperspectral image super-resolution: Task-based evaluation," IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Vol. 17, 2024 (IF=4,7).

Wszystkie wyżej opisane zagadnienia badawcze, jak i ich oryginalne rozwiązania naukowe zaproponowane przez Pana mgr inż. Pawła Kowaleczko świadczą o Jego dużej wiedzy i dojrzałości naukowej, jak również znajomości najnowszych osiągnięć i technologii światowych.

3. Poprawność naukowa

Czy stwierdzenia zawarte w rozprawie są godne zaufania? Czy uzasadnienia są poprawne? Wskaż zauważone słabości i błędy. Wskaż także te aspekty dotyczące poprawności, które są najbardziej wartościowe.

Pan mgr inż. Paweł Kowaleczko podjął uzasadnioną naukowo metodykę prowadzenia badań polegającą na formułowaniu problemów, obserwowaniu i analizie istniejących rozwiązań, a następnie na proponowaniu nowych, lepszych rozwiązań oraz stawianiu tez naukowych, które w końcu podlegały weryfikacji eksperymentalnej. Poprzez wnikliwą obserwację wyników, p. mgr inż. Paweł Kowaleczko mógł zweryfikować swoje założenia, jak również zaproponować nowe rozwiązania – dzięki temu, wszystkie zaproponowane rozwiązania, jak i tezy postawione w rozprawie, zostały zweryfikowane eksperymentalnie.

Poprawność zaproponowanych rozwiązań jest też potwierdzona poprzez publikacje naukowe z udziałem Pana mgr inż. Pawła Kowaleczko, w *recenzowanych* periodykach o zasięgu światowym. Na szczególne podkreślenie zasługują tutaj dwie publikacje, w których Doktorant jest jednym z autorów:

1. **P. Kowaleczko**, T. Tarasiewicz, M. Ziaja, D. Kostrzewa, J. Nalepa, P. Rokita, and M. Kawulok, "A real-world benchmark for Sentinel-2 multi- image super-resolution," *Scientific Data* , Vol. 10, no. 1, 2023 (IF=5,8).
2. M. Kawulok, **P. Kowaleczko**, M. Ziaja, J. Nalepa, D. Kostrzewa, D. Latini, D. De Santis, G. Salvucci, I. Petracca, V. La Pegna, Z. Bartalis, and F. Del Frate, "*Hyperspectral image super-resolution: Task-based evaluation*," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol. 17, 2024 (IF=4,7).

Dodatkowo p. mgr inż. Paweł Kowaleczko jest współautorem w :

3. Rozdziału w książce, w którym Doktorant jest pierwszym z autorów:
P. Kowaleczko, M. Ziaja, D. Kostrzewa, and M. Kawulok, "*Introduction to super-resolution for remotely sensed hyperspectral images*", in *Super-Resolution for Remote Sensing* , M. Kawulok, J. Kawulok, B. Smolka, and M. E. Celebi, Eds. Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 1–26, ISBN: 978-3-031-68106-6.
4. Siedmiu publikacjach głównie konferencyjnych dotyczących procesów związanych z przetwarzaniem obrazów wielospektralnych i metodami poprawy ich parametrów;
5. Pięciu publikacji naukowych dotyczących innych tematów badawczych.

Wyżej opisane osiągnięcia naukowe, zarówno w postaci nowych zbiorów danych LR-SR, jak również oryginalnych metod ich oceny i procedury ewaluacji są niewątpliwie nowatorskie i dostarczają nową istotną wiedzę w skali światowej. Tym niemniej, są one wynikiem intensywnej pracy całego zespołu badawczego, do którego należy Doktorant. Najważniejsze osiągnięcia zostały zaprezentowane w dwóch wcześniej wymienionych istotnych publikacjach – w pierwszym przypadku jest to wynik współpracy 7 autorów, a w drugim aż 12! Z kolei sam tekst doktoratu to kompilacja tych oraz innych prac naukowych, w których p. mgr inż. Paweł Kowaleczko jest jednym ze współ-autorów. W takim kontekście bardzo trudno jest precyzyjnie wyłonić i ocenić indywidualny wkład naukowy Doktoranta. Sytuację nieco poprawiają dopiski w bibliografii dotyczące wkładu autorskiego, zarówno w samej rozprawie, jak i w artykułach. Jednakże Doktorant powinien *explicite* zaprezentować swój indywidualny i oryginalny wkład w każdą z zaprezentowanych metod.

Baza publikacji Web of Science zawiera 5 publikacji, w których p. mgr inż. Paweł Kowaleczko jest jednym z autorów. Jego współczynnik H=1 (stan: luty 2025).

