



POLITECHNIKA GDAŃSKA
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji
i Informatyki



mgr inż. Andrzej Chybicki

**Algorytmy analizy i przetwarzania
danych z sonarów wielowiązkowych
w rozproszonych systemach GIS**

Rozprawa doktorska

Promotor:

dr hab. inż. Marek Moszyński, prof. nadzw. PG
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji
i Informatyki
Politechnika Gdańska

Gdańsk, 2010

*Chciałbym serdecznie podziękować mojemu
Promotorowi Profesorowi Markowi
Moszyńskiemu, jak również Doktorowi
Zbigniewowi Łubniewskiemu za cenną
pomoc podczas pisania pracy*

SPIS TREŚCI

WYKAZ OZNACZEŃ I SKRÓTÓW	3
OZNACZENIA	3
SKRÓTY.....	5
1. WPROWADZENIE	6
1.1. WSTĘP	6
1.2. TEZY PRACY	7
1.3. PRZEGLĄD ROZDZIAŁÓW	8
2. SONARY WIELOWIĄZKOWE ORAZ ICH ZASTOSOWANIE W ROZPROSZONYCH SYSTEMACH GIS.....	10
2.1. RÓWNANIE SONARU ORAZ JEGO PARAMETRY	10
2.2. SONARY WIELOWIĄZKOWE ORAZ CHARAKTERYSTYKA ICH DZIAŁANIA	15
2.3. OPIS WYBRANYCH ALGORYTMÓW BEAMFORMINGU	20
2.4. STRUKTURA I OPIS DANYCH OTRZYMYWANYCH Z SYSTEMÓW WIELOWIĄZKOWYCH.....	26
2.5. PRZYKŁADOWE ZASTOSOWANIA SONARÓW WIELOWIĄZKOWYCH W SYSTEMACH GIS	32
3. WYBRANE ZAGADNIENIA Z DZIEDZINY PRZETWARZANIA I KOMPRESJI DANYCH	41
3.1. WYBRANE ZAGADNIENIA ZWIĄZANE Z KOMPRESJĄ DANYCH	41
3.2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ALGORYTMÓW PRZETWARZANIA RÓWNOLEGŁEGO.....	52
3.3. PLATFORMA CUDA JAKO NARZĘDZIE KOMPRESJI DANYCH.....	55
3.4. SPECYFIKA KOMPRESJI DANYCH Z SONARU WIELOWIĄZKOWEGO.....	63
3.5. ANALIZA GŁÓWNYCH SKŁADOWYCH I JEJ ZASTOSOWANIE W KOMPRESJI DANYCH	67
4. ALGORYTMY ARCHIWIZACJI, KOMPRESJI I ANALIZY DANYCH POCHODZĄCYCH Z SONARÓW WIELOWIĄZKOWYCH.....	71
4.1. WYKORZYSTANIE TECHNIK REORGANIZACJI DANYCH I METOD KOMPRESJI OBRAZU DLA ZOBRAZOWAŃ AKUSTYCZNYCH TONI WODNEJ	72
4.2. ALGORYTMY ARCHIWIZACJI DANYCH PRZEZNACZONE DO DZIAŁANIA W CZASIE RZECZYWISTYM .	81
4.3. ZASTOSOWANIE ARCHITEKTURY CUDA DO KOMPRESJI ZOBRAZOWAŃ AKUSTYCZNYCH W CZASIE RZECZYWISTYM.....	93
4.4. ZASTOSOWANIE ANALIZY GŁÓWNYCH SKŁADOWYCH ORAZ TRANSFORMATY FALKOWEJ DO KOMPRESJI DANYCH BATYMETRYCZNYCH	101
5. WYBRANE ZASTOSOWANIA OPRACOWANYCH METOD W ROZPROSZONYCH MORSKICH SYSTEMACH GIS	111
5.1. PRZETWARZANIE ORAZ WIZUALIZACJA DANYCH DLA ROZPROSZONEGO MORSKIEGO SYSTEMU GIS	111
5.2. TRÓJWYMIAROWA WIZUALIZACJA DANYCH POCHODZĄCYCH Z SYSTEMÓW WIELOWIĄZKOWYCH DLA SYSTEMU GIS	121
5.3. ZASTOSOWANIE KOMPRESJI METODĄ PCA DO ZDALNEJ WIZUALIZACJI DANYCH SONAROWYCH .	126
5.4. KLASYFIKACJA RODZAJU DNA MORSKIEGO NA PODSTAWIE KĄTOWEJ ZALEŻNOŚCI ECHA JAKO PRZYKŁAD ANALIZY DANYCH SONAROWYCH.....	129
6. PODSUMOWANIE	137
BIBLIOGRAFIA.....	140

WYKAZ OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

Oznaczenia

α	– logarytmiczny współczynnik tłumienia
φ	– kąt pomiędzy kierunkiem padania sygnału sondującego, a kierunkiem pionowym
φ_v	– szerokość wiązki w kierunku przemieszczania się przetwornika
η	– sprawność
θ_i	– kąt padania fali akustycznej względem wektora normalnego
λ	– długość fali akustycznej oraz mnożnik Lagrange’a
ρ	– gęstość ośrodka
τ	– czas trwania sygnału sondującego
Φ	– całkowita równoważna wiązka stożkowa przetwornika sonaru dla rewerberacji powierzchniowych
Ψ	– całkowita równoważna wiązka stożkowa przetwornika sonaru dla rewerberacji objętościowych
$b(\cdot)$	– charakterystyka kierunkowa przetwornika
c	– prędkość propagacji fali akustycznej w ośrodku
k	– stała falowa
k_i	– liczba falowa fali padającej
p_a	– ciśnienie akustyczne
p_1	– jednostkowe ciśnienie akustyczne (1 μ Pa)
r	– odległość od źródła sygnału sondującego
s_s	– współczynnik rozpraszania fali akustycznej na dnie (zależny od kąta insonifikacji)
7-ZIP	– standard kompresji danych na licencji GNU LGPL
a_{ULA}	– liniowa macierz odbiorcza (ang. <i>Uniform Linear Array</i>)
C	– współczynnik kompresji
DI	– wskaźnik kierunkowości przetwornika (ang. <i>Directivity Index</i>)
DT	– próg detekcji (ang. <i>Detection Threshold</i>)
EL	– poziom echa (ang. <i>Echo Level</i>)
H	– entropia
I	– natężenie fali akustycznej
I_0	– natężenie fali akustycznej w odległości jednostkowej (1m) od źródła sygnału

I_1	– natężenie odniesienia $0.667 \cdot 10^{-18}$ W/m ² , odpowiadające ciśnieniu jednostkowemu $p_1=1\mu\text{Pa}$
I_{bs}	– natężenie fali rozproszonej wstecznie
I_i	– natężenie fali padającej
I_n	– natężenie szumu
I_R	– natężenie rewerberacji
I_s	– natężenie fali rozproszonej powierzchniowo
I_{th}	– wartość progowa natężenia fali rozproszonej
NL	– poziom szumu (ang. <i>Noise Level</i>)
P	– amplituda ciśnienia akustycznego
P_e	– moc szumu akustycznego
P_n	– moc szumu na wejściu odbiornika sonaru
P_R	– parametr Rayleigha
P_s	– moc sygnału na wejściu odbiornika sonaru
RAR	– standard kompresji danych
RL	– poziom rewerberacji (ang. <i>Reverberation Level</i>)
RL_s	– składowa powierzchniowa poziomu rewerberacji
RL_v	– składowa objętościowa poziomu rewerberacji
SL	– poziom źródła (ang. <i>Source Level</i>)
SPL	– spektralny poziom szumu (ang. <i>Spectral Noise Level</i>)
S_s	– siła wstecznego rozpraszania powierzchniowego
S_v	– siła wstecznego rozpraszania objętościowego
T	– przepływowość
TL	– straty transmisji (ang. <i>Transmission Losses</i>)
TS	– siła celu (ang. <i>Target Strength</i>)
W	– gęstość widmowa wysokości pofałdowanej powierzchni dna
Z_0	– impedancja akustyczna ośrodka dla fali płaskiej
ZIP	– standard kompresji danych

Skróty

AUV	–	autonomiczny pojazd podwodny (ang. <i>Autonomous Underwater Vehicles</i>)
CPU	–	procesor ogólnego przeznaczenia (ang. <i>Central Processing Unit</i>)
CUDA	–	Uniwersalna Architektura Procesorów Wielordzeniowych (ang. <i>Compute Unified Device Architecture</i>)
DGPS	–	różnicowy GPS (ang. <i>Differential Global Positioning System</i>)
DTM	–	cyfrowy model terenu (ang. <i>Digital Terrain Model</i>)
ECDIS	–	System Obrazowania Map Elektronicznych i Informacji Nawigacyjnych (ang. <i>Electronic Chart Display and Information System</i>)
FIR	–	filtr o skończonej odpowiedzi impulsowej (ang. <i>Finite Impulse Response Filter</i>)
GIS	–	System Informacji Geograficznej (ang. <i>Geographic Information System</i>)
GPS	–	system nawigacji satelitarnej (ang. <i>Global Positioning System</i>)
GPU	–	koprocesor graficzny (ang. <i>Graphics Processing Unit</i>)
MBSS, MBS	–	sonar wielowiązkowy (ang. <i>MultiBeam Sonar System</i>)
MSE	–	błąd średniokwadratowy (ang. <i>mean-squared error</i>)
OGC	–	organizacja OGC (ang. <i>Open Geospatial Consortium</i>)
PCA	–	analiza głównych składowych (ang. <i>Principal Component Analysis</i>)
PSNR	–	szczytowy stosunek sygnału do szumu (ang. <i>Peak Signal-to-Noise Ratio</i>)
RMSE	–	pierwiastek błędu średniokwadratowego (ang. <i>Root Mean Squared Error</i>)
RLE	–	kodowanie długości serii (ang. <i>Run Length Encoding</i>)
ROV	–	zdalnie sterowany pojazd podwodny (ang. <i>Remotely Operated Vehicles</i>)
RTD	–	technika tzw. obrotowej transmisji kierunkowej (ang. <i>Rotational Directional Transmission</i>)
SIS	–	Morski System Informacji Przestrzennej (ang. <i>Seafloor Information System</i>)
TVG	–	zasięgowa regulacja wzmocnienia (ang. <i>Time Varied Gain</i>)

1. WPROWADZENIE

1.1. Wstęp

Telemonitoring morski oraz szeroko rozumiane badania morza są ważnym elementem aktywności człowieka w sferze badań, nauki oraz gospodarki. Prowadzenie działań związanych z tworzeniem map dna, inspekcją nadbrzeży, umocnień, badaniem fauny morskiej pozwala zrozumieć procesy zachodzące w środowisku morskim oraz przyczynia się do rozwoju wielu gałęzi gospodarki takich jak transport morski, bezpieczeństwo, ochrona portów i inne. W ramach realizacji wyżej wymienionych zadań instytucje zlokalizowane na wybrzeżu, zarówno za granicą jak i w kraju (np. Instytut Morski, Morski Instytut Rybacki), zgromadziły wielkie ilości danych dotyczących różnych obiektów podwodnych oraz całych obszarów hydrosfery (np.: portów w Gdańsku i Gdyni, Zatoki Gdańskiej). Powszechnie stosowaną metodą archiwizacji tych danych jest kompresja zbiorów wynikowych za pomocą ogólnodostępnych narzędzi programistycznych takich jak RAR [72], ZIP [79][80] czy innych. Obecnie nie opracowano żadnego sposobu sprawnego przetwarzania danych mających na celu redukcję większej ilości informacji otrzymywanych z urządzeń przeznaczonych do zdalnego monitorowania środowiska morskiego. Co więcej, nie istnieją też metody pozwalające na archiwizację tych danych w czasie rzeczywistym.

Nowoczesne urządzenia pomiarowe stosowane w telemonitoringu morskim wykonują pomiary z użyciem tzw. metod szerokokątnego pokrycia dna (ang. *wide-angle coverage*) charakteryzujących się wysoką wydajnością w pozyskiwaniu informacji o środowisku morskim oraz dużą dokładnością uzyskanych wyników. Najczęściej w tym celu stosowane są systemy wielowiązkowe (ang. *multibeam systems – MBSS* lub *MBS*), które w chwili obecnej są w stanie zapisywać dane nie tylko o batymetrii dna, jak to się dzieje w typowych urządzeniach przeznaczonych do hydrografii morskiej, ale także dostarczają pełną informację na temat rozproszenia fali akustycznej od dna morza i innych obiektów podwodnych [16]. Ta nowa funkcjonalność jest szczególnie przydatna dla wielu grup użytkowników takich jak naukowcy czy hydrografowie z wielu powodów [6]. Przede wszystkim, oczekuje się że systemy wielowiązkowe mogą dostarczyć znacznie więcej informacji o obiektach podwodnych, gdyż w przeciwieństwie do danych z echosond jednowiązkowych, mają formę trójwymiarową [7]. Poza tym, fakt że mogą być jednocześnie używane przez hydrografów i

badaczy, czyni te urządzenia bardziej praktycznymi. Mimo licznych zalet wykorzystywania systemów MBSS, zbiory wynikowe przez nie dostarczane charakteryzują się dużym rozmiarem, a samo ich składowanie i archiwizacja podczas długich rejsów pomiarowych stanowi istotny problem.

W niniejszej pracy doktorskiej zajęto się problematyką efektywnego przetwarzania danych o środowisku morskim w aspekcie rozproszonych morskich systemów informacji przestrzennej. W pracy opisano podstawowe problemy związane z efektywnym przetwarzaniem informacji otrzymywanych z urządzeń przeznaczonych do monitoringu środowiska morskiego ze szczególnym uwzględnieniem sonarów wielowiązkowych. Przedstawione w ramach pracy metody mają zastosowanie przede wszystkim w dziedzinie akwizycji, integracji oraz wizualizacji danych w rozproszonych morskich systemach informacji przestrzennej, począwszy od tworzenia batymetrycznych map dna, poprzez prace hydrograficzne do badań naukowych włącznie.

W tym kontekście, głównym celem pracy jest stworzenie zestawu algorytmów przeznaczonych do efektywnego przetwarzania i archiwizacji wyników pomiarów wykonywanych systemami wielowiązkowymi, co jest szczególnie istotne w badaniach hydrograficznych oraz w różnych aplikacjach morskich systemów informacyjnych. Badania takie są również istotnym elementem programów badawczych w ramach wielu projektów o zasięgu europejskim i światowym.

W takim ujęciu, problem badawczy podjęty w pracy jest nowatorski, chociaż należy zaznaczyć, że zbliżona tematyka jest przedmiotem aktualnych badań ośrodków badawczych za granicą, nie posiada jednak, jak do tej pory, oddźwięku w postaci szerzej opublikowanych rezultatów.

1.2. Tezy pracy

Głównym celem pracy doktorskiej jest stworzenie zestawu algorytmów przeznaczonych do wydajnego przetwarzania i archiwizacji wyników pomiarów wykonywanych systemami wielowiązkowymi, których zastosowanie zwiększy efektywność prac badawczych związanych z telemonitoringiem obszarów morskich oraz usprawni akwizycję wyników podczas tego typu działań.

Tezy pracy zostały sformułowane następująco:

- 1) *Poprzez zastosowanie właściwych technik przetwarzania danych można zredukować rozmiar rekordów pochodzących z pomiarów sonarem wielowiązkowym ze współczynnikiem kompresji większym niż przy użyciu typowo stosowanych algorytmów kompresji plików.*
- 2) *Zastosowanie odpowiednich technik przetwarzania i kompresji danych z sonaru wielowiązkowego umożliwi zdalną wizualizację wyników sondowania w czasie rzeczywistym.*

Zastosowanie dedykowanych metod przetwarzania danych pomiarowych z sonarów wielowiązkowych pozwala na znacznie większą redukcję informacji pochodzących z systemów wielowiązkowych niż w przypadku stosowania standardowych narzędzi do kompresji plików. Ponadto, w wyniku opracowanych metod archiwizacji, będzie możliwy podgląd zawartości pliku bez konieczności dekompresji całego zbioru danych, co może być szczególnie przydatną cechą podczas przeglądania czy walidacji otrzymanych wyników pomiarów, zarówno w sferze badań naukowych jak i w zastosowaniach komercyjnych.

Opracowane metody przetwarzania danych będą także umożliwiały podgląd wyników sondowania w czasie rzeczywistym poprzez wykorzystanie łączy bezprzewodowych o bardzo niskiej przepustowości. Zaproponowane rozwiązania będą miały zastosowanie w rozproszonych systemach GIS, w których akwizycja, składowanie oraz wizualizacja danych odbywa się w fizycznie różnych miejscach.

1.3. Przegląd rozdziałów

Po rozdziale wprowadzającym, rozdział drugi niniejszej rozprawy przedstawia zagadnienia związane z teoretycznymi oraz praktycznymi aspektami działania systemów wielowiązkowych. W rozdziale zamieszczono zarys teorii z dziedziny hydroakustyki dotyczącej działania systemów MBSS, zawarto w nim opis równania sonaru oraz podstaw algorytmów filtracji przestrzennej. Następnie, przedstawiono syntaktyczną analizę danych otrzymywanych z systemów MBSS. Rozdział zakończono opisem istniejących i popularnych systemów klasy GIS przeznaczonych do obróbki i wizualizacji omówionych danych.

Rozdział trzeci jest wprowadzeniem w problematykę teorii informacji oraz zagadnień związanych z kompresją danych. Omówiono w nim także charakterystykę przetwarzania danych w środowisku obliczeń równoległych oraz przedstawiono specyfikę tworzenia aplikacji na wielordzeniowej platformie CUDA. W kolejnych sekcjach opisano problematykę

przetwarzania danych pochodzących z systemów wielowiązkowych oraz omówiono aspekty stosowania metod redukcji wymiaru przestrzeni w kompresji danych.

Rozdział czwarty, będący opisem oryginalnego dorobku autora, zawiera opis algorytmów przetwarzania i archiwizacji danych pochodzących z systemów MBSS. W pierwszej części omówiono charakterystykę opracowanych algorytmów typu *offline* przeznaczonych do archiwizacji danych sonarowych, następnie opisano zaproponowaną optymalizację metody kodowania Huffmana dla potrzeb kompresji rekordów sonarowych w czasie rzeczywistym oraz przedstawiono jej modyfikację dla celów implementacji na wielordzeniowej architekturze CUDA. Rozdział zakończono opisem metod wykorzystujących analizę głównych składowych oraz transformatę falkową do kompresji danych batymetrycznych otrzymywanych bezpośrednio z systemu sonarowego. Pokazano także potencjalne korzyści wynikające ze stosowania proponowanych rozwiązań.

Rozdział piąty stanowi opis oryginalnego dorobku autora wykonywanego w zespole badawczym realizującym projekt naukowy MNiSW 0137/R/Z/T02/06/01, którego celem było stworzenie internetowego systemu informacji przestrzennej przeznaczonego do monitorowania składników ekosystemów morskich. W rozdziale zamieszczono opis algorytmów przetwarzania i wizualizacji danych sonarowych oraz procesu ich integracji z innymi danymi o charakterze przestrzennym. W drugiej części rozdziału opisano metody klasyfikacji rodzaju dna morskiego oparte o dane pochodzące z systemów wielowiązkowych, które są komplementarne do przedstawionych w rozdziale 4 metod przetwarzania danych.

W rozdziale szóstym zawarto podsumowanie rozprawy oraz ocenę opracowanych metod przetwarzania danych pod kątem otrzymanych wyników, zakresu ich stosowalności oraz ograniczeń. Wymieniono także oryginalne i najbardziej znaczące aspekty pracy oraz przedstawiono korzyści wynikające z ewentualnego wdrożenia proponowanych rozwiązań w praktyce.

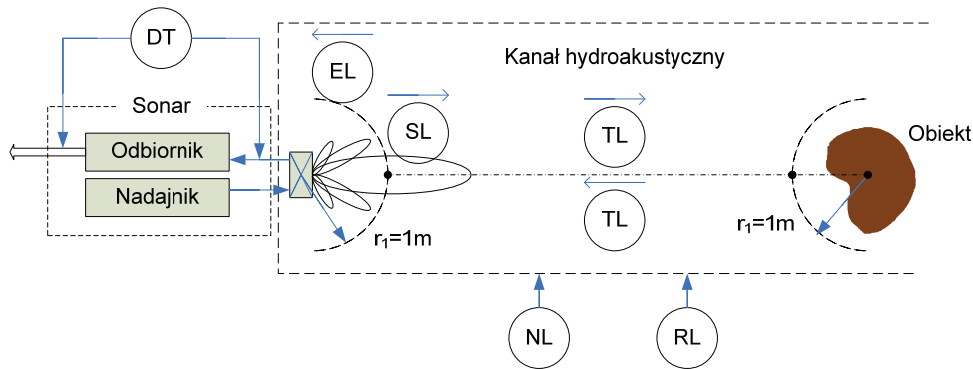
2. SONARY WIELOWIĄZKOWE ORAZ ICH ZASTOSOWANIE W ROZPROSZONYCH SYSTEMACH GIS

Sonary wielowiązkowe są zaawansowanymi urządzeniem integrującymi rozwiązania z dziedziny hydroakustyki, cyfrowego przetwarzania sygnałów oraz przetwarzania danych, przeznaczonymi do mapowania oraz obrazowania różnych elementów środowiska morskiego. Zasada działania sonaru wielowiązkowego wykorzystuje zjawisko rozproszenia się fali akustycznej na niejednorodnościach fizycznych ośrodka wodnego w celu wydobycia informacji o właściwościach samego środowiska oraz obiektów podwodnych, włączając w to również dno i powierzchnię morza [69]. Obecnie, systemy wielowiązkowe są jednym z najczęściej stosowanych urządzeń w zakresie zdalnego monitoringu środowiska morskiego. Wykorzystuje się je między innymi do inspekcji różnego rodzaju obiektów i zjawisk podwodnych takich jak rzeźba dna morskiego, przeszkody nawigacyjne, budowle hydrotechniczne, rurociągi oraz do innych działań związanych z eksploatacją zasobów rzek, mórz oraz oceanów.

W przeciwieństwie do wcześniej wytwarzanych sonarów przeznaczonych jedynie do tworzenia map batymetrycznych, obecnie produkowane echosondy wielowiązkowe produkują znaczne ilości danych podczas rejsów pomiarowych, pozwalając jednocześnie na dokładną obserwację i analizę obiektów podwodnych, także tych nie znajdujących się bezpośrednio na dnie [7]. Otrzymywana dokładność pomiarów oraz przydatność wyników wiąże się także z koniecznością stosowania wyrafinowanych technik związanych z przetwarzaniem danych, integracją z zaawansowanymi systemami informatycznymi oraz narzędziami wizualizacji [5][23]. W rozdziale zamieszczono opis najistotniejszych zagadnień teoretycznych związanych z działaniem echosond wielowiązkowych oraz przedstawiono ogólną charakterystykę systemów GIS, w których systemy MBSS są wykorzystywane.

2.1. Równanie sonaru oraz jego parametry

Równanie sonaru, które w postaci logarytmicznej opisuje podstawowe zależności pomiędzy głównymi parametrami systemu hydroakustycznego, przedstawia bilans energetyczny parametrów charakteryzujących główne moduły systemu w trzech kategoriach, a mianowicie związane z: urządzeniem hydroakustycznym (sonarem), kanałem hydroakustycznym (ośrodkiem) i obiektem. Transmisję i odbiór sygnałów w systemie hydrolokacyjnym przedstawiono schematycznie na rys. 2.1.



Rys. 2.1. Podstawowy schemat systemu hydrolokacyjnego

Potencjał nadawczy sonaru, reprezentuje parametr zwany poziomem źródła SL (ang. *source level*), który jest logarytmiczną miarą stosunku natężenia dźwięku I_0 promieniowanego przez przetwornik sonaru na jego osi akustycznej w odległości jednostkowej $r_1 = 1m$, do natężenia odniesienia I_1 :

$$SL = 10 \log \frac{I_0}{I_1}, \quad (2.1)$$

gdzie $I_1 = 0.667 \cdot 10^{-18} W / m^2$ jest natężeniem odniesienia odpowiadającym ciśnieniu jednostkowemu $p_1 = 1 \mu Pa$, $I = p_{rms}^2 / Z_0$, a Z_0 jest charakterystyczną impedancją akustyczną ośrodka.

W przypadku gdy znane są parametry techniczne nadajnika, poziom źródła SL wyznaczyć można również ze wzoru obliczeniowego:

$$SL = 171 + 10 \log P_e + 10 \log \eta / 100 + DI, \quad (2.2)$$

gdzie P_e jest mocą (elektryczną) nadajnika sonaru $[W]$, η jest sprawnością elektroakustyczną przetwornika nadawczego wyrażonego w procentach, natomiast DI (ang. *directivity index*) jest wskaźnikiem kierunkowości przetwornika $[dB]$ zdefiniowanym, jako:

$$DI = 10 \log \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} b^2(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi}, \quad (2.3)$$

gdzie $b(\theta, \varphi)$ jest charakterystyką kierunkową przetwornika we współrzędnych sferycznych (θ, φ, r) .

Straty energii związane z rozszerzaniem się frontu falowego i tłumieniem w trakcie propagacji w ośrodku wodnym fali akustycznej, syntetycznie ujmuje parametr zwany stratą transmisji TL (ang. *transmission loss*). Jest on logarytmiczną miarą stosunku natężenia

zmierzonego w odległości r od źródła względem natężenia w odległości jednostkowej ($r_1 = 1m$):

$$TL = 10 \log \frac{I_{(r)}}{I_{(r_1)}}. \quad (2.4)$$

Przy założeniu sferycznego modelu propagacji fali, najczęściej występującego w praktyce (przynajmniej dla głębszych wód oceanicznych), natężenie dźwięku, będące strumieniem przepływu mocy przez powierzchnię $I = P/S$, maleje proporcjonalnie do kwadratu odległości r i w konsekwencji straty na rozprzestrzenianie (związane z rozszerzeniem się frontu falowego) wyrażają się zależnością: $TL_r = 20 \log(r/r_1)$. Z kolei, straty na tłumienie są proporcjonalne do odległości r , ze współczynnikiem proporcjonalności równym logarytmicznemu współczynnikowi tłumienia α : $TL_t = \alpha r$ [76]. W rezultacie, straty transmisji dla sferycznego modelu propagacji można zapisać w postaci:

$$TL = 20 \log \left(\frac{r}{r_1} \right) + \alpha r. \quad (2.5)$$

Oprócz strat transmisji, kanał hydroakustyczny charakteryzują jeszcze dwa inne parametry równania sonaru opisujące zakłócenia, a mianowicie: poziom szumów i poziom rewerberacji.

Szumy akustyczne ośrodka morskiego w zakresie częstotliwości ultradźwiękowych od kilkunastu do kilkuset kHz, na których pracuje większość sonarów i echosond, wywoływane są przez dwa główne czynniki: falowanie morza oraz zjawiska termiczne. Fenomenologia szumów falowania opisana jest krzywymi Knudseny reprezentującymi zależność spektralnego poziomu szumu od częstotliwości, w której parametrem jest stan morza [76]. Spektralny poziom tych szumów spada wraz z częstotliwością w tempie około 5 decybeli na oktawę. Szumy te dominują w zakresie niższych częstotliwości tj. do ok. 50kHz. Z kolei w zakresie wyższych częstotliwości – powyżej 100kHz, decydującą rolę odgrywa szum termiczny, którego spektralny poziom, zgodnie z prawem Stefana-Boltzmann, rośnie z częstotliwością w tempie równym 6 decybeli na oktawę, co oznacza kwadratową zależność gęstości widmowej mocy szumu od częstotliwości [76].

Poziom szumu NL (ang. *noise level*), zdefiniowany jest jako logarytmiczna miara stosunku natężenia szumu zmierzonego na wejściu odbiornika do natężenia jednostkowego:

$$NL = 10 \log \frac{I_n}{I_1}. \quad (2.6)$$

Poziom szumów NL , który określony jest w paśmie odbiornika W , zależy jest od spektralnego poziomu szumu SPL (ang. *spectrum noise level*), który jest logarytmiczną miarą gęstości widmowej mocy szumu w paśmie jednostkowym 1Hz. W zależności między poziomem szumu NL i spektralnym poziomem SPL wpisuje się zwykle nie tylko pasmo odbiornika wyrażone w decybelach, lecz również odbiorczy wskaźnik kierunkowości przetwornika DI . Wprawdzie liczbowo jest on równy wskaźnikowi kierunkowemu po stronie nadawczej, ma jednak inny sens fizyczny, opisuje bowiem stosunek sygnału do szumu przestrzennego dla przetwornika sonaru, względem przetwornika bezkierunkowego [76]:

$$NL = SPL + 10 \log W + DI. \quad (2.7)$$

Drugim parametrem związanym z występowaniem zakłóceń w kanale hydroakustycznym jest zjawisko rewerberacji. W odróżnieniu od szumu, rewerberacja jest zakłóceniem skorelowanym z sygnałem nadawanym, powstaje bowiem wskutek jego rozproszenia na niejednorodnościach akustycznych ośrodka. Ponadto, w przeciwieństwie do szumu, zwykła filtracja pasmowa w celu redukcji zakłóceń w przypadku rewerberacji nie daje z reguły dobrych wyników. Wynika to z faktu, iż widmo rewerberacji jest wąskopasmowe i pokrywa się z widmem sygnału nadawanego, co sprawia że ten zbiór zakłóceń jest znacznie trudniejszy do wyeliminowania [41].

Poziom rewerberacji RL (ang. *reverberation level*) jest logarytmiczną miarą stosunku natężenia rewerberacji I_R , zmierzonego na wejściu odbiornika, do natężenia jednostkowego:

$$RL = 10 \log \frac{I_R}{I_1}. \quad (2.8)$$

Tak określony, całkowity poziom rewerberacji, zawiera dwie składowe, a mianowicie: składową objętościową RL_V – pochodzącą od rozproszenia dźwięku na niejednorodnościach akustycznych (np. pęcherzyki gazu, plankton, ryby) znajdujących się w toni oraz składową powierzchniową RL_S – pochodzącą od rozproszenia na dnie i na powierzchni morza [76]

$$RL_V = SL - (20 \log r + 2\alpha r) + 10 \log(c\tau_s/2) + 10 \log \Psi + S_V, \quad (2.9)$$

$$RL_S = SL - (30 \log r + 2\alpha r) + 10 \log(c\tau_s/2) + 10 \log \Phi + S_S, \quad (2.10)$$

gdzie S_V , S_S są odpowiednio siłami wstecznego rozproszenia objętościowego i powierzchniowego, Ψ , Φ są całkami równoważnymi wiązkom stożkowym przetwornika sonaru dla rewerberacji objętościowych i powierzchniowych, a τ_s jest długością impulsu sondującego.

Akustyczne własności odbijające obiektu określa siła celu TS (ang. *target strength*), która zdefiniowana jest jako miara logarytmiczna stosunku natężenia dźwięku rozpraszanego wstecznie przez obiekt na kierunku źródła i zmierzonego w odległości jednostkowej od środka obiektu, do natężenia padającego w tym samym punkcie:

$$TS = 10 \log \frac{I_{bs}}{I_i} . \quad (2.11)$$

Ostatnim z syntetycznych parametrów równania sonaru jest próg detekcji DT (ang. *detection threshold*), który określony jest jako miara logarytmiczna stosunku mocy sygnału do mocy szumu na wejściu odbiornika sonaru wymaganego dla osiągnięcia założonego poziomu poprawnej detekcji [70]:

$$DT = 10 \log \frac{P_s}{P_n} . \quad (2.12)$$

Próg detekcji wiąże proces podejmowania decyzji na wyjściu odbiornika z wejściowym stosunkiem sygnału do szumu, co zaznaczono symbolicznie na rys. 2.1, gdzie umiejscowiono również pozostałe parametry równania sonaru.

Po zdefiniowaniu parametrów sonaru i przyporządkowaniu ich odpowiednim częściom składowym całego systemu hydroakustycznego, można sformułować problem detekcji obiektów w postaci równania sonaru. Podstawowym kryterium, dla którego otrzymuje się rozwiązanie równania, jest spełnienie warunku detekcji dla obiektu znajdującego się w odległości r od sonaru, który można sprowadzić do zapewnienia odpowiedniej wartości stosunku sygnału do szumu na wejściu odbiornika (progu detekcji DT), co można zapisać jako:

$$SL - 2TL + TS = NL + DT , \quad (2.13)$$

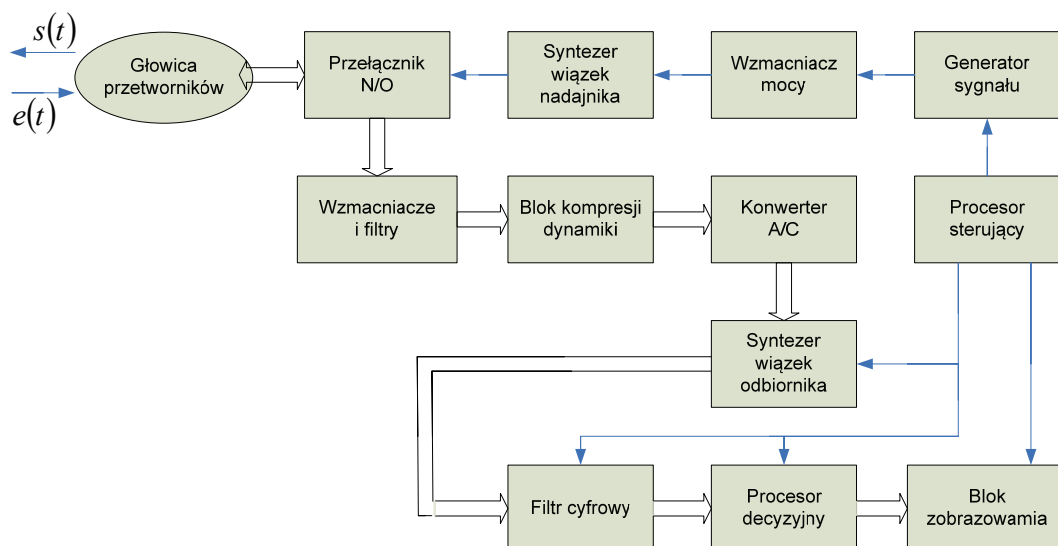
gdzie $2TL$ jest dwustronną stratą transmisji na drodze nadajnik-obiekt-odbiornik (por. rys. 2.1).

Wyrażenie po lewej stronie równania sonaru 2.13 ma sens składowej użytecznej odebranego sygnału, przedstawionej w mierze logarytmicznej i dlatego nosi nazwę poziomu echa EL (ang. *echo level*). Dla wykrycia obiektu, poziom ten, określony przez parametry sonaru, kanału i obiektu, musi być większy od poziomu szumu NL o wielkość progu detekcji DT . W przypadku, gdy w kanale hydroakustycznym dominującym zakłóceniem jest rewerberacja a nie szum, równanie 2.13 zachowuje tę samą postać, z tą tylko różnicą, że występujący po prawej stronie parametr NL , zastąpiony zostanie przez parametr RL . Należy zauważyć, że zależność zarówno warunków detekcji jak i parametrów równania od odległości

r obiektu czy zasięgu sonaru, nie jest wyrażona *explicite* w równaniu 2.13, gdyż zasięg zawarty jest w stratach transmisji TL zgodnie z równaniem 2.4.

2.2. Sonary wielowiązkowe oraz charakterystyka ich działania

Model transmisji danych w kanale hydroakustycznym jako równanie logarytmiczne pokazuje zależność między źródłem sygnału (nadajnikiem) a odbiornikiem. Model ten, wraz z zastosowaniem wyrafinowanych technik cyfrowego przetwarzania sygnałów, pozwala na wyznaczanie batymetrii dna oraz ocenę właściwości fizycznych obiektów podwodnych w systemach wielowiązkowych. Na rys. 2.2 przedstawiono typową strukturę funkcjonalną współczesnego sonaru z cyfrowym przetwarzaniem sygnałów.

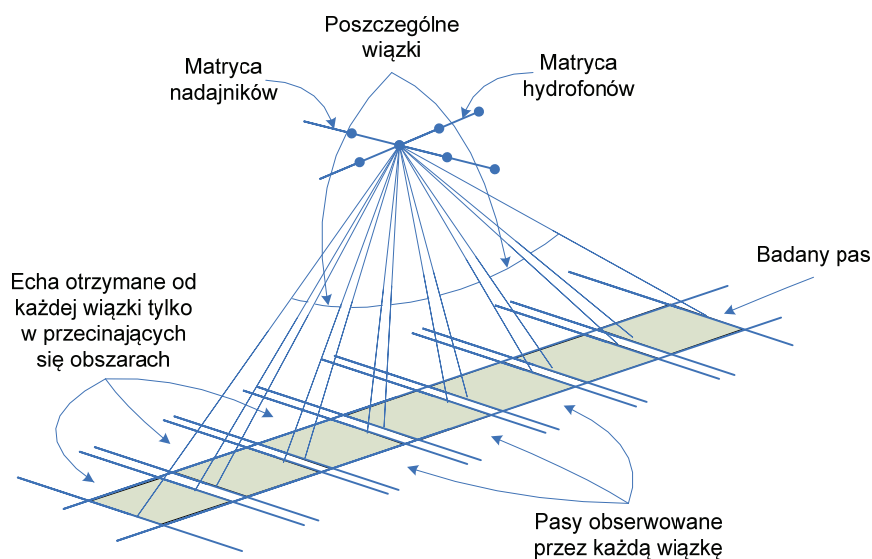


Rys. 2.2. Schemat blokowy sonaru wielowiązkowego

Sygnał sondujący $s(t)$ wytwarzany jest w generatorze przebiegów a następnie wzmacniany do odpowiedniego poziomu we wzmacniaczu mocy. Filtr przestrzenny, czy inaczej tzw. syntezer wiązek nadajnika (ang. *beamformer*), generuje sekwencję sygnałów opóźnionych o czas trwania sygnału sondującego T_s koniecznych do uformowania wielowiązkowej charakterystyki kierunkowej nadajnika sonaru, najczęściej przy pomocy techniki tzw. obrotowej transmisji kierunkowej RTD (ang. *rotational directional transmission*) [41]. Sygnały te zasilają kolejne elementy przetwornika sonaru, co pozwala na wielowiązkową transmisję sygnału sondującego do ośrodka wodnego. Sygnał echa $e(t)$, który powstaje w wyniku odbicia sygnału sondującego od obiektu, rejestrowany jest przez przetwornik sonaru wraz z omówionymi wyżej zakłóceniami powstającymi w kanale hydroakustycznym. Po zamianie na postać elektryczną w przetworniku, którego elementy

stanowią wejścia poszczególnych kanałów odbiornika, sygnał ten poddawany jest wstępnej obróbce analogowej w bloku wzmacniaczy i filtrów, a następnie zasięgowej regulacji wzmocnienia TVG (ang. *Time Varied Gain*) w bloku kompresji dynamiki. Po przetworzeniu w konwerterze analogowo-cyfrowym na postać cyfrową, sygnał echa przekazywany zostaje do syntezeru wiązek odbiornika. W bloku tym, w każdym kanale odbiorczym, sygnały z poszczególnych elementów przetwornika poddane zostają filtracji przestrzennej, co najczęściej polega na ich opóźnieniu i sumowaniu w celu uformowania wielowiązkowej charakterystyki kierunkowej odbiornika sonaru [8][41]. Sygnały z syntezeru wiązek poddawane są filtracji cyfrowej, a następnie przetwarzaniu w procesorze decyzyjnym, na wyjściu którego otrzymuje się statystyki detekcyjne, estymacyjne i inne, które po redukcji danych przedstawiane są w różnej formie w bloku zobrazowania [69].

Sonar wielowiązkowy – główny element systemów mapowania dna – cechuje wysoka rozdzielczość i duża szerokość kątowna obserwacji [69]. Zasadniczą ideę działania sonaru wielowiązkowego przedstawiono na rys. 2.3.

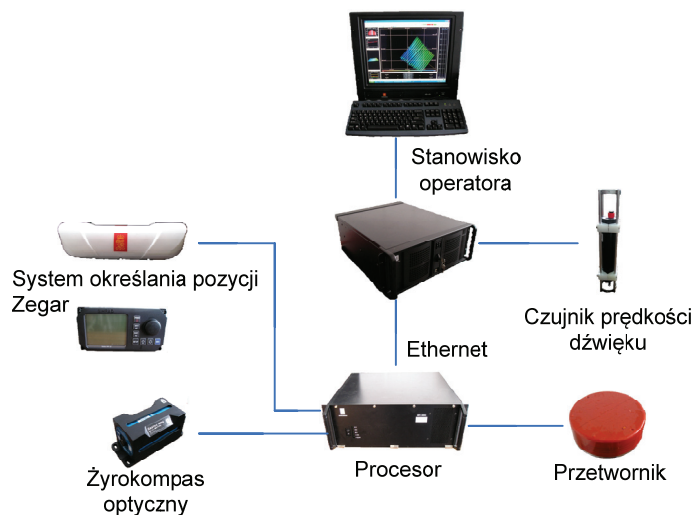


Rys. 2.3. Przykład procesu akwizycji danych dla sonaru wielowiązkowego

Przetwornik sonaru zapewnia odbiór sygnałów ech z różnych kierunków, a obszar pokrycia przeszukiwanego obszaru podzielony jest na quasi-równoległe pasy składające się z dużej ilości punktów pomiarowych. W efekcie otrzymywany jest dyskretny obraz batymetryczny dna o dużej rozdzielczości zależnej głównie od głębokości w kierunku pionowym obserwacji oraz ilości wiązek. Precyzja pomiarów jest uzależniona od błędów zewnętrznych i kalibracji systemu. O ile przeprowadzony prawidłowo proces kalibracji systemu pozwala na eliminację błędów systematycznych, błędy niesystematyczne są główną przyczyną degradacji wyników pomiaru. Zaliczyć do nich można błędy w stabilizacji

przetwornika wymuszone przez warunki zewnętrzne, błędy przechyłu poprzecznego i wzdłużnego oraz pionowego – tzw. „myszkowania” (ang. *roll, pitch, yaw*). Korekcja tych błędów jest realizowana na etapie syntezy (ang. *beamforming*) i przetwarzania wiązek.

Przykładem systemu mapowania dna jest system wielowiązkowy EM3002 firmy Kongsberg, którego schemat zaprezentowano na rys. 2.4



Rys. 2.4. Schemat funkcjonalny systemu wielowiązkowego EM3002

W skład systemu wchodzi echosonda wielowiązkowa o bardzo wysokiej rozdzielczości, przeznaczona do mapowania i inspekcji dna morskiego, spełniająca najwyższe wymagania w zakresie standardów w badaniach hydroakustycznych i hydrograficznych na wodach płytkich. Zasadnicze części składowe, z których jest zbudowana, to: przetwornik (głowica antenowa), procesor oraz stacja robocza.

Przetwornik odpowiedzialny jest za nadawanie i odbiór sygnału. Składa się z części antenowej i elektronicznej odpowiadającej za sterowanie wzmocnieniem oraz wstępne przetwarzanie sygnału. Jest odporny na korozję dzięki materiałowi, z którego jest zbudowany (tytan). Procesor sygnałowy odpowiada za proces syntezy wiązek, detekcję dna i sterowanie głowicą antenową (wzmocnienie, przeliczanie pozycji geograficznej, synchronizacja z zegarem zewnętrznym oraz stabilizacja). Stacja robocza klasy PC (ang. *operators station*), na której uruchomiona jest aplikacja będąca jednocześnie interfejsem użytkownika, odpowiada za instalację oprogramowania echosondy, kontrolę parametrów roboczych, zapis i składowanie danych, przeprowadzane testy oraz uruchamianie aplikacji do przetwarzania i wizualizacji danych z echosondy.

Minimalna głębokość przeszukiwań echosondy jest mniejsza od 1 metra (poniżej poziomu montażu przetwornika – głowicy antenowej ang. *transducer*), maksymalny zasięg

przeszukiwań uzależniony jest od parametrów środowiska zewnętrznego i wynosi około 300 metrów.

Niewielkie rozmiary i waga sprawiają, że system jest przenośny, co umożliwia jego łatwy montaż oraz instalację. Echosonda może być montowana na pojazdach podwodnych pływających i poruszających się po dnie nawet do głębokości 1500m.

Szerokość kątowna wiązki (ang. *beamwidth*) wynosi 1.5° przy częstotliwości sondowania (ang. *ping rate*) wynoszącej 40Hz, natomiast kompensację zakłóceń w stabilizacji pionowej przy takiej rozdzielczości zapewnia żyrokompas. Parametry te umożliwiają pełne pokrycie przeszukiwanego obszaru dna przy prędkości 10 węzłów (18 km/h). Na większych głębokościach pełne pokrycie (200–tu metrowy pas przeszukiwań) możliwe jest przy prędkościach do 20 węzłów.

System EM3002 pozwala na wykonywanie pomiarów z ustalonym stałym kątem między wiązkami lub ze stałą odległością między punktami pomiarowymi. Obszar przeszukiwań może być ograniczony zarówno co do szerokości wiązki jak i jego kąta bez zmniejszenia ilości wiązek. Zapewnia to technologia dynamicznego ogniskowania wiązek (ang. *dynamic focusing*). Kombinacja detekcji obwiedni i detekcji przejścia fazy przez 0 dla wiązek bocznych pozwala na wykonywanie pomiarów głębokości z dokładnością do 5 cm.

Nominalna częstotliwość pracy sonaru wynosi 300kHz i decyduje o niewielkich rozmiarach sonaru, stosunkowo dużym zasięgu i odporności na zakłócenia, a w szczególności odporności na zakłócenia pochodzące od turbulencji. Akustyczne obrazowanie jest częścią zintegrowaną systemu, otrzymywaną równolegle z wykonywanym mapowaniem dna. Dane surowe z obydwu rodzajów pomiarów mogą być zachowywane przed procesem syntezy wiązek (ang. *beamforming*). Integralną częścią systemu jest oprogramowanie do przetwarzania, obróbki (ang. *post-processing*) i wizualizacji danych.

Echosonda współpracuje z urządzeniami zewnętrznymi na kilku prędkościach transmisji. Poprzez złącze szeregowo podłączone są: czujnik przechyłu, żyrokompas, system określania pozycji, zegar zewnętrzny oraz system do określania prędkości dźwięku.

Główny procesor połączony jest z komputerem PC wykorzystując warstwę fizyczną technologii Ethernet. W tab. 2.1 zestawiono parametry techniczne systemu wielowiązkowego EM3002.

Tab. 2.1. Parametry techniczne systemu wielowiązkowego EM3002.

Lp.	Parametr	Wartość
1	Częstotliwość pracy	300 kHz
2	Częstotliwość przemieszczania (ang. ping)	40Hz
3	Maksymalna ilość wiązek w jednym pingu	160
4	Maksymalna liczba punktów pomiarowych	240
5	Szerokość wiązki	1.5 x 1.5°
6	Tryb pracy	równokątny, równoodległościowy
7	Kątowy obszar przeszukiwań	130°
8	Rozdzielczość wgłębna	1 cm
9	Długość impulsu	150 μs
10	Częstotliwość próbkowania	14, 14.3 lub 14.6 kHz (5cm)
11	Metoda syntezy wiązek (ang. beamforming)	opóźnienie czasowe z dynamicznym ogniskowaniem (ang. dynamic focusing in near-field)
12	Szybkość logowania danych	50 - 400 MB/h (maksymalna na głębokości 5-10 m)

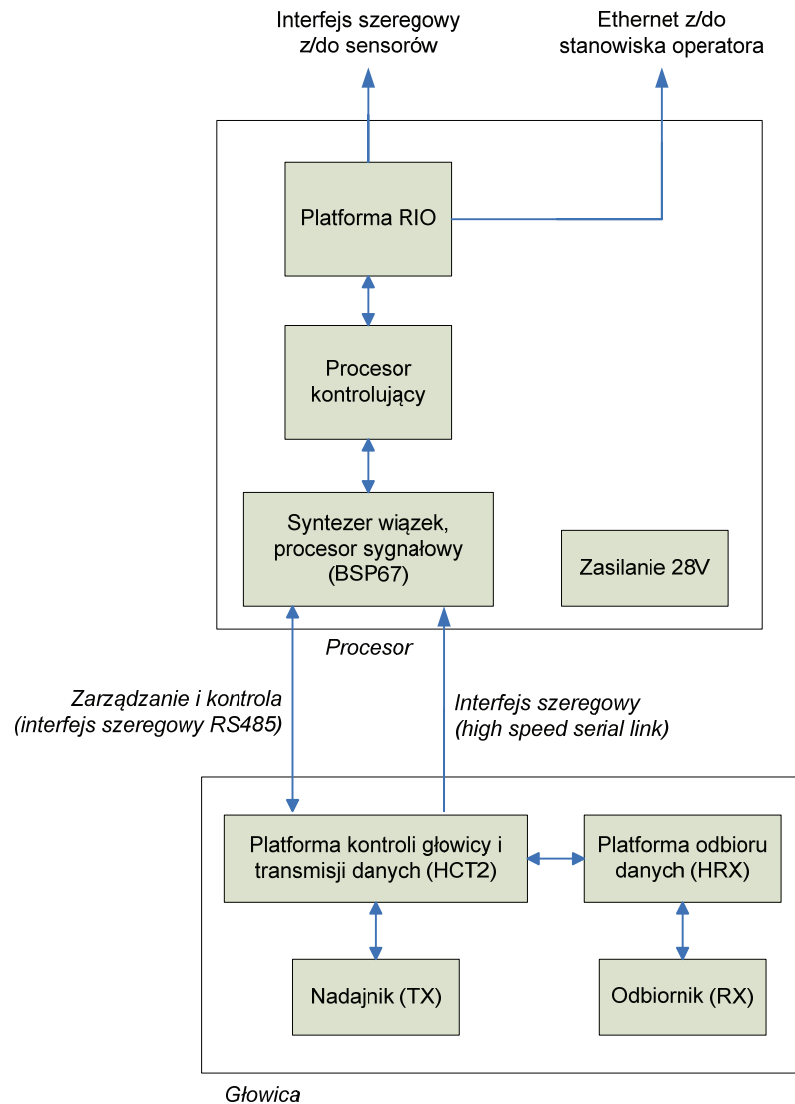
System EM 3002 wyposażony jest w kompas Seapath 20 firmy Seatex wykorzystujący system nawigacji globalnej GPS do określania kursu rzeczywistego. Zastępuje on żyrokompas, system GPS, urządzenie do pomiaru prędkości zwrotu (ang. *rate of turn indicator*) oraz zegar systemowy. Nie wymaga wstępnej kalibracji. Seapath 20 składa się z trzech zasadniczych części: dwóch anten GPS, jednostki obliczeniowej oraz wyświetlacza.

W odróżnieniu od żyrokompasu, dokładność pomiaru kursu jest niezależna od pozycji geograficznej i dynamiki statku. Kurs jest obliczany na podstawie znajomości pozycji dwóch rozstawionych o znaną i niezmienną odległość odbiorników GPS.

System Seapath 20 dostarcza także informacji o myśkowaniu statku, jego przechylach wzdłużnych i poprzecznych. Chwilowe zaniki sygnału GPS powodują automatyczne przełączanie systemu w inercyjny tryb pracy rejestrujący estymatę pozycji. Poprawa dokładności w określaniu pozycji, kursu, prędkości itp. uzyskiwana jest poprzez wykorzystanie informacji różnicowej z odbiornika DGPS (ang. *Differential Global Positioning System*).

Seapath 20 spełnia wymagania określania kursu na podstawie Globalnego Systemu Nawigacji Satelitarnej GNSS (ang. *Global Navigation Satellite System*) zdefiniowane w dokumentach Międzynarodowej Organizacji Morskiej IMO (ang. *International Maritime Organization*).

Na rys. 2.5 przedstawiono proces przetwarzania danych z sonaru wielowiązkowego. Głównym etapem tego procesu jest synteza wiązek realizowana przez specjalizowane procesory sygnałowe (9 procesorów firmy Texas Instruments). Ważny z punktu widzenia procesu przetwarzania sygnału echa w sonarze jest etap filtracji i wstępnego czyszczenia danych (ang. *data cleaning*) realizowany programowo. W przypadku mniej zaawansowanych algorytmów filtracyjnych etap ten może być realizowany w czasie rzeczywistym.



Rys. 2.5. Schemat procesu przetwarzania danych w sonarze wielowiązkowym EM3002

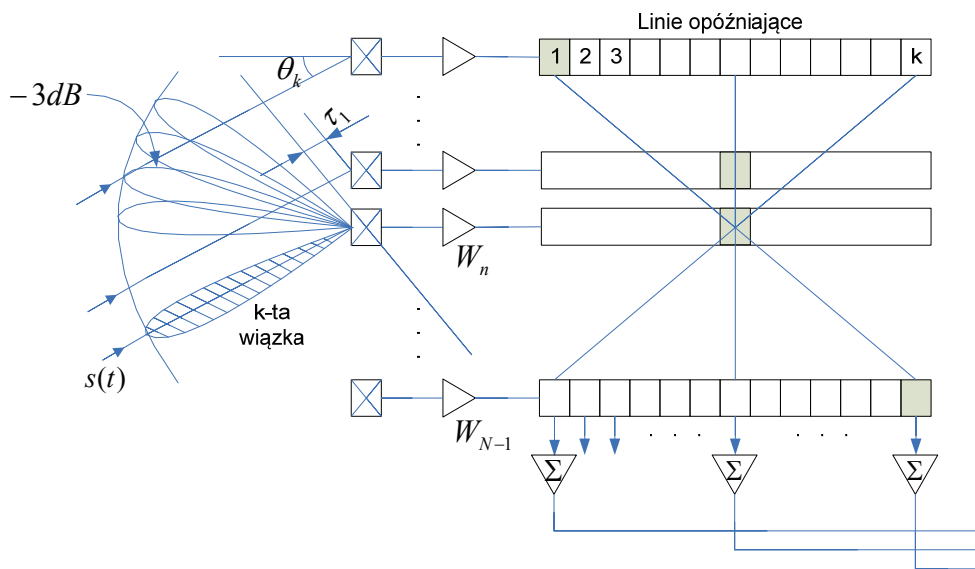
2.3. Opis wybranych algorytmów beamformingu

Poszerzający się wachlarz zastosowań systemów wielowiązkowych w różnych dziedzinach związanych z telemonitoringiem morskim wynika z wykorzystania metod wielokierunkowej obserwacji środowiska morskiego, które wraz z zachowaniem wysokiej rozdzielczości kątowej, pozwalają na dokładne obrazowanie dna morskiego na

podstawie odbieranych sygnałów echa [19]. Ta szczególna cecha systemów sonarowych umożliwia dogłębną analizę środowiska morskiego, zarówno dla celów komercyjnych (np. tworzenie map dna), oraz, poprzez ekstrakcję dodatkowych cech dotyczących badanego obszaru [50], także celów naukowych.

