



*Ocena możliwości zobrazowań satelitarnych
pozyskanych w różnych zakresach spektralnych
do analizy potencjału Floty Bałtyckiej
z wykorzystaniem metod cyfrowego
przetwarzania obrazu*



Ocena możliwości zobrazowań satelitarnych pozyskanych w różnych zakresach spektralnych do analizy potencjału Floty Bałtyckiej z wykorzystaniem metod cyfrowego przetwarzania obrazu

Autor

sierż. pchor. inż. Adrian MOLENDĄ

Promotor pracy

por. dr inż. Marcin WALKOWIAK

Wydawca

Alioth Foundation

foundation.alioth.group

Warszawa

2024

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część niniejszej publikacji nie może być reprodukowana
lub przedrukowana bez zgody Alioth Foundation.

Spis treści

Wykaz użytych skrótów i ważniejszych oznaczeń	6
Wstęp	8
1. Satelitarne dane obrazowe	10
1.1. Charakterystyka danych elektrooptycznych	14
1.2. Charakterystyka danych radarowych	15
1.3. Porównanie danych	16
1.4. Charakterystyka wykorzystanych danych	17
2. Analiza rozpoznawcza floty bałtyckiej z wykorzystaniem OSINT	20
2.1. Struktura organizacyjna Floty Bałtyckiej	21
2.2. Lokalizacja Floty Bałtyckiej	22
2.3. Wyposażenie Floty Bałtyckiej	24
2.4. Analiza Floty Bałtyckiej	26
2.4.1. Analiza Bazy Marynarki Wojennej w Bałtyjsku	28
2.4.2. Analiza Bazy Marynarki Wojennej w Kronsztadzie	34
2.4.3. Analiza portu w Łomonosowie	37
2.4.4. Analiza portu w Wyborgu	38
3. Cyfrowe przetwarzanie zobrażeń EO i SAR	40
3.1. Pansharpening zobrażenia EO	41
3.1.1. Pansharpening metodą IHS	42
3.1.2. Pansharpening metodą Brovey'a	43
3.1.3. Pansharpening metodą Esri	44
3.2. Przetworzenie wstępne zobrażenia SAR	45
3.2.1. Kalibracja radiometryczna	46
3.2.2. Korekcja geometryczna i topograficzna	47
3.3. Filtracja przetworzonego zobrażenia SAR	49
3.3.1. Filtr Lee	50
3.3.2. Filtr Gamma	52
3.3.3. Filtr Frost	53
3.4. Integracja danych SAR i EO	55
3.4.1. Integracja danych metodą Layer stacking	56
3.4.2. Integracja danych metodą Pansharpeningu	57
4. Ocena zobrażeń EO i SAR oraz ich przetworzeń	59
4.1. Analiza surowych zobrażeń EO i SAR	59
4.1.1. Analiza zobrażenia EO	60

4.1.2. Analiza zobrazowania SAR	61
4.2. Ocena jakości połączonych zobrazowań EO portu w Bałtyjsku	64
4.2.1. Ocena wizualna	64
4.2.2. Wskaźniki do globalnej oceny jakości połączonych obrazów	66
4.2.3. Ocena jakości spektralnej przetworzonych obrazów elektrooptycznych	71
4.2.4. Podsumowanie	72
4.3 Ocena przetworzonych zobrazowań SAR portu w Bałtyjsku	73
4.3.1. Ocena wizualna	73
4.3.2. Wskaźniki do oceny jakości wykonanej filtracji obrazu SAR	76
4.3.3. Ocena jakości filtracji	77
4.3.4. Podsumowanie	77
4.4. Ocena integracji danych EO i SAR	78
4.4.1. Ocena wizualna dwóch metod integracji	78
4.4.1. Ocena wizualna dwóch metod integracji	82
4.5. Analiza przetworzonych zobrazowań EO i SAR	83
4.5.1. Analiza przetworzonego zobrazowania EO	83
4.5.2. Analiza przetworzonego zobrazowania SAR	85
4.5.3. Potencjał Floty Bałtyckiej	88
4.6. Możliwości danych w zakresie widzialnym i radarowym oraz ich przetworzeń	88
4.6.1. Możliwości cyfrowego przetworzenia zobrazowań EO i SARprzetworzeń	88
4.6.2. Możliwości zobrazowań w zakresie widzialnym	89
4.6.3. Możliwości zobrazowań w zakresie radarowym	90
Wnioski	91
Wykaz literatury	93
Wykaz zamieszczonych rysunków i tabel	96
Streszczenie	98
Abstract	99

Wykaz użytych skrótów i ważniejszych oznaczeń

AEO – Atlantycka Ekspedycja Oceanograficzna

AOR – Area of Responsibility, pol. Obszar odpowiedzialności

ASTER – Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, pol. Zaawansowany kosmiczny radiometr emisji i odbicia termicznego

ASW – anti-submarine warfare, pol. Walka przeciw okrętom podwodnym

CAVIS – Clouds, Aerosols, Vapours, Ice, and Snow, pol. Chmury, aerozole, para wodna, lód i śnieg

CPO – Cyfrowe przetwarzanie obrazu

CRS – Coordinate Reference System, pol. Układ odniesienia przy pomocy współrzędnych

DMC – Disaster Monitoring Constellation, pol. Konstelacja monitorująca katastrofy

DN – Digital Number, pol. Jasność piksela

EO – Elektrooptyczne

EOS – Earth Observing System, pol. System Obserwacji Ziemi

ERGAS – Erreur Relative Globale Adimensionnelle de Synthèse, pol. Bezwymiarowy globalny błąd względny wyniku łączenia

EROS – Earth Resources Observation Satellites, pol. Satelity do obserwacji zasobów Ziemi

ESA – European Space Agency, pol. Europejska Agencja Kosmiczna

EW – Extra Wide Swath, pol. Bardzo szeroki pokos

FB – Flota Bałtycka

GRD – Ground Resolved Distance, pol. Terenowa zdolność rozdzielcza

GSD – Ground Sampling Distance, pol. Terenowa wielkość piksela

IHS – Intensity, Hue, Saturation, pol. Intensywność, barwa, nasycenie

IMINT – Imagery Intelligence, pol. Rozpoznanie Obrazowe

IPB – Intelligence preparation of the battlefield, pol. Informacyjne przygotowanie pola walki

IW – Interferometric Wide Swath, pol. Interferometryczny szeroki zakres

KH – KeyHole, pol. Otwór na klucz – Oficjalne oznaczenie optycznych satelitów szpiegowskich

MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, pol. Spektrometr obrazujący o umiarkowanej rozdzielczości

MPS – Materiały pędne i smary

MS – Multispectral, pol. Wielospektralny

MSS – Multispectral Scanner System, pol. System skanowania wielospektralnego

MW – Marynarka Wojenna

NASA – National Aeronautics and Space Administration, pol. Narodowa Agencja Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej

NATO – North Atlantic Treaty Organization, pol. Organizacja Traktatu Północnoatlantyckiego

NMT – Numeryczny Model Terenu

OLI – Operational Land Imager, pol. Operacyjny Wykrywacz Ziemi

OSINT – Open-source Intelligence, pol. Rozpoznanie z otwartych źródeł

OVR – Okhrana vodnogo raiona, pol. Ochrona obszaru wodnego

PAN – Panchromatyczny

PCA – Principal Component Analysis, pol. Analiza głównych składowych

PSNR – Peak Signal to Noise Ratio, pol. Współczynnik szczytu sygnału do szumu

RAR – Real Aperature Radar, pol. Antena o rzeczywistej aparaturze

RGB – Red, Green, Blue, pol. Czerwony, Zielony, Niebieski

RMSE – Root mean square error, pol. Pierwiastek z błędu średniokwadratowego

SAR – Synthetic Aperture Radar, pol. Radar z syntetyczną aperturą

SLAR – Side-looking Airborne Radar, pol. Lotniczy radar obrazujący ukośnie

SLR – Side-looking Radar, pol. Radar obrazujący ukośnie

SM – Striptmap

SNR – Signal to Noise Ratio, pol. Stosunek sygnału do szumu

SPOT – Satellite pour l’Observation de la TerreSpotlight, pol. Satelita do obserwacji Ziemi

SSIM – Structural Similarity Index Measure, pol. Miara indeksu podobieństwa strukturalnego

TIRS – Thermal Infrared Sensor, pol. Termiczny czujnik podczerwieni

TM – Thematic Mapper, pol. Mapper tematyczny

UIQI – Universal Image Quality Index, pol. Uniwersalny wskaźnik jakości obrazu

USA – United States of America, pol. Stany Zjednoczone

VIP – Very Important Person, pol. Bardzo ważna osoba

WGS 84 – World Geodetic System 1984, pol. Światowy System Geodezyjny 1984

WV – Wave, pol. Fala

Wstęp

W dzisiejszych czasach zbyt duża ilość informacji powoduje wydłużenie działalności rozpoznawczej dot. analizy danych rozpoznawczych, ponieważ pewną część czasu przeznaczoną na tworzenie wiadomości wywiadowczej trzeba poświęcić na segregację coraz większej ilości danych. Dlatego powodem podjęcia takiego tematu pracy dyplomowej jest wsparcie analityków obrazowych w kwestii doboru odpowiednich zobrazowań oraz metod ich przetworzenia, co usprawni i zmniejszy czas ich działalności. Realizacja takich prac badawczych jest niezmiernie istotna, gdyż jest pomocnym narzędziem dla analityków rozpoznania obrazowego. Poprawa dokładności i skrócenie opracowywania produktów informacyjnych znacząco wpływa na poprawę świadomości sytuacyjnej Sił Zbrojnych Rzeczypospolitej Polskiej.

Celem praktycznym badań jest analiza i ocena możliwości zobrazowań elektrooptycznych i radarowych oraz metod cyfrowego przetworzenia satelitarnych danych obrazowych w celu poprawy ich interpretacyjności w aspekcie przeprowadzenia identyfikacji zarejestrowanego na nich sprzętu wojskowego znajdującego się na wyposażeniu Floty Bałtyckiej. W pracy badawczej zastosowano kilka metod integracji danych teledetekcyjnych oraz wstępne przetworzenia obrazu SAR wraz z jego filtracją.

Poznawczym celem badań jest omówienie satelitarnych danych obrazowych, w tym przybliżenie czytelnikowi informacji na temat programów obrazujących powierzchnie Ziemi przez poszczególne państwa czy prywatne firmy wraz z ich satelitami. Kolejno przedstawienie charakterystyki zobrazowań optycznych i radarowych oraz przeprowadzenie szczegółowej analizy potencjału Floty Bałtyckiej przy wykorzystaniu informacji z otwartych źródeł i danych obrazowych. Wiadomości dotyczące FB pochodzą z artykułów internetowych, raportów stworzonych przez analityków oraz zdjęć z ogólnodostępnej aplikacji Google Earth Pro.

Praca skupia się na danych obrazowanych w zakresie widzialnym w kanałach R, G, B, NIR i kanale panchromatycznym oraz danych radarowych w paśmie X. Zobrazowania pozyskane były na obszar bazy morskiej Federacji Rosyjskiej w Bałtyjsku. Do cyfrowego przetworzenia wcześniej wspomnianych obrazów wykorzystane zostały cztery metody pansharpeningu: IHS, Broveya, Grama Schmidta i sposób wyostrzania obrazu firmy Esri. W przypadku zdjęć SAR wykonana została korekcja radiometryczna oraz filtracja z wykorzystaniem filtrów: Gamma, Lee oraz Frost. Do zrealizowania operacji na zdjęciach użyte zostały programy: ArcGis Pro, ENVI, SNAP, ArcMap a do oceny ich jakości oprogramowanie Matlab.

Realizacja prac badawczych była ukierunkowana na rozwiązanie problemu badawczego, który można zawrzeć w pytaniu: Jakie są możliwości satelitarnych danych obrazowych do identyfikacji obiektów wojskowych i co umożliwiają wybrane metody cyfrowego przetwarzania obrazów w aspekcie poprawy ich potencjału interpretacyjnego?

Wobec tak sformułowanego problemu badawczego Autor postawił następującą hipotezę: Satelitarne dane obrazowe umożliwiają wykrywanie obiektów na obrazie, takich jak: pojazdy, budynki

czy sprzęt wojskowy, natomiast po ich przetworzeniu i otrzymaniu wysokorozdzielczych produktów możliwa jest szczegółowa identyfikacja wcześniej rozpoznanych obiektów. Cyfrowe przetworzenie danych satelitarnych znacznie poprawi możliwości interpretacyjne i przyspieszy identyfikację sprzętu wojskowego na zobrazeniach.

1. Satelitarne dane obrazowe

Satelitarne dane obrazowe to zobrazowania Ziemi pozyskane przez satelity i przesyłane przez satelity orbitujące wokół Ziemi. Satelity te należą do państw lub do prywatnych firm, które handlują wykonanymi obrazami z przedsiębiorstwami, rządami państw a nawet z klientami indywidualnymi. Pozyskane zobrazowania satelitarne mają wiele zastosowań w różnych dziedzinach, między innymi w rolnictwie, meteorologii, edukacji, ochronie środowiska, kartografii, leśnictwie, oceanografii, geologii oraz w wywiadzie i rozpoznaniu wojskowym.

Pierwsze zdjęcie powierzchni Ziemi z kosmosu powstało 24 października 1946 roku z sensora umieszczonego w rakiecie V-2 wystrzelonej ze stanu Nowy Meksyk w USA. Rakietę tą była pierwszym statkiem, który pokonał linię Kármána rozciągającą się na wysokości 100 km – jest to umowna granica pomiędzy atmosferą Ziemi a przestrzenią kosmiczną. Pierwszy sztuczny satelita Ziemi został wyniesiony 4 października 1957 roku przez Związek Radziecki i był nim Sputnik 1. Wydarzenie to zapoczątkowało walkę mocarstw o dominację w przestrzeni kosmicznej oraz zaogniło stosunki państw uwikłanych w tzw. zimną wojnę. Masa sputnika wynosiła 83 kg, średnica 58 cm, satelita została wyniesiona na orbitę przy użyciu rakiety nośnej R7 wystrzelonej z kosmodromu Bajkonur. Misja trwała 92 doby, w ciągu których Ziemia została okrążona 1367 razy i polegała na badaniu propagacji fal radiowych przez jonosferę. 14 sierpnia 1959 roku zrealizowano pierwsze satelitarne zdjęcie naszej planety za pomocą amerykańskiego satelity Explorer 6. Szacuje się, że od pierwszej misji Sputnika na orbitach okołoziemskich umieszczonych zostało 12170 sztucznych satelitów, obecnie jest ich 7630 w czym ponad 4800 jest operatywnych [50].

Pierwszym kosmicznym projektem obserwacji i pozyskiwania zobrazowań powierzchni Ziemi jest Earth Resources Observation Satellites (EROS). Został stworzony przez Amerykańską Agencję Kosmiczną NASA, w ramach której wyniesiono na orbitę dziewięć sztucznych satelitów. Projekt ten przerodził się w program Landsat i pozyskuje on obrazy wielospektralne. Pierwszych pięć satelitów Landsat wyposażonych było w Multispectral Scanner System (MSS), który pozyskiwał obrazy w czterech pasmach widmowych od 0,5 do 1,1 m. Landsat 3 dysponował dodatkowo pasmem 8, które rejestrowało promieniowanie podczerwone. Kolejnym sensorem skonstruowanym do uzyskania lepszej jakości zdjęć jest Thematic Mapper (TM). Pozwala on na jednoczesne wykrywanie w siedmiu pasmach 0,45 – 12,35 m o rozdzielczości przestrzennej wynoszącej 30 m. Najnowsze czujniki, w które wyposażony jest satelita Landsat, pozyskują dane w jedenastu pasmach od 0,435 do 12,51 m. Jest to Operational Land Imager (OLI) dla pasm optycznych i Thermal Infrared Sensor (TIRS) dla pasm termalnych [61]. Do programów prowadzonych przez inne państwa, których dane są udostępniane do użytku publicznego można również zaliczyć:

- **program CORONA** – amerykański program satelitów wywiadowczych. Wczesne satelity tego systemu nazwane zostały jako KH-1, KH-2, KH-3, KH-4, KH-4A, KH-4B. Wykonane przy ich użyciu zdjęcia miały rozdzielczość przestrzenną 7,5 m, w późniejszej wersji KH-6 zmniejszyła się ona do 1,8 m. Dane pozyskane w czasie trwania tego programu były ściśle tajne i dopiero w 2002 roku

zostały odtajnione i wykorzystywane przez naukowców [3].

- **Program MODIS** – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer to wielospektralny skaner optyczny, który rejestruje promieniowanie w 36 pasmach od 0,46 do 14,39 m, używając do tego dwóch satelitów. Sensor przesyła dane dotyczące: zachmurzenia Ziemi, atmosfery, zmian w oceanach i na lądzie. Projekt oferuje około czterdziestu różnych produktów, m. in.: wskaźniki roślinności, pokrycie terenu i jego zmiany, pokrywę śnieżną, zgeneralizowane dane atmosferyczne [63].
- **Copernicus** – projekt obserwacji Ziemi przeprowadzany przez Komisję Europejską we współpracy z państwami członkowskimi i Europejską Agencją Kosmiczną. Dostarcza aktualnych informacji odnośnie środowiska i zmian klimatu w celu ochrony środowiska. W ramach tego programu ESA stworzyła misję Sentinel, która polega na wystrzeleniu co najmniej jednej pary satelitów, przez co zwiększają badany obszar. Do tej pory wysłano sześć takich misji:
 - **Sentinel-1** (03.04.2014r.) dostarcza obrazy radarowe SAR z czasem rewizyty do 6 dni, mogą być one uzyskane w trybie pasmowym (Stripmap, SM), szerokim (Extra Wide Swath, EW), falowym (Wave, WV) oraz interferometrycznym (Interferometric Wide Swath, IW).
 - **Sentinel-2** (23.06.2015) zapewnia wielospektralne zdjęcia optyczne wysokiej rozdzielczości. Dla kanałów 2, 3, 4, 8 rozdzielczość przestrzenna wynosi 10 m z czasem rewizyty 5 dni przy wykorzystaniu dwóch satelitów.
 - **Sentinel-3** (16.02.2016) monitoruje lądy i oceany.
 - **Sentinel-4** nadzorować ma skład atmosfery, zostanie uruchomiony w 2024 roku,
 - **Sentinel-5** również dostarcza informację na temat atmosfery.
 - **Sentinel-6** przesyła dane na temat poziomu morza [56].
- **EOS** – jest to program NASA, który zbiera i kolekcjonuje dane obrazowe z różnych aparatów teledetekcyjnych. Jedną z nich jest Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), czyli japoński instrument na pokładzie satelity Terra. Rejestruje wielospektralne dane w wysokiej rozdzielczości w 14 różnych kanałach widma elektromagnetycznego. Na ich podstawie generowane są bardzo dokładne mapy temperatury powierzchni naszej planety, emisyjności i współczynnika odbicia [55].
- **Program Meteosat** – to seria geostacjonarnych satelitów meteorologicznych, których zadaniem jest obserwacja pogody i badania meteorologiczne. Trzy- kanałowy skaner pierwszej generacji MVIRI dostarcza dane w zakresie widma od 0,5 do 12,5 m, w tym WV (absorpcja pary wodnej) o rozdzielczości czasowej 30 min. W drugiej generacji skaner SEVIRI rejestruje dane w podobnym spektrum długości fali elektromagnetycznej, ale już w 12 kanałach spektralnych, a rozdzielczość czasowa zmniejszyła się do 15 min [58].

Obrazowe dane satelitarne pozyskiwane są także przez prywatne firmy w celach komercyjnych. Jedną z takich firm jest firma Maxar, która monitoruje globalne zmiany, dostarcza oraz analizuje dane z

obserwacji Ziemi. Dane obrazowe zbierane są przez serie wystrzelonych satelitów:

- **IKONOS** (24.09.1999) – pierwszy na świecie komercyjny satelita rejestrujący dane panchromatyczne w rozdzielczości 0,80 m oraz dane wielospektralne w rozdzielczości 3,2 m.
- **QuickBird** (18.10.2001) – pozyskuje zobrazowania panchromatyczne w zakresie 405 – 1053 nm (0,65 m), zobrazowania wielospektralne (430 – 918 nm) w rozdzielczości 2,62 m.
- **WorldView-1** (18.09.2007) – to panchromatyczny (400 – 900 nm) system obrazowania z półmetrową rozdzielczością przestrzenną, średni czas rewizyty wynosi 1,7 dnia.
- **GeoEye-1** (06.09.2008) – zbiera informacje obrazowe w postaci zdjęć panchromatycznych (450 – 800 nm) w rozdzielczości 0,46 m oraz zobrazowania wielospektralne (450 – 920 nm).
- **WorldView-2** (08.10.2009) – posiada ośmiokanałowy sensor wielospektralny, działający w spektrum widma elektromagnetycznego od 400 do 1040 nm, jak również panchromatyczny (450 – 800 nm). Średni czas rewizyty to 1,1 dnia.
- **WorldView-3** (13.08.2014) – to pierwszy na świecie merkantylny satelita wielozadaniowy o wysokiej rozdzielczości 0,31 m w kanale panchromatycznym (450 – 800 nm). Posiada ośmiokanałowy sensor optyczny (397 – 1039 nm), kamerę bliskiej podczerwieni obrazującą w 8 kanałach od 1184 do 2373 nm, a także detektor CAVIS (Clouds, Aerosols, Vapours, Ice, and Snow) do monitorowania atmosfery.
- **WorldView-4** (11.11.2016) – oferuje wysokiej rozdzielczości wielospektralne zdjęcia satelitarne z archiwum firmy, ponieważ został wycofany z konstelacji 7.01.2019 roku w wyniku awarii.
- **WorldView Legion** – ten system satelitarny ma zdolność do zbierania obrazów w rozdzielczości do 30 cm, co oznacza, że jest w stanie uchwycić szczegóły, takie jak samochody, budynki i inne obiekty o tej samej wielkości lub mniejszej. WorldView Legion ma na celu zwiększenie zasięgu i dokładności satelitów firmy Maxar w zbieraniu obrazów komercyjnych, a także umożliwienie klientom tej firmy uzyskania dostępu do najnowszych i najdokładniejszych informacji o terenie [62].

Kolejną firmą jest europejski Airbus posiadający sześć różnych konstelacji satelitów dla użytkowników cywilnych i wojskowych:

- **Pléiades**, która składa się z dwóch satelitów optycznych o rozdzielczości przestrzennej 2 m w kanałach wielospektralnych (430 – 950 nm) z czasem rewizyty jednego dnia oraz 0,5 m w kanale panchromatycznym (480 – 830 nm).
- **Pléiades Neo** to konstelacja czterech identycznych satelitów, które są w stanie pozyskać dane o rozdzielczości 0,3 m dla kanału panchromatycznego (450 – 800 nm). Rewizyta tego samego miejsca możliwa jest dwa razy dziennie przy odchyleniu sensora o 46° od nadiru.
- **SPOT** (Satelita do obserwacji Ziemi) to dwie satelity, które mają dzienną zdolność akwizycji sześciu milionów km² z rozdzielczością przestrzenną do 1,5 m.
- **Vision-1** to satelita rejestrujący w paśmie panchromatycznym, widzialnym oraz bliskiej

podczerwieni.

- **Konstelacja radarowa** to dwa niemieckie satelity TerraSAR-X i TanDEM-X oraz hiszpański satelita Paz. Satelity wyposażone są w sensor pracujący w paśmie X, który umożliwia pozyskiwanie danych o różnych polaryzacjach i szerokościach pasma.
- **Konstelacja DMC** dostarcza obrazy wielospektralne w rozdzielczości przestrzennej 22 - 24 m oraz zdjęcia panchromatyczne w rozdzielczości 12 m. Konstelacja gromadzi dane z dziesięciu milionów km² dziennie [54].

Szeroki asortyment satelitarnych danych obrazowych oferują również izraelska firma ImageSat International, która posiada dwie satelitarne konstelacje. Pierwsza z nich to Earth Resources Observation Satellite (EROS), w której skład wchodzi 6 wojskowych satelitów obserwacyjnych Ziemi. Drugą konstelację Global Eye zaprojektowano z myślą o wsparciu pracy pierwszej z nich i wykorzystano do tego satelity Runner oraz Knight [60]. Na rynku pojawiły się także mikrosatelity produkowane przez firmę ICEYE. Misja ICEYE składa się z 16 satelitów o masie 85 kg każdy z nich, wyposażonych w instrumenty SAR zdolne rejestrować obraz naszej planety w paśmie X. Firma nadal zwiększa liczbę satelitów w swojej konstelacji, aby zwiększyć możliwości monitorowania zmian na powierzchni Ziemi [59].

Pierwsze próby wykorzystania radarów do obrazowania Ziemi zostały podjęte już pod koniec lat 40. Po II wojnie światowej technologia radarowa uległa znacznemu rozwojowi i stała się coraz bardziej zaawansowana. Lotniczy radar bocznego wybierania SLAR (Side-Looking Airborne Radar) z anteną o rzeczywistej aparaturze RAR (Real Aparature Radar), zbudowany na Uniwersytecie Michigan w 1953 roku, był ważnym osiągnięciem w dziedzinie radarów i pozwolił na zobrazowanie pasa powierzchni Ziemi równoległego do lotu samolotu. To urządzenie było przeznaczone do celów militarnych i przyczyniło się do dalszego rozwoju radarów, w tym radarów SAR. W 1960 roku amerykańska agencja kosmiczna NASA wystrzeliła satelitę Echo 1, która była w stanie odbijać sygnały radarowe i umożliwić namierzanie pozycji satelity za pomocą odbić. Pierwsza satelita z radarami SAR została wystrzelona przez NASA w 1972 roku. Satelitę nazwano Seasat i była ona w stanie zobrazować powierzchnię Ziemi z rozdzielczością przestrzenną do 10 metrów. Seasat był używany do badania ruchu fal morskich, monitorowania roślinności i pomocy w prognozowaniu pogody. Od tego czasu technologia satelitów SAR ewoluowała i stała się bardziej zaawansowana [22].

Przy pozyskiwaniu jak i kupnie obrazowych danych satelitarnych ważna jest ich jakość, którą można określić poprzez kilka parametrów, takich jak:

- **Rozdzielczość przestrzenna** to liniowy wymiar fragmentu terenu, który jest reprezentowany przez jeden piksel. Z niską rozdzielczością mamy do czynienia wtedy, kiedy jeden piksel jest większy niż 30 m, a za obrazy wysokorozdzielcze uznaje się te, w których jeden piksel jest mniejszy niż 2 m.
- **Rozdzielczość spektralna** - określa liczbę i zakres kanałów spektralnych, które rejestrowane są przez dany sensor. W zależności od aparatury, w którą wyposażony jest dany satelita, może on

pozyskiwać dane wielospektralne (kilka kanałów), superspektralne (kilkadziesiąt kanałów) lub hiperspektralne (kilkaset kanałów).

- **Rozdzielczość czasowa** – wyraża interwał czasu pomiędzy dwoma kolejnymi akwizycjami tego samego obszaru przez konkretnego satelitę. Krótszy czas rewizyty zwiększa możliwości rozpoznawcze terenu, detekcji zmian oraz niweluje ograniczenia, takie jak występowanie zachmurzenia nad obszarem zainteresowania.
- **Rozdzielczość radiometryczna** – charakteryzuje zdolność do wyodrębnienia niewielkich różnic w ilości energii odbitej lub emitowanej dla danego przedmiotu, czyli maksymalna wartość, jaka określa pojedynczą wartość piksel (DN) tzw. dynamika zakresu [27].
- **Ground Sampling Distance (GSD)** – terenowa wielkość piksela, która wytycza odległość między dwoma sąsiednimi środkami pikseli w terenie. Parametr ten formułuje możliwości interpretacyjne w sposób przybliżony.
- **Ground Resolved Distance (GRD)** – to najmniejsza wielkość, jaką można rozróżnić na zobrazowaniu. Ustala prawdziwą rozdzielczość, z jaką uzyskano zdjęcie satelitarne, ponieważ bierze pod uwagę wpływ optyki, atmosfery na jakość zobrazowania [42].

1.1. Charakterystyka danych elektrooptycznych

Dane elektrooptyczne dostarczane są przez pasywne systemy teledetekcyjne. Sensory umieszczone na satelitach pozyskują zobrazowania poprzez wykorzystanie odbitego promieniowania Słońca lub emitowanego przez powierzchnię Ziemi. Obejmują one kanał panchromatyczny w zakresie widzialnym oraz bliskiej podczerwieni, kanał RGB (Red, Green, Blue), czyli obraz w barwach naturalnych, jak również zobrazowania wielospektralne, superspektralne i hiperspektralne ze spektrum fal o długości od 0,1 do 15 m.

Obrazy panchromatyczne rejestrowane są tylko w jednym kanale, a wartości i różnice w sile promieniowania przedstawiane są za pomocą skali szarości. Charakteryzują się białą – czarną postacią oraz większą rozdzielczością przestrzenną od innych rodzajów zdjęć pochodzących od tego samego typu sensora. Przy użyciu adekwatnych filtrów można rozdzielić to samo promieniowanie z tego kanału na trzy składowe i uzyskać obraz kolorowy. Dane wielospektralne cechuje ilość od 4 do 20 kanałów spektralnych, umożliwia to rozpoznanie podstawowych elementów pokrycia terenu, jak woda czy obszary zurbanizowane. Aparatura wielospektralna jest najczęściej wykorzystywana w obrazowaniu naszej planety, ale w przypadku identyfikacji różnych rodzajów gatunków roślin lub zanieczyszczenia pól uprawnych używane są sensory hiperspektralne. Urządzenia te posiadają kilkaset kanałów spektralnych, które są znacznie gęściej rozmieszczone i dotyczą małych części spektrum elektromagnetycznego od 20 do nawet 10 nm [64].

Elektrooptyczne dane satelitarne przez wzgląd na fakt, że wśród ich spektrum widma elektromagnetycznego znajduje się zakres widzialny, mogą być bardziej przystępne do interpretacji i

analizy dla niedoświadczonych osób, ponieważ przedstawiają obraz w barwach naturalnych. Dzisiejsze sensory optyczne są w stanie wykonywać zdjęcia w wysokiej rozdzielczości przestrzennej nawet do 0,3 m. Takie obrazy są wyjątkowo użyteczne do celów rozpoznania obrazowego, ponieważ umożliwiają identyfikację rodzajów i typów pojazdów, statków powietrznych czy innego sprzętu wojskowego, którym dysponuje przeciwnik. Jednak, aby uzyskać wysokorozdzielcze dane elektrooptyczne o dobrej jakości, nie może wystąpić zbyt duże zachmurzenie nad danym terenem zainteresowania. Warunki atmosferyczne powinny być sprzyjające oraz Słońce musi oświetlać nasz obszar. Kolejną wadą, w przypadku danych tego rodzaju, jest dłuższy czas rewizyty, ponieważ optycznych satelitów, które są w stanie zobrazować Ziemię na poziomie rozdzielczości przestrzennej około 0,5 m, jest niewiele. Dodatkowo, tak dokładne i precyzyjne sensory, to wielkogabarytowe oraz kosztowne aparatury, z których dane obrazowe są bardzo duże i mogą obciążać komputery i programy do cyfrowego przetwarzania obrazu [52].

1.2. Charakterystyka danych radarowych

Dane radarowe należą do rodziny aktywnych systemów teledetekcyjnych, które w procesie pozyskiwania zobrazowań wykorzystują do tego własne źródło promieniowania. Promieniowanie wysyłane jest z pokładów satelitów obrazujących w kierunku powierzchni Ziemi, po odbiciu od terenu lub obiektu rejestrowane są jako sygnał przez odbiornik.

Radar obrazujący jest radarem bocznego wybierania SLR (side-looking radar), ponieważ przy obrazowaniu pionowym symetrycznie wysłane promieniowanie w kierunku obszaru naszej planety w pewnym kącie jej rozwarcia zawierałoby punkty położone w tej samej odległości od instrumentu. Skutkowałoby to niejednoznaczną identyfikacją sygnałów powracających do odbiornika w radarze odbitych od tych punktów. Obrazowanie radarowe sprowadza się do wysyłania milionów impulsów mikrofalowych w kierunku Ziemi, a następnie odbiorze echa wynikającego z odbicia od danego obiektu. Współrzędne odbitej wiązki oblicza się na podstawie czasu jej powrotu do instrumentu oraz prędkości propagacji fali radarowej. Obrazy radarowe mieszczą w sobie dane o właściwościach dielektrycznych obiektów naturalnych (rośliny i gleby) oraz o strukturze (szorstkości) terenu. Radarowe dane obrazowe są z zakresu mikrofal widma elektromagnetycznego głównie w pasmach P, L, C, X. Pasma X o falach długości od 2,4 do 3,75 cm uzyska więcej danych na temat rodzaju upraw niż pasma C (3,75 – 7,5 cm) czy L (15 – 30 cm), ponieważ są one od nich krótsze. Dodatkowo pasmo X najczęściej wykorzystywane jest w rozpoznaniu wojskowym oraz obrazowaniu terenu. Dłuższe zakresy spenetrują głębiej glebę, dostarczając informacji na temat jej wilgotności. Do penetracji drzewostanu oraz do detekcji min używa się pasma P (30 – 100 cm). Pasma C ma zastosowanie w radarach pogodowych i transponderach satelitarnych, natomiast pasmo L w urządzeniach do kontroli przestrzeni powietrznej.

