Politechnika Gdańska

Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
Katedra Systemów Geoinformatycznych

Rozprawa doktorska

ALGORYTMY REKONSTRUKCJI KSZTAŁTU DNA MORSKIEGO I TRÓJWYMIAROWA WIZUALIZACJA OBIEKTÓW PODWODNYCH

Krzysztof Bikonis

Promotor
dr hab. inż. Marek Moszyński

Gdańsk, 2007

Składam serdeczne podziękowania mojemu promotorowi doktorowi habilitowanemu Markowi Moszyńskiemu, profesorowi Andrzejowi Stepnowskiemu oraz doktorowi Zbigniewowi Łubniewskiemu, za cenną pomoc podczas pisania pracy.

Oraz wszystkim, którzy przyczynili się do powstania tej pracy.

Pracę dedykuję
moim najlepszym nauczycielom –
Rodzicom,
siostrze Małgosi oraz ukochanej Ani.

Spis treści

Wykaz oznaczeń i skrótów ... 3

1. Wstęp ... 7

1.1. Wprowadzenie ... 7

1.2. Tezy pracy ... 10

1.3. Przegląd rozdziałów ... 11

2. Akwizycja danych pochodzących z systemów hydroakustycznych ... 13

2.1. Wprowadzenie ... 13

2.2. Propagacja fali akustycznej w środowisku wodnym ... 14

2.3. Równanie sonaru i jego parametry ... 16

2.4. Współczynnik odbicia ... 20

2.5. Modele rozpraszania wstecznego ... 21

2.5.1. Model Lamberta i jego modyfikacje ... 22
2.5.2. Model Novariniego i Caruthersa ... 23
2.5.3. Inne modele rozpraszania wstecznego ... 25

2.6. Modelowanie rozpraszania fali akustycznej na dnie ... 26

2.7. Przegląd wybranych systemów hydroakustycznych ... 28

2.7.1. Echosondy jednowiązkowe ... 28
2.7.2. Sonary boczne ... 31
2.7.3. Sonary wielowiązkowe ... 35

2.8. Podsumowanie ... 44

3. Trójwymiarowa rekonstrukcja dna morskiego na podstawie danych z sonaru bocznego ... 47

3.1. Wprowadzenie ... 47

3.2. Techniki odtwarzania kształtu ... 48

3.2.1. Odtwarzanie kształtu z tekstury ... 48
3.2.2. Odtwarzanie kształtu z ogniskowania ... 51
3.2.3. Odtwarzanie kształtu z ruchu ... 53
3.2.4. Odtwarzanie kształtu z odcieni szarości (SFS) ... 54

3.3. Technika wykorzystująca zdjęcia stereo ... 56

3.4. Algorytmy do odtwarzania kształtu obiektów bazujące na technice SFS ... 58

3.4.1. Algorytmy minimalizujące funkcję energii obrazu ... 63
3.4.2. Algorytmy propagacji ... 65
3.4.3. Algorytmy bazujące na lokalnej sferyczności powierzchni ... 65
3.4.4. Algorytmy bazujące na liniowej aproksymacji funkcji odbicia ... 66

3.5. Podsumowanie 67

4. Analiza wybranych algorytmów optymalizacji 69

4.1. Wprowadzenie 69
4.2. Algorytmy bezgradientowe 71
4.3. Algorytmy gradientowe 77
4.4. Algorytmy optymalizacji globalnej 79
4.5. Podsumowanie 82

5. Opracowane algorytmy do trójwymiarowej rekonstrukcji kształtu dna morskiego oraz obiektów położonych na dnie 83

5.1. Wprowadzenie 83
5.2. Rekonstrukcja dna morskiego z wykorzystaniem techniki SFS 85
5.3. Algorytm do trójwymiarowej rekonstrukcji obiektów położonych na dnie morskim 87
5.4. Trójwymiarowa rekonstrukcja kształtu dna morskiego 94
5.5. Metody optymalizacyjne w algorytmach rekonstrukcji dna morskiego 103
5.6. Podsumowanie 107

6. Zastosowanie języków opisu wirtualnej rzeczywistości do wizualizacji danych hydroakustycznych 109

6.1. Wprowadzenie 109
6.2. Charakterystyka języków opisu wirtualnej rzeczywistości 111
6.3. Wizualizacja danych hydroakustycznych za pomocą języka VRML 115
6.3.1. Wizualizacja w języku VRML przemieszczania się ryb pelagicznych w wiązce echosondy 115
6.3.2. Wizualizacja w języku VRML obiektów na dnie morskim z wykorzystaniem danych pochodzących z echosondy wielowiązkowej 121
6.3.3. Wizualizacja danych w Morskim Systemie Informacji Przestrzennej SIS . 126
6.3.3.1. System SIS, jako przykład Morskiego Systemu Informacji Przestrzennej 126
6.3.3.2. Technologie obrazowania 3^D zaimplementowane w Morskim Systemie Informacji Przestrzennej 128

7. Wnioski 133

Literatura 137

Wykaz oznaczeń i skrótów

Oznaczenia

α – logarytmiczny współczynnik tłumienia

α_i – kąt nachylenia jednostkowej płaszczyzny dna morskiego

α_k – współczynnik korygujący dla dużych kątów padania fali akustycznej

δ_f – odchylenie standardowe kąta nachylenia powierzchni rozpraszającej

φ – kąt pomiędzy kierunkiem padania sygnału sondującego, a kierunkiem pionowym

φ_v – szerokość wiązki w kierunku przemieszczania się przetwornika

η – sprawność elektroakustyczna przetwornika

θ_i – kąt padania fali akustycznej względem wektora normalnego

θ_s – kąt obserwacji fali rozproszonej

λ – długość fali akustycznej

μ_L – stała Lamberta

ν – prędkość cząstki akustycznej

ρ – gęstość ośrodka

σ_μ – średniokwadratowa wartość wysokości mikroskalowych nierówności

σ_{bs} – przekrój rozpraszania wstecznego

σ_o – przekrój rozpraszania objętościowego

σ_s – przekrój rozpraszania

τ – czas trwania sygnału sondującego

$\upsilon_L(\cdot)$ – funkcja opisująca straty transmisyjne przy dwukrotnym przechodzeniu fali akustycznej przez granicę woda-powierzchnia dna

Φ – całkowa równoważna wiązka stożkowa przetwornika sonaru dla rewerberacji powierzchniowych

Ψ – całkowa 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

l_t – rozmiar teksela tekstury obiektu

l_{to} – rozmiar teksela tekstury na obrazie dwuwymiarowym

m_μ – współczynnik rozpraszania na mikronierównościach dna

m_{bs} – współczynnik rozpraszania wstecznego

m_f – współczynnik rozpraszania na średnioskalowych elementach powierzchni dna

m_s – współczynnik rozpraszania na nieregularnej powierzchni dna

m_v – współczynnik rozpraszania objętościowego

$\vec{n}$ – wektor normalny

$\vec{n}_s$ – wektor padania światła na obiekt

p – gradient wysokości powierzchni obiektu w kierunku osi x

p_a – ciśnienie akustyczne

p_1 – jednostkowe ciśnienie akustyczne (1μPa)

p_s – składowa x wektora padania światła na obiekt

q – gradient wysokości powierzchni obiektu w kierunku osi y

q_s – składowa y wektora padania światła na obiekt

r – odległość od źródła sygnału sondującego

s_s – współczynnik rozpraszania fali akustycznej na dnie (zależny od kąta insonifikacji)

z – wysokość elementów powierzchni dna morskiego

BC – ograniczenie na jasność obrazu (ang. *Brightness Constraint*)

DI – wskaźnik kierunkowości przetwornika (ang. *Directivity Index*)

DT – próg detekcji (ang. *Detection Threshold*)

E – energia światła padającego na powierzchnię obiektu

EF – funkcja energii obrazu

EL – poziom echa (ang. *Echo Level*)

G – funkcja ograniczająca funkcję celu w algorytmach optymalizacji

H – wysokość przetwornika sonaru nad dnem

I – natężenie fali akustycznej

I_0 – natężenie fali akustycznej w odległości jednostkowej (1m) od źródła sygnału

I_1 – natężenie odniesienia $0.667*10^{-18}$ W/m^2, odpowiadające ciśnieniu jednostkowemu p_1=1μPa

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

I_v – natężenie fali rozproszonej objętościowo

$I_{(x)}$ – natężenie chwilowe fali rozproszonej

IC – ograniczenie całkowalności (ang. *Intergrability Constraint*)

IGC – ograniczenie gradientu (natężenia) jasności obrazu (ang. *Intensity Gradient Constraint*)

J_0 – funkcja Bessela zerowego rzędu, pierwszego rodzaju

L – energia światła odbitego od powierzchni obiektu

L_s – długość impulsu sondującego

M – współczynnik odbicia od mikronierówności dna

M_ϕ – średni rozmiar cząstek osadu dennego

NL – poziom szumu (ang. *Noise Level*)

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

Q – funkcja celu w algorytmach optymalizacji

R – odległość pomiędzy przetwornikiem, a punktem na powierzchni dna

$R_\perp$ – ciśnieniowy współczynnik odbicia od dna dla pionowego padania fali akustycznej

RL – poziom rewerberacji (ang. *Reverberation Level*)

RL_s – składowa powierzchniowa poziomu rewerberacji

RL_v – składowa objętościowa poziomu rewerberacji

SC – ograniczenie gładkości powierzchni obiektu (ang. *Smoothness Constraint*)

SL – poziom źródła (ang. *Source Level*)

SPL – spektralny poziom szumu (ang. *Spectral Noise Level*)

S_s – siła wstecznego rozpraszania powierzchniowego

S_v – siła wstecznego rozpraszania objętościowego

TL – straty transmisji (ang. *Transmission Losses*)

TS – siła celu (ang. *Target Strength*)

UNC – ograniczenie jednostkowości wektorów normalnych (ang. *Unit Normal Constraint*)