Poniżej zostały zestawione pozostałe kwestie, pytania, ale i sugestie naukowe wymagające lepszego uzasadnienia lub dodatkowej dyskusji i wyjaśnienia.

1. Rozdział 3 – po szczegółowym opisie metod zwiększania rozdzielczości warto by się zastanowić nad zagadnieniem związanym z możliwością poprawy kolejnego parametru obrazów, którym jest zakres dynamiczny wartości poszczególnych sygnałów (pikseli). Problem ten w literaturze światowej znany jest pod nazwą obrazowania HDR (ang. *High Dynamic Range*). Czy opracowane przez Autora metody i procedury można by zastosować w tym przypadku? Czy możliwe byłoby skonstruowanie całościowych systemów (sieci) typu *end-to-end* do trenowania zarówno pod kątem SR, jak i HDR?
2. Opracowane zbiory danych takie jak MuS2 oraz procedury ich oceny jako pierwszoplanowe stawiają sobie zadanie oceny „jakości” otrzymanych obrazów SR. Tym niemniej, poprawa rozdzielczości, szczególnie otrzymana w ten sposób, niekoniecznie i nie zawsze musi się przekładać na lepsze wyniki np. detekcji obiektów w obrazach satelitarnych/lotniczych. Czy możliwa jest konstrukcja takich obrazów, które jako miarę przyjmowałyby te inne zadania, takie jak wspomniana detekcja? Co więcej, czy możliwa jest integracja metod SR z metodami (sieciami) detekcji obiektów?
3. Podane miary, takie jak m.in. wyrażone wzorami (46), (47) itd. mogą prowadzić do niestabilności obliczeniowych w przypadku bardzo małych wartości w ich mianownikach – czy istnieją metody detekcji, czy też radzenia sobie z tego typu praktycznymi sytuacjami? Jak jest to zaimplementowane w metodach używanych przez Doktoranta?
4. W rozdziale 5.2 opisane są metody konstrukcji masek obrazowych, które polegają głównie na analizie wariancji sygnału i pewnych wartości progowych (ang. *threshold*). Ale czy w dobie głębokich sieci neuronowych jest to jedyne i właściwe podejście? Można by przedyskutować czy nie mogłyby być tutaj użyte np. głębokie cechy semantyczne, o których Autor wspominał w innych partiach swojej dysertacji?
5. Str. 75 – niejasne pojęcie „hallucinations”, ale co to znaczy? To pojęcie jest raczej przypisywane wielkim modelom językowym (LLM, ChatGPT), raczej niż sieciom typu VGG, o których jest mowa w tym rozdziale. Zagadnienie to wymaga bliższego wyjaśnienia.
6. Rozdział 6.5.2 – warto by rozszerzyć opis procesu nad-próbkowania (ang. *upsampling*) w przypadku PRISMA HSI za pomocą dekompozycji do komponentów głównych PCA oraz podmiany komponentu dominującego. Ciekawe byłoby dokonanie analizy tego procesu w nieco bardziej precyzyjny sposób, np. z wykorzystaniem opisu matematycznego i pokazania kolejnych kroków obliczeniowych.

Powyższa lista pytań dotyczy dodatkowych zagadnień naukowych lub też prośby o głębsze potraktowanie pewnych tematów poruszonych w rozprawie doktorskiej Pana mgr inż. Pawła Kowaleczko. Tym niemniej, mają one wyłącznie charakter dyskusyjny i nie umniejszają istotnego wkładu merytorycznego przedstawionego w tej rozprawie.

4. Wiedza Kandydata

Które z rozdziałów (lub sekcji w rozdziałach) rozprawy omawiają istniejący stan wiedzy i dzięki temu potwierdzają ogólny stan wiedzy kandydata w zakresie ITT? Jakie obszary tych dyscyplin zostały omówione w tych rozdziałach/sekcjach? Jaka jest opinia recenzenta o jakości tych rozdziałów/sekcji? Jaka jest opinia recenzenta o bibliografii? Na ile bibliografia jest kompletna? Prosimy o podanie innych

argumentów za lub przeciw stwierdzeniu, że kandydat posiada ogólną wiedzę w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.

Analizę wiedzy Doktoranta należy zacząć od analizy przedłożonej rozprawy doktorskiej. Praca ta jest obszerna i liczy 144 strony. Została napisana po angielsku i składa się z 8 rozdziałów oraz bibliografii. Niestety jest to rodzaj kompilacji opisów różnych zagadnień naukowych i o różnym stopniu złożoności, poczynając od opisu elementarnych algorytmów interpolacji takich jak dwu-liniowa, czy też dwukwadratowa (rozdział 2), poprzez bardziej zaawansowane metody otrzymywania obrazów nad-rozdzielczości (rozdział 3), opis dostępnych zbiorów danych satelitarnych (rozdział 4), a następnie procedur ewaluacji metod nad-rozdzielczości (rozdział 5), aż do opisu praktycznych przypadków użycia satelitarnych obrazów nad-rozdzielczych (rozdział 6). Opis ten należy postrzegać w kontekście rozdziału w książce na temat SR, jak również innych publikacji naukowych, w których p. mgr inż. Paweł Kowaleczko jest jednym ze współautorów.