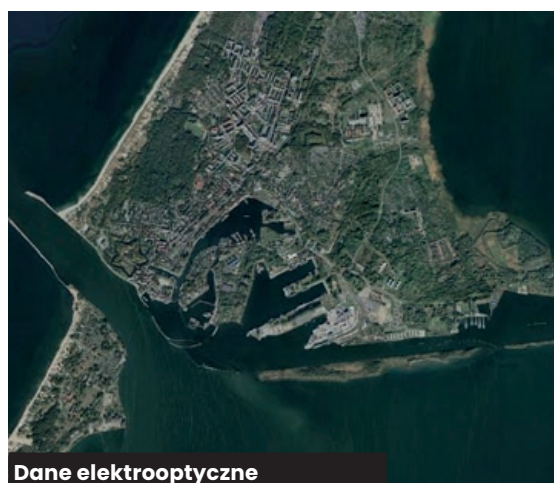
Mikrofały wysyłane z nadajnika przechodzą przez chmury i w zależności od danego pasma oraz długości jego fali penetrują w różnym stopniu szatę roślinną [34]. Dlatego te systemy odporne są na złe warunki atmosferyczne, zachmurzenia oraz na brak promieniowania słonecznego, co umożliwia

prorowadzenie obserwacji w trybie ciągłym oraz monitorowanie zmian. Ważną cechą SAR jest możliwość pozyskiwania danych obrazowych dużych powierzchni Ziemi w krótkim czasie. Obrazy dostarczone przez radary najlepiej sprawdzają się w wykrywaniu okrętów i statków na morzach i oceanach, ponieważ takie obiekty dobrze kontrastują na tle wody. Zobrazowania dostarczone przez aktywne systemy satelitarne obarczone są niestety pewnymi błędami, które wpływają negatywnie na ich interpretację, m. in. zniekształcenia geometrii spowodowane terenami o znacznych deniwelacjach terenu, jak również ziarnistość obrazu [52].

1.3. Porównanie danych

Po przeanalizowaniu wad i zalet danych radarowych jak i optoelektronicznych, można stwierdzić, że bezpośrednie ich porównanie jest podejściem błędnym. Satelity radarowe doskonale sprawdzają się w obrazowaniu rozległych obszarów naszej planety oraz do wykrywania zmian, ponieważ pora dnia jak i warunki atmosferyczne nie wpływają na ich jakość. Z kolei zobrazowania optyczne idealnie nadają się do pracy wywiadowczej. Na podstawie wysokorozdzielczych danych w zakresie widzialnym można dokładnie zidentyfikować rodzaj, jak i liczbę statków powietrznych czy okrętów wojskowych przeciwnika. Nie trzeba posiadać specjalnego oprogramowania, oraz większych umiejętności interpretacyjnych, jak w przypadku pracy na zdjęciach radarowych, ponieważ dane pochodzące z SAR są często opatrzone wieloma błędami. Dobrym rozwiązaniem mogłaby być współpraca tych dwóch rodzajów obrazowania: satelity radarowe wykorzystać do wykrywania obiektów przez lustracje znacznych obszarów Ziemi, a optoelektroniczne sensory o wysokiej rozdzielczości przestrzennej do dokładnej identyfikacji poszczególnych celów.

W przypadku mojej pracy dyplomowej do przeprowadzanie analizy Floty Bałtyckiej lepiej sprawdzą się dane elektrooptyczne. Do szczegółowego rozpoznania pojedynczych okrętów stacjonujących w porcie w Bałtyjsku przydadzą się zobrazowania w barwach naturalnych, na których bez specjalistycznego oprogramowania będzie można przeprowadzić analizę.



Dane elektrooptyczne



Dane radarowe

Tabela 1.1. Porównanie danych
[źródło: opracowanie własne].

1.4. Charakterystyka wykorzystanych danych

W pracy wykorzystam trzy zobrazowania przedstawiające Bazę Marynarki Wojennej Federacji Rosyjskiej w Bałtyjsku. Pierwsze dwa zdjęcia elektrooptyczne pozyskane są z 23.07.2020 roku, natomiast trzeci obraz radarowy jest z 21.07.2020 roku. Wybór takiego przedziału czasowego, z którego zostały zaczerpnięte dane nie jest przypadkowy, ponieważ w tym okresie w bazie morskiej odbywała się defilada wojskowa. W przypadku takiej uroczystości możliwa jest identyfikacja większej liczby sprzętu, którą dysponuje Flota Bałtycka, a co za tym idzie dokładniejsze określenie potencjału tej floty.

Pierwsze zobrazowanie rysunek 1.1. pochodzi z satelity Pleiades 1A, którą dysponuje francuska firma Airbus. Jest to zdjęcie wykonane w czterech kanałach spektralnych: kanale niebieskim (430–550 nm), kanale zielonym (490–610 nm), kanale czerwonym (600–695 nm) oraz w kanale bliskiej podczerwieni (750–950 nm) w rozdzielczości przestrzennej 2 m. Sensor w trakcie wykonywania zobrazowania był wychylony o 30°. Drugie zdjęcie rysunek 1.2. zostało zrealizowane przez ten sam sensor, w tym samym czasie, ale w kanale panchromatycznym (480–830 nm) w rozdzielczości przestrzennej wynoszącej 0,5 m. Obie sceny satelitarne przedstawiają obszar o wielkości 14,5 km², z zachmurzeniem na poziomie około 17,5%.



Rys. 1.1. Zobrazowanie elektrooptyczne w zakresie widzialnym z satelity Pleiades 1A



Rys. 1.2. Zobrazowanie panchromatyczne z satelity Pleiades 1A

Trzecie wykorzystane zdjęcie w pracy to zobrazowanie radarowe rysunek 1.3. pozyskane z satelity ICEYE X4. Sensor ten ma możliwość obrazowania dwoma metodami: Stripmap (SM) oraz Spotlight (SPOT). SM działa poprzez wykorzystanie ruchomej platformy, takiej jak samolot lub satelita, do nadawania i odbierania sygnałów radarowych. Platforma zwykle porusza się w kierunku liniowym, który pozwala na szeroki obraz powierzchni. Stripmap ma tę zaletę, że obejmuje szeroki obszar w jednym przejściu, co czyni go przydatnym do monitorowania dużych obszarów, rozpoznania i mapowania. SPOT jest rodzajem obrazowania radarowego, które jest wykorzystywane do tworzenia obrazów o wysokiej rozdzielczości określonych obszarów. Działa poprzez emisję wąskiej, skupionej wiązki radarowej, która oświetla niewielki obszar powierzchni za jednym razem. W przeciwieństwie do stripmap, który obrazuje długi, wąski pas powierzchni, spotlight SAR obrazuje mniejszy, bardziej skoncentrowany obszar. Pozwala to na uzyskanie jeszcze wyższej rozdzielczości obrazu od 0,2 – 1 m [32]. W przypadku mojej pracy wykorzystane zobrazowanie radarowe zostało wykonane metodą Spotlight w paśmie X o długości fali 2,4 – 3,75 cm i częstotliwości 12,5 – 8 GHz oraz w polaryzacji VV. Pozwoliło to na pokrycie obszaru o wymiarze 33 km² z rozdzielczością przestrzenną na poziomie około 0,5 m. Podczas rejestracji satelita ICEYE X4 znajdowała się na orbicie wstępującej.



Rys. 1.3. Zobrażowanie
radarowe z satelity
ICEYE X4

2. Analiza rozpoznawcza floty bałtyckiej z wykorzystaniem OSINT

OSINT czyli Open-Source Intelligence to rozpoznanie z ogólnodostępnych źródeł tzw. biały wywiad. Termin ten odnosi się do danych, które nie są sklasyfikowane jako zastrzeżone, poufne czy tajne, tylko do informacji pochodzących z jawnego źródła. Każda osoba może zgodnie z prawem pozyskać takie wiadomości poprzez żądanie, zakup lub obserwację, ponieważ są to materiały publiczne. Źródła OSINT można podzielić na:

- Media,
- Internet,
- Dane administracji publicznej,
- Publikacje profesjonalne i akademickie,
- Dane handlowe,
- Szarą literaturę (pisemne informacje wytwarzane przez sektor prywatny, rząd i środowisko akademickie, które mogą ograniczać dostęp do tych informacji, przez wzgląd na ich niewielką liczbę).

Jednym z błędnych przekonań na temat białego wywiadu jest to, że polega on głównie na danych pozyskanych w Internecie. Informacje zdobywane w ten sposób są często ciężkie do zweryfikowania oraz służby wywiadowcze obcych państw wykorzystują Internet do rozpowszechniania fałszywych wiadomości. OSINT z całą pewnością jest rodzajem rozpoznania, które generuje najmniejsze koszty w porównaniu do innych typów rozpoznania, ale nie jest całkowicie bezpłatne, jak wiele osób może o nim sądzić. Nadal trzeba uiścić opłatę za dostęp do zróżnicowanych źródeł informacji oraz za oprogramowanie, które ułatwi pracę analityczną, jednak wciąż nie będą to tak duże wydatki, jak w przypadku gromadzenia danych przy użyciu satelity obrazującej w rozdzielczości przestrzennej poniżej 0,5 m [6]. W trakcie trwania pracy rozpoznawczej można wyróżnić cztery jej fazy:

- gromadzenie danych,
- ukierunkowanie na dany cel rozpoznania,
- przetwarzanie, analiza danych oraz wyciągnięcie wniosków na ich podstawie,
- rozpowszechnienie informacji wywiadowczej [21].

Do analizy Floty Bałtyckiej przy wykorzystaniu OSINT można uzyskać takie informacje, jak: dane dotyczące typów okrętów, lokalizacje baz morskich oraz szczegóły na temat modernizacji i rozwoju poszczególnych jednostek wojskowych.

2.1. Struktura organizacyjna Floty Bałtyckiej

Flota Bałtycka jest formacją operacyjno-strategiczną, czyli należy do wyższej struktury Sił Zbrojnych Federacji Rosyjskiej. Podporządkowana jest pod Zachodnie Połączone Dowództwo Strategiczne zlokalizowane w mieście Sankt Petersburg. Sztab główny FB mieści się w Obwodzie Kaliningradzkim w miejscowości Kaliningrad i dowodzi nią admirał Viktor Nikolayevich Liina. Dowództwu podlegają dwie bazy morskie [24]:

1. Baza Marynarki Wojennej w Bałtyjsku (Obwód Kaliningradzki), w której skład wchodzi:

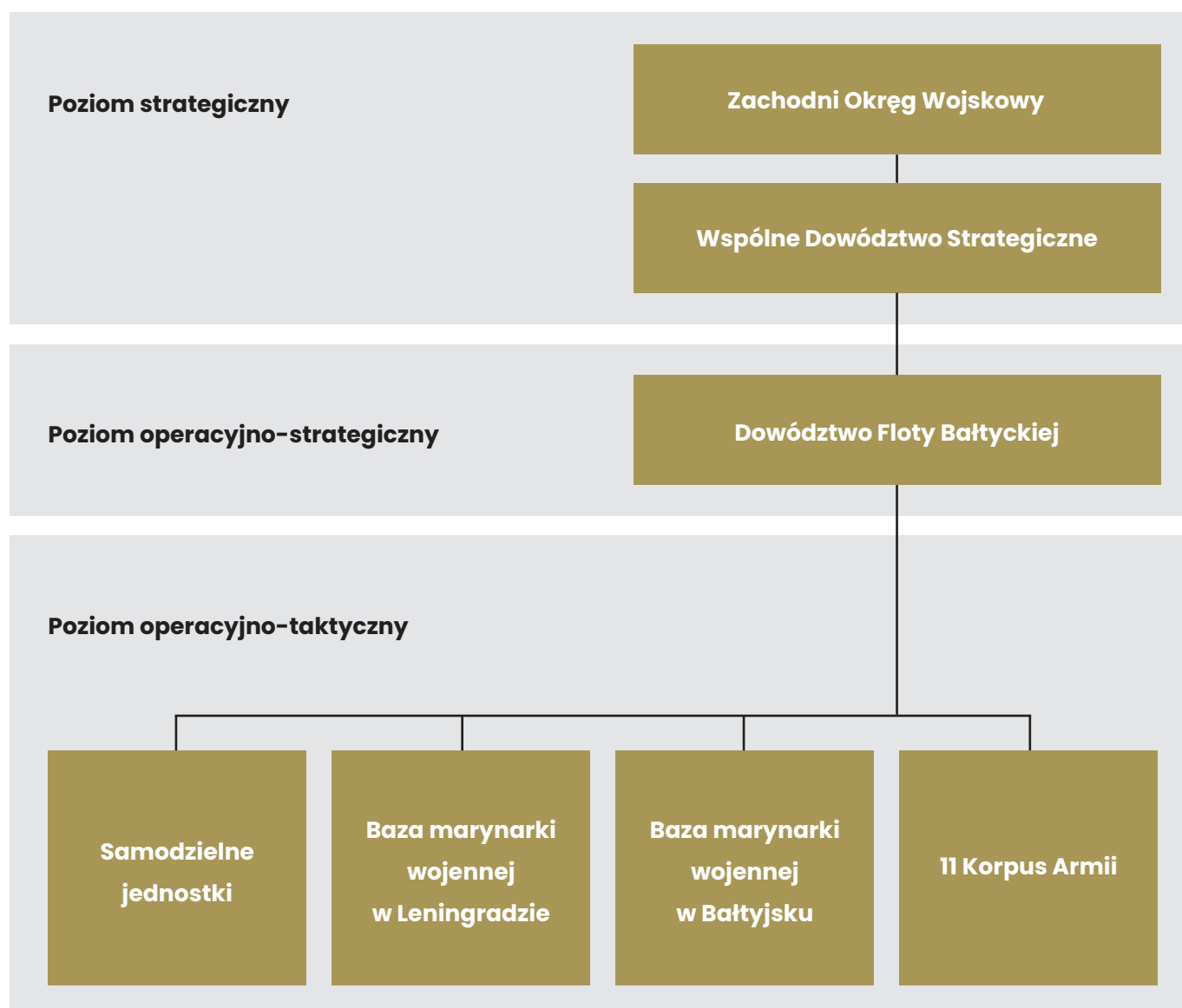
- 71. Brygada Okrętów Desantowych,
- 128. Brygada Okrętów Nawodnych,
- 36. Brygada Okrętów Rakietowych,
- 4. Brygada Ochrony Obszaru Wodnego,

2. Baza Marynarki Wojennej w Kronsztadzie (Obwód Leningradzki):

- 3. Dywizjon Okrętów Podwodnych,
- 105. Brygada Ochrony Obszaru Wodnego.

Dodatkowo do Floty Bałtyckiej wliczają się:

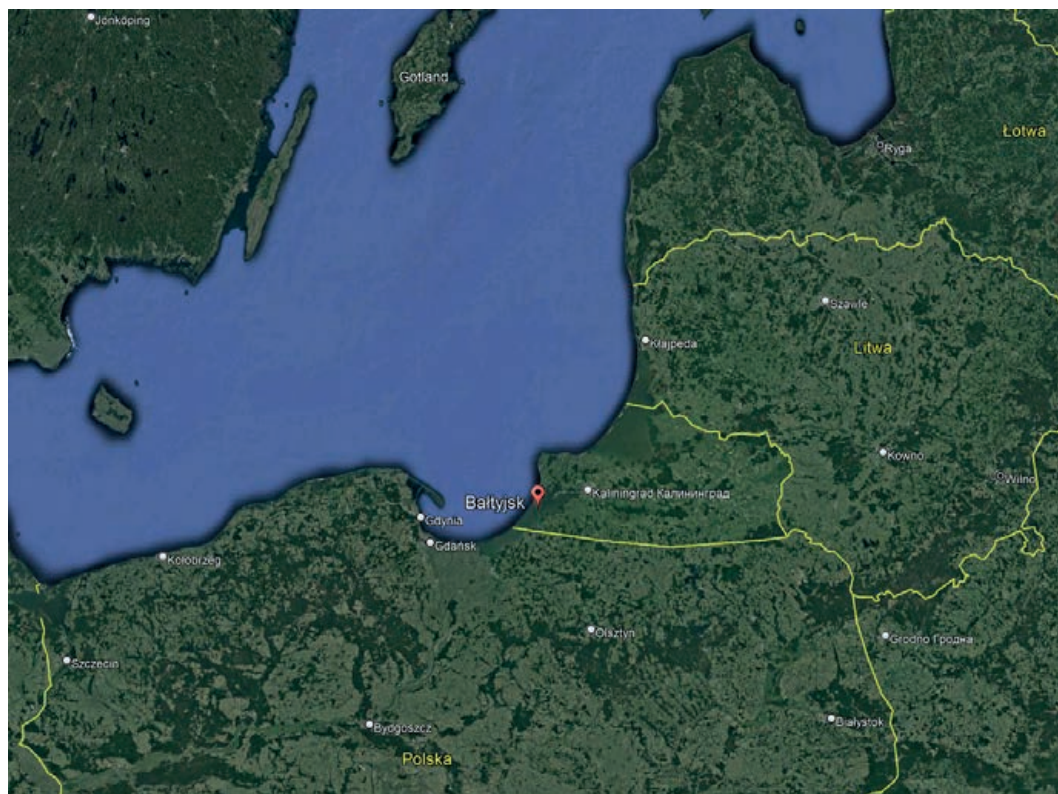
- **Siły Przybrzeżne FB** – 11. Korpus Armii:
 - 18. Gwardyjska Dywizja Strzelców Zmotoryzowanych (Gusiew),
 - 7. Samodzielny Pułk Strzelców Zmotoryzowanych (Kaliningrad),
 - 244. Brygada Artylerii (Kaliningrad),
 - 152. Gwardyjska Brygada Rakietowa (Czerniachowsk),
 - 25. Brygada Rakietowa Obrony Wybrzeża (Donskoje),
 - 336. Gwardyjska Brygada Piechoty Morskiej (Bałtyjsk),
- **Siły Powietrzne FB** – 132. Dywizja Lotnictwa Mieszanego:
 - 689. Pułk Lotnictwa Myśliwskiego (Czkałowsk),
 - 4. Pułk Lotnictwa Szturmowego (Czerniachowsk),
 - 125. Dywizjon Śmigłowców (Czkałowsk),
 - 396. Pułk Śmigłowców Mieszanych (Donskoje),
 - 398. Samodzielna Eskadra Transportowa (Chrabrowo),
- **Obrona Powietrzna** – 44. Dywizja Obrony Powietrznej:
 - 183. Pułk Rakietowy Obrony Powietrznej (Gwardiejsk),
 - 1545. Pułk Rakietowy Obrony Powietrznej (Krugłowo) [64].



Rys. 2.1. Struktura Floty Bałtyckiej [24].

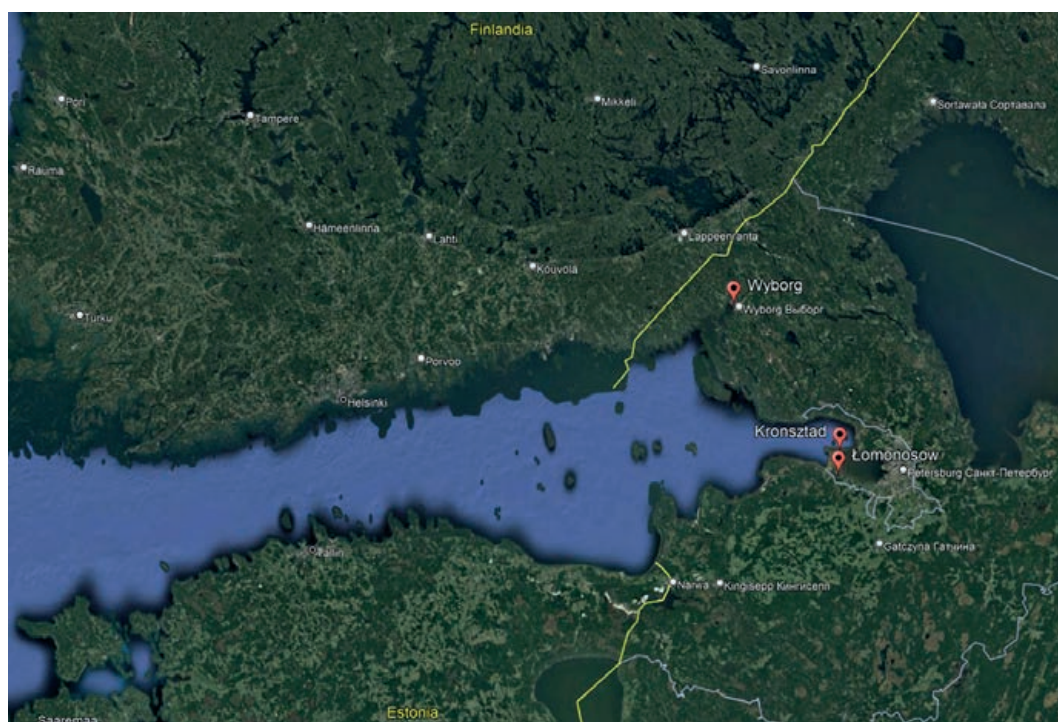
2.2. Lokalizacja Floty Bałtyckiej

Główną bazą Floty Bałtyckiej jest ta zlokalizowana w Bałtyjsku w pobliżu Cieśniny Bałtyjskiej. Jej położenie stwarza duże zagrożenie dla obszaru Zatoki Gdańskiej i wszelkiej infrastruktury krytycznej zlokalizowanej w jej obrębie, jak również gwarantuje jej szybką reakcję na wrogie działania w południowej części Morza Bałtyckiego.

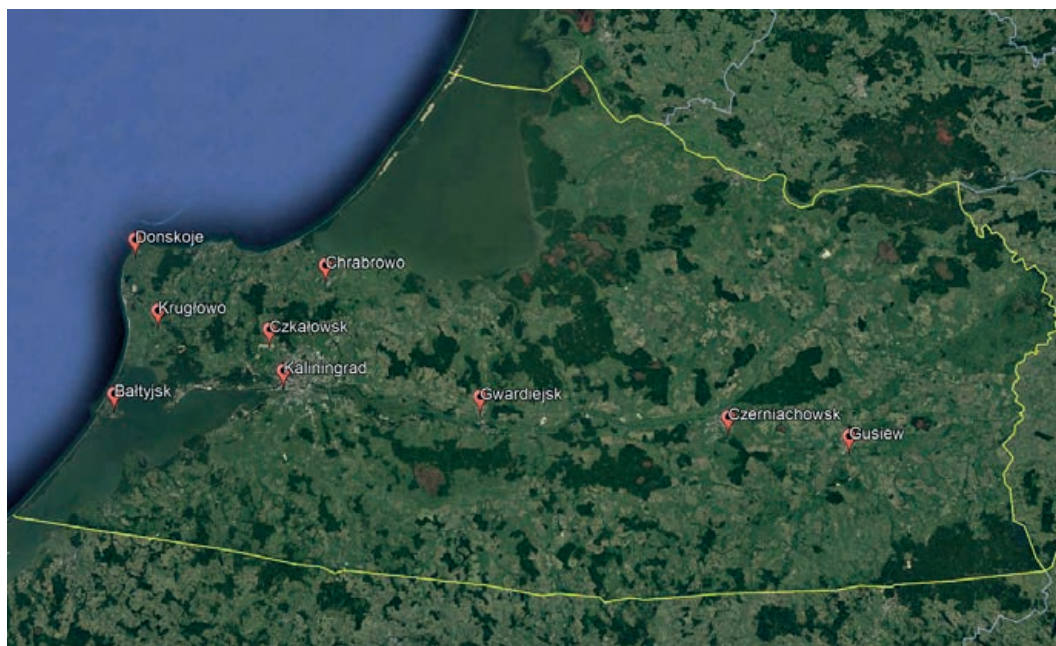


Rys. 2.2. Lokalizacja Bazy Marynarki Wojennej w Bałtyjsku [66].

Baza Marynarki Wojennej w obwodzie Leningradzkim rozlokowana jest w kilku portach. Jej główna baza znajduje się w miejscowości Kronsztad na wyspie Kotlin, w wewnętrznej części Zatoki Fińskiej. Jeden z portów znajduje się w mieście Wyborg w Zatoce Wyborskiej, kolejny w Łomonosowie na południe od Kronsztadu.



Rys. 2.3. Lokalizacja portów Marynarki Wojennej w Obwodzie Leningradzkim [66].



Rys. 2.4. Lokalizacja jednostek wojskowych FB w Obwodzie Kaliningradzkim [66].

2.3. Wyposażenie Floty Bałtyckiej

Wyposażenie dwóch baz Marynarki Wojennej Floty Bałtyckiej znacznie się od siebie różni. Okręty stacjonujące w Bałtyjsku są dużo większe od tych w bazie w Leningradzie, jak również sama ich liczba jest większa. W głównej bazie przeważają okręty bojowe, jest ich o 41 więcej niż w drugiej bazie, w której większy nacisk położono na jednostki hydrograficzne. Zestawienie liczby okrętów Floty Bałtyckiej przedstawia tabela 2.1. W tabeli 2.2. przybliżono rozmieszczenie okrętów bojowych w zależności od jego typu oraz rangi pomiędzy bazami FB. Ranga okrętu zależy od cech operacyjno-taktycznych danej jednostki pływającej, takich jak: rozmiar, zasięg, uzbrojenie czy rodzaj napędu. Na wyposażeniu Floty Bałtyckiej znajdują się 63 okręty bojowe, w tym 9 mniejszych łodzi patrolowych i przeciwdywersyjnych, które nie są w systemie rankingowym. Z zestawienia ukazanego w tabeli 2.2. można stwierdzić, że nie tylko większość jednostek bojowych znajduje się w Bałtyjsku, ale również to, że w bazie morskiej w Leningradzie nie występują okręty powyżej III rangi, z wyjątkiem jednego okrętu podwodnego FB, który stacjonuje w porcie w Kronsztadzie. W tabeli 2.3. ukazano jednostki pomocnicze FB, których celem jest wsparcie logistyczne okrętów bojowych w ich działaniu na morzu Bałtyckim. Ich całkowita liczba wynosi 41 okrętów, są to jednostki pełnomorskie. We flocie pomocniczej znajdują się również mniejsze łodzie, ale nie zostały one wliczone do tego zestawienia. Największe jednostki typu tankowce czy okręty transportowe przebywają w Bałtyjsku, co potwierdza fakt, że jest to główny port floty wojennej.

	Baza w Bałtyjsku	Baza w Leningradzie	Flota Bałtycka
Całkowita liczba okrętów	131	96	227
Okręty bojowe	52	11	63
Okręty pomocnicze	51	40	91
Okręty ratunkowo-poszukiwawcze	19	18	37
Statki do badań hydrograficznych	5	20	25
Okręty specjalnego przeznaczenia	4	7	11

Tabela 2.1. Liczba okrętów Floty Bałtyckiej (2020r.) [24].

Ranga okrętu	Typ okrętu bojowego	Baza w Bałtyjsku	Baza w Leningradzie	Liczba całkowita
I	Niszczyciel	1	-	1
II	Okręty strażnicze	2	-	11
	Korwety	4	-	
	Duże okręty desantowe	4	-	
	Duże okręty podwodne	-	1	
III	Małe okręty rakietowe	5	-	18
	Małe okręty rakietowe	4	-	
	Okręty do zwalczania okrętów podwodnych	3	3	
	Trałowiec Morski	1	-	
	Małe okręty desantowe	2	-	
IV	Krążowniki rakietowe	6	-	24
	Jednostki desantowe	8	-	
	Trałowce przybrzeżne	7	3	
-	Łódź przeciw dywersyjna	4	2	9
	Łódź patrolowa	1	2	
Liczba całkowita		52	11	63

Tabela 2.2. Liczba oraz typ okrętów bojowych Floty Bałtyckiej (2020r.) [24].

Morskie okręty pomocnicze	Baza w Bałtyjsku	Baza w Leningradzie
Holownik	2	3
Średni tankowiec	3	-
Mały tankowiec	2	2
Cysterna na wodę	1	-
Duży okręt transportowy	1	-
Średni okręt transportowy	2	-
Mały okręt transportowy	1	-
Transportowiec uzbrojenia	-	1
Pływający warsztat	3	-
Statek demagnetyzujący	4	1
Statek kontrolny pól fizycznych	1	3
Statek doświadczalny	-	2
Żuraw morski	2	2
Kablowiec	-	1
Lodołamacz	-	1
Łódź komunikacyjna (VIP)	1	-
Liczba całkowita	24	17

Tabela 2.3. Liczba oraz typ okrętów pomocniczych Floty Bałtyckiej (2020r.) [24]

2.4. Analiza Floty Bałtyckiej

Flota Bałtycka jest jednym z pięciu związków operacyjnych rosyjskiej marynarki wojennej oraz jedną z najpotężniejszych marynarek świata, w skład której wchodzi okręty wojenne, samoloty i śmigłowce oraz inne jednostki specjalistyczne. Flota ta została utworzona w 1703 roku i obejmuje swym zasięgiem Morze Bałtyckie oraz przylegające do niego obszary lądowe. Głównym zadaniem Floty Bałtyckiej jest ochrona granic i interesów Rosji oraz utrzymywanie bezpieczeństwa morskiego w regionie. Flota ta współpracuje również z innymi związkami operacyjnymi marynarki wojennej, takimi jak Flota Czarnomorska, Flota Oceanu Spokojnego i Floty Kaspijskiej. Flota Bałtycka może być wzmocniona przez okręty przerzucone z innych akwenów, takich jak Morze Czarne i Ocean Spokojny. Okręty dotrzeć mogą do Morza Bałtyckiego przez śródlądowe drogi wodne, które znajdują się w całości na terenie Rosji, nie tylko przez Cieśniny Duńskie, które są nietrudne do zablokowania [41].

Flota Bałtycka jest odpowiedzialna za prowadzenie misji zarówno w swoim obszarze odpowiedzialności (Area of Responsibility - AOR), jak i poza nim (rysunek 2.5). Obszar odpowiedzialności Floty Bałtyckiej obejmuje nie tylko Cieśninę Duńską, ale także dużą część Morza Północnego i Kanału La Manche (do cieśniny Dover). Formalnie Zatoka Botnicka jest również częścią AOR Floty Bałtyckiej, ale nie ma informacji o regularnej rosyjskiej obecności na morzu na północ od Wysp Alandzkich. Misje poza Cieśniną Duńską są ograniczone do większych okrętów nawodnych (głównie I lub II rangi), okrętów pomocniczych, szkoleniowych, wywiadowczych lub badawczych. Warto zauważyć, że większość działań Floty Bałtyckiej skupia się na Morzu Bałtyckim, szczególnie w pobliżu dwóch baz morskich. Odpowiedzialność terytorialna obu baz marynarki wojennej obejmuje także same bazy oraz wody przylegające do nich, w celu zapewnienia bezpiecznego wejścia i wyjścia dla okrętów marynarki wojennej [24].



Rys. 2.5. Rejon odpowiedzialności Floty Bałtyckiej

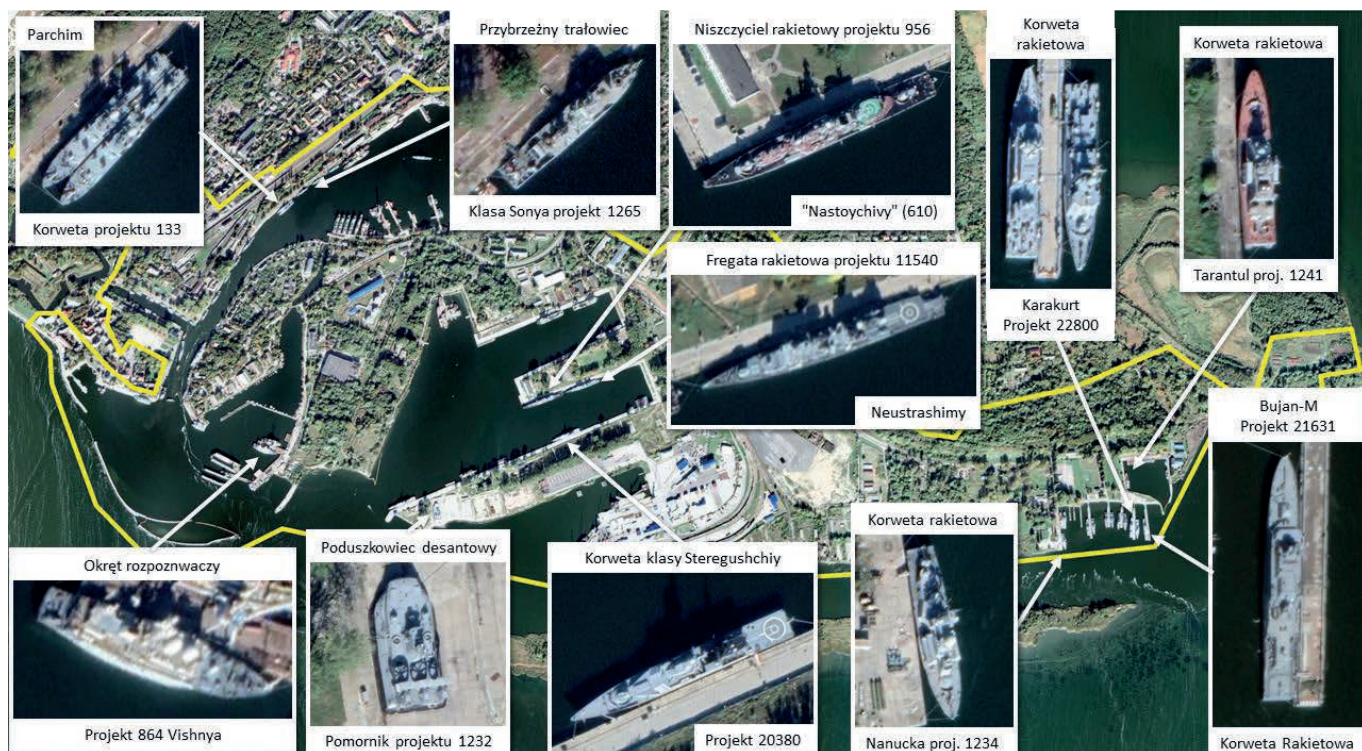
[źródło: opracowanie własne na podstawie: Kjellén J., The Russian Baltic Fleet - Organisation and role within the Armed Forces in 2020, FOI, 2021, s. 58].