W – gęstość widmowa wysokości pofałdowanej powierzchni dna

Z_0 – impedancja akustyczna ośrodka dla fali płaskiej

Skróty

AUV	–	Autonomiczny Pojazd Podwodny (ang. *Autonomous Underwater Vehicles*)
DFT	–	Dyskretna Transformata Fouriera (ang. *Digital Fourier Transform*)
DGPS	–	Różnicowy GPS (ang. *Differential Global Positioning System*)
DTM	–	Cyfrowy Model Terenu (ang. *Digital Terrain Model*)
ECDIS	–	System Obrazowania Map Elektronicznych i Informacji Nawigacyjnych (ang. *Electronic Chart Display and Information System*)
GeoVRML	–	rozszerzenie języka VRML dla danych w kontekście geograficznym
GIS	–	System Informacji Geograficznej (ang. *Geographic Information System*)
GPS	–	System Nawigacji Satelitarnej (ang. *Global Positioning System*)
ISO	–	Międzynarodowa Organizacja Standaryzacji (ang. *International Organization for Standardization*)
MBSS	–	sonar wielowiązkowy (ang. *MultiBeam Sonar System*)
ROV	–	Zdalnie Sterowany Pojazd Podwodny (ang. *Remotely Operated Vehicles*)
RTD	–	technika tzw. obrotowej transmisji kierunkowej (ang. *Rotational Directional Transmission*)
SIS	–	Morki System Informacji Przestrzennej (ang. *Seafloor Information System*)
SAR	–	radar z syntetyczną aperturą (ang. *Synthetic Aperture Radar*)
SAS	–	sonar boczny z syntetyczną aperturą (ang. *Synthetic Aperture Sonar*)
SFFD	–	metoda odtwarzania kształtu z ogniskowania (ang. *Shape from Focus and Defocus*)
SFM	–	metoda odtwarzania kształtu z ruch (ang. *Shape from Motion*)
SFS	–	metoda odtwarzania kształtu z odcienia szarości (ang. *Shape from Shading*)
SFT	–	metoda odtwarzania kształtu z tekstury (ang. *Shape from Texture*)
TVG	–	Zasięgowa Regulacja Wzmocnienia (ang. *Time Varied Gain*)
UTM	–	cylindryczne odwzorowanie kartograficzne Merkatora (ang. *Universal Transverse Mercator*)
VRML	–	język opisu wirtualnej rzeczywistości (ang. *Virtual Reality Modeling Language*)
X3D	–	Język VRML wersja 3.0 (ang. *Extensible 3D*)

1. Wstęp

1.1. Wprowadzenie

Szybki rozwój technologii informacyjnych pozwala w chwili obecnej na szybkie przetwarzanie dużych ilości danych w czasie rzeczywistym, wykorzystywanych w różnych dziedzinach zarówno nauki, jak i przemysłu czy administracji. Akwizycja i przetwarzanie danych jest jednym z zasadniczych zadań i funkcji współczesnych systemów informacyjnych. Różnorodność i bogactwo danych występujących w wielu dziedzinach, jak np. w monitoringu środowiska, telekomunikacji, marketingu, medycynie, itp., może doprowadzić do chaosu informacji, co czyni zbiór informacji nieużytecznym. Przetworzone dane mogą być gromadzone w specjalizowanych systemach informacji przestrzennej w postaci geometrycznych i topologicznych baz danych i wykorzystywane w procesach podejmowania decyzji i kreowania strategii rozwoju. Zadaniem systemu informacyjnego jest więc właściwe, logiczne uporządkowanie danych, likwidacja nadmiaru informacji, integracja danych różnych typów i formatów oraz udostępnienie mechanizmów analizy i prezentacji informacji. Współczesne systemy informacyjne budowane w oparciu o narzędzia zarządzania bazami danych dają duże możliwości w dziedzinie opisu obiektów i zachodzących pomiędzy nimi relacji. Natomiast graficzna prezentacja obiektów umożliwia ukazanie lokalizacji obiektów oraz ich wzajemnych relacji [93]. Celem rozprawy jest opracowanie algorytmów rekonstrukcji kształtu dna morskiego na podstawie danych z sonaru bocznego oraz metod trójwymiarowej wizualizacji obiektów podwodnych w

Morskim Systemie Informacji Przestrzennej, jako ostatnich etapów przetwarzania danych hydroakustycznych.

Hydroakustyczne metody badań zarówno dna morskiego jak i toni wodnej znajdują szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach eksploracji środowiska morskiego (m. in. w badaniach hydrograficznych, geomorfologicznych, nawigacyjnych, parametrów oceanograficznych, zasobów środowiska morskiego, itp.). Na podkreślenie zasługuje tutaj szybkość gromadzenia i przetwarzania danych, duży obszar zasięgu, elastyczność oraz niskie koszty [23, 69, 93, 104]. Zastosowanie w ostatnich latach sonarów bocznych oraz wielowiązkowych, wraz z rozwojem metod szybkiej transmisji danych, przyczyniło się do przełomu w rozwoju cyfrowych metod batymetrii morskiej. Znacząco wpłynęło również na wprowadzenie i rozwój technik trójwymiarowej wizualizacji rozległych i rozproszonych obiektów podwodnych, które znajdują zastosowanie w systemach GIS (ang. *Geographic Information System*), ECDIS (ang. *Electronic Chart Display and Information System*) i innych [15, 61, 92, 106].

Oprócz konwencjonalnych metod obserwacji i charakteryzowania obiektów podwodnych poprzez przetwarzanie sygnałów echa z echosond jednowiązkowych, w ostatnich latach nabrały szczególnego znaczenia tzw. obserwacje szerokokątne (ang. *swath scan*) realizowane za pomocą sonarów bocznych i sonarów wielowiązkowych, które dzięki wielokierunkowej obserwacji szerokokątnej dna, przy jednoczesnym utrzymaniu wysokiej rozdzielczości kątowej, pozwalają na doskonałą batymetrię i obrazowanie dna morskiego z odbieranych sygnałów echa [62, 88].

Stosowane dotychczas metody wizualizacji pozwalały na różnorodne formy prezentacji dwuwymiarowej obiektów podwodnych i całych obszarów hydrosfery (włączając w to również dno morskie), takie jak echogramy, zobrazowania typu A, B, M i P [16, 82]. Zobrazowania te uzyskiwano w wyniku przetwarzania sygnałów echa od obiektów podwodnych, zwykle w kolejnych transmisjach sonaru lub echosondy. Ostatnim etapem rozwoju tych metod jest wprowadzenie algorytmów śledzących zmiany położenia i zachowania się celów (ang. *tracking algorithms*), co znalazło zastosowanie w metodach estymacji populacji i rozmiaru ryb pelagicznych [81, 94].

Systemy hydroakustyczne wyposażone w sonar boczny pozwalają, z natury swego funkcjonowania, na generowanie dwuwymiarowych obrazów reprezentujących amplitudę sygnału odbieranego od kolejnych fragmentów dna z bardzo dużą rozdzielczością, która pozwala na uzyskiwanie jakości obrazów zbliżonych do fotografii. W latach osiemdziesiątych poprzedniego wieku podjęto próby rekonstrukcji

kształtu dna morskiego na podstawie danych z sonarów bocznych. Współczesne techniki tworzenia trójwymiarowych obrazów dna można podzielić na dwie grupy. Pierwsza – sprzętowa – polega na udoskonalaniu konstrukcji przetwornika sonaru bocznego [56]. Druga – programowa – polega na algorytmicznym odtwarzaniu trzeciego wymiaru na podstawie wizualnej głębi dwuwymiarowego zobrazowania sonaru [25, 26, 38]. Podejście takie jest słuszne tylko dla wysokich częstotliwości pracy sonarów, gdzie rozchodzenie się fali akustycznej można z dobrym przybliżeniem aproksymować zasadami optyki geometrycznej. Niniejsza rozprawa prezentuje podejście programowe do zagadnienia rekonstrukcji dna morskiego.

Z kolei systemy hydroakustyczne wyposażone w sonary wielowiązkowe pozwalają na podstawie transmisji pojedynczego sygnału zmierzyć głębokość dla wielu punktów batymetrycznych jednocześnie, ułożonych poprzecznie do kierunku przemieszczania się statku. W wyniku takich pomiarów uzyskuje się obraz dna z bardzo dużą rozdzielczością przestrzenną [36, 65]. Systemy te potrafią również dokonywać pomiaru zdolności rozpraszania wstecznego (ang. *backscattering*), dostarczając danych do produkcji map charakteryzujących rodzaj dna morskiego [69].

Ostatnim etapem przetwarzania danych hydroakustycznych jest ich wizualizacja. Przełomem w wizualizacji rozległych i rozproszonych obiektów podwodnych, takich jak dno morskie i ławice ryb może stać się zastosowanie języków opisu wirtualnej rzeczywistości. Szczególnie przydatny wydaje się tu być język VRML (ang. *Virtual Reality Modeling Language*), który obok typowych aplikacji w grafice komputerowej znalazł również zastosowanie w wielu innych dziedzinach, jak np. w chemii [28], medycynie [50], astronomii [27], geografii [86] i nawigacji [40].

Pozyskiwanie oraz przetwarzanie i prezentacja informacji o środowisku morskim staje się nieodzownym elementem szeroko rozumianej problematyki zrównoważonego zarządzania zasobami w rejonach nadmorskich. Pogłębiona wiedza dotycząca tych rejonów, a w szczególności procesów występujących w strefach przybrzeżnych, będzie miała decydujący wpływ na dalsze ich funkcjonowanie. Z kolei bark wiedzy na temat struktury, skali i rodzaju zjawisk występujących na wymienionych obszarach, uniemożliwi w przyszłości zarządzanie kluczowymi czynnikami i zasobami odpowiedzialnymi za ich zrównoważony rozwój. Miarą wagi tej problematyki jest ujęcie jej w bieżącym VII Programie Ramowym Unii Europejskiej, w grupie programów tematycznych [55].

Trójwymiarowe obrazowanie rozległych i rozproszonych obiektów podwodnych w kontekście geograficznym jest szczególnie istotne w badaniach hydrograficznych oraz w różnych aplikacjach morskich systemów informacyjnych. Badanie takie są również istotnym elementem programów badawczych w ramach wielu projektów o zasięgu europejskim i światowym.