Podstawową własnością systemów sonarowych, dzięki której jest możliwe wykonywanie tego typu obserwacji, jest zastosowanie beamformingu jako metody analogowego lub cyfrowego przetwarzania sygnałów umożliwiającej niwelowanie poziomu sygnału dochodzącego z jednego kierunku oraz jednocześnie wzmocnienie sygnału pochodzącego z innego miejsca. Procedura ta, z racji podobieństwa do często stosowanych w akustyce tzw. filtrów o skończonej odpowiedzi impulsowej (ang. *finite impulse response* – *FIR*), nazywana jest też filtracją przestrzenną i w przeciwieństwie do FIR wykonuje filtrację w dziedzinie kierunku propagacji sygnału, a nie dziedzinie czasu. Zasada działania algorytmów beamformingu polega na realizacji opóźnień sygnałów rejestrowanych w sensorach matrycy odbiorczej w tzw. opóźnieniowo-sumacyjnych syntezach wiązek. Wtrącanie opóźnień „elektrycznych” pozwala na stworzenie warunków odbioru sygnałów z określonego kierunku źródła tak, aby propagacyjne opóźnienia geometryczne w poszczególnych elementach przetwornika zostały skompensowane. W ten sposób, opóźnione sygnały dodają się w fazie w układzie sumującym, a amplituda sygnału sumarycznego, odpowiadająca koherentnemu frontowi falowemu, będzie maksymalna dla fali przychodzącej z pożądanego kierunku [69].

Techniki filtracji przestrzennej w realizacji syntezatorów wiązek stanowią jądro współczesnych sonarów wielowiązkowych. Dzięki nim możliwe jest formowanie wachlarzowej konfiguracji charakterystyk kierunkowych sonarów. Na rys. 2.6 przedstawiono schemat opóźnieniowo-sumacyjnego syntezera wiązek sonaru wielowiązkowego [69].



Rys. 2.6. Schemat opóźnieniowo-sumacyjnego syntezyera wiązek sonaru wielowiązkowego

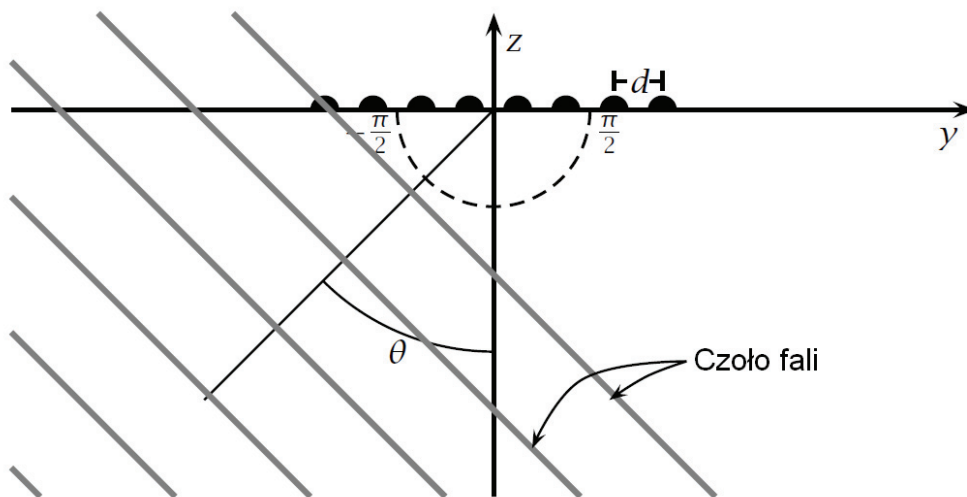
Należy zauważyć iż sama procedura beamformingu nie jest stosowana wyłącznie w akustyce podwodnej, jej historia sięga 20 lat wstecz, a jej zastosowania dotyczą także akustyki pomieszczeń, anten radiowych, komunikacji bezprzewodowej i innych.

W literaturze można znaleźć szereg opracowań dotyczących zaawansowanych metod beamformingu [58][65][75][77], niemniej jednak w praktyce najczęściej stosowanymi metodami tworzenia wiązek kierunkowych są: metoda opóźnień czasowych oraz metoda opóźnień fazowych. Ta pierwsza najczęściej jest stosowana poprzez dodanie określonej liczby kroków opóźnienia, które są niezależne od częstotliwości pracy urządzenia i pasma odbieranego sygnału. W przypadku drugiej, realizacja opóźnień polega na przesuwaniu w fazie poszczególnych sygnałów pochodzących z matrycy odbiorczej w zależności od rozmiarów jego apertury i jest przeznaczona dla sygnałów wąskopasmowych, w których częstotliwość odbieranego sygnału jest dokładnie znana.

W modelu filtracji przestrzennej stosowanym w systemach wielowiązkowych przyjmuje się iż, matryca odbiorcza urządzenia sonarowego składa się z zestawu odbiorników sygnału akustycznego umieszczonego wzdłuż osi Y . Każdy sensor ma swoją charakterystykę kierunkową wynikającą z fizycznych właściwości przetwornika. W przypadku matrycy sensorów nadawczych ułożonych w linii na osi X na dystansie od $-\frac{D}{2}$ do $\frac{D}{2}$ jej charakterystyka kierunkowa jest zdefiniowana za pomocą wzoru [65]:

$$g_1(\vec{k}) = \frac{\sin(k_x D / 2)}{k_x D / 2} \quad (2.12)$$

Na rys. 2.7 przedstawiono układ przetworników odbiorczych systemu sonarowego w układzie współrzędnym XYZ , gdzie płaszczyzna $Y-Z$ jest prostopadła do toru sondowania. Kąt Φ oznacza kąt między osią X i Z , natomiast θ oznacza kąt między osią Y i Z przy czym $\theta = 0$ dla punktów położonych na osi Z .



Rys. 2.7. Model matrycy odbiorczej sonaru w układzie współrzędnym. Nadajniki matrycy nadawczej są umieszczone wzdłuż osi X

W takim przypadku sygnał odbierany w sensorze l umieszczonym na osi Y można zapisać za pomocą wyrażenia:

$$y_l(t) = g_1(\Phi) e^{-jk y_l \sin \theta} s(t) = a_l(\Phi, \theta) s(t), \quad (2.13)$$

gdzie $s(t)$ jest odbieranym wąskopasmowym sygnałem akustycznym, $g_1(\Phi)$ jest charakterystyką kierunkową przetwornika (zakładając że charakterystyka kierunkowa jest równa dla wszystkich kątów θ) a $e^{-jk y_l \sin \theta}$ jest opóźnieniem sygnału $s(t)$. Amplitudowa część sygnału $a_l(\Phi, \theta)$ zależy od wartości $g_1(\Phi)$ oraz opóźnienia wynikającego z kierunku propagacji fali akustycznej θ . Sygnał otrzymywany w przetworniku l pochodzący z kierunku θ jest zatem ważony i opóźniany w funkcji kąta Φ i opóźnienia θ .

W systemach wielowiązkowych przyjmuje się, iż charakterystyka kierunkowa $g_1(\Phi)$ przetworników umieszczonych na osi Y zapewnia odbiór energii sygnałów w płaszczyźnie $Y-Z$ oraz że wszystkie sensory matrycy mają jednakową charakterystykę odbiorczą w funkcji kąta Φ tzn.

$$g_1(\Phi) = \dots = g_L(\Phi) = g(\Phi), l = 1, \dots, L. \quad (2.14)$$

W przypadku zbioru sensorów umieszczonych na osi Y znajdujących się w jednakowej odległości od siebie równej d otrzymuje się tzw. liniową matrycę odbiorczą (ang. *uniform*

linear array – ULA). W tak zdefiniowanym układzie, dla sygnału wąskopasmowego s_m przychodzącego z kierunku θ_m , wektor sterujący zdefiniowany jest następująco:

$$a_{ULA}(\theta_m) = g(\Phi)[1 \quad e^{-jkd \sin \theta_m} \quad \dots \quad e^{-j(L-1)kd \sin \theta_m}]^T \quad (2.15)$$

Wektor ten, poprzez zbiór opóźnień czasowo-fazowych dla kolejnych przetworników matrycy, steruje kierunkiem z jakiego odbierany jest sygnał na podstawie właściwości geometrycznych oraz charakterystyki odbiorczej całej matrycy. Wykładniki wektora a_{ULA} to opóźnienia fazowe zależące od kierunku propagacji fali akustycznej sygnału s_m odbieranego w poszczególnych przetwornikach. W przypadku gdy pożądanym jest zmaksymalizowanie energii fali przychodzącej z danego kierunku, wektor przyjmuje postać:

$$a_{ULA}(\theta_m) = g[1 \quad e^{-jkd \sin \theta_m} \quad \dots \quad e^{-j(L-1)kd \sin \theta_m}]^T \quad (2.16)$$

a następnie:

$$y_{m(t)} = a(\theta_m)s_m(t), \text{ gdzie } a = a_{ULA} \quad (2.17)$$

Zakładając liniowe przesunięcie fazy pomiędzy poszczególnymi elementami matrycy odbiorczej, równanie 2.17 opisuje sygnał przychodzący z określonego kierunku m . Dla sygnałów pochodzących z M kierunków jednocześnie wyjście matrycy odbiorczej można zapisać jako:

$$y(t) = \sum_{m=1}^M a(\theta_m)s_m(t) \quad (2.18)$$

lub w uproszczeniu:

$$y(t) = A(\theta)s(t), \quad (2.19)$$

gdzie $A(\theta) = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_M)]$ jest macierzą sterującą matrycy odbiorczej, a

$s(t) = [s_1(t), \dots, s_M(t)]^T$ zbiorem sygnałów pochodzących z M kierunków.

W przypadku systemów hydrolokacyjnych, oprócz zbioru sygnałów i sposobu formowania wiązek, należy także uwzględnić szum pochodzący z innych źródeł. Równanie 2.19 można zatem przedstawić w następujący sposób:

$$y(t) = A(\theta)s(t) + n(t) \quad (2.20)$$

Konwencjonalna synteza wiązek polega więc na sumowaniu (dodawaniu) sygnałów pochodzących z kolejnych przetworników matrycy odbiorczej uwzględniając przesunięcie wynikające z różnicy fazy w propagacji sygnału przychodzącego z danego kierunku. W takim podejściu, sygnały pochodzące z kierunku θ dodadzą się koherentnie natomiast energia szumu zostanie wyeliminowana. Aby bardziej formalnie przybliżyć problem redukcji szumu można zawęzić powyższy zapis do jednego danego kierunku, tak że $A(\theta) = a(\theta)$.

Problem maksymalizacji energii będzie zatem wyglądał następująco:

$$\begin{aligned} \max_w E\{w^H y(t)y^H(t)w\} &= \max_w w^H E\{y(t)y^H(t)\}w \\ &= \max_w \{E|s(t)|^2 |w^H a(\theta)|^2 + \sigma^2 |w|^2\} \end{aligned} \quad (2.21)$$

gdzie w jest wektorem wag dla sygnału $y(t)$. Zakładając iż $n(t)$ jest przestrzennie białym szumem, rozwiązaniem powyższego równania jest znormalizowany zbiór wag [65]:

$$w_{FT} = \frac{a(\theta)}{\sqrt{a^H(\theta)a(\theta)}} \quad (2.22)$$

Podstawiając za znormalizowany zbiór wag w_{FT} do równania 2.21 otrzymujemy:

$$\begin{aligned} P_{FT}(\theta) &= w_{FT}^H E\{y(t)y^H(t)\}w_{FT} \approx w^H \hat{R}w \\ &= \frac{a(\theta)}{\sqrt{a^H(\theta)a(\theta)}} \hat{R} \frac{a(\theta)}{\sqrt{a^H(\theta)a(\theta)}} = \frac{a^H(\theta)\hat{R}a(\theta)}{a^H(\theta)a(\theta)}, \end{aligned} \quad (2.23)$$

gdzie \hat{R} jest estymatorem kowariancji sygnału $y(t)$ równym w idealnym przypadku $E\{YY^H\}$.

Macierz kowariancji \hat{R} jest sprzężona symetrycznie, co oznacza że równa się swojemu transponowanemu sprzężeniu i jest macierzą hermitowską. Ponadto, macierz ta miała by strukturę Toeplitza gdyby była równa dokładnie $E\{YY^H\}$, w takim przypadku wszystkie elementy leżące na jej przekątnej były by sobie równe [65].

We współczesnych sonarach, w większości wykorzystywane są cyfrowe techniki syntezy wielowiązkowych charakterystyk kierunkowych, zarówno w dziedzinie czasu jak i częstotliwości [71]. Takie rozwiązanie posiada szereg zalet w stosunku do rozwiązań analogowych, a w szczególności: możliwość bezpośredniej realizacji opóźnień w dziedzinie czasu, prostą strukturę, mniejsze koszty i rozmiary, a w końcu możliwość elastycznego łączenia techniki sprzętowego i programowanego przetwarzania sygnału. Klasyczne metody beamformingu mimo, iż mają kilka istotnych wad, takich jak choćby ograniczona rozdzielczość determinowana rozmiarem apertury nadawczo-odbiorczej, to ze względu na łatwość implementacji, są najczęściej stosowane w obecnie produkowanych systemach wielowiązkowych.

2.4. Struktura i opis danych otrzymywanych z systemów wielowiązkowych

Istotnym zagadnieniem w kontekście przetwarzania i analizy danych pochodzących z sonarów wielowiązkowych jest ich struktura, cechy, które umożliwiają ich efektywne przetwarzanie oraz inne informacje dotyczące ich składu, objętości i czasu generowania. Należy zaznaczyć, iż zarówno do zastosowań komercyjnych jak i naukowych stosuje się wiele rodzajów sonarów wielowiązkowych pochodzących od różnych producentów, które charakteryzują się różną dokładnością pozyskiwanych danych, zawartością informacyjną zbiorów wynikowych oraz sposobem ich zapisu. Mimo istniejących różnic w podanym zakresie, można wymienić pewne cechy wspólne tych danych, które można przypisać do najczęściej stosowanych modeli sonarów, mianowicie:

- system wielowiązkowy połączony jest ze stacją roboczą (komputerem klasy PC) za pomocą łącza sieciowego w celu przekazywania otrzymanych wyników,
- wyniki otrzymywane przez sonar przekazywane są w formie rekordów (datagramów) binarnych zdefiniowanych przez producenta,
- przetwarzanie zarejestrowanych sygnałów oraz proces formowania wiązek wykonywany jest przez jednostkę obliczeniową sonaru,
- ilość rodzajów oraz struktura datagramów zależą od modelu sonaru, a ich opis jest dostarczony w dokumentacji dołączonej do systemu wielowiązkowego,
- datagramy zawierają informacje dotyczące batymetrii dna, pozycji przetwornika, przechyłów jednostki oraz ewentualnie inne informacje pochodzące z podłączonych urządzeń peryferyjnych (np. sondy CTD, sonaru bocznego),
- algorytmy dodatkowego przetwarzania danych i wizualizacji są realizowane na stacji roboczej podłączonej do sonaru wielowiązkowego, która najczęściej jest komputerem klasy PC,
- aby uzyskać ostateczne wyniki pomiaru w postaci batymetrycznych map dna, map ENC, bądź w innym formacie, potrzebna jest dodatkowa obróbka danych nazywana post-processingiem. Może być ona wykonana przez oprogramowanie dostarczone przez producenta sonaru (np. SIS w przypadku sonaru Simrad-Kongsberg) lub przez inne dedykowane aplikacje (ang. *third party software*) takie jak Hypack czy Qinsy (opisane w następnych rozdziałach pracy).

Badania będące przedmiotem rozprawy, oparte zostały na danych otrzymywanych z dwóch modeli sonarów wielowiązkowych, a mianowicie, będącego w posiadaniu Katedry Systemów Geinformatycznych sonaru wielowiązkowego firmy Kongsberg SIMRAD EM 3002 oraz sonaru firmy RESON Inc. Seabat serii 7k. Oba modele sonarów są zawansowanymi techniczne urządzeniami umożliwiającymi inspekcję obszarów hydrosfery z wykorzystaniem zaawansowanych technik przetwarzania sygnałów. Charakteryzują się porównywalną jakością i dokładnością w pozyskiwaniu danych oraz parametrami pracy (częstotliwość, ilość generowanych wiązek oraz ich geometria). W tab. 2.2 przedstawiono zestawienie najważniejszych parametrów technicznych pracy obu modeli.

Tab. 2.2. Porównanie najistotniejszych parametrów pracy sonarów EM 3002 oraz Reson Seabat 7k.

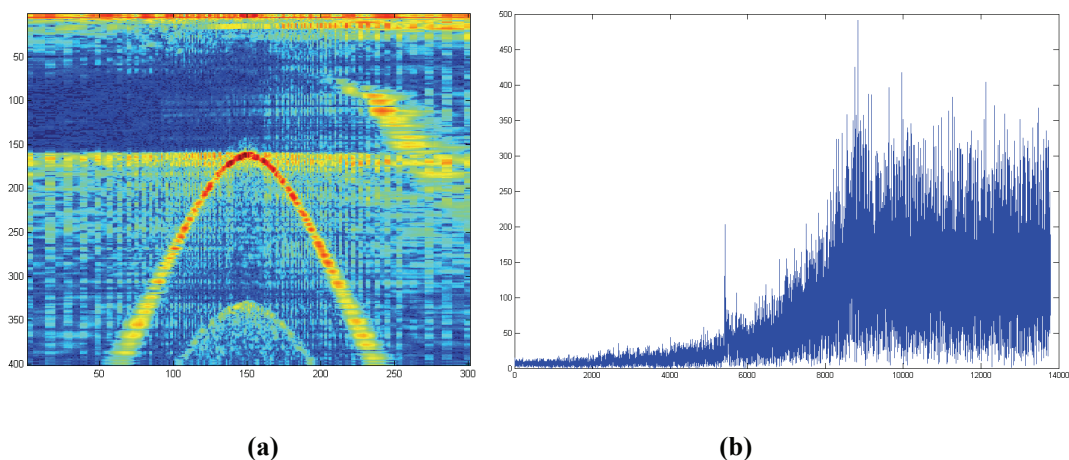
Model sonaru	Simrad Kongsberg Em 3002	RESON Seabat 7k
Częstotliwość pracy [kHz]	297/300/303	200/400
Ilość generowanych wiązek	160/256	256/301/401
Geometria wiązki	1.5°x1.5°	1.5°x0.5°
Częstotliwość próbkowania [kHz]	7	14

Omawiane sonary, oprócz standardowego zestawu danych umożliwiającego generowanie map dna, produkują znaczne ilości dodatkowych informacji umożliwiających dokładną analizę otrzymywanych informacji takich jak informacje o sile rozpraszania wstecznego (ang. *backscattering strength*) dla ech poszczególnych wiązek, parametry pracy sonaru (ang. *runtime parameters*), dane z czujników przechyłu oraz inne. Istotną cechą obecnie wytwarzanych modeli sonarów jest także możliwość zapisu informacji dotyczących przebiegu pełnych ech poszczególnych wiązek wygenerowanych przez sonar, które są wynikiem filtracji przestrzennej opisanej w podrozdziale 2.3. W literaturze można znaleźć wiele określeń dotyczących tego typu danych, w niniejszej pracy przyjęto je nazywać danymi typu water-column lub akustycznymi zobrazeniami toni wodnej. Dane te, z uwagi na wysoką częstotliwość próbkowania oraz generowaną ilość wiązek, stanowią istotny element uzyskiwanych wyników pomiarów. W publikacjach [15][16][17] pokazano jak wielki wpływ na wielkość danych z sonaru wielowiązkowego ma zapis tych właśnie informacji. W tab. 2.3 pokazano procentową zawartość danych będących informacją o zobrazeniu akustycznym względem ogółu informacji pozyskiwanych z wykorzystaniem sonarów. Z uwagi na fakt, iż dane te stanowią procentowo największy składnik w plikach wynikowych należy stwierdzić, iż efektywne metody ich przetwarzania pozwolą w dużym stopniu uzyskać postęp w dziedzinie efektywnego przetwarzania całych plików sonarowych.

Tab. 2.3. Ogólna charakterystyka danych pochodzących z sonarów wielowiązkowych.

Nazwa zbioru wynikowego	Procentowa zawartość danych dotyczących zobrażeń akustycznych	Częstotliwość pracy [kHz]	Częstotliwość próbkowania [kHz]	Wielkość pliku wynikowego [MB]
20060719_204657_7125 (400kHz).s7k	85.72%	396	34	557
20051014_185729_7125 (400kHz).s7k	83.09%	396	34	589
20070720_170910.s7k	82.77%	100	6	1 100
20070720_171128.s7k	82.82%	100	6	477
20060201_190255_7125 (400kHz).s7k	83.07%	400	34	601
20070315_184108.s7k	97.96%	396	34	127
20070720_170721.s7k	82.84%	100	6	937
20070831_185543.s7k	87.87%	100	6	1046

Zobrazowania akustyczne (rys. 2.8), tak jak każdy inny składnik danych, są zapisywane do plików wynikowych w formie binarnych datagramów i składowane są w postaci serii dwuwymiarowych matryc, w których współrzędne określają odpowiednio numer wiązki i numer próbki dla danego sondowania. Liczba wiązek i ilość próbek są wielkościami charakterystycznymi dla danego zestawu danych i zależą od modelu sonaru oraz jego charakterystyki technicznej (częstotliwość próbkowania, ilość wiązek), a także od parametrów oraz warunków samego pomiaru (głębokość, rozpiętość kątowna i inne). Przykładowo, ilość próbek w danej wiązce może sięgnąć liczby 32 tysięcy, a sama ilość wiązek wynosi od 128 do 3520 dla najbardziej zaawansowanych technicznie modeli [66]. Ponieważ w większości sonarów wartość każdej próbki jest przechowywana jako 8 albo 16-bitowa wartość numeryczna, rozmiar całego zestawu danych tego typu może sięgnąć nawet 99% objętości całego pliku [17].



Rys. 2.8. Akustyczne zobrazenie toni wodnej zarejestrowane sonarem wielowiązkowym RESON Seabat 7125 (a) oraz obwiednia amplitudowa echa jednej z wiązek w postaci sygnału cyfrowego (b).

Akustyczne zobrazowania toni wodnej mogą służyć do oceny jakości stosowanych algorytmów beamformingu oraz otrzymywanych danych batymetrycznych w miejscach, w których z powodu warunków pomiaru (np. duża głębokość dna, liczne rewerberacje echa), jakość wyników budzi zastrzeżenia. Ich analiza jest także przydatna w procesie wydobywania dodatkowych informacji o środowisku morskim oraz zjawiskach w nim zachodzących. Metody skupiające się na efektywnym przetwarzaniu, kompresji oraz archiwizacji, ze szczególnym uwzględnieniem przetwarzania opisanych powyżej zobrazowań akustycznych, zostały przedstawione w podrozdziałach 4.1, 4.2 oraz 4.3.

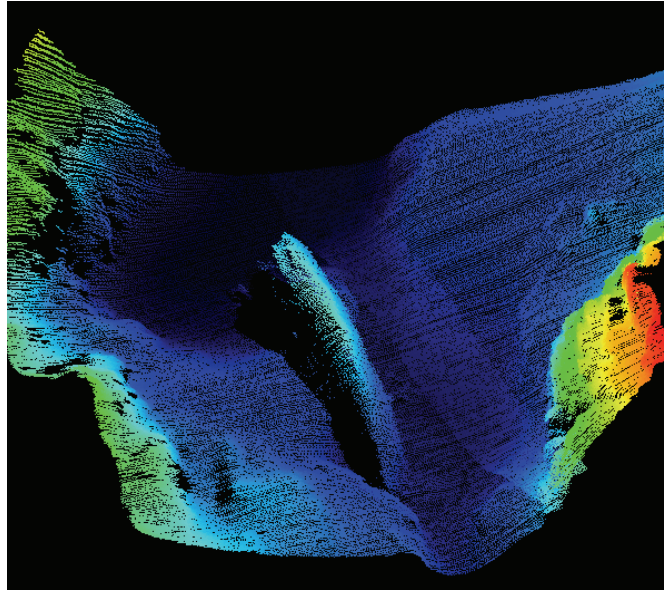
Sonary wielowiązkowe oprócz przydatności w projektach badawczych, mają także zastosowanie w pracach komercyjnych. Przykładem mogą być tu prace, w których nie wykorzystuje się zobrazowań akustycznych toni wodnej, a głównym celem działań jest określenie batymetrii danego obszaru. Wśród zastosowań komercyjnych systemów MBS należy wymienić przede wszystkim pomiary batymetryczne mające na celu określenie rzeźby dna w miejscach związanych z żeglugą morską lub śródlądową, a także w kanałach, rzekach i innych zbiornikach wodnych. Systemy sonarowe są też często wykorzystywane do oceny stanu budowli hydrotechnicznych oraz w pracach pogłębiarskich (ang. *dredging industry*). W takim przypadku, informacje dotyczące batymetrii, jakości otrzymywanych danych, pozycji geograficznej i przechylów są najistotniejsze, a struktura ich zawartości może ulec zmianie.

Tab. 2.4. Charakterystyka danych pochodzących z sonaru wielowiązkowego na przykładzie systemu EM 3002 podczas pomiarów batymetrycznych.

Nazwa zbioru wynikowego	Batymetria	Geometria wiązek	Dane GPS	Akustyczny obraz dna	Pozostałe
0001_20070920_172143_Oceania.all	29,85%	22,96%	2,25%	42,38%	2,56%
0002_20070921_082105_Oceania.all	32,87%	25,10%	0,60%	40,74%	0,69%
0003_20070920_161822_Oceania.all	41,63%	31,80%	0,49%	25,52%	0,56%
0005_20070920_163312_Oceania.all	29,47%	22,52%	0,28%	17,42%	0,33%
0006_20070920_164423_Oceania.all	42,44%	32,42%	0,39%	24,28%	0,47%

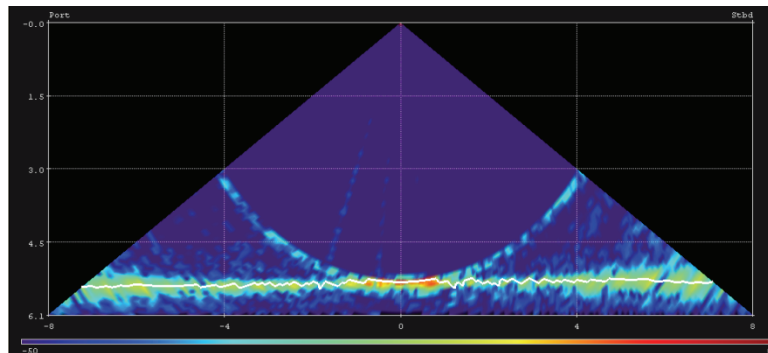
W tab. 2.4 przedstawiono syntaktyczną charakterystykę danych otrzymywanych z sonaru wielowiązkowego EM 3002 podczas typowych pomiarów batymetrycznych. Dane podzielono na 5 tematycznych grup, mianowicie:

1) dane batymetryczne stanowiące zbiór informacji otrzymywanych z sonaru wielowiązkowego związanych z rzeźbą dna jako wynikiem pomiaru sondowania (rys. 2.9),



Rys. 2.9. Wizualizacja danych batymetrycznych otrzymywanych sonarem wielowiązkowym EM 3002 - wrak statku Blucher

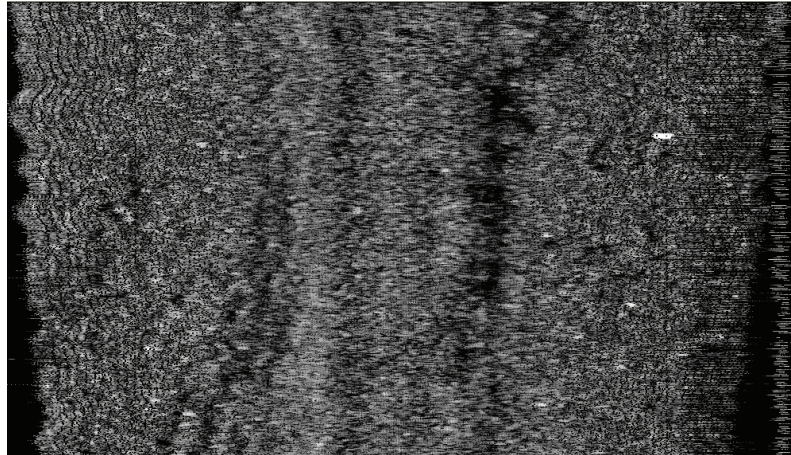
2) geometria wiązek stanowiąca zbiór danych dotyczących kierunku, mocy, amplitudy sygnału, częstotliwości próbkowania oraz innych parametrów technicznych i akustycznych dotyczących formowanych przez system sonarowy wiązek kierunkowych (rys. 2.10),



Rys. 2.10. Wizualizacja danych dotyczących geometrii wiązek. Zrzut z systemu SIS (ang. *Seafloor Information System*)

3) dane GPS, czyli informacje o pozycji jednostki pływającej, otrzymywane z wykorzystywanego systemu pozycjonowania,

4) akustyczny obraz dna (rys. 2.11), zawierający informacje dotyczące akustycznych aspektów otrzymywanych danych, w szczególności informacje o sile rozpraszania wstecznego insonifikowanej powierzchni, przyjętym współczynniku tłumienia dźwięku w wodzie, informacje dotyczące zastosowanej procedury TVG oraz akustyczne parametry impulsu sondującego,



Rys. 2.11. Akustyczna mapa dna - wizualizacja danych grupy 4 . Poziom szarości odpowiada sile rozpraszania wstecznego insonifikowanej powierzchni

5) grupa stanowiąca ogół pozostałych informacji otrzymywanych z sonaru z wyłączeniem akustycznych zobrazowań toni wodnej.

Głównym elementem składowym opisanych w tab. 2.4 informacji są dane dotyczące batymetrii, w których skład wchodzi między innymi dane XYZ reprezentujące rzeźbę dna morskiego oraz elementy mówiące o jakości otrzymywanej informacji, znacznikach czasowych, zastosowanym algorytmie detekcji dna (algorytm fazowy lub amplitudowy) oraz inne informacje, które mogą być niezbędne do tworzenia docelowych map batymetrycznych.

Na uwagę zasługuje fakt, iż istotnym składnikiem (od 15% do 45%) są też dane dotyczące właściwości akustycznych dna i geometrycznych ech wiązek oraz mała ilość danych, maksymalnie 2,5% ogółu, jaką zajmują dane pochodzące z systemów pozycjonowania – w tym przypadku systemu GPS. Szczegółowa struktura omawianych danych w przypadku innych warunków pomiaru może w pewnym stopniu ulec zmianie. Powyższa analiza pozwala jednak na wyróżnienie najważniejszych cech, które są istotne w kontekście efektywnego przetwarzania informacji otrzymywanych z systemów MBS, a mianowicie:

- w przypadku pomiarów batymetrycznych dane dotyczące rzeźby dna stanowią ok. 20-60% ogólnej informacji otrzymywanej z sonaru,

- inne istotne składniki to informacje dotyczące właściwości akustycznych insonifikowanej powierzchni oraz szczegółowe dane dotyczące geometrii wiązek i przetwarzania,
- dane dotyczące pozycji GPS stanowią relatywnie małą część otrzymywanych danych,

Mając na uwadze powyższą charakterystykę oraz specyfikę danych, w pracy, oprócz metod przetwarzania obrazowań akustycznych toni wodnej, w podrozdziale 4.4 zaproponowano metodę kompresji danych batymetrycznych otrzymywanych bezpośrednio z sonaru oraz, w podrozdziale 5.3, zaprezentowano ewentualne korzyści wynikające z zastosowania opisanych rozwiązań w kontekście rozproszonych systemów GIS.

2.5. Przykładowe zastosowania sonarów wielowiązkowych w systemach GIS

System GIS (ang. *Geographic Information System - GIS*) to system zbierający, gromadzący i udostępniający informacje o terenie geograficznym. System taki składa się nie tylko z samego oprogramowania, operującego na danych przestrzennych, ale także z aparatury sprzętowej dostarczającej informacje, które są później składowane i przetwarzane w systemie. Najpopularniejszymi urządzeniami będącymi źródłami danych dla GIS są:

- czujniki optyczne, termiczne i inne,
- system pozycjonowania (systemy GNSS),
- urządzenia radiolokacyjne,
- mierniki geodezyjne,
- urządzenia hydroakustyczne dla zastosowań morskich,
- satelity i aparatura fotometryczna.

O tempie rozwoju tej gałęzi systemów informacyjnych świadczy też fakt, iż jeszcze kilka lat temu systemy informacji przestrzennej były stosowane jedynie przez instytucje ściśle związane z działalnością geodezyjną, których celem była akwizycja, obróbka lub prezentacja danych geoprzestrzennych. Mowa tu między innymi o urządzeniach gmin, powiatach, urządzeniach miejskich, lokalnych urządzeniach kartograficznych, które prawnie są zobligowane do prowadzenia działalności w tym zakresie. Obecnie jednak, systemy GIS, stają się coraz częściej narzędziem powszechnego użytku i są stosowane w rozwiązaniach komercyjnych, wspomagając działalność wielu przedsiębiorstw oraz instytucji badawczych.

Jednym z najistotniejszych zastosowań systemów GIS są tzw. morskie systemy informacji przestrzennej - *marine GIS*. Systemy te przeznaczone są do zbierania, analizy, wizualizacji i udostępniania danych dotyczących środowiska morskiego i charakteryzują się

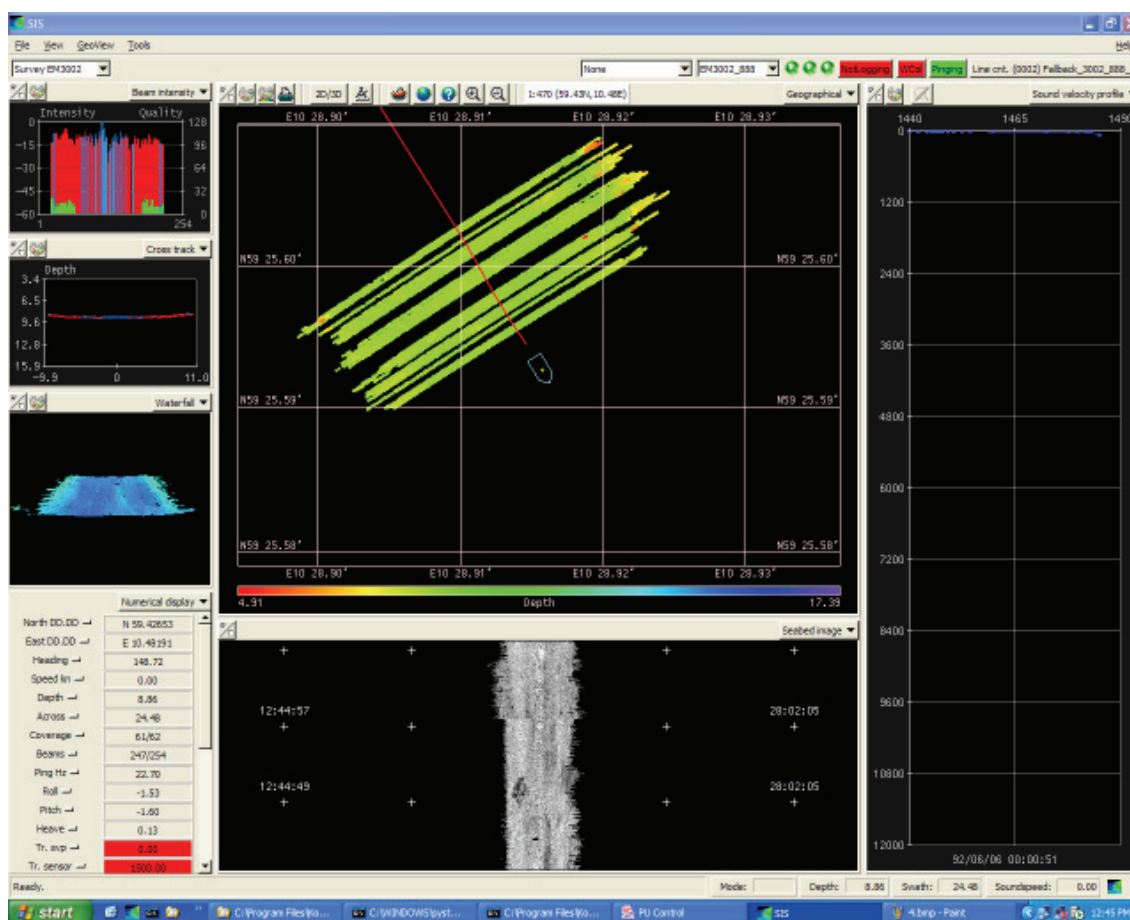
specyficznym zestawem cech, które sprawiają iż gałąź ta została wyodrębniona spośród pozostałych rodzajów systemów informacji przestrzennej. Dane, które są przechowywane w takich systemach, to przede wszystkim: dane o batymetrii akwenu, rodzaju dna morskiego, jego strukturze oraz mapy morskie, mapy ENC i inne. Niektóre systemy tej klasy gromadzą także informacje o zawartości samego akwenu wodnego, mowa tu o przemieszczaniu się ryb w danym zbiorniku wodnym [48][56][70], jego zanieczyszczeniu [13][45] czy jakości wód [46].

W związku z rozwojem integracji technik elektronicznych, hydroakustycznych i informatycznych, systemy *marine GIS* mają coraz większe zastosowanie w zakresie zdalnej obserwacji środowiska morskiego. Ponadto, rozwój technologii w zakresie zdalnej obserwacji składników ekosystemów morskich, skutkuje we wzroście jakości oraz ilości otrzymywanych danych jakie są przetwarzane w tych systemach. Jednym z najistotniejszych wyzwań stojących przed projektantami i twórcami systemów GIS jest więc efektywne przetwarzanie, składowanie oraz archiwizacja wielkiej ilości danych [5]. W wielu przypadkach, konieczne jest także zapewnienie mechanizmu dostępu do wybranych informacji oraz wizualizacja danych zgodnie z wymogami oraz ograniczeniami sprzętowymi [14]. W niniejszym podrozdziale omówiono najpopularniejsze systemy przeznaczone do obsługi systemów wielowiązkowych ze szczególnym uwzględnieniem metod przetwarzania i wizualizacji danych pochodzących z systemów MBSS na przykładzie komercyjnych produktów klasy *marine GIS*.

2.5.1 SIS

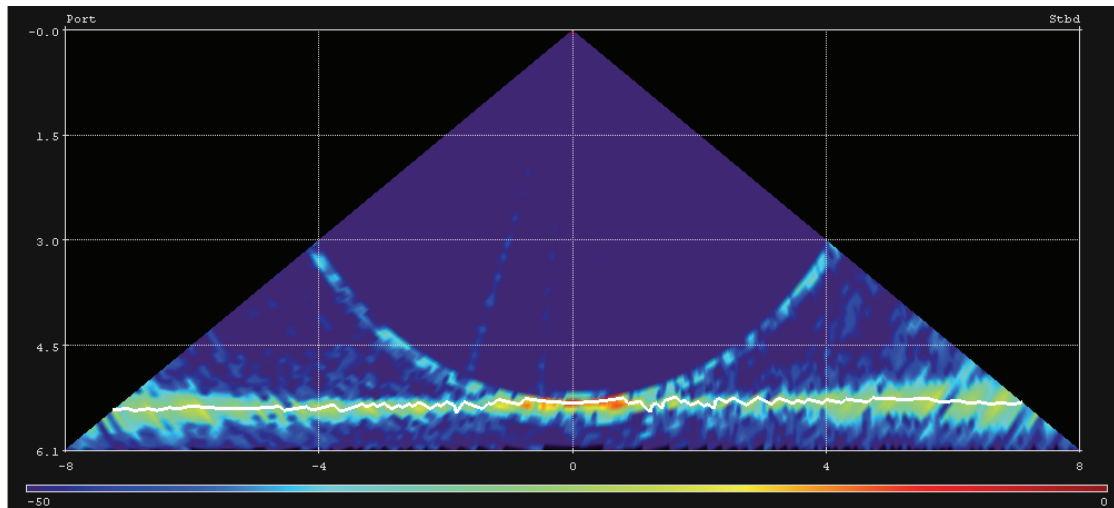
Systemy wielowiązkowe niezależnie od swego zastosowania, aby być użyteczne, muszą posiadać interfejs użytkownika (ang. GUI – *graphical user interface*), który umożliwia prezentację otrzymywanych wyników, ocenę jakości wykonywanych pomiarów oraz monitorowanie parametrów pracy urządzenia. Pierwszym przykładem komercyjnego systemu obsługi danych z echosondy wielowiązkowej jest system SIS (ang. *Seafloor Information System*), którego producentem jest firma Kongsberg Simrad. System SIS wraz echosondą wielowiązkową jest podstawowym narzędziem obsługi systemu EM 3002 oraz urządzeń pomocniczych. SIS dostępny jest w wersji na platformę Unix i Windows. Umożliwia on konfigurację prezentowanych paneli w oknie głównym, jak również korzystanie ze zdefiniowanych trybów pracy, takich jak: tryb kalibracji, nawigacji, sternika oraz tryb użytkownika (ang. *user mode*). Na rys. 2.12 zaprezentowano przykładową konfigurację dla

trybu pracy użytkownika. Należy zauważyć, iż aplikacja stanowi etap pośredni przetwarzania danych z sonaru, jest elementem filtrującym, weryfikującym dane i dokonującym trójwymiarowej prezentacji. Poza tym dostępnych jest kilka sposobów wizualizacji umożliwiających obrazowanie różnych aspektów pracy urządzenia. Do najbardziej przydatnych zobrazowań należą wizualizacja otrzymanych danych batymetrycznych w kontekście geograficznym tzw. *geographic display*, wizualizacja geometrii wiązek tzw. *water-column* oraz prezentacja parametrów pracy urządzenia, tzw. *runtime parameters*. Ponadto, system umożliwia wizualizację obrazów akustycznych dna morskiego na podstawie obliczonej siły rozpraszania wstecznego, przebiegu danych dotyczących przechyłów na podstawie informacji otrzymywanych z odpowiednich urządzeń.



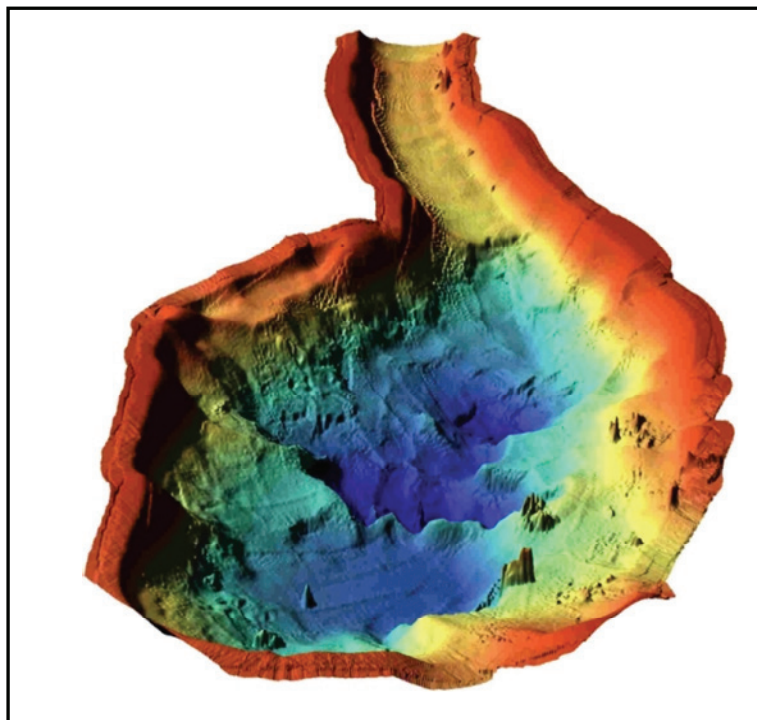
Rys. 2.12. Interfejs użytkownika programu SIS

Na rys. 2.13 przedstawiono zobrazowanie akustyczne toni wodnej wykonane przez sonar wielowiązkowy EM3002. Jasność reprezentuje amplitudę obwiedni echa danej wiązki wyrażoną w decybelach. Na osi odciętych zaznaczono odległości wyrażone w metrach poprzecznie do kierunku sondowania. Oś rzędnych reprezentuje głębokość.



Rys. 2.13. Przykład zobrazowania akustycznego toni wodnej zarejestrowanego przez sonar wielowiązkowy EM 3002 podczas pracy z systemem SIS

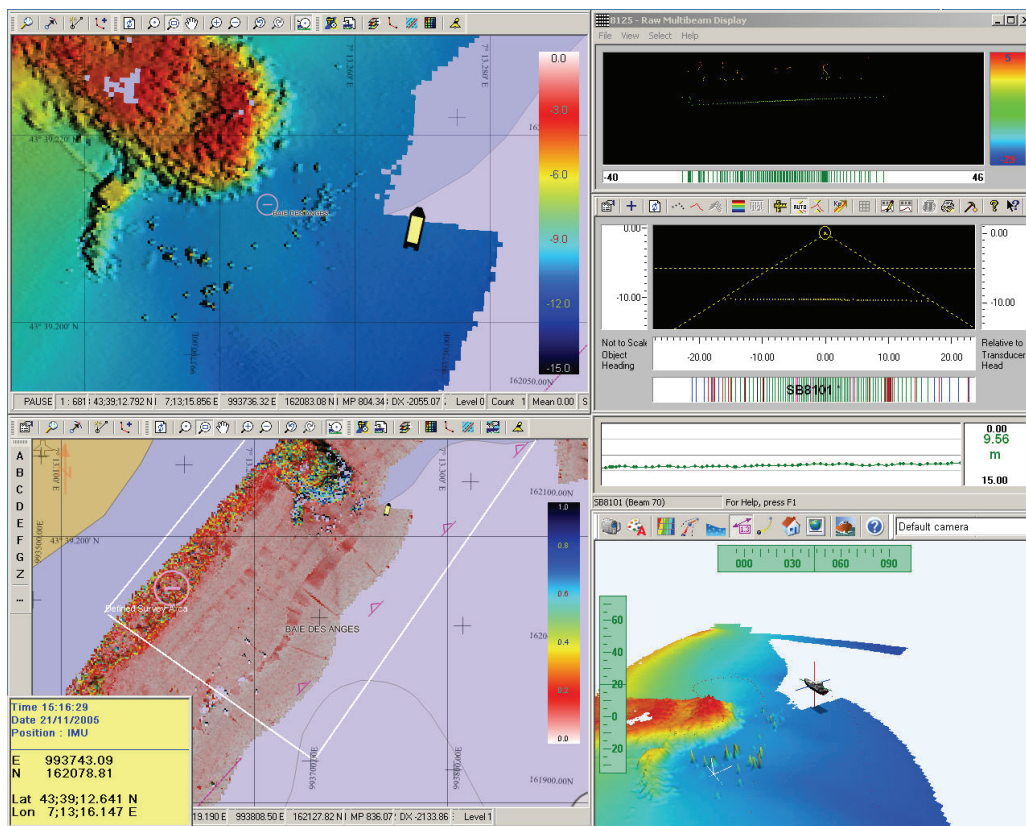
Efektom pomiarów z wykorzystaniem sonarów wielowiązkowych są głównie trójwymiarowe profile dna. W przypadku, gdy do systemu pomiarowego dostarczana jest informacja z systemu pozycjonowania, mają one charakter geograficzny. Pomiar, charakteryzuje się dużą dokładnością i rozdzielczością. Typowe trójwymiarowe zobrazowanie dna uzyskane za pomocą danych z sonaru wielowiązkowego EM3002 wykonane z użyciem systemu SIS przedstawiono na rys. 2.14.



Rys. 2.14. Trójwymiarowy model dna uzyskany na podstawie danych zebranych sonarem wielowiązkowym EM3002

2.5.2 System Qinsky

System QINSy (ang. *Quality Integrated Navigation System*) jest produktem holenderskiej firmy QPS, który został stworzony z wykorzystaniem środowiska obiektowego języka C++. QINSy, którego interfejs użytkownika przedstawiony został na rys. 2.15, jest systemem przeznaczonym do prac związanych z hydrografią, integrującym dane pochodzące z wielu źródeł takich jak: sondy hydroakustyczne, sonary boczne, sensory nawigacyjne (GPS, DGPS, żyrokompasy) i inne. Do głównych zadań systemu należą: akwizycja danych w jednolitej bazie, przejrzysta wizualizację oraz eksport do różnych formatów. Główną zaletą produktu firmy QPS jest niezależność od źródła dostarczanych danych - system potrafi obsługiwać dane pochodzące z różnego rodzaju czujników, sond, sonarów i innych urządzeń pomiarowych.



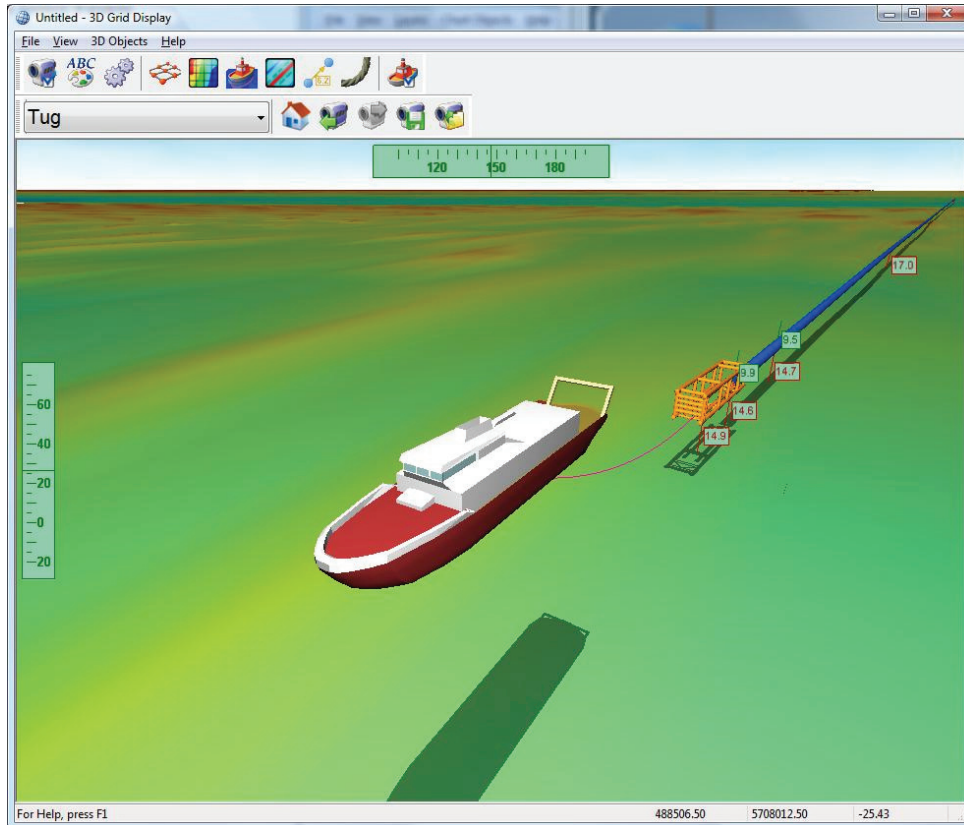
Rys. 2.15. Interfejs użytkownika programu QINSy podczas pracy z wykorzystaniem sonaru wielowiązkowego.

Niezależność ta jest realizowana za pomocą osobnych modułów programistycznych, aktualizowanych przez producenta. Ich zadaniem jest przekształcanie danych z urządzeń pomiarowych do jednolitej formy, w której dane mogą być przechowywane w bazie lub dedykowanych plikach. System QINSy ma budowę modułową, oznacza to, że do

podstawowego programu można dołączać poszczególne pakiety wzbogacające jego funkcjonalność. Na uwagę zasługują przede wszystkim moduły Qinsy Mapping Survey oraz Qinsy 3D Visualization Tool.

System Qinsy wykorzystuje zaawansowane algorytmy czyszczenia danych batymetrycznych o dużych rozmiarach takie jak CUBE [9] oraz metody oparte o funkcje sklejane LSSSM (ang. *Least Squares Statistical Spline Method*). Dane do systemu QINSy mogą być importowane ze źródeł zewnętrznych, dając użytkownikowi możliwość pracy np. z mapami w standardzie ENC (ang. *Electronic Navigation Chart*), mapami DTM czy zobrazowaniami satelitarnymi.

Do podstawowego pakietu QINSy, można także dołączyć moduły wspomagające między innymi pilotowanie dużych statków na wodach płytkich (moduł QASTOR Pilot) oraz systemy wspomagające cumowanie jednostek morskich w portach (QASTOR Docking Master). Oprogramowanie QINSy wspomaga także tworzenie map terenu w postaci DTM oraz zawiera dedykowane moduły przeznaczone do generowania map w standardzie ENC. System w najbogatszej wersji umożliwi wizualizację danych w formie dwu-wymiarowej (eksport do pliku JPG) lub w formie trójwymiarowej (grafika 3D, filmy AVI) co zostało pokazane na rys. 2.16.



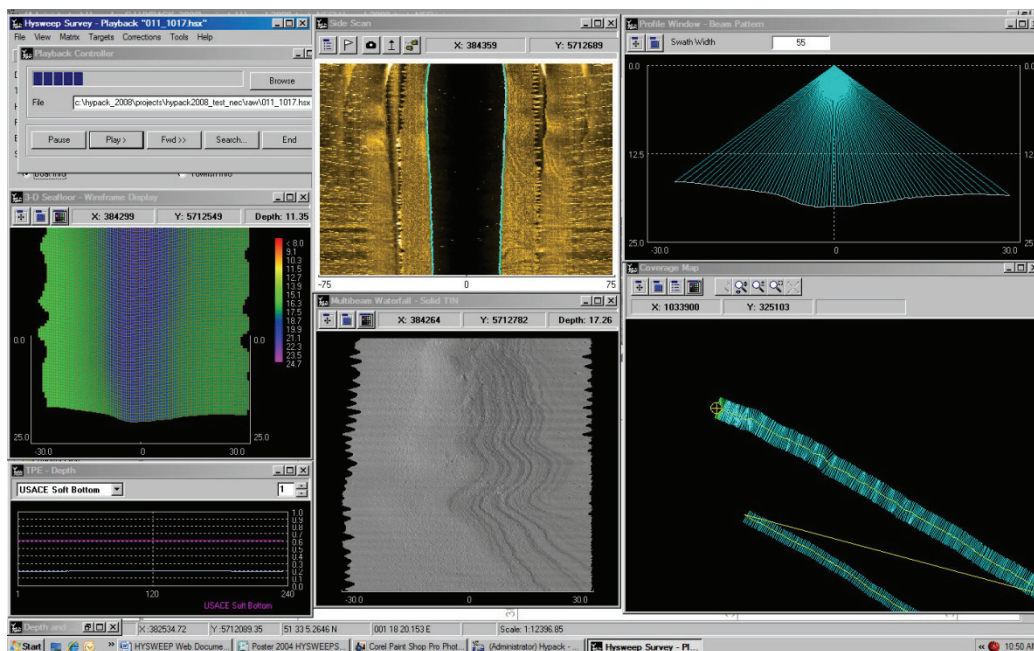
Rys. 2.16. Wizualizacja 3D w programie QINSy.

W Qinsy dostępne są także specjalistyczne moduły przeznaczone do użytkowania podczas pracy z urządzeniami ROV lub AUV.

Niewątpliwą zaletą systemu jest jego modułarna architektura pozwalająca na zwiększanie funkcjonalności systemu bez konieczności ponownej instalacji całego programu. System jest wyposażony w bogaty interfejs zapewniający dostęp do wielu przydatnych funkcji i ma zastosowanie zarówno komercyjne (pakiety QUAStOR), jak i badawczo-naukowe (moduł Qinsy Mapping Survey).