2.4.1. Analiza Bazy Marynarki Wojennej w Bałtyjsku

128. Brygada Okrętów Nawodnych jest główną jednostką marynarki wojennej, której okręty są umieszczone w bazie Marynarki Wojennej w Bałtyjsku. Brygada została utworzona w 1950 roku i obecnie posiada siedem nowoczesnych okrętów, z których pięć było dostępnych do działań w 2020 roku. Wśród tych okrętów znajduje się niszczyciel rakietowy projektu 956 Nastoychivy, który jest flagowym okrętem Floty Bałtyckiej. Brygada ta posiada również dwie fregaty rakietowe projektu 11540, o nazwach Neustrashimyy i Jarosława Mudryego, która jest jednym z najczęściej używanych okrętów FB. Pozostałymi czterema okrętami w czynnej służbie, są korwety klasy Steregushchi proj. 20380, wymagają one częstych modernizacji. 71. Brygada Okrętów Desantowych jest kolejną jednostką działającą w ramach bazy MW w Bałtyjsku. W jej skład wchodzi dywizjon złożony z dwóch poduszkowców klasy Pomornik projektu 1232, czterech okrętów desantowych klasy Ropucha projektu 775 oraz dywizjonu okrętów desantowych klas Serna, Ondatra i Diugon. 36. Brygada Okrętów Rakietowych jest najstarszą, nadal operującą jednostką Floty Bałtyckiej. Obejmuje ona dwa dywizjony: dywizjon okrętów rakietowych klasy Nanucka, Karakurt (proj. 22800) i Bujan-M oraz dywizjon okrętów rakietowych z korwetami rakietowymi klasy Tarantul projektu 1241 [24]. Dwa okręty klasy Karakurt wyposażone są w systemy przeciwlotnicze Pancyer-M [40], natomiast Bujany-M projektu 21631 posiadają system Kalibr-NK uzbrojony w rakiey manewrujące 3M14, jak również w naddźwiękowe pociski przeciwokrętowe 3M55 Onik [18]. Korwety tego typu są w stanie operować nie tylko na wodach morskich ale również w ujściach rzek i ich żaglowych fragmentach, co czyni ją najmniejszą jednostką nawodną przenoszącą pociski manewrujące dalekiego zasięgu [37]. 4. Brygada Ochrony Obszaru Wodnego to jednostka Floty Bałtyckiej, która jest rozlokowana w bazie morskiej w Bałtyjsku. Jej wyposażenie to nowoczesne łodzie patrolowe klasy Mangust projektu 12150, trzy korwety ASW (anti-submarine warfare) Parchim projektu 133 oraz cztery przybrzeżne trałowce klasy Lida i Sonya. Ostatnimi czasy aktywność tej brygady koncentrowała się przede wszystkim na nadzorze podwodnym, ponieważ pewien element ich obowiązków został przekazany nowo utworzonym oddziałom żandarmerii morskiej w 2018 roku. Nowa jednostka wojskowa zapewnia bezpieczeństwo oraz odpowiada za operacje antydywersyjne [24].



Rys. 2.6. Strefy jednostek wojskowych zlokalizowanych w porcie w Bałtyjsku
[źródło: opracowanie własne na podstawie: Google Earth Pro, zobrazowanie z dnia 10.10.2022].



Rys. 2.7. Podstawowe okręty stacjonujące w porcie w Bałtyjsku
[źródło: opracowanie własne na podstawie: Google Earth Pro, zobrazowanie z dnia 10.10.2022].

[66]

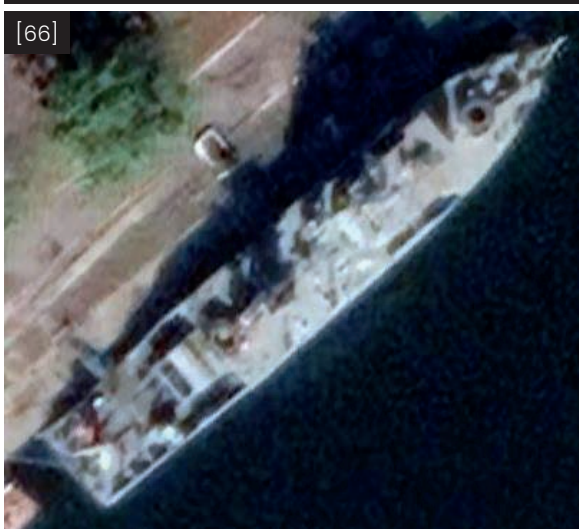


[51]



Korweta projektu 133 Parchim

[66]



[65]



Przybrzeżny trałowiec projektu 1265 Sonya

[66]



[9]



Niszczyciel rakietowy projektu 956

[66]



[46]



Fregata rakietowa projektu 11540 Neustrashimy

[66]



[46]



Korweta rakietowa projektu 22800 Karakurt

[66]

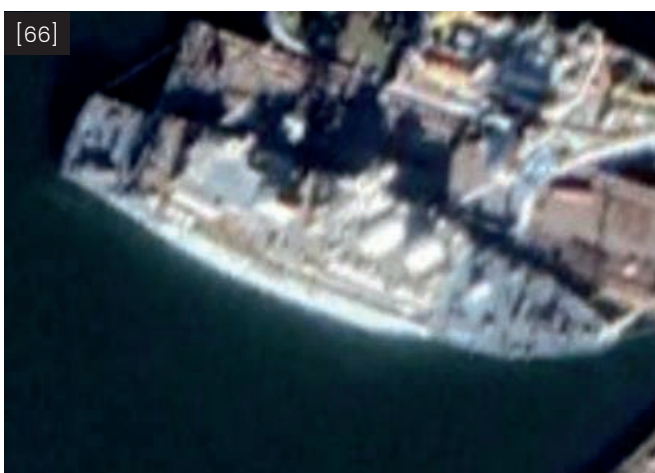


[5]



Korweta rakietowa projektu 1241 Tarantul

[66]



[16]



Okręt rozpoznawczy projektu 864 Vishnya



[51]



[17]

Poduszkowiec desantowy projektu 1232 Pomornik



[66]



[46]

Korweta projektu 20380 Steregushchiy

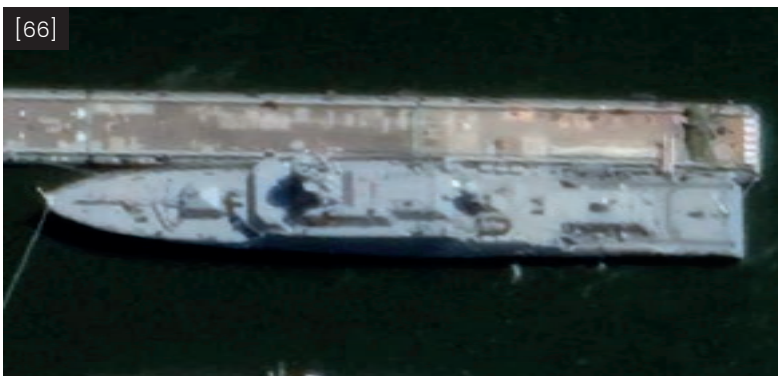


[66]



[46]

Korweta rakietowa projektu 1234 Nanuka

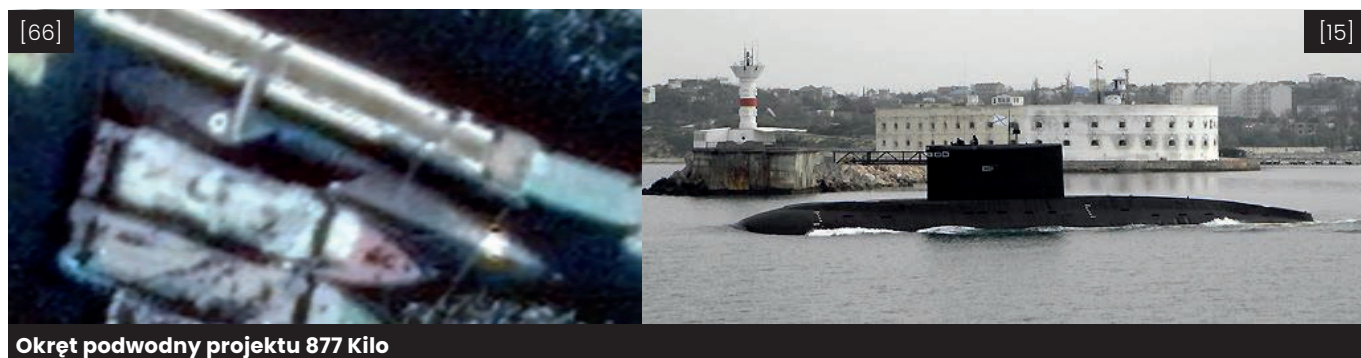


[66]



[46]

Korweta Rakietowa projektu 21631 Bujan-M



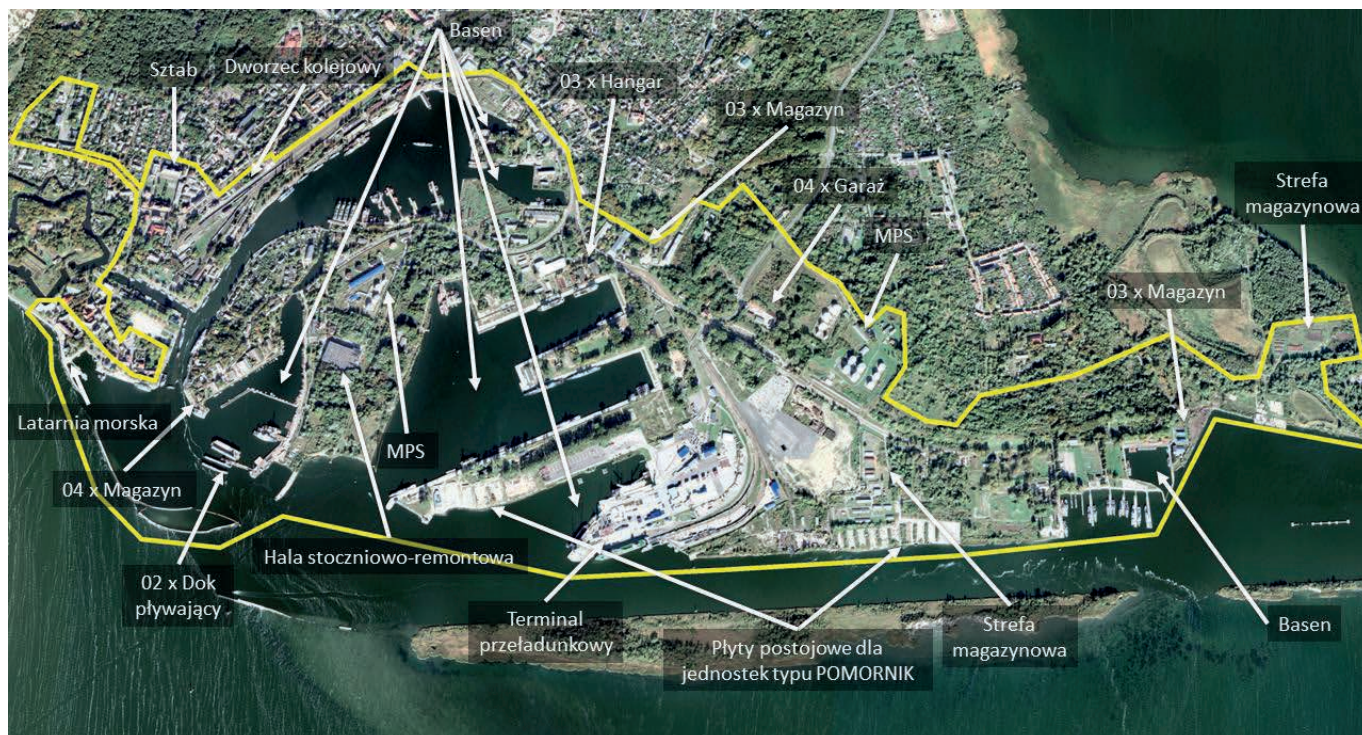
Okręt podwodny projektu 877 Kilo



Oceanograficzny statek badawczy projektu 852 „Admirał Włodimirski”

Tabela 2.4. Zestawienie rozpoznanych okrętów na zobrazowaniu z Google Earth Pro ze zdjęciami ze źródeł OSINT [źródło: opracowanie własne].

Infrastruktura wojskowa w obwodzie kaliningradzkim, w tym w bazie morskiej w Bałtyjsku, nie była modernizowana od czasów sowieckich. W latach 90-tych Siły Zbrojne Federacji Rosyjskiej mogły rozmieścić tam kontyngent wojskowy liczący 100 tys. żołnierzy. W ciągu następnej dekady ta liczba zmniejszyła się znacznie do poziomu 25 tys. Wiązało się to z uzawodowieniem armii. Zwiększone potrzeby żołnierzy do lepszych warunków życia przyczyniło się w latach 2017–2018 do rozpoczęcia prac nad modernizacją infrastruktury wojskowej [11]. Niektóre nabrzeża w bazie są przechwytywane przez cywilne firmy, jak choćby terminal przeładunkowy znajdujący się w środkowej części portu, który rozdziela bazę na dwie części. Istotnym elementem infrastruktury jest część stoczniowo-remontowa włącznie z dokami pływającymi [14].



Rys. 2.8. Elementy infrastruktury Bazy Morskiej FB w Bałtyjsku
[źródło: opracowanie własne na podstawie: Google Earth Pro, zobrazowanie z dnia 10.10.2022].

2.4.2. Analiza Bazy Marynarki Wojennej w Kronsztadzie

Infrastruktura wojskowa w obwodzie kaliningradzkim, w tym w bazie morskiej w Bałtyjsku, nie była modernizowana od czasów sowieckich. W latach 90-tych Siły Zbrojne Federacji Rosyjskiej mogły rozmieścić tam kontyngent wojskowy liczący 100 tys. żołnierzy. W ciągu następnej dekady ta liczba zmniejszyła się znacznie do poziomu 25 tys. Wiązało się to z uzawodowieniem armii. Zwiększone potrzeby żołnierzy do lepszych warunków życia przyczyniło się w latach 2017–2018 do rozpoczęcia prac nad modernizacją infrastruktury wojskowej [11]. Niektóre nabrzeża w bazie są przechwytywane przez cywilne firmy, jak choćby terminal przeładunkowy znajdujący się w środkowej części portu, który rozdziela bazę na dwie części. Istotnym elementem infrastruktury jest część stocznio-remontowa włącznie z dokami pływającymi [14].



Rys. 2.9. Strefy jednostek wojskowych zlokalizowanych w porcie w Kronsztadzie
[źródło: opracowanie własne na podstawie: Google Earth Pro, zobrazowanie z dnia 14.08.2022].

Przewiduje się, że w przyszłości Flota Bałtycka może otrzymać nowoczesne okręty podwodne w postaci projektu 636.3 (kod NATO: Improved-Kilo) klasy Varshavyanka. Jednym z nich może być okręt podwodny „Ałrosa”, który jest jedyną jednostką tego typu z pędnikiem strugowodnym zamiast śruby, skutkuje to większym wyciszeniem. Okręty te są dłuższe o niecałe 3 m od okrętów projektu 877 „Paltus” i dodatkowo wyposażone w system rakietowy „Kalibr”. Umożliwia to neutralizację celów nawodnych przy użyciu rakiet przeciwokrętowych 3M54 o zasięgu ponad 200 km oraz celów lądowych pociskami 3M14 o zasięgu ponad 2000 km [15]. Istnieje kilka powodów, dla których obecność okrętów podwodnych we Flocie Bałtyckiej jest niewystarczająca. Pierwszym z nich jest fakt, że Flota Czarnomorska nadała priorytet modernizacji po 2014 roku, czego efektem było dostarczenie w latach 2014–2016 sześciu okrętów podwodnych projektu 636.3 Varshavyanka. Drugim priorytetem modernizacyjnym była dostawa nowych okrętów podwodnych dla Floty Pacyfiku i Floty Północnej jako dodatkowego wsparcia dla ich sił podwodnych. Trzeci powód to niski priorytet Floty Bałtyckiej jako floty szkoleniowej. Rosyjskie dowództwo wojskowe miało niewielką motywację do przeznaczania środków na rozwój zdolności Floty Bałtyckiej, biorąc pod uwagę słabość innych regionalnych marynarek wojennych. Siły podwodne polskiej Marynarki Wojennej są na skraju załamania i istnieją realne obawy, że Warszawa może wkrótce całkowicie stracić tę zdolność. Również flota nawodna jest przestarzała i nie jest w stanie skutecznie sprostać wyzwaniom

stawianym przez flotę oraz jej platformy morskie i lądowe [36].



Rys. 2.10. Okrećy stacjonujące w porcie w Kronsztadzie
[źródło: opracowanie własne na podstawie: Google Earth Pro, zobrazowanie z dnia 14.08.2022].

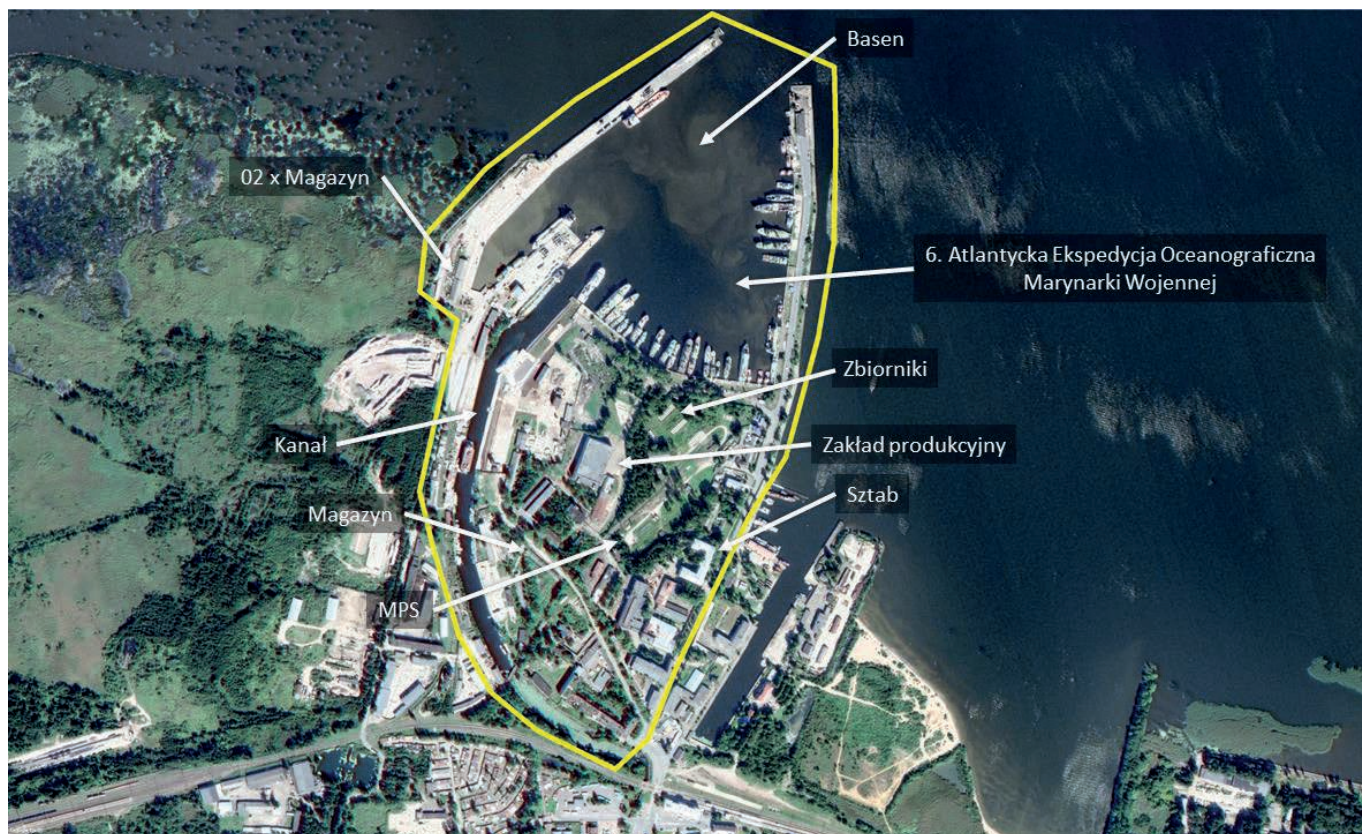


Rys. 2.11. Elementy infrastruktury Bazy Morskiej FB w Kronsztadzie
[źródło: opracowanie własne na podstawie: Google Earth Pro, zobrazowanie z dnia 14.08.2022], zobrazowanie z dnia 10.10.2022].

2.4.3. Analiza portu w Łomonosowie

W porcie w Łomonosowie znajduje się 6. Atlantycka Ekspedycja Oceanograficzna Marynarki Wojennej. Wykorzystuje ona oceanograficzne okręty badawcze oraz większe okręty do badań hydrograficznych m.in. drugą pod względem wyporności jednostkę pływającą w składzie Floty Bałtyckiej – okręt badań oceanograficznych *Admirał Władimirski* [24]. Na rysunku 2.10. najprawdopodobniej tymczasowo znajduje się w porcie w Kronsztadzie. Okręt ten może być zdolny do prowadzenia działań rozpoznawczych i wywiadowczych, dlatego jego poczynania są dokładnie śledzone [33]. Mniejsze jednostki eksploatowane w bazie to chociażby kuter hydrograficzny „*Antolij Kniaziew*” projektu 19920 Baklan [39]. Wyposażone są w wielowieżkowe echosondy do wykonywania precyzyjnych map dna morskiego, które są niezastąpione w prowadzeniu operacji przez okrętowe siły przeciwminowe [13].

6. AEO operuje na całym obszarze odpowiedzialności Floty Bałtyckiej dodatkowo realizuje również dłuższe oceanograficzne ekspedycje badawcze. Jej głównym zadaniem jest prowadzenie badań dna morskiego i pomiary właściwości morza, takich jak prądy, zasolenie itp. Ma to na celu nie tylko zapewnienie bezpieczeństwa żeglugi morskiej, ale również aktualizacji map morskich, które są niezbędne do prowadzenia działań na morzu i w środowisku przybrzeżnym [24].



Rys. 2.12. Elementy infrastruktury Bazy Morskiej FB w Łomonosowie
[źródło: opracowanie własne na podstawie: Google Earth Pro, zobrazowanie z dnia 14.08.2022].

2.4.4. Analiza portu w Wyborgu

W Wyborgu stacjonuje 42. Hydrograficzna jednostka badawcza, która ma podobny zakres zadań tak jak 6. AOE, ale wykorzystuje do tego mniejsze statki przeznaczone do badań hydrograficznych. Jest odpowiedzialna za badania północnej i zachodniej części Zatoki Fińskiej oraz w akwenie w pobliżu bazy marynarki wojennej [24].

Do przeprowadzenia analizy potencjału Floty Bałtyckiej na podstawie OSINT wykorzystywałem głównie artykuły internetowe ze stron zajmujących się tematyką militarno-wojskową, raporty wykonane przez analityków oraz bazowałem na zobrazowaniach z satelity WorldView-3 z aplikacji Google Earth Pro. Na podstawie tych materiałów zdobyłem informacje na temat struktury organizacyjnej FB, lokalizacji poszczególnych jednostek wojskowych wchodzących w skład FB i ich rozwoju. W oparciu o dane z otwartych źródeł dotyczących specyfikacji okrętów, jak ich długość, szerokość oraz wygląd, byłem w stanie zidentyfikować stacjonujące jednostki w bazach morskich na zobrazowaniach satelitarnych.



Rys. 2.13. Elementy infrastruktury Bazy Morskiej FB w Wyborgu
[źródło: opracowanie własne na podstawie: Google Earth Pro, zobrazowanie z dnia 19.07.2020].

3. Cyfrowe przetwarzanie obrazowań EO i SAR

W tej części pracy skupiono się na cyfrowym przetworzeniu danych elektrooptycznych i radarowych opisanych w podrozdziale 1.4. Celem takiego działania jest poprawa wizualna obrazowań, która przyczyni się do ułatwienia oraz przyspieszenia procesu ich interpretacji oraz analizy sprzętu wojskowego znajdującego się w obszarze zainteresowania. W pracy wykonam pansharpening obrazowania elektrooptycznego przy użyciu obrazu panchromatycznego trzema metodami. Obraz radarowy zostanie poddany korekcji radiometrycznej oraz odsumiony trzema filtrami. Przetworzone obrazy zostaną ze sobą zintegrowane przy użyciu funkcji Layer Stacking oraz jednej z metod pansharpeningu. Do przeprowadzenia tych operacji wykorzystam oprogramowanie ArcGis Pro, SNAP i ENVI.

Fotointerpretacja to proces, który opiera się na bezpośrednim odczytywaniu obiektów oraz zjawisk zarejestrowanych na zdjęciu, jak i wykorzystaniu ich cech pośrednich, takich jak cechy ilościowe i jakościowe, które nie są na nim wprost przedstawione. Fotointerpretacja związana jest z percepcją wzrokową obserwatora, która umożliwia wyobrażenie o obiektach i zjawiskach dostrzeżonych na obrazie. Szczególnie ważne jest widzenie stereoskopowe, które polega na postrzeganiu przestrzennym i ułatwia rozpoznawanie niektórych obiektów. Obiekty mogą mieć cechy naturalne lub być pochodzenia antropogenicznego, a także składać się z punktów, linii lub obszarów. Mogą również różnić się pod względem sposobu wyglądu na zdjęciu czy obrazowaniu, ponieważ jest to zależne od tego, jak odbijają lub emitują promieniowanie [21].

Cyfrowe przetwarzanie obrazów (CPO) to dziedzina, która zajmuje się analizowaniem, modyfikowaniem i generowaniem obrazów cyfrowych. Wykorzystuje algorytmy i metody matematyczne do przetwarzania obrazów cyfrowych, takie jak filtrowanie, kompresja, analiza, rozpoznawanie obiektów, automatyczne klasyfikacje oraz wiele innych. CPO jest stosowane w wielu różnych dziedzinach, takich jak medycyna, przemysł, bezpieczeństwo, geografia,

38

telekomunikacja, robotyka, automatyka, a także w komputerowej grafice i animacji. Przykładowe zastosowania:

- Analiza obrazów medycznych, takich jak tomografia komputerowa i rezonans magnetyczny, do diagnostyki i planowania leczenia.
- Opracowywanie algorytmów do automatycznej detekcji i analizy obiektów na zdjęciach satelitarnych i z lotu ptaka.
- Zwiększanie jakości i rozdzielczości obrazów cyfrowych przy użyciu technik, takich jak pansharpening.
- Tworzenie i edycja grafiki 3D i animacji komputerowych.
- Analiza obrazów wideo i detekcja ruchu do zastosowań w bezpieczeństwie i automatyce.

Cyfrowe przetwarzanie obrazów zależy od różnych metod matematycznych, takich jak

transformacje Fouriera, transformacje wałkowe, filtrowanie i analiza statystyczna. Te metody pozwalają na przetwarzanie obrazów w celu wykrywania i analizowania określonych cech, takich jak kontury, tekstury, kolory i rozmiary obiektów. Są również ważnym narzędziem w automatycznej klasyfikacji obrazów, która polega na automatycznym rozpoznawaniu i oznaczaniu obiektów na obrazie. Jest to ważne w różnych dziedzinach, m.in.: analizie obrazów satelitarnych, bezpieczeństwie, medycynie i rolnictwie. Umożliwiają kompresję obrazów, która polega na redukcji ilości danych potrzebnych do reprezentowania obrazu, bez znacznego pogorszenia jakości obrazu. Kompresja obrazów jest ważna w przypadku przesyłania obrazów przez Internet lub przechowywania ich na nośnikach danych o ograniczonej pojemności [53]. Cyfrowe przetwarzanie obrazów jest dziedziną, która stale rozwija się dzięki postępowi technologicznemu i rosnącemu zapotrzebowaniu na automatyzację i analizę obrazów cyfrowych w różnych dziedzinach. Nowe metody i algorytmy są ciągle opracowywane, aby poprawić jakość i efektywność przetwarzania obrazów cyfrowych, co pozwala na rozwijanie nowych aplikacji i zastosowań w różnych dziedzinach.

Jakie przetworzenia należy wykonać na zobrazowaniach optycznych i radarowych, aby poprawić ich potencjał interpretacyjny?

W celu poprawy możliwości interpretacyjnych danych EO i SAR można wykonać łączenie zdjęć wielospektralnych ze zdjęciami panchromatycznymi w celu poprawy rozdzielczości przestrzennej obrazu MS. Natomiast zdjęcia radarowe mogą zostać poddane filtracji.

3.1. Pansharpening zobrazowania EO

Pansharpening jest procesem, który łączy wysoką rozdzielczość przestrzenną obrazu panchromatycznego z niższą rozdzielczością przestrzenną, ale wyższą rozdzielczością spektralną obrazu wielospektralnego. Celem wyostrzania jest uzyskanie nowego obrazu o poprawionej rozdzielczości przestrzennej i jakości kolorów, przy zachowaniu oryginalnej informacji spektralnej obrazu wielospektralnego. Istnieje kilka metod wyostrzania obrazu, z których każda ma swoje mocne strony i ograniczenia [49]. Najczęściej stosowane metody to: Brovey, IHS, Esri oraz metoda PCA, która polega na przekształceniu obrazu wielospektralnego w nową przestrzeń barw zdefiniowaną przez główne składowe obrazu, a następnie połączeniu go z obrazem panchromatycznym za pomocą średniej ważonej [35]. Należy zauważyć, że wybór metody pansharpeningu zależy od charakterystyki obrazów i pożądaných rezultatów. Każda metoda może dawać inne rezultaty, dlatego zaleca się wypróbowanie różnych metod i ocenę ich działania przy użyciu odpowiednich metryk jakości.

Do przeprowadzenia pansharpeningu zobrazowania satelitarnego pozyskanego z satelity Pleiades 1A trzema wybranymi metodami zostało wykorzystane narzędzie Utwórz wyostrzony panchromatycznie zestaw danych rastrowych z programu ArcGis Pro oraz zobrazowanie panchromatyczne pozyskane również z tej samej satelity.

3.1.1. Pansharpening metodą IHS

Metoda wyostrażania panchromatycznego IHS (Intensity, Hue, Saturation) rozdziela obraz wielospektralny RGB na trzy składowe: intensywność, barwę i nasycenie. Intensywność niskiej rozdzielczości jest zastępowana intensywnością obrazu panchromatycznego wysokiej rozdzielczości, natomiast składowe barwy i nasycenia są zachowywane z oryginalnego obrazu wielospektralnego. Jeśli obraz wielospektralny zawiera pasmo podczerwieni, jest ono uwzględniane poprzez odjęcie go przy użyciu współczynnika wagowego. Etapy przetworzenia obrazowania metodą IHS:

1. Przeglądanie obrazu barwnego do rozdzielczości obrazu panchromatycznego;
2. Konwersja przestrzeni barwnej RGB do IHS;
3. Zamiana składowej I (Intensity) obrazu wielospektralnego na składową obrazu panchromatycznego;
4. Transformacja wsteczna z IHS na RGB w wyższej rozdzielczości

Rysunek 3.1. to wynik przeprowadzenia operacji pansharpeningu metodą IHS na obrazowaniu ukazanym na rysunku 1.1.



Rys. 3.1. Zobrazowanie EO po operacji pansharpeningu metodą IHS [źródło: opracowanie własne].

3.1.2. Pansharpening metodą Brovey'a

Transformacja Brovey'a oparta jest na modelowaniu spektralnym i przeznaczona jest do podnoszenia wizualnego kontrastu w niskich oraz wysokich końcach histogramu danego obrazu. W tym celu stosuje procedurę mnożenia każdego resamplowanego, wielospektralnego piksela przez stosunek intensywności odpowiadającego mu piksela obrazu panchromatycznego do sumy wszystkich intensywności wielospektralnych. Metoda Brovey'a w ogólnym równaniu stosuje jako kanały wejściowe pasmo czerwone, zielone i niebieskie oraz kanał panchromatyczny do uzyskania nowych kanałów RGB. Przykład takiego równania:

$$R_{\text{wyjściowy}} = \frac{R_{\text{wejściowy}}}{[(B_{\text{wejściowy}} + G_{\text{wejściowy}} + R_{\text{wejściowy}}) * PAN]} \quad (3.1)$$

gdzie:

R – kanał czerwony;

G – kanał zielony;

B – kanał niebieski;

PAN – kanał panchromatyczny.