1.2. Tezy pracy

Głównym celem niniejszej pracy doktorskiej było opracowanie algorytmów trójwymiarowej rekonstrukcji kształtu dna morskiego z echogramów uzyskanych w trakcie przeszukiwań akustycznych sonarem bocznym. Drugim celem pracy było stworzenie systemu interaktywnych trójwymiarowych scen wirtualnych dla wybranych obiektów podwodnych (rozległych i rozproszonych) oraz wizualizacja tych scen z zapewnieniem możliwości udostępniania ich w sieci Internet.

W tym kontekście tezy pracy zostały sformułowane następująco:

1. *Zastosowanie języków opisu wirtualnej rzeczywistości w postaci interaktywnych trójwymiarowych scen tworzonych w wyniku przetwarzania sygnałów echa daje znacznie większe możliwości obserwacji, analizy i obrazowania obiektów podwodnych i całych obszarów środowiska morskiego, niż dotychczas stosowane techniki wydobywania informacji bazujące jedynie na bezpośrednim przetwarzaniu sygnałów echa.*
2. *Zastosowanie opracowanych algorytmów trójwymiarowej rekonstrukcji kształtu dna morskiego pozwala na uzyskiwanie trójwymiarowych obrazów dna morskiego z dwuwymiarowych echogramów otrzymywanych z sonaru bocznego.*

Zaproponowane algorytmy tworzące wirtualne sceny z danych hydroakustycznych oraz metoda obserwacji i obrazowania obiektów podwodnych posiadają zalety w odniesieniu do celów rozproszonych, jak i rozległych. Szczególnie w pierwszym przypadku (głównie ławic i warstw rozproszonych ryb pelagicznych) pozwalają nie tylko na ich bezpośrednią wizualizację, lecz również na obrazowanie i monitoring ich zachowania i migracji. W drugim przypadku, odnoszącym się do dna morskiego, mają

zastosowanie do obrazowania obiektów położonych na dnie lub nawet zagrzebanych w dnie morskim, jak np. wraki, miny i inne.

Obserwacja trójwymiarowa pozwala na bezpośrednią prezentację celów rozproszonych, jak wspomniane już ławice ryb pelagicznych, czego nie umożliwiają metody prezentacji dwuwymiarowej będące rezultatem bezpośredniej wizualizacji rezultatów otrzymanych z analizy sygnałów. Ograniczenie to dotyczy również nawet najbardziej wyrafinowanych algorytmów śledzenia celów w klasycznych systemach akwizycji i przetwarzania danych hydroakustycznych.

1.3. Przegląd rozdziałów

Poniżej przedstawiono pokrótce charakterystykę kolejnych rozdziałów. I tak rozdział 2 wprowadza w zagadnienia związane z akwizycją i wizualizacją danych pochodzących z systemów hydroakustycznych. Zaprezentowano w nim fenomenologię rozchodzenia się fal akustycznych w środowisku wodnym, przeanalizowano równanie sonaru i jego parametry, jak również przybliżono wybrane modele rozpraszania fal akustycznych na dnie morskim. W dalszej części zostały przedstawione systemy hydroakustyczne. Omówiono sensory wchodzące w skład systemów hydroakustycznych (echosondy jednowiązkowe, sonary boczne, sonary wielowiązkowe), klasyfikując je pod względem ich przeznaczenia i budowy. Przedstawiono zagadnienia związane ze specyfiką gromadzonych przez te sensory danych oraz klasyczne metody ich wizualizacji.

Rozdział 3 jest wprowadzeniem w problematykę trójwymiarowej rekonstrukcji dna morskiego z dwuwymiarowych obrazów pochodzących z sonarów bocznych. Ze względu na podobieństwa zagadnień rozchodzenia się fali akustycznej w środowisku wodnym oraz zjawisk zachodzących w optyce, w rozdziale tym szczególną uwagę zwrócono na techniki odtwarzania trzeciego wymiaru wywodzące się z grafiki komputerowej. Ideą zaprezentowanych technik jest umiejętne pozyskiwanie informacji o obiekcie w celu stworzenia jego numerycznego trójwymiarowego modelu.

Rozdział 4 zawiera przegląd metod optymalizacji w zagadnieniu odwrotnym, jakim jest rekonstrukcja dna morskiego. Metody te zostały wykorzystane w celu optymalizacji procesu odtwarzania trzeciego wymiaru z obrazów sonarowych. W rozdziale tym, zastosowano algorytmy optymalizacji zaimplementowane w środowisku MATLAB.

Rozdział 5 zawiera opis opracowanych dla obrazów z sonaru bocznego algorytmów mających na celu odtwarzanie kształtu dna morskiego. Dane pochodzące z sonaru bocznego przedstawiane są typowo w postaci dwuwymiarowych obrazów w skali szarości. Intensywność poszczególnych pikseli w takim obrazie odpowiada natężeniu odbitej fali dźwiękowej od powierzchni dna, które zależy głównie od kąta padania fali, nachylenia oraz rodzaju (piasek, muł, itp.) powierzchni odbijającej. Opracowane algorytmy są modyfikacją podejścia zastosowanego w technice SFS (ang. *Shape from Shading*) pozwalającej na odtwarzanie kształtu dna morskiego. Wyniki symulacji uzyskano przy zastosowaniu teorii Lamberta i Gaussa opisujących problem rozpraszania dźwięku na nierównomiernościach dna morskiego. W drugiej części rozdziału przedstawiono weryfikację opracowanych algorytmów dla danych rzeczywistych.

W rozdziale 6 scharakteryzowano języki opisu wirtualnej rzeczywistości VRML, GeoVRML, X3D oraz przedstawiono zalety jakie daje ich zastosowanie do trójwymiarowej wizualizacji danych pochodzących z systemów hydroakustycznych. Ponadto zaprezentowano trójwymiarową wizualizację w języku VRML przemieszczania się ryb pelagicznych w wiązce echosondy oraz trójwymiarową wizualizację dna morskiego wraz z obiektami na dnie. Otrzymane wyniki porównano z wizualizacją dna morskiego uzyskaną za pomocą alternatywnych dla języków opisu wirtualnej rzeczywistości technologii, takich jak: OpenGL, Java3D oraz JOGL (Java OpenGL).

Rozdział 7 zawiera wnioski oraz podsumowanie wyników pracy.

2. Akwizycja danych pochodzących z systemów hydroakustycznych

2.1. Wprowadzenie

Zadaniem systemów hydroakustycznych jest obserwacja obiektów znajdujących się w środowisku wodnym, jak i samego środowiska. Środowisko wodne, w którym wykorzystywane są systemy hydroakustyczne, to oceany, morza, wody śródlądowe i inne rozległe akweny. Obserwowane zaś obiekty, to fauna i flora, przeszkody nawigacyjne, podwodne budowle inżynieryjne, rurociągi, kable podwodne i inne urządzenia związane z eksploatacją zasobów mórz i oceanów. Obserwacja środowiska wodnego prowadzona jest głównie w celach poznawczych oraz z myślą o ochronie naturalnych walorów tego środowiska i jego racjonalnym wykorzystaniu gospodarczym [88]. Działalność tę określa się mianem akustycznego monitoringu środowiska morskiego [93].

Dobre warunki propagacji fal akustycznych w morzu, dzięki relatywnie małemu ich tłumieniu, umożliwiają penetrację środowiska morskiego oraz jego obrazowanie akustyczne. Systemy akustyczne monitoringu środowiska morskiego wykorzystują zjawisko rozproszenia fal akustycznych na niejednorodnościach fizycznych ośrodka wodnego, do wydobywania informacji o właściwościach samego środowiska, jak i obiektów podwodnych, włączając w to również dno i powierzchnię morza [93].

2.2. Propagacja fali akustycznej w środowisku wodnym

Rozchodzenie się dźwięku w wodzie zależy od mechanicznych właściwości ośrodka, a w szczególności od bezwładności i podatności elementarnej objętości ośrodka. W wyniku przyspieszenia powstającego wskutek reakcji na bezwładność ośrodka, na elementarnej objętości generowana jest siła, co prowadzi w efekcie do powstania na niej naprężenia, związanego z przyłożoną siłą i podatnością ośrodka. Energia, związana z tymi oddziaływaniami, składa się zarówno z energii kinetycznej ruchu jak i zmagazynowanej energii potencjalnej, reprezentowanej przez wewnętrzne naprężenia. Propagacja tych efektów ruchowo-naprężeniowych – mających sens zaburzenia stanu równowagi ośrodka – prowadzi do generacji podłużnej fali sprężystej, zagęszczeń i rozrzedzeń materii ośrodka.

Propagację zaburzenia opisuje się w akustyce przy pomocy równania falowego, wiążącego zmiany w czasie i przestrzeni wielkości charakteryzujących pole akustyczne, a w szczególności: ciśnienia panującego w ośrodku p, prędkości cząstki akustycznej v i gęstości ośrodka ρ [93]. Równanie falowe, wraz z warunkami brzegowymi i początkowymi, stanowi model matematyczny rozchodzenia się dźwięku. Model taki jest najprostszy w przypadku cieczy wyidealizowanej, traktowanej jako ośrodek jednorodny (ciągły), izotropowy, nieruchomy w stanie nie zaburzonym oraz bezstratny. Równanie falowe dla takiej cieczy wyprowadza się z trzech podstawowych równań mechaniki ośrodków ciągłych, a mianowicie: równań zachowania masy i zachowania pędu, oraz równania stanu [93]. Są to równania różniczkowe cząstkowe-skalarne i wektorowe, a ich złożoność rzutuje na możliwość rozwiązania wynikowego równania falowego i dlatego upraszcza się je zazwyczaj maksymalnie, ograniczając do niezbędnego minimum liczbę uwzględnianych zjawisk fizycznych.

Dla źródła oscylującego, fala zawiera obszary zagęszczeń, gdzie ciśnienie przewyższa pierwotny stan równowagi oraz obszary rozrzedzeń, o ciśnieniu mniejszym od wielkości oryginalnej. Obszary te przesuwają się od źródła ze stałą prędkością c, określoną przez własności ośrodka. W przypadku ośrodka jednorodnego, maksima ciśnienia odpowiadające największym zagęszczeniom materii ośrodka, mają postać koncentrycznych powierzchni sferycznych otaczających źródło fali.

W przypadku źródeł drgań harmonicznych (sinusoidalnych), wspomniane wyżej powierzchnie sferyczne, są równoodległe, z odstępem równym długości fali akustycznej w wodzie λ. Fale, które propagują z symetrią sferyczną nazywane są falami

sferycznymi, a równania opisujące ich własności czasowo-przestrzenne, są tzw. równaniami fali sferycznej.