W tym kontekście zupełnie jednak nie rozumiem przyjętej przez p. mgr inż. Pawła Kowaleczko koncepcji prezentacji swoich wyników w postaci tak skomponowanej rozprawy doktorskiej! Moim zdaniem jest to raczej nieporozumienie, gdyż posiadając liczne publikacje wystarczyło je zacytować, bądź też po prostu dołączyć ich kopie, oczywiście przy zachowaniu odpowiednich praw autorskich, a w rezultacie istotnie podnieść jakość całej rozprawy przy jednoczesnym jej znacznym skróceniu. W obecnej formie Autor praktycznie kopiuje większość zamieszczonych ilustracji i diagramów z przytoczonych swoich prac, opłatając je mniej lub bardziej oryginalnym tekstem, również w języku angielskim. Przykładowo rysunek 6.5 zaczerpnięty z przytoczeniem odpowiednich praw własności z pracy [7] – w ogóle nie rozumiem po co taki rysunek serwować czytelnikowi? Po pierwsze jest to kopia 1-do-1 rysunku z wymienionej publikacji, ale – po drugie – w tej wersji jest on nieco mylący, gdyż liczności warstw neuronowych sugerują inną ich dystrybucję niż ta opisana w tekście. W rozprawie można więc było te wartości podać prawidłowo, choćby je dopisać na tym rysunku, niż po prostu skopiować. Pisanie tego typu pracy być może miałoby jakiś sens gdyby przedstawione w niej zostały jakieś istotne nowe odkrycia naukowe i takie, które wcześniej nie były opublikowane, bądź też aktualnie nie są dostępne gdyż znajdują się w procesie recenzji. Niestety, analizując zarówno treść tej obszernej pracy oraz publikacji w których p. mgr inż. Paweł Kowaleczko jest jednym ze współautorów nie zauważam żadnych takich treści.

Praca kończy się podsumowaniem osiągnięć Doktoranta (rozdział 7), podziękowaniami (rozdział 8) oraz innymi dodatkami w tym bibliografią. Ta ostatnia liczy 157 pozycji, co stanowi o dobrej orientacji Doktoranta w tej nowoczesnej dziedzinie nauki.

Tym niemniej powyższe krytyczne uwagi dotyczą raczej przyjętego stylu prezentacji swoich osiągnięć w rozprawie doktorskiej, a nie samych opracowanych metod i wyników. W tym aspekcie, i tak jak już wspominałem w poprzednich rozdziałach recenzji, pozytywnie oceniam zarówno wiedzę i dojrzałość naukową p. mgr inż. Pawła Kowaleczko, jak również jego umiejętności zbierania oraz przetwarzania danych, organizacji eksperymentów naukowych, jak również programowania systemów przetwarzania i klasyfikacji danych.

Podsumowując, opracowanie nowych metod do tak ambitnego zadania wymagało od Pana mgr inż. Pawła Kowaleczko zarówno dogłębnej znajomości już istniejących metod światowych, wiedzy zarówno w aspekcie teoretycznym, jak również w kontekście przetwarzania dużych zbiorów danych oraz organizacji eksperymentów. Nie mniej istotne były umiejętności *stricte* informatyczne Pana mgr inż. Pawła Kowaleczko, który tworzył oprogramowanie do przetwarzania dużych wolumenów danych i systemów uczących się.

5. Podsumowanie

Postawione przez Pana magistra inżyniera Pawła Kowaleczko tezy naukowe zostały w pełni wykazane. Opracowane przez niego metody są oryginalne i na wysokim poziomie. Stanowią one oryginalny własny wkład Doktoranta Pana magistra inżyniera Pawła Kowaleczko w rozwój dyscypliny naukowej informatyka techniczna i telekomunikacja. Przy ich realizacji Pan magister inżynier Paweł Kowaleczko wykazał się dogłębną znajomością najnowszych metod i algorytmów przetwarzania obrazów wielospektralnych, jak również dobrym opanowaniem warsztatu badawczego, a w rezultacie również wysoką dojrzałością naukową.

Recenzowaną pracę oceniam jako z spełniającą formalne oraz zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Wnioskuje o jej przyjęcie oraz o dopuszczenie Pana magistra inżyniera Pawła Kowaleczko do publicznej obrony.

B. GYS