[57]



Rys. 3.2. Zobrazowanie EO po operacji pansharpeningu metodą Brovey'a [źródło: opracowanie własne].

3.1.3. Pansharpening metodą Esri

Transformacja Esri pansharpening to metoda oparta na algorytmie Spectral Angle Mapper i wykorzystuje średnią ważoną oraz dodatkowe pasmo bliskiej podczerwieni do tworzenia swoich pasm wyjściowych. Wynik średniej ważonej jest używany do tworzenia wartości dostosowania, która jest następnie używana w obliczaniu wartości wyjściowych, na przykład:

$$ADJ = \text{Zdjecie panchromatyczne} - WA$$

$$\begin{aligned} E_{\text{wyjściowy}} &= R + ADJ \\ G_{\text{wyjściowy}} &= G + ADJ \\ B_{\text{wyjściowy}} &= B + ADJ \\ NIR_{\text{wyjściowy}} &= NI + ADJ \end{aligned} \quad (3.2)$$

gdzie:

ADJ – wartość dostosowania;

WA – średnia ważona;

R – kanał czerwony;

G – kanał zielony;

B – kanał niebieski;

NIR – kanał bliskiej podczerwieni.

Wagi dla pasm wielospektralnych zależą od pokrywania się krzywych czułości spektralnej pasm wielospektralnych z pasmem panchromatycznym. Wagi są względne i zostaną znormalizowane, gdy zostaną użyte. Pasma wielospektralne o największym pokryciu z pasmem panchromatycznym powinny otrzymać największą wagę. Pasma wielospektralne, które w ogóle nie pokrywa się z pasmem panchromatycznym, powinny otrzymać wagę 0. Zmieniając wartość wagi dla bliskiej podczerwieni, można sprawić, że zieleń będzie bardziej lub mniej żywa [57]. Rysunek 3.3. przedstawia zobrazowanie wynikowe portu w Bałtyjsku po wykonaniu pansharpeningu metodą Esri.



Rys. 3.3. Zobrazowanie EO po operacji pansharpeningu metodą Esri [źródło: opracowanie własne].

3.2. Przetworzenie wstępne zobrazowania SAR

Wstępnym etapem w przypadku przetworzenia danych radarowych jest korekcja radiometryczna, której celem jest transformacja zarejestrowanych wartości jasności pikseli (DN) na jednostki odbicia spektralnego oraz usunięcie zakłóceń występujących na zdjęciach. Przyczyną takich zakłóceń jest negatywny wpływ atmosfery np. w postaci zachmurzenia występującego nad rejestrowanym obszarem, jak również pojawiające się cienie budynków czy gór [23]. Istotą tego przetworzenia jest osiągnięcie prawidłowej radiometrii obrazu, który wyraża prawdziwe właściwości obiektów znajdujących się na powierzchni Ziemi bez elementów, które negatywnie wpływają na rejestrację danych satelitarnych. Korekcja radiometryczna dzieli się na cztery główne etapy:

1. Usunięcie dystorsji radiometrycznych;
2. Kalibrację detektorów;
3. Korekcję atmosferyczną;
4. Korekcję słoneczną i topograficzną.

W pierwszym etapie wyeliminowana zostaje dystorsja radiometryczna wynikająca z błędów powstałych podczas transmisji danych lub niejednakowej funkcji odpowiedzialnej za przenoszenie sygnału. Dystorsja może mieć charakter przypadkowy i być przedstawiona jako tzw. błędne piksele, ale również może mieć cechę systematyczną, której efektem jest prążkowanie. W drugiej części korekcji radiometrycznej konwertowane są wartości radiometryczne piksela (DN) pozyskane przez detektory, na radiancję spektralną. Korekcja atmosferyczna charakteryzuje oddziaływanie atmosfery i aerozoli, które są w niej zawarte na sygnał, który dotarł do detektorów znajdujących się na platformie satelitarnej. Wpływ atmosfery na poprawne przedstawienie obrazu powierzchni Ziemi jest bardzo duże, ponieważ

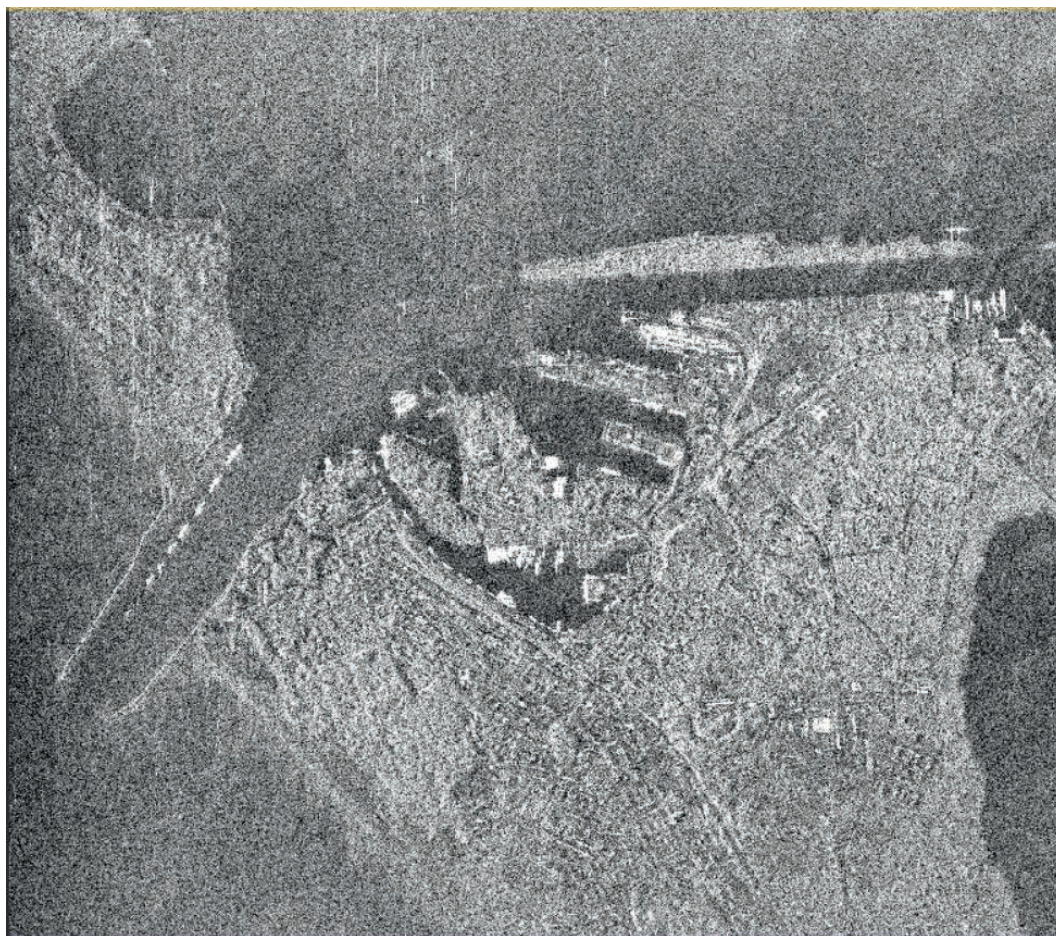
wiele procesów w niej zachodzących wpływa negatywnie na promieniowanie elektromagnetyczne docierające do sensora. Dlatego istotą tej korekcji jest całkowite wyeliminowanie wpływu atmosfery, bądź jego znaczące ograniczenie. Celem ostatniego etapu jest uwzględnienie wpływu położenia Słońca w trakcie wykonywania zobrazowania, zmienności jego oświetlenia podczas trwania całego lotu satelity oraz interakcji, jaka zachodzi między kątem wychylenia sensora, a kątem padania promieni słonecznych. Natomiast korekcja topograficzna dotyczy negatywnego działania deniwelacji i zacienienia terenu na obrazie [45].

W pracy do przeprowadzenia korekcji radiometrycznej zobrazowania radarowego rys. 1.3. wykorzystam program SNAP. Przy jego użyciu przeprowadzę kalibrację radiometryczną oraz korekcję geometryczną i topograficzną.

3.2.1. Kalibracja radiometryczna

Przed przystąpieniem do kalibracji radiometrycznej przeprowadzono przetwarzanie wielopunktowe zobrazowania radarowego przy użyciu funkcji Multilooking w programie SNAP. Operacja ta redukuje szumy na obrazie radarowym zwane plamką, działa poprzez uśrednienie kilku obrazów tego samego obszaru. Osiąga się to poprzez ponowne przepróbkowanie obrazu. Występują dwie metody tej operacji, pierwsza z nich to space-domain, a druga to frequency-domain, która wykorzystuje zakres pasma subspektralnego. W tym przypadku mamy do czynienia z metodą space-domain, która uśrednia pojedynczy obraz [68]. Parametrem wykorzystanym do tego przetworzenia to pasmo intensywności VV obrazu źródłowego.

Po przetworzeniu wielopunktowym, wykonano kalibrację radiometryczną narzędziem Calibrate. Operacja ta usuwa czynniki związane z geometrią obrazowania i ułatwia zestawienie ze sobą danych radarowych pozyskanych z różnych satelitów, różnymi trybami rejestrowania obrazu oraz w innym czasie. Celem kalibracji jest dostarczenie obrazu, w którym cyfrowe wartości pikseli będą bezpośrednio przekonwertowane do współczynnika rozpraszania wstecznego, który wyrażany jest przy użyciu Beta Nought, Sigma Nought i Gamma Nought [68]. W parametrach procesu kalibracji zastosowałem pasmo intensywności VV obrazu SAR oraz współczynnik rozproszenia wstecznego wyrażony jest jako Sigma Nought.



Rys. 3.4. Wynik przeprowadzonej kalibracji radiometrycznej [źródło: opracowanie własne].

3.2.2. Korekcja geometryczna i topograficzna

W kolejnym etapie poprawy wizualnej zobrazowania radarowego przeprowadzono korekcje geometryczną i topograficzną. Do tego celu zastosowano narzędzie Range-Doppler Terrain Correction. Dane obrazowe, które nie znajdują się bezpośrednio w miejscu nadiru sensora są obarczone pewnymi zniekształceniami. Korekcja ma za zadanie zniwelować, w jak największym stopniu deformacje, w taki sposób, aby geometryczna reprezentacja obrazu była jak najbardziej porównywalna do rzeczywistego świata. Algorytm korekcji terenu Range-Doppler implementuje metodę ortorektyfikacji Range Doppler przeznaczoną dla geokodowania danych SAR z pojedynczej geometrii obrazu rastrowego 2D. Metoda ta korzysta z informacji znajdujących się w metadanych dotyczących orbity, czasu pozyskania obrazu oraz z parametrów konwersji zakresu nachylenia sensora względem gruntu wraz z danymi referencyjnymi NMT w celu uzyskania dokładnych informacji o geolokalizacji zdjęcia. Obsługiwane dane NMT są tylko o współrzędnych geograficznych odniesionych do globalnej elipsoidy geodezyjnej WGS 84 wraz z wysokościami podanymi w metrach. Do wyboru jest wiele numerycznych modeli terenu, m.in.: ACE2 5Min, ACE 30, ASTER 1Sec, CFEM, Copernicus30m i SRTM 1sec. Domyślny rozstaw pikseli obliczony jest przy użyciu parametrów opisanych w metadanych, ale użytkownik sam może określić rozstaw pikseli dla

ortorektifikowanego obrazu. Normalizacja radiometryczna, jaka jest tutaj zastosowana, przedstawia się w następującym wzorze:

$$\sigma_{NORLIM}^0 = \sigma_{Elipsoid}^0 \frac{\sin \theta_{NMT}}{\sin \theta_{Elipsoid}} \quad (3.3)$$

gdzie:

σ^0 – pasmo rzeczywiste;

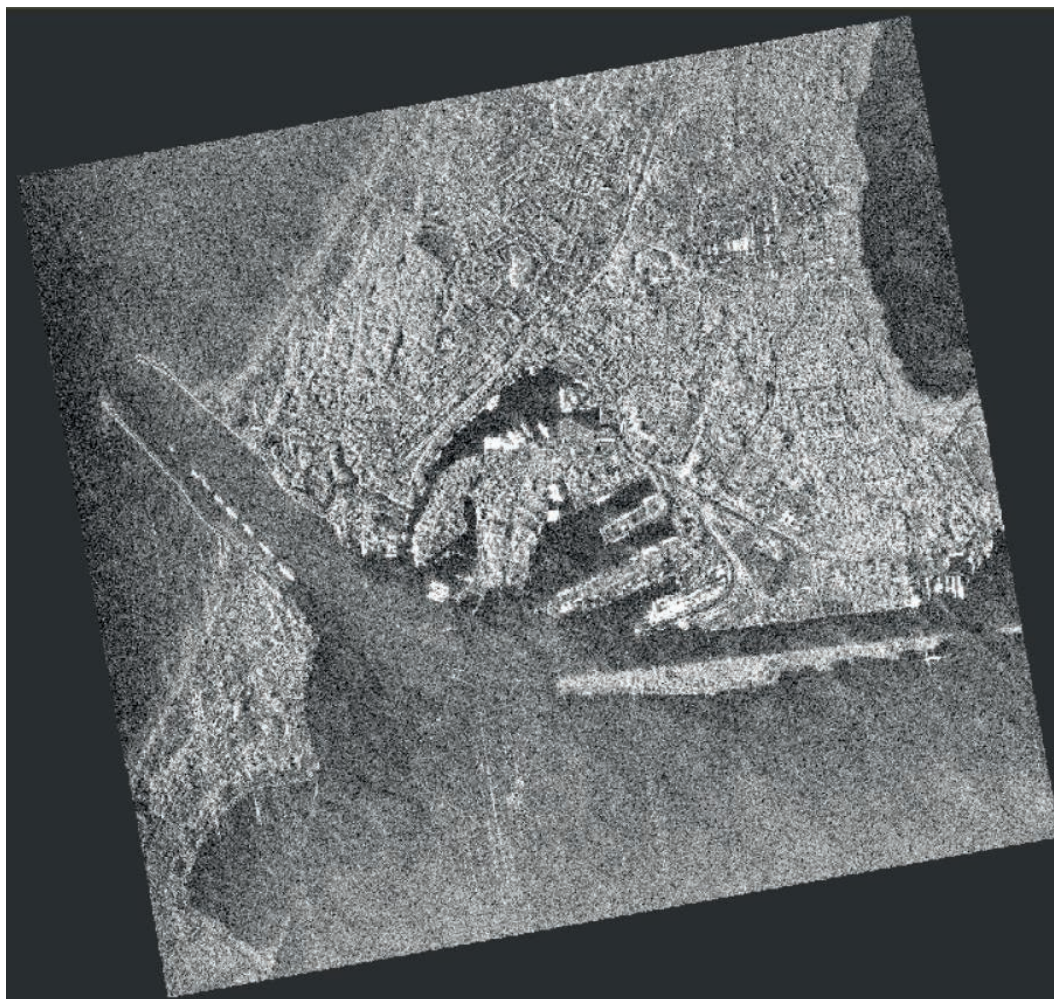
θ_{NMT} – lokalny kąt padania rzutowany na płaszczyznę zasięgu;

$\sigma_{Elipsoid}$ – kąt padania od punktów wiązania produktu źródłowego.

[68]

Parametry wykorzystane do przeprowadzenia kalibracji:

- Pasmo obrazu źródłowego: Intensywność VV;
- NMT: SRTM 3sec;
- Metoda interpolacji NMT: Bilinearna;
- Metoda interpolacji obrazu: Bilinearna;
- Odstęp między pikselami: 0,78 x 0,78 (m);
- Układ odniesienia przy użyciu współrzędnych (CRS): UTM/WGS 84;
- Ortorektyfikacja bez normalizacji radiometrycznej.



Rys. 3.5. Wynik korekcji geometrycznej i topograficznej [źródło: opracowanie własne].

Przeprowadzenie korekcji radiometrycznej było niezbędnym etapem przetwarzania zobrazowania SAR, ponieważ bez tej operacji nie będą możliwe dalsze etapy pracy poprawiające interpretacyjność danych satelitarnych. Korekcja umożliwiła umiejscowienie danych radarowych w tym samym układzie odniesienia, w którym są dane elektrooptyczne. Dzięki temu wykonanie integracji danych pochodzących z różnych sensorów jest jak najbardziej wykonalne. Dodatkowo przed integracją danych możliwa do przeprowadzenia jest filtracja obrazu radarowego.

3.3. Filtracja przetworzonego zobrazowania SAR

W systemach rejestrujących obraz, takich jak SAR, fale wysłane w kierunku Ziemi są rozproszone przez wiele obiektów znajdujących się na powierzchni. Przyczynia się to do interferencji fal, czyli zjawiska, w którym w wyniku nakładania się dwóch lub większej liczby fal powstaje nowy rozkład amplitudy fali. Interferencje mogą być konstruktywne, jak również ich wpływ może okazać się destrukcyjny na wynikowy obraz, który zniekształcony będzie przez punktowy szum zwany plamką (ang., speckle). Błąd tego rodzaju

ma właściwość szumu losowego oraz multiplikatywnego, gdzie jego największy wpływ występuje w miejscach o dużej intensywności. Najczęściej stosowanymi metodami w przypadku takich zniekształceń obrazu są filtry oparte na statystyce, m.in.: Kuan, Lee, Frost i Gamma, ponieważ są bardzo wydajne w redukcji szumu, ale ich minusem jest skłonność do deformacji krawędzi [47].

Filtracja zobrazowania radarowego to proces polegający na usunięciu niepożądanych elementów lub zakłóceń z obrazu radarowego, takich jak szum, odbicia od chmur, czy zakłócenia atmosferyczne. Filtracja pozwala na poprawę jakości obrazu i ułatwienie jego interpretacji. Istnieje wiele różnych metod filtracji obrazu, takich jak:

- Filtracja medianowa: polega na usunięciu szumu, poprzez zastąpienie każdego piksela wartością mediany z otaczającego go obszaru.
- Filtracja adaptacyjna: polega na dostosowaniu parametrów filtru do lokalnych warunków obrazu.
- Filtracja kontekstowa: polega na uwzględnieniu informacji o otoczeniu danego piksela podczas procesu filtracji.
- Filtracja wykorzystująca transformację waveletową: polega na przekształceniu obrazu do domeny waveletów, gdzie szum i inne zakłócenia mają większą energię w wysokich częstotliwościach, a ważne informacje w niższych częstotliwościach. Pozwala to na usunięcie szumu przez usunięcie wysokich częstotliwości.
- Filtracja wykorzystująca filtr morfologiczny: polega na zastosowaniu filtru morfologicznego do usunięcia zakłóceń z obrazu, takich jak obiekty ruchome czy chmury.

Należy również zauważyć, że niektóre z filtrów mogą być również łączone w celu osiągnięcia lepszego rezultatu w filtracji obrazu, na przykład zastosowanie kombinacji filtracji medianowej i adaptacyjnej może być wykorzystane do usunięcia szumu i zachowania krawędzi, a zastosowanie kombinacji filtracji morfologicznej i falkowej może być wykorzystane do usunięcia małych błędów przy zachowaniu szczegółów obrazu. Dodatkowo wybór metody filtracji zależy również od rodzaju danych, rozdzielczości przestrzennej oraz charakterystyki spektralnej obrazu. Na przykład, jeśli obraz jest wielospektralny, pomocne może być zastosowanie metod filtrowania specyficznych dla każdego pasma spektralnego, takich jak inny filtr dla każdego pasma [8].

W przypadku mojej pracy do przetworzenia zobrazowania radarowego rys. 1.3. w celu jego poprawy do interpretacji oraz analizy wykorzystam filtry adaptacyjne t.j.: Lee, Gamma, Frost oraz program SNAP, w którym filtrowanie zostanie wykonane.

3.3.1. Filtr Lee

Filtr Lee wygładza zaszumione dane, których intensywność powiązana jest ze sceną obrazu i posiada składową addytywną i/lub multiplikatywną. Filtr ten oparty jest na odchyleniu standardowym, który

działa na zasadzie obliczania statystyk w danych oknach filtracyjnych. Zaletą tego filtra jest fakt, że obraz po filtracji zachowuje ostrość i szczegółowość, przy jednoczesnym tłumieniu szumów w przeciwieństwie do dolnoprzepustowych filtrów. Piksel na obrazie wejściowym po przetworzeniu jest zastępowany przez nowy, który został wyliczony na podstawie otaczających go pikseli [30]. Do określenia odpowiednich wag wygładzających obraz filtr Lee wykorzystuje algorytm:

$$f(x, y) = \bar{g} + k_{xy}[g(x, y) - \bar{g}] \quad (3.4)$$

gdzie:

$\bar{g}$ - szacunkowa wartość medium w sąsiedztwie;

k_{xy} - parametr adaptacyjny (dostosowuje się do każdego piksela);

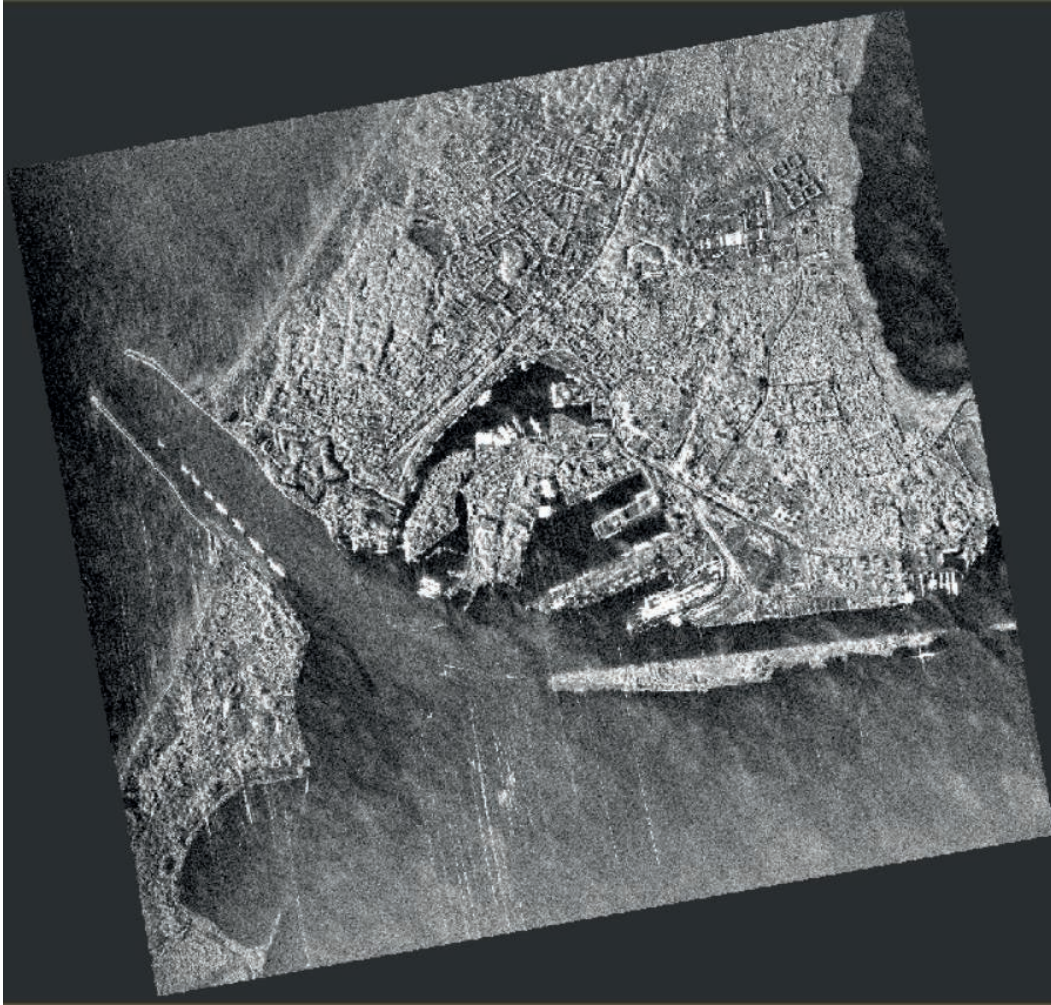
$g(x, y)$ - obraz z szumem.

$$k_{xy} = \frac{\sigma_g}{\sigma_g^2 + (\sigma_n \bar{g})^2} \quad (3.5)$$

σ_g^2 - estymacja wariancji w oknie przetwarzania filtrowanego obrazu.

[47]

Przed uruchomieniem procesu filtracji wprowadzono odpowiednie parametry filtra. Rozmiar okna filtracyjnego to 3x3 piksele.



Rys. 3.6. Zobrazowanie radarowe po filtracji filtrem Lee
[źródło: opracowanie własne].

3.3.2. Filtr Gamma

Filtr Gamma stosowany jest do redukcji plamek przy zachowaniu krawędzi na obrazach. Opiera się na właściwościach statystycznych obrazu, gdzie dane poddane filtracji mają rozkład gamma. Pixel poddany przetworzeniu jest zamieniany wartością obliczoną na podstawie statystyki lokalnej [67]. Jak w przypadku filtru Lee wielkość okna filtrującego to 3x3.

$$f(x, y) = \frac{(\alpha - L - 1)\bar{g} + \sqrt{\bar{g}^2(\alpha - L - 1)^2 + 4\alpha L g(x, y)\bar{g}}}{2\alpha} \quad (3.6)$$

$$\alpha = L + 1/[L(\sigma_2/\bar{g})^2 - 1] \quad (3.7)$$

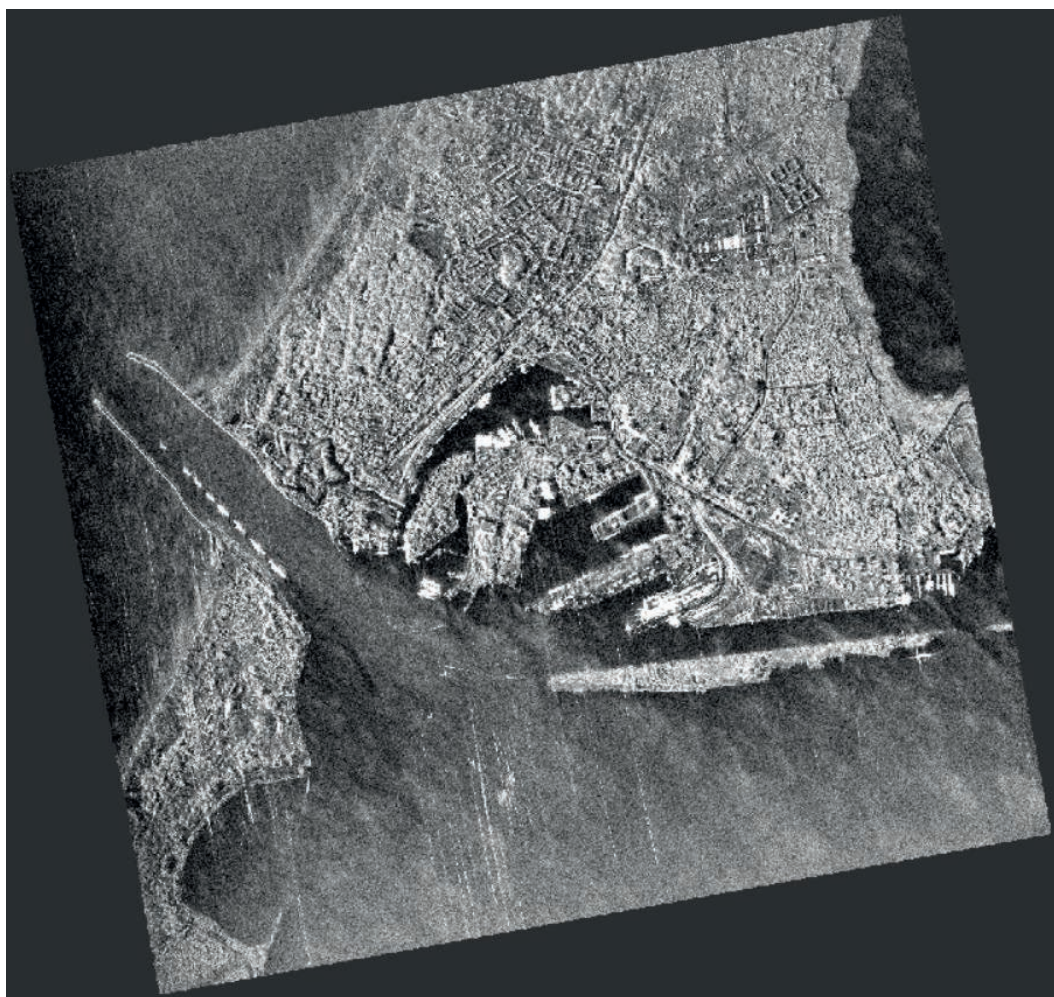
gdzie:

L – stosunek między oszacowanym medium a odchyleniem standardowym całości obrazu;

$\bar{g}$ – szacunkowa wartość medium w sąsiedztwie;

$g(x, y)$ – obraz z szumem.

[47]



Rys. 3.7. Zobrazowanie radarowe po filtracji filtrem Gamma [źródło: opracowanie własne].

3.3.3. Filtr Frost

Filtr Frost jest rodzajem filtra do przetwarzania obrazów, który wykorzystuje algorytm Frosta do poprawy obrazów dotkniętych szumem plamkowym. Algorytm Frosta działa poprzez podzielenie obrazu na małe regiony lub podokna, a następnie oszacowanie lokalnej średniej i wariancji każdego podokna. Oszacowana średnia i wariancja są następnie używane do tłumienia szumu speckle przy zachowaniu podstawowych szczegółów obrazu. Do filtracji wykorzystano okno filtracyjne o wielkości 3x3 piksele oraz współczynnik tłumienia o wartości 2. Estymacja piksela przedstawiona jest przez poniższy wzór:

$$f(x, y) = \frac{g_1 m_1 + g_2 m_2 + \dots + g_n m_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} \quad (3.8)$$

$$m = e^{[-K(\sigma_g/\bar{g})d(t_0, t)]} \quad (3.9)$$

gdzie:

$\bar{g}_i$ – wartość obrazu z szumem w oknie konwulcji;

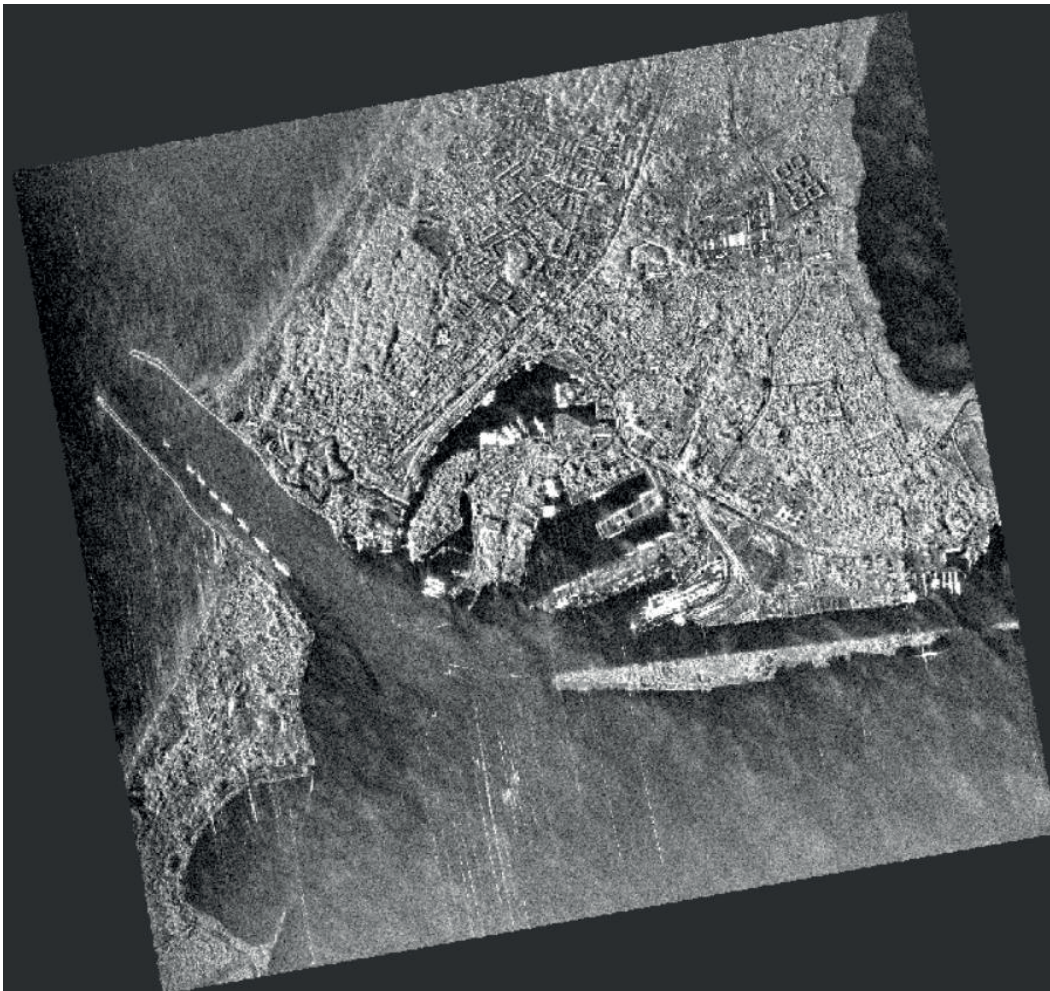
m_i – współczynnik konwulcji;

K – parametr filtra reprezentujący wartość tłumienia;

t_0 – położenie przetwarzanego piksela;

$d(t_0, t)$ – to odległość euklidesowa mierzona od położenia piksela $t = (x, y)$ do t_0 .