Dla dostatecznie dużych odległości od źródła i dostateczne małych rozmiarów obszaru rozważań, sferyczny front fali można przybliżyć płaszczyzną. Wtedy, równanie fali sferycznej upraszcza się do równania fali płaskiej, opisującego transmisję płaskich fal akustycznych [93].

Oczywiście, aproksymacja fali płaskiej nie obejmuje wszystkich przypadków propagacji fal akustycznych w morzu, jednakże w wielu sytuacjach jest ona ważna i pozwala na prosty opis zależności między fizycznymi własnościami ośrodka i parametrami fali akustycznej [93].

Dla przypadku jednowymiarowego, równanie fali płaskiej w ośrodku idealnym zapisać można w postaci [19]:

$$\frac{\partial^2 p_a}{\partial x^2} = c^{-2} \frac{\partial^2 p_a}{\partial t^2}, \tag{2.1}$$

gdzie p_a jest ciśnieniem akustycznym, $c = E/\rho$ jest prędkością propagacji fali w ośrodku, E jest modułem podatności ośrodka, natomiast ρ jest gęstością ośrodka.

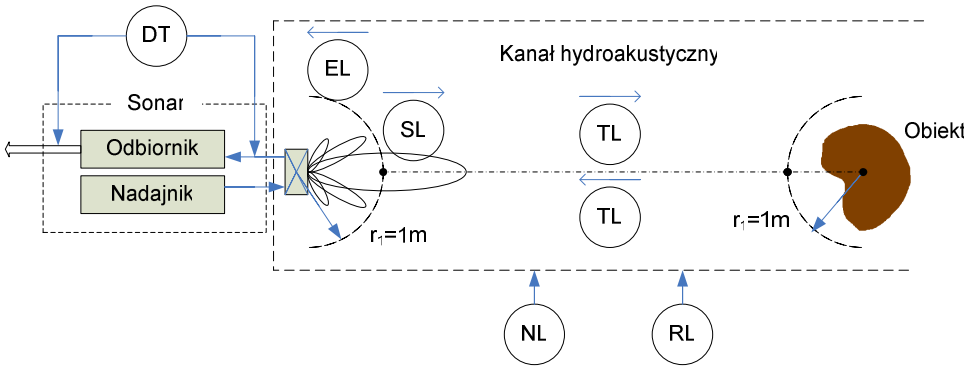
Zależność ciśnienia akustycznego p_a od prędkości cząstkowej drgań v, wynikająca z drugiej zasady Newtona, pozwala na wyrażenie charakterystycznej impedancji akustycznej ośrodka dla fali płaskiej: $Z_0 = \rho c$, która stanowi syntetyczną charakterystykę akustyczną ośrodka [93].

Natomiast średnia gęstość mocy fali akustycznej (moc przypadająca na powierzchnię jednostkową) jest proporcjonalna do wartości średniej iloczynu ciśnienia i prędkości cząstkowej fali $< v p_a >$ i nosi nazwą natężenia akustycznego fali, które można wyrazić w postaci: $I =< p_a^2 > / Z_0$ [88], gdzie znak <> oznacza uśrednianie w czasie.

Dla fal harmonicznych, których zapis przestrzenno-czasowy można wyrazić w postaci $p_a(t,x) = P\sin(\omega t - kx)$, gdzie P jest amplitudą ciśnienia, a $k = 2\pi/\lambda$ jest stałą falową, natężenie chwilowe fali $I_{(x)}$ oscyluje z częstotliwością 2ω, pomiędzy wartością zero, a P^2/Z_0. Natomiast, zdefiniowane wyżej natężenie I ma sens natężenia średniego, otrzymanego przez całkowanie wartości chwilowej $I_{(x)}$ w okresie drgań [93].

2.3. Równanie sonaru i jego parametry

Transmisję i odbiór sygnałów w systemie hydroakustycznym, przedstawionym schematycznie na rysunku 2.1, opisać można syntetycznie przy pomocy równania sonaru [107]. Równanie to, ujmuje w postaci logarytmicznej, podstawowe zależności między głównymi parametrami systemu, co pozwala zarówno na analizę systemów, jak i ich projektowanie. Równanie sonaru przedstawia bilans energetyczny parametrów charakteryzujących główne bloki czy też moduły systemu w trzech kategoriach, a mianowicie związane z: urządzeniem hydroakustycznym (sonarem), kanałem hydroakustycznym (ośrodkiem) i obiektem.



Rys. 2.1. Podstawowy schemat systemu hydrolokacyjnego

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

$$SL = 10\log\frac{I_0}{I_1}, \tag{2.2a}$$

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

Alternatywnie do wzoru definicyjnego (2.2a), pozwalającego na obliczenie poziomu źródła z pomiaru natężenia lub ciśnienia osiowego, poziom źródła wyznaczyć można również z wzoru obliczeniowego, jeśli znane są parametry techniczne nadajnika sonaru, a mianowicie:

$$SL = 171 + 10\log P_e + 10\log\eta/100 + DI, \tag{2.2b}$$

gdzie P_e jest mocą (elektryczna) nadajnika sonaru $[W]$, η jest sprawnością elektroakustyczną przetwornika nadawczego $[\%]$, natomiast DI (ang. *Directivity Index*) jest wskaźnikiem kierunkowości przetwornika $[dB]$ zdefiniowanym, jako:

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

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

Straty energii fali związane z rozszerzaniem jej frontu falowego i tłumieniem w trakcie propagacji w ośrodku wodnym, syntetycznie ujmuje parametr zwany stratami transmisji TL (ang. *transmission loss*), który jest logarytmiczną miarą stosunku natężenia zmierzonego na odległości r od źródła, względem natężenia w odległości jednostkowej $(1m)$:

$$TL = 10\log\frac{I_{(r)}}{I_{(r1)}}. \tag{2.4}$$

Przy założeniu najczęściej występującego w praktyce (przynajmniej dla głębszych wód oceanicznych) sferycznego modelu propagacji fali, 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: $TL_t = \alpha r$ [103]. W rezultacie straty transmisji, dla sferycznego modelu propagacji można zapisać w postaci:

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

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 i zjawiska termiczne.

Fenomenologia szumów falowania, opisana jest słynnymi krzywymi Knudsena, reprezentującymi zależność spektralnego poziomu szumu od częstotliwości, w której parametrem jest stan morza [103]. Spektralny poziom tych szumów spada wraz z częstotliwością w tempie około 5 decybeli na oktawę. Szumy te dominują w zakresie niższych częstotliwości - do ok. 50kHz. Z kolei w zakresie wyższych częstotliwości – powyżej 100kHz, decydującą role odgrywa szum termiczny, którego spektralny poziom, zgodnie z prawem Stefana-Boltzmanna, rośnie z częstotliwością w tempie równym 6 decybeli na oktawę, co oznacza kwadratową zależność gęstości widmowej mocy szumu od częstotliwości [103].

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

$$NL = 10\log\frac{I_n}{I_1}. \tag{2.6}$$

Poziom szumów NL, który określony jest w paśmie odbiornika W, zależny jest od spektralnego poziomu szumu SPL (ang. *spectrum noise level*), który jest logarytmiczną miarą gęstości widmowej mocy szumu w paśmie jednostkowym 1Hz. W zależność między poziomem szumu NL i spektralnym poziomem SPL wpisuje się zwykle nie tylko pasmo odbiornika 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 [103]:

$$NL = SPL + 10\log W + DI. \tag{2.7}$$

Rewerberacja, w odróżnieniu od szumu, jest zakłóceniem skorelowanym z sygnałem nadawanym, powstaje bowiem wskutek rozproszenia tego sygnału na niejednorodnościach akustycznych ośrodka. W związku z tym, znacznie trudniej jest wyeliminować rewerberację z sygnału odebranego, albowiem zwykła filtracja pasmowa, która w przypadku szumu skutecznie ogranicza jego poziom, niewiele daje, ponieważ widmo rewerberacji jest wąskopasmowe i praktycznie pokrywa się z widmem sygnału nadawanego [67].

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

$$RL = 10\log\frac{I_R}{I_1}. \tag{2.8}$$

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 [103]:

$$RL_V = SL - \left(20\log r + 2\alpha r\right) + 10\log\left(cL_S/2\right) + 10\log\Psi + S_V, \tag{2.9a}$$

$$RL_S = SL - \left(30\log r + 2\alpha r\right) + 10\log\left(cL_S/2\right) + 10\log\Phi + S_S, \tag{2.9b}$$

gdzie S_V, S_S jest siłą wstecznego rozproszenia objętościowego, lub powierzchniowego, Ψ, Φ jest całkową równoważną wiązką stożkową przetwornika sonaru dla rewerberacji objętościowych, lub powierzchniowych, L_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 natężenie padającego w tym samym punkcie:

$$TS = 10\log\frac{I_{bs}}{I_i}. \tag{2.10}$$

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 poprawności detekcji [103]:

$$DT = 10\log\frac{P_s}{P_n}. \tag{2.11}$$

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

Po zdefiniowaniu parametrów sonaru i przyporządkowaniu ich odpowiednim częściom składowym całego systemu hydroakustycznego, możemy sformułować problem detekcji obiektów, jak również innych bardziej skomplikowanych funkcji ich monitoringu, 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:

$$SL - 2TL + TS = NL + DT\,, \tag{2.12}$$

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

Jak łatwo zauważyć, wyrażenie po lewej stronie równania sonaru (2.12) 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 sonaru (2.12) 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 (2.12), gdyż zasięg zawarty jest w stratach transmisji TL zgodnie z równaniem (2.5).