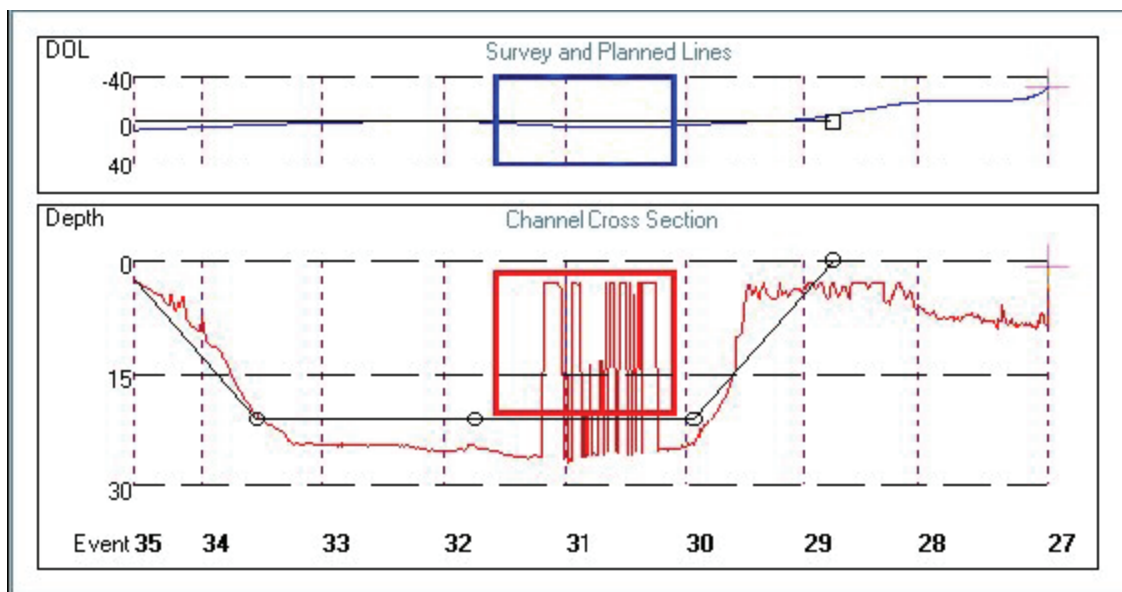
2.5.3 System HyPack

HyPack to oprogramowanie typu *marine GIS* pomocne w pracach dotyczących pomiarów hydrograficznych, akwizycji danych oraz przy pracach na dnie akwenów wodnych (kanały, jeziora, porty, nabrzeża). HyPack jest wyposażony w bogaty interfejs użytkownika przedstawiony na rys. 2.17 i podobnie jak QINSy jest podzielony na moduły.



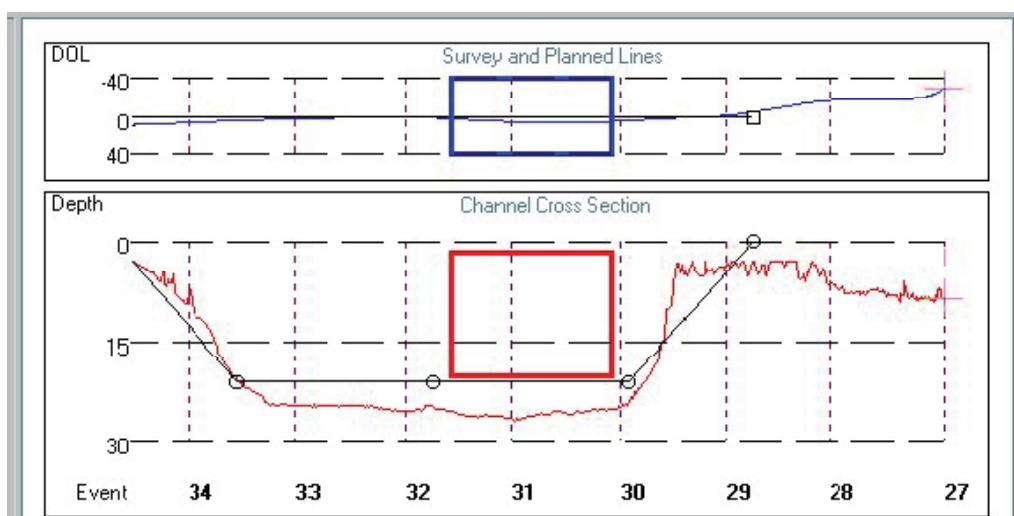
Rys. 2.17. Interfejs programu HyPack

HyPack umożliwia przetwarzanie danych z echosondy jednowiązkowej, sonaru bocznego oraz systemu wielowiązkowego. Dane otrzymywane w systemie można ręcznie edytować, bądź decydować o tym, które dane są błędne i wymagają ręcznej bądź automatycznej poprawki. Zrzut z ekranu prezentujący działanie systemu podczas ręcznej edycji danych dla echosond jednowiązkowych przedstawiają rys. 2.18 oraz rys. 2.19.



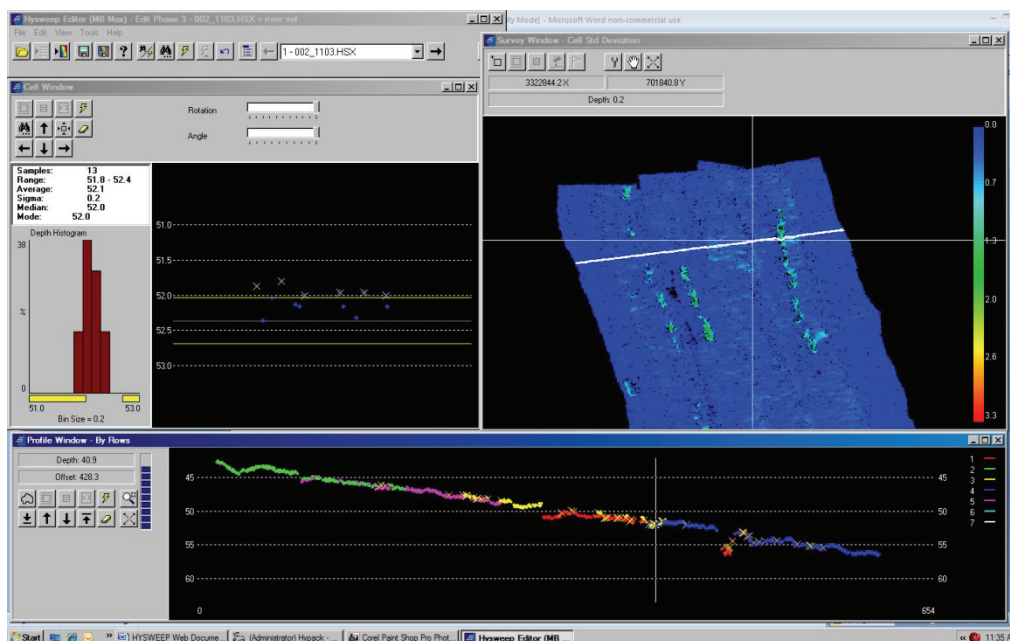
Rys. 2.18. Dane pochodzące z echosondy jednowiązkowej wymagające ręcznej korekty

Na rys. 2.18, w czerwonym polu, zaznaczono fragment pomiar wykonanego przez echosondę jednowiązkową, który wymaga naniesienia poprawek. Wynik algorytmów automatycznej korekcy danych pokazany został na rys. 2.19.



Rys. 2.19. Dane z echosondy jednowiązkowej po poprawce.

Operacje korekcy mogą być wykonywane także dla danych pochodzących z echosondy wielowiązkowej. Zrzut z ekranu podczas działania systemu wykonującego te czynność przedstawia rysunek rys. 2.20.



Rys. 2.20. Zrzut z ekranu podczas działania systemu HyPack Max - korekcja danych otrzymanych z echosondy wielowiązkowej.

Do dyspozycji użytkownika dostępna jest cała gama algorytmów korekcyjnych, system proponuje najlepsze z rozwiązań w zależności od konkretnego przypadku. Należy wspomnieć, iż możliwość ręcznej poprawki danych w celu zwiększenia dokładności pomiaru jest szczególnie przydatna przy pracy na wodach płytkich, przy nabrzeżach oceanów, oraz w kanałach czy mniejszych zbiornikach wodnych, w których precyzja wykonanych pomiarów decyduje później o jakości dalszych prac. Hypack jest wyposażony także w moduł wprowadzania poprawek korekcyjnych z systemu DGPS RTK z wykorzystaniem protokołu NTRIP w celu zwiększenia jakości otrzymywanych danych o pozycji.

System HyPack jest przykładem systemu klasy *marine GIS*, który wspomaga prace związane z wykorzystaniem między innymi systemów MBSS. Jego podstawowym przeznaczeniem jest pomoc przy pracach w zakresie wykonywania robót podwodnych, takich jak pogłębianie kanałów, pracy w portach, kładzeniu rurociągów na dnie akwenów wodnych i innych. System ten, podobnie jak Qinsy, integruje dane pochodzące z różnych źródeł i sensorów i przedstawia je w jednym zintegrowanym środowisku umożliwiającym dwu- lub trzywymiarową wizualizację, stanowiąc cenne narzędzie do obsługi dużej ilości danych przestrzennych dla użytkowników związanych z przemysłem hydrograficznym.

3. WYBRANE ZAGADNIENIA Z DZIEDZINY PRZETWARZANIA I KOMPRESJI DANYCH

Problem przechowywania oraz przesyłania informacji dotyczącej otaczającej nas rzeczywistości dotyczy każdego aspektu naszego życia. Ludzie nieustannie komunikują się między sobą w celu przekazania swoich myśli, faktów, wiedzy oraz odczuć na temat otaczającego ich świata. Wprowadzanie nowoczesnych technologii komunikacyjnych jest odpowiedzią na zapotrzebowanie ludzi związane z udostępnianiem, pobieraniem, przekazywaniem (często na odległość) oraz składowaniem informacji. Mimo znaczącego wzrostu możliwości obliczeniowych jednostek komputerowych oraz powstania w ostatnim czasie wyrafinowanych rozwiązań technologicznych przeznaczonych do szybkiego wykonywania obliczeń numerycznych, kwestia odpowiedniego przechowywania danych ciągle odgrywa istotną rolę w informatyce. Problem ten, mimo znaczącego rozwoju technologii przechowywania danych (dynamiczny rozwój nośników pamięci, struktur bazodanowych), ciągle stanowi istotny czynnik ograniczający rozwój obecnie tworzonych systemów informatycznych. Nabiera on także szczególnego znaczenia w przypadku rozproszonych systemów informacyjnych, w których ograniczenia związane z przepustowością sieci, często stanowią czynnik determinujący możliwości systemu. W niniejszym rozdziale, przedstawiono wybrane aspekty dotyczące efektywnego przetwarzania danych, skupiono się na wybranych zagadnieniach teoretycznych dotyczących kompresji oraz omówiono dostępne rozwiązania technologiczne, które są wykorzystywane w dalszej części pracy.

3.1. Wybrane zagadnienia związane z kompresją danych

Kompresja jest procesem zmniejszania ilości pamięci i szerokości pasma potrzebnych do magazynowania i przesyłania danych. Choć komputery są znacznie szybsze, a pamięć o wiele tańsza i bardziej pojemna, coraz większe zapotrzebowanie na wykorzystanie dźwięku, obrazu oraz kompleksowej informacji dotyczącej różnych procesów zachodzących w otaczającej nas rzeczywistości stawia wymagania w zakresie wydajnego przetwarzania i składowania informacji. Szczególne znaczenie ma kompresja danych przeznaczona do zastosowań w czasie rzeczywistym, która jest wykorzystywana w systemach czasu rzeczywistego, w telekomunikacji czy przy strumieniowaniu danych multimedialnych. Stan wiedzy w dziedzinie redukcji danych rozwija się bardzo dynamicznie, obecnie dostępne są

liczne opracowania teoretyczne (np. [67][68]), materiały [22] oraz literatura [20][64] dotyczące tej dziedziny. Ogólnie dostępne są też rozmaite narzędzia technologiczne czy rozwiązania informatyczne, które usprawniają proces redukcji danych. Obecnie, jednym z największych wyzwań stojących przed projektantami systemów informatycznych jest określenie nie tylko czy w danym przypadku kompresować zbierane informacje, ale jaką metodę wybrać. W tego typu rozważaniach, oprócz znajomości zagadnień technologicznych, niezbędna jest także wiedza teoretyczna, na podstawie której można określić, która metoda jest najbardziej korzystna dla danego rozwiązania. Poniżej opisano podstawowe zagadnienia teoretyczne związane z kompresją danych w systemach informacyjnych.

3.1.1 Miary informacji

Wraz z rozwojem technik przetwarzania sygnałów elektrycznych już w latach 20-tych ubiegłego wieku dostrzeżono ważność problemu redukcji rozmiaru danych w kontekście przesyłania komunikatów z zastosowaniem łączy kablowych jako medium transmisyjnego. Dwadzieścia lat później amerykański matematyk Claude E. Shannon zdefiniował podstawy teorii informacji determinujące dalszy rozwój systemów telekomunikacyjnych w dziedzinie przetwarzania i przesyłania informacji [68]. Współczesna teoria informacji obejmuje teorię modeli matematycznych źródeł informacji i źródeł zakłóceń, teorię zajmującą się miarą ilości przekazywanej informacji oraz właściwościami transmisyjnymi kanału komunikacyjnego, teorię kodowania i statystyczną teorię detekcji (odtworzenia sygnału).

Shannon, bazując na intuicyjnym podejściu do wiadomości jako zbioru wyrazów (symboli) o mniejszym lub większym znaczeniu uznał, że im większe prawdopodobieństwo wystąpienia danego symbolu w zdaniu, tym mniej informacji on niesie. Na tej podstawie stworzył matematyczny model informacji pozwalający ściśle określić, co jest najmniejszą jednostką informacji oraz jak wiele informacji zawartej jest w danym komunikacie.

Przyjęto, że istnieje zbiór symboli $S = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ nazywany alfabetem wtedy tylko i tylko wtedy, gdy każdy z symboli x_i , gdzie $i = 1, 2, \dots, n$ może być użyty do skonstruowania komunikatu. Przyjęto również, że istnieje zbiór znanych prawdopodobieństw wystąpień każdego z symboli $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, gdzie $p_i = p(x_i)$, $p_i \geq 0$ oraz $\sum_{i=1}^n p_i = 1$. W wypadku źródła bez pamięci, czyli takiego które wysyła kolejne symbole niezależnie od poprzednich, można zdefiniować ilość autoinformacji (ang. *self-information*) stowarzyszonej z symbolem x_i jako:

$$I(x_i) = -\log_k p_i \quad (3.1)$$

gdzie $k > 0$ i $k \neq 1$. Funkcję tę nazywa się też *entropią indywidualną* symbolu. W przypadku użycia logarytmu przy podstawie 2 ($k=2$), jednostką informacji jest *bit*. Entropia indywidualna jest miarą zaskoczenia, nieoczekiwania, a więc wartości informacji zawartej w symbolu. Ponieważ funkcja I zmienia się odwrotnie proporcjonalnie do prawdopodobieństwa p , mniej prawdopodobne symbole będą miały większą entropię indywidualną, co jest zgodne się ze wstępnymi założeniami Shannona.

Funkcja I dotyczy jednego symbolu i można ją określić niezależnie dla każdego z elementów alfabetu. Z punktu widzenia kompresji, ważny jest natomiast pomiar zawartości informacyjnej całego komunikatu. Dzięki temu wiadomo jak bogaty w informację jest określony komunikat i ile średnio bitów byłoby potrzebnych na zapisanie każdego z symboli przy zastosowaniu optymalnej metody kompresji. Funkcja *entropii* stowarzyszona ze zbiorem n niezależnych symboli zdefiniowana jest jako:

$$H(x_1, \dots, x_n) = H(S) = -\sum_{i=1}^n p_i \log_k p_i \quad (3.2)$$

przy czym $S = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ jest alfabetem, czyli zbiorem wszystkich symboli, natomiast $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ jest odpowiadającym zbiorem prawdopodobieństw ich wystąpienia. W przypadku źródeł binarnych ($k = 2$), entropię interpretować można jako najmniejszą średnią liczbę pytań, na które da się odpowiedzieć *tak* lub *nie*, konieczną do określenia wartości zmiennej x_i [20]. Entropia reprezentuje dolne ograniczenie na średnią liczbę bitów przypadających na jeden symbol w komunikacie, tj. ograniczenie na średnią długość słowa kodowego używanego do kodowania danego komunikatu. Zbiór słów kodowych $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$, gdzie $c_i \neq c_j$, przypisanych do symboli alfabetu $S = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ nazywany jest kodem. Kodem binarnym natomiast jest kod, w którym słowa składają się wyłącznie z zer i jedynek.

Każde słowo kodowe c_i posiada długość l_i oraz koszt. W kontekście kompresji, celem kodowania jest stworzenie takiego kodu, w którym średni koszt słowa kodowego, obliczany według wzoru:

$$L_{sr} = \sum_{i=1}^n p_i l_i \quad (3.3)$$

zredukowany jest do minimum.

Ponieważ każde ze słów kodowych danego kodu może mieć inną długość, a słowa w zakodowanym komunikacie występują jeden za drugim, konieczne jest określenie gdzie kończy się dane słowo kodu, a gdzie zaczyna następne. Kod, w którym istnieje tylko jeden taki sposób podziału ciągu słów kodu $c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{ik}$ na oddzielne słowa kodowe nazywany jest kodem jednoznacznie dekodowalnym. Podzbiorem kodów jednoznacznie dekodowalnych są kody przedrostkowe, które odznaczają się tym, że żadne ze słów kodowych nie jest przedrostkiem innego. Dzięki temu istnieje możliwość jednoznacznego rozpoznania kolejnych słów bez konieczności przeglądania zakodowanego komunikatu z wyprzedzeniem, w oczekiwaniu na znak końca słowa lub separator. W kodzie przedrostkowym, wyłącznie na podstawie analizy aktualnie badanego słowa kodowego, można określić czy dany znak jest ostatnim danego słowa kodowego.

Istnieje dowolnie wiele kodów dla danego komunikatu wejściowego. W kompresji dąży się jednak do tworzenia kodów możliwie najbardziej zbliżonych do optymalnych pod względem średniego kosztu. Kodem optymalnym jest kod, dla którego liczba L_{sr} jest najmniejsza spośród wszystkich kodów dla danego rozkładu prawdopodobieństwa P . W optymalnym systemie kodowania, dłuższe słowa kodu używane są tylko wówczas, gdy wszystkie krótsze słowa kodu zostały już użyte do zakodowania innych symboli.

Inną interpretację zagadnienia tworzenia kodów zaproponował Leon G. Kraft. W swojej pracy magisterskiej z 1949 roku [42] wyprowadził wzór pozwalający stwierdzić, czy dany zestaw kodów, a dokładniej dany zestaw długości kodów, może stanowić bazę do stworzenia binarnego kodu przedrostkowego. Twierdzenie Krafta jest następujące:

Tw. 1. Binarny kod przedrostkowy złożony ze słów kodu $\{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ o długościach $\{l_1, l_2, \dots, l_k\}$ istnieje wtedy i tylko wtedy, gdy

$$\sum_{i=1}^n 2^{-l_i} \leq 1 \quad [22] \quad (3.4)$$

Nierówności Krafta towarzyszy kilka istotnych wniosków na temat konstruowania kodów przedrostkowych. Po pierwsze, powyższa nierówność staje się równością, gdy słów kodu nie możemy już skrócić. Po drugie powyższe twierdzenie mówi, że dla pewnych długości słów kodowych możliwe jest znalezienie kodu przedrostkowego, istnieje jednak możliwość, że dla tych samych długości da się skonstruować kod jednoznacznie dekodowalny nie mający własności przedrostkowej. Nawiązując do drugiego wniosku, późniejsze prace w tej dziedzinie dowiodły jednak, że jeśli dla danego zbioru długości kodów możliwe jest stworzenie kodu jednoznacznie dekodowalnego, to istnieje również kod przedrostkowy.

Oznacza to, że nierówność Krafta można odnieść do dowolnego kodu jednoznacznie dekodowalnego.

Oprócz określenia, czy dla danych długości słów kodowych, możliwym jest zbudowanie kodu przedrostkowego, ważnym jest pozyskanie wiedzy na temat samych kodów. W kompresji kluczowym jest określenie, jaki współczynnik kompresji można osiągnąć dla danego komunikatu wejściowego stosując kodowanie binarne. Współczynnik kompresji definiuje się następująco:

$$C = \frac{K}{D} * 100\% \quad (3.5)$$

gdzie K oznacza rozmiar danych po kompresji, a D rozmiar danych przed kompresją. Oznacza to, że mniejszy współczynnik kompresji oznacza lepszą kompresję. Istnieją oszacowania, które określają dolne i górne granice średniej długości słowa kodowego kodu optymalnego opisane w [20]:

1) Dla dowolnego binarnego kodu przedrostkowego, dla którego średnia długość słowa kodowego $L_{sr} = \sum_{i=1}^n p_i l_i$, zachodzi nierówność:

$$L_{sr} \geq H(S) \quad (3.6)$$

2) Istnieje binarny kod przedrostkowy, dla którego

$$L_{sr} \leq H(S) + 1 \quad (3.7)$$

stąd wiadomo, że istnieje binarny kod przedrostkowy, dla którego:

$$H(S) \leq L_{sr} < H(S) + 1 \quad (3.8)$$

Jedno z usprawnień kodowania w takim przypadku polega na łączeniu symboli w grupy i kodowaniu ich za pomocą jednego kodu. Kolejne twierdzenie określa oszacowania przy stosowaniu tej metody:

3) *Podstawowe twierdzenie Shannona o dyskretnym kodowaniu bezszumowym:*

Tw.2. Dla źródła S o entropii $H(S)$ jest możliwe przypisanie słów kodowych ciągom k symboli źródła tak, że jest spełniona właściwość przedrostkowa oraz dla średniej długości L_k otrzymujemy:

$$H(S) \leq \frac{L_k}{k} < H(S) + \frac{1}{k} \quad [20] \quad (3.9)$$

Z ostatniego twierdzenia wypływa jeden bardzo ważny wniosek: jeżeli kodowanie poszczególnych symboli prowadzi do średniej długości słowa kodowego znacznie większej niż entropia komunikatu, długość tę można zredukować poprzez kodowanie ciągów symboli

zamiast każdego symbolu z osobna, otrzymując średnią długość słowa dowolnie bliską entropii układu.

W literaturze naukowej na temat kompresji zostało opisanych szereg metod pozwalających na systematyczne tworzenie kodów dla zadanego komunikatu wejściowego. Niektóre z nich są optymalne, inne zaś niemal optymalne. Efektywność danego kodu obliczana jest według następującego wzoru:

$$\eta = \frac{H(S)}{L_{sr}} * 100\% \quad (3.10)$$

W kolejnych podrozdziałach przedstawiono wybrane z nich, jak również metody umożliwiające dalsze zwiększanie stopnia kompresji danych.

3.1.2 Kodowanie Huffmana

Pierwszą opisaną optymalną metodą kodowania, która korzystała z teorii zaproponowanej przez C. Shannona była metoda kodowania Huffmana [33]. Algorytm ten został stworzony w oparciu o określone przez Davida Huffmana własności binarnych kodów optymalnych, a mianowicie:

- a) jeśli $p_j > p_i$, to $l_j \leq l_i$,
- b) dwóm najmniej prawdopodobnym symbolom odpowiadają słowa kodu o równej długości,
- c) dwa najdłuższe słowa kodu różnią się tylko ostatnim bitem gdzie $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ to zbiór prawdopodobieństw stowarzyszonych z alfabetem $S = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, a $L = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$ to długości słów kodowych $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$

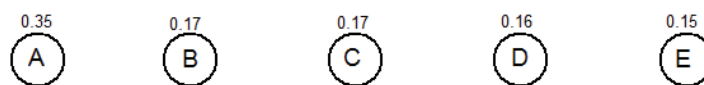
Metoda budowania kodów Huffmana wygląda następująco:

- 1) dla każdego symbolu utwórz drzewo złożone tylko z korzenia i ustaw te drzewa w malejącym porządku prawdopodobieństwa
- 2) dopóki istnieją przynajmniej dwa drzewa powtarzaj krok 3), w przeciwnym wypadku przejdź do kroku 4)
- 3) weź dwa drzewa t_1 i t_2 o najmniejszych prawdopodobieństwach p_1 i p_2 i utwórz z nich drzewo zawierające w korzeniu prawdopodobieństwo $p_1 + p_2$ mające drzewa t_1 i t_2 jako lewe i prawe poddrzewa
- 4) przypisz 0 każdej lewej i 1 każdej prawej krawędzi jedyne pozostałego drzewa

5) utwórz słowo kodowe dla każdego symbolu, przechodząc drzewo od korzenia do liścia zawierającego prawdopodobieństwo stowarzyszone z tą literą łącząc napotkane zera i jedyne [20].

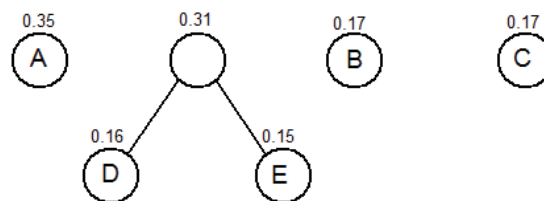
Dla przykładowego alfabetu źródłowego $S = \{A, B, C, D, E\}$ oraz prawdopodobieństw $P = \{0.35, 0.17, 0.16, 0.15\}$, można zaprezentować sposób działania procedury kodowania Huffmana.

W pierwszym kroku dla każdego symbolu z alfabetu $S = \{A, B, C, D, E\}$ stworzone zostanie drzewo złożone tylko z korzenia. Drzewa zostaną ułożone porządku malejącym według prawdopodobieństwa (rys. 3.1).



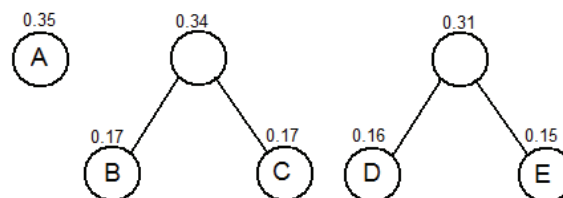
Rys. 3.1. Pierwszy krok algorytmu Huffmana

Krok drugi zostaje pominięty i w pierwszej iteracji kroku trzeciego dwa drzewa o najmniejszych prawdopodobieństwach 0.16 i 0.15 są łączone w jedno drzewo o prawdopodobieństwie 0.31 (rys. 3.2).



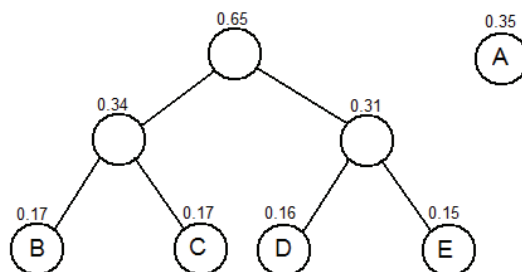
Rys. 3.2. Pierwsza iteracja budowania drzewa Huffmana

W kolejnej iteracji kroku trzeciego połączono korzenie B i C z prawdopodobieństwami 0.17 i 0.17, następnie drzewa : 0.34 i 0.31 (rys. 3.3).



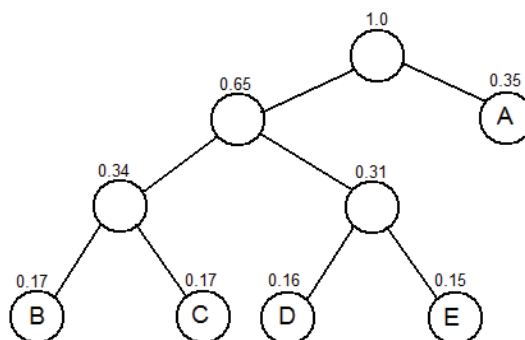
Rys. 3.3. Druga iteracja budowania drzewa Huffmana

W iteracji trzeciej, drzewami o najmniejszych prawdopodobieństwach były wcześniej utworzone drzewa: 0.34 i 0.31. Stworzono więc z nich drzewo o zsumowanym prawdopodobieństwie 0.65 (rys. 3.4).



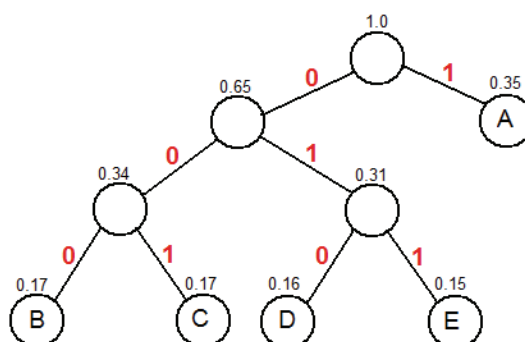
Rys. 3.4. Trzecia iteracja budowania drzewa Huffmana

Ostatnią czynnością w kroku 3 jest połączenie dwóch pozostałych drzew w jedno (rys. 3.5).



Rys. 3.5. Czwarta i ostatnia iteracja budowania drzewa Huffmana

Po utworzeniu kompletnego drzewa, każdej lewej krawędzi przypisana zostanie cyfra 0, a każdej prawej cyfra 1, co zostało pokazane na rys. 3.6.



Rys. 3.6. Krok 4 – przyporządkowanie zer i jedynek odpowiednim gałęziom

Ostatnim krokiem algorytmu jest utworzenie słów kodowych, zaprezentowanych w tab. 3.1, na podstawie powstałego drzewa.

Tab. 3.1. Przykład kodowania Huffmana

x_i	p_i	l_i	Słowo kodowe
<i>A</i>	<i>0.35</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
<i>B</i>	<i>0.17</i>	<i>3</i>	<i>000</i>
<i>C</i>	<i>0.17</i>	<i>3</i>	<i>001</i>
<i>D</i>	<i>0.16</i>	<i>3</i>	<i>010</i>
<i>E</i>	<i>0.15</i>	<i>3</i>	<i>011</i>

W podanym przypadku, średnia długość kodu wynosi:

$$L_{sr} = 0.35 * 1 + 0.17 * 3 + 0.17 * 3 + 0.16 * 3 + 0.15 * 3 = 2.3 \text{ bitów / symbol}$$

zaś entropia źródła równa się:

$$H(S) = 0.53010 + 0.43459 + 0.42302 + 0.41054 = 2.23284 \text{ bitów / symbol}$$

Efektywność kodowania Huffmana równa jest w tym przypadku:

$$\eta = \frac{2.23284}{2.3} * 100\% = 97.08\%$$

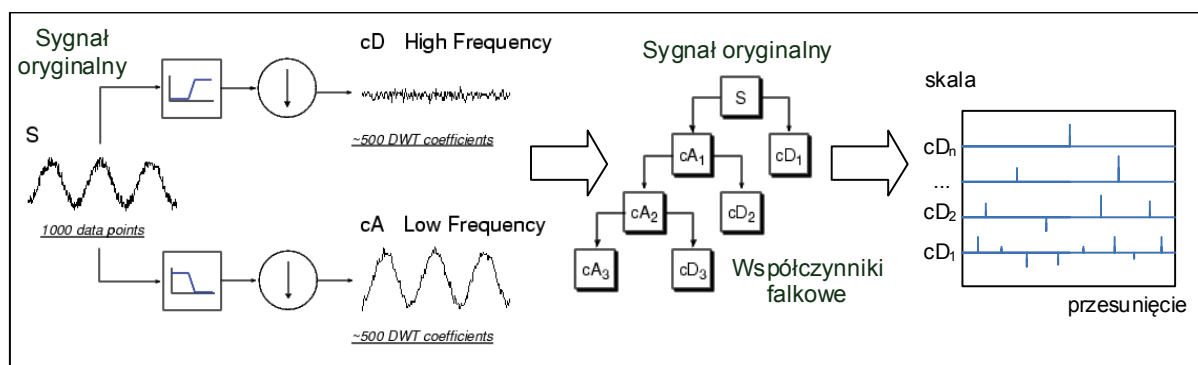
Kodowanie Huffmana jest jedną z najbardziej popularnych metod kompresji ponieważ sprawdza się dla wszystkich typów danych. Ma ono jednak także swoje wady. Rozmiar drzewa Huffmana oraz długość kodu rośnie proporcjonalnie do liczby kodowanych symboli. Dotyczy to przede wszystkim symboli o najniższym prawdopodobieństwie, dla których długość kodu może w najgorszym wypadku sięgać ilości symboli. Dla zbioru, na przykład 10 000 symboli, zjawisko to staje się wyjątkowo niekorzystne, zwłaszcza w przypadku, gdy razem ze skompresowanym komunikatem przesyłana będzie tablica kodów. Z tego powodu C.S. Weaver i M. Hankamer [31] opracowali metodę pozwalającą na ograniczenie wielkości tablicy kodów. Zaproponowali oni, aby dla symboli o najmniejszym prawdopodobieństwie, a więc i najdłuższych kodach, tworzyć kategorię ELSE, której przepisany jest jeden kod. Gdy zachodzi potrzeba zakodowania symbolu z kategorii ELSE, wpierw zapisany zostaje kod kategorii a następnie sam symbol. Dzięki temu unika się przesyłania całej tablicy kodów wraz z zakodowanymi danymi, samo kodowanie zaś, staje się przez te modyfikacje nieoptymalne. Praktyczne badania dowodzą jednak, że spadek efektywności algorytmu Weavera-Hankamera w stosunku do oryginalnego kodowania Huffmana jest znikomy.

W miarę potrzeby, kodowanie Huffmana poddaje się wielu innym modyfikacjom, mającym na celu na przykład dynamiczne uaktualnianie struktury drzewa kodowego w przypadku gdy prawdopodobieństwa wystąpień symboli w komunikacie nie są znane lub gdy przed rozpoczęciem kodowania w ogóle nie jest znany alfabet. Również w niniejszej pracy zastosowano autorskie modyfikacje kodowania Huffmana, które miały na celu zmniejszenie wymagań obliczeniowych przy tworzeniu drzewa kodowego dla dużego alfabetu oraz

przystosowanie algorytmu do równoległego kodowania wielu podzbiorów komunikatu jednocześnie. Wspomniane modyfikacje zostały szerzej opisane w podrozdziałach 4.2 oraz 4.3 rozprawy.

3.1.3 Transformata falkowa

Transformata falkowa jest przekształceniem sygnału umożliwiającym jego analizę zarówno w dziedzinie czasu jak i częstotliwości. Ma ona rozmaite zastosowania, między innymi w przetwarzaniu i filtracji sygnałów, kompresji obrazów oraz innego rodzaju danych. Matematycznie, transformata falkowa jest przekształceniem podobnym do transformaty Fouriera pod tym względem, iż oba należą do przekształceń całkowych. Oba przekształcenia opierają się na wykorzystaniu operacji iloczynu badanego sygnału $s(t)$ i pozostałej części, zwanej „jądrem przekształcenia”. W odróżnieniu od klasycznej analizy widmowej, analiza falkowa pozwala dokonać dekompozycji analizowanego sygnału na składowe zlokalizowane zarówno w dziedzinie czasu (przesunięcia), jak i częstotliwości (skali) [52]. W niniejszej pracy wykorzystano dyskretną transformację falkową (ang. *Discrete Wavelet Transformation* - DWT), która może być rozumiana jako zbiór filtrów dolnoprzepustowych i górnoprzepustowych oraz procedur decymacji badanego sygnału, jak przedstawione zostało to na rys. 3.7. W wyniku DWT sygnał przedstawiany jest w formie zbioru tzw. współczynników falkowych, odnoszących się do konkretnych lokalizacji w przestrzeni: (przesunięcie, skala), tworzących strukturę swego rodzaju drzewa, przedstawionego z prawej strony rys. 3.7. Wartość danego współczynnika związana jest z korelacją analizowanego sygnału z sygnałem będącym odpowiednio przeskalowaną i przesuniętą tzw. falką bazową (*mother wavelet*).



Rys. 3.7. Schemat dyskretnego przekształcenia falkowego jako zbioru filtrów

Reprezentacja falkowa sygnału jest więc funkcją dwóch zmiennych: skali m oraz przesunięcia n tzw. falki bazowej ψ i można ją przedstawić w następujący sposób:

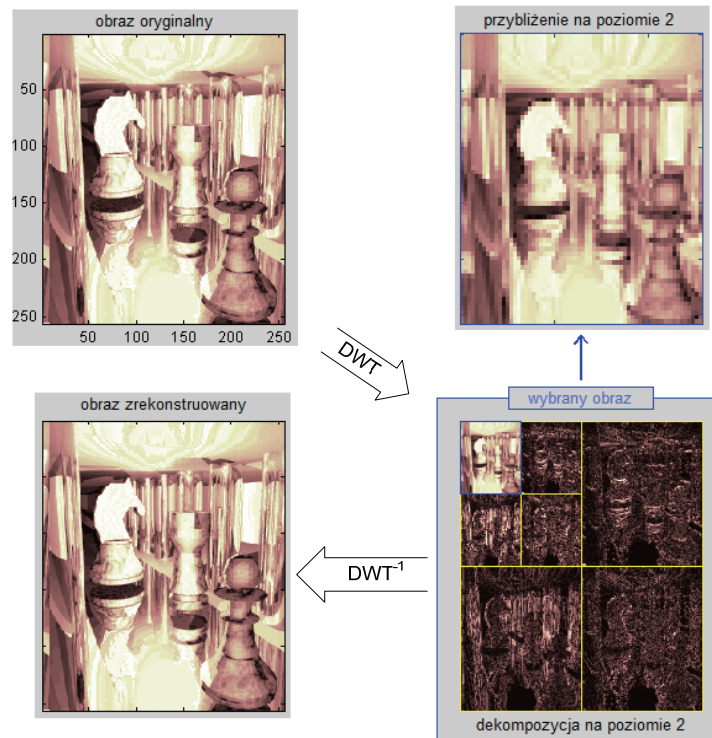
$$f(x) = \sum \sum d_{m,n} \Psi(2^{-m}x - n) \quad (3.11)$$

Współczynniki d i n oblicza się ze wzoru:

$$d_{m,n} = 2^m \int f(x) \Psi(2^{-m}x - n) dx \quad (3.12)$$

Falka, na podstawie której, przy pomocy skalowania i translacji, tworzy się zespół ortogonalnych funkcji bazowych, charakteryzuje się specyficznymi właściwościami: dobrą lokalizacją w czasie czyli zwartym nośnikiem funkcji oraz ograniczonym pasmem w dziedzinie częstotliwości. Dobre umiejscowienie i selektywność czasu powoduje, że falki doskonale nadają się do aproksymacji sygnałów zmiennych w czasie. Inną istotną cechą reprezentacji falkowej jest także to, iż zawiera ona w sobie informacje o sygnale na różnych poziomach szczegółowości, z tego powodu jest też ona doskonałym aproksymatorem sygnałów fizycznych. Kompresja sygnałów oraz obrazów z użyciem transformaty falkowej polega na wykorzystaniu specyficznej własności tej metody a mianowicie na fakcie, iż w wyniku transformacji, znaczna część współczynników $d_{m,n}$ jest bardzo mała w porównaniu do pozostałych. Może być przez to zastąpiona zerami bez zauważalnego zniekształcenia aproksymowanej funkcji w procedurze zwanej progowaniem (ang. *thresholding*).

W niniejszej pracy wykorzystano metody dwuwymiarowej dekompozycji falkowej. W ogólności, dla tego typu danych, a więc o charakterze obrazów, konstruuje się algorytm dwuwymiarowej dekompozycji falkowej. Polega on bądź na całkowitej dekompozycji obrazu w jednym wymiarze, a następnie w drugim, bądź na wymiennej dekompozycji raz w jednym, raz w drugim wymiarze podczas dekomponowania obrazu na kolejnych poziomach. Na rys. 3.8 zamieszczono przykład dekompozycji falkowej obrazu graficznego na poziomie drugim.



Rys. 3.8. Przykład dwuwymiarowej dekompozycji falkowej obrazu. DWT – dyskretna transformacja falkowa, DWT^{-1} – odwrotna dyskretna transformata Falkowa

Należy zauważyć, że samo przekształcenie falkowe nie prowadzi do zmniejszenia rozmiaru danych poddanych transformacji. Kompresja w tym przypadku polega na wykorzystaniu własności transformacji polegającej na otrzymywaniu w wyniku przekształcenia szeregu współczynników bliskich lub równych zero. Redukcja zbioru poprzez zastąpienie najmniejszych współczynników falkowych zerami oraz zastosowanie dodatkowych metod kompresji takich jak np. RLE (ang. *Run Length Encoding*) czy kodowanie arytmetyczne pozwala w efekcie na faktyczną redukcję danych [38][63]. Metodyka ta została wykorzystana do kompresji surowych danych batymetrycznych stanowiąc treść rozdziału 4.4 rozprawy.

3.2. Ogólna charakterystyka algorytmów przetwarzania równoległego

Przetwarzanie równoległe znajduje zastosowanie wszędzie tam, gdzie mamy do czynienia z wielokrotnie powtarzającymi operacjami, wykonywanymi dla różnych zestawów danych. Równoległe wykonywanie podzadań na wielu jednostkach obliczeniowych jednocześnie pozwala na skrócenie całkowitego czasu jaki jest potrzebny na rozwiązanie danego problemu. Przetwarzanie równoległe stosowane jest w celu zwiększenia wydajności

komputerów, rozwiązywania zaawansowanych problemów obliczeniowych oraz przyspieszenia działania programów.

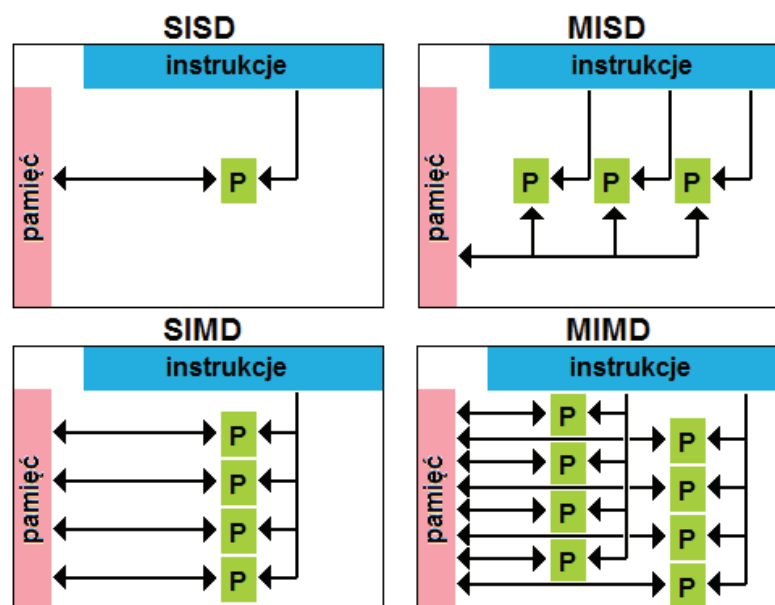
Mimo licznych korzyści płynących z optymalizacji za pomocą opisanej powyżej filozofii, stosowanie rozwiązań równoległych wiąże się z szeregiem ograniczeń sprzętowych oraz algorytmicznych. Po pierwsze, równoległe wykonanie danego zadania obliczeniowego jest możliwe tylko w przypadku podzielenia go na mniejsze i niezależne części, z których każda może być wykonywana niezależnie od pozostałych. Ponadto, w takim przypadku, żaden proces nie może być wykonany szybciej niż najdłuższy łańcuch zależnych od siebie obliczeń (znanych jako ścieżka krytyczna), ponieważ obliczenia, które są zależne od poprzednich obliczeń w łańcuchu, muszą być wykonywane po sobie. Problematyka obliczeń równoległych sięga praktycznie początku ery komputerów i jest ciągle stosowana w różnego rodzaju rozwiązaniach naukowych, badawczych oraz komercyjnych.

Jedną z najwcześniejszych klasyfikacji systemów dla równoległych (i sekwencyjnych) komputerów i programów zaproponował Michael J. Flynn. Sklasyfikował on programy i komputery w cztery zasadnicze grupy, według tego czy dany program lub komputer korzysta z jednego, czy z wielu zbiorów instrukcji oraz czy te instrukcje korzystają z jednego, czy z wielu zbiorów danych [24]:

- 1) SISD (ang. *Single Instruction, Single Data*) – jeden strumień instrukcji przetwarza jeden strumień danych, a więc typowa architektura sekwencyjna,
- 2) SIMD (ang. *Single Instruction, Multiple Data*) – jeden strumień instrukcji przetwarza równocześnie wiele strumieni danych. Architektura ta stosowana jest w komputerach wektorowych,
- 3) MISD (ang. *Multiple Instructions, Single Data*) – wiele strumieni instrukcji przetwarza jeden współdzielony strumień danych. Model wykorzystywany w systemach składających się z heterogenicznych jednostek obliczeniowych, gdzie głównym celem jest eliminacja błędów obliczeń.
- 4) MIMD (ang. *Multiple Instructions, Multiple Data*) – wiele autonomicznych procesorów równocześnie przetwarza własne zestawy danych. W ramach tej architektury wyróżnia się co najmniej dwie podkategorie:
 - a. SPMD (ang. *Single Program, Multiple Data*) – niezależne procesory przetwarzające własne zestawy danych wykonują ten sam zestaw instrukcji, czyli program. Jest to najczęściej spotykany współcześnie model programowania równoległego [18].

- b. MPMD (ang. *Multiple Programs, Mutiple Data*) – niezależne procesory wykonują co najmniej 2 niezależne programy. Zwykle w takich systemach jeden procesor wykonuje tzw. „kod hosta”, który przygotowuje i przekazuje dane dla pozostałych procesorów wykonujących drugi program.

Schematy czterech głównych architektur przedstawiono na rysunku rys. 3.9.



Rys. 3.9. Podział systemów według taksonomii Flynna, P oznacza jednostkę obliczeniową

Problematyka projektowania algorytmów służących do równoległego przetwarzania danych jest znacznie bardziej złożona niż tworzenie algorytmów sekwencyjnych. W algorytmach sekwencyjnych program wykonywany jest krok po kroku, to znaczy, że tylko jedna instrukcja może być wykonywana w tym samym czasie, a dane wyjściowe z jednej instrukcji przekazywane są bezpośrednio do kolejnej. W algorytmach równoległych napotykanym jest szereg problemów związanych z trudnością określenia optymalnego podziału zadań na niezależne podzadania i faktycznego wzrostu wydajności. Pojawiają się też problemy z dostępem do współdzielonej części danych, jak również niedeterministyczne efekty działania przy konkurencyjnych próbach zapisu do tej samej komórki pamięci przez wiele równoległych wątków. Z tego powodu algorytmy równoległe projektuje się w taki sposób, aby równocześnie wykonywane były jedynie zadania wzajemnie niezależne.

Warunki Bernsteina [1] pozwalają na określenie, czy dwa podzadania P_i i P_j o zbiorach wszystkich zmiennych wejściowych I_i , I_j oraz wyjściowych O_i , O_j mogą być wykonywane niezależnie:

$$1) I_j \cap O_i = \emptyset$$

$$2) I_i \cap O_j = \emptyset$$

$$3) O_i \cap O_j = \emptyset$$

Naruszenie warunków 1) lub 2) powoduje wystąpienie sytuacji, w której wynik działania jednego podzadania zależy od wyników drugiego, a więc zjawiska zależności przepływu. Warunek 3) natomiast, konieczny jest do zapewnienia niezależności wyjścia. Gdyby obydwa podzadania zapisywały wynik do wspólnych zmiennych, wyniki jednego zostałyby nadpisane przez wyniki drugiego.

Współczynnik, o jaki uda się przyspieszyć działanie algorytmu na platformie wieloprocesorowej, można wyznaczyć na podstawie prawa Amdahla [27]. Prawo to mówi, że przy znanym procencie podzadań całego algorytmu możliwych do niezależnego wykonania P , współczynnik maksymalnego przyspieszenia algorytmu S wynosi:

$$S = \frac{1}{(1 - P)}, \quad (3.13)$$

Oznacza to, że gdy 90% zadań można wykonywać równocześnie, maksymalne możliwe przyspieszenie algorytmu wynosi $S = \frac{1}{(1 - 0.9)} = \frac{1}{0.1} = 10$. Wynika z tego, iż w najlepszym wypadku algorytm zostanie wykonany 10 razy szybciej, niż gdyby był wykonywany sekwencyjnie.

3.3. Platforma CUDA jako narzędzie kompresji danych

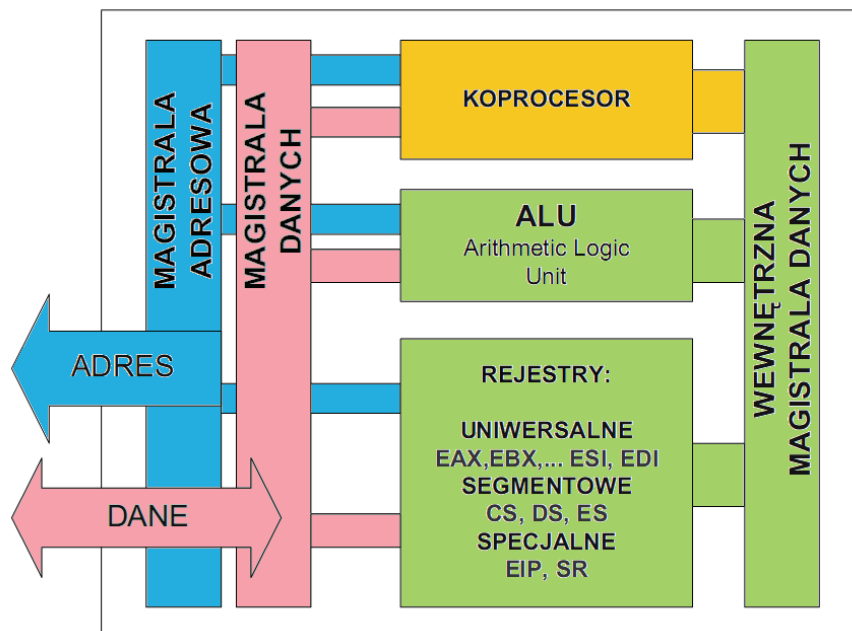
Jedną z najbardziej obiecujących gałęzi rozwoju w dziedzinie równoległego wykonywania obliczeń okazały się układy wielordzeniowe, a w tym dobrze znane graczom komputerowym wysokiej wydajności karty graficzne. Szybki rozwój przetwarzania równoległego z użyciem wielordzeniowych procesorów stał się więc jednym z największych wyzwań przemysłu komputerowego. Wielkie nadzieje związane z technologią zaowocowały w ciągu stosunkowo niedługiego czasu szeregiem proponowanych rozwiązań. Jeszcze w latach 2006/2007 dobrze rokującymi podejściami wydawały się *Wielordzeniowa Platforma Rozwojowa* firmy RapidMind, biblioteki matematyczne przeznaczone dla kart graficznych firmy PeakStream, nowa przyjazna deweloperom architektura CPU (ang. *Central Processing Unit*) firmy Ambric czy kafelkowa sieć rdzeni Tiler. Jednak już pod koniec roku 2006, po rocznych próbach w fazie beta-testów, firma nVidia, światowy lider produkcji wydajnych kart graficznych, oficjalnie zaprezentowała swoje rozwiązanie: Uniwersalną Architekturę Urządzeń Wielordzeniowych (ang. *Compute Unified Device Architecture*), czyli *nVidia CUDA* [30].

CUDA to platforma programistyczna pozwalająca na tworzenie aplikacji w języku C/C++ wykorzystująca możliwości przetwarzania równoległego wielu rdzeni procesora graficznego GPU. Twórcy technologii CUDA w kolejnych miesiącach udoskonalali kolejne wersje bibliotek programistycznych, natomiast architekti nVidia optymalizowali układy najnowszych kart graficznych pod kątem wykorzystania w obliczeniach niezwiązanych ściśle z grafiką. Efektem było rosnące zainteresowanie twórców aplikacji równoległych z różnych gałęzi przemysłu. CUDA już teraz uzyskuje bardzo dobre wyniki wielu dziedzinach: trójwymiarowych symulacjach fizycznych, obliczeniach chemicznych i biologicznych, wizualizacji przepływów i wielu innych. Licencja technologii CUDA pozwala na darmowe wykorzystanie bibliotek i narzędzi programistycznych na własny użytek, dzięki temu nie brakuje entuzjastów. Ci z kolei, wymieniając uwagi poprzez oficjalne forum CUDA na stronie nVidia.com z twórcami technologii, przyczyniają się do szybkiego jej rozwoju. Regularnie co kilka miesięcy, udostępniane są kolejne wersje bibliotek i narzędzi programistycznych integrowalnych z platformą Microsoft Visual Studio [30][59].

Jedną z największych zalet technologii CUDA jest to, że posiada interfejs programistyczny (API) ukrywający architekturę GPU, dzięki czemu programista, projektując metodę wykonywaną równoległe w na wielu rdzeniach GPU, nie musi znać faktycznej liczby dostępnych rdzeni, a jego program wykona się bez problemów na wszystkich kartach graficznych nVidia wspierających technologię CUDA w odpowiedniej wersji [30].

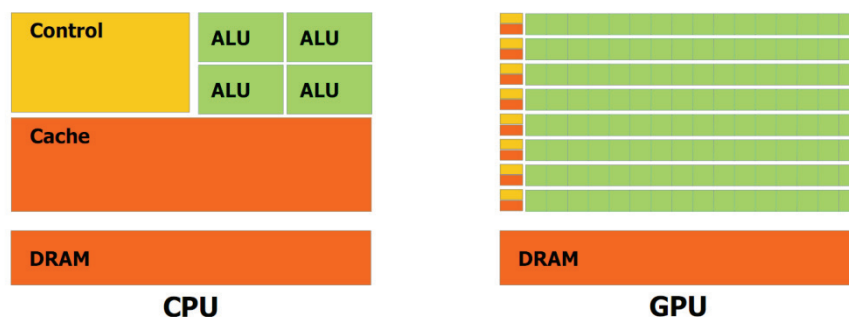
3.3.1 Architektura jednostki GPU

Na rys. 3.10 przedstawiono typową architekturę procesora ogólnego przeznaczenia. Składa się ona z kilku podstawowych modułów: jednostki obliczeń arytmetycznych (lub kilku), koprocatora, rejestrów oraz pamięci podręcznej L1 (cache), która podzielona jest zwykle na część przechowującą dane i część przechowującą rozkazy. Komunikacja z niewidoczną na rysunku pamięcią cache odbywa się poprzez magistralę danych i adresową.



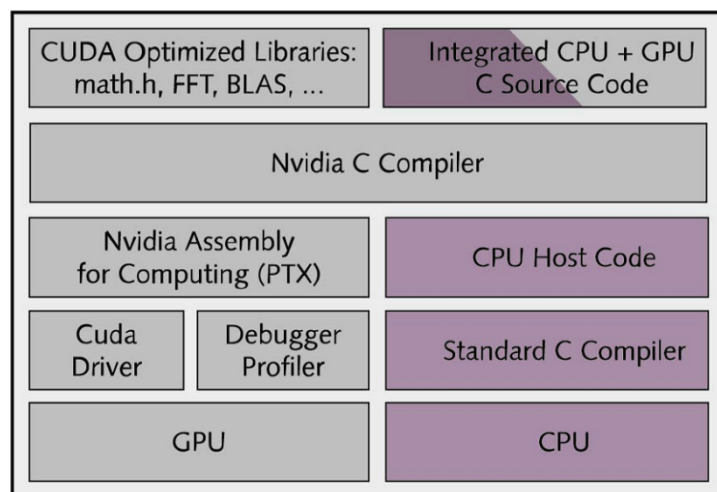
Rys. 3.10. Architektura jednostki CPU (architektura harwardzka)

W odróżnieniu od jednostek obliczeniowych ogólnego przeznaczenia procesory GPU zostały zaprojektowane tak, by umożliwić wykonywanie wielu współbieżnych operacji na tego samego typu danych. Zwiększono więc liczbę tranzystorów pełniących funkcję jednostek obliczeń arytmetycznych kosztem koprocatora i pamięci podręcznej. Jest to zasadne, gdyż w przypadku większej ilości danych poddawanych tym samym obliczeniom, niepotrzebne są wyrafinowane metody kontroli przepływu danych, jakie zapewnia rozbudowany koprocator. Także rozmiar pamięci podręcznej można było w tym przypadku ograniczyć, gdyż niepotrzebne jest dublowanie tych samych rozkazów dla każdej z jednostek ALU. Rys. 3.11 przedstawia ilościowe różnice w przeznaczeniu tranzystorów układu na omówione moduły mikroprocesora dla CPU i GPU [59].