[47]



Rys. 3.8. Zobrazowanie radarowe po filtracji filtrem Frost
[źródło: opracowanie własne].

3.4. Integracja danych SAR i EO

Integracja danych elektrooptycznych i radarowych polega na łączeniu informacji pochodzących z dwóch różnych źródeł – obrazów EO uzyskiwanych za pomocą sensorów wielospektralnych i zdjęć SAR uzyskiwanych za pomocą radarów umieszczonych na satelitach. Celem tej integracji jest uzyskanie bardziej pełnego i dokładnego obrazu, który pozwala na lepsze zrozumienie i interpretację danych oraz dokładniejsze rozpoznanie i identyfikację sprzętu wojskowego na danym zobrazowaniu. Jak wiadomo, obrazy radarowe (SAR) (intensywność i koherencja) zawierają informacje o chropowatości powierzchni, teksturze, właściwościach dielektrycznych i zmianie stanu obiektów naturalnych i stworzonych przez człowieka, podczas gdy zobrazowania wykonane w optycznym zakresie widma elektromagnetycznego zawierają informacje o odbiciowej i emisyjnej charakterystyce cech powierzchni Ziemi. W przeszłości poprawę jakości mapowania pokrycia terenu osiągnięto dzięki efektywnemu wykorzystaniu zintegrowanych cech tych wieloźródłowych zbiorów danych. Ponieważ obiekt lub klasa, która nie jest widoczna na obrazie z czujnika pasywnego, może być widoczna na obrazie z czujnika aktywnego i odwrotnie, jest oczywiste, że połączenie obrazów optycznych i SAR przyniesie wiele korzyści [2]. Integracja takich danych może być wykorzystywana w różnych dziedzinach, takich jak nawigacja, bezpieczeństwo, monitorowanie zmian w środowisku czy w badaniach naukowych. Integracja danych obrazowych elektrooptycznych i radarowych może być wykonana na kilka sposobów, takich jak:

- łączenie obrazów w jednym wspólnym obrazie: w tym przypadku informacje z obu źródeł są zebrane i połączone w jednym obrazie, który zawiera informacje zarówno z obrazów elektrooptycznych, jak i radarowych.
- Analiza warstwowa: w tym przypadku informacje z obu źródeł są analizowane osobno i wyniki są następnie łączone w jedną całość.
- Wykorzystanie różnych źródeł danych do uzupełniania się: obrazy elektrooptyczne są używane do uzupełnienia brakujących informacji w obrazach radarowych, a obrazy radarowe są używane do uzupełnienia brakujących informacji w obrazach elektrooptycznych.

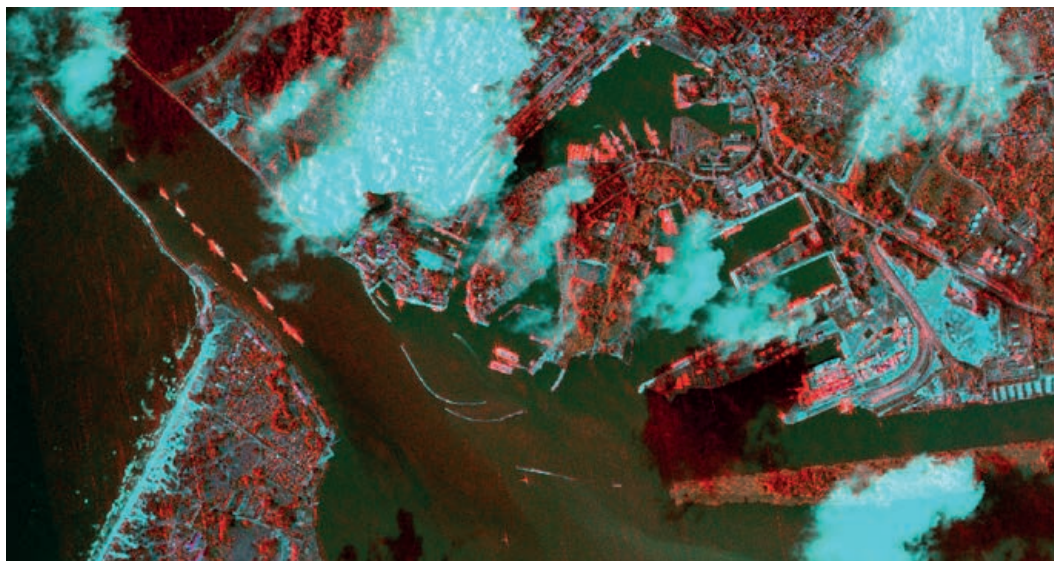
Integracja danych może przynieść wiele korzyści, takich jak lepsza jakość i dokładność obrazów, zwiększona zdolność do wykrywania i rozpoznawania obiektów, a także zwiększona zdolność do przetwarzania danych w czasie rzeczywistym. Warto jednak pamiętać, że integracja danych obrazowych wymaga specjalistycznej wiedzy i narzędzi, aby była skuteczna i użyteczna [4].

Do integracji danych wykorzystano pierwotne zobrazowanie elektrooptyczne przedstawione na rysunku 1.1., jej przetworzoną wersję rys. 3.3. oraz zobrazowanie radarowe rys. 3.7. Fuzja zdjęć została wykonana dwoma metodami, pierwsza z nich to Layer stacking, a druga to Pansharpening metodą Grama Schmitda. Obie operacje przeprowadzone zostały w programie ENVI.

3.4.1. Integracja danych metodą Layer stacking

Layer stacking jest metodą w teledetekcji i przetwarzaniu obrazów geoprzestrzennych, która łączy wiele obrazów wykonanych w różnym czasie lub z różnych sensorów w jeden produkt końcowy. Dodawane są do siebie pasma kilku zdjęć, z których powstaje nowe zobrazowanie wielopasmowe [67]. Proces ten jest przydatny w przypadkach, gdy pojedynczy obraz nie przekazuje pożądaných informacji, np. w przypadku zachmurzenia lub cieni przesłaniających część obrazu. Layer stacking może być wykonany na dwa sposoby. Pierwszy z nich to łączenie obrazów względem czasu, np. w analizie wieloczasowej jednej lokalizacji. Drugi sposób to dobieranie zdjęć na podstawie przestrzeni, np. łączenie zobrazowań wykonanych w różnych zakresach spektralnych lub rozdzielczościach przestrzennych w celu utworzenia jednego obrazu, który zawiera najlepsze cechy każdego z łączonych zdjęć. Jest to przydatne do wielu celów, w tym analizy danych, wizualizacji danych i zarządzania danymi. Zapewnia sposób efektywnego wykorzystania wielu źródeł zobrazowań w celu poprawy jakości końcowego produktu danych i może pomóc przezwyciężyć ograniczenia w poszczególnych rodzajach obrazów. Dodatkowo, layer stacking może być wykorzystane do korekty zniekształceń atmosferycznych i błędów geometrycznych w danych teledetekcyjnych. Inną korzyścią wynikającą z tego narzędzia jest możliwość wzbogacenia informacji znajdującej się na obrazie. Na przykład, połączenie obrazów optycznych o wysokiej rozdzielczości przestrzennej z obrazami radarowymi o niższej rozdzielczości może poprawić ogólną dokładność i szczegółowość obrazu końcowego. Obrazowanie optyczne o wyższej rozdzielczości może być wykorzystane do identyfikacji określonych cech, natomiast obrazowanie radarowe może być wykorzystane do dostarczenia dodatkowych informacji o chropowatości powierzchni i fakturze obiektów na obrazie. Łączenie pasm ze zdjęć pozyskanych w danym przedziale czasowym może być wykorzystywane do wykrywania zmian powstałych w danym obszarze zainteresowania. Na przykład, poprzez łączenie obrazów wykonanych w różnym czasie, możliwe jest zaobserwowanie zmian w użytkowaniu ziemi, roślinności i ekspansji miejskiej. Informacje te mogą być wykorzystywane do planowania przestrzennego, zarządzania zasobami naturalnymi i monitorowania środowiska [28].

Rysunek 3.9 przedstawia finalny produkt, który jest wynikiem dodania do siebie zobrazowań Bazy Marynarki Wojennej w Bałtyjsku pozyskanych w różnych zakresach spektralnych. Jest to przetworzone zobrazowanie elektrooptyczne oraz zobrazowanie radarowe po filtracji filtrem Gamma. Kanał czerwony tego obrazu to dane radarowe, a kanał zielony i niebieski to dane elektrooptyczne.



Rys. 3.9. Zintegrowany obraz SAR i EO metodą Layer stacking [źródło: opracowanie własne].

3.4.2. Integracja danych metodą Pansharpeningu

Celem tej operacji jest połączenie szczegółowości obrazu elektrooptycznego z zaletami obrazu radarowego, takimi jak zdolność penetracji chmur i zdolność do tworzenia obrazów w różnych warunkach oświetleniowych. Poprzez zmniejszenie zniekształceń i niedokładności we właściwościach przestrzennych przy jednoczesnym zachowaniu kompletności informacji spektralnej, wielosensorowa fuzja obrazów ma na celu połączenie komplementarnych informacji z wielosensorowych obrazów tej samej sceny w jeden obraz, który zawiera więcej informacji niż którykolwiek z obrazów źródłowych [7]. W pansharpeningu metodą Grama Schmidta, pasma spektralne o niższej rozdzielczości przestrzennej imitują pasmo panchromatyczne. W tym celu pasma wielospektralne są często uśredniane i razem z symulowanym pasmem panchromatycznym są przekształcane za pomocą algorytmu Grama Schmidta, przy czym symulowane pasmo panchromatyczne służy jako pierwsze pasmo. Początkowe przetworzone pasmo jest zastępowane pasmem panchromatycznym o wysokiej rozdzielczości przestrzennej. Finalnie, wyostrzone pasma wielospektralne są wytwarzane przy użyciu odwrotnej transformacji Grama Schmidta [25].

W przypadku tej pracy za obraz panchromatyczny o wyższej rozdzielczości przestrzennej służy zobrazowanie radarowe po przeprowadzonej korekcji radiometrycznej oraz filtracji. Rysunek 3.10. przedstawia fuzję danych SAR i EO wykonaną metodą pansharpeningu.



Rys. 3.10. Zintegrowany obraz SAR i EO metodą Grama Schmidta [źródło: opracowanie własne].

Do poprawy potencjału interpretacyjnego wykorzystanych danych obrazowych w pracy użyłem pansharpeningu do zwiększenia rozdzielczości przestrzennej zobrazowania elektrooptycznego. Dane SAR zostały poddane korekcji radiometrycznej, a następnie zredukowane zostały na nich szumy przy użyciu odpowiednich metod filtracji obrazu. Wszystkie przetworzenia zostały wykonane poprawnie, a ich wyniki zostaną przeanalizowane oraz poddane ocenie w następnym rozdziale.

4. Ocena zobrazowań EO i SAR oraz ich przetworzeń

W tym rozdziale pracy zostaną przeanalizowane surowe dane elektrooptyczne i radarowe oraz ich przetworzone wersje pod kątem identyfikacji sprzętu wojskowego znajdującego się w bazie morskiej w Bałtyjsku w programie ArcMap, jak również ocena możliwości tych zobrazowań do przeprowadzenia rozpoznania obrazowego. Dodatkowo ocenie poddane zostaną zrealizowane operacje na zdjęciach satelitarnych w celu poprawy ich interpretacyjności. Oceny jakości spektralnych i filtracji zostały wykonane w oprogramowaniu Matlab.

Który rodzaj przetworzonych danych obrazowych uzyska lepsze wyniki w kontekście analizy sprzętu wojskowego znajdującego się w bazie morskiej w Bałtyjsku?

Wyodróżnione dane elektrooptyczne uzyskują lepsze wyniki w identyfikacji i rozpoznawaniu sprzętu wojskowego stacjonującego w porcie w Bałtyjsku, ponieważ ich wysoka rozdzielczość przestrzenna umożliwia odczytywanie charakterystycznych cech poszczególnych okrętów.

4.1. Analiza surowych zobrazowań EO i SAR

W tej części pracy analizie pod kątem wykrycia i identyfikacji sprzętu wojskowego zostanie poddane surowe zobrazowanie elektrooptyczne pozyskane z satelity Pleiades 1A. Drugim analizowanym obrazem będzie pierwotne zobrazowanie radarowe z satelity ICEYE X4. Etapy procesu fotointerpretacji:

- Wykrycie obiektów (detekcja);
- Rozpoznanie;
- Identyfikacja;
- Analiza techniczna.

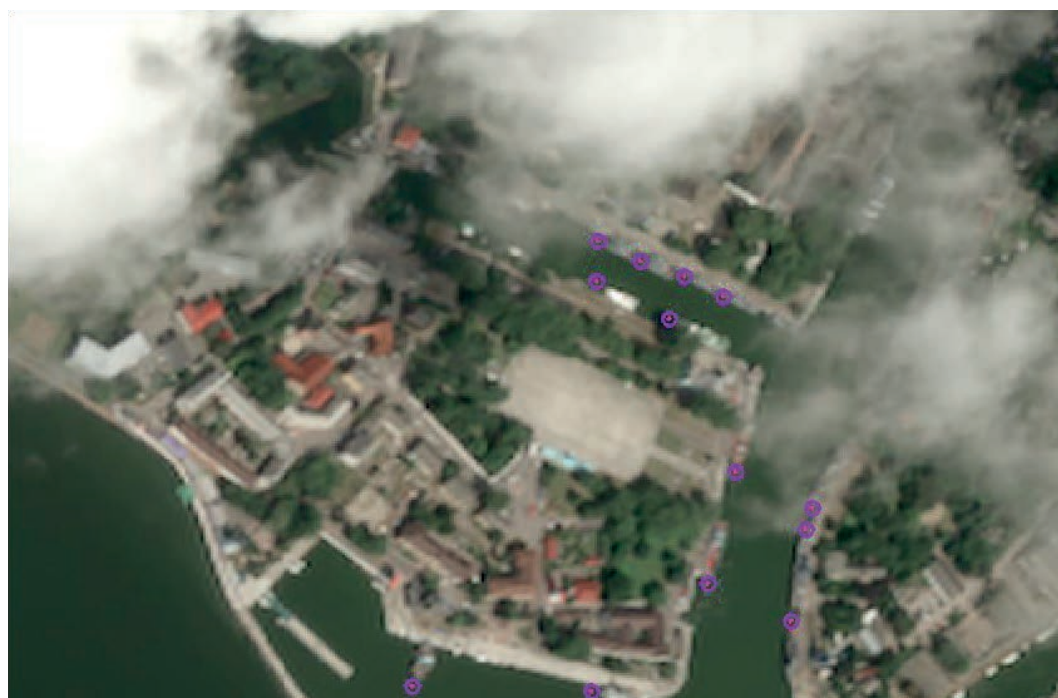
Detekcja to proces ustalenia obecności czegoś na podstawie zewnętrznych cech, takich jak kształt, struktura lub różnice w jasności. Rozpoznanie natomiast polega na potwierdzeniu istnienia obiektu lub zjawiska oraz określeniu jego typu i nazwy. W ten sposób można na przykład stwierdzić, że widzimy czołg, a nie ciężarówkę. Rozpoznanie jest kluczem do uzyskania szczegółowych informacji o obiekcie. Identyfikacja polega na dokładnym określeniu nazwy obiektu lub zjawiska, a także na określeniu jego klasy lub typu. Wykorzystuje się charakterystyczne cechy i detale, aby dokładnie nazwać obiekt, na przykład czołg T-80 zamiast T-64. Analiza techniczna natomiast polega na dokładnym określeniu funkcji, przynależności lub znaczenia obiektu lub jego komponentów, co odróżnia go od innych obiektów. Na przykład, analiza techniczna może ujawnić, że czołg posiada zbiorniki paliwa na zewnątrz, a Su-34 jest wyposażony w uzbrojenie podwieszane [21].

4.1.1. Analiza zobrazowania EO

Na zobrazowaniu elektrooptycznym wykryte zostały 64 obiekty pływające. Spośród nich zidentyfikowano 6 okrętów wojskowych oraz rozpoznano jedną jednostkę. Wyniki przeprowadzonej analizy przedstawione są na rysunkach 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, na których przy użyciu wektoryzacji zaznaczone zostały wykryte, rozpoznane bądź zidentyfikowane obiekty.



Rys. 4.1. Analiza północnej części portu w Bałtyjsku (EO) [źródło: opracowanie własne].



Rys. 4.2. Analiza centralnej części portu w Bałtyjsku (EO) [źródło: opracowanie własne].



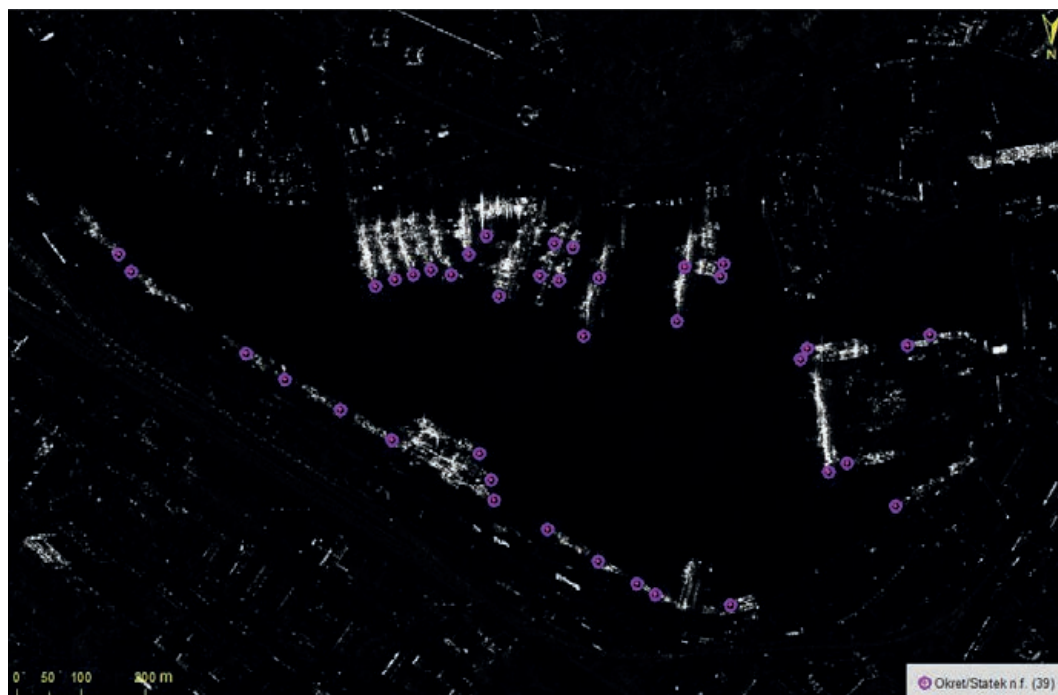
Rys. 4.3. Analiza zachodniej części portu w Bałtyjsku (EO) [źródło: opracowanie własne].



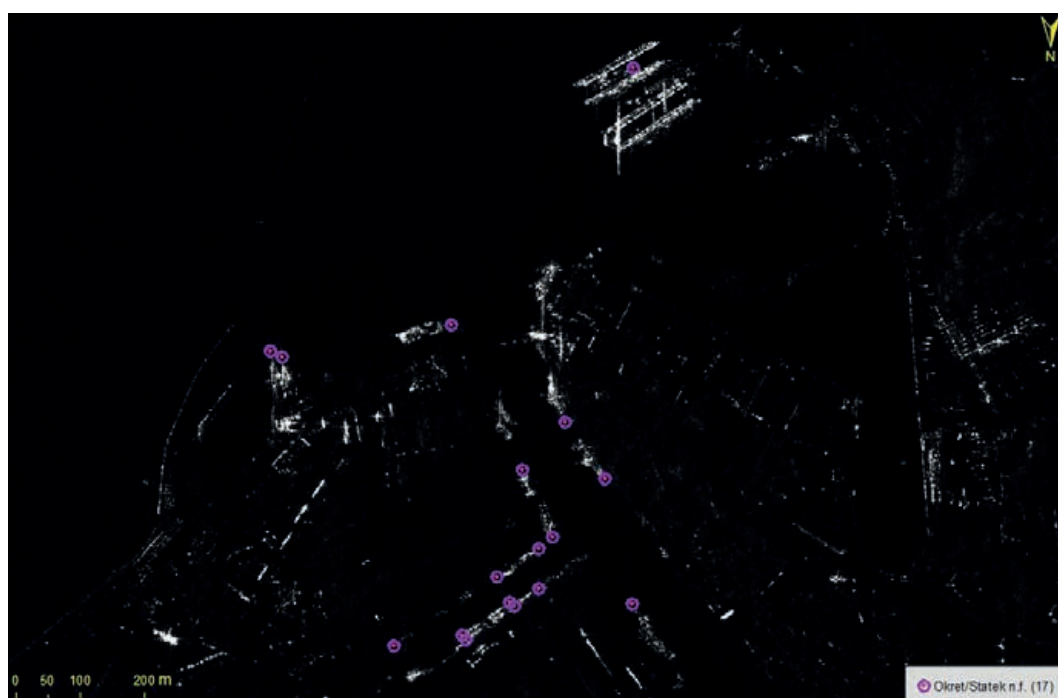
Rys. 4.4. Analiza wschodniej części portu w Bałtyjsku (EO) [źródło: opracowanie własne].

4.1.2. Analiza zobrazowania SAR

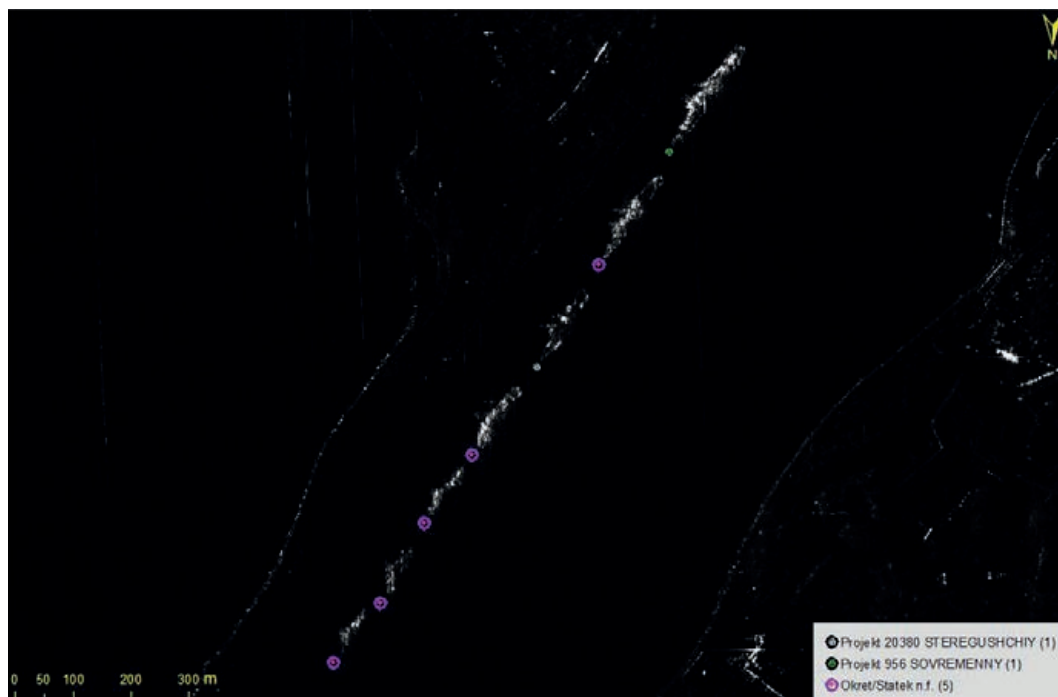
Na zobrazowaniu radarowym wykrytych zostało 74 obiektów pływających. Spośród nich zidentyfikowano dwa okręty wojskowe. Rysunki 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 przedstawiają części przeanalizowanego zdjęcia, na których przy użyciu wektoryzacji zaznaczone zostały wykryte, bądź zidentyfikowane obiekty.



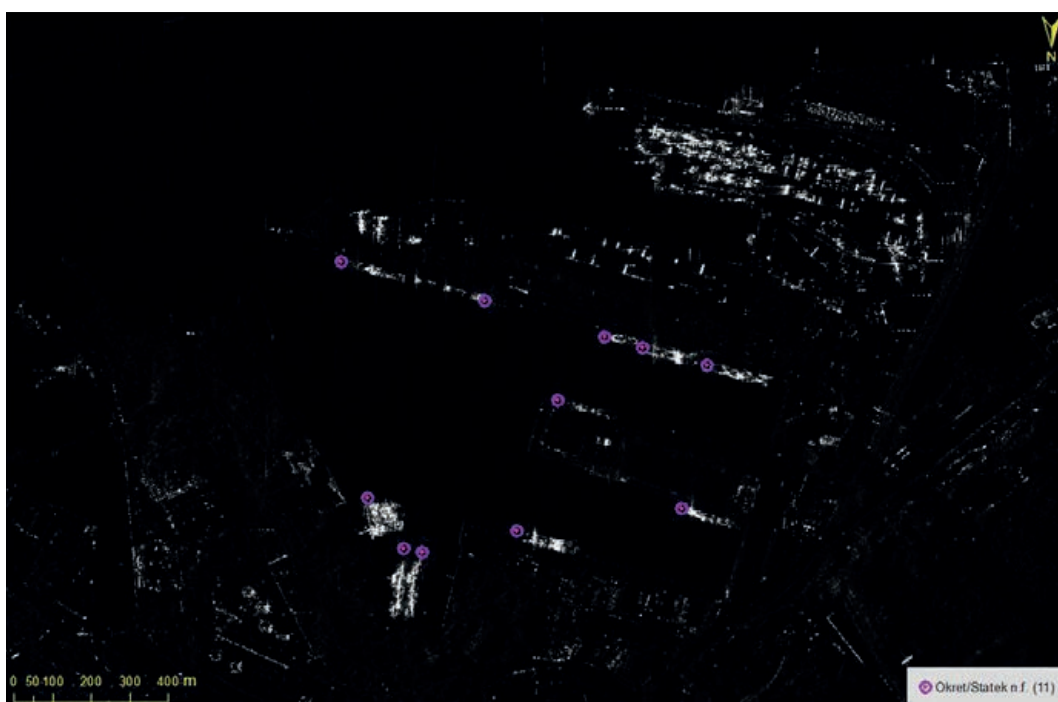
Rys. 4.5. Analiza północnej części portu w Bałtyjsku (SAR)
źródło: opracowanie własne].



Rys. 4.6. Analiza centralnej części portu w Bałtyjsku (SAR)
źródło: opracowanie własne].



Rys. 4.7. Analiza zachodniej części portu w Bałtyjsku (SAR) [źródło: opracowanie własne].



Rys. 4.8. Analiza wschodniej części portu w Bałtyjsku (SAR) [źródło: opracowanie własne].

4.2. Ocena jakości połączonych zobrazowań EO portu w Bałtyjsku

4.2.1. Ocena wizualna

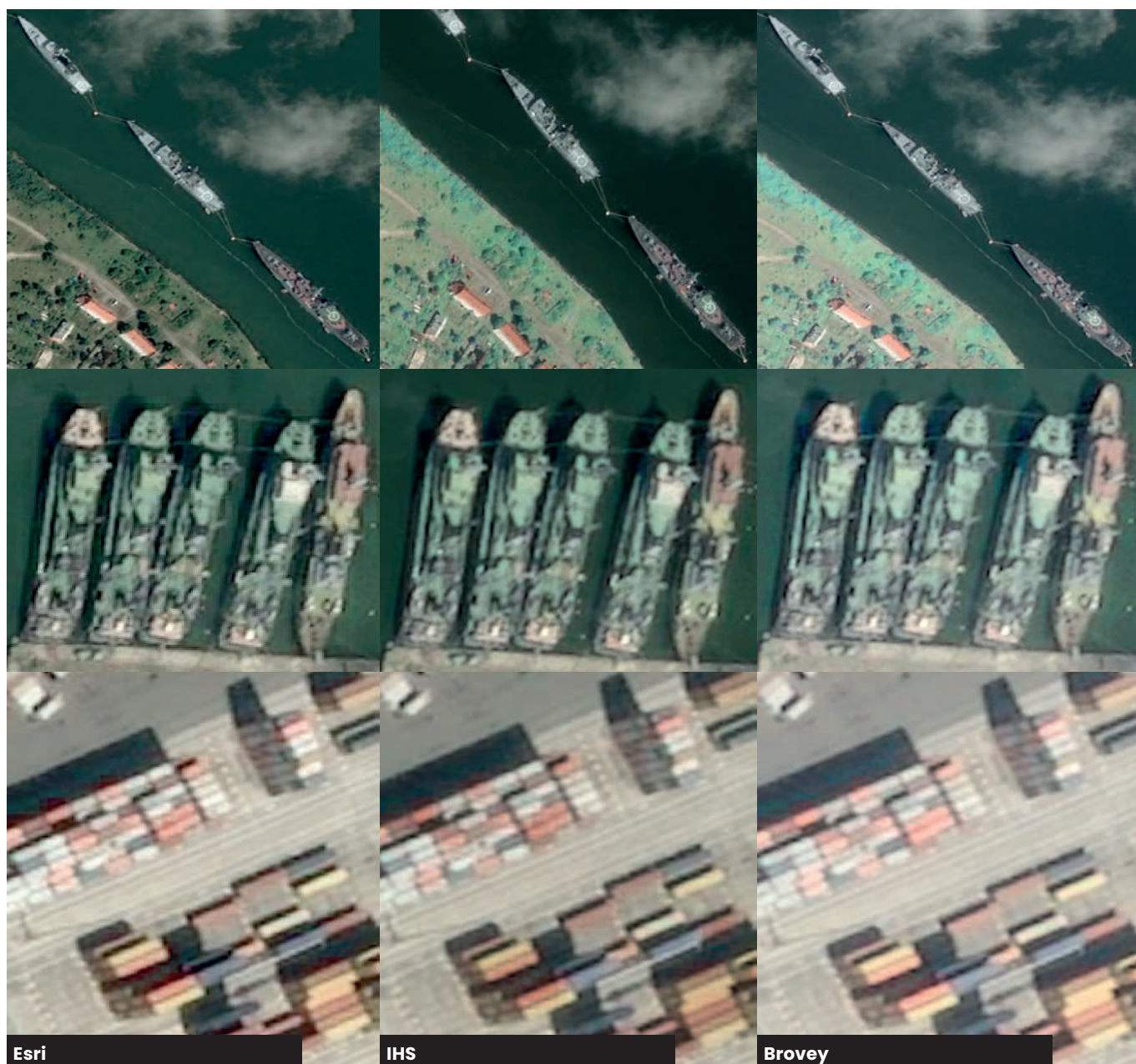
Najbardziej kluczowym aspektem z punktu widzenia wizualnej oceny zobrazowania satelitarnego jest otrzymanie obrazu barwnego, który najlepiej wyeksponuje różnice kolorystyczne i teksturowe poszczególnych obiektów. Nie jest wymagane w tym przypadku zachowanie właściwości radiometrycznych otrzymanego zestawu danych. Celem jest uzyskanie najlepszego możliwego efektu wizualnego, bez podejmowania dodatkowych czynności prowadzących do zachowania jak najlepszych charakterystyk spektralnych obiektów. Wszystkie kroki przy przetwarzaniu powinny skupiać się na zachowaniu jak najlepszych barw bez tzw. zniekształceń barwy oraz na ulepszeniu zdjęcia wielospektralnego pod kątem rozdzielczości przestrzennej [43].



Rys. 4.9. Wyniki metod pansharpeningu
[źródło: opracowanie własne].