2.4. Współczynnik odbicia

W wielu zagadnieniach teoretycznych współczynnik odbicia fali rozważa się dla zjawiska odbicia fali płaskiej. Dla takiego założenia warunki brzegowe w równaniu falowym (2.1) przyjmują postać:

$$\left[p_i\left(t - \frac{z}{c_1}\right) + p_r\left(t + \frac{z}{c_1}\right)\right] = p_t\left(t - \frac{z}{c_2}\right), \tag{2.13}$$

$$\left[v_{zi}\left(t - \frac{z}{c_1}\right) + v_{zr}\left(t + \frac{z}{c_1}\right)\right] = v_{zt}\left(t - \frac{z}{c_2}\right). \tag{2.14}$$

Wówczas rozwiązanie równania falowego z zastosowaniem prawa Snella, obowiązującego także w optyce [77], ma postać:

$$R_{12} = \frac{\rho_2 c_2 \cos\theta_1 - \rho_1 c_1 \cos\theta_2}{\rho_2 c_2 \cos\theta_1 + \rho_1 c_1 \cos\theta_2}, \tag{2.15}$$

gdzie $\rho_1 c_1$ jest impedancją pierwszego ośrodka, $\rho_2 c_2$ jest impedancją drugiego ośrodka, θ_1 jest kątem padania, natomiast

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{c_2}{c_1}\sin\theta_1\right). \tag{2.16}$$

Aczkolwiek otrzymany wzór jest słuszny jedynie dla fali płaskiej, to w wielu przypadkach stosowanych w praktyce, można go stosować, także dla fali kulistej w polu dalekim, co ma miejsce w większości przypadków sondowań sonarowych.

Chociaż poprawne rozwiązanie równania falowego (2.1), dla przypadków ogólnych [77], prowadzi do modyfikacji równania (2.15), to wzór ten jest w praktyce słuszny także dla sytuacji nierównomiernej powierzchni, gdy stosunek długości fali padającej, do średniego rozmiaru nierównomierności jest mały. Uwaga ta pozwala stosować prawa optyki geometrycznej do zagadnień hydroakustyki, gdy częstotliwość pracy systemu jest wystarczająco duża. W praktyce oznacza to częstotliwości powyżej 100kHz, dla których długość fali jest rzędu 1cm. Jednocześnie, można zauważyć, że większość współczesnych sonarów bocznych pracuje na częstotliwościach powyżej 200kHz, aby zapewnić dużą rozdzielczość zobrazowania.

2.5. Modele rozpraszania wstecznego

Modelowanie rozpraszania fal akustycznych na dnie pomimo złożoności zjawiska pozwala w dużym przybliżeniu uzyskać przestrzenny rozkład pola rozproszonego [41], lub natężenie i kształt impulsu echa [84]. Jednak podstawową wielkością obliczaną w modelach zjawiska rozpraszania, charakteryzującą energetyczne własności odbijające dna, jest wartość rozpraszania, lub siły rozpraszania wstecznego, jako funkcji parametrów geoakustycznych, częstotliwości fali padającej, parametrów opisujących nierówności powierzchni oraz kątów padania i rozpraszania [64].

Modele współczynnika rozpraszania możemy podzielić na empiryczne i fizyczne. W modelach empirycznych relacja opisująca współczynnik rozpraszania została

określona na podstawie dopasowania jego zależności funkcyjnej od kąta padania, lub wybranych parametrów geoakustycznych do wartości współczynnika zmierzonej dla dna o znanych parametrach. Słabością modeli empirycznych jest to, że nie wywodzą się one z procesów fizycznych zachodzących podczas interakcji fali akustycznej z dnem. Modele fizyczne, bazujące na procesach zachodzących podczas rozpraszania dźwięku oraz na geoakustycznych własnościach dna, pozwalają, na podstawie danych pomiarowych, na odtworzenie metodą ekstrapolacji parametrów rozproszonego sygnału dla dowolnych kątów padania i rozpraszania, częstotliwości i typów dna. W modelach tych stopień i rodzaj pofałdowania powierzchni dna oraz częstotliwość padającej fali wyznaczają sposób modelowania pola rozproszonego [100].

2.5.1. Model Lamberta i jego modyfikacje

Do najbardziej uproszczonej grupy modeli empirycznych rozpraszania fal akustycznych na dnie można zaliczyć zapożyczony z optyki geometrycznej model Lamberta [17]. Model ten opisuje zależność przekroju czynnego na rozpraszanie σ_s od kąta padania, kąta obserwacji (rozproszenia) i stałej związanej z rodzajem dna [100] i ma postać:

$$\sigma_s = \mu_L \cos\theta_i \cos\theta_s, \tag{2.17}$$

gdzie μ_L jest stałą Lamberta, θ_i jest kątem padania, a θ_s jest kątem obserwacji fali rozproszonej. Przy założeniu geometrii monostatycznej kąty padania i rozproszenia są sobie równe i przekrój rozpraszania σ_s na rozproszenie wstecz przyjmuje postać [100]:

$$\sigma_s = \mu_L \cos^2\theta_i. \tag{2.18}$$

Współczynnik μ_L jest interpretowany, jako przekrój rozpraszania na rozpraszanie dla padania pionowego. Przytoczona reguła może być stosowana dla kątów padania od około 50º do 80º i jest niezależna od częstotliwości fali padającej. Wiele prac zostało poświęconych weryfikacji eksperymentalnej modelu Lamberta dla fali padającej o częstotliwości z zakresu 1kHz do 200kHz [45]. Wartość współczynnika μ_L zdefiniowanego w skali logarytmicznej jako $10\log\mu_L$ dla rozpraszania na dnie skalistym wynosi w przybliżeniu -18dB, na dnie piaszczystym -31dB, a na dnie mulistym -37dB. Model Lamberta może być stosowany tylko dla przypadku rozpraszania niekoherentnego, tzn. kiedy wartość parametru Rayleigha P_R jest dużo większa od jedności [100].

$$P_R \equiv 2k_i \langle h \rangle \cos\theta_i , \tag{2.19}$$

gdzie k_i jest liczbą falową fali padającej, $\langle h \rangle$ jest średniokwadratową wysokością powierzchni, θ_i jest kątem padania fali akustycznej.

Próby dopasowania wyników pomiarów rozpraszania wstecznego do modelu Lamberta doprowadziły do licznych jego modyfikacji. W modelu Lamberta-Mackenziego [74] zastąpiono kwadrat cosinusa kąta padania potęgą rzędu n ($1 \le n \le 2$). Dalszą modyfikacją było dodanie do prawa Lamberta-Mackenziego progowej wartości przekroju czynnego na rozpraszanie σ_0 będącej wynikiem rozpraszania na niejednorodnościach objętościowych dna [85], otrzymując:

$$\sigma_s = \sigma_0 + \mu_L \cos^n \theta_i . \tag{2.20}$$

Dalszym rozwinięciem modelu Lamberta jest model Del Balzo [31] wiążący przekrój czynny na rozpraszanie wsteczne ze średnim rozmiarem cząstek osadu dennego M_ϕ [100], o postaci:

$$\sigma_{bs} = \alpha_k(M_\phi) + \mu_L(M_\phi)\cos^2\theta_i , \tag{2.21}$$

gdzie $\alpha_k(M_\phi)$ jest współczynnikiem korygującym dla dużych kątów padania.

Model Lamberta zakłada istnienie tylko pola dyfuzyjnego. Rozszerzeniem tego ograniczenia o dodanie pola koherentnego jest model, w którym do modelu Lamberta członu związanego z odbiciami od powierzchni płaskich o wymiarach liniowych dużo większych od długości fali odbicia. Przekrój czynny na rozpraszanie wsteczne jest równy [100]:

$$\sigma_{bs}(\theta) = \mu_L \cos^2\theta_i + \frac{\nu_F}{\cos^4\theta_i}\exp\left(-\frac{\tan^2\theta_i}{2\delta_f^2}\right), \tag{2.22}$$

gdzie czynnik ν_F jest zależny od rayleighowskiego współczynnika odbicia i odchylenia standardowego kąta nachylenia powierzchni rozpraszającej δ_f.

2.5.2. Model Novariniego i Caruthersa

Model rozpraszania na nierównym dnie przedstawiony przez Novariniego i Caruthersa [83], będący rozwinięciem modelu Brekhovskicha i Lysanova [18], zakłada dwuskalową postać powierzchni dna złożonego z płaszczyzn o rozmiarach liniowych większych od długości padającej fali oraz mikronierówności pokrywających te powierzchnie. Podstawowymi założeniami modelu jest przyjęcie gaussowskiego

rozkładu nachyleń powierzchni rozpraszających zawartych w obszarze śladu wiązki akustycznej oraz umiejscowienie układu nadawczo-odbiorczego w polu dalekim nadźwiękowionego obszaru dna. Dodatkowo przyjęto, że rozpraszanie zachodzi na izotropowo rozłożonych niejednorodnościach osadu dennego. Współczynnik rozpraszania wstecznego m_{bs} jest sumą trzech składowych [100]:

$$m_{bs} = m_f + m_\mu + m_v, \tag{2.23}$$

gdzie m_f jest współczynnikiem rozpraszania na średnioskalowych elementach powierzchni dna posiadających mikroskalowe nierówności (wymiary liniowe nierówności dużoskalowych wielokrotnie przewyższają wymiar liniowy śladu wiązki akustycznej na dnie), m_μ jest współczynnikiem odpowiedzialnym za rozproszenie na mikronierównościach, a m_v określa rozpraszanie na niejednorodnościach objętościowych dna. Współczynnik m_f jest iloczynem koherentnego współczynnika odbicia od mikronierówności M i parametru F opisującego udział powierzchni średnioskalowych w rozpraszaniu [100].

$$m_f = M\left(k_i, \sigma_\mu\right) F\left(\delta_f, \theta_l\right), \tag{2.24}$$

gdzie k_i jest liczbą falową fali padającej, σ_μ jest średniokwadratową wartością wysokości mikroskalowych nierówności, δ_f jest odchyleniem standardowym nachylenia średnioskalowych elementów powierzchni dna, a θ_l jest lokalnym kątem padania mierzonym od normalnej do powierzchni w punkcie rozproszenia [100].

Współczynnik rozpraszania m_μ opisujący pole dyfuzyjne powstałe przy rozpraszaniu na mikronierównościach został wyprowadzony na podstawie teorii rozpraszania Bragga z uwzględnieniem teorii rachunku zaburzeń [100].

$$m_\mu = \pi^{-2} R_0^2 k_i^4 \cos^4\theta_l W\left(\frac{k_i}{\pi}\sin\theta_l\right), \tag{2.25}$$

gdzie W jest gęstością widmową wysokości pofałdowanej powierzchni [100].