Rys. 3.11. Porównanie architektur CPU i GPU

Programowanie w technologii CUDA polega na pisaniu kodu zarówno dla GPU jak i CPU, które współpracują ze sobą w ramach jednej aplikacji. W związku z tym, warstwowa architektura platformy posiada moduły odpowiadające za integrację tych dwóch oddzielnych środowisk w jednym interfejsie API przeznaczonym dla programistów. Rys. 3.12 [59] demonstruje kolejne warstwy abstrakcji pomiędzy aplikacją a jednostkami GPU i CPU.

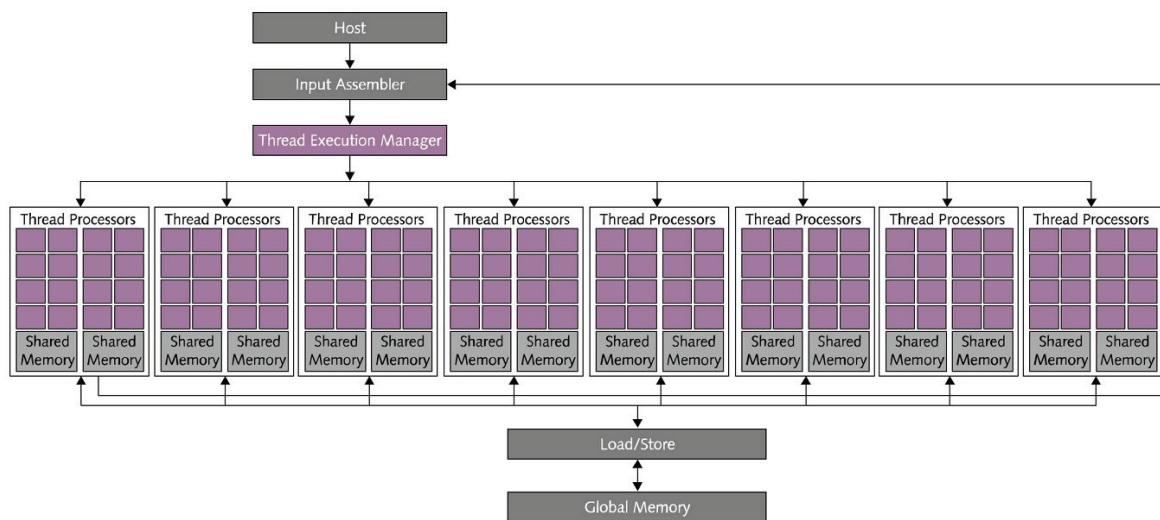


Rys. 3.12. Architektura platformy CUDA

Kluczowymi modułami w architekturze platformy CUDA jest zintegrowany kod źródłowy przeznaczony dla CPU i GPU rozdzielany na poziomie kompilatora. Dużym ułatwieniem dla programistów są też zoptymalizowane biblioteki funkcyjne oraz mechanizm warstw abstrakcji ukrywających sprzętowe szczegóły budowy GPU. Narzędzia programistyczne CUDA wymagają co prawda pisania fragmentów nietypowego kodu dla funkcji przeznaczonych dla GPU, jednak oprócz dodatkowych operatorów dostępnych jest większość procedur z podstawowych bibliotek C/C++. Dzięki temu tworzenie aplikacji nie wymaga nauki nowego języka programowania. Dla najprostszych programów wystarczy umiejętność deklarowania metod przeznaczonych dla GPU. Projektowanie procedur równoległych wymaga oczywiście umiejętności sterowania przepływem wykonania aplikacji już nie w jednym, a w dwóch wymiarach. Tak jak w przypadku CPU, każda procedura równoległa wykonywana jest sekwencyjnie, z tą różnicą, że jest ona wykonywana równocześnie w ramach wielu niezależnych wątków. Wprowadza to często wiele komplikacji, których trzeba być świadomym i dopiero ta wiedza, w połączeniu ze znajomością silnych i słabych stron tego rozwiązania pozwala na właściwe wykorzystanie możliwości przetwarzania równoległego [30].

Schemat architektury jednostki GPU spotykanych na kartach graficznych firmy nVidia przedstawiono na rys. 3.13. Nowoczesne jednostki GPU posiadają kilkaset procesorów

wątkowych, nazywanych także procesorami strumieniowymi lub shader'ami pikseli. W serii kart graficznych GeForce 8 każdy z nich posiada pojedynczej dokładności jednostkę obliczeń zmiennoprzecinkowych oraz 1024 rejestry, każdy o wielkości 32 bitów. Każdy klaster ośmiu procesorów wątkowych posiada 16kB współdzielonej pamięci lokalnej wspierającej równoległy dostęp w obrębie klastra. Moduł zarządzania wykonaniem wątków automatycznie rozdziela zdefiniowane przez programistę wątki pomiędzy procesory wątkowe bez konieczności przydzielania wątków do konkretnych procesorów przez twórcę aplikacji, zapewniając jednocześnie maksymalne wykorzystanie czasu oczekiwania na dostęp do pamięci na obliczenia arytmetyczne.



Rys. 3.13. Architektura jednostki GPU

Dla kart graficznych tej konkretnej serii (GeForce 8) maksymalna liczba wszystkich wątków wykonywanych jednocześnie wynosi 12 288 [59]. Dane dostarczane do wątków dzielone są na paczki i umieszczane we współdzielonej pamięci lokalnej, dzięki czemu unika się zbędnych odwołań do pamięci globalnej, co znacznie podnosi wydajność. Dostęp do pamięci globalnej jest niewłaścivnym elementem każdego algorytmu równoległego i pod względem czasowym jest bardzo obciążający, gdyż pamięć globalna nie może być czytana równoległe przez dowolną liczbę wątków. Kiedy jednak wątek musi się do niej odwołać, dostęp obsługiwany jest przez zoptymalizowany system kolejkowania zapewniający nieblokowanie się wątków wzajemnie w oczekiwaniu na swoją kolej na odczyt lub zapis. Z tego powodu, jednym z głównych zaleceń pisania aplikacji równoległych jest minimalizowanie odwołań do pamięci globalnej i korzystanie w największym możliwym stopniu ze współdzielonej pamięci lokalnej bądź pełnego zestawu rejestrów dostępnych dla każdego wątku. Wykorzystanie rejestrów także zapewnione jest automatycznie. Ładowane są

do nich zmienne lokalne metody, pod warunkiem, że nie przekraczają one łącznej pojemności 1024 32-bitowych rejestrów. Poszczególne parametry liczbowe stanowiące podstawę wydajności danej karty graficznej są inne dla kart graficznych różnych serii. Jednak sam projekt aplikacji równoległej w technologii CUDA jest niezależny od konkretnych parametrów urządzenia, na którym docelowo zostanie uruchomiony [59].

3.3.2 Wydajność w technologii CUDA

Technologię CUDA używa się obecnie na najszerzą skalę w takich dziedzinach jak obliczenia dynamiki płynów, tworzenie treści cyfrowych, narzędzia do projektowania układów, finanse, grafika czy obrazowanie w grach komputerowych. Z uwagi na inną architekturę jednostki obliczeniowej GPU proces modelowania samej aplikacji CUDA ma swoją specyfikę. W ogólności, aby przetworzyć instrukcję dla bloku wątków, multiprocessor GPU musi wykonać następujące operacje:

- 1) wczytać argumenty instrukcji dla każdego wątku w bloku,
- 2) wykonać instrukcję,
- 3) zapisać wynik operacji dla każdego wątku w bloku.

W konsekwencji, efektywność wykonania instrukcji zależy w takim samym stopniu od nominalnego czasu jaki jest potrzebny do wykonania danej instrukcji, jak od czasu odczytu bądź zapisu pamięci i jej szybkości. Efektywność maksymalizuje się poprzez ograniczenie do minimum używania nieefektywnych instrukcji oraz maksymalne wykorzystanie pamięci na każdym z trzech poziomów. Równie ważną, jeśli nie najważniejszą, kwestią jest umożliwienie modułowi zarządzania wątkami pokrywania, w największym możliwym stopniu, transakcji na pamięci obliczeniami arytmetycznymi. Program spełniający ostatni warunek posiada tzw. „wysoką intensywność arytmetyczną”. Aby aplikacja posiadała tę korzystną własność, zaleca się stosowanie o wiele większej ilości operacji arytmetycznych w stosunku do liczby odczytów/zapisów pamięci. Dodatkowo zaleca się także wywoływanie aplikacji z wieloma aktywnymi wątkami w ramach jednego bloku wątków. Minimalną liczbą są tutaj 64 aktywne wątki, choć w celu maksymalizacji wydajności aplikacji zaleca się 192 lub 256 wątków w bloku [59].

Ponieważ kopiowanie dużych ilości danych pomiędzy pamięcią karty graficznej a pamięcią RAM komputera jest bardzo kosztowne, wprowadzono kilka mechanizmów na ominięcie tej przeszkody. Pierwszym rozwiązaniem jest alokowanie części przesyłanych tablic danych w pamięci RAM w trybie „page-locked”. Oznacza to, że tablice takie nie będą

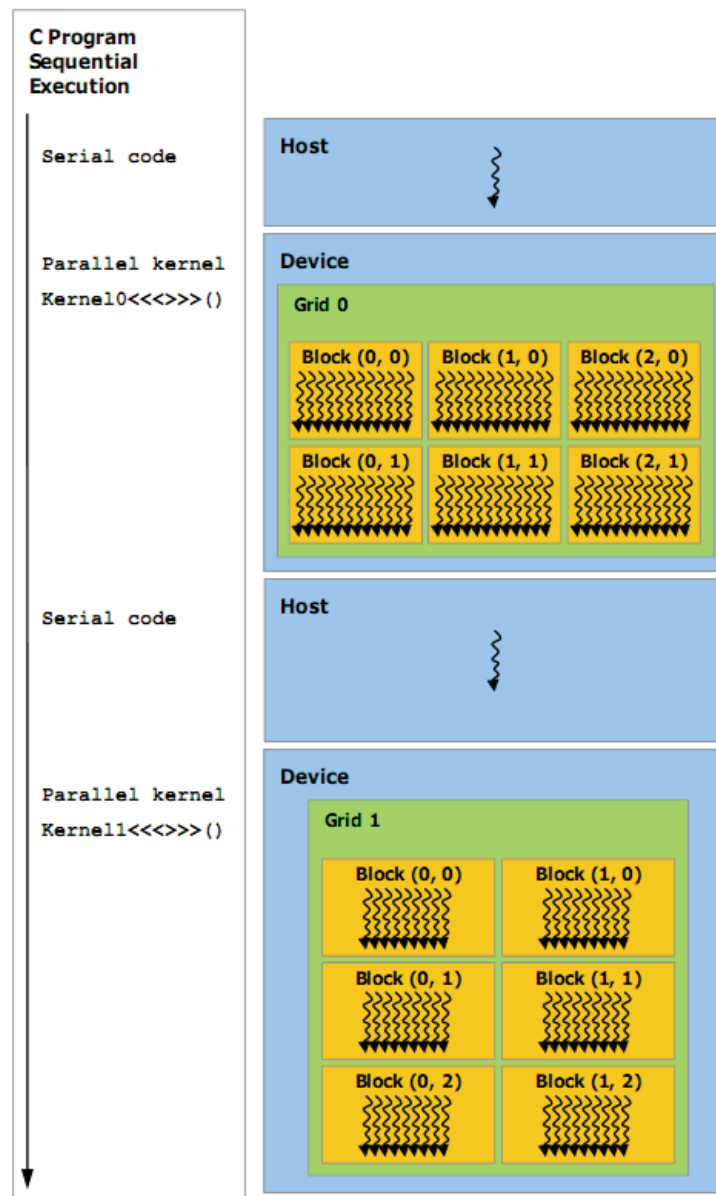
podlegały mechanizmowi stronicowania pamięci i dostęp do nich będzie się odbywał w znacznie krótszym czasie. Drugim rozwiązaniem jest zastosowanie zmapowanej pamięci w trybie „page-locked”. Mapowanie pamięci polega na używaniu pamięci RAM komputera zarówno przez wątek wykonywany na CPU jak i wszystkie wątki GPU. Taki mechanizm zapewnia, że kopiowanie danych pomiędzy kartą graficzną a pamięcią RAM odbędzie się jedynie w momencie odczytu lub zapisu do tej pamięci w danym wątku. Implementacja takiego rozwiązania jest relatywnie czasochłonna, lecz w niektórych aplikacjach może okazać się najwydajniejszym z podejść, zwłaszcza kiedy komórki pamięci odczytywane i zapisywane są raz w obrębie wątku. Przedstawione mechanizmy pozwalają na częściowe obejście problemu wolnego transferu danych pomiędzy pamięcią komputera a pamięcią karty graficznej, należy jednak pamiętać, że najlepszą metodą na podniesienie wydajności aplikacji jest unikanie tego typu zabiegów [59].

3.3.3 Tworzenie aplikacji

Język C, w którym tworzy się aplikacje w technologii CUDA, stanowi rozszerzenie standardowego języka C umożliwiając programiście definiowanie funkcji C jako tzw. funkcji „jądra” (ang. *kernel*). Gdy wywołana, w przeciwieństwie do zwykłych funkcji C, funkcja będąca jądrem zostaje wykonana równocześnie N razy poprzez N różnych wątków. Jądro definiuje się za pomocą klauzuli `__global__` przy deklaracji funkcji i wywołuje z użyciem nowej składni `<<<...>>>`. Każdy z wątków wykonujących kod jądra otrzymuje unikalny identyfikator, który dostępny jest wewnątrz jądra poprzez wbudowaną zmienną `threadIdx`. Zmienna ta, ze względów praktycznych, jest definiowana jako wektor o trzech polach. Dzięki temu wątki można identyfikować w jednym, dwóch lub trzech wymiarach, zależnie od definicji wymiarów bloku wątków. Wątki mogą wymieniać dane w obrębie bloku poprzez pamięć współdzieloną. Ponieważ jednak jądro może być wykonywane przez wiele identycznych bloków wątków, istnieje możliwość synchronizacji pracy wątków pomiędzy blokami. Służy do tego funkcja `__syncthreads()`, której wywołanie w kodzie stanowi barierę, na której wątki czekają dopóki wszystkie pozostałe wątki dotrą do tego samego punktu w kodzie. Bloki wątków grupowane są w jednej jedno- lub dwu-wymiarowej tablicy, co przedstawia rysunek rys. 3.14 [59].

W terminologii CUDA kartę graficzną wraz z jej układem GPU oraz pamięcią nazywa się „urządzeniem” (ang. *device*), zaś CPU, pamięć RAM i pozostałe moduły jednostki centralnej nazywa się „hostem”. Model programowania w technologii CUDA zakłada, że kod

hosta, wykonywany sekwencyjnie, odpowiedzialny jest za wywołania jąder wykonywanych na urządzeniu. Następnie oczekuje on na zakończenie funkcji równoległej, zwrócenie wyniku przez urządzenie i przystępuje do wykonywania dalszej części logiki. Taką aplikację nazywa się heterogeniczną, gdyż łączy wykonanie procedur sekwencyjnych i równoległych co zostało pokazane na rys. 3.14.



Rys. 3.14. Schemat wykonania aplikacji heterogenicznej

W ramach pracy stworzono aplikację do kompresji danych sonarowych pracującą w trybie czasu rzeczywistego wykonaną technologią CUDA. Kod hosta kontroluje przebieg wykonania całej aplikacji i odpowiada za przygotowanie bufora danych dla jąder urządzenia, które wykonują równoległe kodowanie wydzielonych fragmentów bufora. Sposób

wykorzystania opisanej powyżej architektury wraz z projektem systemu przedstawione zostały w rozdziale czwartym.

3.4. Specyfika kompresji danych z sonaru wielowiązkowego

W rozdziale drugim dokonano syntaktycznej analizy struktury danych pochodzących z sonarów wraz z podziałem na najważniejsze składowe, które są poddawane procesowi przetwarzania danych. Poniżej przedstawiono zagadnienia dotyczące samej metodyki przetwarzania informacji pochodzących z systemów MBS, głównie w kontekście kompresji oraz archiwizacji, które pozwalają na określenie jakości stosowanych metod przetwarzania oraz poziomu dopuszczalnych błędów związanych z rekonstrukcją danych. Omówiono także aspekty oceny wydajności algorytmów przetwarzania danych sonarowych.

3.4.1 Podział algorytmów ze względu na przeznaczenie

Podstawowym kryterium podziału algorytmów przetwarzania danych pochodzących z sonarów wielowiązkowych jest przeznaczenie, czyli sposób w jaki projektowane rozwiązania mają być wykorzystane podczas pracy z systemami wielowiązkowymi. Z tego względu przyjęto podział algorytmów przetwarzania na metody, których podstawowym celem jest archiwizacja danych (*offline*) oraz na metody, które są stosowane w trybie czasu rzeczywistego (*online*). W pierwszym przypadku podstawowym kryterium oceny jest stopień kompresji, w drugim natomiast jest także istotny czas przetwarzania otrzymywanego strumienia danych, w szczególności ważne jest to, aby czas kompresji dla poszczególnych rekordów otrzymywanych z systemu wielowiązkowego, był krótszy niż czas tworzenia takiego rekordu przez system wielowiązkowy. W związku z tym, w pracy zdecydowano się wprowadzić dwa podstawowe kryteria oceny jakości opracowanych algorytmów polegające na:

- a. ocenie otrzymywanego współczynnika redukcji rozmiaru danych,
- b. ocenie wydajnościowej opracowanych metod

W przypadku oceny współczynnika redukcji rozmiaru danych, w procesie archiwizacji narzędziem do oceny jakości są stosowane powszechnie narzędzia kompresji plików takie ZIP, RAR, 7-ZIP, JPEG oraz inne. Ocena wydajnościowa projektu polega natomiast na ocenie czasu przetwarzania poszczególnych datagramów danych otrzymywanych z sonaru wielowiązkowego i porównaniu ich z czasem generacji, który jest zapisywany w plikach wynikowych pomiaru. Należy także dodać, iż ewentualne stworzenie metod archiwizacji

danych sonarowych działających w trybie czasu rzeczywistego byłoby unikatowym rozwiązaniem i mogłoby w znaczny sposób przyczynić się do rozwoju metod telemonitoringu morskiego opartych o stosowanie systemów wielowiązkowych.

3.4.2 Wydajność algorytmów

Wydajność opracowanych algorytmów jest w pracy oceniona poprzez pojęcie „przepływowości” (pojemność kanału, ang. *throughput*), które w telekomunikacji i informatyce oznacza maksymalną ilość informacji (mierzonej w bitach), jaka może być przesyłana przez dany kanał telekomunikacyjny, algorytm, rozwiązanie technologiczne lub łącze w jednostce czasu (mierzonej najczęściej w sekundach). W kontekście wydajnego przetwarzania danych, istotne jest aby proponowane rozwiązania miały przepływowość wyższą niż strumień danych otrzymywanych z systemu MBS. Ewentualna wyższa przepływowość projektowanego rozwiązania w stosunku do generowanego strumienia danych oznacza, iż dane rozwiązanie może być stosowane w trybie czasu rzeczywistego. Na podstawie parametrów technicznych sonarów można określić teoretyczną maksymalną przepływowość strumienia generowanych danych liczoną w MB/s:

$$T_{teoretyczna} = L_B * B * S * PR, \quad (3.14)$$

gdzie L_B oznacza maksymalną liczbę wiązek równą 3520, B maksymalny rozmiar formatu zapisu jednej próbki równą 4 bajty, S maksymalną długość sygnału cyfrowego zarejestrowanego (przyjęto 32000 próbek), PR maksymalną częstotliwość próbkowania (ang. *ping rate*) równą 40 Hz, stąd:

$$T_{teoretyczna} = 3520 * 4 * 32000 * 40 \approx 17 \text{ GB / s}$$

Praktyka pokazuje, że przepustowości tego rzędu są dla sonarów wielowiązkowych nieosiągalne, co wynika głównie z ograniczonych możliwości obliczeniowych systemu wielowiązkowego oraz szybkości dysków twardych, których maksymalne transfery odczytu i zapisu wynoszą zwykle po kilkadziesiąt megabajtów na sekundę. Dopiero najnowsze modele dostępne obecnie na rynku oferują przepustowości nieco wyższe niż 100 MB/s. Alternatywna metoda obliczenia realnej przepustowości polega na analizie znaczników czasowych zawartych w rekordach otrzymywanych z sonaru wielowiązkowego. W tym celu wykorzystuje się wzór:

$$T_{\max} = \max\left(\frac{S_i}{t_i^{\text{last}} - t_i^{\text{first}}}\right) \text{ dla } 1 \leq i \leq N, \quad (3.15)$$

gdzie: T_{max} jest maksymalną realną przepustowością, N liczbą dostępnych plików, S_i – rozmiarem pliku, t_i^{last} – czasem odbioru ostatniego datagramu w pliku a t_i^{first} czasem odbioru pierwszego datagramu w pliku. Wyniki obliczeń dla reprezentatywnych przypadków testowych przedstawiono w tab. 3.2.

Tab. 3.2. Przepływowości strumienia danych dla pomiarów wykonanych sonarem wielowiązkowym RESON Seabat serii 7 (7k) z włączoną opcją zapisu akustycznych zobrażeń toni wodnej.

Nazwa pliku	S_i [kB]	$t_i^{last} - t_i^{first}$ [s]	$\frac{S_i}{t_i^{last} - t_i^{first}}$ [MB/s]
20060719_204657__7125 (400kHz).s7k	557 285	22,25	23,89
20051014_185729__7125 (400kHz).s7k	589 345	30,16	18,64
20070720_170910.s7k	1 126 438	517,70	2,08
20070720_171128.s7k	477 037	50,42	9,02
20060201_190255__7125 (400kHz).s7k	587 688	30,49	18,82
20070315_184108.s7k	129 788	4,38	28,29
20070720_170721.s7k	937 394	100,06	8,93
20070831_185543.s7k	303 756	4,61	6,35

Realna przepływowość otrzymywanych danych z systemu wielowiązkowego z włączonym trybem rejestracji zobrażeń akustycznych toni wodnej oznacza w praktyce generowanie strumienia danych z prędkościami do 30 MB/s. Stąd, też przy realizacji algorytmów przetwarzania danych przeznaczonych do pracy w trybie czasu rzeczywistego przepływowość projektowanych rozwiązań powinna być dostosowana do wielkości pokazanych w tabeli 3.2. W podrozdziale 4.1 niniejszej pracy zaproponowano metody reorganizacji, które pozwalają na uzyskiwane znacznie wyższych stopni kompresji danych zawierających omawiane zobrażenia akustyczne, natomiast w podrozdziałach 4.2 oraz 4.3 zaproponowano metody optymalizacji przetwarzania danych przeznaczone do działania w trybie czasu rzeczywistego.

Należy oczywiście zauważyć, iż dla pomiarów w których nie są zapisywane zobrażenia akustyczne toni wodnej, wymagana prędkość działania algorytmów przetwarzania nie jest tak duża i wynosi często poniżej 1 MB/s. W tabeli 3.3 zaprezentowano wyniki obliczeń dla pomiarów o charakterze typowo „batymetrycznym”, w których zobrażenia akustyczne toni wodnej nie były rejestrowane.

Tab. 3.3. Przepływowości strumienia danych otrzymywanych z sonaru wielowiązkowego dla pomiarów wykonanych sonarem wielowiązkowym EM 3002 bez zapisu akustycznych zobrazowań toni wodnej.

nazwa pliku	S_i [kB]	$t_i^{last} - t_i^{first}$ [s]	$\frac{S_i}{t_i^{last} - t_i^{first}}$ [MB/s]
0001_20070920_172143_Oceania.all	14 791	1284	0,011
0002_20070921_082105_Oceania.all	29 982	686	0,041
0003_20070920_161822_Oceania.all	42 655	796	0,051
0005_20070920_163312_Oceania.all	61 398	670	0,088
0006_20070920_164423_Oceania.all	7 940	117,5	0,066

W tym przypadku, z uwagi na relatywnie niedużą ilość generowanej informacji, szczególnie istotnym elementem, nie jest czas przetwarzania danych, ale stopień kompresji oraz poziom błędu jaki jest wprowadzany podczas rekonstrukcji danych. Algorytmy przetwarzające tego typu dane, przeznaczone głównie do zastosowań, w których najważniejsza jest otrzymywana informacja o rzeźbie dna morskiego, zostały opisane w podrozdziale 4.4.

3.4.3 Dopuszczalne błędy rekonstrukcji

Istotnym elementem w procesie stratnej kompresji danych jest także ocena jakości zrekonstruowanej informacji. Należy podkreślić, iż niektóre składniki otrzymywanych danych sonarowych mogą być poddawane do pewnego stopnia stratnej kompresji, przykładem mogą być zobrazowania akustyczne toni wodnej, a inne, np. dane dotyczące rozmiarów poszczególnych datagramów, muszą być kompresowane bezstratnie, tak aby możliwa była prawidłowa interpretacja otrzymywanej informacji.

Zobrazowania akustyczne toni wodnej stanowią jeden z najistotniejszych składników danych sonarowych zwłaszcza w zastosowaniach naukowych. Ich dokładność jest determinowana jakością sprzętu pomiarowego jaki jest stosowany w obecnie produkowanych systemach wielowiązkowych [25][78]. Jakość przetworników elektro-akustycznych montowanych w głowicach sonarów, w chwili obecnej, nie pozwala na uzyskiwanie pomiarów dokładniejszych niż 0.5 dB, zatem zapis tej informacji z większą dokładnością powoduje redundancję danych. W opracowanych algorytmach przyjęto zatem, iż dokładność otrzymywanych danych jest na poziomie 0.5 dB.

Innym składnikiem, który do pewnego stopnia, może zostać poddany stratnej kompresji jest batymetria insonifikowanej powierzchni. W tym przypadku jakość otrzymywanych

danych wynika między innymi z prędkości dźwięku w wodzie, częstotliwości próbkowania oraz częstotliwości pracy sonaru i w przypadku systemów Simrad-Kongsberg EM 3002 oraz RESON, nie jest lepsza niż 2.5 cm. Z tego względu, w zastosowanych rozwiązaniach przyjęto, iż błąd rekonstrukcji danych batymetrycznych, obliczany jako pierwiastek błędu średniokwadratowego (ang. *Root Mean Squared Error – RMSE*), wynoszący 1cm nie stanowi istotnej degradacji jakości otrzymywanej informacji batymetrycznej.

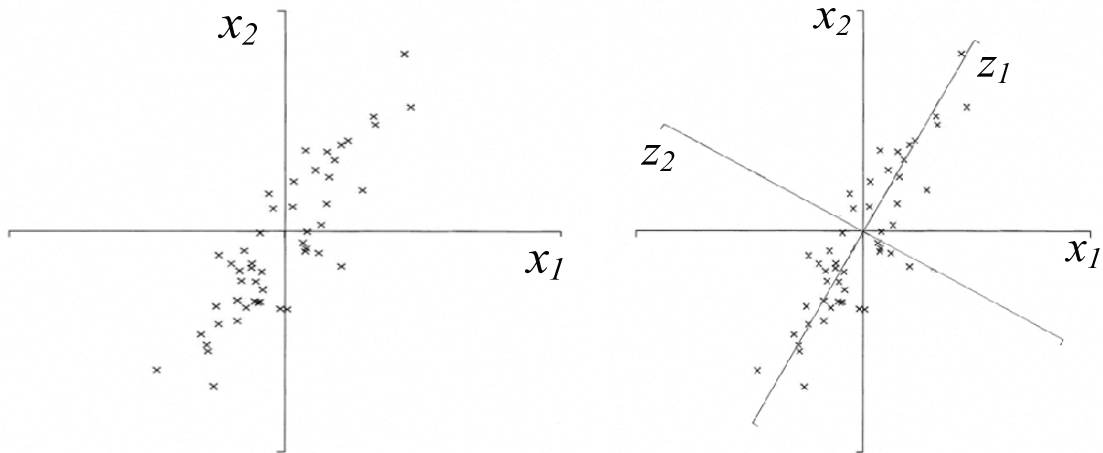
3.5. Analiza głównych składowych i jej zastosowanie w kompresji danych

W celu odkrycia istotnych zależności, jakie zachodzą między zmiennymi opisującymi obiekt wielowymiarowy stosuje się techniki optymalnej redukcji wymiaru przestrzeni danych pozwalające kontrolować stopień istotności zaniechywanej informacji. Jedną z takich technik jest analiza głównych składowych (ang. *Principal Component Analysis – PCA*), polegająca na dokonaniu transformacji początkowych zmiennych w zbiór nowych, wzajemnie niezależnych zmiennych (składowych) [43].

Idea algorytmu polega na łączeniu skorelowanych zmiennych wyjściowych w kombinacje liniowe, tworzące nowe zmienne. Geometrycznie odpowiada to dokonywaniu rotacji pierwotnego układu współrzędnych w wielowymiarowej przestrzeni danych w taki sposób, by osie nowego układu w jak najlepszy sposób, w sensie kryterium najmniejszych kwadratów, dopasowane były do chmury punktów w przestrzeni danych. Efektem zastosowania algorytmu jest otrzymanie nowego zbioru zmiennych o szczególnie pożytecznych dla badacza własnościach:

- ilość nowych zmiennych (składowych głównych) nie przekracza ilości początkowych zmiennych,
- kolejne składowe są ortogonalne (nieskorelowane),
- łączna wariancja składowych jest równa ogólnej wariancji początkowych zmiennych, a wkład każdej kolejnej składowej w ogólną wariancję – malejący i jasno określony,
- współczynniki prostych tworzących składowe dostarczają informacji o stopniu powiązania składowej z poszczególnymi zmiennymi początkowymi.

Graficzna reprezentacja procesu znajdowania głównych składowych danego zestawu danych w przestrzeni dwuwymiarowej polega na wyznaczeniu nowych osi układu współrzędnych w taki sposób, aby zminimalizować odległość punktów pomiarów od kolejnych nowopowstałych osi (rys. 3.15). Osie te są do siebie prostopadłe i są zarazem składowymi głównymi omawianego zestawu danych.



Rys. 3.15. Graficzna reprezentacja przykładowej analizy głównych składowych dla przypadku dwuwymiarowego. Osie x_1 oraz x_2 reprezentują oryginalny układ współrzędnych, natomiast osie z_1 oraz z_2 odpowiadają składowym głównym opisanego zestawu danych

W bardziej uogólnionym zapisie przyjmuje się, że dane wejściowe stanowi macierz zawierająca p obserwacji, na podstawie której będą wyznaczone główne składowe (wektory bazowe nowej przestrzeni):

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_p) \quad (3.16)$$

Pierwszy składnik główny w PCA zdefiniowany jest jako

$$z_1 \equiv a_1^T x = \sum_{i=1}^p a_{i1} x_i, \quad (3.17)$$

gdzie wektor $a = (a_{11}, a_{21}, \dots, a_{p1})$ jest dobrany tak że wariancja z_1 , zgodnie z wcześniej przyjętymi postulatami, przyjmuje wartość maksymalną, czyli niesie ze sobą większość informacji analizowanego zbioru [57].

Kolejne składowe główne definiowane są za pomocą liniowej transformacji

$$z_k \equiv a_k^T x \text{ dla } k = 2, \dots, p, \quad (3.18)$$

gdzie wektor $a_k = (a_{1k}, a_{2k}, \dots, a_{pk})$ jest dobrany w ten sposób, aby wariancja z_k przyjęła wartość maksymalną oraz $\text{cov}[z_k, z_1] = 0$ i $a_k^T a_k = 1$, co oznacza, że kolejne wektory a_k są unormowane do 1 a wynik transformacji z_k jest niekorelowany z pozostałymi.

Wyznaczanie pierwszej składowej głównej polega na obliczeniu wartości elementów wektora a_1 :

$$\text{var}[z_1] = \langle z_1^2 \rangle - \langle z_1 \rangle^2 = \sum_{i,j=1}^p a_{i1} a_{j1} \langle x_i x_j \rangle - \sum_{i,j=1}^p a_{i1} a_{j1} \langle x_i \rangle \langle x_j \rangle = \sum_{i,j=1}^p a_{i1} a_{j1} S_{ij}, \quad (3.19)$$

gdzie $S_{ij} = \sigma_{x_i x_j} = \langle x_i x_j \rangle - \langle x_i \rangle \langle x_j \rangle = a_1^T S a_1$ jest macierzą kowariancji obserwacji $X = (x_1, x_2, \dots, x_p)$.

Aby znaleźć wektor a_1 dla którego wariancja z_1 przyjmuje maksimum przy wcześniej opisanym warunku unormowania do 1, zakładamy iż operator λ jest mnożnikiem Lagrange'a [57]. Znajdowanie maksimum $\text{var}[z_1]$ polega więc na znalezieniu ekstremum funkcji przy określonych warunkach brzegowych według twierdzenia Lagrange'a:

$$a_1^T S a_1 - \lambda(a_1^T a_1 - 1), \quad (3.20)$$

a następnie:

$$S a_1 - \lambda a_1 = 0 \Rightarrow (S - \lambda I_p) a_1 = 0 \quad (3.21)$$

Tak zdefiniowany wektor a_1 jest wektorem własnym macierzy S , a odpowiadająca mu wartość własna $\lambda \equiv \lambda_1$, spełnia warunek opisany wcześniej:

$$\text{var}[z_1] = a_1^T S a_1 = a_1^T \lambda_1 a_1 = \lambda_1 \quad (3.22)$$

gdzie λ_1 jest największą wartością z wartości własnych macierzy S , zatem pierwszy składnik główny zbioru X niesie ze sobą najwięcej informacji badanego zestawu danych.

Obliczenie kolejnych składowych głównych odbywa się w sposób analogiczny. Aby znaleźć następny wektor a_2 , należy zmaksymalizować wariancję z_2 , przy czym $\text{cov}[z_1, z_2] = 0$ oraz $a_2^T a_2 = 1$

Zatem:

$$\text{cov}[z_2, z_1] = a_2^T S a_1 = \lambda_1 a_2^T a_1 = 0 \quad (3.23)$$

Analogicznie, jak przy wyznaczaniu wektora a_1 , λ oraz φ są mnożnikami Lagrange'a, przy opisanych powyżej ograniczeniach, maksymalizowane jest wyrażenie:

$$a_2^T S a_2 - \lambda(a_2^T a_2 - 1) - \varphi a_2^T a_1 \quad (3.24)$$

W wyniku obliczeń, a_2 jest również wektorem własnym macierzy S , a odpowiadająca mu wartość własna $\lambda \equiv \lambda_2$ jest druga co do wielkości.

Opisany powyżej problem, można uogólnić do wyznaczenia k składowych głównych:

$$\text{var}[z_k] = a_k^T S a_k = \lambda_k \quad (3.25)$$

Zatem, dla zbioru p obserwacji $X = (x_1, x_2, \dots, x_p)$ celem analizy składowych głównych jest znalezienie wektora $Z = (z_1, z_2, \dots, z_p)$ takiego, że:

$$Z = A^T X, \quad (3.26)$$

gdzie A jest macierzą ortogonalną o rozmiarze $p \times p$, a kolumna o numerze k reprezentuje k -ty wektor własny macierzy kowariancji S zbioru obserwacji.

Ponieważ wkład każdej kolejnej składowej w ogólną zmienność początkowych zmiennych jest nie tylko znany, ale i coraz mniejszy, od pewnego momentu składowe będą wyjaśniać znikomy zakres zmienności - z punktu widzenia badacza nie będą już zatem wносиły istotnego ładunku informacji i jako takie mogą w dalszej analizie zostać pominięte. Zbiór rozpatrywanych zmiennych może zostać w ten sposób zredukowany, przy jednoczesnej pełnej kontroli badacza nad stopniem utraty informacji. Przykładowo, w pomiarach wykonywanych z użyciem sonarów wielowiązkowych, wyniki otrzymywane w kolejnych sondowaniach wykonywanych z dużą częstotliwością w naturalny sposób są ze sobą powiązane. Wykrycie wzajemnych powiązań umożliwia zapis wyników w znacznie bardziej zwartej formie bez utraty znaczących informacji.

W opisanym powyżej przypadku, kompresja zbioru danych składającego się z serii obserwacji polega na wyznaczeniu m wektorów głównych, gdzie $m < p$, w taki sposób, aby wyznaczone składowe główne niosły za sobą większość informacji pierwotnego zbioru przy zadanym błędzie rekonstrukcji danych.

4. ALGORYTMY ARCHIWIZACJI, KOMPRESJI I ANALIZY DANYCH POCHODZĄCYCH Z SONARÓW WIELOWIĄZKOWYCH

W poprzednich rozdziałach pracy omówiono teoretyczne zagadnienia dotyczące technik kompresji przeznaczonych do redukcji rozmiaru danych o dowolnej specyfice. Większość metod ogólnego przeznaczenia nie bierze pod uwagę specyfiki oraz struktury otrzymanej informacji. Nie zakłada także podziału analizowanego zbioru danych na podzbiory, w których sam proces redukcji danych może być efektywniejszy, a co za tym idzie, uzyskany współczynnik kompresji dla całego zbioru mniejszy. Co więcej, istniejące obecnie metody kompresji nie są optymalizowane pod względem wydajności tak, aby dzięki specyfice przetwarzanych danych, można było uzyskiwać nie tylko lepszy współczynnik kompresji, ale także zminimalizować czas potrzebny na redukcję informacji. To drugie kryterium nabiera szczególnego znaczenia w kontekście przetwarzania danych z sonaru wielowiązkowego z uwagi na fakt, iż systemy MBS generują wielkie ilości danych, a dzięki zastosowaniu wyspecjalizowanych układów opartych o zestawy procesorów sygnałowych bądź układy FPGA, ich wydajność w kontekście przetwarzania sygnałów akustycznych i elektronicznych jest znacznie wyższa niż komputerów klasy PC, na których odbywa się składowanie, analiza oraz wizualizacja pomiarów. W niniejszym rozdziale przedstawiono schematy, koncepcje oraz szczegóły implementacyjne stworzonych algorytmów archiwizacji, kompresji i przetwarzania danych z sonarów wielowiązkowych.

W podrozdziałach 4.1-4.2 omówiono koncepcje algorytmów archiwizacji danych sonarowych typu *offline* oraz algorytmów kompresji przeznaczonych do działania w trybie czasu rzeczywistego (*online*). W podrozdziale 4.3 pokazano rozwinięcie algorytmów drugiego typu przeznaczonych do wykonywania na platformie CUDA. Oprócz metod kompresji danych sygnałowych i obrazowych skupiających się na efektywnym przetwarzaniu zobrażeń akustycznych toni wodnej, w pracy zaproponowano metodę kompresji surowych danych batymetrycznych otrzymywanych z systemów MBSS, które mogą mieć zastosowanie w bezprzewodowej transmisji wyników sondowania. Koncepcję tą omówiono w podrozdziale 4.4.

4.1. Wykorzystanie technik reorganizacji danych i metod kompresji obrazu dla zobrazowań akustycznych toni wodnej

Wstępny proces realizacji wydajnych algorytmów kompresji danych polega na zaproponowaniu metod redukcji danych, które po uwzględnieniu ich specyfiki i formatu dadzą lepsze współczynniki redukcji niż stosowane standardowo narzędzia kompresji. Jako metody weryfikacji opracowanych algorytmów na tym etapie zastosowano standardowe algorytmy oraz narzędzia kompresji plików takie jak transformacja cosinusowa, algorytm *deflate/inflate* [22] oraz kodowanie Huffmana.

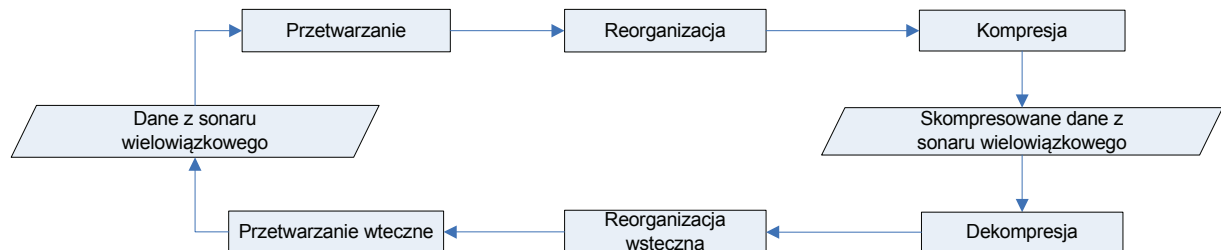
Podstawową cechą wszystkich metod kompresji ogólnego przeznaczenia jest założenie iż analizowany zbiór jest jednorodny tzn. nie wydziela się w nim części, które poddawane kompresji osobno, mogą zostać zredukowane lepiej, niż gdyby były przetwarzane jako całość. W przypadku danych pochodzących z systemów MBS, które są logowane do plików wynikowych w postaci szeregu rekordów, własność tę można wykorzystać do zwiększenia efektywności kompresji poprzez odpowiedni podział oraz reorganizację. W zaproponowanych metodach nazwanych: B2B (ang. *beam-to-beam* – B2B), S2S (ang. *sample-to-sample* – S2S) oraz M2M (ang. *matrix-to-matrix* – M2M), skupiono się przede wszystkim na zobrazowaniach akustycznych toni wodnej, jako na głównym składniku otrzymywanych danych. Dane te w plikach wynikowych zajmują najwięcej miejsca, a ze względu na swoją specyfikę, mogą być poddawane różnym technikom redukcji danych.

W pracy wykorzystano metody kompresji danych dwuwymiarowych, które polegają na usuwaniu redundancji danych poprzez znajdowanie nadmiaru informacji znajdującej się w pikselach obrazu. Niemniej jednak, zestaw kilku obrazów zawiera w sobie dodatkowy rodzaj redundancji - tzw. redundancję zbioru (ang. *set redundancy*) [36]. Podobne do siebie obrazy mają podobne wartości pikseli w odpowiadających sobie obszarach, porównywalne rozkłady i histogramy. Redundancja zbioru obrazów jest więc „międzyobrazową” redundancją wynikającą z istnienia wspólnych cech w więcej niż jednym z obrazów w zbiorze. Zostało udowodnione, iż entropia zbioru obrazów H jest związana z podobieństwem obrazów S wg wzoru [36][37]:

$$H = -S \log(S) - (1 - S) \log\left(\frac{1 - S}{N}\right), \quad (2.1)$$

gdzie, $n = 65535$ dla obrazów 16-bitowych. Z wzoru 2.1, wynika, że dla rosnącego podobieństwa obrazów S entropia zbioru H zmniejsza się.

Proces kompresji danych z sonarów wielowiązkowych został podzielony na trzy zasadnicze etapy: przetwarzanie wstępne, reorganizacja oraz sam etap kompresji, co zostało przedstawione na rys. 4.1. Etap przetwarzania wstępnego polega na odczycie rekordów z pliku będącego wynikiem pomiaru systemem MBS oraz na wstępnej analizie i weryfikacji poprawności otrzymywanych danych. Pozwala on także na zapisanie w odpowiednich buforach pamięci przechowywanych tablic dwuwymiarowych stanowiących zbiór ech dla poszczególnych wiązek danego sondowania. Wstępnie obrobione dane przekazywane są do bloku reorganizacji, gdzie stosowana jest jedna z trzech opisanych poniżej metod reorganizacji danych. Zadaniem obu omówionych bloków przetwarzania jest modyfikacja układu rekordów do takiej postaci, w której wyniki kompresji mogą być lepsze.



Rys. 4.1. Schemat procesu kompresji danych pochodzących z sonarów wielowiązkowych

W pierwszej kolejności zaimplementowany został algorytm *B2B*, w którym usunięcie redundancji zbioru wynikającej z podobieństwa odpowiednich obszarów w kolejnych obrazowaniach, zostało zrealizowane poprzez przetworzenie macryc reprezentujących zbiory sygnałów ech wiązek w taki sposób, aby sygnały wiązek o danym kącie insonifikacji pochodzące z kolejnych sondowań znajdowały się w tworzonej macierzy obok siebie. W ramach prac stworzono także ograniczenia dotyczące maksymalnego rozmiaru otrzymywanej macierzy tak, aby algorytm mógł być wykonywany na maszynach klasy PC dla plików binarnych o dowolnej wielkości (poniżej 4GB). W pseudokodzie opisującym algorytm (algorytm 4.1), przyjęto, iż dane pochodzące z kolejnych sondowań traktowane są jako macierz trójwymiarowa, w której pierwszy wymiar, oznaczony indeksem i , oznacza numer sondowania (numer pingu względem początku pomiaru), wymiar drugi, indeksowany przez j , oznacza ilość wiązek generowanych przez sonar, a wymiar trzeci oznacza numer próbki w wiązce. W tym kontekście, algorytm *B2B* jest funkcją transformacji tablicy trójwymiarowej (*WaterColumnData*) na tablicę dwu-wymiarową określoną według następującego wzoru:

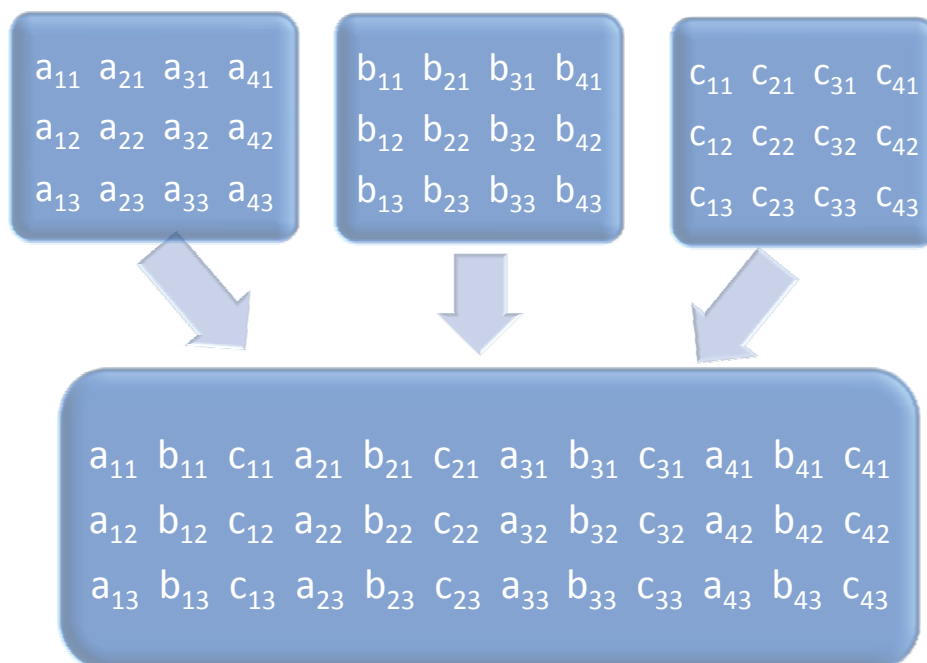
Algorytm 4.1. Opis algorytmu B2B w postaci pseudokodu.

```

for (i=1;i<nWaterColumn;i++)
    for (j=1;j<noBeams;j++)
        for (k=1;k<noSamples;k++)
            B2B(k, nWaterColumn *(j-1)+i) =WaterColumnData(i,k,j);

```

gdzie zmienna *nWaterColumn* oznacza ilość sondowań (pingów) zapisanych w pliku wynikowym, *noBeams* oznacza ilość wiązek, a *noSamples* oznacza maksymalną ilość próbek z których może składać się dana wiązka. Schemat działania algorytmu został także schematycznie pokazany na rys. 4.2. Omawiane rozwiązanie jest łączeniem tablic reprezentujących wyniki kolejnych sondowań w formie zobrazowań akustycznych toni wodnej w jedną macierz .



Rys. 4.2. Schemat działania algorytmu B2B. Liczby a_{xy} , b_{xy} , oraz c_{xy} , oznaczają wyniki kolejnych sondowań przedstawione w postaci macierzowej, indeks x oznacza numer wiązki a y numer próbki sygnału echa

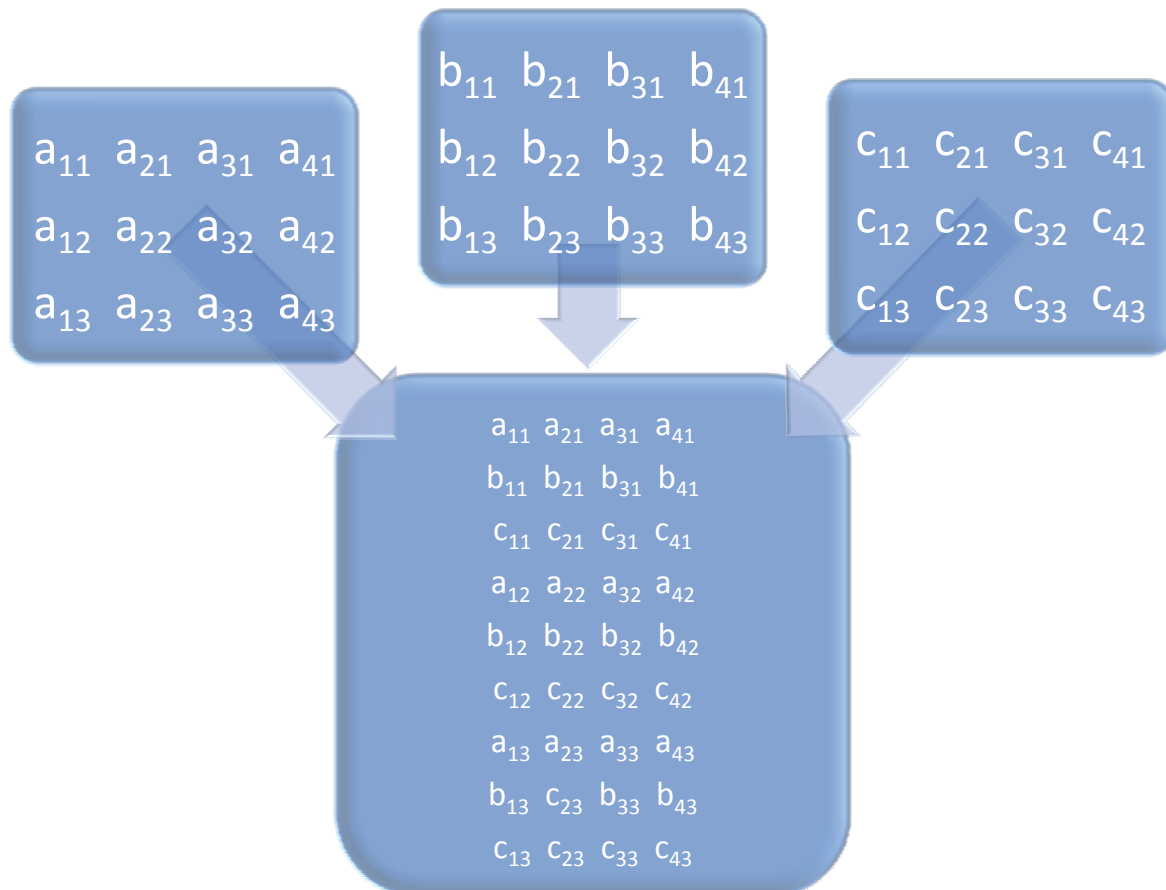
Algorytm *S2S* jest modyfikacją algorytmu *B2B*, w którym metoda reorganizacji polega na analogicznym przekształceniu macierzy danych, z tymże odpowiadające elementy przebiegów czasowych sygnałów poszczególnych wiązek pochodzących z kolejnych sondowań umieszczone są obok siebie. Metodę tę można opisać za pomocą pseudokodu opisanego w algorytm 4.2:

Algorytm 4.2. Opis algorytmu S2S w postaci pseudokodu.

```

for (i=1;i< nWaterColumn;i++)
    for (j=1;j<noSamples;j++)
        for (k=1;k<noBeams;k++)
            S2S(nWaterColumn *(j-1)+i,k) = WaterColumnData(i,j,k);
    
```

Schemat działania metody pokazany został na rys. 4.3.



Rys. 4.3. Schemat działania metoda reorganizacji S2S. Oznaczenia analogicznie jak w przypadku algorytmu B2B

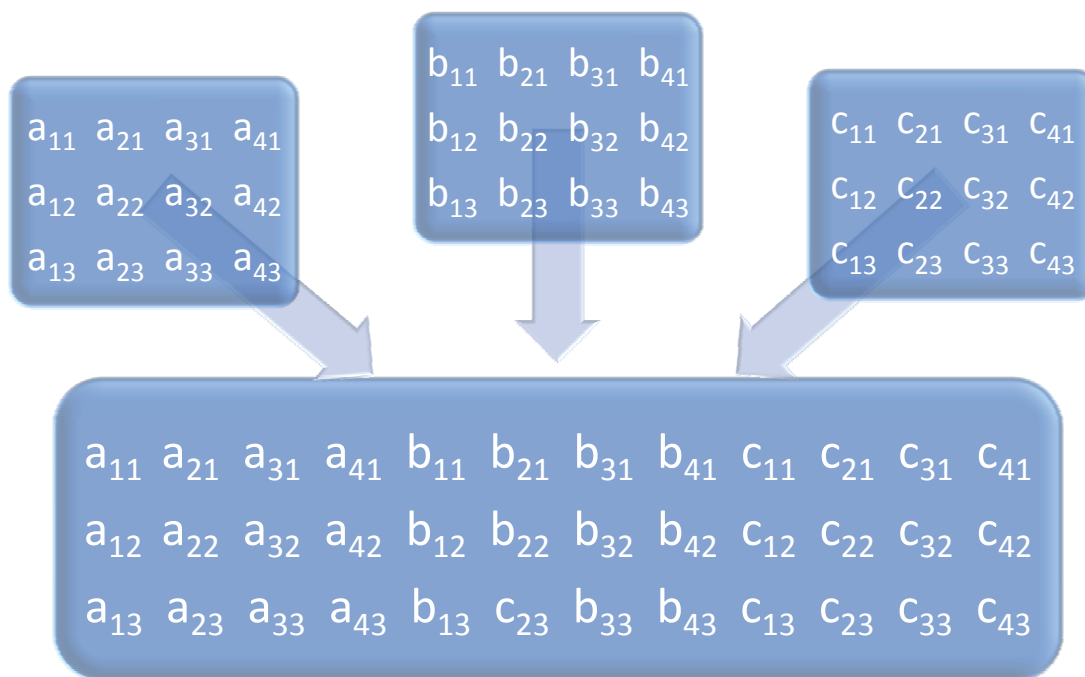
Ostatnią zaimplementowaną metodą jest algorytm *Make-Matrix* opisany za pomocą pseudokodu przedstawionego w algorytmie 4.3:

Algorytm 4.3. Opis algorytmu M2M w postaci pseudokodu.

```

for (i=1;i< nWaterColumn;i++)
    for (j=1;j<noBeams;j++)
        for (k=1;k<noSamples;k++)
            MM(k,(i-1)*j) = WaterColumnData(i,k,j);
    
```

oraz schematu na rys. 4.4.