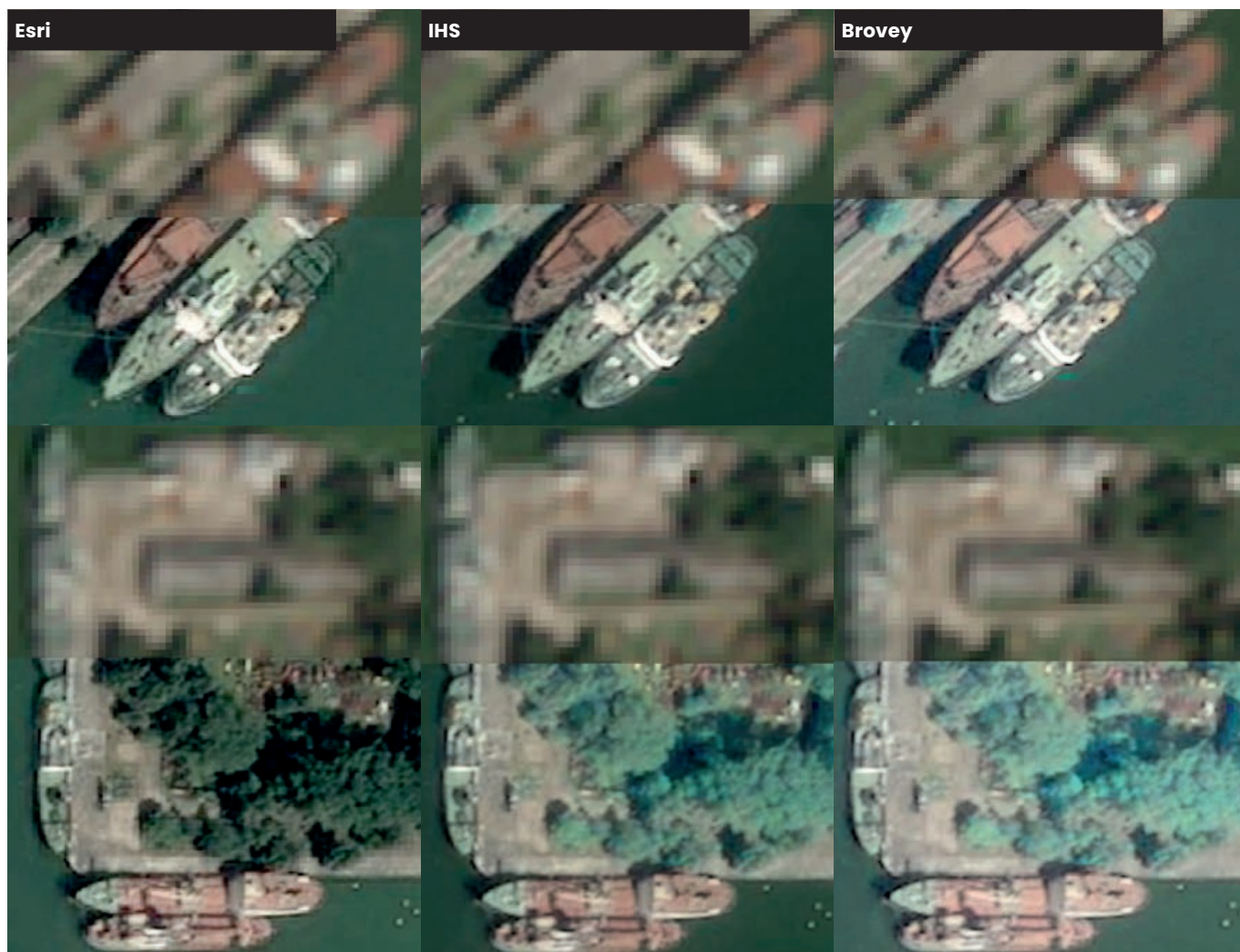
Na rysunku 4.9. przedstawione są wyniki integracji danych wielospektralnych i panchromatycznych metodami: Esri, IHS i Broveya. Ich wizualne porównanie pod kątem zachowania barw zobrazowania wielospektralnego wyraźnie wskazuje na różnice pomiędzy obrazami wyostrzonymi. Metoda Esri najlepiej

poradziła sobie z kwestią odwzorowania barw zdjęcia pierwotnego. Natomiast wyniki uzyskane przy wykorzystaniu dwóch kolejnych metod są do siebie bardzo zbliżone, ale zbyt odbiegają od wejściowych danych MS (ang., Multispectral). Rysunek 4.10. przedstawia porównanie wizualne wyników poszczególnych metod łączenia obrazów PAN i MS tym razem w kontekście odwzorowania szczegółów obiektów i rozdzielczości przestrzennej. Trzy obrazy wyostrome zachowują wysoką rozdzielczość przestrzenną, jak również nie są obciążone żadnymi zniekształceniami. Metodę Esri i IHS charakteryzuje wysoka czytelność w przypadku obiektów znajdujących się na jasnym tle (kontenery). Metoda Broveya w tej sytuacji wypada nieznacznie gorzej, ponieważ krawędzie kontenerów są mniej ostre.



Rys. 4.10. Wyniki metod pansharpeningu (zblżenia)
[źródło: opracowanie własne].

Rysunek 4.11. prezentuje zestawienie wyników pansharpeningu do pierwotnego obrazu wielospektralnego. Na podstawie tego rysunku można stwierdzić, że każda z wykorzystanych metod znacznie poprawiła rozdzielczość przestrzenną obrazu MS. Przyczyniło się to do zwiększenia możliwości interpretacyjnych danego zobrazowania oraz umożliwiło szczegółową identyfikację poszczególnych okrętów stacjonujących w bazie morskiej w Bałtyjsku.



Rys. 4.11. Wizualne porównanie obrazów wyostrzonych z obrazem MS
[źródło: opracowanie własne].

4.2.2. Wskaźniki do globalnej oceny jakości połączonych obrazów

Ocena globalna jest pomiarem bezstronnym i niezwiązanym z opinią operatora. Jakość wyników integracji danych o różnych poziomach rozdzielczości przestrzennej i spektralnej była przedmiotem wielu rekomendacji w literaturze międzynarodowej. Poniżej wymieniono najpopularniejsze techniki oceny jakości połączonych obrazów wielospektralnych i panchromatycznych o bardzo wysokiej rozdzielczości

przestrzennej. Wyniki badania formalnego wyrażone są w kategoriach jakości spektralnej.

Najczęściej do oceny jakości spektralnej wyników integracji obrazów PAN i MS wykorzystuje się porównanie różnych właściwości statystycznych opisujących oba obrazy, takich jak: średnia, minimum, maksimum, moda, mediana, odchylenie standardowe, histogramy dla poszczególnych zakresów spektralnych, korelacja pomiędzy poszczególnymi zakresami spektralnymi, macierz wariancji i kowariancji oraz współczynnik korelacji pomiędzy danymi pierwotnymi, a wynikami wykonanych przekształceń. Ich samodzielne badanie nie pozwala jednak jednoznacznie określić stopnia jakości wyników integracji.

Obecnie błąd średniokwadratowy RMSE (root mean square error), określony dla k-tego zakresu spektralnego jest najczęściej stosowaną i podstawową metryką pozwalającą ocenić jakość wyników integracji obrazów wielospektralnych i panchromatycznych. Przy wartości równej 0 mamy do czynienia z brakiem błędu pomiędzy wartościami gęstości piksela obrazu przetworzonego a wielospektralnego. Wzór RMSE wyrażony jest w następujący sposób:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_x \sum_i (A(x, i) - F(x, i))^2}{x \times m \times d}} \quad (4.1)$$

gdzie:

n – liczba rzędów pikseli na zobrazowaniu;

m – liczba kolumn pikseli na zobrazowaniu;

d – liczba zakresów spektralnych na danym zobrazowaniu;

$A(x, i)$ – gęstość optyczna piksela położonego w kolumnie „ x ” oraz rzędzie „ i ” na obrazie wielospektralnym;

$F(x, i)$ – gęstość optyczna piksela położonego w kolumnie „ x ” oraz rzędzie „ i ” na obrazie pansharpened.

ERGAS (Erreur Relative Globale Adimensionnelle de Synthèse) mierzy różnicę pomiędzy obrazem scalonym, a pierwotnym obrazem wielospektralnym pod względem średniego zniekształcenia spektralnego. Zniekształcenie spektralne jest mierzone przez stosunek średniego błędu kwadratowego pomiędzy pasmami spektralnymi obrazu wyostzonego i obrazu MS. Wskaźnik ERGAS jest często wykorzystywany w zastosowaniach teledetekcyjnych do oceny jakości technik fuzji obrazów oraz do porównania różnych algorytmów fuzji. Wartość błędu mniejsza od 3 wskazuje na zadowalającą jakość obrazu wyostzonego.

$$ERGAS = 100 \times \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(\frac{RMSE_k}{\mu_{MSk}} \right)^2} \quad (4.2)$$

gdzie:

n – liczba zakresów spektralnych;

h – rozmiar piksela obrazu panchromatycznego;

l – rozmiar piksela obrazu wielospektralnego;

$RMSE$ – błąd średni kwadratowy gęstości optycznej piksela obrazu wynikowego pod względem wartości gęstości optycznej obrazu wielospektralnego;

$\mu(n)$ – długość fali danego zakresu, w którym zostało wykonane zobrazowanie.

[48]

PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) mierzy różnicę między oryginalnym i wyostrzonym lub skompresowanym obrazem pod względem ich szczytowego stosunku sygnału do szumu. Jest on obliczany jako stosunek maksymalnej możliwej mocy sygnału do mocy szumu, który wpływa na wierność jego reprezentacji. Wyższa wartość PSNR wskazuje na wyższą jakość wyostrzonego lub skompresowanego obrazu, gdyż oznacza niższy poziom zniekształceń lub szumu. Należy jednak zauważyć, że PSNR nie zawsze jest dokładną oceną jakości obrazu, ponieważ nie uwzględnia ludzkiej percepcji wzrokowej, na którą mogą wpływać takie czynniki jak kontrast, ostrość i barwa. Wyraża się go w decybelach (dB) i określa następującym równaniem:

$$PSNR = 20 \times \log_{10} \left(\frac{Peak}{\sqrt{MSE_k}} \right) \quad (4.3)$$

gdzie:

$Peak$ – maksymalna możliwa do osiągnięcia wartości radiometrycznej danego zbioru;

MSE – średni błąd kwadratowy.

SSIM (Structural Similarity Index Measure) to metryka jakości obrazu, która mierzy podobieństwo pomiędzy dwoma obrazami, ze szczególnym uwzględnieniem informacji strukturalnej. Bierze pod uwagę trzy aspekty jakości obrazu: luminancję, kontrast i informację strukturalną. Porównuje luminancję i kontrast dwóch obrazów w sposób podobny do innych metryk, takich jak PSNR, ale mierzy również podobieństwo strukturalne dwóch obrazów za pomocą wskaźnika porównania strukturalnego (SCI). Metryka SSIM jest zdefiniowana jako wartość dziesiętna pomiędzy 0 a 1, gdzie wartość 1 oznacza doskonałe podobieństwo strukturalne pomiędzy dwoma obrazami, a wartość 0 oznacza, że dwa obrazy są nieskorelowane. Jest często używany w aplikacjach przetwarzania obrazów, gdzie zapewnia dokładniejszą miarę jakości

obrazu w porównaniu do tradycyjnych metryk, takich jak PSNR. Dzieje się tak dlatego, że SSIM uwzględnia ludzką percepcję wizualną, która jest bardzo wrażliwa na informacje strukturalne. We wskaźniku SSIM niezależnie obliczane są trzy składowe: jasność L, kontrast C i struktura S:

$$L_{PMS,MS} = \frac{2 \times \mu_{PMS} \times \mu_{MS} + C_1}{\mu_{PMS}^2 + \mu_{MS}^2 + C_1} \quad (4.4)$$

$$C_{PMS,MS} = \frac{2 \times \sigma_{PMS} \sigma_{MS} + C_2}{\sigma_{PMS}^2 + \sigma_{MS}^2 + C_2} \quad (4.5)$$

$$S_{PMS,MS} = \frac{\sigma_{PMS} + C_3}{\sigma_{PMS} + \sigma_{MS} + C_3} \quad (4.6)$$

gdzie:

μ_{MS} – wartość średnia w k-tym kanale spektralnym obrazu oryginalnego;

μ_{PMS} – wartość średnia w k-tym kanale spektralnym obrazu przetworzonego;

σ_{MS}^2 – wariancja w k-tym kanale spektralnym obrazu oryginalnego;

σ_{PMS}^2 – wariancja w k-tym kanale spektralnym obrazu przetworzonego.

Połączenie tych trzech składowych tworzy wskaźnik jakości wyostzonego obrazu SSIM:

$$SSIM_{PMS,MS} = \frac{(2 \times \mu_{MS} \times \mu_{PMS} \times C_1)(2 \times \sigma_{PMS} \times C_2)}{(\mu_{MS}^2 + \mu_{PMS}^2 + C_1)(\sigma_{MS}^2 + \sigma_{PMS}^2 + C_2)} \quad (4.7)$$

gdzie:

C_1 - ($K_1 D$), D oznacza zakres dynamiczny wartości pikseli (np. 255 dla 8bitowego zapisu obrazu), a K_1 to wartość stała. Tak samo zdefiniowane są wartości C_2 i C_3 .

[44]

UIQI (Universal Image Quality Index) to wskaźnik jakości obrazu wyostzonego. Jego wartość wynosi od 0 do 1, gdzie 1 oznacza, że obraz wyostzony jest identyczny z oryginalnym, a 0 oznacza, że obraz wyostzony jest zupełnie niepodobny do oryginału. UIQI wykorzystuje trzy czynniki, które wpływają na jakość wyostzonego obrazu: podobieństwo do oryginału, zmienność kontrastu oraz zniekształcenia radiometrii. Wskaźnik ten opiera się na obliczeniu korelacji między oryginalnym, a wyostzonym obrazem w kilku różnych skalach przestrzennych, a następnie sumowaniu tych korelacji z uwzględnieniem wpływu trzech

czynników. Według autorów tego wskaźnika, uwzględnia on szereg odrębnych czynników statystycznych definiujących zbiór danych, a wartość jego średniej umożliwia kompleksową ocenę wyników. Warto zauważyć, że UIQI nie jest idealnym wskaźnikiem jakości obrazu, ponieważ może dać nieprawidłowe wyniki w przypadku bardzo słabej jakości obrazu lub gdy oryginał jest bardzo mało skomplikowany [22]. Najczęściej występuje w tej formie:

$$Q = \frac{4 \times \sigma_{MS,PMS} \times \mu_{MS} \times \mu_{PMS}}{(\sigma_{MS}^2 + \sigma_{PMS}^2) \times [(\mu_{MS})^2 + (\mu_{PMS})^2]} \quad (4.8)$$

gdzie:

μ_{MS} – wartość średnia w k-tym kanale spektralnym obrazu oryginalnego;

μ_{PMS} – wartość średnia w k-tym kanale spektralnym obrazu przetworzonego;

σ_{MS}^2 – wariancja w k-tym kanale spektralnym obrazu oryginalnego;

σ_{PMS}^2 – wariancja w k-tym kanale spektralnym obrazu typu przetworzonego.

[44]

Q4 to metryka jakości obrazu, która opiera się na koncepcji 4-poziomowej transformacji falkowej (ang. four-level wavelet transform) obrazu. Umożliwia analizę składowych wysokiej i niskiej częstotliwości obrazu. W pierwszym etapie, obraz jest podzielony na bloki pikseli, a następnie każdy blok jest poddawany transformacji falkowej. Kolejne trzy etapy polegają na podziale każdego bloku na cztery mniejsze bloki, z których każdy jest poddawany kolejnej transformacji falkowej. W ten sposób uzyskuje się cztery składowe obrazu: LL, LH, HL i HH, reprezentujące składowe niskiej i wysokiej częstotliwości. Q4 mierzy jakość kodowania poprzez porównanie tych składowych dla oryginalnego i odtworzonego obrazu. Indeks ten określa, ile pikseli z każdej składowej jest odtworzonych dokładnie, a następnie oblicza średnią wartość dla wszystkich składowych. Wynik tej metody znajduje się w przedziale od 0 do 1, gdzie wartość 1 oznacza idealną jakość wyostzonego obrazu.

$$\mathbf{z}_1 = a_1 + ib_1 + jc_1 + kd_1 \quad \mathbf{z}_2 = a_2 + ib_2 + jc_2 + kd_2 \quad (4.9)$$

gdzie:

a – wartość luminancji danego piksela w paśmie B;

b – wartość luminancji danego piksela w paśmie G;

c – wartość luminancji danego piksela w paśmie R;

d – wartość luminancji danego piksela w paśmie NIR.

$$Q4 = \frac{4|\sigma_{z_1z_2}| \times |z_1| \times |z_2|}{(\sigma_{z_1}^2 + \sigma_{z_2}^2)(|z_1|^2 + |z_2|^2)} \quad (4.10)$$

gdzie:

$\sigma_{z_1z_2}$ – kowariancja pomiędzy z_1 a z_2 ;

$\sigma_{z_1}^2$ – wariancja z_1 ;

$\sigma_{z_2}^2$ – wariancja z_2 .

[1]

4.2.3. Ocena jakości spektralnej przetworzonych obrazów elektrooptycznych

Do oceny jakości spektralnej wyników otrzymanych wskutek połączenia obrazów panchromatycznych i wielospektralnych można wykorzystać wiele czynników statystycznych opisujących odrębne kanały spektralne obrazów (wartość średnia, moda, mediana, odchylenie standardowe itp.). Jednak analiza podstawowych cech statystycznych oddzielnie dostarcza niewiele informacji na ten temat, co wymusza stosowanie wskaźników globalnych [43].

W tabeli nr. 4.1. zestawiono wartości RMSE, ERGAS, PSNR, SSIM, UIQI oraz Q4 dla metod pansharpeningu wykorzystanych w tej pracy. Wartości najniższe średniego błędu kwadratowego RMSE wskazują na najlepsze utrzymanie charakterystyk spektralnych obrazu wyostrzonego w stosunku z obrazem wejściowym. Najlepszy wynik otrzymała metoda Esri, a najgorszy metoda Broveya, która znacznie odstaje od dwóch poprzednich.

Podobna sytuacja występuje w przypadku zastosowania wskaźnika ERGAS. Najlepszy wynik otrzymała metoda Esri, nieznacznie mniejszy od niej metoda IHS, natomiast metoda Broveya wyszła prawie 3,5 razy gorzej od najlepszej. Warto jednak zauważyć, że według autorów tego indeksu jakości, wartości znajdujące się poniżej liczby 3 oznaczają satysfakcjonujący wynik dla danego obrazu.

W przypadku wskaźnika jakości PSNR, wyższa wartość przy danej metodzie wskazuje na mniejsze zniekształcenia obrazu wynikowego. Najwyższy wynik otrzymała metoda Esri, a najniższy metoda Broveya. Wartość metody IHS minimalnie odbiega od metody Esri.

Metryka SSIM zdefiniowana jest pomiędzy 0 a 1, wartości najbardziej zbliżone do liczby 1 oznaczają najlepsze podobieństwo strukturalne między dwoma obrazami. Wskaźnik ten podobnie jak poprzednie za najlepszą metodę łączenia danych uznaje Esri.

Wskaźnik UIQI analogicznie jak metryka SSIM określony jest pomiędzy 0 a 1. Wartość 1 oznacza, że obraz poddany przetworzeniu jest identyczny spektralnie jak obraz pierwotny. W przypadku tego indykatora najdokładniejszą techniką pansharpeningu okazała się metoda IHS, aczkolwiek jest to praktycznie niezauważalna różnica w stosunku do metody Esri.

Podobnie jest w przypadku indeksu Q4, wartości oscylujące w granicy liczby 1 oznaczają najlepszą jakość obrazu wyostrzonego. Ponownie wskaźnik oceny jakości obrazu uplasował metodę Esri na

pierwszym miejscu.

	RMSE	ERGAS	PSNR	SSIM	UIQI	Q4
Esri	0.0569	0.3583	24.9010	0.6327	0.9994	0.7785
IHS	0.0784	0.4937	22.1167	0.5756	0.9998	0.8048
Brovey	0.2155	1.3573	13.3327	0.2998	0.8465	0.6291

Tabela 4.1. Ocena jakości obrazów wyostrzonych [źródło: opracowanie własne].

4.2.4. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonej oceny wizualnej i oceny jakości spektralnej trzech metod pansharpeningu okazało się, że wszystkie sposoby wyostrenia obrazu zwiększają możliwości interpretacyjne zobrazowania wielospektralnego. Rozdzielczość przestrzenna została zwiększona z 2 m do 0,5 m, co umożliwia szczegółową analizę sprzętu wojskowego znajdującego się w obszarze zainteresowania, jakim jest port w Bałtyjsku.

Pod względem odwzorowania barw obrazu wielospektralnego najlepsze efekty uzyskała metoda Esri. Obraz wyostrzony zachowuje wszystkie cechy zdjęcia MS i dodatkowo jego szczegółowość i rozdzielczość przestrzenna zostały znacznie zwiększone. Spośród tych metod kolorystycznie najbardziej przypomina obraz wejściowy.

Z punktu widzenia oceny jakości spektralnej przy wykorzystaniu 6 wskaźników najlepsze wyniki ponownie otrzymała metoda Esri. Spośród wszystkich indykatorów jakości, aż pięć wykazały najkorzystniejsze wartości dla tej metody. Jednak należy zauważyć, że wartości wskaźników nieznacznie różniły się w przypadku metody Esri i IHS, dodatkowo indeks UIQI uplasował tą drugą metodę na pierwszym miejscu pod względem jakości spektralnej.

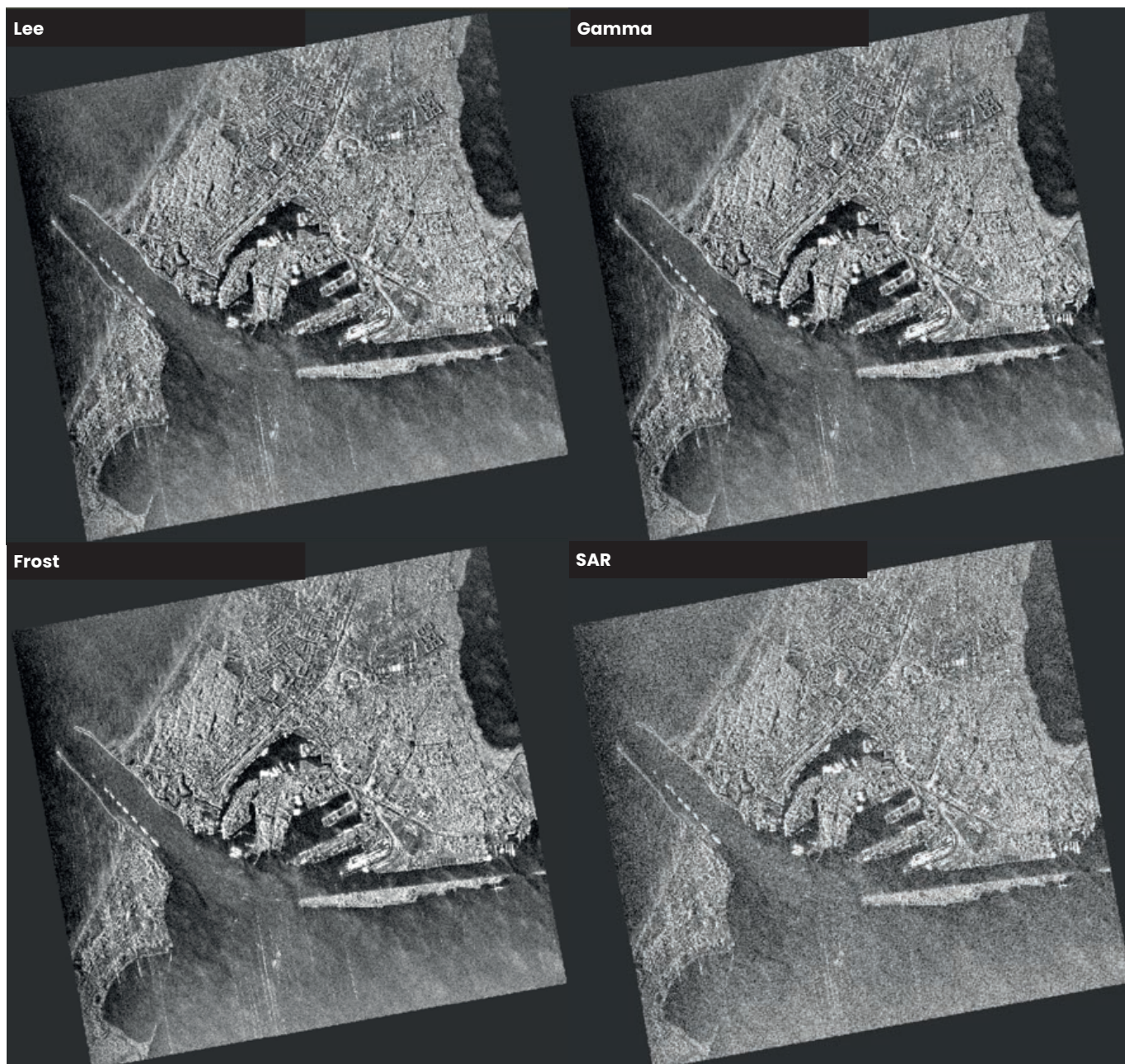
Przeprowadzenie analiz i porównań metod pansharpeningu pozwoliło na dokładne przebadanie różnych sposobów łączenia danych wielospektralnych (MS) z danymi panchromatycznymi (PAN) w celu wyostrenia jakości obrazów. W wyniku tych badań okazało się, że metoda pansharpeningu Esri wyróżnia się spośród innych metod jako najlepsza. Po pierwsze, ta metoda zachowuje cechy obrazu MS, czyli zachowuje informacje o barwie i widmie światła, co jest kluczowe dla uzyskania szczegółów obiektów. Po drugie, jakość spektralna obrazów wyostrzonych tym sposobem jest bardzo wysoka, co pozwala na dokładne rozróżnienie między różnymi typami obiektów. W związku z tym, że Esri okazało się najlepszą metodą pansharpeningu, obrazy wyostrene przy jej wykorzystaniu będą najlepszym narzędziem do analizy pod kątem identyfikacji sprzętu wojskowego. Dzięki wysokiej jakości spektralnej takie obrazy będą umożliwiały dokładne rozpoznanie detali sprzętu wojskowego, co ma kluczowe znaczenie w celu

podejmowania odpowiednich decyzji taktycznych i strategicznych.

4.3 Ocena przetworzonych zobrazowań SAR portu w Bałtyjsku

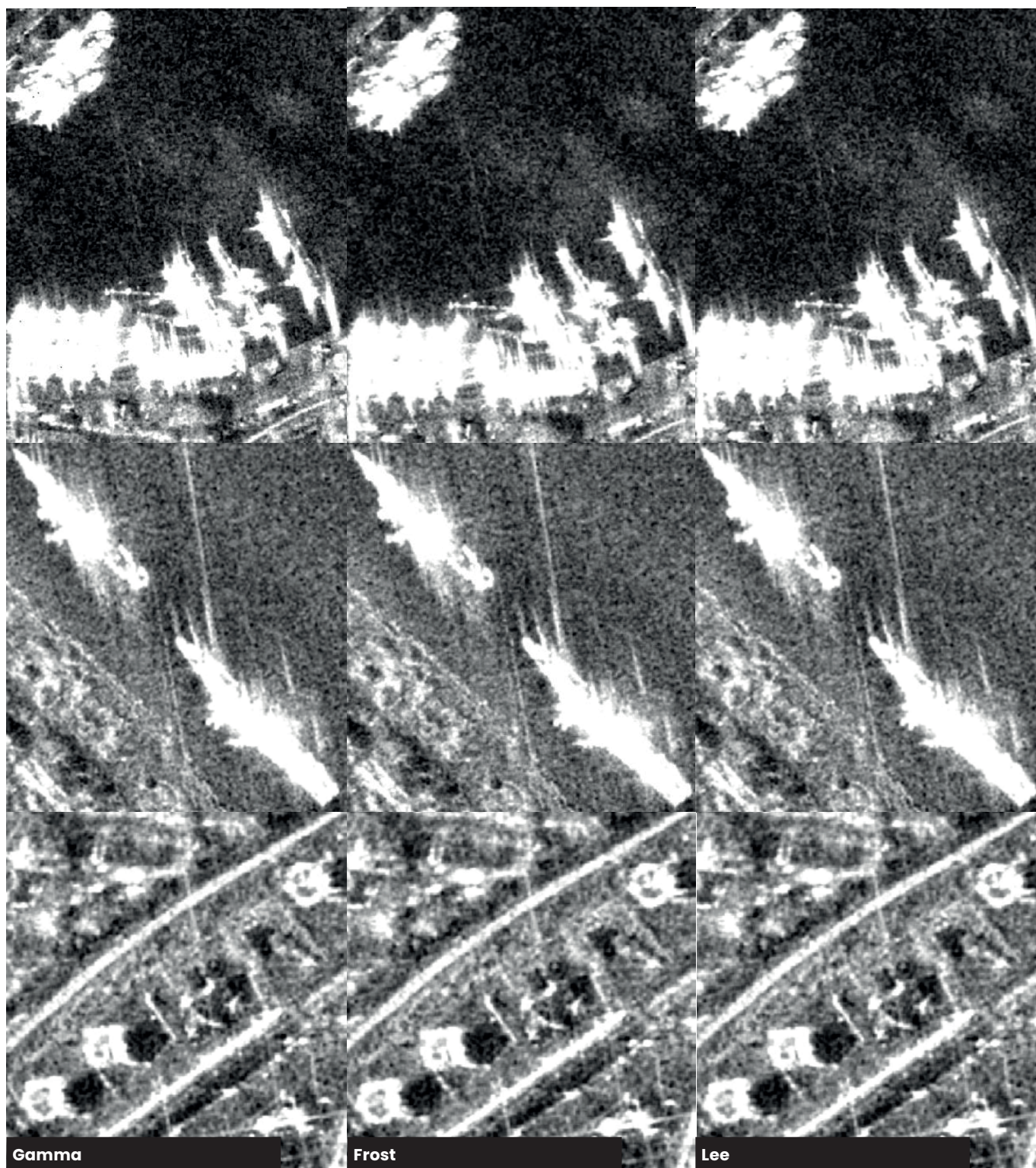
4.3.1. Ocena wizualna

Rysunek 4.12. przedstawia wyniki filtracji zobrazowania radarowego bazy morskiej w Bałtyjsku. Filtracja została przeprowadzona w celu zmniejszenia szumu typu speckle, który występuje na radarowych obrazach z powodu interferencji fali elektromagnetycznej podczas odbicia od obiektów. Analiza wyników filtracji pozwala na stwierdzenie, że wszystkie zastosowane filtry wpłynęły na poprawę jakości pierwotnego obrazu. Oznacza to, że szum typu speckle został zredukowany, co umożliwiło uzyskanie bardziej wyraźnego i dokładnego obrazu. Ponadto, dzięki filtracji elementy, takie jak okręty, stały się bardziej wyraźne na tle wody. Ten efekt przyczynia się do szybszego zlokalizowania i identyfikacji obiektów, co jest szczególnie ważne w przypadku bazy morskiej, gdzie szybkie wykrycie i zidentyfikowanie okrętów może być kluczowe dla podejmowania odpowiednich działań.



Rys. 4.12. Wyniki filtracji [źródło: opracowanie własne].

Na rysunku 4.13. przedstawione są wyniki trzech różnych filtrów, które zostały zastosowane do przetwarzania obrazu. Jednym z kluczowych wyzwań w takim przetwarzaniu obrazu jest wybór odpowiedniej metody filtracji, która pozwoli uzyskać jak najwyższą jakość przetworzonego obrazu. Z pozoru różnice pomiędzy tymi filtrami mogą wydawać się nieznaczne, jednakże zastosowanie tylko oceny wizualnej nie jest wystarczające do dokładnego porównania skuteczności tych filtrów.



Rys. 4.13. Porównanie wyników filtracji [źródło: opracowanie własne].

Wiele filtrów może mieć podobny efekt wizualny, ale ich wpływ na jakość przetworzonego obrazu może być inna. Właśnie dlatego w celu porównania skuteczności tych filtrów, ważne jest zastosowanie wskaźników oceny jakości filtracji. Te wskaźniki pozwalają na dokładniejsze określenie skuteczności filtrów na podstawie precyzyjnych parametrów. W ten sposób będzie można dokładniej określić, która z metod filtracji najlepiej sprawdza się w konkretnym przypadku.

4.3.2. Wskaźniki do oceny jakości wykonanej filtracji obrazu SAR

Do oceny jakości filtracji szumu speckle istnieje kilka wskaźników ilościowych oraz różne kryteria, które są brane pod uwagę, takie jak: zachowanie krawędzi, redukcja szumu, zachowanie odpowiednich cech czy czas wykonania [29]. W pracy zostanie wykorzystany wskaźnik SNR (Signal to Noise Ratio) oraz średni błąd kwadratowy RMSE.

Wskaźnik SNR jest powszechnie używany do oceny jakości filtracji obrazu radarowego. Jest to stosunek mocy sygnału do mocy szumu, czyli miara, która określa, jak silny jest sygnał w porównaniu do poziomu szumu. Wartość SNR wyrażana jest zwykle w decybelach (dB), im jest ona większa, to sygnał jest bardziej dominujący w stosunku do szumu, co z kolei oznacza, że obraz radarowy jest bardziej wyraźny i mniej zaszumiony.

$$SNR = \frac{\bar{f}}{\sigma_f} \quad (4.11)$$

gdzie:

$\bar{f}$ – średnia wartość pikseli na przefiltrowanym obrazie;

σ_f – odchylenie standardowe pikseli.