Współczynnik rozpraszania objętościowego m_v jest zdefiniowany jako [100]:

$$m_v = \mu_v V\left(\theta_l - \alpha_{f0}\right), \tag{2.26}$$

gdzie

$$V\left(\theta_l - \alpha_{f0}\right) = \frac{\cos^4\left(\theta_l - \alpha_{f0}\right)\left[1 - \sin\left(\theta_l - \alpha_{f0}\right)^2 / n_{wb}^2\right]^{1/2}\left(m + \sqrt{n_{wb}^2}\right)^4}{\left\{m\cos\left(\theta_l - \alpha_{f0}\right) + \left[n_{wb}^2 - \sin^2\left(\theta_l - \alpha_{f0}\right)\right]^{1/2}\right\}^4} \tag{2.27}$$

oraz

$$\mu_v = \frac{4m^2 n_{wb}\sigma_v}{k_i \delta \cos\alpha_{f0}\left(m+\sqrt{n_{wb}^2}\right)^4}, \tag{2.28}$$

gdzie $m = \rho_b / \rho_w$, $n_{wb} = c_w / c_b = n_0(1+i\delta)$, δ jest parametrem strat [100].

2.5.3. Inne modele rozpraszania wstecznego

Oprócz modyfikacji modelu Lamberta próbowano metodą dopasowania krzywej teoretycznej do wyników pomiarów otrzymać wyrażenie na przekrój czynny na rozpraszanie. Jednym z przykładów takiego postępowania jest praca Tuovila [102], w której na podstawie danych pomiarowych opublikowanych przez McKinneya i Andersona [66] opracowano model empiryczny estymujący siłę rozpraszania wstecznego w zależności od typu dna, częstotliwości i kąta padania fali akustycznej. Zależność funkcyjną sporządzono dla zakresu częstotliwości od 12,5kHz do 290kHz i dla danych pomiarowych zebranych w 16 miejscach położonych w strefie szelfowej wybrzeża Stanów Zjednoczonych [100]. Opracowany model rozróżnia tylko cztery podstawowe typy dna (muł, piasek, żwir, skała) i w sposób poprawny określa przekrój czynny na rozpraszanie wstecznego dla zbioru danych użytych do jego ekstrapolacji [100].

Sternlich i de Moustier [95] zaproponowali model rozpraszania na nierównym dnie łączący metodę Jacksona, Winebrennera i Ishimaru [64] dla rozpraszania powierzchniowego z metodami Stockhausena [96], Ivakina i Lysanowa [63] dla rozpraszania objętościowego. Rozpatrywane w modelu bliskie pionowemu padanie fali akustycznej na dno pozwoliło na ograniczenie obliczeń siły rozpraszania wstecznego do kątów padania nie przekraczających wartości 20º. Implikuje to redukcję zagadnienia rozpraszania na powierzchni do rozwiązania całki Helmholtza z zastosowaniem aproksymacji Kirchhoffa. Podstawowym założeniem modelu jest rozgraniczenie natężenia sygnału odbitego od pofałdowanej powierzchni $I_s(t)$ od rozpraszania zachodzącego na niejednorodnościach objętościowych osadu dennego $I_v(t)$ i dające w rezultacie całkowite natężenie fali rozproszonej $I(t)$, jako [100]:

$$I(t) = I_s(t) + I_v(t). \tag{2.29}$$

Kątowa zależność współczynnika rozpraszania na nieregularnej powierzchni m_s jest opisana wyrażeniem [64]:

$$m_s(\theta_i)=\begin{cases} R_\perp^2(8\pi\eta)^{-1}C_h^{-2/\eta}\Gamma(1/\eta) & \theta_i=0 \\ R_\perp^2\left(8\pi\cos^2\theta_i\sin^2\theta_i\right)^{-1}\int_0^\infty \exp\left(-qu^{2\eta}\right)J_0(u)u\,du & \theta_i>0 \end{cases}, \tag{2.30}$$

gdzie $R_\perp$ jest ciśnieniowym współczynnikiem odbicia od dna dla pionowego padania fali, $\eta=(\gamma/2)-1$, C_h jest stałą strukturalną, Γ jest funkcją gamma Eulera, $q=\cos^2(\theta_i)\sin^{-2}(\theta_i)C_h^2 2^{1-2\eta}k_i^{2(1-\eta)}$ i $J_0(u)$ jest funkcją Bessela zerowego rzędu, pierwszego rodzaju.

Natomiast współczynnik rozpraszania objętościowego jest równy [100]:

$$m_v(\theta_i)=\sigma_2 \upsilon_L(\theta_i)A^{-1}, \tag{2.31}$$

gdzie $A=2/(10\log_{10}e)$, σ_2 jest parametrem objętościowym, a funkcja $\upsilon_L(\theta_i)$ opisuje straty transmisyjne przy dwukrotnym przechodzeniu fali przez pofałdowaną powierzchnię rozdzielającą wodę od dna i cechującą się małym odchyleniem standardowym wysokości [100].

2.6. Modelowanie rozpraszania fali akustycznej na dnie

Modelowanie całkowitego natężenia fali rozproszonej na dnie $I(t)$ zakłada rozgraniczenie natężenia sygnału odbitego od pofałdowanej powierzchni $I_s(t)$ oraz rozpraszania zachodzącego na niejednorodnościach objętościowych osadu dennego $I_v(t)$, co można wyrazić następująco:

$$I(t)=I_s(t)+I_v(t)=\int_0^{2\pi}\int_{\phi(t-T,0)}^{\phi(t,0)}\left[d^2I_s+\int_{l(\phi,t-T)}^{l(\phi,t)}d^3I_v\right]. \tag{2.32}$$

Kąt $\phi(t,l)$ oznacza kąt padania fali akustycznej przedstawiony na rysunku 2.2, a który można opisać prostym wyrażeniem:

$$\cos(\phi(t,l))=\frac{H}{H+\frac{c_w t}{2}-\frac{lc_w}{c_s}}. \tag{2.33}$$

Podstawowe elementy d^2I_s i d^2I_v w równaniu (2.32) przedstawiane są w formie:

$$d^2I_s=I_0 D(\phi(t,0),\psi,\theta)m_s(\phi(t,0))\left[\frac{\exp(-2\alpha_w R)}{R^2}\right]^2 dS, \tag{2.34}$$

$$d^2 I_\upsilon = I_0 D(\phi(t,l),\psi,\theta) m_\upsilon(\phi(t,l)) \left[\frac{\exp(-2\alpha_w R)}{R^2}\right]^2 dS\,, \tag{2.35}$$

gdzie I_0 jest natężeniem sygnału transmitowanego, $D(\phi(t,0),\psi,\theta)$ jest charakterystyką kierunkową przetwornika, $\exp(-2\alpha_w R)/R^2$ oznacza straty ($R(t)=c_w t/2$) oraz $m_s(\phi(t,0))$ i $dm_\upsilon=(\phi(t,l))$ i stanowią odpowiednio powierzchnię i wielkość rozproszenia poprzecznego sekcji. Rozproszenie poprzeczne sekcji może zostać wybrane spośród różnych wyrażeń teoretycznych dostępnych w literaturze. W tym opracowaniu, powierzchnia rozpraszania poprzecznego sekcji $m_s(\phi(t,0))$ bazuje na przybliżeniu Kirchhoffa przyjętego za Jackson'em [64], przy założeniu gęstości spektralnej wartości mocy w postaci $W(K)=\beta K^{-\gamma}$:

$$m_s(\phi(t,l=0)) = \frac{|R_{12}(\phi=0)|^2}{8\pi\sin^2(\phi)\cos^2(\phi)} \int_0^\infty \exp(-qu^{2\alpha}) J_0(u) u du\,, \tag{2.36}$$

gdzie $R_{12}(\phi=0)$ oznacza wektor normalny na granicy dwóch ośrodków woda-dno, $\alpha=\gamma/2-1$ jest związana z wykładnikiem γ spektralnej ziarnistości oraz $q=\cos^2(\phi)\sin^{-2\alpha}(\phi)C_h^2 2^{1-2\alpha} k_a^{2(1-\alpha)}$. Wielkość profilu rozproszenia poprzecznego została przyjęta za Yamamoto i ma postać:

$$dm_\upsilon(\phi(t,l)) = \sigma_\upsilon \cos(\phi'(t,l)) T_{12}^2 T_{21}^2 \frac{\sin^2(\phi'(t,l))\cos^2(\phi(t,l))}{\sin^2(\phi(t,l))\cos^2(\phi'(t,l))} \exp(-2\beta l) dl\,, \tag{2.37}$$

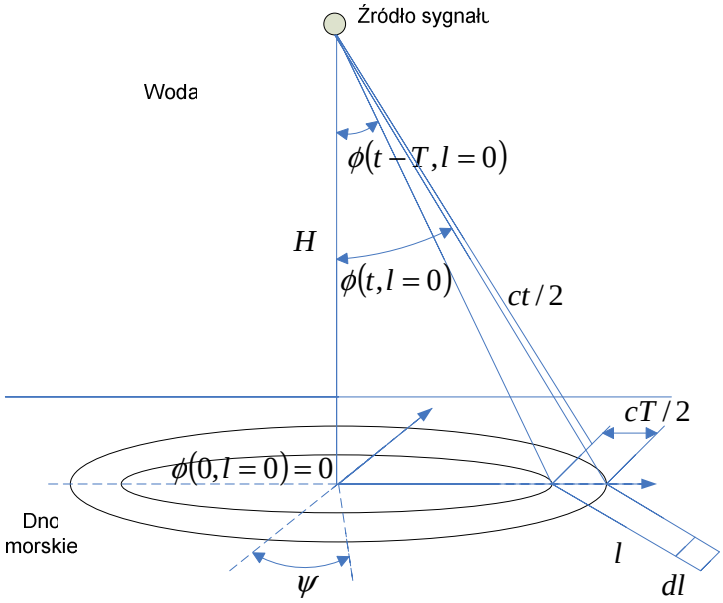
gdzie σ_υ to współczynnik lokalnej wielkości rozproszenia, ϕ' oznacza kąt załamania na dnie morskim, T_{12} i T_{21} są odpowiednio współczynnikami transmisji fal na granicy pomiędzy ośrodkami woda-dno i dno-woda oraz $\exp(-2\beta l)$ stanowi wyrażenie dwukierunkowego tłumienia dna. Obliczenie $I(t)$ jest proste, ale nie uwzględnia rozszerzanie czasu w sygnale powracającym spowodowanym ziarnistością dna o dużej skali. Statystyki ziarnistości są przyjmowane jako proces izotropowy Gaussa. Aby zdefiniować efekt ziarnistości dużej skali należy oszacować rozkład wysokości dla danego wykresu pokrycia. Nisko-energetyczna gęstość spektralna ziarnistości zakłada stały przyrost procesu posiadającego średnią kwadratową różnice wysokości (tj. funkcja struktury $D(r)=C_h^2 r^{2\alpha}$ wraz z $C_h^2=\left[2\pi\beta\Gamma(2-\alpha)2^{-2\alpha}\right]/\left[\alpha(1-\alpha)\Gamma(1+\alpha)\right]$ oraz $\alpha=\gamma/2-1$), co zwiększa przedział r pomiędzy dwoma punktami na narastającej powierzchni dna. Promień rozkładu pokrycia rozkładu wysokości powierzchni jest obliczany następująco:

$$R_h(z,r)=\frac{1}{\sqrt{2\pi D(r)}}\exp\left[-\frac{(z-<z>)^2}{2D(r)}\right]. \tag{2.38}$$