Rys. 4.4. Schemat działania metody MM

Podstawową cechą wspólną wszystkich zaprezentowanych algorytmów reorganizacji danych, jest taka zmiana układu rekordów zapisywanych do plików wynikowych sondowania, aby jako całość, poddane kompresji dawały lepsze rezultaty, niż zbiór rekordów w pierwotnym porządku. Odpowiednia reorganizacja plików jest uporządkowaniem otrzymywanego w wyniku sondowania strumienia danych i stanowi przedwstępne przetwarzanie, po którym wykonywana jest faktyczna redukcja danych.

Aby określić w jakim stopniu proponowane metody poprawiają jakość istniejących rozwiązań, dane otrzymane w wyniku reorganizacji poddano kompresji bezstratnej. W ramach prac przetestowano szereg algorytmów kompresji (LZW, RLE, kompresja oparta o transformaty falkowe, metody słownikowe), niemniej jednak, najlepsze wyniki osiągnięto wykorzystując algorytm bezstratnej kompresji o nazwie *deflate/inflate*, który jest kombinacją słownikowej metody lz77/78 oraz kodowania Huffmana. Podstawową koncepcją tej metody jest znajdowanie powtarzających się ciągów bajtów w wejściowym ciągu znaków oraz zastępowaniu ich parą liczb: odległością w jakiej występują powtarzające się łańcuchy symboli (znaków) oraz ich długości. Drugi etap kompresji polega na zastępowaniu najczęściej powtarzających się symboli krótszymi ciągami bitów, a rzadziej występujących symboli dłuższymi. Algorytm *deflate/inflate* został zdefiniowany w dokumencie RFC 1951 i jest obecnie częścią narzędzia archiwizującego PKZIP. Znajduje on także swoje zastosowanie między innymi w kompresji obrazów w plikach formatu PNG (ang. *Portable Network Graphics*).

W proponowanym rozwiązaniu stosuje się bezstratne metody kompresji dla danych pochodzących z systemów wielowiązkowych. Niemniej jednak, aby zmniejszyć redundancję przetwarzanych obrazów akustycznych, zdecydowano się na konwersję otrzymywanych danych dotyczących przebiegu fali akustycznej w środowisku wodnym ze skali liniowej do skali decybelowej z zadaną dokładnością. Przewagą opisanych metod w stosunku do innych stratnych metod kompresji jest zatem fakt iż, wprowadzany stopień błędu jest równomierny dla całego zestawu i może być dobierany według potrzeb użytkownika z uwzględnieniem jakości przetwarzanej informacji oraz właściwości akustycznych sondowanego środowiska.

W związku z powyższym, aby ocenić poziom zniekształceń, które wprowadza dana metoda kompresji, należy przyjąć odpowiednie kryteria oceny jakości zrekonstruowanych danych. Zostało pokazane, iż jednym z najlepszych kryteriów oceny rekonstrukcji danych obrazowych jest współczynnik szczytowego sygnału do szumu (ang. *Peak Signal-to-noise Ratio -PSNR*) [10][34], który jest zdefiniowany jako:

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{MAX_I^2}{MSE} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{MAX_I}{\sqrt{MSE}} \right), \quad (4.2)$$

gdzie MSE oznacza błąd średniokwadratowy zdefiniowany jako:

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \| I(i, j) - K(i, j) \|^2, \quad (4.3)$$

gdzie MAX_I oznacza maksymalną wartość piksela dla danego obrazu, $I(i, j)$ oznacza obraz oryginalny, $K(i, j)$ obraz zrekonstruowany, a m i n oznaczają odpowiednio szerokość oraz wysokość obrazów. Należy zauważyć także, iż w przypadku stosowania standardu JPEG wartość współczynnika PSNR wynosi od 20 do 40 dB i oznacza, iż różnice w obrazie oryginalnym oraz zrekonstruowanym są percepcyjnie trudne do wychwycenia [67].

W tabelach przedstawione zostały wyniki kompresji przy dokładności 0.1 dB (tab. 4.1) oraz 0.5 dB (tab. 4.2) podczas konwersji ze skali liniowej do logarytmicznej. Wyniki uzyskiwane za pomocą proponowanych rozwiązań (kolumny M2M, B2B oraz S2S) zestawiono z wynikami uzyskiwanymi przy zastosowaniu narzędzia kompresji ZIP oraz podano uzyskany współczynnik zniekształcenia obrazu (PSNR). Uzyskane wyniki redukcji danych, definiowane jako stosunek wielkości zbioru skompresowanego do wielkości zbioru oryginalnego, są znacznie niższe niż przy użyciu standardowych metod. Najlepsze rezultaty osiągnięto stosując algorytm MM, oraz metodę S2S.

Tab. 4.1. Wyniki uzyskane z wykorzystaniem metod reorganizacji z dokładnością 0.1 dB.

Nazwa zbioru danych	Zip	MM	B2B	S2S	PSNR [dB]
20060719_204657__7125 (400kHz).s7k	0,48	0,35	0,44	0,35	51,8
20070315_184108.s7k	0,79	0,44	0,46	0,45	49,1
20070720_170721.s7k	0,41	0,35	0,4	0,36	54,0
20070831_185543.s7k	0,53	0,35	0,39	0,38	46,9

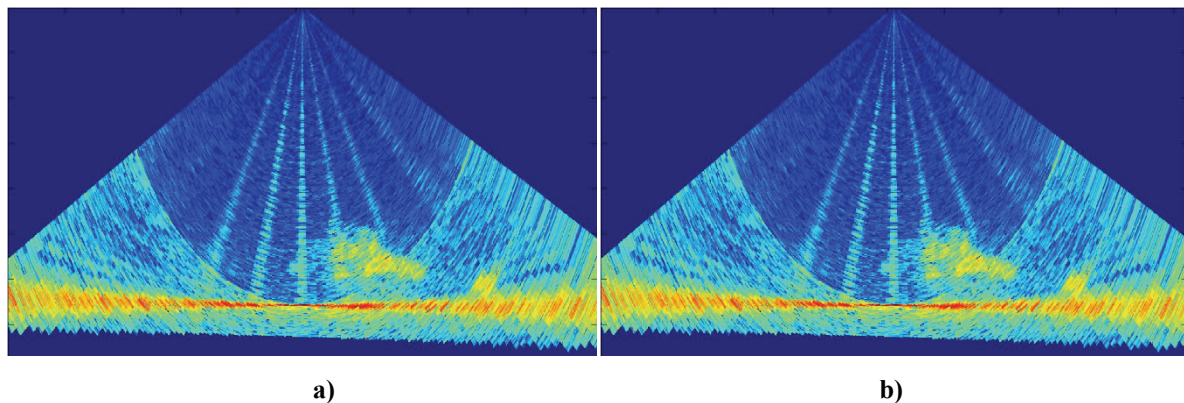
Przy zastosowaniu dokładności 0.1 dB wyniki uzyskane poprzez wykorzystanie proponowanych metod są od 10% do 80% lepsze niż przy zastosowaniu narzędzia kompresji ZIP, przy czym dla każdego z przypadków testowych można znaleźć metodą dającą min. 30% poprawę w stosunku do standardu ZIP. Należy podkreślić, iż dla wszystkich przypadków, współczynnik PSNR określający podobieństwo pomiędzy obrazem oryginalnym a zrekonstruowanym wynosi powyżej 45 dB, co oznacza że obrazy percepcyjnie są nierozróżnialne.

Tab. 4.2. Wyniki uzyskane z wykorzystaniem metod reorganizacji z dokładnością 0.5 dB.

Nazwa zbioru danych	Zip	MM	B2B	S2S	PSNR [dB]
20060719_204657__7125 (400kHz).s7k	0,48	0,23	0,30	0,24	46,2
20070315_184108.s7k	0,79	0,30	0,31	0,30	43,0
20070720_170721.s7k	0,41	0,27	0,29	0,26	48,3
20070831_185543.s7k	0,53	0,24	0,26	0,26	40,3

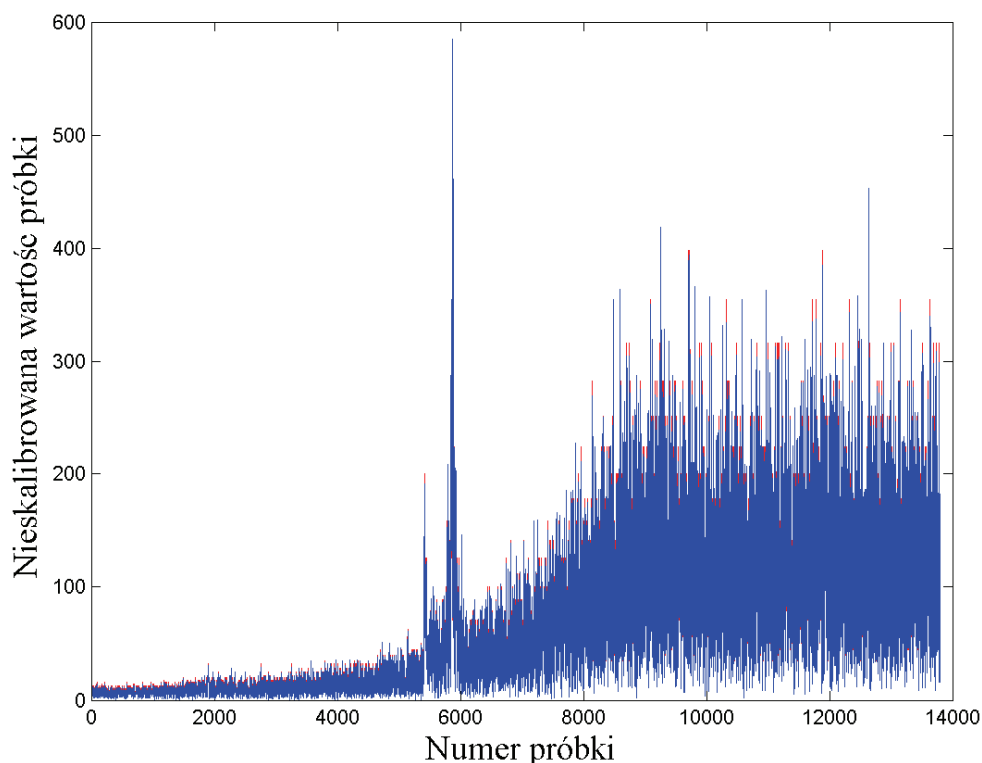
Zgodnie z oczekiwaniami, niższe współczynniki kompresji danych oraz niższe wartości PSNR uzyskuje się poprzez zastosowanie dokładności przetwarzania danych na poziomie 0.5 dB. W tym przypadku, stopień redukcji rozmiaru danych był w niektórych przypadkach ponad dwukrotnie lepszy niż przy wykorzystaniu standardu ZIP.

Należy także zauważyć iż, podczas przetwarzania danych z dokładnością 0.1 dB, wprowadzany błąd rekonstrukcji jest praktycznie niezauważalny zarówno w przypadku wizualizacji danych jak i głębszej analizy. W przypadku, gdy pożądane jest zwiększenie stopnia kompresji kosztem utraty jakości, wyniki konwersji danych z dokładnością 0.5 dB dają wystarczającą dokładność dla celów wizualizacji (rys. 4.5), o czym świadczy wartość współczynnika PSNR dla każdego z przypadków wynosząca powyżej 40 dB.



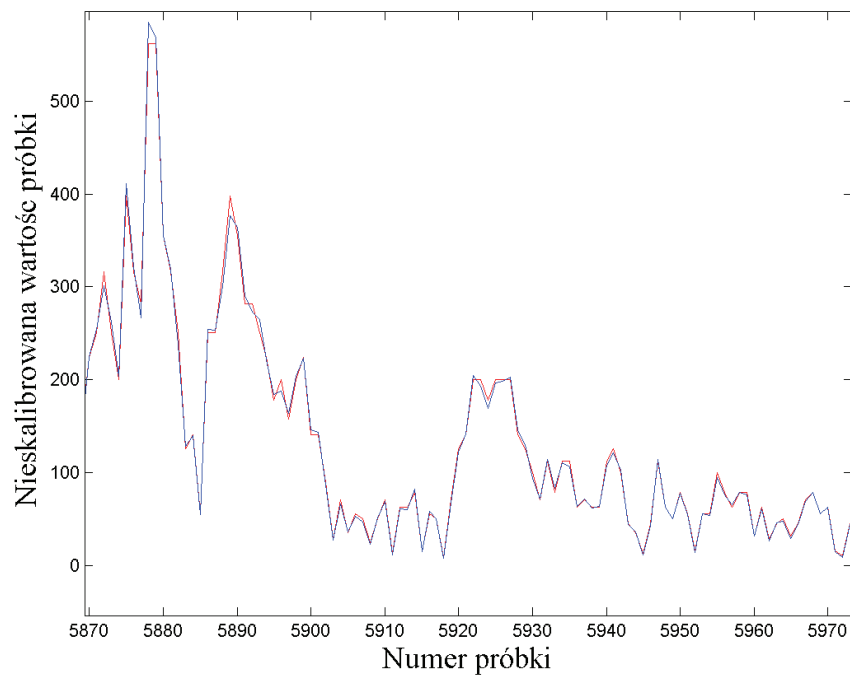
Rys. 4.5. Wizualizacja zobrażenia akustycznego toni wodnej typu fan-shape wykonanego za pomocą sonaru RESON Seabat 7125. Dane oryginalne (a) oraz dane po rekonstrukcji z dokładnością 0.5 dB (b)

Dokładniejsza analiza dla przykładowego echa wiązki o kącie insonifikacji równym 25° , zaprezentowana na rys. 4.6, pokazuje różnice pomiędzy sygnałem oryginalnym a zrekonstruowanym z dokładnością 0.5 dB. Jak widać, różnice w skali przebiegu całego sygnału są praktycznie niezauważalne i oba przebiegi (oryginalny oraz zrekonstruowany na podstawie dokładności 0.5 dB) praktycznie się pokrywają.

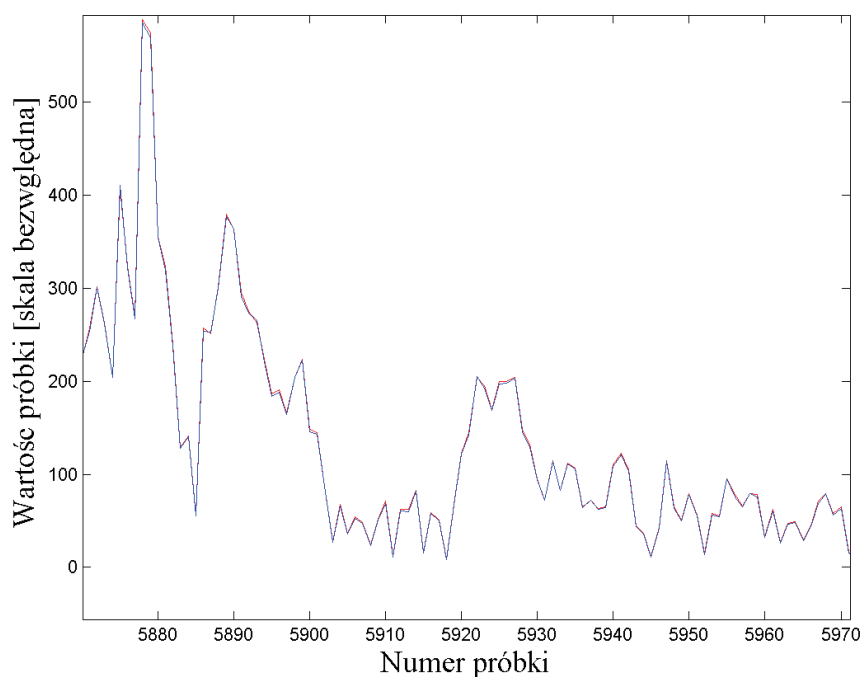


Rys. 4.6. Przykładowego echa w postaci sygnału cyfrowego dla wiązki o kącie insonifikacji 25° . Kolorem niebieskim zaznaczono dane po rekonstrukcji z dokładnością 0.5dB, kolorem czerwonym dane oryginalne

Dopiero dokładniejsza analiza wybranego fragmentu echa w postaci sygnału cyfrowego pokazanego na rys. 4.7 pozwala zobaczyć różnice w przebiegach obu sygnałów. Przy dokładności przetwarzania równej 0.1 dB, różnice w przebiegach obu funkcji, zarówno w skali całego zobrazowania, jak i w przypadku analizy pojedynczych sygnałów, są praktycznie niezauważalne, co zostało pokazane na rys. 4.8.



Rys. 4.7. Fragment echa pokazanego na rys 4.6 przy zastosowaniu dokładności 0.5dB. Widoczne różnice pomiędzy sygnałem oryginalnym (kolor czerwony) oraz zrekonstruowanym (kolor niebieski)



Rys. 4.8. Ten sam fragment echa analizowany dla parametru kompresji 0.1 dB. Różnice, zarówno w skali całego zobrazowania jak i z punktu widzenia analizy sygnałowej, są praktycznie niezauważalne

Opisane metody reorganizacji danych, poprzez uporządkowanie wewnętrznej struktury plików wynikowych, umożliwiają uzyskanie znacznie lepszych wyników kompresji niż przy użyciu standardowych narzędzi. Ich niewątpliwą zaletą jest możliwość redukcji dużych ilości informacji, które są wynikiem wielogodzinnych przeszukiwań akustycznych, w zwartej jednolitej formie. Dzięki zastosowaniu proponowanych rozwiązań można także uzależnić wielkość skompresowanego zbioru od oczekiwanej jakości danych. Należy jednak zauważyć iż, z uwagi na specyfikę omawianych rozwiązań, aby poddać dane kompresji wymagana jest wiedza *a posteriori* dotycząca wyników kolejnych sondowań. Oznacza to, iż proponowane metody są dobrym narzędziem archiwizacji danych, lecz nie mogą być stosowane jako narzędzie przetwarzania działające w trybie czasu rzeczywistego.

4.2. Algorytmy archiwizacji danych przeznaczone do działania w czasie rzeczywistym

Przedstawiona w podrozdziale 4.1. koncepcja archiwizacji danych z sonarów wielowiązkowych przeznaczona była do działania w trybie *offline*. Dzięki wiedzy dotyczącej wyników całego pomiaru, pozwalała ona na uporządkowanie wewnętrznej struktury danych, co w efekcie umożliwiało uzyskanie znacznie lepszych wyników, niż przy użyciu standardowych narzędzi kompresji plików. Zastosowanie omówionej metody miało jednak

pewne istotne ograniczenie – metoda wymagała wiedzy *a posteriori* dotyczącej całości pomiaru i z tego względu nie mogła być stosowana w trybie czasu rzeczywistego.

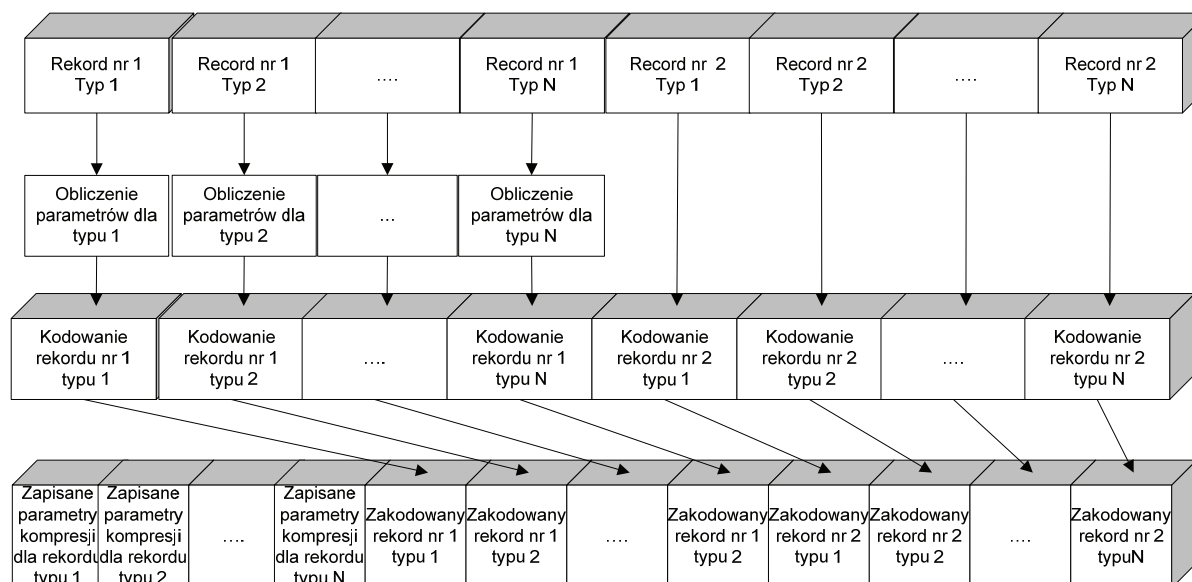
Poniżej, zaproponowano metodę kompresji danych, która daje nieco gorsze z punktu widzenia stopnia kompresji wyniki, natomiast jej główną zaletą jest fakt, iż czas kompresji jest na tyle krótki, iż pozwala ona na zapis skompresowanej informacji otrzymywanej bezpośrednio z jednostki obliczeniowej sonaru. W pracach skupiono się przede wszystkim na efektywnym przetwarzaniu danych sonarowych, które umożliwiłoby kompresję poszczególnych rekordów w czasie krótszym, niż ten który jest potrzebny na ich stworzenie przez sonar. W ramach prac przeprowadzono doświadczalną weryfikację opracowanych metod na podstawie rekordów zawierających dane dotyczące rozproszenia się fali akustycznej w toni wodnej ze względu na fakt, iż są najistotniejszym składnikiem w kontekście wydajności kompresji. Należy jednak wspomnieć, iż proponowane rozwiązanie ma zastosowanie dla wszystkich rodzajów datagramów.

4.2.1 Opis rozwiązania

Koncepcja opracowanych metod wynika z obserwacji, iż rekordy pochodzące z kolejnych sondowań są względem siebie relatywnie podobne. Wynika to z faktu, iż parametry wpływające na rozproszenie się fali akustycznej od dna i innych obiektów podwodnych, dane dotyczące batymetrii badanego w danym momencie fragmentu dna morskiego oraz sposób przetwarzania danych nie różnią się w znaczący sposób pomiędzy kolejnymi rekordami. Zatem, aby zoptymalizować proces kompresji danych sonarowych, można w pewnych przypadkach wyliczać statystyki dotyczące danego typu rekordu jedynie dla reprezentatywnej części zbioru wynikowego, a następnie stosować kompresję z wcześniej wyliczonymi parametrami dla dalszych fragmentów danych.

Istotną kwestią omawianego zagadnienia jest także wewnętrzna struktura poszczególnych rekordów oraz ich zawartość. W pracy stratnie kompresowano dane dotyczące rozproszenia się fal akustycznych z pewną określoną dokładnością wynikającą ze specyfiki pomiarów oraz zastosowano bezstratne kodowanie innych fragmentów pliku takich jak np. parametry działania (ang. *runtime parameters*) czy dane dotyczące pozycji przetwornika w przestrzeni geograficznej. Taki podział pliku, wraz z odpowiednim przetwarzaniem, pozwala na uzyskanie znacznie lepszego stopnia kompresji niż przy użyciu standardowych metod.

W omawianym rozwiązaniu zaproponowano metodę wyliczenia statystyk niezbędnych do przeprowadzenia kompresji jedynie dla pierwszego rekordu danego typu dostarczonego przez sonar. Następnie, wykonywana jest kompresja na podstawie wcześniej wyliczonych parametrów dla kolejnych rekordów danego typu oraz zapis zakodowanej informacji do pliku wynikowego. Schemat omawianego rozwiązania został zaprezentowany na rys. 4.9.



Rys. 4.9. Schemat zoptymalizowanego procesu kompresji danych sonarowych

4.2.2 Ograniczenia

Dzięki proponowanej metodzie przetwarzania znacznie zredukowano ilość obliczeń niezbędnych do redukcji rozmiaru poszczególnych rekordów. Należy jednak zauważyć, że zaproponowane rozwiązanie jest obarczone pewnymi ograniczeniami, a mianowicie:

- kolejne rekordy tego samego typu muszą wykazywać wzajemne podobieństwo względem kryterium wynikającego z zastosowanej metody kompresji,
- sposób przetwarzania danych i parametry beamformingu znacząco się nie zmieniają,
- częstotliwość sondowania jest na tyle duża, że sposób rozproszenia się fali akustycznej w środowisku morskim pomiędzy poszczególnymi sondowaniami znacząco się nie różni.

Istotnym elementem w realizacji zoptymalizowanych metod redukcji danych sonarowych jest wybór metody kompresji. W literaturze można znaleźć szereg opracowań dotyczących różnych metod redukcji danych oraz zagadnień związanych z ich optymalizacją [32][47][49] – w pracy postanowiono skupić się na jednej z najbardziej popularnych i najczęściej stosowanych metod jaką jest kodowanie Huffmana. Spośród wielu zalet tej metody należy wymienić przede wszystkim fakt, iż metodę tę można stosować dla wszystkich rodzajów danych, zarówno sygnałowych jak i obrazowych [2] o różnym stopniu zaszumienia.

Ponadto, metoda ta jest stosunkowo prosta w implementacji oraz daje możliwości w zakresie jej modyfikowania dla potrzeb wybranych zastosowań. W powyższym kontekście, kryterium wzajemnego podobieństwa kolejnych rekordów będzie zatem częstotliwość występowania poszczególnych symboli (tj. wartości bajtów) w kolejnych datagramach. Istotne będą parametry beamformingu (parametry procedury TVG, wzmocnienie – ang. *gain*, zasięg – ang. *range*) rozumianego jako proces przetwarzania jednego zestawu danych, jakim są dane otrzymane bezpośrednio z przetworników głowicy odbiorczej, w drugi: zestaw wiązek kierunkowych.

4.2.3 Analiza proponowanego rozwiązania

Aby w wyżej wymienionym kontekście liczbowo określić wzajemne podobieństwo kolejnych rekordów, należy się posłużyć pojęciem entropii (wzór 3.2), która definiuje wartość informacji niesioną przez dany zbiór wartości – w tym przypadku przez dany rekord. Wzór ten jest przydatny wówczas gdy prawdopodobieństwo wystąpienia danego zdarzenia lub danego symbolu jest znane *a priori*. Zastosowanie kodowania w tym przypadku wymaga, bądź dokładnej znajomości statystyki wystąpienia symboli na podstawie wiedzy o źródle, bądź też zliczania poszczególnych wartości przed kodowaniem. Oba te podejścia w przypadku kompresji w czasie rzeczywistym są trudne do zrealizowania – po pierwsze: przeprowadzone eksperymenty pokazały, iż zliczenie symboli oraz przygotowanie odpowiadających im ciągów bitów na komputerze klasy PC jest zbyt czasochłonne i niemożliwe do zrealizowania w czasie krótszym niż generowanie danych przez system wielowiązkowy, po drugie: na podstawie wiedzy o źródle danych nie można dokładnie określić częstości wystąpienia poszczególnych wartości bajtów w danym rekordzie sonarowym. Niemniej jednak, można dokonać zliczenia statystyki wystąpienia bajtów w poprzednim rekordzie danego typu, a następnie wyliczyć odpowiednie ciągi bitów reprezentujących dane symbole i zastosować je do kodowania kolejnych rekordów tego samego rodzaju. Formalne określenie podobieństwa kolejnych rekordów w powyższym kontekście może być określone wzorem :

$$E = - \sum_{i=0}^{256} (p_i + \Delta p_i) \log_2(p_i), \quad (4.2)$$

gdzie p_i oznacza prawdopodobieństwo wystąpienia symbolu i w poprzednim rekordzie, Δp_i oznacza różnicę prawdopodobieństwa pomiędzy wystąpieniem symbolu i w stosunku do poprzedniego rekordu, a $\log_2(p_i)$ oznacza wartość proporcjonalną do długości słowa

kodowego reprezentującego symbol i . W klasycznym podejściu ciągi bitów reprezentujących zadane symbole obliczane są na podstawie znanego zestawu prawdopodobieństw $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$. W omawianym podejściu, rzeczywiste prawdopodobieństwo wystąpienia danego symbolu w kolejnym rekordzie równe jest natomiast wartości $(p_i + \Delta p_i)$.

Aby określić formalnie wzajemne relacje pomiędzy podaną entropią zbiorów a stopniem kompresji, należy przeprowadzić formalny dowód zależności pomiędzy entropią wyliczaną według 4.2 a długością kodu optymalnego dla zestawu prawdopodobieństw $(p_1 + \Delta p_1, p_2 + \Delta p_1, \dots, p_n + \Delta p_1)$. W tym celu należy pokazać że:

$$S(K) \leq H(p_1 + \Delta p_1, p_2 + \Delta p_1, \dots, p_n + \Delta p_1) + 1 \quad (4.3)$$

Ponieważ długości kodów obliczane są na podstawie pierwszego rekordu danego typu długości słów kodowanych d_1, d_2, \dots, d_n wynoszą $d_i = \lceil -\log p_i \rceil$,

Wówczas:

$$\sum 2^{-d_i} \leq \sum p_i = 1 \quad (4.4)$$

co oznacza, że istnieje kod prefiksowy o długościach d_1, d_2, \dots, d_n co wynika z twierdzenia Krafta. Dla następnych rekordów o zmodyfikowanym zestawie prawdopodobieństw $(p_1 + \Delta p_1, p_2 + \Delta p_1, \dots, p_n + \Delta p_1)$ po podstawieniu za $S(K)$ w 4.3 otrzymuje się:

$$\begin{aligned} \sum (p_i + \Delta p_i) \lceil -\log p_i \rceil - \sum (p_i + \Delta p_i) \log p_i \leq \\ \sum (p_i + \Delta p_i) (-\log p_i + 1) - \sum (p_i + \Delta p_i) \log p_i = (4.5) \\ \sum (p_i + \Delta p_i) \end{aligned}$$

Ponieważ wielkość rekordu w kolejnych sondowaniach się nie zmienia a zestaw występujących symboli jest pełny to:

$$\sum (p_i + \Delta p_i) = 1,$$

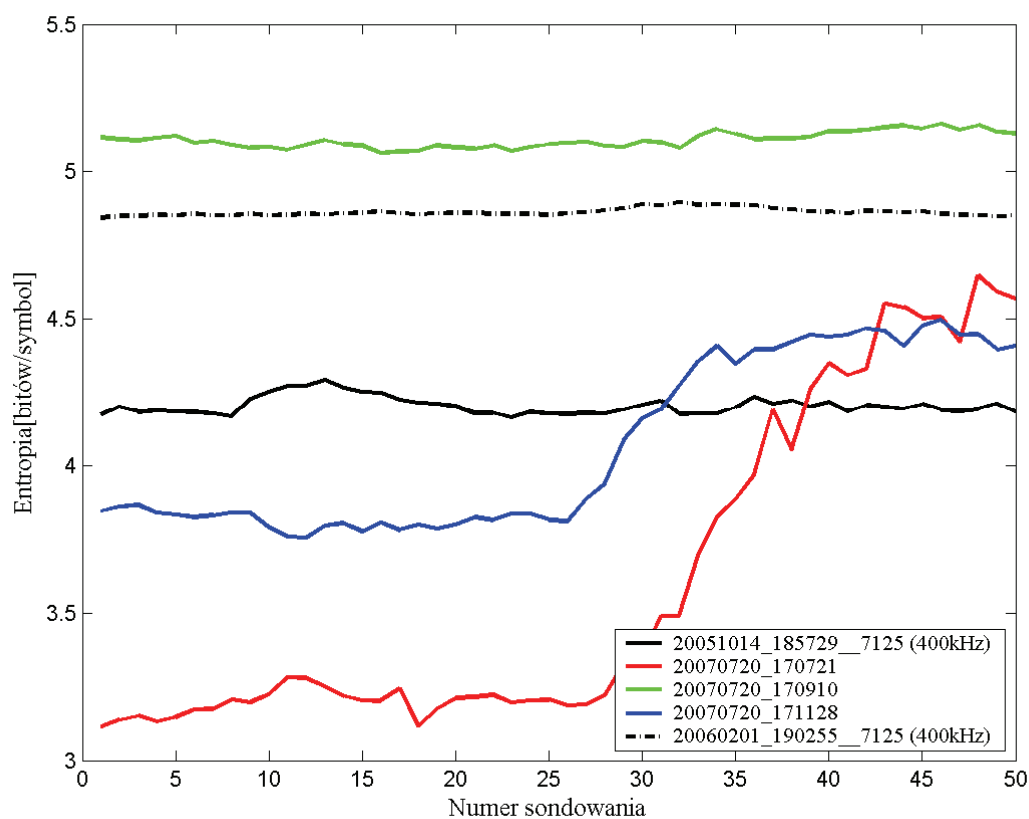
co dowodzi istnienia kodu przedrostkowego spełniającego nierówność podaną w 4.3.

4.2.4 Analiza wyników

Z uwagi na fakt, iż największy ciężar obliczeń jest związany z przetwarzaniem rekordów zawierających dane o rozproszeniu fali akustycznej w toni wodnej, poniżej sporządzono wykres entropii obliczonej według wzoru 4.2 dla wybranych reprezentatywnych przypadków testowych.

Rysunek 4.10 przedstawia podobieństwo kolejnych rekordów dla wybranych zestawów danych pochodzących z sonaru wielowiązkowego RESON Seabat 7125 według kryterium ze

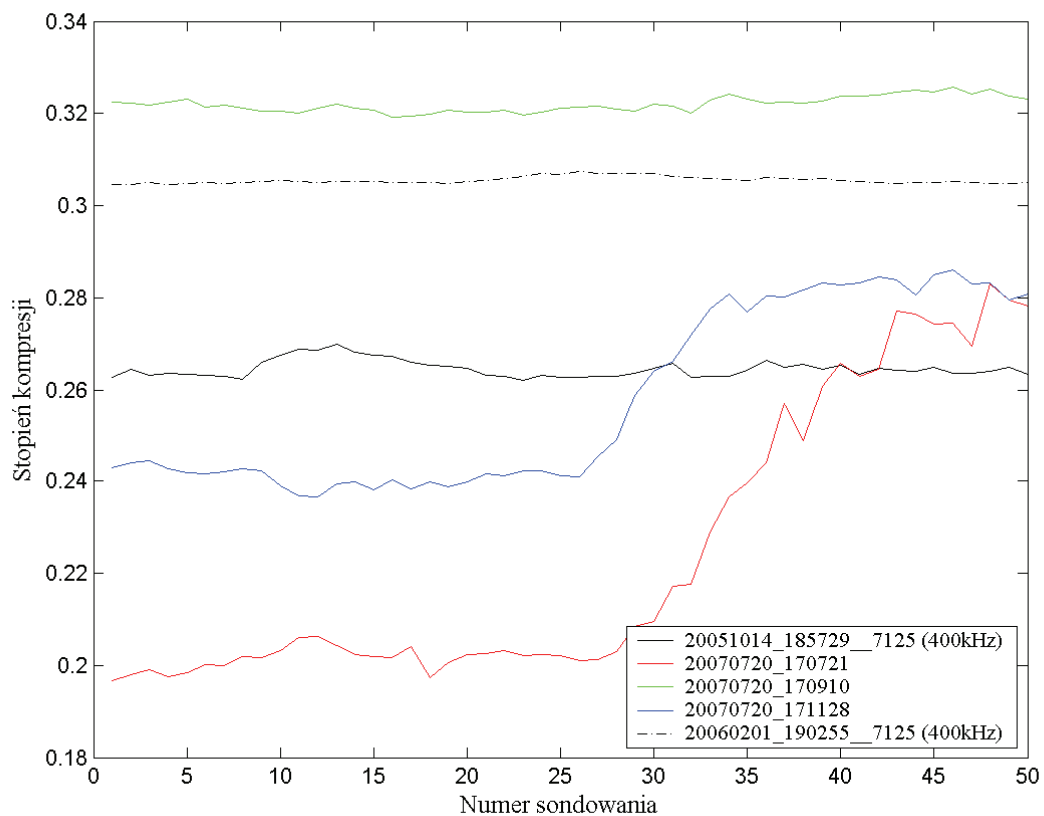
wzoru 4.2. Wartość ta może być interpretowana jako średnia minimalna ilość bitów potrzebnych do zakodowania danego symbolu przy założeniu że ciągi bitowe reprezentujące dany symbol są wyliczane na podstawie prawdopodobieństw wyliczonych jedynie dla pierwszego rekordu. Wyliczona w ten sposób entropia zbiorów jest w przybliżeniu stała dla kolejnych sondowań w trzech z pięciu zaprezentowanych przypadków. Ponieważ entropia jest oszacowaniem dolnym dla stopnia kompresji, a zastosowany algorytm kodowania należy do optymalnych w klasie przedrostkowych, to przy zachowaniu przedstawionych ograniczeń dotyczących warunków i parametrów pomiaru, zastosowanie zaproponowanej optymalizacji metody kodowania Huffmana daje korzyści w postaci zmniejszenia ilości niezbędnych obliczeń dających w wyniku tabelę kodów Huffmana.



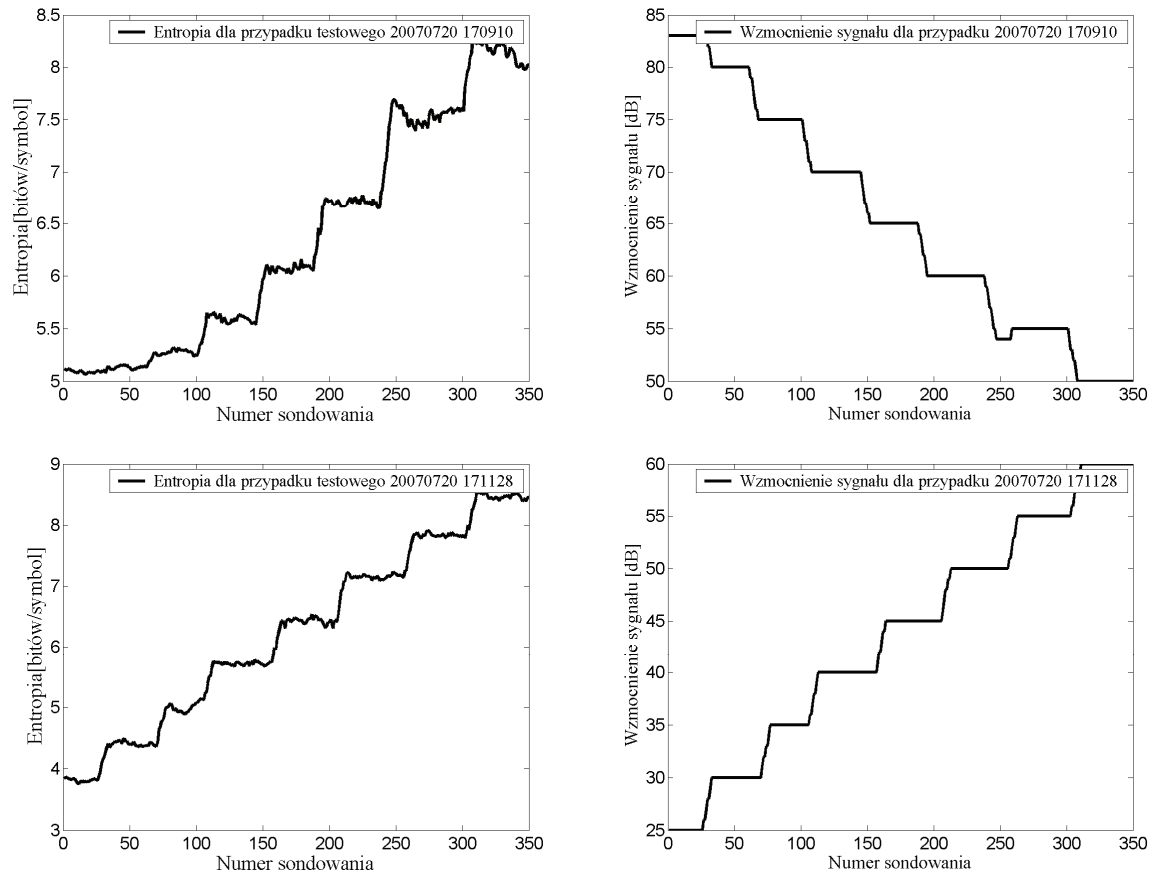
Rys. 4.10. Wykres wzajemnego podobieństwa kolejnych zobrażeń akustycznych dla zaproponowanego algorytmu kompresji danych sonarowych

Na rysunku 4.11 przedstawiono wyniki kompresji uzyskane proponowaną metodą. Otrzymywane stopnie kompresji dla poszczególnych sondowań są zależne od entropii wyliczonej według wzoru 4.2. Szczególną uwagę należy zwrócić na dwa przypadki, w których po ok. 20-25 sondowaniach, zarówno wzajemne podobieństwo rekordów jak i

wynikający z niego stopień kompresji, gwałtownie się zmieniają. Sytuacja taka ma miejsce w przypadku zestawów danych 20070720_170910 oraz 20070720_171128 i wynika ze zmiany parametrów beamformingu, co w konsekwencji prowadzi do zmian w częstotliwości występowania poszczególnych wartości bajtów w zbiorach wyjściowych. W celu weryfikacji tej tezy, na rys. 4.12 przedstawiono wykresy entropii wraz z wartością wzmocnienia TVG w czasie dla opisanych przypadków testowych.

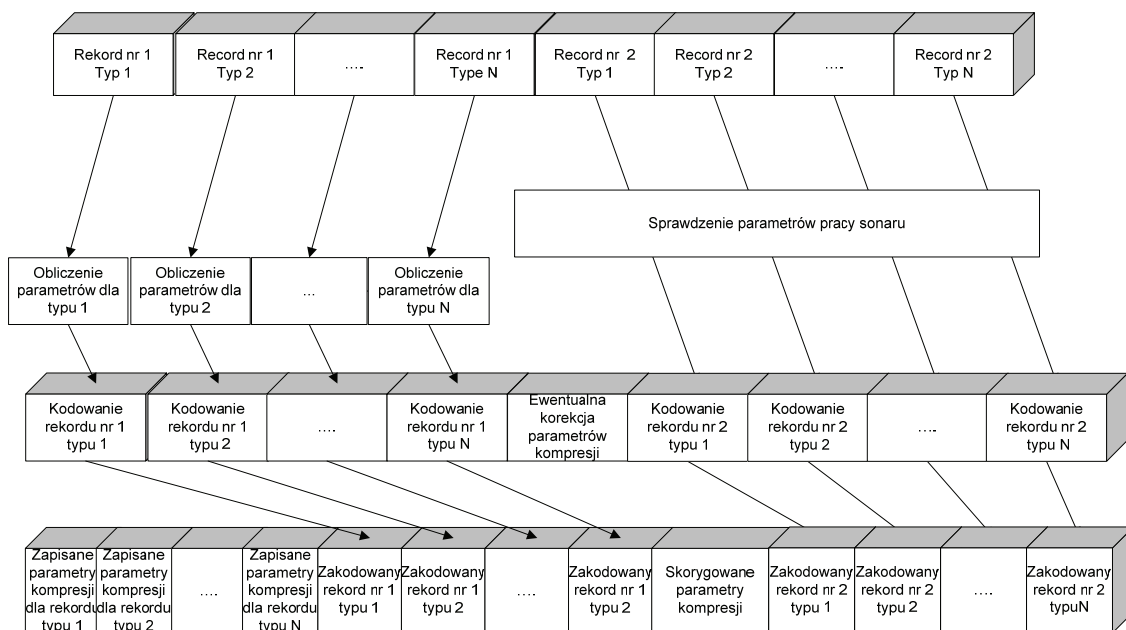


Rys. 4.11. Stopień kompresji w zależności od numeru sondowania dla testowych zestawów danych



Rys. 4.12. Entropia dla kolejnych datagramów w dwóch rozpatrywanych przypadkach w zestawieniu z przebiegiem wzmocnienia sygnału

Z powyższych rozważań wynika więc iż, zmiana wartości parametrów pracy sonaru podczas dłuższych pomiarów może w znacznym stopniu pogorszyć stopień kompresji. Z tego względu zaproponowano modyfikację przedstawionego algorytmu, która umożliwia uaktualnianie tabeli kodów Huffmana, w przypadku gdy następuje zmiana ustawień pracy sonaru. Jej schemat został przedstawiony na rysunku rys. 4.13.

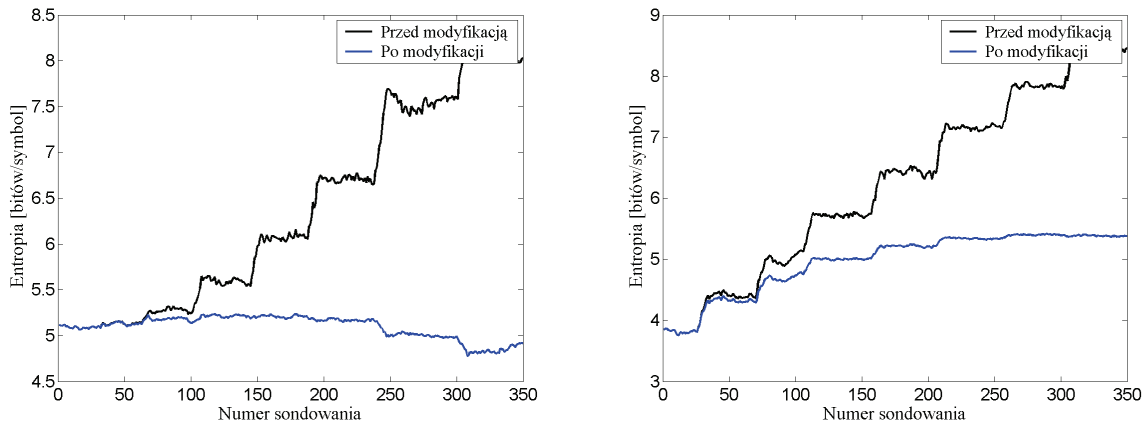


Rys. 4.13. Modyfikacja zaproponowanego rozwiązania

Zaprezentowana powyżej modyfikacja algorytmów kompresji polega na kontroli parametrów przetwarzania danych przy każdym następnym sondowaniu. W zaproponowanych algorytmach ograniczono się do monitorowania kilku najważniejszych parametrów dotyczących procesu beamformingu a mianowicie:

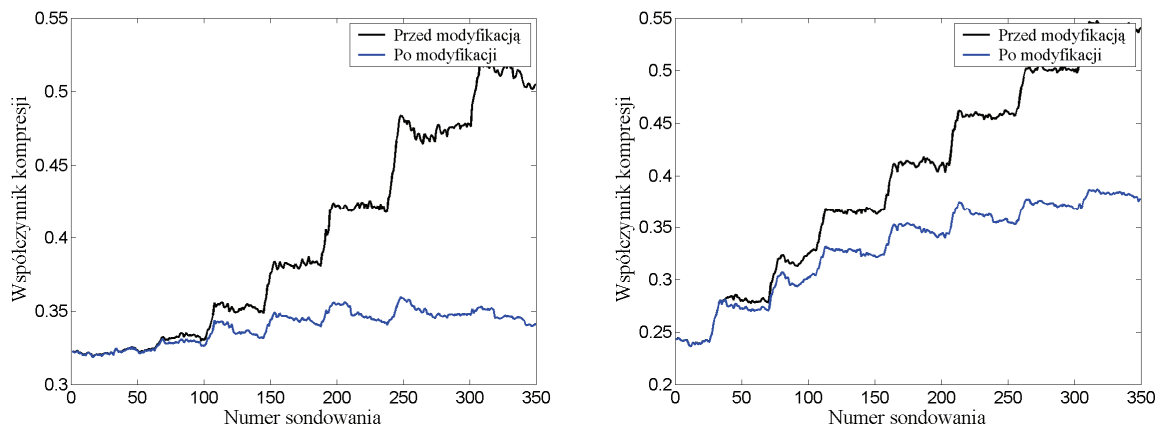
- wzmocnienia,
- zasięgu,
- przyjętego współczynnika tłumienia dźwięku w wodzie.

Opis tego jak parametry te wpływają na otrzymywane zobrazowania sonarowe można wyprowadzić na podstawie opisu w rozdziale drugim (wzory 2.1-2.13). Zadanie aktualizacji parametrów kodowania z technicznego punktu widzenia nie jest trudne w realizacji, gdyż producenci systemów sonarowych wraz z wynikami każdego sondowania dostarczają także zbiór parametrów przetwarzania w rekordzie o roboczej nazwie *runtime parameters*. Umożliwia to między innymi prawidłową interpretację otrzymywanych danych. Proponowany algorytm wykonuje automatyczne wyliczenie drzew Huffmana oraz zapisanie do pliku wynikowego nowych tabeli kodów Huffmana umożliwiających późniejszą kompresję i dekompresję zbioru przy każdej zmianie wyżej opisanych parametrów. Dzięki zastosowaniu opracowanej modyfikacji podobieństwo zobrazowań akustycznych otrzymywanych w wyniku kolejnych sondowań jest znacznie większe i zostało pokazane na rys. 4.14.



Rys. 4.14. Podobieństwo kolejnych sondowań po uwzględnieniu proponowanych modyfikacji. Wykres z lewej strony dla zbioru testowego 20070720_170910, wykres z prawej strony dla przypadku testowego 20070720_171128

W wyniku zastosowania modyfikacji proponowanego algorytmu udało się uzyskać lepsze stopnie kompresji opisanych wcześniej przypadków, w których pogorszenie stopnia kompresji spowodowane było zmianą parametrów pracy urządzenia (rys. 4.15).



Rys. 4.15. Współczynnik kompresji dla kolejnych sondowań po uwzględnieniu proponowanych modyfikacji. Wykres z lewej strony dla zbioru testowego 20070720_170910, wykres z prawej strony dla przypadku testowego 20070720_171128

Całościowe zestawienie wyników kompresji dla wszystkich zbiorów zostało przedstawione w tab. 4.3, w której porównano zarówno stopień kompresji danych oraz czas przetwarzania z wynikami uzyskanymi za pomocą narzędzi ZIP, 7-ZIP oraz RAR.

Tab. 4.3. Całościowe zestawienie wyników kompresji z zastosowaniem proponowanej metody.

Nazwa zbioru danych	Wielkość zbioru [MB]	ZIP współczynnik kompresji /czas [s]	7-ZIP współczynnik kompresji /czas [s]	RAR współczynnik kompresji /czas [s]	Zaproponowane rozwiązanie współczynnik kompresji /czas [s]
20060719_204657__7125 (400kHz).s7k	557	0.65 / 155	0.50 / 295	0.54 / 220	0.31 / 65
20070315_184108.s7k	127	0.79 / 35	0.63 / 73	0.69 / 42	0.31 / 12
20070720_170721.s7k	937	0.51 / 255	0.23 / 11 min.	0.44 / 380	0.19 / 94
20070831_185543.s7k	303	0.48 / 80	0.40/195	0.41 / 110	0.19 / 29
20051014_185729__7125 (400kHz).s7k	589	0.63/178	0.48 / 380	0.57 / 182	0.28 / 90
20070720_170910.s7k	1126	0.53 / 305	0.40 / 13 min.	0.46 / 430	0.2 / 120
20070720_171128.s7k	477	0.52 / 125	0.40 / 13 min.	0.46 / 170	0.21 / 53
20060201_190255__7125 (400kHz).s7k	601	0.66 / 170	0.54 / 340	0.61 / 225	0.31 / 82

Wyniki uzyskane poprzez zastosowanie proponowanych metod pokazują iż czas kompresji zbiorów w porównaniu z czasami kompresji poprzez zastosowanie innych narzędzi kompresji danych jest znacznie krótszy. Ponadto, uzyskane stopnie kompresji są we wszystkich przypadkach znacznie mniejsze niż poprzez zastosowanie popularnych narzędzi archiwizacji danych.

Z uwagi na fakt, iż proponowane metody są przeznaczone do działania w czasie rzeczywistym, istotnym zagadnieniem jest określenie czasu jaki jest niezbędny do przetworzenia odpowiednich rekordów za pomocą proponowanego rozwiązania. W tym celu przeprowadzono doświadczalną weryfikację opracowanego rozwiązania wykonując pomiary czasu tworzenia obrazowań akustycznych przez system wielowiązkowy oraz porównując go do czasu przetwarzania danych za pomocą proponowanego rozwiązania wykonywanego na stanowisku laboratoryjnym będącym standardowym komputerem klasy PC Athlon X2 3600+ z 1GB pamięci RAM. Zestawienie wyników znajduje się w tab. 4.4.

Tab. 4.4. Doświadczalna weryfikacja wydajności proponowanego rozwiązania – porównanie czasów generowania zobrażeń akustycznych wykonywane w systemie wielowiązkowym z czasem przetwarzania za pomocą proponowanego rozwiązania na komputerze klasy PC.

Nazwa zbioru danych	Czas przetwarzania (kompresji) zobrażenia akustycznego za pomocą proponowanych algorytmów [ms]	Czas generowania zobrażenia akustycznego przez system wielowiązkowy [ms]
20060719_204657__7125 (400kHz).s7k	80	150-200
20070315_184108.s7k	350-400	450-500
20070720_170721.s7k	15-20	100-120
20070831_185543.s7k	20-25	300-350
20051014_185729__7125 (400kHz).s7k	40	70-80
20070720_170910.s7k	15	120-130
20070720_171128.s7k	17	120-130
20060201_190255__7125 (400kHz).s7k	42-43	70-80

Różnice w czasach tworzenia oraz przetwarzania rekordów w poszczególnych przypadkach testowych zależą od parametrów pracy sonaru takich jak głębokość dna w trakcie wykonywania pomiaru, częstotliwość próbkowania, ilość wiązek itp. Zaprezentowane wyniki pokazują, iż opracowany algorytm, wykonywany na standardowym komputerze klasy PC, poprzez zastosowanie zaproponowanej optymalizacji algorytmów kodowania, potrafi przetworzyć otrzymywane dane w czasie krótszym o 10% do 80% niż czas generowania rekordów przez system wielowiązkowy. Należy także zauważyć, iż weryfikacja doświadczalna została przeprowadzona jedynie dla najistotniejszego z wydajnościowego punktu widzenia składnika danych – zobrażeń akustycznych toni wodnej. Pozostałe eksperymenty wykazały także iż czas przetwarzania pozostałych datagramów zawiera się w czasie krótszym niż 10 ms i nie stanowi w żaden sposób elementu opóźniającego w algorytmach przetwarzania danych.

Z uwagi na fakt, iż rekordy kompresowane są osobno, istotną zaletą opracowanego rozwiązania jest możliwość wybiórczej dekompresji pożądaných rekordów bez konieczności przetwarzania całego zbioru wynikowego. Dekompresja odpowiedniego datagramu polega na odczytaniu zapisanego drzewa Huffmana z pliku skompresowanego oraz dekompresji wybranego zbioru na podstawie zawartych znaczników liczbowych dołączanych do skompresowanych datagramów w pliku wynikowym. Ta unikatowa cecha wspomnianego rozwiązania pozwala na stosowanie proponowanych metod jako narzędzia archiwizacji działającego w trybie czasu rzeczywistego oraz umożliwia definicję nowego formatu pliku, który może stanowić rozwiązanie konkurencyjne w stosunku do istniejących obecnie realizacji polegających na zapisie otrzymywanych danych w postaci binarnej.