Średni błąd kwadratowy RMSE mierzy, jak bardzo każdy piksel różni się od swojej wartości w oryginalnym obrazie. Im niższa wartość błędów, tym lepsza jakość przetworzonego obrazu. W przypadku przetwarzania obrazów, błąd RMSE jest często wykorzystywany do porównywania jakości oryginalnego obrazu z obrazem poddanym jakiejś transformacji, np. filtracji. Definiowany jest jako pierwiastek z średniej wartości kwadratu różnicy między oryginalnym a przetworzonym obrazem.

$$RMSE = \sqrt{\sum_x \sum_y [g(x, y) - f(x, y)]^2 / N^2} \quad (4.12)$$

gdzie:

$g(x,y)$ – wartości pikseli obrazu oryginalnego;

$f(x,y)$ – wartości pikseli obrazu przefiltrowanego;

N – rozmiar okna filtrującego.

[47]

4.3.3. Ocena jakości filtracji

W tabeli 4.2. zestawiono wyniki dla poszczególnych metod filtracji. Wartości obydwu wskaźników jakości filtracji obrazu radarowego dla różnych filtrów adaptacyjnych są do siebie bardzo zbliżone. W przypadku indykatora SNR wyższe wartości określają lepszą jakość przefiltrowanego obrazu. Najwyższą wartość otrzymał filtr Gamma, jak również najniższy błąd RMSE. Natomiast najgorsze wyniki spośród badanych sposobów otrzymał filtr Frost.

	SNR	RMSE
Lee	18.8555 dB	1.2497
Gamma	18.8574 dB	1.2489
Frost	18.8512 dB	1.2503

Tabela 4.2. Ocena jakości przefiltrowanych obrazów radarowych [źródło: opracowanie własne].

4.3.4. Podsumowanie

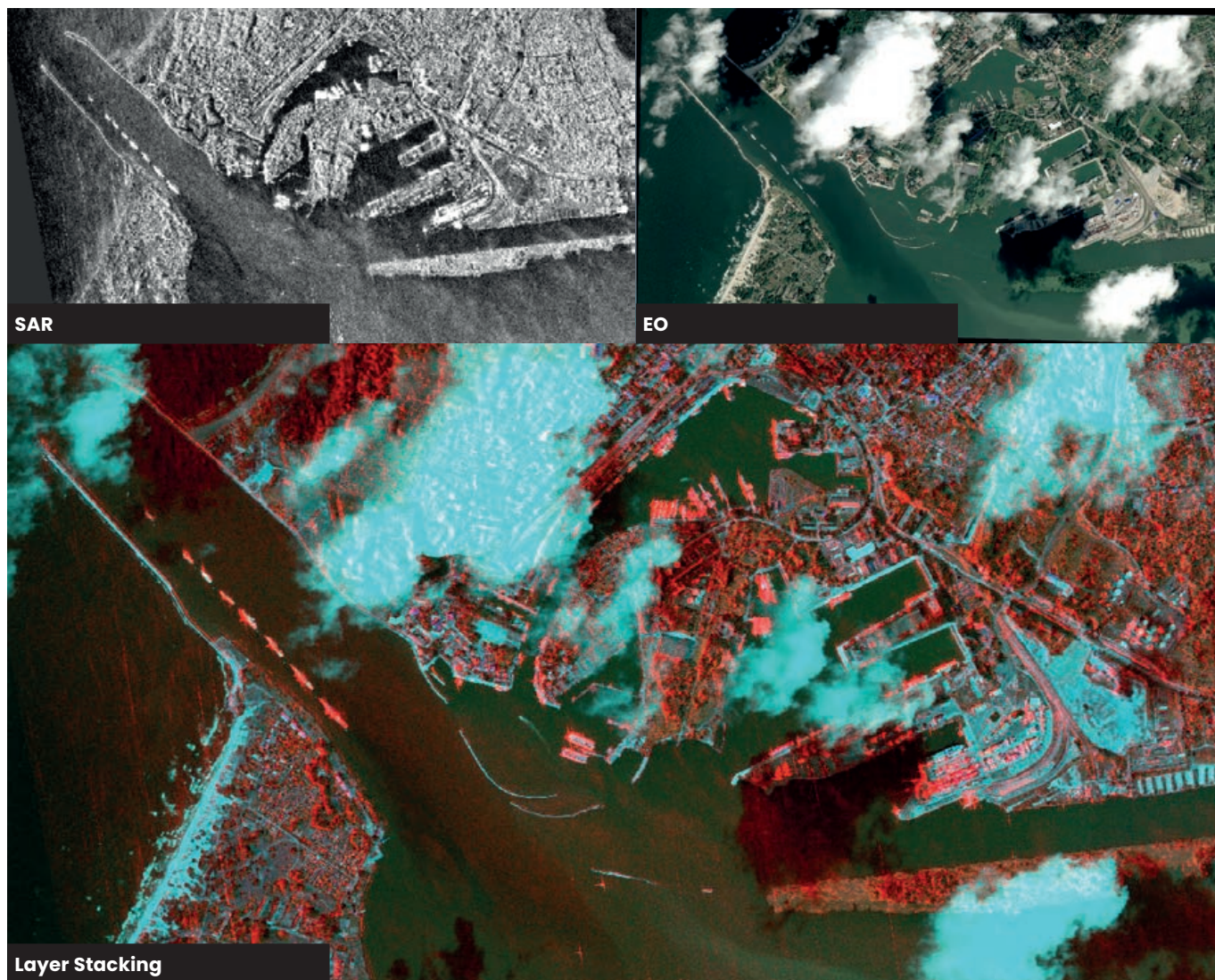
W wyniku przeprowadzonej oceny wizualnej i oceny jakości filtracji trzech filtrów okazało się, że wszystkie sposoby redukują szumy typu speckle na zobrazowaniu radarowym. Poprawa obrazu SAR usprawniła wykrycie sprzętu wojskowego stacjonującego w porcie w Bałtyjsku. Porównanie zastosowanych metod filtracji wizualnie nie przyniosło pożądanych efektów, ponieważ wyniki przeprowadzonych operacji są praktycznie identyczne i jest to trudne to wykrycia organoleptycznie.

Z punktu widzenia oceny jakości filtracji przy wykorzystaniu 2 wskaźników najlepsze wyniki otrzymał filtr Gamma. Niemniej jednak warto zaznaczyć, że wartości wskaźników były nieznacznie różne w przypadku wszystkich trzech filtrów, co oznacza, że wybór danego typu filtra nie ma znaczącego wpływu na końcową jakość obrazu.

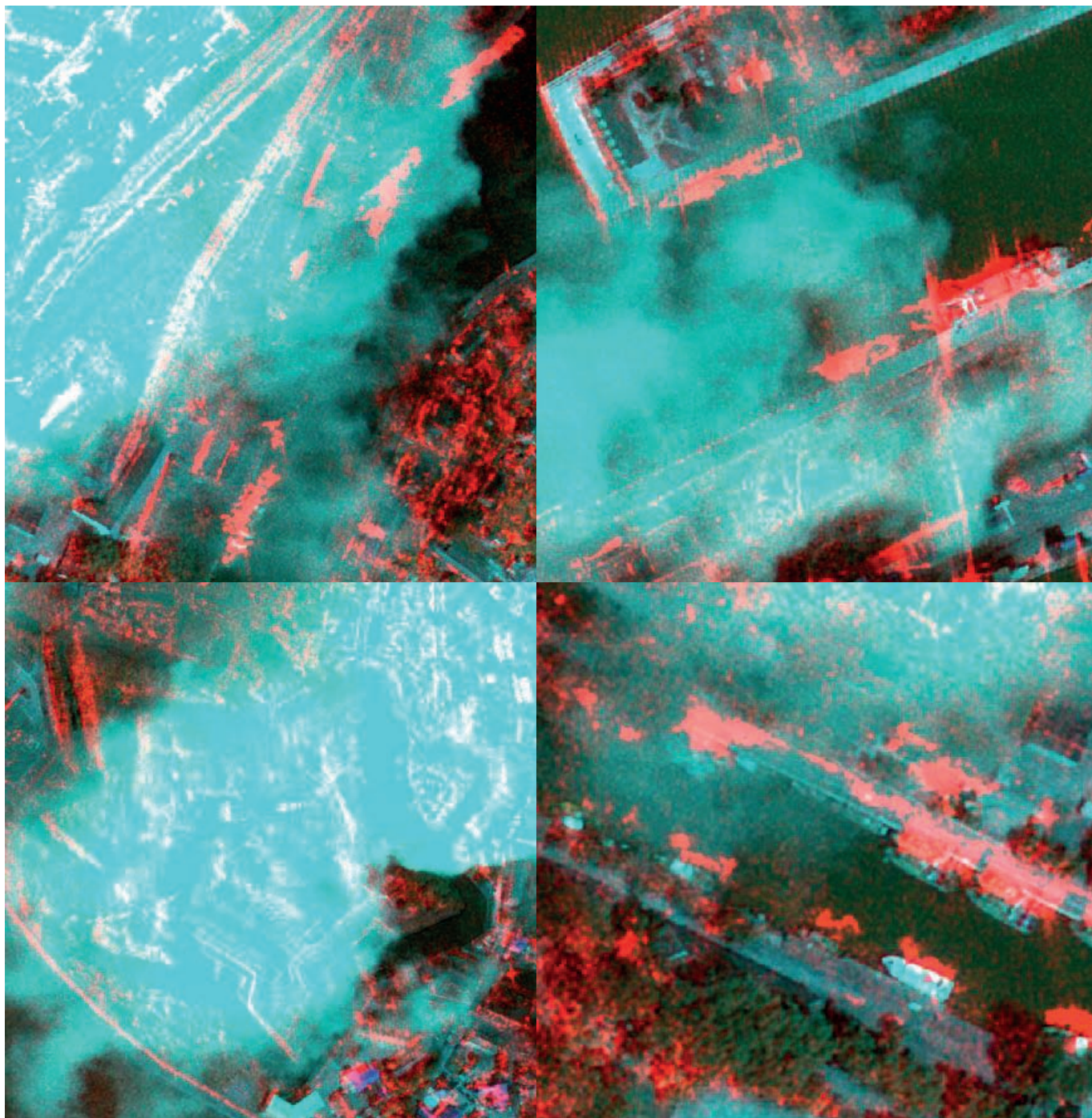
4.4. Ocena integracji danych EO i SAR

4.4.1. Ocena wizualna dwóch metod integracji

W celu dokładniejszej analizy portu w Bałtyjsku, zdecydowano się na zintegrowanie danych elektrooptycznych i radarowych. Wykorzystano dwie metody: layer stacking oraz pansharpening. Na rysunku 4.14. zestawiono ze sobą zdjęcia wykorzystane do połączenia danych pierwszą metodą oraz sam jej wynik. Zobrazowanie SAR zostało przedstawione przy użyciu kanału czerwonego (R), a zdjęcie EO wykorzystuje do tego kanały zielony (G) i niebieski (B). Dzięki temu połączeniu możliwe jest ukazanie obiektów tj. okrętów wojskowych w miejscach, które zostały zasłonięte przez chmury na zobrazowaniu wielospektralnym. Rysunek 4.15. przybliży sprzęt wojskowy, który przy zastosowaniu tej funkcji został dodatkowo wykryty i rozpoznany. Integracja danych z różnych źródeł pozwala na uzyskanie bardziej kompletnego obrazu i pozwala na dokładniejsze zidentyfikowanie obiektów w terenie, co jest szczególnie istotne w przypadku działań militarnych.



Rys. 4.14. Wynik metody Layer Stacking [źródło: opracowanie własne].



Rys. 4.15. Ocena wizualna metody Layer Stacking [źródło: opracowanie własne].



Rys. 4.16. Ocena wizualna pansharpeningu [źródło: opracowanie własne].

Podobne wnioski można wysnuć na podstawie rysunku 4.16. i 4.17. gdzie zaprezentowane są wyniki integracji danych metodą pansharpeningu. Ten sposób również przyczynia się do wykrycia obiektów w miejscach zachmurzonych, a co za tym idzie do efektywniejszego wyniku przeprowadzenia rozpoznania obrazowego bazy morskiej Federacji Rosyjskiej.



Rys. 4.17. Ocena wizualna obrazu wyostrzonego [źródło: opracowanie własne].

4.4.1. Ocena wizualna dwóch metod integracji

Integracje danych SAR i EO metodą Pansharpening dodatkowo została poddana ocenie jakości spektralnej przy użyciu wskaźników opisanych w rozdziale 4.1.2. Tabela 4.3. zestawia wyniki tej oceny

z wynikami otrzymanymi przy zastosowaniu wyostrozania obrazu danymi panchromatycznymi. Na podstawie wynik6w moŹna wywnioskować, Źe charakterystyki spektralne obrazu MS zostały zachowane w stopniu dobrym przez zintegrowany produkt.

Wskaźnik RMSE, ERGAS i PSNR wypadł nieznacznie gorzej od pansharpeningu metodą Broveya, przy czym naleŹy zaznaczyć, Źe jako obraz o wysokiej rozdzielczości zostało wykorzystane zobrazowanie SAR. Dwa wskaźniki SSIM oraz UIQI wyszły lepiej od wcześniejszej wspomnianej metody, a indeks Q4 uplasował wynik integracji danych SAR i EO na pierwszym miejscu względem wcześniejszych wynik6w łączenia obraz6w.

	RMSE	ERGAS	PSNR	SSIM	UIQI	Q4
SAR	0.2393	1.5077	12.4194	0.3797	0.9973	0.8217
Esri	0.0569	0.3583	24.9010	0.6327	0.9994	0.7785
IHS	0.0784	0.4937	22.1167	0.5756	0.9998	0.8048
Brovey	0.2155	1.3573	13.3327	0.2998	0.8465	0.6291

Tabela 4.3. Ocena jakości zintegrowanego obrazu [źródło: opracowanie własne].

4.5. Analiza przetworzonych zobrazowań EO i SAR

W tej części pracy analizie pod kątem wykrycia i identyfikacji sprzętu wojskowego zostanie poddane zobrazowanie elektrooptyczne wcześniejsze przetworzone przy wykorzystaniu pansharpeningu metodą Esri. Drugim analizowanym obrazem będzie przefiltrowane filtrem Gamma zobrazowanie SAR. Wyb6r tych danych do identyfikacji obiekt6w jest spowodowany przeprowadzonymi wcześniejszymi ocenami jakości.

4.5.1. Analiza przetworzonego zobrazowania EO

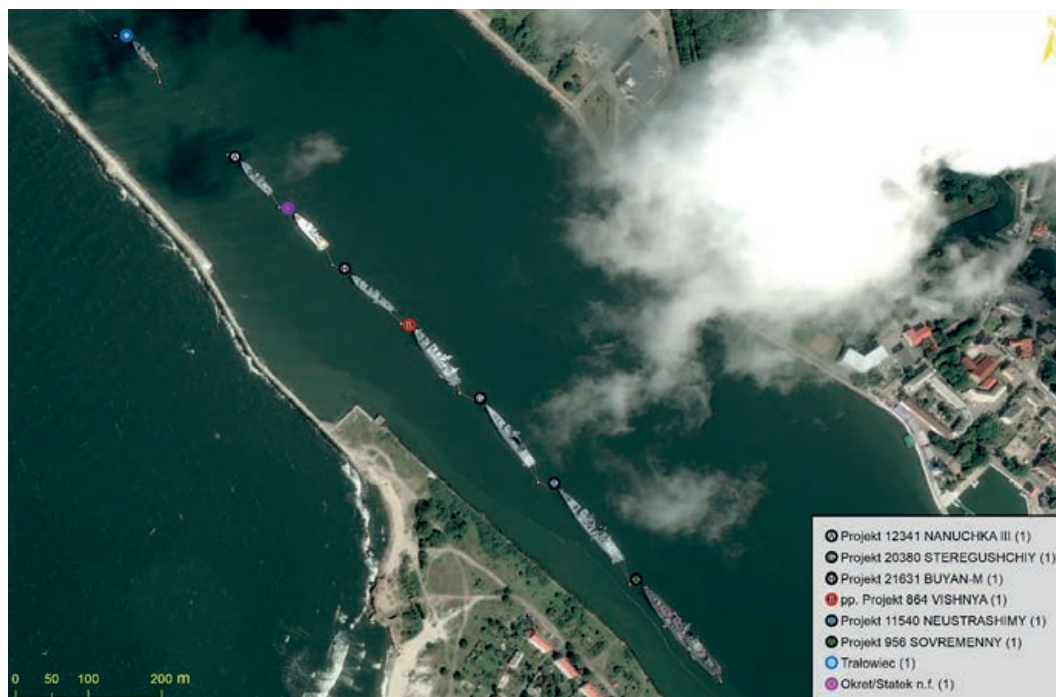
Na zobrazowaniu elektrooptycznym wykryte zostały 104 obiekty pływające. Spośród nich zidentyfikowano 30 okręt6w wojskowych oraz rozpoznano 44 jednostki r6żnego typu. Wyniki przeprowadzonej analizy przedstawione sę na rysunkach 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, na których przy uŹyciu wektoryzacji zaznaczone zostały wykryte, rozpoznane będz zidentyfikowane obiekty. Taka wysoka skuteczność interpretacji obrazu EO wynika z wykonanych na nim przetworzeń zwiększających rozdzielczość przestrzenną oraz z odpowiedniego doboru metody łączenia obrazu popartej o ocenę jakości spektralnej i wizualnej.



Rys. 4.18. Analiza północnej części portu w Bałtyjsku (Esri)
[źródło: opracowanie własne].



Rys. 4.19. Analiza centralnej części portu w Bałtyjsku (Esri)
[źródło: opracowanie własne].



Rys. 4.20. Analiza zachodniej części portu w Bałtyjsku (Esri) [źródło: opracowanie własne].

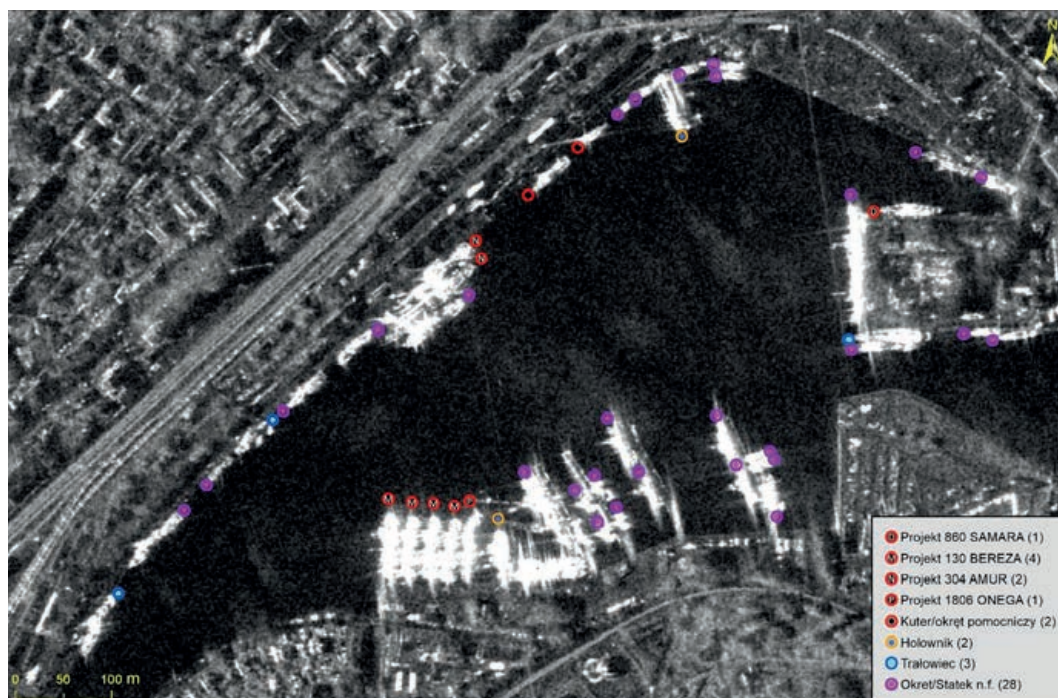


Rys. 4.21. Analiza wschodniej części portu w Bałtyjsku (Esri) [źródło: opracowanie własne].

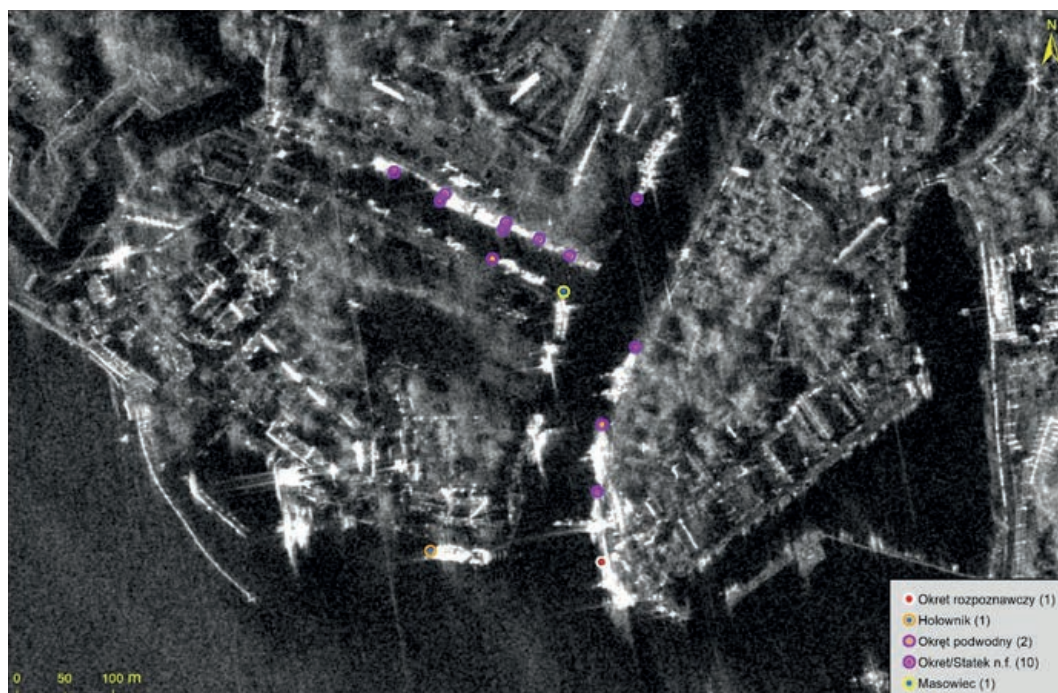
4.5.2. Analiza przetworzonego zobrazowania SAR

Na zobrazowanie radarowym wykryte zostało 80 obiektów pływających. Spośród nich zidentyfikowano 17 okrętów wojskowych oraz rozpoznano 19 jednostek różnego typu. Rysunki 4.22, 4.23, 4.24, 4.25 przedstawiają części przeanalizowanego zdjęcia, na których przy użyciu wektoryzacji zaznaczone

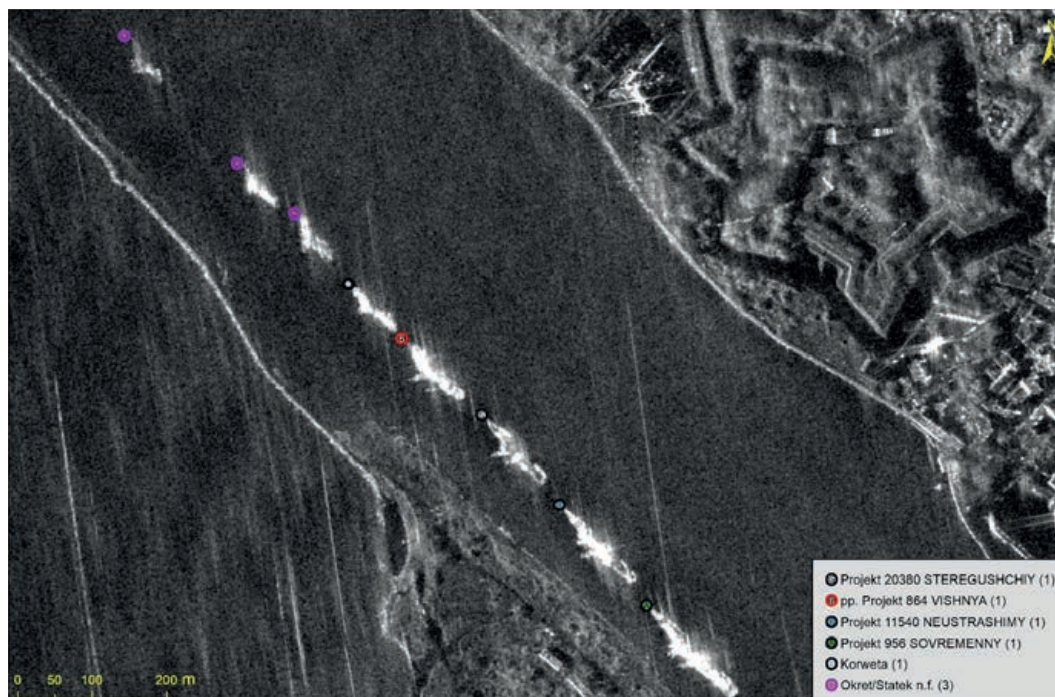
zostały wykryte, rozpoznane bądź zidentyfikowane obiekty. Niska skuteczność interpretacji obrazu SAR spowodowana jest w głównej mierze trudnością odczytywania tego typu danych. Zawierają one mniej szczegółowych informacji dotyczących wyglądu obiektów, przez co identyfikacja jednostek jest znacznie utrudniona.



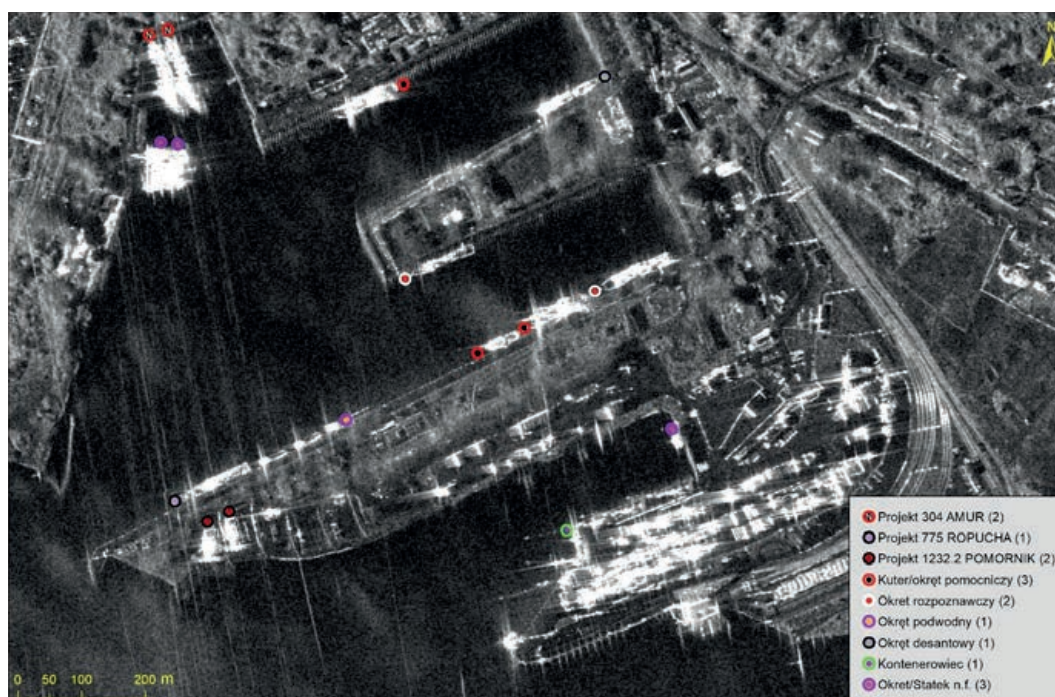
Rys. 4.22. Analiza północnej części portu w Bałtyjsku (Gamma) [źródło: opracowanie własne].



Rys. 4.23. Analiza centralnej części portu w Bałtyjsku (Gamma) [źródło: opracowanie własne].



Rys. 4.24. Analiza zachodniej części portu w Bałtyjsku (Gamma)
[źródło: opracowanie własne].



Rys. 4.25. Analiza wschodniej części portu w Bałtyjsku (Gamma)
[źródło: opracowanie własne].

4.5.3. Potencjał Floty Bałtyckiej

Potencjał danej struktury wojskowej to ogólna wartość, jaka wynika z jej zdolności do realizacji zadań wojskowych. Obejmuje on wszystkie zasoby, które jednostka posiada i które wpływają na jej zdolność bojową, m.in: ludzie, sprzęt, wyposażenie, uzbrojenie, technika, infrastruktura oraz szkolenie i doświadczenie żołnierzy. Potencjał jest oceniany przez dowództwo, które na jego podstawie podejmuje decyzje dotyczące użycia jednostki w określonych warunkach operacyjnych. Jest również stale monitorowany i analizowany, aby umożliwić skuteczne planowanie działań wojskowych i wykorzystanie dostępnych środków w najbardziej efektywny sposób.

Na podstawie analizy przetworzonych danych EO i SAR można dokonać oceny potencjału Floty Bałtyckiej w aspekcie znajdującego się tam sprzętu wojskowego. Wykryte zostały 104 okręty, w tym rozpoznano z nich 44, a 29 zidentyfikowano. W głównej mierze w porcie znajdują się jednostki wsparcia, takie jak: holowniki, ratunkowe łodzie projektu 23040, trałowce klasy Lida, Sonya, okręty warsztatowe klasy Amur, okręt hydrograficzny klasy Samara czy okręty rozpoznawcze m.in. klasy Onega. Na rysunku 4.20. i 4.24. przedstawione są główne okręty FB, ustawione do defilady. Flagowy niszczyciel rakietowy klasy Sovremenny wyposażony w 8 pocisków przeciwokrętowych o zasięgu do 120 km oraz w 48 pocisków ziemia – powietrze, ma również możliwość przewożenia jednego śmigłowca [10]. Kolejną jednostką jest fregata rakietowa Neustrashimy uzbrojona podobnie jak poprzedni okręt, ale dodatkowo posiada system przeciw okrętom podwodnym [26]. Korwety klasy Steregushchi oraz Bujan-M, również zasilają Flotę Bałtycką. Pierwsza z nich jest w stanie razić cele na odległość do 260 km przy użyciu 8 rakiet Kh-35 oraz posiada 12-ogniowy pionowy system obrony powietrznej S-350 Vityaz [12]. Bujan-M wyposażony jest w system Kalibr-NK uzbrojony w rakiety manewrujące 3M14 oraz w naddźwiękowe pociski przeciwokrętowe 3M55 Onik, takie wyposażenie umożliwia neutralizację celów na odległość 2000 km [18]. Warto także wspomnieć o okręcie rozpoznania radioelektronicznego klasy Vishnya oraz rozpoznawczym na obrazowaniu radarowym okręcie podwodnym. Możliwe, że jest to jednostka projektu 636.3 „Ałrosa” lub projektu 877 „Paltus”, pierwsza z nich jest wyposażona w system rakietowy „Kalibr” [15]. Ważną zdolnością Floty Bałtyckiej jest możliwość przeprowadzenia desantu na plażę. Wskazują na to zidentyfikowany okręt desantowy klasy Ropucha, który jest w stanie przerzucić 10 czołgów średnich i 340 ludzi [31] oraz dwa poduszkowce klasy Pomornik, mogące zabrać ładunek o łącznej masie 159 ton każdy [17].

4.6. Możliwości danych w zakresie widzialnym i radarowym oraz ich przetworzeń

4.6.1. Możliwości cyfrowego przetworzenia obrazowań EO i SARprzetworzeń

W wyniku przeprowadzonej analizy obrazowej obrazowań elektrooptycznych i radarowych

oraz ich wersji przetworzonych można ocenić możliwości cyfrowego przetworzenia obrazu w kontekście poprawy interpretacyjności danych satelitarnych. W tabeli 4.4. zestawiono liczby wykrytych, rozpoznanych i zidentyfikowanych jednostek pływających na surowych i przetworzonych zdjęciach EO i SAR. W przypadku danych elektrooptycznych mamy znaczną różnicę w liczbie wykrytych obiektów na obrazie przetworzonym w porównaniu ze zdjęciem surowym. Wyostrenie wejściowych danych metodą Esri poskutkowało wykryciem na zobrazowaniu 40 dodatkowych obiektów oraz rozpoznaniem i zidentyfikowaniem większej części okrętów stacjonujących w tym porcie. Korekcja radiometryczna wraz z filtracją danych SAR umożliwiło rozpoznanie 19 obiektów oraz zidentyfikowanie dodatkowych 15 okrętów. W sumie znaleziono o 6 więcej elementów sprzętu wojskowego znajdującego się w porcie w Bałtyjsku na przetworzonym zdjęciu radarowym.

	EO	Esri	SAR	Gamma
Wykryty	64	104	74	80
Rozpoznany	1	44	0	19
Zidentyfikowany	6	30	2	17

Tabela 4.4. Możliwości cyfrowego przetwarzania obrazu [źródło: opracowanie własne].