Efekt ziarnistości dużej skali jest opisany jako $I(t)$ uzyskanego dla płaskiej powierzchni z rozkładem wysokości $R_h(z,r)$:

$$S(t)=\int_0^{z(t)} I\left(t-\frac{2z}{c_w\cos\phi_0}\right)R_h(z,r)dz\,, \tag{2.39}$$

gdzie ϕ_0 oznacza kierunek nominalny wektorów normalnych. Dla ułatwienia przyjmuje się $\phi_0=0$.



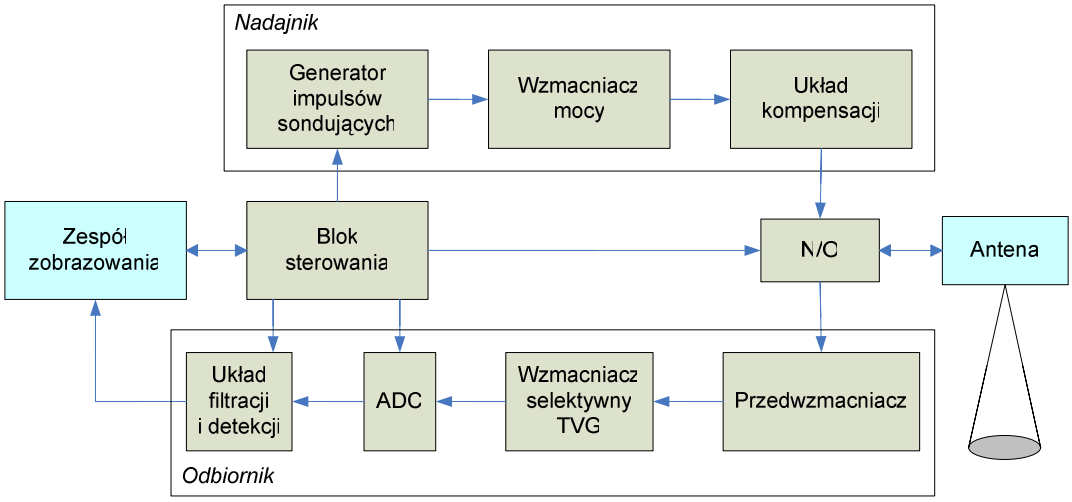
Rys. 2.2. Schematyczny układ okręgów dla echa odbitego od powierzchni dna morskiego w chwili czasu t. Okręgi te są określone przez kąt $\phi(t,l)$

2.7. Przegląd wybranych systemów hydroakustycznych

2.7.1. Echosondy jednowiązkowe

Echosondy jednowiązkowe są urządzeniami hydrolokacyjnymi typowo wyposażonymi w przetwornik nadawczo-odbiorczy wytwarzający jedną wiązkę, której oś akustyczna jest pionowa. Obszar przeszukiwany przez echosondę na określonej drodze s jest zbliżony do graniastosłupa o przekroju trójkątnym, w którym kąt wierzchołkowy jest równy, w przybliżeniu, przekrojowi szerokości wiązki (θ_{-3dB}) w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku ruchu jednostki pływającej. W sonarach

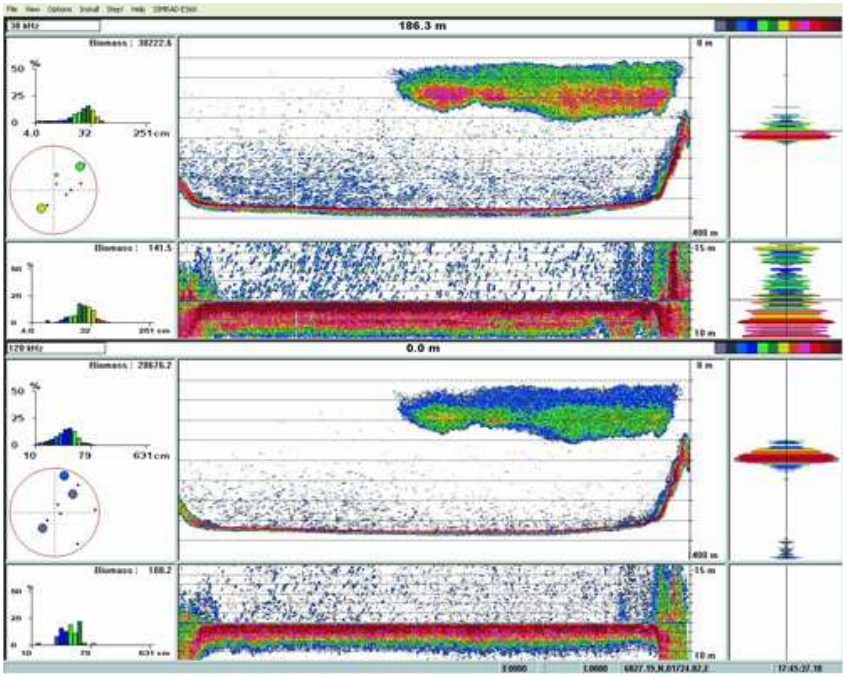
przeznaczonych na jachty i małe statki szerokość wiązki przekracza zwykle 50°. Przy takich szerokościach wiązki obszar przeszukiwania jest stosunkowo duży, lecz rozdzielczość kątowa jest niewielka. Zastosowanie węższych wiązek (rzędu 10°) wymaga stabilizacji położenia przetwornika, którą stosuje się głównie w echosondach badawczych. Na rysunku 2.3 przedstawiono schemat blokowy typowej echosondy [88].



Rys. 2.3. Schemat blokowy echosondy

Sygnał sondujący wytwarzany jest cyklicznie w generatorze impulsów sondujących. W większości echosond ma on postać paczki przebiegów sinusoidalnych. Częstotliwość pracy (przebiegu sinusoidalnego) zależy od jej zasięgu i rodzaju obserwowanych obiektów, czyli od przeznaczenia. Częstotliwości pracy większości echosond mieszczą się w granicach od około 10kHz do około 300kHz. W nowszych echosondach istnieje możliwość wyboru jednej z dwu, lub rzadziej większej liczby częstotliwości. Następnie sygnał sondujący wytworzony w generatorze jest wzmacniany we wzmacniaczu mocy. Impuls sondujący o odpowiednio dużej mocy jest podawany na układ kompensacji, którego zadaniem jest eliminacja składowej urojonej impedancji elektrycznej anteny hydroakustycznej i toru kablowego łączącego nadajnik z anteną. Jeżeli ta sama antena hydroakustyczna wykorzystywana jest do emisji impulsów sondujących i odbioru impulsów echa, konieczne jest zastosowanie przełącznika nadawanie/odbiór (N/O). Elektryczny sygnał sondujący po przetworzeniu w przetwornikach ultradźwiękowych anteny na sygnał akustyczny jest promieniowany w wąskiej wiązce i po odbiciu od obiektów znajdujących się w wodzie wraca do anteny jako akustyczny sygnał echa. W następnym, analogowym bloku odbiornika następuje wzmocnienie i filtracja wąskopasmowa sygnału echa. Filtracja poprawia wyjściowy stosunek sygnału do szumu i ogranicza widmo sygnału, co jest niezbędne, gdy sygnał

jest próbkowany i przekształcany na sygnał cyfrowy. Ze względu na dużą dynamikę odbieranych sygnałów i konieczność jej ograniczenia stosowana jest zasięgowa regulacja wzmocnienia TVG (ang. *Time Varied Gain*). Oprócz zasięgowej regulacji wzmocnienia w echosondach stosuje się ręczną regulacje wzmocnienia. Zapewnia ona operatorowi możliwość dokonywania w pewnych granicach skokowej, lub płynnej zmiany wzmocnienia odbiornika echosondy. W echosondach stosowana jest z reguły detekcja obwiedni. W starszych, analogowych echosondach sygnały echa były rejestrowane na papierze elektroczułym (suchym, bądź mokrym). Stopień zaczernienia papieru był proporcjonalny do amplitudy sygnału echa. W nowszych, cyfrowych echosondach sygnały echa są eksponowane i rejestrowane na monitorach ekranowych, zwykle kolorowych [88]. Na rysunku 2.4 przedstawiono przykład obrazu zarejestrowanego przez echosondę ES60 firmy Simrad.