4.3. Zastosowanie architektury CUDA do kompresji obrazowań akustycznych w czasie rzeczywistym

W podrozdziałach 4.1 oraz 4.2 niniejszego opracowania zaproponowano koncepcje polegające na poprawie jakości kompresji danych otrzymywanych sonarem wielowiązkowym pod dwoma zasadniczymi aspektami: stopnia kompresji oraz czasu przetwarzania. Dzięki wiedzy dotyczącej specyfiki działania systemów sonarowych oraz struktury i zawartości otrzymywanych danych, omawiane rozwiązania pozwalają zoptymalizować proces przetwarzania danych przy jednoczesnym zachowaniu wysokiego współczynnika kompresji. W niniejszym podrozdziale opisano podejście umożliwiające realizację algorytmów kompresji danych przeznaczoną do działania w trybie czasu rzeczywistego polegające na zastosowaniu konkretnych rozwiązań sprzętowo-programistycznych do realizacji wyżej opisanych zadań.

Niniejszy podrozdział stanowi techniczny opis procesu implementacji oraz modyfikacji algorytmu przedstawionego w 4.2 dla potrzeb wielordzeniowej architektury CUDA. Omówiono w nim specyfikę wybranych rozwiązań oraz szczegóły dotyczące wykonywania zadań w omawianej technologii GPU.

4.3.1 Kompresja danych na wielordzeniowej architekturze CUDA

Opracowana w ramach prac nad rozprawą aplikacja umożliwia kompresję danych pochodzących z systemów wielowiązkowych w czasie rzeczywistym. Aby spełnić ten warunek, powinna ona umożliwiać wydajną kompresję z przepływowością wyższą niż dostarczany strumień danych. Zgodnie z wnioskami z rozdziału 3, przepływowość proponowanego rozwiązania powinna wynosić powyżej 30 MB/s dla najbardziej niekorzystnych przypadków testowych. W praktyce, ważne jest także, aby wydajność aplikacji pozwalała na przetwarzanie kolejnych rekordów w czasie krótszym, niż generuje je system wielowiązkowy.

Aby w pełni wykorzystać możliwości jakie daje architektura przetwarzania równoległego, na potrzeby niniejszej pracy, opracowywano modyfikację metod kompresji przedstawionych w podrozdziale 4.2 wykorzystującą architekturę CUDA.

Oryginalna wersja algorytmu kodowania Huffmana może być opisana w trzech podstawowych krokach:

- 1) zliczenie wystąpień każdego z symboli w komunikacie wejściowym oraz wyznaczenie ich prawdopodobieństw wystąpień

2) zbudowanie drzewa Huffmana na podstawie tablicy prawdopodobieństw i przekształcenie go do postaci tablicy [*symbol => kod*]

3) zakodowanie komunikatu wejściowego na podstawie tabeli kodów

Algorytm kodowania Huffmana, w formie oryginalnej, jest trudny w implementacji na platformie wielordzeniowej, ponieważ zliczenia wystąpień symboli wykonywane w kroku pierwszym zapisywane są w jednej tablicy, a niemożliwy jest dostęp wielu równoległych wątków do tego samego obszaru danych jednocześnie. Można wprawdzie wprowadzić rozwiązanie polegające na stosowaniu atomowych operacji dostępnych w bibliotekach CUDA lub użyć ograniczonej liczby tablic, które dopiero w ostatnim kroku byłyby sumowane. To jednak nie rozwiązuje w ogólności problemu jednoczesnego zapisu do tej samej komórki pamięci, a wraz z dodatkowym obciążeniem pamięciowym i obliczeniowym związanym z buforowaniem operacji zapisu, prowadzi do wzrostu czasu wykonania metody w porównaniu z wersją szeregową wykonywaną na CPU.

Ponadto, metoda budowania drzewa Huffmana w oryginalnej formie jest trudna do zrównoleglenia [40], gdyż wymaga wiedzy, które z aktualnego zbioru drzew, mają najmniejsze prawdopodobieństwa. Każda iteracja budowania drzewa zależy wprost od wyniku poprzedniej, co narusza dwa pierwsze warunki Bernsteina.

Również zapis komunikatu wyjściowego nie może być wykonany równoległe w wielu wątkach, gdyż kod każdego z symboli może być dowolnej długości. W takim przypadku zapis danego kodu reprezentującego symbol do komunikatu wyjściowego wymaga wiedzy, w którym miejscu należy zapisać ten kod. To natomiast zależy od długości kodów wszystkich poprzedzających symboli w komunikacie.

W związku z powyższym, opracowano modyfikację algorytmu w oparciu o ideę kodowania Huffmana oraz kodowania Shannona, która jest podporządkowana wymogom równoległego wykonywania operacji. Zmodyfikowany algorytm kodowania został podzielony na następujące kroki:

- 1) wypełnienie bufora wieloma rekordami i podzielenie go na fragmenty równej wielkości
- 2) dla każdego rekordu w buforze:
 - a) wyznaczenie prawdopodobieństw wystąpień symboli jako procedura szeregowo wykonywana na CPU osobno dla każdego rekordu w buforze
 - b) zapisanie prawdopodobieństw do tabeli oznaczeń [*symbol => prawdopodobieństwo*] oraz skumulowanie tabeli oznaczeń w procedurach równoległych
 - c) wyznaczenie tabeli kodów na podstawie skumulowanej tabeli oznaczeń jako procedura równoległa

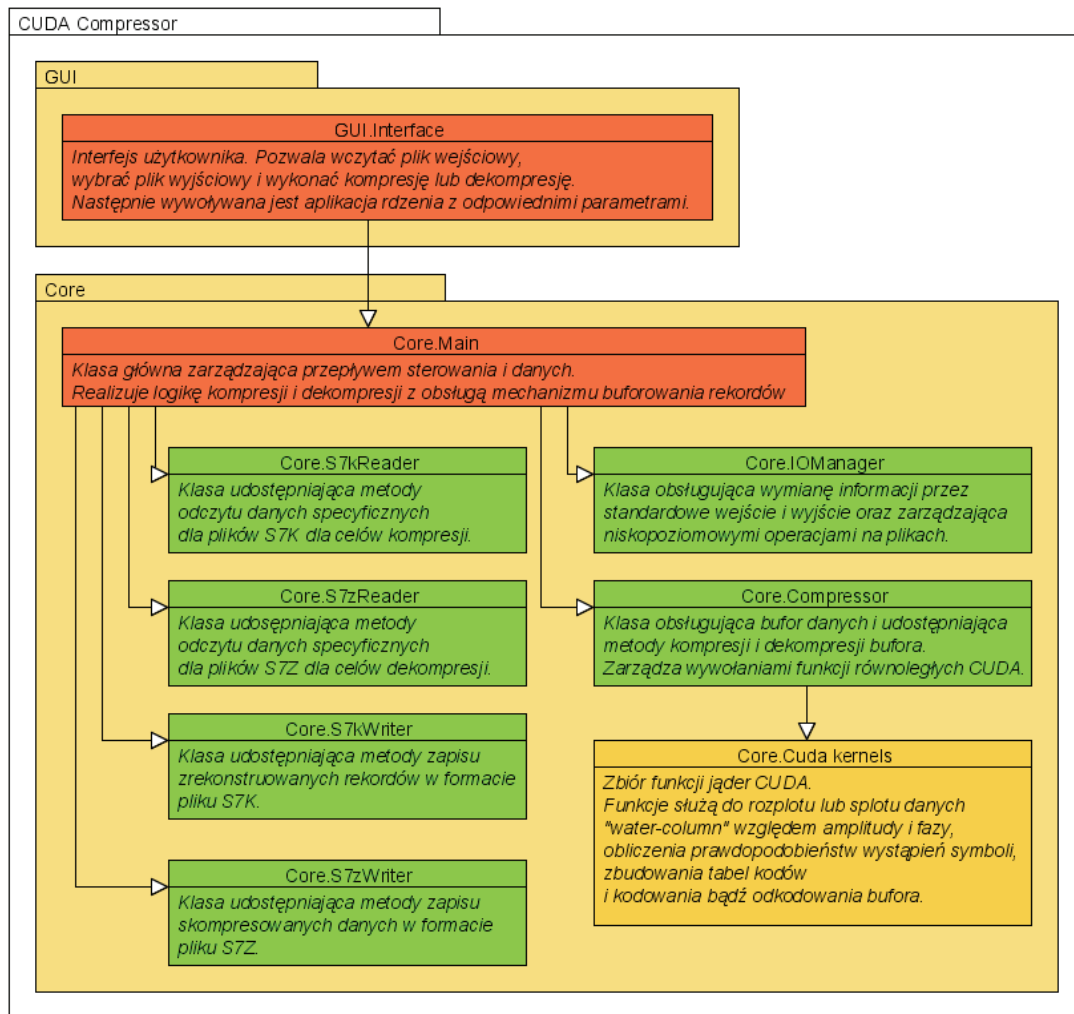
3) zakodowanie równolegle wszystkich fragmentów bufora na podstawie odpowiadających tabel kodów

Takie rozwiązanie zapewnia wykorzystanie możliwości obliczeń równoległych, gdyż tylko wyznaczenie prawdopodobieństw wystąpienia symboli wykonywane jest jako procedura wyłącznie szeregowo, pozostałe mogą być w całości lub częściowo wykonywane równolegle.

W celu zwiększenia stopnia kompresji pliku, w pierwszych etapach budowy aplikacji zaimplementowano także metodę dwuwymiarowej dekompozycji falkowej. Następnie dane dekomponowane poddawano kodowaniu RLE i dopiero tak przygotowane zestawy kodowano według powyższej metody. Spodziewano się dzięki temu uzyskać wzrost wydajności kompresji, lecz już po pierwszych testach okazało się, że dekompozycja falkowa nie ma w przypadku tego rodzaju danych większego zastosowania. Zysk stopnia kompresji nie przekraczał 2%, a z powodu znacznych wymagań obliczeniowych algorytmu dwuwymiarowej dekompozycji falkowej, wydajność opracowywanego rozwiązania spadała poniżej wymaganej. Z tego powodu, w kolejnych fazach budowy systemu zrezygnowano z wykorzystywania tej metody. Po wnikliwej analizie charakteru danych przesyłanych w ramach zbiorów, okazało się, iż czynnikiem dyskryminującym zasadność stosowania dekompozycji falkowej jest znaczny poziom szumu w przetwarzanych danych. Z tego powodu obrazy zdekomponowane były równie zaszumione, co eliminuje niemal wszystkie potencjalne zyski wynikające z transformacji falkowej w celach kompresji.

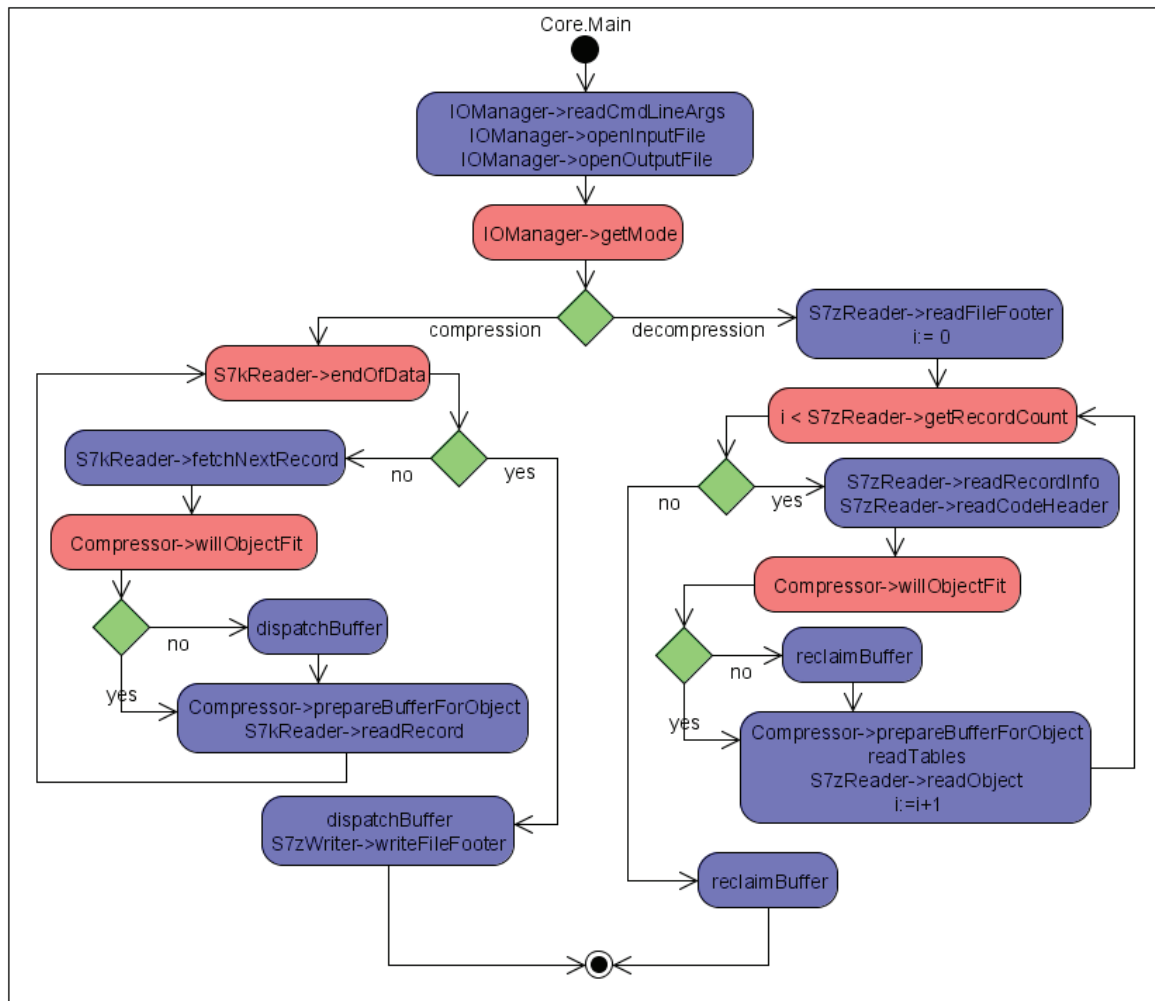
4.3.2 Architektura proponowanego rozwiązania

Opisywana aplikacja, przeznaczona do wykonywania na wielordzeniowej architekturze GPU, składa się z dwóch modułów. Pierwszy z nich stanowi tzw. rdzeń aplikacji (ang. *core*) i z uwagi na wybór technologii został zaimplementowany w języku Visual C++, drugi natomiast, zawiera graficzny interfejs użytkownika (GUI) zarządzający wywoływaniem odpowiednich metod rdzenia. Moduł interfejsu został napisany w języku Visual C#. Diagram klas aplikacji został zamieszczony na rys. 4.16.



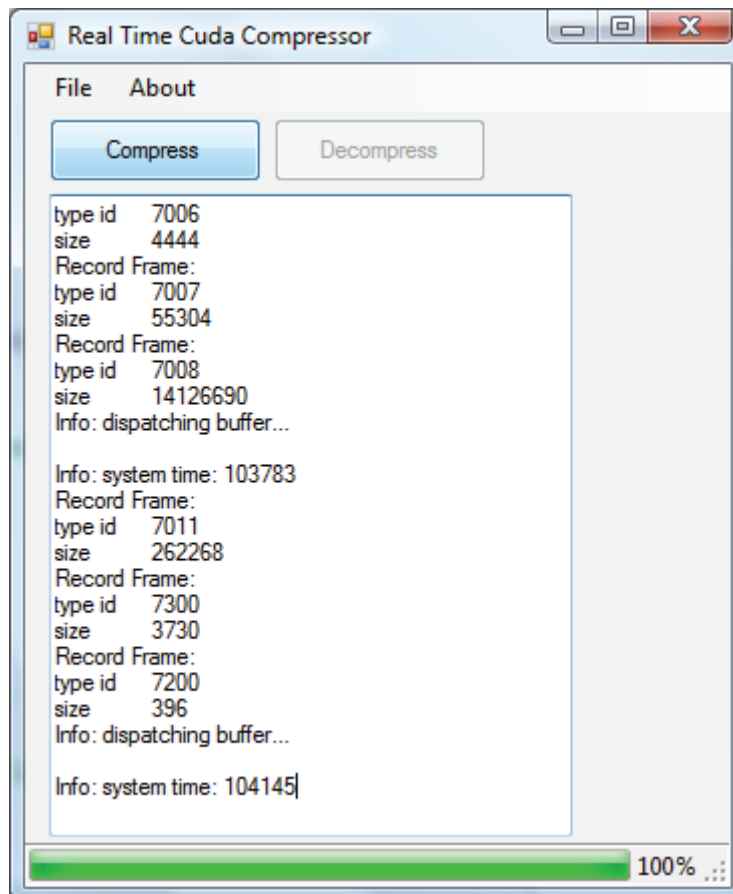
Rys. 4.16. Diagram klas aplikacji

Moduł rdzenia składa się z 7 zasadniczych bloków zarządzanych przez obiekt klasy Main, który steruje ogółem operacji związanych z przetwarzaniem danych w jednostce GPU. Klasa IOManager jest odpowiedzialna za realizację funkcji odczytu oraz zapisu danych pochodzących z systemu wielowiązkowego, natomiast w klasie Compressor wykonywane są operacje kompresji danych. W zależności od trybu działania (kompresja lub dekompresja), w obiekcie inicjalizowane są instancje odpowiednich klas umożliwiających bezpośrednio zapis i odczyt z plików s7k lub s7z (format pliku skompresowanego). Schemat blokowy aplikacji rdzenia został przedstawiony na rys. 4.17.



Rys. 4.17. Schemat blokowy modułu rdzenia

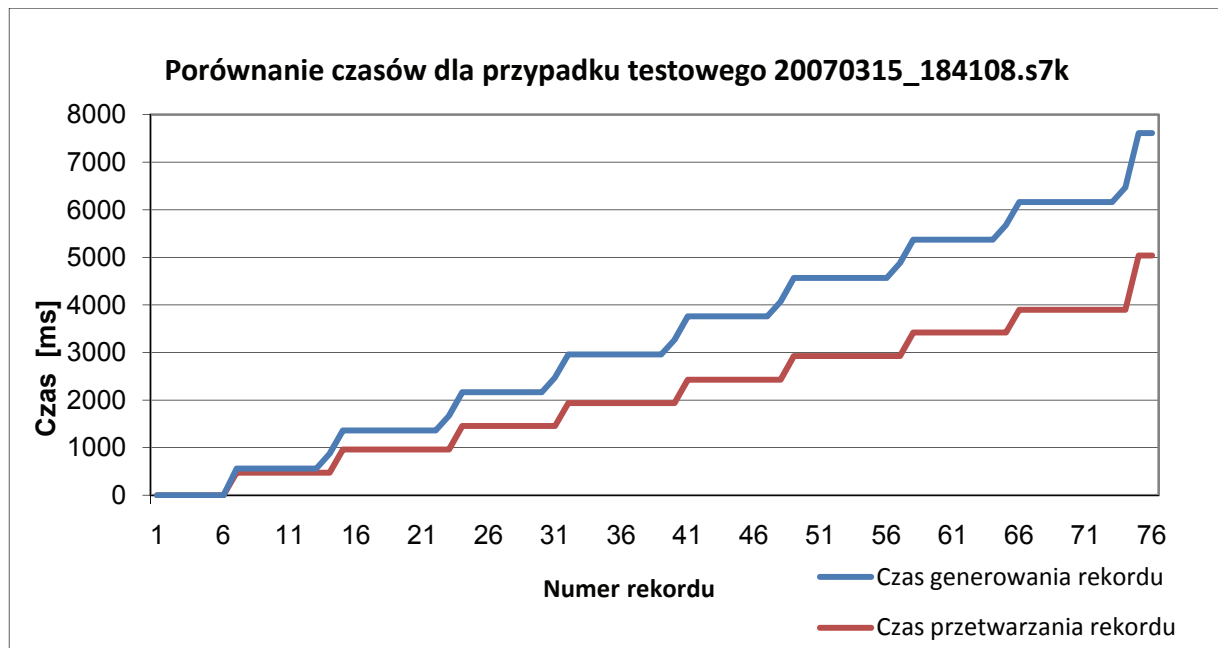
Moduł GUI stanowi dla użytkownika warstwę pośredniczącą pomiędzy modułem rdzenia a zestawem funkcji dostępnych z poziomu interfejsu. Jest to formularz umożliwiający zarządzanie operacjami wyboru plików wejściowego, wyjściowego oraz operacjami na tych plikach: kompresji i dekompresji. W przypadku pracy na większych zestawach danych, użytkownik ma także możliwość podglądu aktualnego stanu zaawansowania procesu za pomocą dostępnego w głównym oknie aplikacji paska postępu. Podczas wykonywania operacji, w oknie tekstowym poniżej przycisków, zapisywane są logi informacyjne dotyczące między innymi aktualnie przetwarzanych rekordów (rys. 4.18).



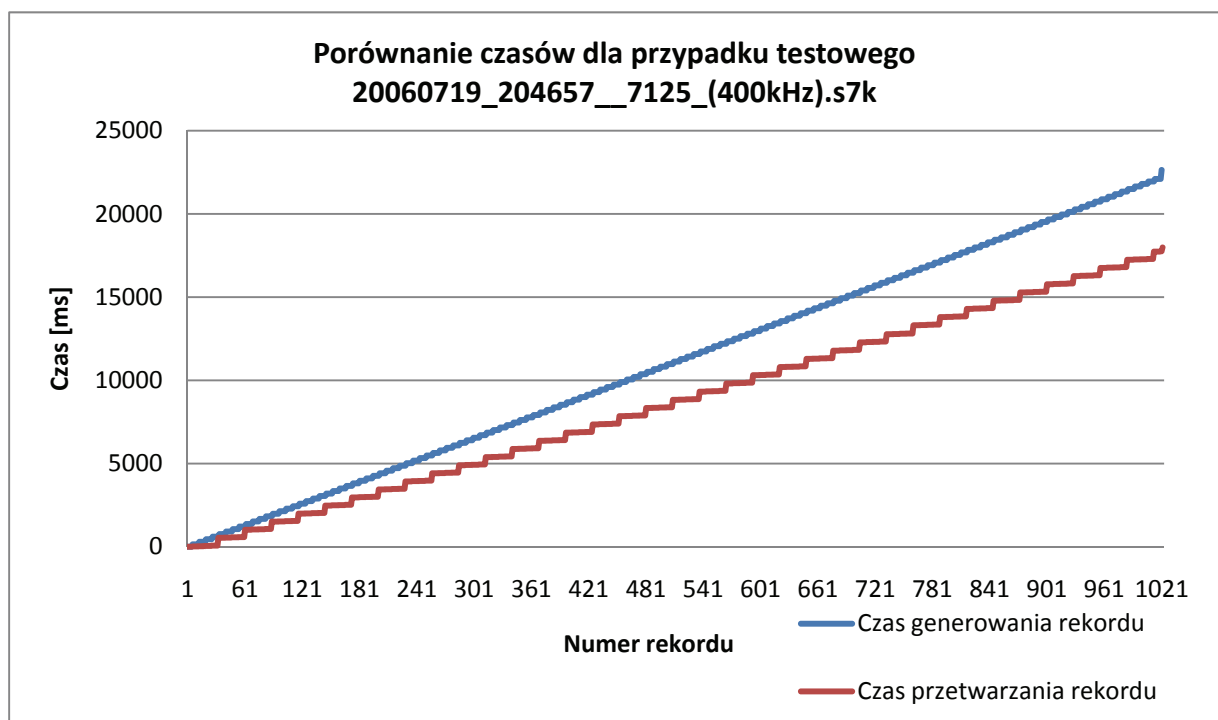
Rys. 4.18. Okno główne podczas działania programu

4.3.3 Wyniki działania algorytmu na architekturze wielordzeniowej

W ramach testowania wydajności aplikacji wykonywano proces kompresji dla wielu zestawów danych otrzymywanych z systemu wielowiązkowego firmy RESON Inc. z serii 7k. Przeprowadzono pomiary czasu kompresji w odniesieniu do czasów odczytanych ze źródłowych strumieni danych. Rysunki 4.19 oraz 4.20 przedstawiają porównanie czasów generowania (kolor niebieski) kolejnych rekordów oraz czasu przetwarzania (kolor czerwony) dla dwóch wybranych reprezentatywnych przypadków testowych.



Rys. 4.19. Generowanie oraz przetwarzanie rekordów dla przypadku testowego 20070315_184108.s7k – porównanie oraz weryfikacja doświadczalna opracowanych metod



Rys. 4.20. Generowanie oraz przetwarzanie rekordów dla przypadku testowego 20060719_204657__7125_(400kHz).s7k – porównanie oraz weryfikacja doświadczalna opracowanych metod

Doświadczalną weryfikację wykonano na podstawie porównania czasu generowania rekordu przez system wielowiązkowy obliczonego na podstawie znaczników czasowych w otrzymywanym strumieniu danych z czasem jego kompresji wykonanej za pomocą

proponowanego rozwiązania. Wyniki testów pokazują, że czas kompresji otrzymywanych rekordów jest krótszy niż czas konieczny do ich wygenerowania, co oznacza że kompresja może odbywać się w czasie rzeczywistym. Należy zaznaczyć, iż analogiczne pomiary przeprowadzono dla znacznie większej liczby danych, a w opracowaniu postanowiono przedstawić wyniki dla najbardziej reprezentatywnych przypadków. W pracy dokonano także porównania opracowanego rozwiązania z ogólnodostępnymi narzędziami kompresji danych. Aby zmierzyć dokładną wydajność dla danego przypadku testowego, należy porównać wyniki uzyskane przez opracowane rozwiązanie z wynikami uzyskanymi przez obecnie stosowane narzędzia archiwizacji danych (ZIP, RAR, 7-ZIP). W tym celu wykonano eksperymenty mające na celu obliczenie wydajności aplikacji według wzoru 3.15, a następnie porównano je z wynikami obliczeń otrzymanymi poprzez zastosowanie popularnych narzędzi archiwizacji danych przedstawiając je w tab. 4.5.

Tab. 4.5. Porównanie wydajności opracowanego rozwiązania w technologii CUDA z innymi ogólnodostępnymi narzędziami kompresji danych: RAR, ZIP oraz 7-ZIP.

Przypadek testowy	T_{input} [MB/s]	$T_{aplikacji}$ [MB/s]	T_{RAR} [MB/s]	T_{ZIP} [MB/s]	T_{7-ZIP} [MB/s]
20070315_184108.s7k	25,762	44,993	3,818	6,888	1,760
20060719_204657__7125_(400kHz).s7k	24,612	30,259	3,040	6,306	1,357
20060201_190255__7125 (400kHz).s7k	19,272	21,498	2,934	6,298	1,358
20070720_171128.s7k	9,3697	10,043	2,967	6,318	1,403

Należy stwierdzić, iż dla wybranych przypadków testowych wydajność niniejszej aplikacji pozwala na jej stosowanie w czasie rzeczywistym, gdyż przepływowość proponowanego rozwiązania ($T_{aplikacji}$) jest od 7% do 80% większa od przepływowości strumienia danych wejściowych (T_{input}) w skali całego zestawu. Ponadto, prędkość ta jest od 5 do 20 razy większa niż prędkość przetwarzania za pomocą innych popularnych metod kompresji, oznaczonymi jako T_{RAR} , T_{ZIP} , T_{7-ZIP} w powyższej tabeli. Największą wydajność aplikacja uzyskała dla przypadku testowego *20070315_184108.s7k*. Wynika to z faktu iż zestaw ten, w porównaniu z pozostałymi, zawiera rekordy ze zobrazeniami akustycznymi toni wodnej kilkukrotnie większej objętości. Pozostałe pliki są bardziej pofragmentowane - zawierają więcej rekordów o mniejszych rozmiarach. Z tego wynika, iż konieczność niezależnej kompresji każdego z rekordów wpływa niekorzystnie na wydajność aplikacji, zwłaszcza w przypadku, gdy są one stosunkowo małych rozmiarów. Należy jednak podkreślić, iż współczynnik przepływowości wejściowego strumienia danych w przypadku bardziej pofragmentowanych zbiorów, jest także odpowiednio niższy, a dla wszystkich

przypadków (także tych niewymienionych w tabeli), warunek kompresji w czasie rzeczywistym jest spełniony.

Kolejnym kryterium oceny algorytmów kompresji jest stopień kompresji. W pracy dokonano porównania proponowanego rozwiązania z wynikami otrzymanymi za pomocą innych popularnych narzędzi archiwizacji danych. W tab. 4.6 przedstawiono wyniki pomiarów dla przykładowych zestawów danych.

Tab. 4.6. Porównanie stopnia kompresji C otrzymywanego za pomocą proponowanego rozwiązania z wynikami otrzymywanymi za pomocą popularnych narzędzi archiwizacji.

Przypadek testowy	C _{aplikacji} [%]	C _{RAR} [%]	C _{ZIP} [%]	C _{7-ZIP} [%]
20070315_184108.s7k	0,69	0,69	0,79	0,66
20060719_204657__7125_(400kHz).s7k	0,61	0,54	0,65	0,51
20060201_190255__7125 (400kHz).s7k	0,69	0,61	0,67	0,55
20070720_171128.s7k	0,51	0,46	0,53	0,42

Należy zauważyć iż stopień kompresji, uzyskiwany za pomocą proponowanego rozwiązania, jest porównywalny z wynikami uzyskanymi poprzez zastosowanie standardu 7-ZIP oraz RAR oraz w trzech przypadkach na cztery lepszy od kompresji ZIP.

Opracowane rozwiązanie jest przykładem innowacyjnej metody kompresji danych otrzymywanych z systemów wielowiązkowych. W celu realizacji systemu spełniającego postulat kompresji danych w czasie rzeczywistym zdecydowano się na podejście oparte o przetwarzanie równoległe z wykorzystaniem wielordzeniowych kart graficznych *nVidia*. Otrzymywany stopień kompresji porównywalny jest z uzyskiwanymi dzięki zastosowaniu popularnych metod kompresji, a dodatkowo znacznie je przewyższa w aspekcie wydajności. Należy także zauważyć iż, każdy z rekordów w pliku wejściowym kodowany jest niezależnie. Oznacza to, że możliwe jest zastosowanie wybiórczej metody dekompresji wybranych fragmentów pliku bez konieczności przetwarzania całego skompresowanego zbioru danych.

Wyniki niniejszej pracy świadczą o tym, iż systemy kompresji danych, budowane w oparciu o technologię *nVidia* CUDA, mogą być doskonałym narzędziem nie tylko w kontekście archiwizacji danych typowych dla sonarów wielowiązkowych, lecz w każdej dziedzinie wymagającej kompresji znacznej ilości danych, w której aspekt wydajności i szybkości opracowywanego rozwiązania jest istotny.

4.4. Zastosowanie analizy głównych składowych oraz transformaty falkowej do kompresji danych batymetrycznych

W poprzednich podrozdziałach omówiono sposoby redukcji, optymalizacji przetwarzania oraz składowania danych sonarowych ze szczególnym uwzględnieniem

zobrazowań akustycznych toni wodnej. Mimo iż, przetwarzanie tego typu informacji jest bardzo przydatne w wielu analizach dotyczących środowiska morskiego, a stan wiedzy dotyczący efektywnych metod składowania, przetwarzania i wizualizacji tego typu danych ciągle się rozwija, nadal głównym celem stosowania sonarów wielowiązkowych, przynajmniej w zastosowaniach komercyjnych, jest możliwość szerokokątnego mapowania środowiska oraz otrzymywania trójwymiarowych obrazów dna morskiego, które później są wykorzystywane do tworzenia map morskich.

W niniejszym podrozdziale przedstawiono koncepcję kompresji danych batymetrycznych otrzymywanych bezpośrednio z sonaru wielowiązkowego EM 3002, która może mieć zastosowanie w rozproszonych morskich systemach GIS. W przedstawionych rozwiązaniach zdecydowano się na wykorzystanie dwóch metod przetwarzania danych: transformaty falkowej oraz analizy głównych składowych.

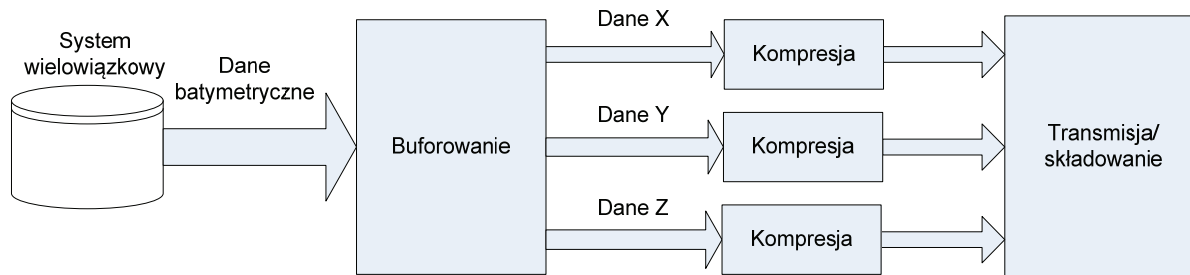
4.4.1 Algorytm kompresji surowych danych batymetrycznych

Współcześnie produkowane systemy wielowiązkowe są doskonałym narzędziem do tworzenia map dna. Mogą być montowane zarówno na pływającej jednostce badawczej oraz na specjalistycznych pojazdach podwodnych typu AUV (ang. *automated underwater vehicle*) lub ROV (ang. *remotely operating vehicle*). Aby móc wiernie odtworzyć kształt rzeźby dna, systemy te, oprócz samych danych batymetrycznych, dostarczają szeregu informacji dotyczących jakości otrzymywanych danych, pozycji przetwornika czy przechyłów, które mogą znacznie poprawić jakość ostatecznie generowanych map dna.

Należy jednak zauważyć, iż dane te nie są niezbędnym elementem do wizualizacji otrzymywanej informacji, mają głównie charakter pomocniczy i są wykorzystywane dopiero w tzw. procesie post-processingu, w którym otrzymuje się ostateczną mapę dna przeznaczoną dla klienta docelowego. W przypadku wizualizacji danych batymetrycznych w trybie czasu rzeczywistego, nie jest konieczne uwzględnianie wszystkich parametrów, które mogą mieć wpływ na jakość pomiaru, gdyż ostateczny obraz dna jest wynikiem, często wielogodzinnej, obróbki danych już po wykonanym pomiarze.

W niniejszej części opracowania zaproponowano algorytmy, których głównym celem jest kompresja tzw. surowych danych batymetrycznych, czyli tych otrzymywanych bezpośrednio z sonaru. Metody te mogą mieć zastosowanie na przykład dla celów zdalnej wizualizacji dna morskiego wykonywanej w czasie rzeczywistym. W omawianym rozwiązaniu wykorzystuje się jedynie tzw. dane XYZ, które składają się z serii trójek liczb

stanowiących odległości punktów pomiarowych od głowicy sonaru. Uproszczony schemat procesu kompresji przedstawiony został na rys. 4.21.



Rys. 4.21. Schemat kompresji danych w proponowanym rozwiązaniu

W proponowanym podejściu, podzielonym na trzy zasadnicze fazy, wykorzystuje się trzy różne techniki redukcji danych: metodę analizy głównych składowych, transformatę falkową oraz standard JPEG [63] w celu weryfikacji jakości proponowanych rozwiązań. Pierwszym etapem omawianego procesu jest buforowanie danych tak, aby w wyniku przetwarzania możliwe było stosowanie kompresji obrazowej (operującej na macierzach) na podstawie danych będących wynikami kolejnych sondowań. Należy zwrócić uwagę na fakt iż, aby omawiane rozwiązanie mogło działać w trybie czasu rzeczywistego, wielkość bufora musi być dobrana tak, aby nie wprowadzać zbyt dużego opóźnienia w procesie przetwarzania danych. Należy zatem uwzględnić częstotliwość sondowania, w taki sposób, aby czas wypełniania bufora nie powodował znaczących opóźnień. Z uwagi na fakt, iż prace oparto o dane pochodzące z systemu wielowiązkowego EM 3002, który charakteryzuje się częstotliwością sondowania w praktyce nieprzekraczającą 15Hz, rozmiar bufora ograniczono do 15 sondowań. Należy także zwrócić uwagę, iż dane dotyczące poszczególnych wymiarów (XYZ) są kompresowane osobno w bloku kompresji danych, w których wykorzystana jest jedna z omawianych metod kompresji. Oznacza to, że dla każdego bufora może być aplikowana inna metoda kompresji danych, która w danym przypadku jest optymalna. Ostatnim etapem omawianego procesu jest ostateczna obróbka skompresowanych danych, która polega na transmisji skompresowanej informacji za pomocą łącza komunikacyjnego bądź na składowaniu lub archiwizacji.

4.4.2 Opis zastosowanych metod kompresji

Istota proponowanego rozwiązania polega na wykryciu wzajemnego podobieństwa w ramach tworzonych buforów pomiędzy poszczególnymi porcjami danych dostarczonymi do systemu. W celu odkrycia istotnych zależności, jakie zachodzą między zmiennymi

opisującymi obiekt wielowymiarowy będący wynikiem sondowania, można zastosować metodą analizy głównych składowych polegającą na dokonaniu transformacji początkowych zmiennych w zbiór nowych, wzajemnie niezależnych zmiennych (składowych). Kompresja danych w tym przypadku, polega na redukcji otrzymanej w wyniku omawianego przekształcenia k -wymiarowej przestrzeni w przestrzeń p -wymiarową tak że $p < k$ przy czym usuwane są wymiary, które w zmodyfikowanej przestrzeni niosą najmniej informacji. W aspekcie kompresji danych batymetrycznych zbiorów liczb zawartych w jednym z trzech buforów (X,Y lub Z) traktuje się jako wektor k obserwacji, z których każda składa się N liczb stanowiących wartości otrzymane z kolejnych wiązek. W ten sposób zdefiniowana przestrzeń posiada k wymiarów, gdzie k jest równe ilości sondowań w buforze (maksymalnie 15). Zgodnie z wzorem 3.25 problem wyznaczenia składowych głównych przestrzeni polega więc na znalezieniu wektora $Z = (z_1, z_2, \dots, z_p)$ takiego, że

$$Z = A^T X, \quad (4.6)$$

gdzie A jest macierzą ortogonalną o wymiarze $p \times k$, gdzie $p < k$, a kolumna o numerze i reprezentuje i -ty wektor własny macierzy kowariancji analizowanego bufora. Wartość p dobierana jest w taki sposób, aby błędy otrzymane po rekonstrukcji danych były zgodne z przyjętymi ograniczeniami.

Ponieważ macierz A jest ortogonalna i znormalizowana, jej odwrotność równa się jej transpozycji [43] a operacja:

$$X = ZA^T \quad (4.7)$$

oznacza przekształcenie do przestrzeni pierwotnej, a w powyższym kontekście, dekompresję danych.

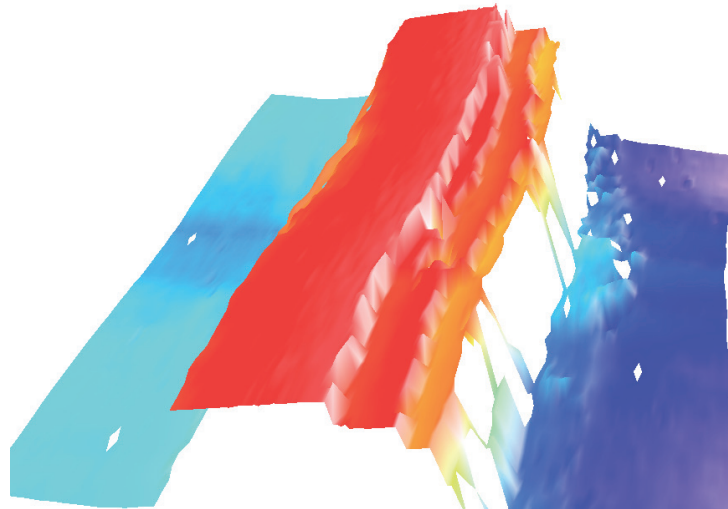
Inną stosowaną na tym etapie badań metodą jest kompresja danych z użyciem transformaty falkowej. Metoda ta polega na wykorzystaniu specyficznej własności tej operacji polegającej na otrzymywaniu w wyniku przekształcenia szeregu zer współczynników bliskich lub równych zeru. Samo przekształcenie nie powoduje zmniejszenia rozmiaru danych - redukcja zbioru osiągnięta jest poprzez zastąpienie najmniejszych współczynników falkowych zerami oraz zastępowanie szeregu powtarzających się symboli odpowiednimi znacznikami typu rodzaj symbolu oraz dołączona do niego liczba informująca o ilości powtarzających się znaków. Takie rozwiązanie wraz z zastosowaniem metody kodowania Huffmana lub innej, daje w efekcie zmniejszenie wielkości zbioru wynikowego.

W omawianych pracach zastosowano dwuwymiarową transformatę falkową poziomu 3 z funkcją bazowa Haara [29], metodę kodowania RLE [38] oraz kodowanie Huffmana w celu otrzymania ostatecznej formy skompresowanej informacji.

4.4.3 Wyniki działania algorytmów oraz ich omówienie

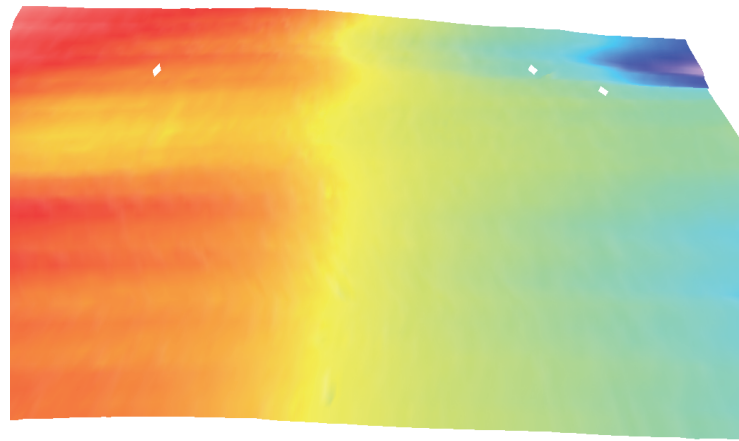
Aby móc określić jakość proponowanych metod, w pracy zdecydowano się porównać wyniki kompresji z najbardziej popularnym standardem kompresji stratnej jakim jest JPEG. Z uwagi na fakt, iż we wszystkich przypadkach stosowano stratne metody kompresji danych założono iż błąd RMSE otrzymywany podczas rekonstrukcji danych nie powinien przekraczać 1,5 cm, a błędy rekonstrukcji powstałe w wyniku zastosowania proponowanych metod kompresji powinny być równe błędom otrzymywanym poprzez zastosowanie standardu JPEG. W ramach prac założono dwa przypadki testowe, które mogą mieć wpływ na jakość otrzymywanych danych:

- 1) Przypadek 1 – dane otrzymane podczas sondowania wraku Terra (Zatoka Gdańska) (rys. 4.22).



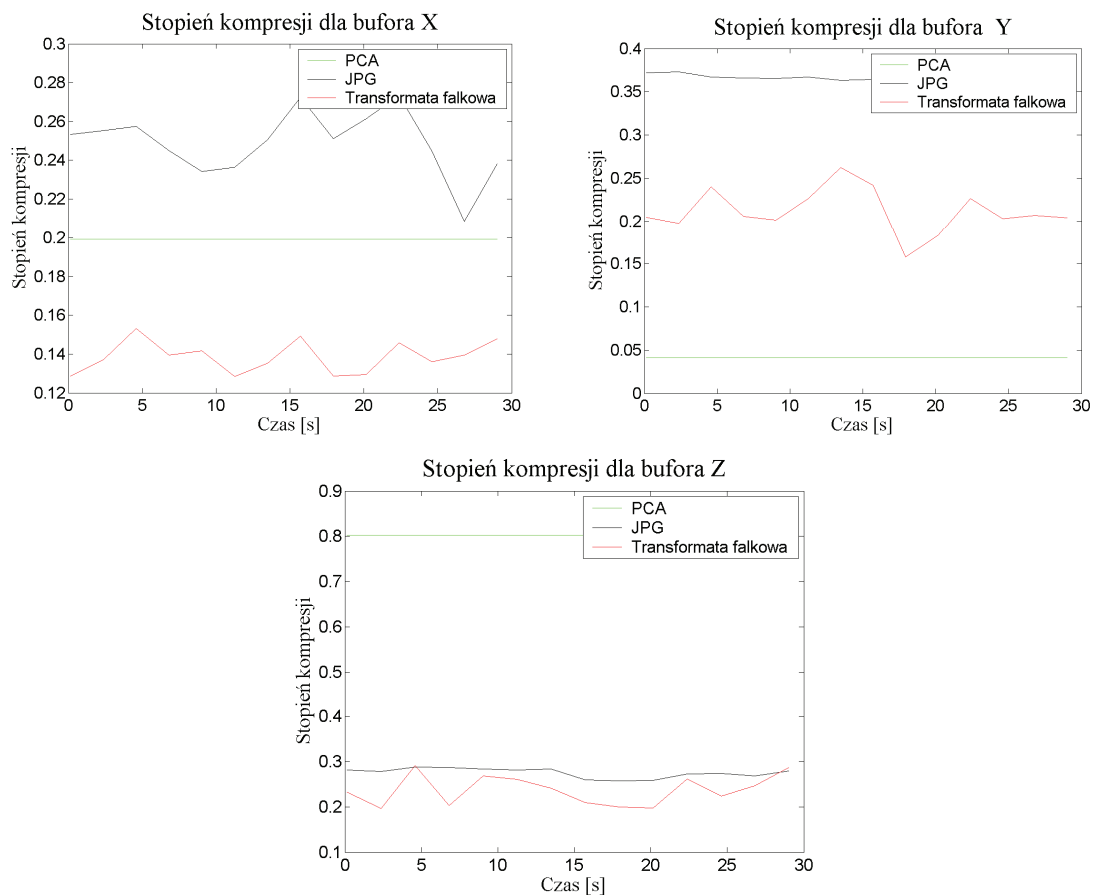
Rys. 4.22. Fragment wraku Terra - sondowanie wykonane za pomocą sonaru wielowiązkowego EM 3002

- 2) Przypadek 2 – regularne dno piaszczyste, typowe dla obszaru Zatoki Gdańskiej (rys. 4.23).



Rys. 4.23. Fragment danych reprezentujących drugi przypadek testowy - regularne dno piaszczyste

Poprzez zastosowanie proponowanego rozwiązania, zgodnie ze schematem z rys. 4.21, otrzymano wyniki zaprezentowane na rys. 4.24.

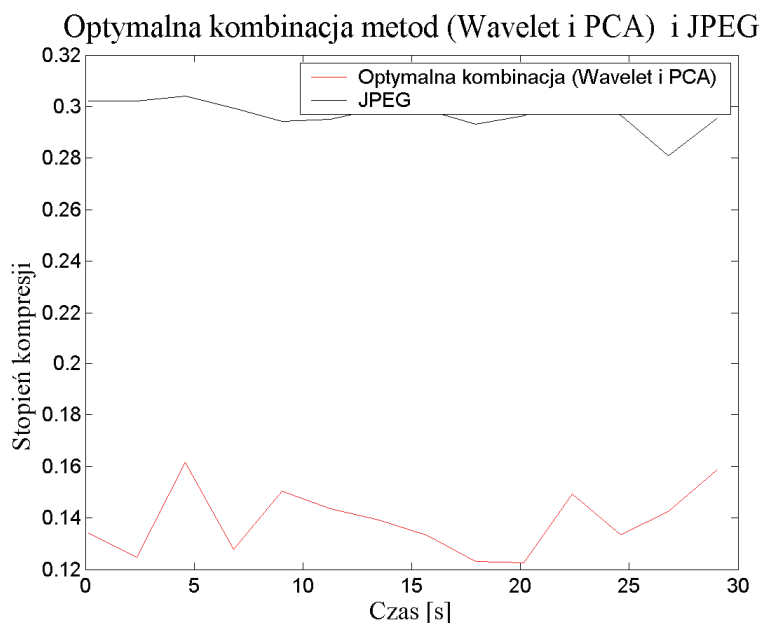


Rys. 4.24. Pierwszy przypadek testowy - wyniki kompresji danych z wykorzystaniem omawianych metod: PCA, transformaty falkowej oraz JPEG

Stopień kompresji uzyskany poprzez redukcję głównych składowych z wykorzystaniem PCA oraz poprzez zastosowanie transformaty falkowej jest lepszy niż przy zastosowaniu standardu JPEG. W przypadku bufora z danymi X pochodzącymi z 15 kolejnych sondowań najlepszy stopień kompresji, średnio 0.14, uzyskano przy zastosowaniu metod transformaty falkowej i

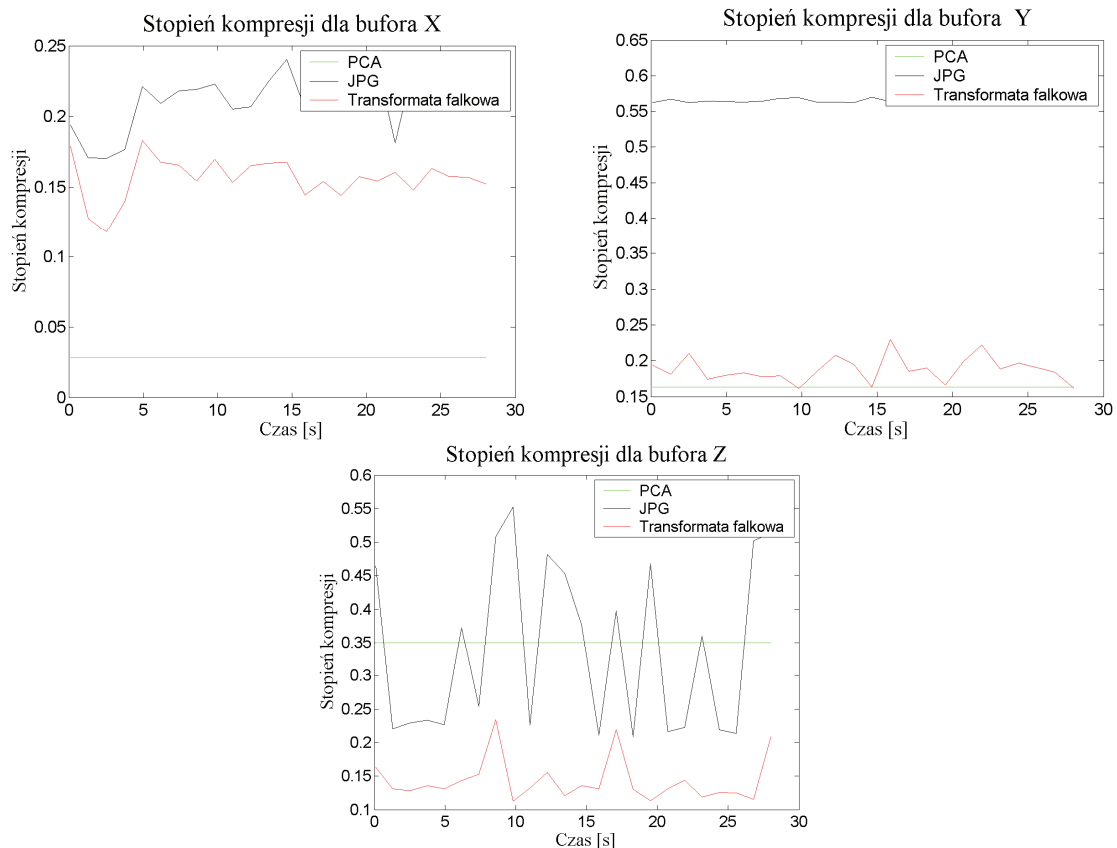
był on dwukrotnie lepszy niż przy zastosowaniu standardu JPEG. Lepsze wyniki od standardu JPEG uzyskano także poprzez zastosowanie analizy głównych składowych, gdzie stały stopień kompresji na poziomie 0.2 został uzyskany poprzez usunięcie najmniej istotnych składowych głównych. W sposób analogiczny przedstawiono wyniki dla bufora Y. W tym przypadku, najlepsze wyniki uzyskano poprzez zastosowanie analizy głównych składowych (stopień kompresji 0.04) i był on 9-krotnie lepszy niż wyniki uzyskane standardem JPEG. Zastosowanie transformaty falkowej dało średni stopień kompresji na poziomie 0.23 co daje 40% poprawę w stosunku do JPEG. Jedynie dla danych bufora Z wyniki uzyskane poprzez zastosowanie proponowanych metod są porównywalne z dotychczas istniejącymi standardami, wprowadzając nieznaczne ulepszenie rzędu 10-15% względem standardu JPEG (0.25 dla kompresji z użyciem transformaty falkowej, 0.28 z wykorzystaniem standardu JPEG).

W wyżej opisanym przypadku, oryginalna przepustowość łącza wynosiła 5.2 kB/s i za pomocą proponowanych metod została zredukowana do 0.7kB/s. Uzyskano w ten sposób średni stopień kompresji na poziomie 0.14, a optymalna kombinacja metod (PCA i transformata falkowa) dała ponadto dwukrotnie lepszy wynik względem metody JPEG (0.31 do 0.14). Przebieg wartości współczynnika kompresji w funkcji czasu z uwzględnieniem optymalnej kombinacji został przedstawiony na rys. 4.25.



Rys. 4.25. Współczynnik kompresji dla optymalnej kombinacji metod w porównaniu z wynikami uzyskiwanymi poprzez zastosowanie standardu JPEG

Analogiczne pomiary przeprowadzono dla drugiego przypadku testowego, a mianowicie dla dna o regularnej strukturze piaszczystej. Podobnie jak wcześniej, ograniczono się jedynie do pokazania wyników, składającej się z ponad 300 sondowań sonarowych, reprezentatywnej części pomiaru. Wyniki uzyskane za pomocą proponowanych metod zostały przedstawione na rys. 4.26.