4.6.2. Możliwości zobrazowań w zakresie widzialnym

Na podstawie przeprowadzonej analizy oraz oceny zobrazowań satelitarnych pozyskanych w zakresie widzialnym można wysnuć następujące wnioski dotyczące ich możliwości interpretacyjnych:

- Umożliwiają szczegółową identyfikację i rozpoznanie różnych obiektów na obrazie, takich jak: pojazdy, budynki czy sprzęt wojskowy.
- Ułatwiają uzyskanie precyzyjnych danych (topografia, środowisko) na temat obszaru odpowiedzialności lub zainteresowania, w celu przygotowania IPB (Intelligence preparation of the battlefield).
- Umożliwiają wykorzystanie ich do planowania działań wojsk, lokalizowanie celów czy określenie strategii.
- Są stosunkowo łatwe do interpretacji dla osób nie posiadających specjalistycznej wiedzy w dziedzinie rozpoznania obrazowego, ponieważ przedstawiają obiekty w taki sam sposób, w jaki rejestruje je ludzkie oko.
- Obrazy elektrooptyczne generują mniejsze koszty ich pozyskiwania oraz są łatwo dostępne, ponieważ nie wymagają aż tak specjalistycznych sensorów.

4.6.3. Możliwości zobrazowań w zakresie radarowym

Na podstawie dokładnej analizy oraz oceny obrazów radarowych, można wyciągnąć następujące wnioski dotyczące ich możliwości interpretacyjnych:

- niewrażliwość na warunki atmosferyczne. Zobrazowania SAR nie są podatne na wpływ opadów deszczu, śniegu, mgły, dymu czy pyłu, co pozwala na uzyskiwanie obrazów powierzchni Ziemi nawet w trudnych warunkach.
- Możliwość uzyskania informacji w nocy. Radar działa na zasadzie emisji i odbicia fal elektromagnetycznych, dzięki temu do obrazowania nie jest mu potrzebne promieniowanie słoneczne.
- Pozyskiwanie danych pomimo występowania zachmurzenia nad danym obszarem zainteresowania.
- Krótszy interwał czasu pomiędzy dwoma kolejnymi akwizycjami tego samego obszaru przez brak wpływu wyżej wymienionych czynników na obraz wynikowy.
- Możliwość wykrycia obiektów ukrytych pod powierzchnią ziemi. Radar jest w stanie wykrywać obiekty ukryte pod powierzchnią ziemi, takie jak tunele, kryjówki czy magazyny.
- Możliwość pozyskiwania danych obrazowych dużych powierzchni Ziemi w krótkim czasie.

W tabeli 4.5. zestawione zostały liczby wykrytych, rozpoznanych i zidentyfikowanych jednostek pływających na zobrazowaniu EO i SAR. Na obrazie optycznym odnaleziono o 24 więcej obiektów niż na obrazie radarowym. Dwa razy więcej okrętów Floty Bałtyckiej zostało rozpoznanych lub zidentyfikowanych na zdjęciu w zakresie widzialnym, co potwierdza możliwości tego typu danych. Warto jednak zauważyć, że dzięki obrazowaniu w paśmie radarowym udało się wykryć okręt podwodny w miejscu zachmurzonym (rys. 4.25). Dlatego dobrym sposobem jest współpraca tych dwóch typów obrazowania, np. poprzez ich integrację przedstawioną na rysunkach 3.9. i 3.10.

	Wykryty	Rozpoznany	Zidentyfikowany
EO	104	44	30
SAR	80	19	17

Tabela 4.5. Liczba wykrytych, rozpoznanych i zidentyfikowanych obiektów [źródło: opracowanie własne].

Wnioski

Cele pracy dyplomowej zostały osiągnięte. Sformułowany problem badawczy zamieszczony we wstępie został rozwiązany oraz postawiona przez Autora hipoteza potwierdziła się w całości. Jednym z wyników pracy jest przeprowadzona analiza i ocena możliwości zobrazowań elektrooptycznych i radarowych do oceny potencjału części Floty Bałtyckiej stacjonującej w Bałtyjsku. Kolejnym rezultatem pracy jest analiza możliwości przeprowadzonych metod cyfrowego przetwarzania obrazu w kontekście poprawy interpretacyjności wykorzystanych danych satelitarnych do identyfikacji sprzętu wojskowego FB. Dodatkowe elementy wykonane w pracy to omówione satelitarne dane obrazowe, przedstawione informacje dotyczące charakterystyk danych elektrooptycznych i radarowych. Natomiast wykorzystując informacje z otwartych źródeł przeprowadzona została szczegółowa analiza Floty Bałtyckiej, która wesprze analityków przy monitorowaniu ruchów Marynarki Wojennej Federacji Rosyjskiej na Morzu Bałtyckim. Zakładane efekty prac badawczych powinny pozwolić na przyspieszenie realizacji cyklu rozpoznawczego, co w znaczącym stopniu przełoży się na poprawę świadomości sytuacyjnej Sił Zbrojnych Rzeczypospolitej Polskiej.

Przeprowadzone analizy wskazują na większe możliwości interpretacyjne zobrazowań elektrooptycznych niż radarowych do oceny części potencjału Floty Bałtyckiej. Na podstawie danych EO wykryto o 24 więcej obiektów niż na obrazie radarowym i aż dwa razy więcej okrętów wojskowych zostało rozpoznanych lub zidentyfikowanych na tego typu zdjęciu. Natomiast niewrażliwość danych SAR na zachmurzenia umożliwiło rozpoznanie na tym obrazie okrętu podwodnego. W związku z tym najlepszym sposobem oceny potencjału danej struktury wojskowej jest integracja tych dwóch rodzajów danych np. poprzez ich połączenie jedną z metod pansharpeningu.

Analizy odnoszące się do oceny możliwości wykonanych operacji cyfrowego przetwarzania obrazu jasno wskazują na znaczący wzrost zdolności do identyfikacji sprzętu wojskowego znajdującego się w porcie w Bałtyjsku. W wyniku wyostrenia danych elektrooptycznych metodą Esri na zobrazowaniu wykryto 40 dodatkowych obiektów oraz rozpoznano i zidentyfikowano znaczną część okrętów stacjonujących w tej bazie, bo 74 na 104 jednostki pływające. W przypadku danych SAR korekcja radiometryczna wraz z ich filtracją umożliwiła rozpoznanie 19 obiektów oraz zidentyfikowanie dodatkowych 15 okrętów w porównaniu do zdjęć surowych.

Najlepsze efekty wizualne przetworzenia danych elektrooptycznych uzyskało wyostrenie obrazu metodą Esri, wynikowy obraz najlepiej odwzorował barwy obrazu wielospektralnego. Ocena wizualna potwierdzona została przez 5 wskaźników jakości spektralnej, które wykazały najkorzystniejsze wartości dla tej metody. W przypadku przetworzonych danych radarowych ocena wizualna nie przyniosła pożądanych efektów, ponieważ wyniki przeprowadzonych filtracji trzema sposobami są praktycznie identyczne. Podobne wnioski można wysnuć na podstawie wskaźników do oceny jakości filtracji, których wyniki nieznacznie się od siebie różnią.

Analiza rozpoznawcza z wykorzystaniem informacji z otwartych źródeł wraz z analizami zobrazowań EO i SAR prowadzi do określenia potencjału Floty Bałtyckiej. Podlegają jej dwie bazy morskie w Bałtyjsku i Leningradzie. Główne siły stacjonują w Bałtyjsku, a jest to m.in. niszczyciel rakietowy klasy Sovremenny wyposażony w 8 pocisków przeciwokrętowych o zasięgu do 120 km oraz w 48 pocisków ziemia – powietrze. Niektóre z okrętów tej floty uzbrojone są w system Kalibr-NK wykorzystujący rakiety manewrujące, które umożliwiają neutralizację celów na odległość 2000 km. W bazie w Kronsztadzie bazują okręty podwodne klasy Varshavyanka, które również mogą być wyposażone w ten system. Jedną z głównych możliwości FB jest zdolność do przeprowadzenia desantu na plażę, przy pomocy poduszkowców klasy Pomornik oraz okrętów desantowych klasy Ropucha, które zostały zidentyfikowane na danych satelitarnych. Zgromadzenie takich sił Marynarki Wojennej Federacji Rosyjskiej, około 25 kilometrów od granicy z Rzeczpospolitą Polską, stwarza ogromne zagrożenie dla bezpieczeństwa naszego państwa nie tylko w kontekście militarnym, ale również w odniesieniu do bezpiecznego funkcjonowania infrastruktury krytycznej znajdującej się na obszarze basenu Morza Bałtyckiego.

Wykaz literatury

1. Alparone L, Baronti S, Garzelli A. et al, A global quality measurement of pan-sharpened multispectral imagery, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, październik 2004, s. 313 – 317.
2. Amarsaikhan D, Ganzorig M, Ache P. & Blotevogel H, The integrated use of optical and InSAR data for urban landcover mapping, International Journal of Remote Sensing, 15 marca 2007, s. 1161 – 1171.
3. Angelo J. A., Encyclopedia of Space and Astronomy, Infobase Publishing, 2014.
4. Badurska M, Integracja obrazów radarowych i optycznych dla potrzeb tworzenia map pokrycia terenu, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, 2007.
5. Behrendt P, Rosja: dok pływający uszkodził okręty, Konflikty.pl, 4 września 2020, artykuł dostępny na stronie: <https://bit.ly/3QNSgQQ> (data dostępu 30.03.2023).
6. Best A. R, Cumming A., „Open Source Intelligence (OSINT): Issues for Congress”, red. Paulson T. M., Intelligence Issues and Developments, Nova Science Publishers, 2008.
7. Byun Y., Choi J., Han Y., An Area-Based Image Fusion Scheme for the Integration of SAR and Optical Satellite Imagery, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, październik 2013, s. 2212 – 2220.
8. Chandel R, Gupta G, Image Filtering Algorithms and Techniques: A Review, Computer Science Department Shoolini University, październik 2013.
9. Cieślak J., Armia rosyjska – armia agresora: Wojsko w Obwodzie Kaliningradzkim [RAPORT], Defence 24, 30 kwietnia 2022, artykuł dostępny na stronie: <https://bit.ly/3khgRkT> (data dostępu 30.03.2023).
10. Defence 24, Niszczyciel rakietowy Floty Bałtyckiej stanie się okrętem muzealnym, 22 października 2016, artykuł dostępny na stronie: <https://bit.ly/3lr4oDm> (data dostępu 30.03.2023).
11. Domańska M., Kardaś S., Menkiszak M. et al, Twierdza Kaliningrad, coraz bliżej Moskwy, Ośrodek Studiów Wschodnich, październik 2019.
12. Dura M., Flota Pacyfiku otrzymuje pierwszą korwetę projektu 20380. Z opóźnieniem, Defence 24, 27 lipca 2017, artykuł dostępny na stronie: <https://bit.ly/3EwQBtP> (data dostępu 30.03.2023).
13. Dura M., Kutry hydrograficzne ochronią rosyjskie porty, Defence 24, 15 listopada 2015, artykuł dostępny na stronie: <https://bit.ly/3GFvqGs> (data dostępu 30.03.2023).
14. Dura M., Morska baza w Bałtysku coraz bardziej „lądowa” [ANALIZA], Defence 24, 9 marca 2019, artykuł dostępny na stronie: <https://bit.ly/3WbdHMM> (data dostępu 30.03.2023).
15. Dura M., Więcej rosyjskich okrętów podwodnych na Bałtyku [ANALIZA], Defence 24, 28 czerwca 2021, artykuł dostępny na stronie: <https://bit.ly/3XeWuCM> (data dostępu 30.03.2023).
16. Grotnik T., Armia 2021: Kontrakty na nowe okręty dla rosyjskiej floty, Zespół Badań i Analiz Militarynych, 25 sierpnia 2021, artykuł dostępny na stronie: <https://bit.ly/3khhw5R> (data dostępu 30.03.2023).
17. Grotnik T., Rosja: zakończono remont największego poduszgowca desantowego świata, Zespół Badań i Analiz Militarynych, 5 marca 2021, artykuł dostępny na stronie: <https://bit.ly/3ZDFTup> (data dostępu 30.03.2023).
18. Grotnik T., Rosyjska Marynarka Wojenna Zleca 2 Okręty Wojenne I 1 SSBN Przed Końcem 2022 Roku, Naval News, 2 stycznia 2023, artykuł dostępny na stronie: <https://bit.ly/3vPzChN> (data dostępu 30.03.2023).
19. Gruszczyńska M., Historia i wykorzystanie zdjęć radarowych, Polskie Towarzystwo Geograficzne, 1999.
20. Hejmanowska B., „Pasywne systemy teledetekcyjne”, red. Hejmanowska B., Wężyk P., Dane satelitarne dla administracji publicznej, Polska Agencja Kosmiczna, 2020.
21. Jachot S. M., Walkowiak M., Orych A., Rozpoznanie Obrazowe (IMINT) – kompendium słuchacza, 2021.
22. Jagalingam P., Hegde A. V., A Review of Quality Metrics for Fused Image, Aquatic Procedia, 2015, s. 133 – 142.
23. Jakomulska A., Sobczak M., Korekcja radiometryczna obrazów satelitarnych – metodyka i przykłady, Teledetekcja

- Środowiska, 2001.
24. Kjellén J., The Russian Baltic Fleet – Organisation and role within the Armed Forces in 2020, FOI, 2021.
 25. Klonus S., Comparison of pansharpening algorithms for combining radar and multispectral data, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008, s. 189 – 194.
 26. Konflity.pl, Fregaty projektu 1154 Jastrieb, 6 lutego 2010, artykuł dostępny na stronie: <https://bit.ly/3EsRL9C> (data dostępu 30.03.2023).
 27. Kramarczyk P., „Cechy satelitarnych systemów teledetekcyjnych”, red. Hejmanowska B, Wężyk P., Dane satelitarne dla administracji publicznej, Polska Agencja Kosmiczna, 2020.
 28. Lee J. K., Acharya T. D., Lee D. H., “Exploring Land Cover Classification Accuracy of Landsat 8 Image Using Spectral Index Layer Stacking in Hilly Region of South Korea”, Sensors and Materials, 2018, s. 2927 – 2941.
 29. Lee J. S., Jurkevich L., Dewaele P. et al, Speckle filtering of synthetic aperture radar images: A review, Remote Sensing Reviews, luty 1994.
 30. Lee J., Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, marzec 1980, s. 165–168.
 31. Łysoń M., Rosyjska flota desantowa wykorzystuje polskie Ropuchy, czyli okręty desantowe projektu 775, Chip, 5 sierpnia 2022, artykuł dostępny na stronie: <https://bit.ly/3IL59sf> (data dostępu 30.03.2023).
 32. Marbouti M., Remote sensing of sea ice properties and dynamics using SAR interferometry, Institute for Atmospheric and Earth System Research, 2022.
 33. Modzelewska K., Rosyjski statek szpiegowski opuścił Bałtyk? „Admirał Władimirski” niedaleko Szkocji, Wirtualna Polska, 15 listopada 2022, artykuł dostępny na stronie: <https://bit.ly/3COjBMJ> (data dostępu 30.03.2023).
 34. Mróz M., Mleczo M., „Obrazowanie radarowe”, red. Hejmanowska B, Wężyk P., Dane satelitarne dla administracji publicznej, Polska Agencja Kosmiczna, 2020.
 35. Mularz S., Pirowski T., Aspekty metodyczne integracji danych teledetekcyjnych w oparciu o metodę IHS i jej modyfikacje, Akademia Górniczo-Hutnicza, 2006.
 36. Muzyka K., Russian Forces in the Western Military District, Rochan Consulting, 9 grudnia 2020.
 37. Nitka A., Bujany-M, Zespół Badań i Analiz Militarnych, sierpień 2017, artykuł dostępny na stronie: <https://bit.ly/3WYCB37> (data dostępu 30.03.2023).
 38. Nitka A., Kolejne kutry przeciwdywerysyjne dla rosyjskiej Floty Bałtyckiej, Zespół Badań i Analiz Militarnych, 25 lipca 2021, artykuł dostępny na stronie: <https://bit.ly/3GVOqlo> (data dostępu 30.03.2023).
 39. Nitka A., Nowa jednostka hydrograficzna w składzie rosyjskiej Floty Bałtyckiej, Zespół Badań i Analiz Militarnych, 25 listopada 2022, artykuł dostępny na stronie: <https://bit.ly/3QvYkwV> (data dostępu 30.03.2023).
 40. Nitka A., Nowe jednostki Floty Bałtyckiej rozpoczęły próby morskie, Zespół Badań i Analiz Militarnych, 23 października 2022, artykuł dostępny na stronie: <https://bit.ly/3W0ZSQE> (data dostępu 30.03.2023).
 41. Nitka A., Rosyjska Flota Bałtycka: stan dzisiejszy i perspektywy [ANALIZA], Defence 24, 29 grudnia 2020, artykuł dostępny na stronie: <https://bit.ly/3PXu5ip> (data dostępu 30.03.2023).
 42. Orych A., Walczykowski P., Wyznaczanie terenowej zdolności rozdzielczej sensorów cyfrowych w oparciu o cele kalibracyjne, Zarząd Główny Stowarzyszenia Geodetów Polskich, 2010.
 43. Osińska-Skotak K., Potencjał interpretacyjny zdjęć wysokorozdzielczych – wpływ metody łączenia danych MS i PAN na wartość interpretacyjną zdjęć VHR, 2006.
 44. Osińska-Skotak K., Przegląd metod oceny jakości wyników integracji obrazów panchromatycznych i wielospektralnych, Teledetekcja Środowiska, styczeń 2015, s. 39 – 49.
 45. Osińska-Skotak K., Znaczenie korekcji radiometrycznej w procesie przetwarzania zdjęć satelitarnych, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, styczeń 2007.
 46. Pawłowski A., Rosja planuje modernizację kolejnych korwet projektu 1234, Konflikty.pl, 13 listopada 2019, artykuł dostępny na stronie: <https://bit.ly/3XcvUed> (data dostępu 30.03.2023).
 47. Quiñones J., Prieto F., Reduction of speckle noise by using an adaptive window, Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 25 maja 2012.

48. Renza D, Martinez E, Arquero A, A New Approach to Change Detection in Multispectral Images by Means of ERGAS Index, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, styczeń 2013.
49. Smadi A.A. Yang S, Mehmood A. et al, Smart pansharpening approach using kernel-based image filtering, The Institution of Engineering and Technology, 18 maja 2021, artykuł dostępny na stronie: <https://bit.ly/3J4KH6x> (data dostępu 30.03.2023).
50. Wężyk P., „Sztuczne satelity Ziemi”, red. Hejmanowska B, Wężyk P. Dane satelitarne dla administracji publicznej, Polska Agencja Kosmiczna, 2020.
51. Wprost.pl, Trzy rosyjskie okręty w pobliżu granic Łotwy, 4 maja 2015, artykuł dostępny na stronie: <https://bit.ly/3kbNKz7> (data dostępu 30.03.2023).
52. Ziemnicki P, Optyka czy radar – czym lepiej obserwować Ziemię?, Space24, 19 grudnia 2018.
53. Zygarlicka M, Wybrane metody przetwarzania obrazów w analizach czasowo-częstotliwościowych na przykładzie zakłóceń w sieciach elektroenergetycznych, Politechnika Opolska Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, 2011.
54. Strona internetowa Airbus.com – <https://www.airbus.com/en> (data dostępu 30.03.2023).
55. Strona internetowa Asterweb.jpl.nasa.gov – <https://asterweb.jpl.nasa.gov/> (data dostępu 30.03.2023).
56. Strona internetowa Copernicus.eu – <https://www.copernicus.eu/pl> (data dostępu 30.03.2023).
57. Strona internetowa Esri.com – <https://pro.arcgis.com/> (data dostępu 30.03.2023).
58. Strona internetowa Eumetsat.int – <https://www.eumetsat.int/our-satellites/meteosat-series> (data dostępu 30.03.2023).
59. Strona internetowa Iceye.com – <https://www.iceye.com/> (data dostępu 30.03.2023).
60. Strona internetowa Imagesatintl.com – <https://www.imagesatintl.com/> (data dostępu 30.03.2023).
61. Strona internetowa Landsat.gsfc.nasa.gov – <https://landsat.gsfc.nasa.gov/> (data dostępu 30.03.2023).
62. Strona internetowa Maxar.com – <https://www.maxar.com/> (data dostępu 30.03.2023).
63. Strona internetowa Modis.gsfc.nasa.gov – <https://modis.gsfc.nasa.gov/> (data dostępu 30.03.2023).
64. Strona internetowa Structure.mil.ru – <https://structure.mil.ru/> (data dostępu 30.03.2023).
65. Strona internetowa Wikipedia.org – <https://pl.wikipedia.org/> (data dostępu 30.03.2023).
66. Google Earth Pro.
67. Help programu ENVI.
68. Help programu SNAP.

Wykaz zamieszczonych rysunków i tabel

Rys. 1.1. Zobrazowanie elektrooptyczne w zakresie widzialnym z satelity Pleiades 1A	17
Rys. 1.2. Zobrazowanie panchromatyczne z satelity Pleiades 1A	18
Rys. 1.3. Zobrazowanie radarowe z satelity ICEYE X4	19
Rys. 2.1. Struktura Floty Bałtyckiej [24].	22
Rys. 2.2. Lokalizacja Bazy Marynarki Wojennej w Bałtyjsku [66].	23
Rys. 2.3. Lokalizacja portów Marynarki Wojennej w Obwodzie Leningradzkim [66].	23
Rys. 2.4. Lokalizacja jednostek wojskowych FB w Obwodzie Kaliningradzkim [66].	24
Rys. 2.5. Rejon odpowiedzialności Floty Bałtyckiej [źródło: opracowanie własne na podstawie: Kjellén J., The Russian Baltic Fleet – Organisation and role within the Armed Forces in 2020, FOI, 2021, s. 58].	27
Rys. 2.6. Strefy jednostek wojskowych zlokalizowanych w porcie w Bałtyjsku [źródło: opracowanie własne na podstawie: Google Earth Pro, zobrazowanie z dnia 10.10.2022].	29
Rys. 2.7. Podstawowe okręty stacjonujące w porcie w Bałtyjsku [źródło: opracowanie własne na podstawie: Google Earth Pro, zobrazowanie z dnia 10.10.2022].	29
Rys. 2.8. Elementy infrastruktury Bazy Morskiej FB w Bałtyjsku [źródło: opracowanie własne na podstawie: Google Earth Pro, zobrazowanie z dnia 10.10.2022].	34
Rys. 2.9. Strefy jednostek wojskowych zlokalizowanych w porcie w Kronsztadzie [źródło: opracowanie własne na podstawie: Google Earth Pro, zobrazowanie z dnia 14.08.2022].	35
Rys. 2.10. Okręty stacjonujące w porcie w Kronsztadzie [źródło: opracowanie własne na podstawie: Google Earth Pro, zobrazowanie z dnia 14.08.2022].	36
Rys. 2.11. Elementy infrastruktury Bazy Morskiej FB w Kronsztadzie [źródło: opracowanie własne na podstawie: Google Earth Pro, zobrazowanie z dnia 14.08.2022].zobrazowanie z dnia 10.10.2022].	37
Rys. 2.12. Elementy infrastruktury Bazy Morskiej FB w Łomonosowie [źródło: opracowanie własne na podstawie: Google Earth Pro, zobrazowanie z dnia 14.08.2022].	38
Rys. 2.13. Elementy infrastruktury Bazy Morskiej FB w Wyborgu [źródło: opracowanie własne na podstawie: Google Earth Pro, zobrazowanie z dnia 19.07.2020].	39
Rys. 3.1. Zobrazowanie EO po operacji pansharpeningu metodą IHS [źródło: opracowanie własne].	42
Rys. 3.2. Zobrazowanie EO po operacji pansharpeningu metodą Brovey'a [źródło: opracowanie własne].	43
Rys. 3.3. Zobrazowanie EO po operacji pansharpeningu metodą Esri [źródło: opracowanie własne].	45
Rys. 3.4. Wynik przeprowadzonej kalibracji radiometrycznej [źródło: opracowanie własne].	47
Rys. 3.5. Wynik korekcji geometrycznej i topograficznej [źródło: opracowanie własne].	49
Rys. 3.6. Zobrazowanie radarowe po filtracji filtrem Lee [źródło: opracowanie własne].	52
Rys. 3.7. Zobrazowanie radarowe po filtracji filtrem Gamma [źródło: opracowanie własne].	53
Rys. 3.8. Zobrazowanie radarowe po filtracji filtrem Frost [źródło: opracowanie własne].	54
Rys. 3.9. Zintegrowany obraz SAR i EO metodą Layer stacking [źródło: opracowanie własne].	57
Rys. 3.10. Zintegrowany obraz SAR i EO metodą Grama Schimdta [źródło: opracowanie własne].	58
Rys. 4.1. Analiza północnej części portu w Bałtyjsku (EO) [źródło: opracowanie własne].	60
Rys. 4.2. Analiza centralnej części portu w Bałtyjsku (EO) [źródło: opracowanie własne].	60
Rys. 4.3. Analiza zachodniej części portu w Bałtyjsku (EO) [źródło: opracowanie własne].	61
Rys. 4.4. Analiza wschodniej części portu w Bałtyjsku (EO) [źródło: opracowanie własne].	61
Rys. 4.5. Analiza północnej części portu w Bałtyjsku (SAR) źródło: opracowanie własne].	62

Rys. 4.6. Analiza centralnej części portu w Bałtyjsku (SAR) [źródło: opracowanie własne].	62
Rys. 4.7. Analiza zachodniej części portu w Bałtyjsku (SAR) [źródło: opracowanie własne].	63
Rys. 4.8. Analiza wschodniej części portu w Bałtyjsku (SAR) [źródło: opracowanie własne].	63
Rys. 4.9. Wyniki metod pansharpeningu [źródło: opracowanie własne].	64
Rys. 4.10. Wyniki metod pansharpeningu (zblżenia) [źródło: opracowanie własne].	65
Rys. 4.11. Wizualne porównanie obrazów wyostrzonych z obrazem MS [źródło: opracowanie własne].	66
Rys. 4.12. Wyniki filtracji [źródło: opracowanie własne].	74
Rys. 4.13. Porównanie wyników filtracji [źródło: opracowanie własne].	75
Rys. 4.14. Wynik metody Layer Stacking [źródło: opracowanie własne].	79
Rys. 4.15. Ocena wizualna metody Layer Stacking [źródło: opracowanie własne].	80
Rys. 4.16. Ocena wizualna pansharpeningu [źródło: opracowanie własne].	81
Rys. 4.17. Ocena wizualna obrazu wyostrzonego [źródło: opracowanie własne].	82
Rys. 4.18. Analiza północnej części portu w Bałtyjsku (Esri) [źródło: opracowanie własne].	84
Rys. 4.19. Analiza centralnej części portu w Bałtyjsku (Esri) [źródło: opracowanie własne].	84
Rys. 4.20. Analiza zachodniej części portu w Bałtyjsku (Esri) [źródło: opracowanie własne].	85
Rys. 4.21. Analiza wschodniej części portu w Bałtyjsku (Esri)[źródło: opracowanie własne].	85
Rys. 4.22. Analiza północnej części portu w Bałtyjsku (Gamma) [źródło: opracowanie własne].	86
Rys. 4.23. Analiza centralnej części portu w Bałtyjsku (Gamma)[źródło: opracowanie własne].	86
Rys. 4.24. Analiza zachodniej części portu w Bałtyjsku (Gamma)[źródło: opracowanie własne].	87
Rys. 4.25. Analiza wschodniej części portu w Bałtyjsku (Gamma)[źródło: opracowanie własne].	87
Tabela 1.1. Porównanie danych [źródło: opracowanie własne].	16
Tabela 2.1. Liczba okrętów Floty Bałtyckiej (2020r.) [24].	25
Tabela 2.2. Liczba oraz typ okrętów bojowych Floty Bałtyckiej (2020r.) [24].	25
Tabela 2.3. Liczba oraz typ okrętów pomocniczych Floty Bałtyckiej (2020r.) [24].	26
Tabela 2.4. Zestawienie rozpoznanych okrętów na zobrazowaniu z Google Earth Pro ze zdjęciami ze źródeł OSINT [źródło: opracowanie własne].	33
Tabela 4.1. Ocena jakości obrazów wyostrzonych [źródło: opracowanie własne].	72
Tabela 4.2. Ocena jakości przefiltrowanych obrazów radarowych [źródło: opracowanie własne].	77
Tabela 4.3. Ocena jakości zintegrowanego obrazu [źródło: opracowanie własne].	83
Tabela 4.4. Możliwości cyfrowego przetwarzania obrazu [źródło: opracowanie własne].	89
Tabela 4.5. Liczba wykrytych, rozpoznanych i zidentyfikowanych obiektów [źródło: opracowanie własne].	90

Streszczenie

Celem praktycznym pracy dyplomowej jest analiza i ocena możliwości zobrazowań elektrooptycznych i radarowych oraz ocena możliwości metod cyfrowego przetworzenia tych zobrazowań do poprawy ich interpretacyjności w celu analizy sprzętu wojskowego Floty Bałtyckiej. Celem poznawczym pracy jest omówienie satelitarnych danych obrazowych, przedstawienie charakterystyki zdjęć optycznych i radarowych oraz przeprowadzenie analizy rozpoznawczej Floty Bałtyckiej przy wykorzystaniu informacji z otwartych źródeł.

W części teoretycznej przedstawione są poszczególne programy obrazujące powierzchnie Ziemi oraz zestawione zostały ze sobą wady i zalety danych elektrooptycznych i radarowych. W kolejnym etapie została wykonana analiza rozpoznawcza, w której zaprezentowano strukturę organizacyjną, lokalizację, wyposażenie Floty Bałtyckiej oraz przeanalizowano zobrazowania pozyskane z otwartych źródeł ukazujące elementy infrastruktury oraz okręty FB.

W części praktycznej wykonano cyfrowe przetworzenia danych EO i SAR. Pierwszą operacją było wyostrenie zobrazowania elektrooptycznego metodą IHS, Brovey'a i Esri w programie ArcGis Pro. Następnie wykonano korekcję radiometryczną obrazu radarowego oraz jej wynik został poddany filtracji filtrem Lee, Gamma i Frost w programie SNAP. Ostatnim przetworzeniem była integracja danych EO i SAR metodą pansharpeningu oraz narzędziem Layer Stacking. W ostatnim rozdziale pracy dokonano analizy obrazowej surowych danych optycznych i radarowych. Oceniono jakość wyostrenia obrazu EO przy użyciu metody wizualnej, wskaźników do globalnej oceny jakości i do oceny jakości spektralnej. Przeanalizowano wizualnie integrację danych EO i SAR, jak również przy użyciu wskaźników jakości. Następnie ponownie dokonano analizy obrazowej zdjęć optycznych i radarowych, ale już po wykonanych przetworzeniach i na ich podstawie omówiono potencjał Floty Bałtyckiej. W ostatnim etapie praktycznym pracy dokonano oceny możliwości przeprowadzonych metod cyfrowego przetwarzania obrazu do poprawy interpretacyjności danych oraz oceny możliwości zobrazowań pozyskanych w zakresie widzialnym i radarowym.

W ostatnim etapie pracy przedstawione zostały wnioski odnoszące się do wcześniej przeprowadzonych analiz i ocen wraz z przypuszczeniami dotyczącymi zagrożeń ze strony Floty Bałtyckiej na podstawie oceny ich potencjału.

Abstract

The practical objective of the thesis is to analyse and evaluate the capabilities of electro-optical and radar imagery and to assess the possibilities of methods of digital processing of these images to improve their interpretability for the analysis of the military equipment of the Baltic Fleet. The cognitive aim of the work is to discuss satellite imagery data, to present the characteristics of optical and radar imagery, and to conduct a reconnaissance analysis of the Baltic Fleet using open-source information.

In the theoretical part, the different imaging programmes of the Earth's surface are presented and the advantages and disadvantages of electro-optical and radar data are juxtaposed. In the next stage, a reconnaissance analysis was carried out, in which the organisational structure, location, equipment of the Baltic Fleet was presented and imagery obtained from open sources showing infrastructure elements and FB ships was analysed.

In the practical part, digital processing of EO and SAR data was performed. The first operation was to sharpen the electro-optical imagery using the IHS, Brovey and Esri methods in ArcGis Pro software. This was followed by radiometric correction of the radar image and the result was filtered with Lee, Gamma and Frost filters in SNAP software. The last processing was the integration of the EO and SAR data using the pansharpening method and the Layer Stacking tool. In the last chapter of the thesis, an image analysis of the raw optical and radar data was performed. The quality of the EO image sharpening was assessed using a visual method, indicators for global quality assessment and for spectral quality assessment. The integration of EO and SAR data was analysed visually, as well as using quality indicators. Next, the imaging analysis of the optical and radar images was again carried out but after the processing performed, and the potential of the Baltic Fleet was discussed on this basis. In the final practical stage of the work, the possibilities of the digital image processing methods carried out to improve the interpretability of the data were evaluated and the capabilities of the images acquired in the visible and radar range were assessed.

In the final stage of the thesis, conclusions relating to the previously conducted analyses and assessments are presented, together with conjectures regarding threats from the Baltic Fleet based on the assessment of their potential.



**Komputerowe przygotowanie publikacji do druku sfinansowano ze środków
Narodowego Instytutu Wolności – Centrum Rozwoju Społeczeństwa Obywatelskiego.**



Sfinansowano ze środków Narodowego Instytutu Wolności –
Centrum Rozwoju Społeczeństwa Obywatelskiego
w ramach Rządowego Programu Rozwoju Organizacji Obywatelskich
na lata 2018–2030 PROO





Wydawca
Alioth Foundation
foundation.alioth.group



Warszawa
2024