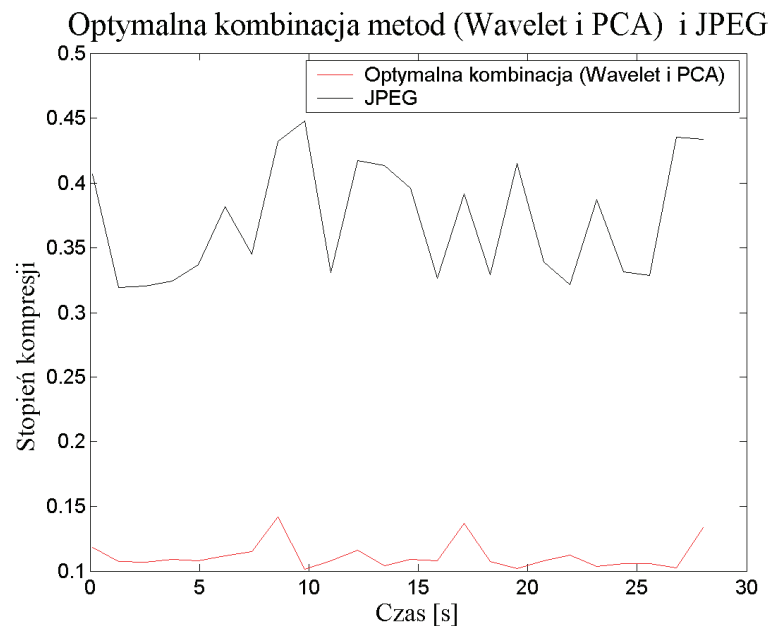


Rys. 4.26. Drugi przypadek testowy - wyniki kompresji danych z wykorzystaniem omawianych metod: PCA, transformaty falkowej oraz JPEG

Stopień kompresji uzyskiwany poprzez usunięcie najmniej istotnych składowych oraz poprzez zastosowanie transformaty falkowej jest lepszy niż przy zastosowaniu standardu JPEG. W przypadku bufora z danymi X pochodzącymi z 12 kolejnych sondowań, najlepszy stopień kompresji (0.03) uzyskano przy zastosowaniu PCA i był on ponad 5-krotnie lepszy niż przy zastosowaniu standardu JPEG. Lepsze wyniki od standardu JPEG uzyskano także poprzez zastosowanie transformaty falkowej (kompresja na poziomie 0.15). Podobnie jak dla bufora X, dla danych Y najlepsze wyniki uzyskano poprzez zastosowanie metody PCA i były one porównywalne do wyników uzyskanych za pomocą transformaty falkowej, dając zarazem trzykrotnie niższy współczynnik kompresji niż standard JPEG. Jedynie dla danych bufora Z, wyniki uzyskane metodą eliminacji składowych głównych są porównywalne ze standardem

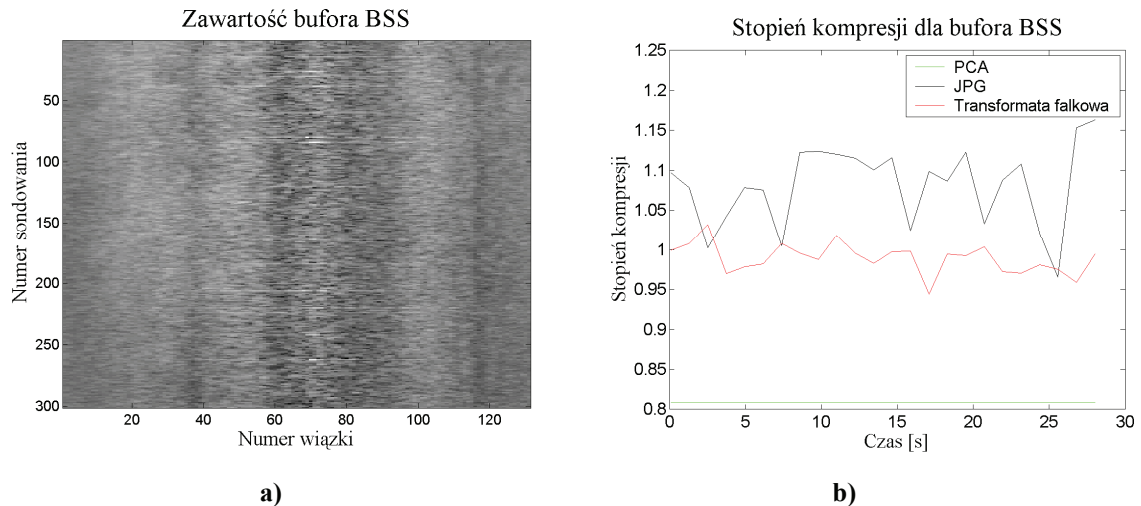
JPEG, jednak i w tym przypadku, zastosowanie transformaty falkowej dało ok. 20%-30% niższe współczynniki kompresji niż wykorzystany standard stratnej kompresji.

W wyżej wymienionym przypadku minimalna przepustowość łącza jaka była potrzebna do transferu opisanych danych wynosiła 7.6 kB/s i za pomocą proponowanych metod została zredukowana do 0.87 kB/s. Uzyskano w ten sposób średni stopień kompresji na poziomie 0.11. Optymalna kombinacja metod (PCA i transformata falkowa) dała ponadto trzykrotnie lepszy wynik względem metody JPEG (0.12 do 0.38), co zostało pokazane na rys. 4.27.



Rys. 4.27. Optymalna kombinacja metod dla trzech buforów danych oraz jej porównanie do wyników uzyskiwanych poprzez zastosowanie standardu JPEG – obliczenia przeprowadzone dla drugiego przypadku testowego

Zaprezentowane metody kompresji surowych danych batymetrycznych pochodzących z sonarów wielowiązkowych można także zastosować do przetwarzania innych rodzajów informacji, które z uwagi na swą naturę mogą zostać poddane stratnej kompresji. Przykładem mogą tu być dane o sile rozpraszania wstecznego (*ang. backscattering strength - BSS*), które są dostarczane przez system wielowiązkowy EM 3002. Dane te, podobnie jak dane o batymetrii, przesyłane są z każdym sondowaniem i mówią o właściwościach akustycznych dna morskiego. Ze względu na nieregularną strukturę, ciężko jest je poddać wydajnej kompresji za pomocą ogólnie znanych metod (rys. 4.28). Niemniej jednak, zastosowanie analizy głównych składowych pozwoliło uzyskać o 20% lepsze wyniki, niż przy wykorzystaniu standardu JPEG (rys. 4.28).



a)
Rys. 4.28. Wizualizacja danych dotyczących właściwości akustycznych badanego fragmentu dna morskiego (a) oraz wyniki uzyskane dla tych danych poprzez zastosowanie omawianych metod (b)

Zastosowanie opisanych metod kompresji surowych danych batymetrycznych pochodzących z sonaru wielowiązkowego może dać wiele korzyści w kontekście zdalnej wizualizacji danych dotyczących batymetrii dna morskiego. Niewątpliwą zaletą zaproponowanych rozwiązań jest ich lepsza wydajność w stosunku do ciągle najbardziej popularnego standardu stratnej kompresji jakim jest JPEG oraz możliwość redukcji danych do tego stopnia, iż jest możliwa ich zdalna wizualizacja poprzez zastosowanie łącz komunikacyjnych o bardzo ograniczonej przepustowości.

5. WYBRANE ZASTOSOWANIA OPRACOWANYCH METOD W ROZPROSZONYCH MORSKICH SYSTEMACH GIS

W rozdziale czwartym przedstawiono szereg metod przetwarzania i kompresji danych z systemów sonarowych, które mogą mieć zastosowanie w rozmaitych rozwiązaniach związanych ze zdalną obserwacją środowiska morskiego. Skupiono się przede wszystkim na wydajnościowym oraz jakościowym aspekcie kompresji danych sonarowych proponując szereg rozwiązań mogących usprawnić przechowywanie wyników pomiarów oraz zwiększyć efektywność samego procesu pomiarowego. W tym celu zaproponowano między innymi nowy format pliku dla danych sonarowych, który umożliwia szybką dekompresję poszczególnych fragmentów bez konieczności przetwarzania całego zestawu danych oraz zastosowano wielordzeniową architekturę kart graficznych do realizacji postulatów zawartych w tezach pracy.

W niniejszym rozdziale przedstawiono opis konkretnych rozwiązań systemowych, będących także dorobkiem autora pracy, w których opracowane wcześniej metody mogą mieć lub mają zastosowanie.

5.1. Przetwarzanie oraz wizualizacja danych dla rozproszonego morskiego systemu GIS

W toku prac nad rozprawą doktorską, jako element implementacji metod przetwarzania danych z sonaru wielowiązkowego dla potrzeb konkretnych rozwiązań systemowych, powstał nowoczesny internetowy morski system informacji geograficznej GIS. Realizacja systemu była częścią projektu badawczego o nazwie „Internetowy System Informacji Geograficznej do zdalnego monitorowania i obrazowania zanieczyszczeń oraz innych składowych ekosystemów morskich” wykonywanego w ramach grantu MNiSW 0137/R/Z/T02/06/01. Poniżej przedstawiono ogólną koncepcję systemu i architekturę zaimplementowanych rozwiązań. Z uwagi na tematykę rozprawy, skupiono się przede wszystkim na opisie algorytmów przetwarzania, integracji oraz wizualizacji danych pochodzących z systemów wielowiązkowych, niemniej jednak omawiany system ma znacznie szerszą funkcjonalność, a jej dokładny opis można znaleźć np. w [3][4][11][12][13][14] lub [44].

5.1.1 Opis systemu

W ramach prac nad systemem zastosowano rozwiązania programistyczne i technologiczne, które oferują użytkownikowi szereg funkcjonalności pomocnych i użytecznych w szeroko rozumianych badaniach związanych z telemonitoringiem obszarów morskich. Niewątpliwą zaletą opracowanego systemu jest możliwość integracji danych z różnego rodzaju sensorów i czujników środowiskowych, począwszy od echosond jednowiązkowych poprzez sonary boczne i wielowiązkowe, na zaawansowanych metodach telemonitoringu satelitarnego skończywszy. Ponadto, system wyposażony został w elastyczny moduł adaptacji danych zewnętrznych, pozwalający m. in. na integrację wyników symulacji z modelowymi algorytmami prognozowania zachowania się zanieczyszczeń na podstawie warunków hydrologicznych, meteorologicznych itp. na danym akwenie [44]. Opracowany system wymagał zastosowania zaawansowanych metod mapowania i wizualizacji danych przestrzennych.

Internetowa wersja systemu umożliwia prezentację pozyskanych informacji o środowisku morskim na mapie w trybie dwuwymiarowym. Taki sposób prezentacji nie pozwala dokonać pełnej interpretacji danych przestrzennych. W tym celu stworzony został moduł trójwymiarowej wizualizacji w postaci aplikacji samodzielnej opisany w podrozdziale 5.3 pracy. Obie aplikacje są komplementarne w stosunku do siebie i pozwalają na wymienną obróbkę danych. Przykładem może tu być możliwość wysyłania danych uzyskanych w ramach rejsu badawczego do serwera aplikacji sieciowej, gdzie zostają one automatycznie przetworzone i poddane wizualizacji. Następnym krokiem może być wybranie i przekazanie najbardziej interesujących danych do aplikacji samodzielnej, gdzie, przedstawione w formie trójwymiarowych brył na tle map wysokościowych i zdjęć satelitarnych, będą gotowe do dalszej obróbki.

Stworzony system jest przeznaczony do wykorzystania zarówno przez jednostki naukowo-badawcze zajmujące się zbieraniem i obróbką pochodzących z różnego rodzaju sensorów danych przestrzennych, w szczególności sensorów hydroakustycznych, jak również przez przedsiębiorców prywatnych zajmujących się inspekcją obszarów morskich oraz tworzeniem map dna morskiego

Funkcjonalność systemu obejmuje następujące możliwości, typowe dla GIS [62]:

- podstawowe narzędzia do obsługi prezentacji map, jak zmiana skali i wybór przedstawianego obszaru;

- warstwowy charakter przetwarzanych i obrazowanych danych; każda warstwa zawiera obiekty innego typu, jak linie brzegowe, izobaty, porty oraz skupiska zanieczyszczeń;
- wygodny, intuicyjny dostęp do większości funkcji, np. automatyczne wyświetlanie zawartych w bazie danych informacji o obiekcie wskazanym na mapie;
- możliwość tworzenia dwuwymiarowych i trójwymiarowych widoków i map tematycznych;
- import danych zapisanych w ogólnodostępnych formatach ESRI takich jak *.lyr, *.shp, *.tff, *.aux, *.rrd i inne;
- eksport danych przestrzennych.

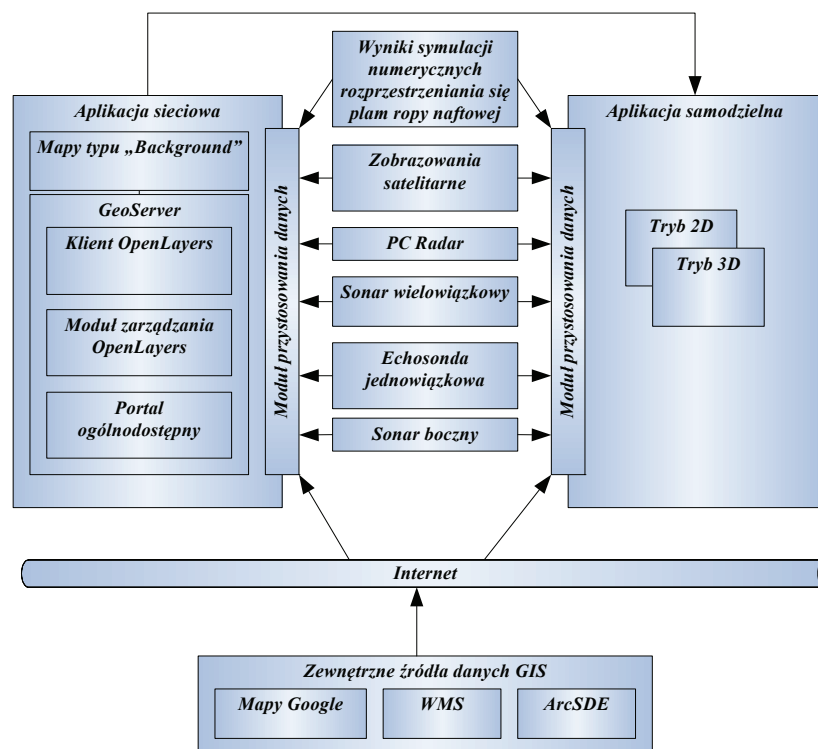
System ponadto obsługuje dwa podstawowe typy warstw:

- warstwy statyczne, które na ogół nie ulegają zmianom podczas pojedynczej sesji pracy z systemem, jak np. linie brzegowe, dane batymetryczne itp.,
- warstwy dynamiczne zawierające informacje zmieniające się w czasie, które mogą być przesyłane do programu podczas pracy systemu. Wśród nich można wymienić dane takie jak: wyniki symulacji rozprzestrzeniania się plam ropy, dane z radaru oraz inne.

W architekturze systemu, przedstawionej na rys. 5.1 zostały wyróżnione dwa główne moduły:

- moduł udostępniania danych poprzez sieć Internet (wersja sieciowa),
- aplikacja samodzielna, oparta na technologii ArcGIS Engine.

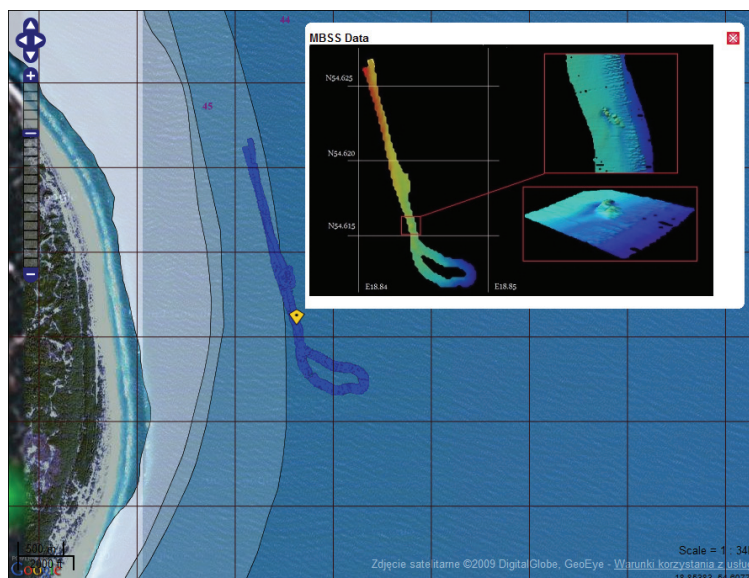
Centralną częścią systemu jest serwer map oparty o technologię GeoServer [28] umożliwiający wszystkim użytkownikom prezentację, dostęp, usuwanie oraz dodawanie przechowywanych danych. Aplikacja samodzielna, która może być zainstalowana na dowolnym komputerze klasy PC, oferuje dodatkowe możliwości wizualizacji 3^D, która szczególnie przydatna jest w przypadku analizy danych pochodzących z sensorów hydroakustycznych. Aby umożliwić użytkownikowi import danych do systemu, konieczne było opracowanie szeregu interfejsów dla danych pochodzących z różnych sensorów środowiskowych, takich jak echosondy jednowiązkowe, sonary boczne czy sonary wielowiązkowe. Interfejsy te zostały skonstruowane w języku JAVA i w oparciu o charakterystykę i formaty otrzymywanych danych, umożliwiając analizę i wizualizację różnych komponentów środowiska morskiego.



Rys. 5.1. Architektura morskiego systemu informacji przestrzennej.

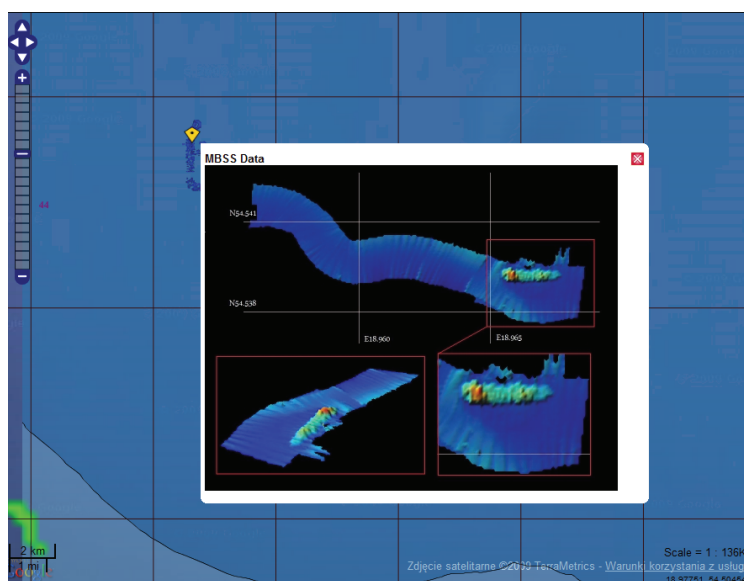
5.1.2 Wizualizacja danych z sonaru wielowiązkowego

Rys. 5.2 przedstawia wynik działania algorytmu wizualizacji danych pomiarowych pochodzących z sonaru wielowiązkowego w sieciowej wersji opracowanego systemu GIS. Główne okno mapy prezentuje przebieg transektu przeszukiwań akustycznych, wzdłuż którego były zbierane dane. Po wybraniu widocznego punktu (tzw. markera) możliwe jest wyświetlenie dodatkowego okna, przedstawiającego w bardziej szczegółowy lub alternatywny sposób zarejestrowane dane. Sposób ten zależny jest od rodzaju danych. W poniższym przypadku przedstawiony jest jeszcze raz przebieg transektu z zaznaczeniem za pomocą koloru bieżącej głębokości dna, oraz, po prawej stronie, trójwymiarowa wizualizacja wybranych fragmentów powierzchni dna badanej sonarem wielowiązkowym. Dla celów tej wizualizacji wykorzystane zostały opracowane algorytmy rekonstrukcji trójwymiarowego kształtu dna bądź obiektów podwodnych na podstawie ech z sonaru wielowiązkowego [12].



Rys. 5.2. Wizualizacja danych z sonaru wielowiązkowego prezentująca technikę prezentacji wyników przeszukiwań akustycznych w kontekście geograficznym

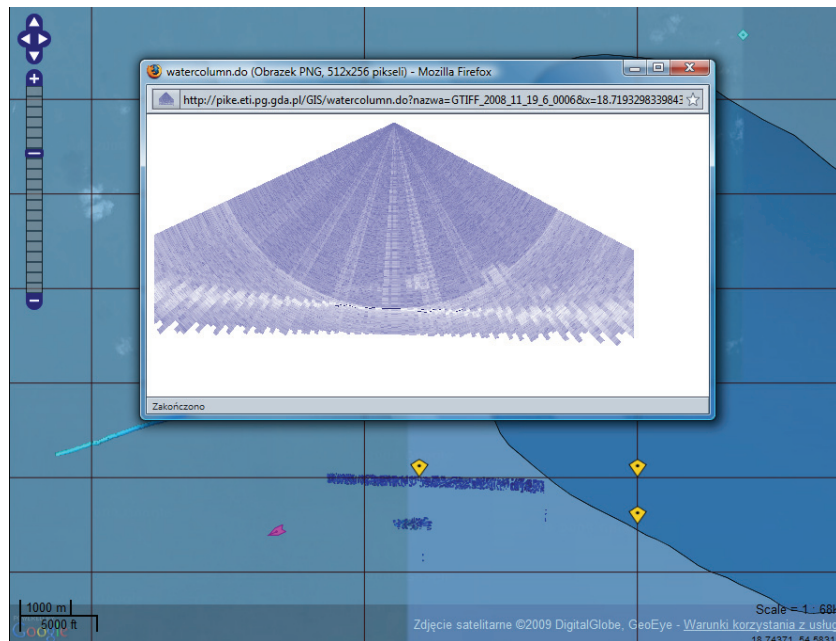
Analogicznie, na rys. 5.3, przedstawiono dane pochodzące z sondowania nad wrakiem transportowca Franken zatopionego w pobliżu Helu na głębokości 70 metrów.



Rys. 5.3. Wizualizacja danych z sonaru wielowiązkowego prezentująca dno morskie przeszukiwanego obszaru oraz znajdujące się na nim obiekty

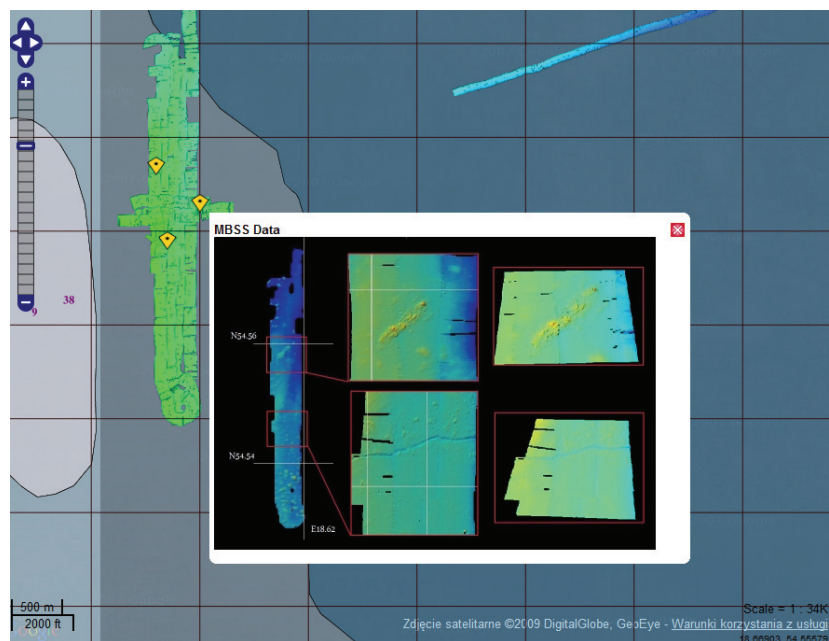
Z kolei rys. 5.4 przedstawia wynik wizualizacji pionowego przekroju akustycznego toni wodnej otrzymanej na podstawie sondowań akustycznych wykonanych z użyciem sonaru wielowiązkowego pracującego w trybie rejestracji zapisów akustycznych zobrazowań toni wodnej. Jest to przykład funkcjonalności systemu pozwalającej użytkownikowi na dostęp do pełnych danych z zapisów dokonanych sonarem wielowiązkowym, a nie tylko do informacji na temat batymetrii dna będącej rezultatem ich przetworzenia. Omawiane zobrazowania

akustyczne tony wodnej mogą zawierać użyteczne informacje na temat różnego rodzaju zjawisk jak np. widoczne na rys. 5.4 ławice ryb (jaśniejsze plamy) czy znajdujące się na większych głębokościach skupiska zanieczyszczeń.



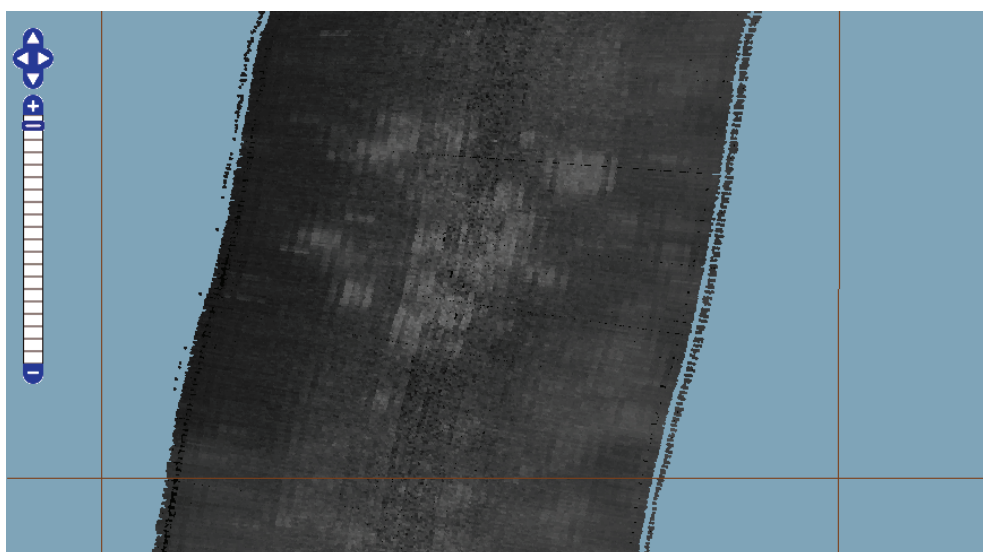
Rys. 5.4. Przykład wizualizacji pionowego przekroju akustycznego toni wodnej otrzymany na podstawie pojedynczego sondowania akustycznego sonarem wielowiązkowym. Widoczne jaśniejsze obszary przedstawiają ławice ryb.

Rys. 5.5 przedstawia zaś wizualizację dna morskiego Zatoki Gdańskiej w rejonie zatopienia statku Stuttgart na głębokości 21 metrów w pobliżu głównego wejścia do portu w Gdyni. Sondowane miejsce zawiera, zgodnie z przypuszczeniami naukowców, przydenną warstwę zanieczyszczenia ropopochodnego – mazutu.

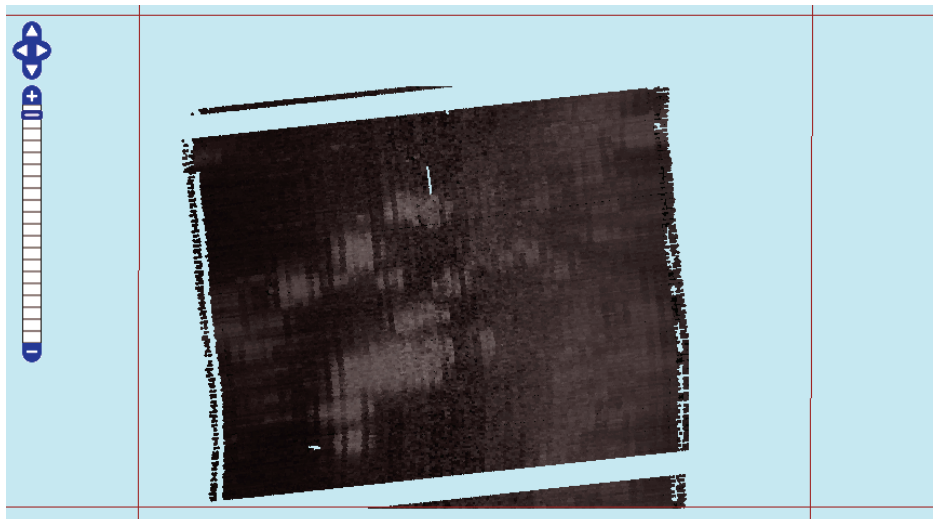


Rys. 5.5. Wizualizacja danych z sonaru wielowiązkowego prezentująca obszar „podejrzany” o istnienie zanieczyszczeń ropopochodnych (obecność mazutu)

Dla celów dokładniejszej analizy omawianego fragmentu dna morskiego opracowane metody przetwarzania danych umożliwiają także pomiary siły rozpraszania wstecznego oraz jej wizualizację w formie zgeoreferencjonowanych map akustycznych dna. Na rys. 5.6 oraz rys. 5.7 zaprezentowano wynik przetwarzania danych z takiego pomiaru. W obrębie wraku, a właściwie jego pozostałości, pomimo nie najlepszej jakości wizualizacji w tym przypadku, widoczne są odmienne w stosunku do otoczenia właściwości rozpraszania wstecznego dla badanego obszaru (jaśniejsze plamy) wynikające z istnienia w nim zanieczyszczeń.



Rys. 5.6. Wizualizacja wyników pomiarów akustycznych rejonu wraku Stuttgart – poziom szarości odpowiada sile rozpraszania wstecznego sygnału akustycznego.



Rys. 5.7. Wizualizacja wyników działania algorytmu przetwarzania sygnałów akustycznych ech od dna - zanieczyszczenia ropopochodne

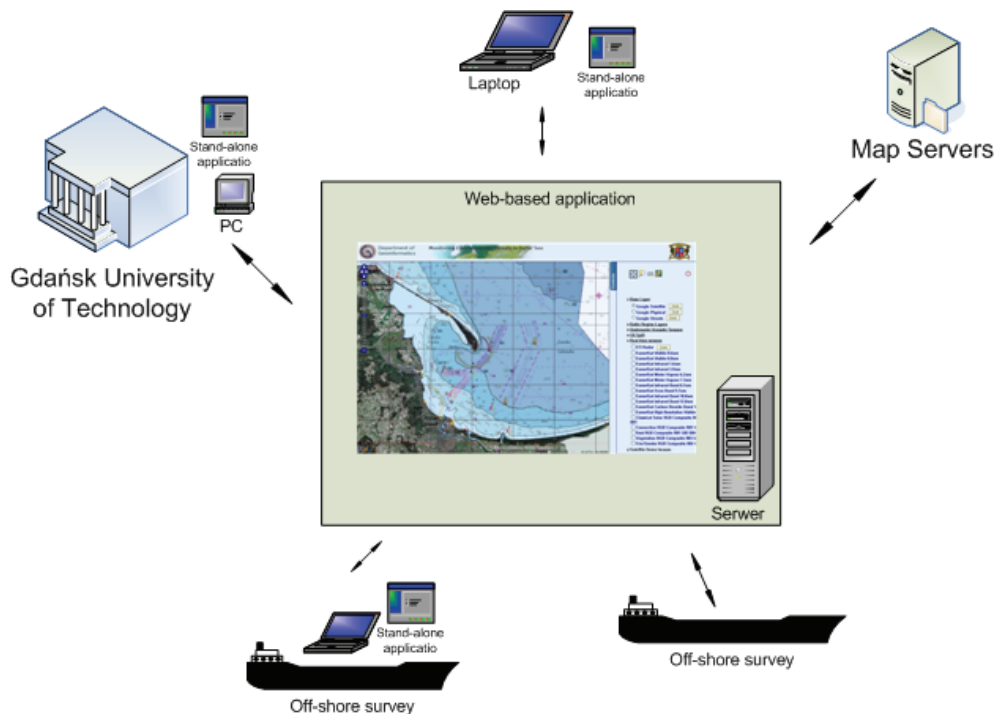
5.1.3 Integracja danych w opracowanym systemie

Zbieranie danych o charakterze akustycznym jest złożonym zadaniem, które składa się nie tylko z samego procesu akwizycji informacji pomiarowej, ale także z jej wstępnej analizy, walidacji oraz interpretacji. Istotnym zagadnieniem w środowiskowych pracach badawczych jest szybkie przetworzenie oraz rozpowszechnienie wyników wykonanych pomiarów, tak aby inne osoby zainteresowane wynikami prac mogły relatywnie szybko mieć do nich dostęp [12]. Z tego powodu, w toku prac nad realizacją opisanego projektu badawczego, stworzono platformę integracji danych o środowisku morskim o roboczej nazwie „GIS Integration Framework” (GIS-IF), której zadaniem jest archiwizacja, przechowywanie oraz udostępnianie użytkownikom systemu danych będących wynikami rejsów badawczych. W projekcie zdecydowano się opracować osobny moduł, który pozwoli wyodrębnić z systemu większość funkcjonalności dotyczących danych zachowując jednocześnie spójność i wygodę korzystania z aplikacji. Moduł ten otrzymał roboczą nazwę „GIS Integration Framework” (GIS-IF), a jego najważniejsze cechy to :

- zapewnienie jednego, scentralizowanego miejsca na magazynowanie danych i informacji o nich,
- hierarchiczne uporządkowanie danych. Struktura danych ma formę drzewiastą, gdzie dane o podobnym charakterze są zebrane w grupach, będących tym samym węzłem w drzewie. Taki sposób uporządkowania danych ułatwia ich wyszukiwanie, zapewnia spójność i pozwala na stworzenie wygodnego interfejsu dostępu do danych,

- uniwersalny mechanizm umieszczania danych w systemie, wymagający jedynie połączenia internetowego,
- automatyzacja procesów przetwarzania danych po stronie serwera

Schemat funkcjonalny systemu został przedstawiony na rys. 5.8.



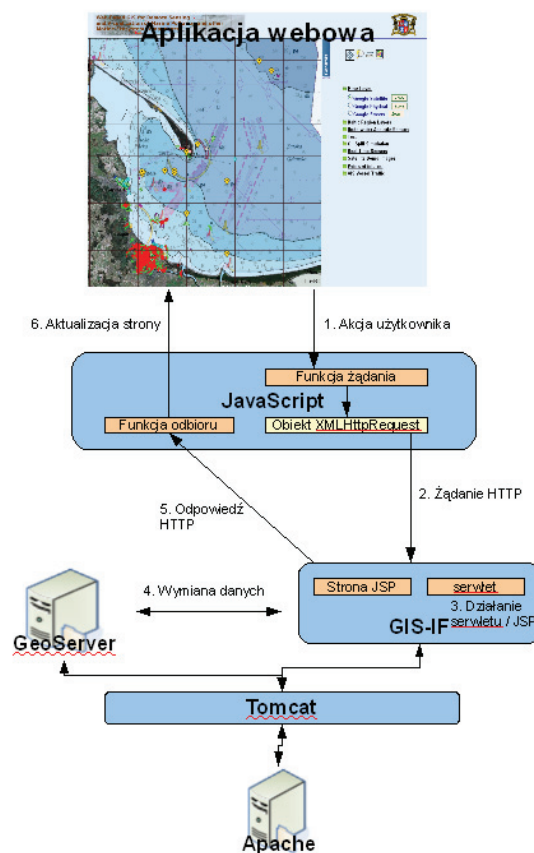
Rys. 5.8. Schemat funkcjonalny modułu GIS-IF

Od strony technicznej GIS-IF bazuje na rozwiązaniach opartych na technologii JEE (ang. *Java Enterprise Edition*) [61] oraz języku JavaScript, a w szczególności związanej z nim technologii AJAX (ang. *Asynchronous JavaScript and XML*) [26]. Od strony serwera za obsługę żądań odpowiedzialny jest kontener „Tomcat” [35] (rys. 5.9), na którym funkcjonuje zestaw serwletów oraz stron JSP (ang. *Java Server Pages*) obsługujących żądania klienta i generujących odpowiedzi. Serwlety zostały napisane w języku Java, natomiast strony JSP przy użyciu języka wyrażeń EL (ang. *Expression Language*) oraz biblioteki JSTL (ang. *Java Standard Tag Library*) będących częścią specyfikacji JEE.

Klient, czyli przeglądarka internetowa, komunikuje się z serwerem poprzez wysyłanie odpowiednich żądań do stron JSP i serwletów przy użyciu opartej o JavaScript technologii AJAX. Z punktu widzenia użytkownika systemu działanie to nie różni się niczym od zwykłego przeglądania stron, obsługi dostępnych przycisków oraz obsługi mapy. Zaletą wykorzystanego rozwiązania jest natomiast fakt, iż żądania są wywoływane asynchronicznie, a więc nie wymagają przeładowania całej strony przeglądarki. Uzyskana odpowiedź jest przechwytywana przez odpowiednie funkcje języka JavaScript (funkcje odbioru związane z

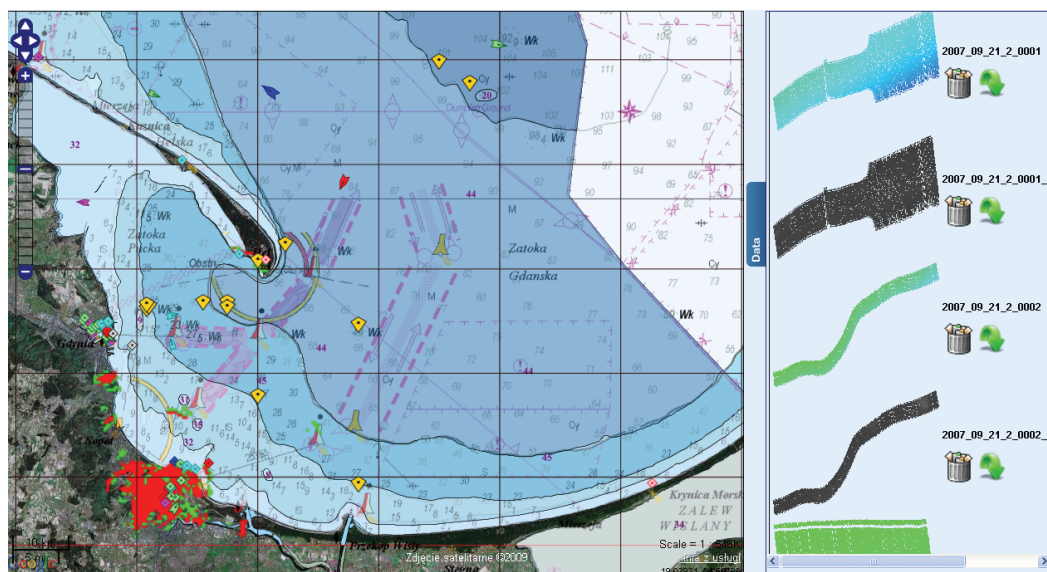
żądaniem w momencie jego wysłania), które wykorzystują ją do aktualizacji elementów strony. Rozwiązanie tego typu pozwala na dużą wygodę pracy z aplikacją, sprawia że czasochłonne zadania (np. umieszczenie danych na serwerze) są wykonywane w tle umożliwiając dalszą pracę z aplikacją w czasie ich obsługi. Dodatkowo możliwe jest umieszczanie elementów dynamicznych, takich jak pasek obrazujący postęp procesu umieszczania pliku na serwerze.

Technologia AJAX jest obecnie jedną z najczęściej stosowanych form komunikacji w architekturze klient-serwer. Jej prostota w użyciu oraz duże możliwości jakie daje, sprawiają że narzędzie to bardzo dobrze sprawdza się w przypadku internetowych systemów GIS.



Rys. 5.9. Diagram prezentujący zasadę działania modułu GIS-IF opartego o technologię AJAX

Opisane powyżej cechy zapewniają spójność danych, wygodę ich udostępniania, łatwość pracy z systemem, możliwość efektywnej pracy zespołowej i szybkiego dostępu do nowo dodanych danych. Rys. 5.10 przedstawia zrzut z ekranu podczas działania platformy GIS-IF. Po lewej stronie widoczne jest główne okno mapy systemu, natomiast po prawej – elementy sterujące (widoczne w postaci miniatur obrazów prezentujących wynik pomiaru) pozwalające na zarządzanie warstwami udostępnianymi przez system, np. dodanie nowej warstwy, usunięcie itp.



Rys. 5.10. GIS-IF - implementacja modułu w przeglądarce sieciowej

5.2. Trójwymiarowa wizualizacja danych pochodzących z systemów wielowiązkowych dla systemu GIS

Internetowa wersja systemu umożliwia prezentację pozyskanych informacji o środowisku morskim na mapie dwuwymiarowej. Z kolei dane pochodzące z niektórych rodzajów sensorów są przestrzenne w swojej naturze – i jedynie trójwymiarowa wizualizacja pozwala dokonać ich pełnej interpretacji.

W chwili obecnej na rynku dostępnych jest kilka technologii tworzenia grafiki trójwymiarowej w obrębie przeglądarki internetowej [39][48]. Ze względu na ich ograniczenia funkcjonalne i licencyjne postanowiono stworzyć oprogramowanie komplementarne do internetowej części systemu – w postaci aplikacji dla środowiska Microsoft Windows. Bazową technologią wytwarzania aplikacji samodzielnej 3^D był zestaw bibliotek ArcGIS Engine stanowiący część pakietu ArcGIS [21], który umożliwił stworzenie aplikacji zawierającej komponenty do wizualizacji danych geograficznych w formie mapy lub sceny trójwymiarowej.

5.2.1 Opis aplikacji

Jedną z podstawowych cech pakietu ArcGIS Engine SDK, które zdecydowały o jego wyborze jako środowiska realizacji aplikacji samodzielnej jest to, że zapewnia on obsługę wielu standardów rozproszonej dystrybucji danych geograficznych, takich jak SDE [21] czy WMS [60], przy czym przez obsługę rozumie się zarówno pobieranie tych danych,

udostępnianie oraz ich graficzną prezentację. Jednocześnie możliwe jest stworzenie własnych typów warstw, których sposób wyświetlania może być w całości oprogramowany przez użytkownika. Stworzona w ramach prac nad projektem aplikacja wyświetla dane z obsługiwanych sensorów hydroakustycznych o środowisku morskim z użyciem technologii OpenGL, natomiast dane geograficzne (rastrowe, wektorowe) może pobierać z użyciem protokołu SDE. Od strony użytkowej aplikacja zapewnia typową funkcjonalność GIS, obejmującą takie funkcje jak dodawanie, modyfikacja i usuwanie warstw oraz ich prezentację przy umożliwieniu swobodnego ruchu kamery.

5.2.2 Obiektowy model przetwarzania danych

Wizualizacja większości obsługiwanych typów danych pochodzących z sonarów wymaga przetworzenia plików źródłowych do postaci obsługiwanej przez API mechanizmu wyświetlania scen trójwymiarowych (w tym wypadku OpenGL) - czy też przetworzenia danych o położeniu obiektów do układu współrzędnych wykorzystywanego w aplikacji 3^D.

Jednocześnie, ze względu na wymagania projektowe, potrzebny był model obiektowy, który pozwalałby na przejrzyste rozszerzanie funkcjonalności aplikacji o nowe typy danych. Opracowany obiektowy model danych pozwala na:

- zapisanie bieżącego stanu warstwy opisującego parametry wizualizacji w pliku XML,
- proste odtworzenie wszystkich danych o warstwie przy odczycie pliku,
- łatwe dodawanie nowych rodzajów warstw rysowanych przy użyciu OpenGL,
- integrację z modułami ARCGIS: GlobeControl, MapControl i TOCControl [21],
- implementację mechanizmu przechowującego przetworzoną postać danych (przede wszystkim tekstur) redukującego czas ładowania warstw.

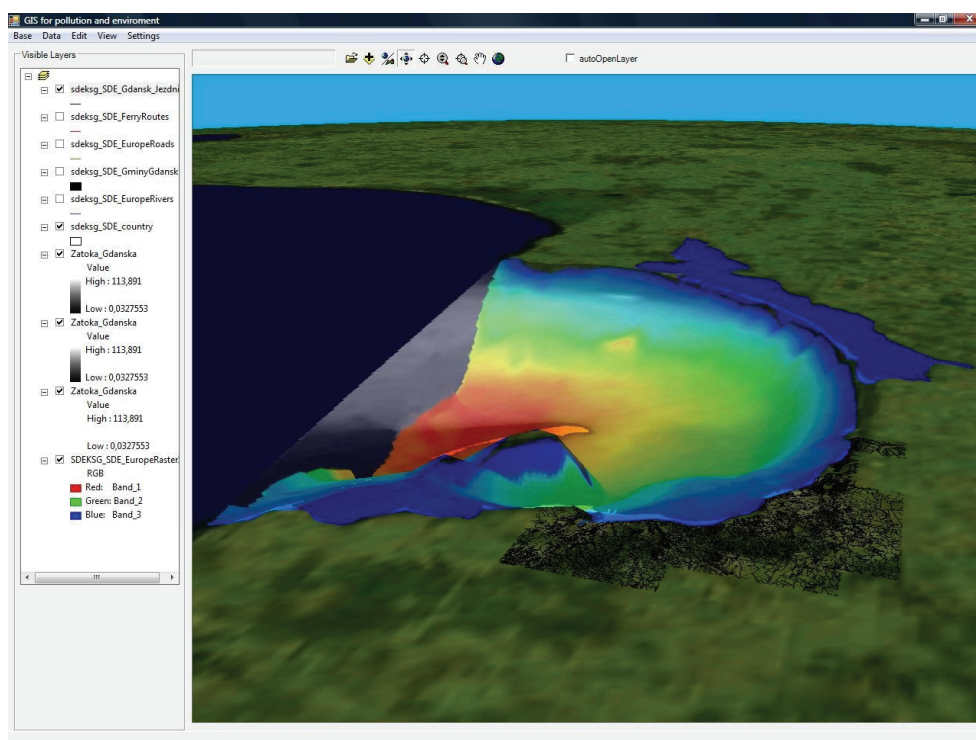
5.2.3 Obsługa i wizualizacja danych geograficznych

Podstawową funkcją stworzonej aplikacji samodzielnej jest zaawansowana trójwymiarowa wizualizacja danych pochodzących z różnych sensorów. Dane takie można prezentować w oderwaniu od ich położenia geograficznego (np. zawieszane w próżni punkty z batymetrii, czy przekroje kolumny wody), ale uniemożliwia to zarówno weryfikację tych danych, jak i ich analizę, zwłaszcza w kontekście monitorowania zanieczyszczeń morskich.

Pakiet ArcGIS zapewnia obsługę typowych mechanizmów sieciowej dystrybucji danych geograficznych. Zaznaczyć tu jednak należy, że z punktu widzenia użytkownika końcowego obsługa pojedynczych warstw byłaby bardzo uciążliwa i dla umożliwienia

efektywnej pracy konieczne było stworzenie mechanizmu integrującego dane geograficzne w formie widoków – zestawów kilku warstw stanowiących spójne tło dla prezentacji danych z sensorów.

W aplikacji samodzielnej zaimplementowano klasy obiektów reprezentujących podstawowe typy danych udostępnianych przez serwer SDE: rastrowych (zdjęć/map terenu oraz informacji o wysokości) oraz wektorowych (*polygon*, *line*, *point*). Pozwala to na określanie parametrów wyświetlania warstw z poziomu aplikacji oraz zapisanie tych parametrów w wewnętrznej formie danych w celu szybkiej generacji widoków. Na rys. 5.11 oraz 5.12 przedstawiono przykładowe widoki do prezentacji danych w obrębie Zatoki Gdańskiej (dla lepszego efektu wizualnego głębokość przedstawiona została ze współczynnikiem skali wynoszącym 20).

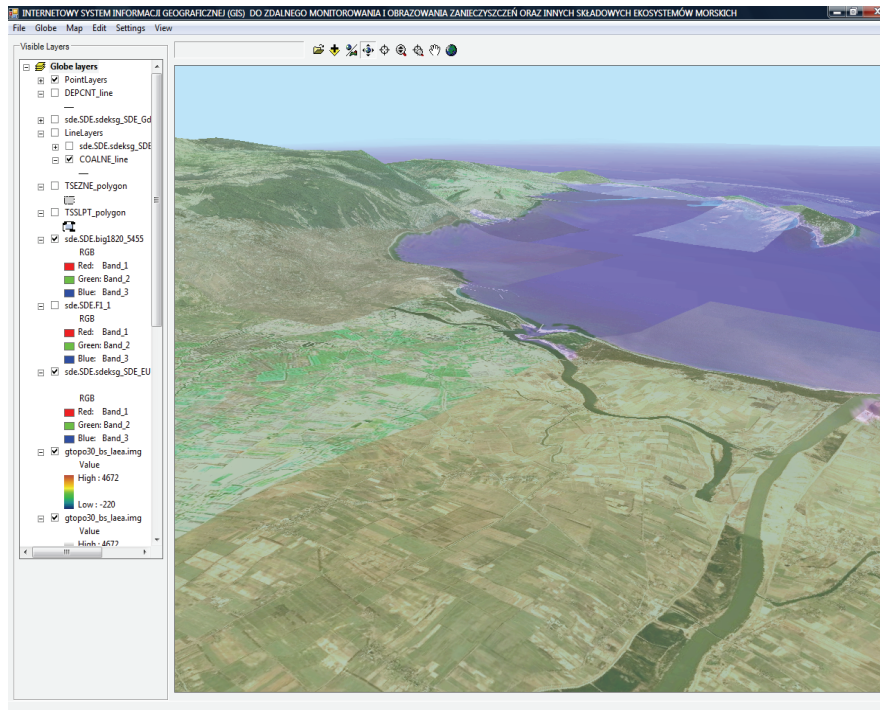


Rys. 5.11. Wizualizacja batymetrii Zatoki Gdańskiej wraz z nałożonym zdjęciami satelitarnymi

Pakiet ArcGIS umożliwia uzupełnienie generowanej przez niego trójwymiarowej sceny o własne elementy rysowane przy użyciu powszechnie stosowanej technologii do wytwarzania grafiki 3^D - OpenGL. Aby usprawnić tworzenie metod wizualizujących konkretne rodzaje danych stworzono zestaw narzędzi programistycznych, umożliwiających między innymi:

- utworzenie tekstury OpenGL na podstawie typowych formatów plików graficznych,
- obsługę przezroczystości w teksturach OpenGL,

- efektywną obsługę dużych (kilkanaście-kilkadziesiąt tysięcy) zbiorów punktów,
- przekształcenia współrzędnych pomiędzy różnymi projekcjami geograficznymi,
- obsługę kamery (m. in. przestawianie, rysowanie "billboardów"),
- tworzenie tekstur zawierających określoną czcionkę i rysowanie napisów.



Rys. 5.12. Wizualizacja danych z geobazy SDE w aplikacji samodzielnej – widok na Zatokę Gdańską

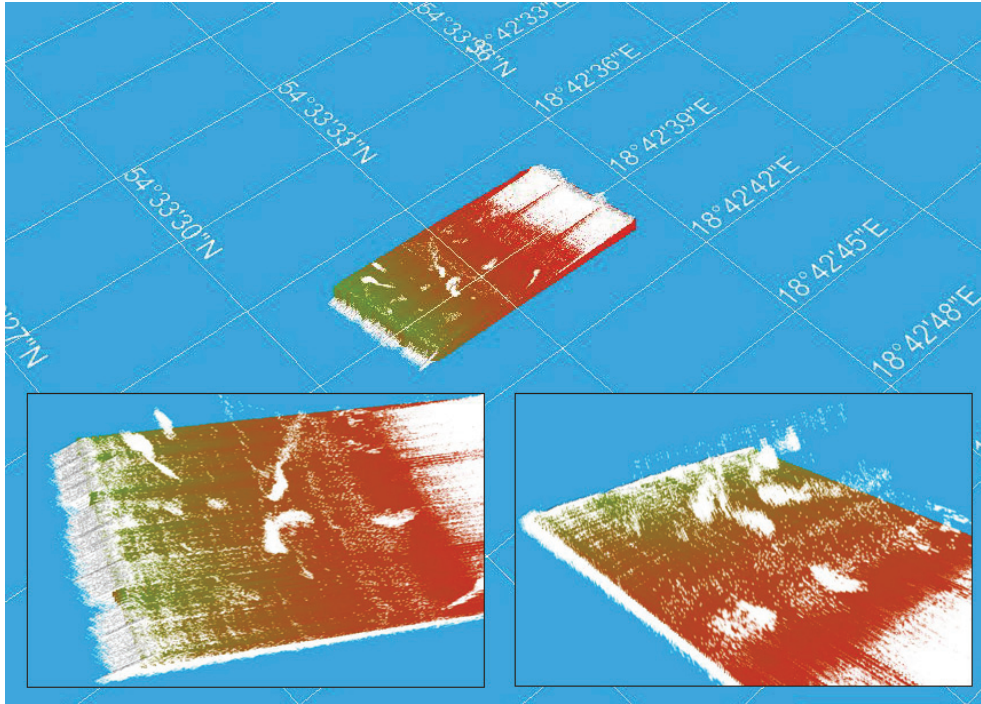
5.2.4 Obsługiwane typy danych przestrzennych

W kontekście danych o charakterze hydroakustycznym, aplikacja samodzielna obsługuje te same formaty danych co wersja internetowa. Dane pochodzące z echosondy jednowiązkowej prezentowane są w formie trójwymiarowego śladu - tekstury nałożonej na szereg połączonych ze sobą prostokątów. Tekstura ta generowana jest przez opracowane w ramach prac badawczych narzędzia programistyczne, natomiast położenie prostokątów określone jest przez ślad GPS generowany na podstawie danych z echosondy.

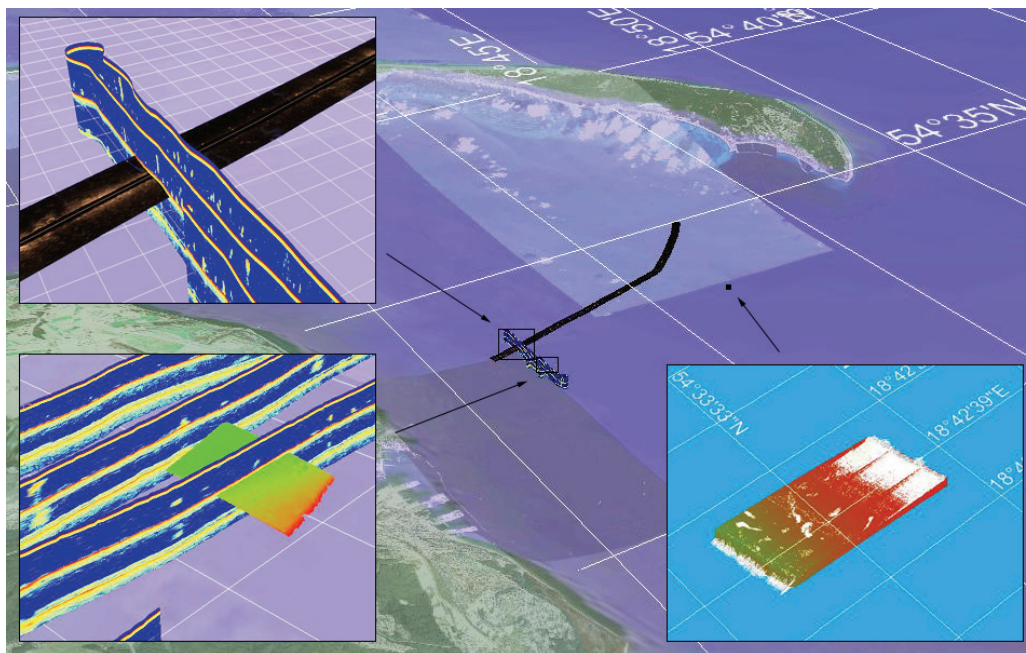
Dane pochodzące z sonaru bocznego prezentowane są w podobny sposób co dane z echosondy, przy czym w tym wypadku, konieczne jest zastosowanie innej metody generowania współrzędnych wstawianych prostokątów tak, aby tekstura umieszczona została "poziomo", w sposób odpowiadający faktycznemu obrazowi dna. Dane o pozycji geograficznej oraz głębokości obrazu pochodzą z pliku źródłowego.

Najbardziej złożonym rodzajem danych prezentowanym w aplikacji samodzielnej są dane pochodzące z sonaru wielowiązkowego. Wykorzystanie środowiska trójwymiarowego pozwoliło na stworzenie mechanizmu obserwacji całych przekrojów toni wodnej, co pozwala

na obserwację różnych obiektów podwodnych rozpraszających fale akustyczną, takich jak skupiska ryb pelagicznych. Same dane batymetryczne pochodzące z MBS mogą być prezentowane w formie punktów kolorowanych zgodnie z ich wysokością (śledzenie wysokości dna) lub w zależności od siły rozpraszania wstecznego sygnału. Kilka zrzutów ekranu pochodzących z jednej wizualizacji zaprezentowano na rys. 5.13 oraz rys. 5.14.



Rys. 5.13. Wizualizacja danych otrzymanych z sonaru wielowiązkowego EM 3002. Za pomocą koloru białego wyeksponowano i zaznaczono echa od ryb pelagicznych. Kolorem czerwonym i zielonym zaznaczono batymetrię badanego obszaru



Rys. 5.14. Trójwymiarowa wizualizacja danych pochodzących z różnych sensorów hydroakustycznych (echosondy jednowiązkowej, sonaru bocznego oraz sonaru wielowiązkowego) oraz ich integracja w jednym oknie.

Stworzona w ramach prac aplikacja samodzielna stanowi cenne uzupełnienie całości systemu. Opracowane oprogramowanie zostało zaimplementowane w języku C# z użyciem platformy .NET oraz biblioteki ArcGIS Engine, która jest interfejsem programistycznym (API) przeznaczonym do operowania na danych przestrzennych udostępnianym w formie obiektów COM, .NET, Java i C. ArcGIS Engine jest międzyjęzykową platformą dostarczającą funkcjonalność obiektów ArcObjects, z których zbudowane są produkty z rodziny ArcGIS Desktop, zawierającą szereg komponentów ułatwiających tworzenie dedykowanych aplikacji GIS. Ponadto, ArcGIS Engine jest narzędziem wspomagającym budowanie lub rozwijanie aplikacji geoinformatycznych dostarczającym wyspecjalizowanych rozwiązań zarówno dla projektantów jak i użytkowników systemów GIS. Jego ważną cechą jest możliwość tworzenia aplikacji, w której moduł wizualizacji nie jest centralnym modułem, a jedynie jego częścią. To sprawia, że ArcGIS Engine jest on szczególnie przydatny przy tworzeniu rozwiązań nietypowych, do których niewątpliwie zalicza się systemy przeznaczone do zdalnego telemonitoringu morskiego.

5.3. Zastosowanie kompresji metodą PCA do zdalnej wizualizacji danych sonarowych

W kontekście rozproszonych systemów GIS, w których akwizycja, przetwarzanie oraz składowanie danych przestrzennych odbywa się w fizycznie różnych miejscach, niezwykle

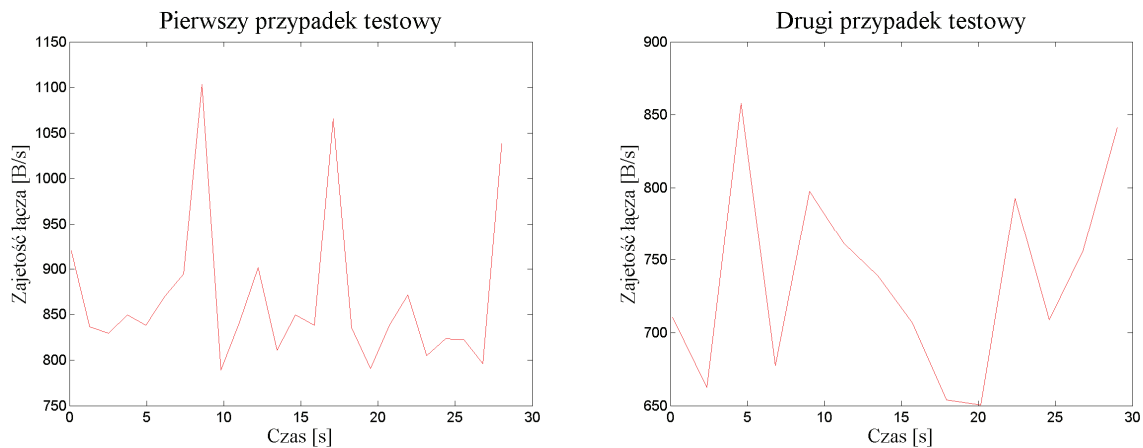
istotną rolę pełnią metody efektywnego przetwarzania danych. Możliwość zdalnej wizualizacji wyników pomiarów w czasie rzeczywistym pozwala na dokonanie szybkiej weryfikacji poprawności wykonywanych działań oraz zmniejsza koszty prac o charakterze komercyjnym. W powyższym kontekście, istotny jest rozwój metod wydajnego przetwarzania otrzymywanej podczas pomiarów informacji, które umożliwiłyby redukcję danych do tego stopnia, aby możliwym było ich przesłanie za pomocą łącz bezprzewodowych o bardzo niskiej przepustowości np. w celu ich zdalnej wizualizacji.

Przykładem może tu być sytuacja, w której wykonywane są badania dna z wykorzystaniem systemów wielowiązkowych na dużej głębokości. W takim przypadku, głowica sonaru umieszczana jest zazwyczaj nie na statku badawczym, ale na specjalnym pojeździe podwodnym ROV, który może schodzić na głębokości poniżej 3000 metrów pod poziomem morza. Obecnie pojazdy te, aby móc na bieżąco przesyłać wyniki pomiaru, podłączone są za pomocą kabla do pływającej stacji badawczej, co powoduje duże utrudnienia podczas badań dna na dużej głębokości.

Poprzez zastosowanie odpowiednich metod przetwarzania i kompresji można zredukować przepustowość łącza danych pomiędzy głowicą sonaru a stacją badawczą do tego stopnia, iż stosowanie fizycznej łączności nie będzie konieczne, a sama praca z sonarem będzie mogła odbywać się poprzez zastosowanie tzw. autonomicznych pojazdów podwodnych (AUV), które mogą być sterowane zdalnie i nie wymagają połączenia ze stacją badawczą znajdującą się na powierzchni. W takim przypadku, przesyłanie informacji batymetrycznej dotyczącej badanego obszaru może odbywać się poprzez zastosowanie modemów akustycznych, które pozwalają na transmisję danych z wykorzystaniem ośrodka wodnego jako medium transmisyjnego. Urządzenia te charakteryzują się relatywnie niską przepustowością na poziomie od 4800 bitów/s do 19200 bitów/s. W praktyce oznacza to, iż bez zastosowania dedykowanych metod przetwarzania, przesyłanie danych sonarowych z wykorzystaniem tych urządzeń jest praktycznie niemożliwe. W rozdziale 4.4 opisane zostały metody oparte o analizę głównych składowych oraz transformatę falkową, które umożliwiają znaczne obniżenie wielkości strumienia przesyłanych danych na przykładzie przypadków testowych zdefiniowanych dla sonaru EM 3002.

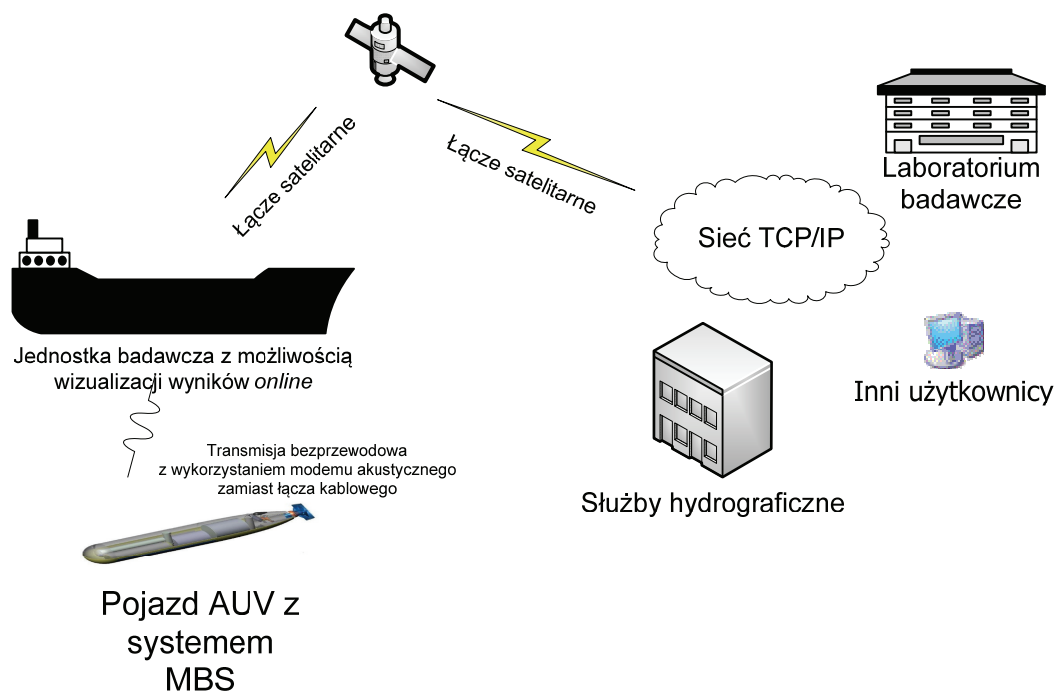
Poniżej przedstawiono wyniki obliczeń dotyczących wymaganej przepustowości łącza transmisyjnego, niezbędnego do przesłania opisanych w przypadkach testowych danych pomiarowych. Zgodnie z wnioskami z sekcji 4.4, wykorzystano kombinację metod kompresji polegającą na zastosowaniu analizy głównych składowych oraz transformaty falkowej według koncepcji zaprezentowanej na rys. 4.21.

Zajętość łącza jaką generuje strumień danych poddany kompresji wynosi od 650 do 800 bajtów na sekundę dla pierwszego przypadku testowego oraz od 800 do 1100 bajtów na sekundę dla drugiego przypadku. Zaprezentowane na rys. 5.15 wyniki obliczeń numerycznych pokazują, że zastosowanie opisanych metod może umożliwić przesyłanie danych batymetrycznych poprzez ograniczone łącze bezprzewodowe, takie jak np. oferowane przez modemy akustyczne, w czasie rzeczywistym.



Rys. 5.15. Wymagana przepustowość łącza dla potrzeb transmisji danych XYZ pochodzących z sytemu wielowiązkowego EM 3002 w funkcji czasu dla badanych dwóch przypadków testowych: wraku statku Terra (pierwszy przypadek testowy) oraz dla regularnego dla piaszczystego (drugi przypadek testowy) tak jak pokazano w rozdziale 4.4 rozprawy. Wykorzystane zostały metody redukcji danych oparte o transformację falkową oraz analizę PCA.

Rozwiązanie to usprawniłoby znacznie proces inspekcji i monitoringu obszarów podwodnych znajdujących się na dużej głębokości, a także pozwoliłoby na dotarcie z systemem sonarowym do miejsc obecnie niedostępnych. W tym przypadku największą korzyścią byłoby uniezależnienie pomiarów wykonywanych sonarem od fizycznej łączności ze stacją bazową oraz zdalne uzyskiwanie obrazów dna w czasie rzeczywistym (rys. 5.16).



Rys. 5.16. Schemat funkcjonalny prezentujący sposób wykorzystania proponowanych rozwiązań kompresji surowych danych batymetrycznych z wykorzystaniem metod PCA oraz transformaty falkowej

Transfer danych z wykorzystaniem modemów akustycznych umożliwiłby nie tylko wizualizację batymetrii dna w stacji bazowej, ale także, poprzez zastosowanie technologii bezprzewodowych łączy satelitarnych, dałby możliwość udostępniania wyników w czasie rzeczywistym innym jednostkom badawczym. Opracowane metody, mogą mieć zastosowanie w zdalnej inspekcji kanałów, miejsc trudno dostępnych oraz służyć jako narzędzie archiwizacji batymetrycznej informacji sonarowej.

5.4. Klasyfikacja rodzaju dna morskiego na podstawie kątowej zależności echa jako przykład analizy danych sonarowych

W ramach prac nad rozprawą, jako element analizy danych pochodzących z sonaru wielowiązkowego, zostały przeprowadzone badania dotyczące opracowania metod klasyfikacji dna morskiego na podstawie kątowej zależności echa sonarowego. Zasadniczym celem tych prac było opracowanie wiarygodnych metod rozpoznawania i klasyfikacji rodzaju dna morskiego opartych na przetwarzaniu omawianych wcześniej składników danych pochodzących z systemów wielowiązkowych: zobrażeń akustycznych toni wodnej oraz map akustycznych dna morskiego.

Ponadto, wykazano komplementarność podejścia zaprezentowanego we wcześniejszych rozdziałach pracy, polegającego na przetwarzaniu danych dotyczących zobrażeń akustycznych toni wodnej, z opracowanymi metodami klasyfikacji rodzaju dna morskiego

5.4.1 Metody

Zaproponowane rozwiązanie wykorzystuje informację zawartą w obwiedniach ech od dna dla poszczególnych wiązek sonaru o różnych kątach transmisji i insonifikacji i jest w znacznej mierze podejściem nowatorskim.

Realizowane prace składały się z trzech podstawowych etapów:

- 1) implementacji algorytmów cyfrowego przetwarzania ech z sonarów wielowiązkowych w celu klasyfikacji dna morskiego, które są rozwinięciem metod opisanych we wcześniejszych rozdziałach pracy,
- 2) pomiarów *in-situ* ech od dna w morzu za pomocą sonaru wielowiązkowego Kongsberg EM3002,
- 3) weryfikacji opracowanych algorytmów przetwarzania ech od dna na podstawie pomiarów *in-situ* i wstępnego opracowania metod klasyfikacji dna nadających się do półautomatycznego lub automatycznego wykorzystania w morzu,

Zasadnicza koncepcja zaproponowanego rozwiązania polegała na określaniu i analizie zależności wybranych cech echa od kąta padania fali akustycznej na powierzchnię dna morskiego (kąta insonifikacji) i powiązaniu charakteru tych zależności z rodzajem dna. Do analizy poszczególnych ech z sonaru wielowiązkowego, odpowiadających poszczególnym kątom insonifikacji dna, użyto zaadaptowanych odpowiednio metod analizy ech z konwencjonalnych echosond jednowiązkowych takich jak:

- 1) Podejście oparte na obliczaniu zbioru parametrów charakteryzujących obwiednię echa od dna [53][55][73]. Zasadniczo, obliczane parametry można podzielić na trzy grupy:
 - a) Podstawowe parametry opisujące echo, do których zaliczały się:
 - i. Energia echa, obliczana w postaci sumy kwadratów wszystkich próbek należących do fragmentu zidentyfikowanego jako echo od dna.
 - ii. Maksymalna amplituda sygnału echa.
 - iii. Czas trwania fragmentu echa zidentyfikowanego jako echo od dna.
 - b) Parametry statystyczne obwiedni echa:
 - i. Średnia wartość energii echa (tj. średnia wartość kwadratów próbek).
 - ii. Odchylenie standardowe energii echa.

iii. Asymetria (skośność, unormowany trzeci moment) rozkładu wartości energii echa.

c) Parametry geometryczne opisujące kształt obwiedni echa opisane np. w [51] lub [73].

Do tej grupy parametrów należały między innymi parametry zdefiniowane analogicznie jak parametry z grupy b), z tą różnicą, że odnosiły się one nie do rozkładu wartości energii echa, tylko do przebiegu czasowego obwiedni echa, potraktowanego tak, jakby był on estymacją rozkładu prawdopodobieństwa pewnej zmiennej losowej [74]. W szczególności były to: środek ciężkości obwiedni echa na osi czasu t oraz moment bezwładności echa względem środka ciężkości (odpowiadający wariancji rozkładu statystycznego).

2) Podejście wykorzystujące analizę falkową, konkretnie polegające na obliczaniu współczynników dyskretnej transformaty falkowej obwiedni echa, a następnie parametrów echa opartych na tych współczynnikach [52].

3) Podejście oparte o obliczanie parametrów akustycznego obrazu dna morskiego

Generalnie przyjęto założenie, że badane dno morza jest (w dużej skali) w przybliżeniu płaskie, tj. kąt transmisji danej wiązki jest równy kątowi insonifikacji dna.

Szczegółowy opis prac w tym zakresie wybiega poza zakres tematyczny pracy, niemniej jednak dokładny opis prowadzonych badań w tej dziedzinie można znaleźć np. w [50] [51] lub [54]. Poniżej przedstawiano wyniki będące podsumowaniem badań dla dwóch najistotniejszych parametrów:

1. Zależności kątowej środka ciężkości obwiedni echa na osi czasu t , momentu bezwładności echa względem środka ciężkości (odpowiadającemu wariancji rozkładu statystycznego) - $I(\varphi)$:

$$J = \frac{\sum_{i=i_a}^{i_b} e_i (t_i - \bar{t})^2}{E} \quad (5.1)$$

gdzie:

i_a, i_b - numer odpowiednio pierwszej i ostatniej próbki echa od dna,

e_i - energia i -tej próbki obwiedni echa (tj. kwadrat jej wartości),

$t_i = i \cdot T_{pr}$, T_{pr} – okres próbkowania,

E - całkowita energia echa.

2. Zależności kątowej wymiaru fraktalnego obwiedni echa traktowanego jako miary złożoności jej kształtu [3] - $D(\varphi)$. Parametr był obliczany w myśl definicji tzw. wymiaru pudełkowego (ang. *box dimension*) zbioru fraktalnego X na płaszczyźnie:

$$D_{box} = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{-\log N(\Delta s)}{\log \Delta s}, \quad (5.2)$$

gdzie:

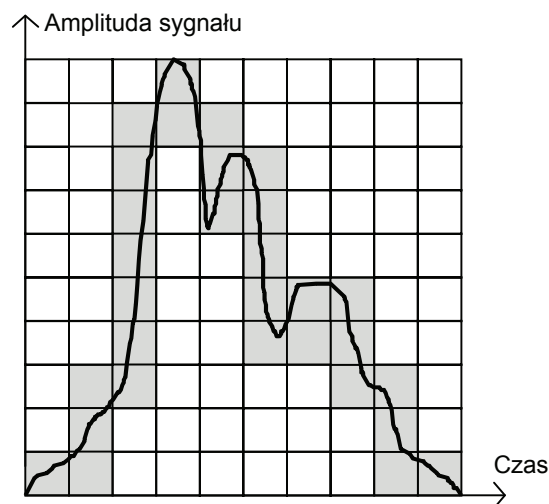
Δs - długość krawędzi pojedynczego elementu regularnej siatki kwadratów nałożonej na zbiór X (jak na rys. 5.17, gdzie zbiór X jest przebiegiem czasowym sygnału),

$N(\Delta s)$ - liczba kwadratów z nałożonej siatki, które zawierają punkty należące do zbioru X .

Zakłada się przy tym, że spełnione jest następujące prawo potęgowe:

$$N(\Delta s) = C \cdot \left(\frac{1}{\Delta s}\right)^{D_{box}}, \quad (5.3)$$

gdzie C - pewna stała.



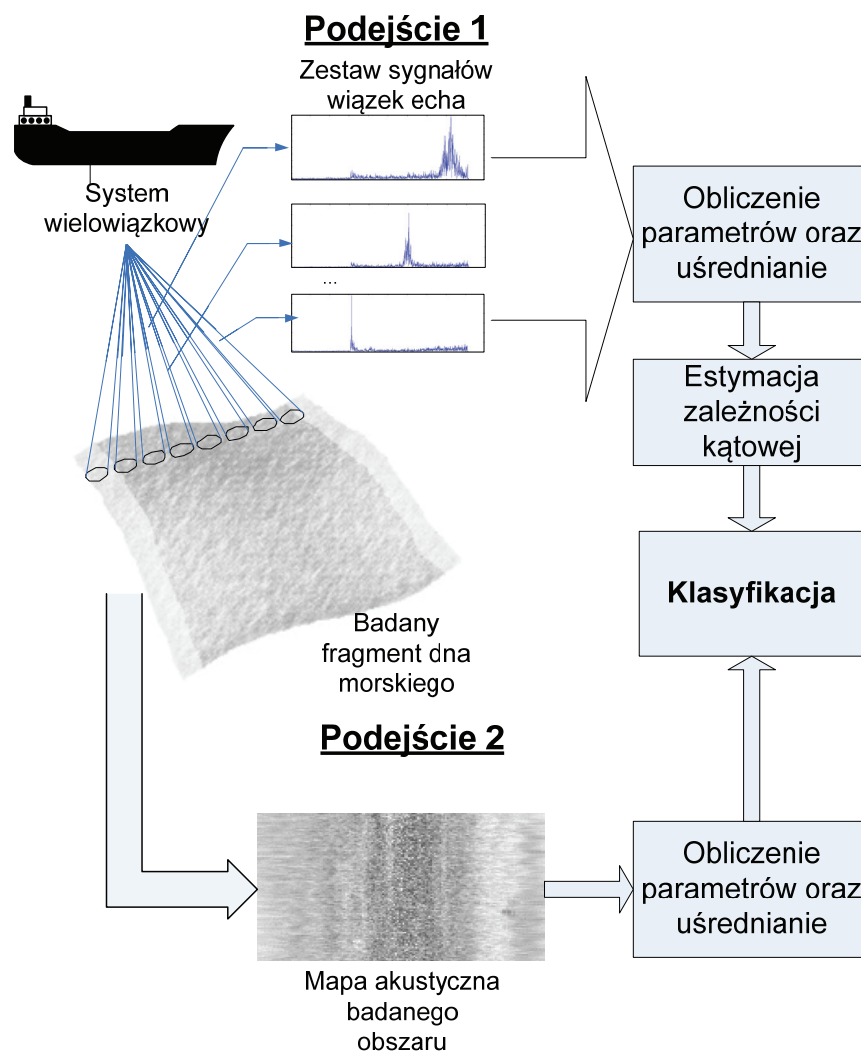
Rys. 5.17. Ilustracja sposobu określania wymiaru pudełkowego dla zbioru na płaszczyźnie, na przykładzie wykresu przebiegu czasowego obwiedni echa akustycznego. W niniejszym przypadku: $\Delta s = 0,1$, $N(\Delta s) = 30$

Ponieważ żaden sygnał wyrażony za pomocą skończonej ilości próbek nie jest zbiorem fraktalnym i w związku z tym jego wymiar fraktalny zgodnie z 5.2 wynosi zawsze 1, estymacja wymiaru fraktalnego obwiedni echa nie może zostać wykonana bezpośrednio za pomocą definicji 5.2. W bieżącej pracy zastosowano metodę estymacji D_{box} jako nachylenia prostej aproksymującej dla rzeczywistych danych zależność $\log N(\Delta s) = f(\log(1/\Delta s))$ dla pewnego przedziału $\langle \Delta s_1, \Delta s_2 \rangle$.

5.4.2 Proponowana koncepcja

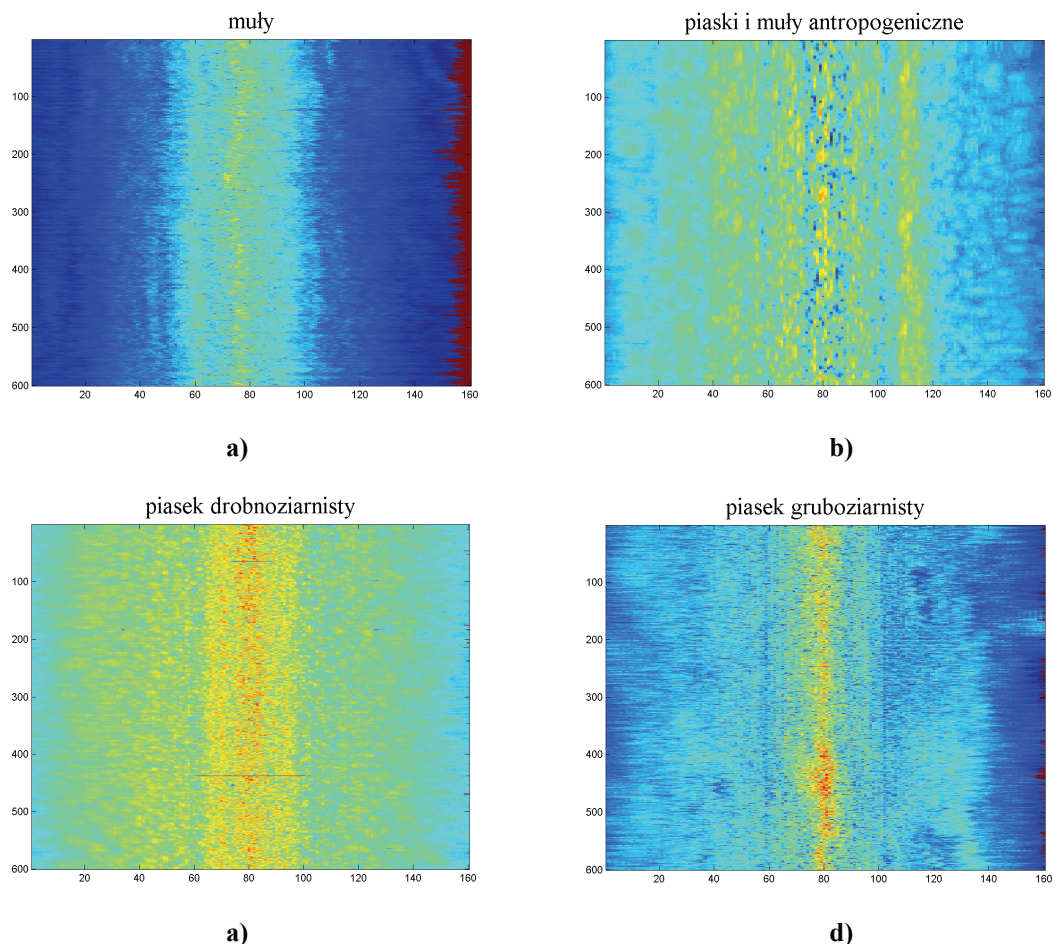
Zdaniem autora pracy, elementem nowatorskim przeprowadzonych prac było połączenie metod opartych o estymację kątowną zależności echa wiązki od rodzaju dna morskiego wraz z estymacją parametrów mapy akustycznej dna morskiego otrzymanego z wykorzystaniem sonaru wielowiązkowego EM 3002 dla badanego rodzaju dna morskiego (rys. 5.18).

Dla każdego badanego rodzaju dna morskiego obliczano dwa parametry obrazu akustycznego tj. lokalne odchylenie standardowe (STD) oraz lokalne nachylenie funkcji autokorelacji (wzdłuż toru sondowania) aproksymowane dla elementów obrazu (AUTC). Następnie, za pomocą obu omawianych technik, wykonano wykresy zbiorów przynależnych do poszczególnych rodzajów dna morskiego.



Rys. 5.18. Schemat ideowy proponowanego algorytmu klasyfikacji typu dna morskiego

Dane pozyskane do pomiarów zostały pobrane z użyciem systemu wielowiązkowego EM 3002 w latach 2007-2010 w regionie Zatoki Gdańskiej. W pracy zaprezentowano wyniki dotyczące 4 typów dna morskiego: mułu, piasków i mułów antropogenicznych, piasku drobnoziarnistego oraz piasku gruboziarnistego, których zobrazowania akustyczne przedstawiono na rys. 5.19. Informacja dotycząca rodzaju dna morskiego zaczerpnięta została z map geologicznych Bałtyku. Pokrycie dna podczas pomiaru wynosiło od -65° do 65° , natomiast w trakcie obliczeń brany pod uwagę był sektor kątowy od -25° do 25° dla podejścia pierwszego oraz od 15° do 30° dla podejścia drugiego. W celu estymacji odchylenia standardowego *STD* wartości obrazu akustycznego (podejście 2) brane były pod uwagę regiony o wielkości 11 na 11 pikseli oraz okno przesuwne o wielkości 61 pikseli z krokiem 5 pikseli dla zastosowanej funkcji autokorelacji *AUTC*.

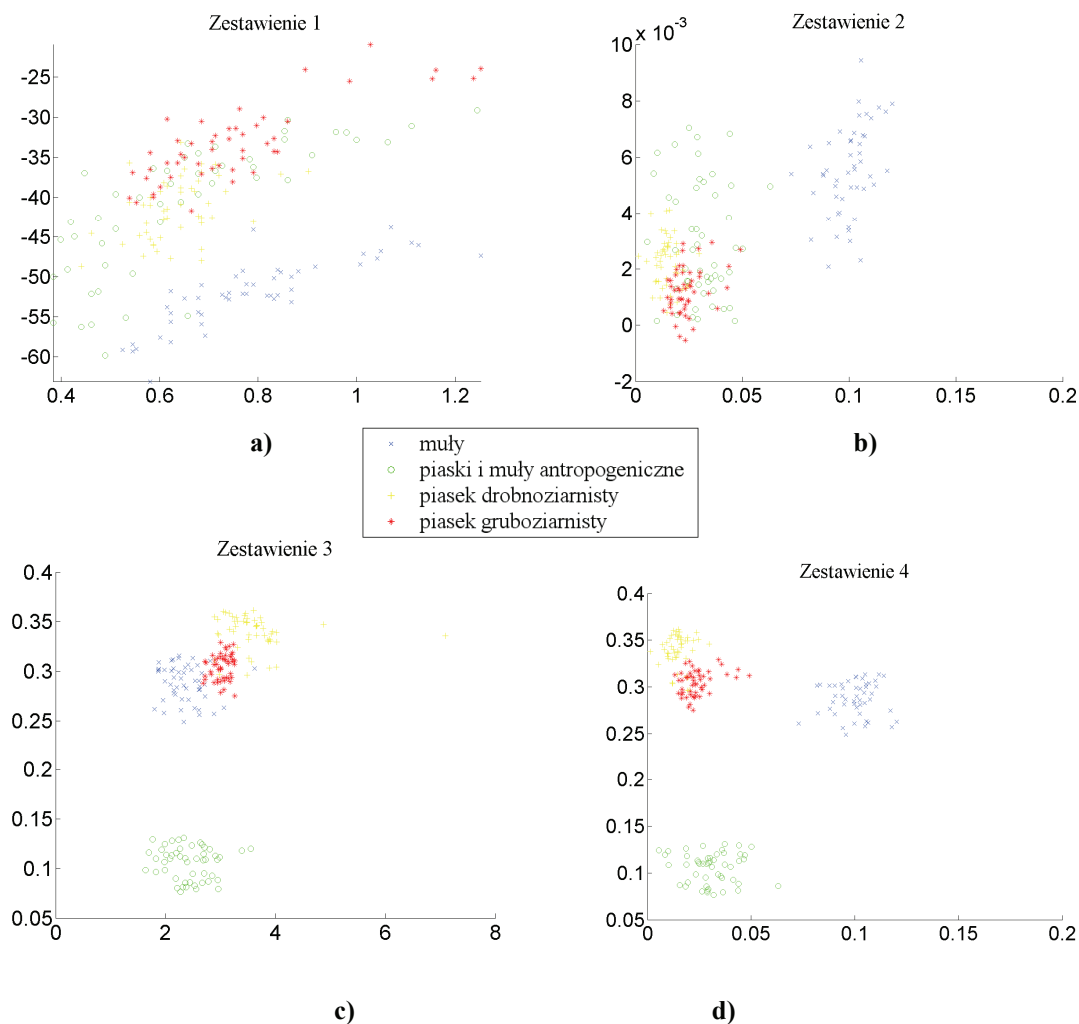


Rys. 5.19. Przykładowe obrazy akustyczne (siła rozpraszania wstecznego) dla różnych rodzajów dna morskiego: a) muły, b) piaski i muły antropogeniczne, c) piasek drobnoziarnisty, d) piasek gruboziarnisty

5.4.3 Wyniki

Wykresy par poszczególnych parametrów branych pod uwagę zaprezentowano na rys. 5.20. Dla porównania, wyliczono także parametry typowo stosowane w klasyfikacji typu dna

morskiego wykonywanej z użyciem echosond jednowiązkowych, a mianowicie czasu trwania echa dla prostopadłego kąta padania oraz energii echa dla tego samego zestawu danych (rys. 5.20a). Wykresy zależności parametrów $I(\varphi)$, $D(\varphi)$ zostały pokazane na rys. 5.20b. Wykresy dla parametrów obrazu akustycznego (podejście drugie - STD , $AUTC$) na rys. 5.20c. Ostatecznie, na rys. 5.20d zaprezentowano zestawienie parametrów $I(\varphi)$ z funkcją autokorelacji $AUTC$, które dało najbardziej użyteczne rozdzielenie zbiorów będących reprezentacją wyników obliczeń dla poszczególnych rodzajów dna morskiego.



Rys. 5.20. Zestawienia zależności wybranych parametrów dla czterech typów dna morskiego: muły – kolor niebieski, piaski muły antropogeniczne – kolor zielony, piasek drobnoziarnisty – kolor żółty, piasek gruboziarnisty – kolor czerwony : a) zestawienie 1 – czas trwania echa [ms] (oś pozioma) oraz energia echa wyrażona w decybelach, b) zestawienie 2 –kątowa zależność momentu bezwładności echa $I(\varphi)$ oraz kątowa zależność wymiaru fraktalnego $D(\varphi)$, c) zestawienie 3 - lokalna funkcja odchylenia standardowego obrazu akustycznego oraz zależność kątowa lokalnej funkcji autokorelacji obrazu akustycznego, d) zestawienie 4 – kątowa zależność momentu bezwładności echa $I(\varphi)$ oraz zależność kątowa lokalnej funkcji autokorelacji obrazu akustycznego

Zastosowanie proponowanych metod pozwoliło na wyraźne oddzielenie klas reprezentujących dane typu dna dla przypadków b),c) i d) co, w odróżnieniu od stosowanych w przypadku a) echosond jednowiązkowych, nie miało miejsca. Ponadto, zastosowanie parametrów $I(\varphi)$, $D(\varphi)$ umożliwiło odseparowanie zbioru wyników reprezentujących dno muliste (kolor niebieski) od pozostałych 3 rodzajów dna morskiego, oraz w przypadku parametrów obrazu akustycznego (STD oraz $AUTC$), dało wyraźne rozdzielenie zbiorów piasków i mułów antropogenicznych od pozostałych. Należy także zauważyć, że różnice między tymi typami dna są także widoczne na zobrazowaniu akustycznym (rys. 5.19).

Ostatecznie, zestawienie parametru $I(\varphi)$ z funkcją autokorelacji $AUTC$ pozwala na separację wszystkich zbiorów branych pod uwagę w opracowaniu. Na uwagę zasługują podobieństwo między wynikami uzyskanymi dla piasku drobnoziarnistego oraz piasku gruboziarnistego. Należy jednak zauważyć, że typy te są bardzo podobne w swojej strukturze co widać także na rys. 5.19b i rys. 5.19c, a kombinacja metod polegających na estymacji kątowej zależności ech sonaru wielowiązkowego wraz z powiązaniem właściwości akustycznych badanego obszaru morskiego, daje lepsze efekty niż stosowanie tych podejść osobno.

Rozdzielczość danych akustycznych na jakich wykonywano obliczenia wynosiła 0.5 dB. Komplementarność opisanych powyżej rozwiązań z przedstawionymi w poprzednich rozdziałach wynika więc nie tylko z zastosowania tej samej metodyki przetwarzania danych bazujących na przetwarzaniu akustycznych zobrazowań morskich oraz map akustycznych dna morskiego, ale także z przyjętych założeń dotyczących dokładności pomiarów.

6. PODSUMOWANIE

W niniejszej pracy doktorskiej podjęto się rozwiązanie problemu efektywnego przetwarzania oraz redukcji danych otrzymywanych z systemów MBS przeznaczonych do wykorzystywania w morskich systemach informacji przestrzennej.

Pierwsza teza pracy została udowodniona poprzez zaadaptowanie ogólnodostępnych technik kompresji danych i ich implementację jako systemu przetwarzania danych hydroakustycznych. Zaproponowana w 4.1 koncepcja archiwizacji plików sonarowych, poprzez uporządkowanie wewnętrznej struktury rekordów, pozwala na uzyskiwanie znacznie wyższych stopni kompresji niż stosowane obecnie popularne narzędzia kompresji danych. Przewagą proponowanych rozwiązań jest także możliwość wprowadzenia kontroli jakości danych w sposób określany przez użytkownika. W przeciwieństwie do innych stratnych metod kompresji wprowadzany stopień błędu jest równomierny dla całego zestawu i może być dobierany według potrzeb użytkownika z uwzględnieniem jakości przetwarzanej informacji oraz właściwości akustycznych sondowanego środowiska.

Druga teza pracy została udowodniona poprzez zastosowanie analizy głównych składowych oraz transformaty falkowej do redukcji rozmiaru surowych danych batymetrycznych otrzymywanych z systemu wielowiązkowego. W pracy pokazano, iż poprzez zastosowanie odpowiednich technik przetwarzania, możliwe jest uzyskiwanie stopni kompresji pozwalających na transmisję otrzymywanych wyników w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem łączy bezprzewodowych o bardzo niskiej przepustowości takich jak np. oferowane przez modemy akustyczne. Zastosowanie proponowanych metod daje lepsze współczynniki redukcji danych (przy zachowaniu tych samych błędów rekonstrukcji) niż najpowszechniej obecnie stosowany standard stratnej kompresji jakim jest JPEG.

Ponadto, w ramach pracy zaproponowano opisaną w 4.2 optymalizację metod kompresji danych sonarowych umożliwiającą przetwarzanie otrzymywanych rekordów w czasie rzeczywistym na komputerze klasy PC oraz, w sekcji 4.3, jej implementację na wielordzeniowej architekturze CUDA. W obu przypadkach uzyskano znaczne korzyści w stosunku do obecnie stosowanych narzędzi kompresji danych polegające na uzyskiwaniu lepszych współczynników redukcji danych oraz krótszym czasie przetwarzania otrzymywanej informacji.

Podsumowując, do oryginalnego dorobku autora pracy należy zaliczyć:

- usystematyzowanie istniejącej wiedzy z zakresu stosowania technik informacyjnych w hydroakustyce,

- implementację metod reorganizacji rekordów sonarowych dla potrzeb archiwizacji danych przeznaczonych do działania w trybie offline,
- modyfikację oraz optymalizację metody kodowania Huffmana dla potrzeb kompresji rekordów sonarowych w czasie rzeczywistym wraz z jej weryfikacją doświadczalną,
- implementację algorytmów kodowania Huffmana na wielordzeniowej architekturze CUDA oraz dostosowanie tych algorytmów do działania w środowisku obliczeń równoległych,
- weryfikację doświadczalną opracowanego rozwiązania opartego o technologię CUDA,
- implementację metod przetwarzania oraz redukcji danych batymetrycznych opartą o analizę głównych składowych,
- implementację metod przetwarzania oraz redukcji danych batymetrycznych opartą o transformatę falkową,
- wykonanie symulacji numerycznych pokazujących korzyści ze stosowania opracowanych metod redukcji surowych danych batymetrycznych w rozproszonych morskich systemach GIS,

Ponadto, do oryginalnego dorobku autora pracy należy zaliczyć udział w tworzeniu internetowego morskiego systemu informacji przestrzennej przeznaczonego do zdalnego monitorowania i obrazowania zanieczyszczeń oraz innych składników ekosystemów morskich wykonywanego w ramach grantu MNiSW. W pracy opisano zadania związane z implementacją metod przetwarzania, udostępniania oraz integracji danych pochodzących z systemów wielowiązkowych z innymi danymi o charakterze przestrzennym takimi jak np. dane z echosond jednowiązkowych oraz sonarów bocznych. W ramach wspomnianego projektu autor pracy uczestniczył także w procesie implementacji algorytmów wizualizacji 3^D opisanych danych.

W pracy pokazano, iż jakość danych poddanych procesowi kompresji przy pomocy proponowanych algorytmów nie odbiega znacząco od poziomu szczegółowości danych nieskompresowanych. Z tego powodu, dane w proponowanej formie mogą być bez przeszkód wykorzystane do innych celów naukowych związanych z przetwarzaniem danych z sonarów wielowiązkowych np. do metod rozpoznawania i klasyfikacji rodzaju dna morskiego. W szczególności dotyczy to zobrazowań akustycznych toni wodnej oraz map akustycznych dna morskiego.

Przedstawione w pracy algorytmy analizy i przetwarzania danych pochodzących z systemów wielowiązkowych opracowane zostały z myślą o nowoczesnych systemach

zdalnego monitorowania środowiska morskiego. Pokazano także, iż dedykowane metody przetwarzania tych danych mogą dać znaczne korzyści podczas rutynowych rejsów o charakterze badawczym oraz komercyjnym. Ewentualne zastosowanie zaproponowanych w pracy metod, może w wielu przypadkach znacznie ułatwić proces inspekcji środowiska morskiego stanowiąc cenne narzędzie do przetwarzania, analizy i archiwizacji danych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bernstein A.J.: Program Analysis for Parallel Processing, IEEE Trans. on Electronic Computers, EC-15, s. 757–762, 1966
- [2] Bhooshan, S.; Sharma, S.; An efficient and selective image compression scheme using Huffman and adaptive interpolation, Image and Vision Computing New Zealand, 2009. IVCNZ '09. 24th International Conference . 2009 , Page(s): 197 – 202
- [3] Bikonis K, Moszynski M, **Chybicki A**, Kocinski P, 3D imaging software tools for multibeam sonar data, Hydroacoustics 9, 2006, pp. 17-22.
- [4] Bikonis K, Partyka A, Łubniewski Z, Moszynski M, Stepnowski A, GIS for shallow water pollution awareness and emergency management, Proceedings of the IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security and Safety TEHOSS 2005, ed. by A. Stepnowski, A. Rucinski and K. Kosmowski, Gdansk, 1997, pp. 45-50.
- [5] Buelens B., Williams R., Saley A., Pauly T., Computational Challenges in Processing and Analysis of Full-Watercolumn Multibeam Sonar Data, Proceedings of the Eighth European Conference on Underwater Acoustics, Carvoeiro, Portugal, 12-15 June, 2006
- [6] Buelens B., Williams R., Saley A., Pauly T., Model Inversion for Midwater Multibeam Backscatter Data Analysis, *Oceans - Europe 2005*
- [7] Buelens B., Williams R., Saley A., Pauly T., Midwater acoustic modeling for multibeam sonar simulation, Acoustical Society of America Conference, Austin, Texas, 2003.
- [8] W. S. Burdic, Underwater acoustic system analysis, Prentice Hall, Signal Processing Series, 1984
- [9] Calder B.R, Mayer L.A., Automatic processing of high-rate, high-density multibeam echosounder data, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, vol. 4, no. 6, 2003
- [10] Chan Tommy C. L., Tai-Chiu Hsung, Member, IEEE, and Daniel Pak-Kong Lun, Member, IEEE, Improved MPEG-4 Still Texture Image Coding Under Noisy Environment, *IEEE transactions on image processing*, vol. 12, no. 5, May 2003
- [11] **Chybicki A.**, Kulawiak M., Kamiński Ł., Łubniewski Z., Dąbrowski J., Analysis, processing and visualization algorithms for multibeam sonar data in distributed GIS systems, *Polish Hyperbaric Research – The Journal of Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society*, Nr 1 (26), p 19-27, 2009
- [12] **Chybicki A.**, Kaminski L., Lubniewski Z., Bruniecki K., Kulawiak M., Dabrowski J., Moszynski M., Geographic information system for remote integration of diverse underwater acoustic sensor data, *Hydroacoustics*, Leba, Poland, 26-29 May, 2009
- [13] **Chybicki A.**, Kulawiak M., Łubniewski Z., Łuba M., Moszyński M., Dąbrowski J., System GIS do analizy i wizualizacji zanieczyszczeń oraz innych składników środowiska

- morskiego, Zeszyty Naukowe Wydziału ETI Politechniki Gdańskiej, Seria: Technologie Informacyjne, 2008, str. 111-117, VI Krajowa Konferencja Technologie Informacyjne, Gdańsk, 18-21 Maj, 2008.
- [14] **Chybicki A.**, Kulawiak M., Lubniewski Z., Luba M., Moszynski M., Dąbrowski J., GIS for Remote Sensing, Analysis and Visualization of Marine Pollution and Other Marine Ecosystem Components, Proceedings of 2008 1st International Conference on Information Technology, p. 223-226
<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/4609442/4621577/04621628.pdf?arnumber=4621628>
- [15] **Chybicki A.**, Moszyński M., Metody przetwarzania danych pochodzących z sonarów wielowiązkowych dla potrzeb kompresji, Gdańsk, Zeszyty Naukowe Wydziału ETI Politechniki Gdańskiej, Nr 6, Gdańsk, 2008
- [16] **Chybicki A.**, Moszynski M., Pocwiardowski P., Compression algorithms for multibeam sonar records, Hydroacoustics Annual Journal, vol. 11, p 55-62.
- [17] **Chybicki A.**, Moszyński M., Applications of compression techniques for reducing the size of multibeam sonar records., Proceedings of 2008 1st International Conference on Information Technology, p. 395-39, Gdańsk, Poland, May 19-21, 2008.
- [18] Darema F., George D. A., Norton V. A., Pfister G. F.: A single-program-multiple-data computational model for expe fortran, Parallel Computing, 7:11-24, 1988
- [19] Demkowicz J., Bikonis K., Combined Spline Wavelet Decomposition for 3D Seafloor Imaging from Multibeam Sonar Echoes, Acta Acustica United with Acustica, Vol. 92, January/February 2006,
- [20] Drozdek A., Wprowadzenie do kompresji danych, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1999
- [21] ESRI Developer Network, materiały w formie elektronicznej,
<http://www.esri.com/software/arcgis/arcgisengine/index.html>
- [22] Feldspar A., An Explanation of the Deflate Algorithm, materiały w wersji elektronicznej,
<http://zlib.net/>
- [23] Ferguson S., Chayes D. A., Use of Generic Sensor Format to Store Multibeam Data, Marine Geodesy, Vol. 18, Issue 4, October 1995
- [24] Flynn M.: Some Computer Organizations and Their Effectiveness, IEEE Transaction. Comput., Vol. C-21, pp. 948, 1972.
- [25] Foote K. G., Chu D., Hammar T. R., Baldwin K. C., Mayer L. A., Hufnagle L. C., Jech J. M., Protocols for calibrating multibeam sonar, Journal of the Acoustical Society of America, Volume 114, Issue 4, October 2003
- [26] Garrett J., Ajax: A New Approach to Web Applications, materiały firmy AdaptivePath w formie elektronicznej, <http://www.adaptivepath.com/ideas/essays/archives/000385.php>

- [27] Gene A.: Validity of the Single Processor Approach to Achieving Large-Scale Computing Capabilities, AFIPS Conference Proceedings (30): 483–485, 1967
- [28] GeoServer – serwer danych przestrzennych w standardzie OGC – materiały informacyjne w formie elektronicznej, <http://www.geoserver.org>
- [29] Haar A.: Zur Theorie der orthogonalen Funktionensysteme, *Mathematische Annalen*, 69, pp 331-371, 1910
- [30] Halfhill T. R.: Parallel Processing With CUDA, *Microprocessor. The insider's Guide To Microprocessor Hardware*, 01/28/08 – 01, 2008
- [31] Hankamer M.: A Modified Huffman Procedure with Reduced Memory Requirement, 1979
- [32] Hidalgo J.R., Salembier, P., On the use of indexing metadata to improve the efficiency of video compression, *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, vol. 16 , Issue 3 2006.
- [33] Huffman D. A., A Method for the Construction of Minimum-Redundancy Codes, *Proceedings of the I.R.E.*, September 1952
- [34] Ichigaya A., Masaaki Kurozumi, Naohiro Hara, Yukihiro Nishida, Eisuke Nakasu , A Method of Estimating Coding PSNR Using Quantized DCT Coefficients, *IEEE Transactions on circuits and systems for video technology*, vol. 16, no. 2, 2006
- [35] Java Community Process, materiały dotyczące technologii “Tomcat”, źródło: <http://tomcat.apache.org/>
- [36] Karadimitriou K., Set Redundancy, the Enhanced Compression Model, and Methods for Compressing Sets of Similar Images, Ph.D. Dissertation, Louisiana State University, Baton Rouge, LA, 1996.
- [37] Karadimitriou K., Fenstermacher M., Image Compression In Medical Image Databases Using Set Redundancy, Division of Diagnostic Imaging, M.D. Anderson Cancer Center, Houston, TX
- [38] Khademi A., Krishnan S., Comparison of JPEG 2000 and Other Lossless Compression Schemes for Digital Mammograms, *Engineering in Medicine and Biology Society, 2005. IEEE-EMBS 2005. 27th Annual International Conference of the* 17-18, Jan. 2006
- [39] Khronos Group, WebGL Developers Books, <http://www.khronos.org>
- [40] Klein S. T., Wiseman Y, Parallel Huffman Decoding with Applications to JPEG Files, *Oxford Journals Mathematics & Physical Sciences Computer Journal* Volume 46, Issue5, 2003
- [41] Knight W. C., et al, Digital signal processing for sonar, *Proc. IEEE*, vol. 69, Nr 11, s. 1451-1506, 1981

- [42] Kraft L. G.: A device for quantizing, grouping, and coding amplitude modulated pulses, Cambridge, MA: MS Thesis, Electrical Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology, 1949
- [43] Krzanowski W.J., Principles of Multivariate Analysis, Oxford, Statistical Science Series, New York, 1988
- [44] Kulawiak M., **Chybicki A.**, Moszyński M., Web-based GIS as a tool for supporting marine research, Marine Geodesy, 2010
- [45] Kulawiak M., Prospathopoulos A., Perivoliotis L., Łuba M., Kiroglou S., Grammatikaki, G., Stepnowski A., Integrating a Web-based GIS to a marine pollution monitoring and forecasting system”, Athens, Greece, 2008
- [46] Kulawiak M., Prospathopoulos A., Perivoliotis L., Łuba M., Kiroglou S., A. Stepnowski, Interactive Visualization of marine pollution monitoring and forecasting data via a Web-based GIS, Computers & Geosciences, 2010
- [47] Kuo Chia-Hsu, Mu-King Tsay, Cheng-Chang Lu, An efficient repetition finder for improving dynamic Huffman coding Communications, IEEE Transactions on Volume: 45 , Issue: 11 1997
- [48] Moszynski M., Bikonis K., Demkowicz J., VRML Visualization of Pelagic Fish Movement in the Echosounder Beam, Hydroacoustics, vol. 6, 2003, 20th Symposium on Hydroacoustic (SHA'20), Jurata, Poland, 27-30 May, 2003
- [49] Leung, R., Taubman, D., Transform and embedded coding techniques for maximum efficiency and random accessibility in 3-D scalable compression, Image Processing, IEEE Transactions on, Volume: 14 , Issue: 10, 2005
- [50] Łubniewski Z., **Chybicki A.**, Klasyfikacja dna morskiego na podstawie kątowej zależności cech echa z sonaru wielowiązkowego, Zeszyty Naukowe Wydziału ETI Politechniki Gdańskiej, Seria: Technologie Informacyjne, 2008, str. 135-141, VI Krajowa Konferencja Technologie Informacyjne, Gdańsk, 18-21 Maj, 2008.
- [51] Łubniewski Z., **Chybicki A.**, Seabed classification using multibeam echosounder, Proceedings of 2008 1st International Conference on Information Technology, p. 491-495, Gdańsk, Poland, May 19-21, 2008
- [52] Łubniewski Z., Moszyński M., Stepnowski A., Application of inverse filtering techniques in the sea bottom recognition, Proceedings of the Second EAA International Symposium on Hydroacoustics, Gdańsk-Jurata, 95-100, 1999.
- [53] Łubniewski Z., Pouliquen E.: Sensitivity of echo parameters to seafloor properties and depth variability, Proceedings of the Seventh European Conference on Underwater Acoustics ECUA2004, Delft, 763-768, 2004

- [54] Łubniewski Z., Stepnowski A., **Chybicki A.**, Seafloor characterisation using multibeam sonar echo signal processing and image analysis, *Hydroacoustics*, vol. 13, -177, Gdańsk, 2010
- [55] Łubniewski Z., Zastosowanie analizy fraktalnej i filtracji odwrotnej do zdalnej klasyfikacji i monitoringu dna morskiego, rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, 2001
- [56] Mayer L., Li Y., Melvin G., 3D visualization for pelagic fisheries research and assessment”, *ICES Journal of Marine Science*, vol. 59, 2002.
- [57] Murtagh, F., and Heck, A., *Multivariate Data Analysis*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.
- [58] Nordebo, S, Claesson, I., Nordholm, S., Adaptive beamforming: spatial filter designed blocking matrix, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 19, issue 4, 1994
- [59] NVidia – materiały informacyjne firmy: CUDA Programming Guide, Version 2.3, <http://www.nvidia.com>
- [60] Open Geospatial Consortium, OpenGIS Web Map Service (WMS) Implementation Specification, 06—42, materiały dostępne w formie elektronicznej: <http://www.opengeospatial.org>
- [61] Oracle – materiały informacyjne firmy dotyczące specyfikacji Java EE, Introducing the Java EE 6 Platform, źródło: <http://www.oracle.com/technetwork/articles/javaee/javaee6overview-141808.html>
- [62] Partyka A, Łubniewski Z, Stepnowski A, Gajewski J, Remotely accessible Web-based GIS for real time monitoring and mapping of the marine environment, *Proceedings of the 8th European Conference on Underwater Acoustics*, Carvoeiro, 2006
- [63] Pennebaker W., Mitchell J., *JPEG - Still Image Data Compression Standard*. New York, Van Nostrand, 1993.
- [64] Przelaskowski A., *Kompresja danych, Podstawy, metody bezstratne, kodery obrazów*”, Wydawnictwo BTC, Warszawa 2005
- [65] Rønhovde A., High Resolution Beamforming of SIMRAD EM3000 Bathymetric Multibeam Sonar Data, Cand Scient thesis, October 1999, University of Oslo Department of Informatics
- [66] Reson Inc, Data Format Definition, Seabat 7k Data Format , Volume I. Version 0.54
- [67] Schowengerdt R. A., *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*, 2nd ed. Orlando, FL: Academic, 1997.
- [68] Shannon C. E., A mathematical theory of communications, *Bell Systems Technical Journal*, vol. 27, pp. 379–423, 623–656, July 1948.
- [69] Stepnowski A., *Systemy akustycznego monitoringu środowiska morskiego*, Gdańskie Towarzystwo Naukowe, Gdańsk, 2001

- [70] Stepnowski, A., J.Burczynski, M. Ostrowski, M.Moszynski, J. Lenkiewicz, A. Partyka. 1996. ECHOBASE - A Portable Geographic Fishery Research Database System, *Marine Geodesy* vol. 19, p. 269-280
- [71] Stepnowski A., Salamon R., High resolution sampled phae-dleay sonar beamformer” *Acoustical Imaging (A.J.Berkhaut et al., eds.)* vol. 14, Plenum Press, 1985
- [72] Storer J. A., Szymanski T.G., Data Compression via Text Substitual, *Journal of the ACM*, p. 928-951, 1982
- [73] Tęgowski J., Łubniewski Z., Application of some echo parameters to the seabed classification - methodological analysis, *Hydroacoustics*, 4, Gdynia, 237-240, 2001
- [74] Tęgowski J., Łubniewski Z., Seabed characterisation using spectral moments of the echo signal, *Acta Acustica united with Acustica*, 88(5), 623-626, 2002.
- [75] Thorner J. E., Approaches to sonar beamforming, *Proceedings of the 1990 IEEE Southern Tier Technical Conference*, 25 April 1990
- [76] Urick R. J., *Principles of underwater sound*, wyd. 3, Mc Graw-Hill, 1983
- [77] Van Veen, B.D.; Buckley, K.M., Beamforming: A Versatile Approach to Spatial Filtering, *IEEE ASSP Magazine*, vol.5, issue 2, p. 4-24, 1988
- [78] Xiaofeng J., Y. Wenjun, Transient calibration of underwater acoustic transducers *Measurement, Science and Technology*, vol. 9, No. 11 1998.
- [79] Ziv J., Lempel A., A universal algorithm for sequential data compression, *IEEE Transactions on Information Theory*, 1977.
- [80] Ziv J., Lempel A., Compression of individual sequences via variable-rate coding, *IEEE Transactions on Information Theory*, 1978.