Rys. 2.4. Obraz na monitorze echosondy ES60 firmy Simrad dla dwóch różnych częstotliwości pracy (górny obraz – częstotliwość pracy 38kHz, dolny obraz – częstotliwość pracy 120kHz)

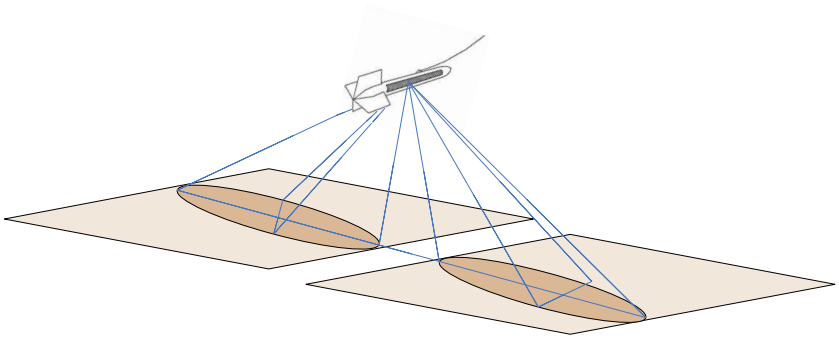
Ze względu na przeznaczenie echosond można dokonać ich podziału na echosondy nawigacyjne, rybackie i hydrograficzne. Echosondy nawigacyjne przeznaczone są głównie do obserwacji dna morza i innych przeszkód nawigacyjnych znajdujących się na dnie (wraków, pozostałości budowli oceanotechnicznych itp.). Użyteczną funkcją w echosondach nawigacyjnych jest automatyczna detekcja dna połączona z alarmem przekroczenia wartości ustawionej przez operatora. Echosondy rybackie przeznaczone są do obserwacji ławic i ryb pojedynczych. Dzięki nim rybacy uzyskują cenne

informacje dotyczące obecności ławic ryb na łowisku oraz ich rozmieszczeniu w pionie. Natomiast echosondy hydrograficzne są budowane głównie w celu wizualizacji kształtu powierzchni dna i obiektów znajdujących się na nim. Do wizualizacji powierzchni dna używane są echosondy wielowiązkowe opisane w podrozdziale 2.7.3.

Echosondy jednowiązkowe znajdują również zastosowanie w badaniach naukowych. Wykorzystywane są między innymi do estymacji siły celu ryb TS (ang. *Target Strength*) [81]. Estymacja siły celu ryb stanowi centralny problem hydroakustycznych metod oceny stanu i monitoringu zasobów ryb pelagicznych. Może również służyć, jako pośrednia metoda oceny długości ryb. Informacje na temat dna morskiego uzyskane za pomocą echosond jednowiązkowych wykorzystywane są do rozpoznawania typu dna morskiego [72]. Dane o typie i strukturze dna morskiego oraz osadach dennych są bardzo użyteczne w wielu zastosowaniach, a szczególnie w hydrografii i pracach oceanotechnicznych (budowa rurociągów, prowadzenie kabli podmorskich, wytyczanie i pogłębianie torów wodnych oraz zastosowaniach militarnych). Wszystkie hydroakustyczne metody rozpoznawania dna morskiego opierają się na założeniu, że w odbieranym sygnale echa jest zawarta i możliwa do odtworzenia informacja o rodzaju dna, na którym nastąpiło rozproszenie sygnału sondującego.

2.7.2. Sonary boczne

Sonary boczne są sonarami aktywnymi, wyposażonymi w dwa przetworniki emitujące sygnały sondujące i odbierające sygnały echa z kierunków prostopadłych do kierunku ruchu ich nośnika. Proste sonary boczne mają wiązki wąskie w przekroju poziomym i szerokie w przekroju pionowym. Kształt i ustawienie wiązek typowego sonaru bocznego przedstawiono na rysunku 2.5 [88].



Rys. 2.5. Geometria wiązki sonaru bocznego

Sonary boczne przeznaczone są głównie do obserwacji dna i celów leżących na nim, lub znajdujących się w jego pobliżu, a mianowicie wraków, rurociągów, budowli inżynieryjnych, przeszkód nawigacyjnych, min dennych i kotwicznych oraz innych obiektów. Nowsze sonary boczne pozwalają obrazować dno z dużą rozdzielczością, która pozwala na uzyskiwanie jakości obrazów zbliżonych do fotografii. Poprzez wydobywanie informacji o rodzaju dna na podstawie zróżnicowanej zdolności rozpraszania sygnału akustycznego na dnie, wykorzystywane są również do opracowywania geologicznej reprezentacji cech dna. Dno miękkie akustycznie (np. zamulone) będzie rozpraszało wstecznie mniej energii, z uwagi na małą impedancję akustyczną. Przeciwnie, dno twarde, o dużej impedancji rozproszy wstecznie większą ilość energii. Stąd obraz akustyczny dna jest zróżnicowany dla różnych struktur geologicznych takich, jak piasek, muł, wydmy, skały, itp. Typowa rozdzielczość sonarów bocznych waha się w granicach kilkudziesięciu centymetrów.

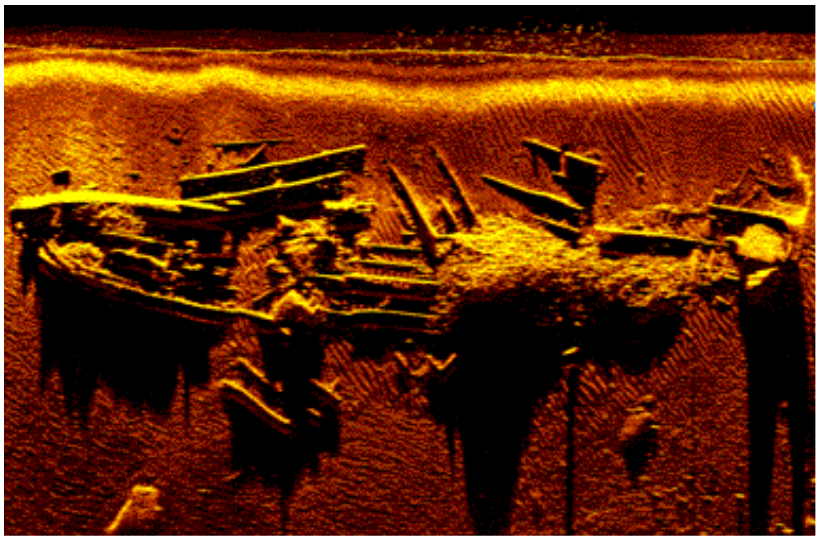
Sonary boczne wyposażone w systemy charakteryzujące strukturę wgłębną dna, pracując na niskich częstotliwościach (ok. 6kHz) potrafią obrazować dno na dużych obszarach o szerokości 30-60 kilometrów [69]. Ich niewielkie rozmiary, związane z wysoką częstotliwością pracy i mniejszym zasięgiem w porównaniu z sonarami wielowiązkowymi, pozwalają na dużą mobilność systemów pomiarowych.

Pomiary interferometryczne, dokonywane przy pomocy sonarów bocznych, które wykorzystywane są do określania batymetrii dna, stanowią dodatkowe źródło informacji w ostatecznej interpretacji obrazów dna wykonywanych tą techniką, pomimo, że jakość tych pomiarów odbiega znacząco od podobnych pomiarów batymetrycznych wykonywanych za pomocą sonaru wielowiązkowego.

Systemy hydroakustyczne, wyposażone w sonar boczny, pozwalają, z natury swego funkcjonowania, na generowanie dwuwymiarowych obrazów reprezentujących amplitudę sygnału odbieranego od kolejnych fragmentów dna. Przykład dwuwymiarowego zobrazowania wraku statku Lidador, uzyskanego za pomocą sonaru bocznego pracującego z częstotliwością sygnału sondującego 600kHz, przedstawiono na rysunku 2.6.

W latach osiemdziesiątych poprzedniego wieku podjęte zostały próby rekonstrukcji struktury trójwymiarowej na podstawie obrazów dwuwymiarowych, co związane było z koniecznością wyposażenia robotów podwodnych w systemy umożliwiające im rozpoznawanie dogodnej dla nich drogi przemieszczania się oraz stabilizację w toni wodnej. Techniki prowadzące do otrzymania trójwymiarowego obrazu dna można

podzielić sprzętowe i programowe. Techniki sprzętowe polegają na udoskonaleniu konstrukcji przetwornika nadawczego sonaru bocznego. Przykładem może być trójwymiarowy sonar boczny amerykańsko-kanadyjskiej firmy Benthos, gdzie wzbogacono układ przetwornika o dodatkowy zastaw przetworników, umożliwiających jednoczesną pracę w układzie interferometrycznym. Pierwsze wersje sonaru z jednym dodatkowym układem przetworników wykazały konieczność zwiększenia układu do szeregu czterech przetworników. W ten sposób powstał produkt określany mianem trójwymiarowy sonar boczny (ang. *3^D side scan sonar*) Na rysunku 2.7 przedstawiono dwuwymiarowy obraz dna morskiego oraz jego trójwymiarową rekonstrukcje wykonaną za pomocą trójwymiarowego sonaru bocznego firmy Bentos.



Rys. 2.6. Dwuwymiarowe zobrazowanie wraku statku Lidador

Rys. 2.7. Dwuwymiarowy obraz dna morskiego uzyskany z trójwymiarowego sonaru bocznego wraz z jego rekonstrukcją 3^D

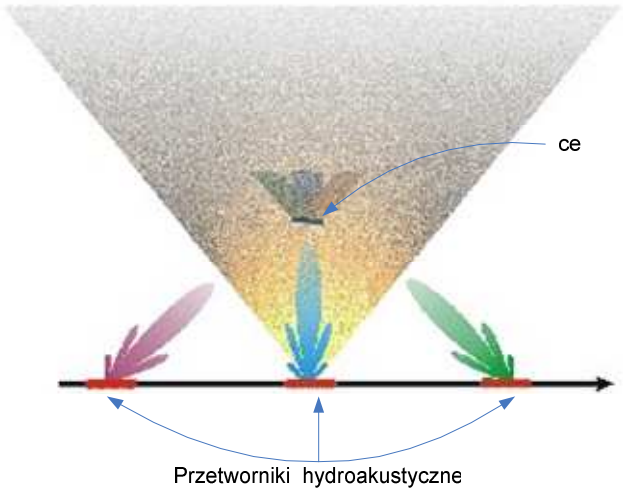
Druga, technika programowa, bazuje na algorytmach analizujących dwuwymiarowe obrazy sonarowe i zostanie przedstawiona w dalszej części niniejszej rozprawy. W

tabeli 2.1 przedstawiono, jako przykładowe, parametry techniczne sonaru bocznego DF-1000 firmy EdgeTech.

Tab. 2.1. Parametry techniczne sonaru bocznego DF-1000 firmy EdgeTech

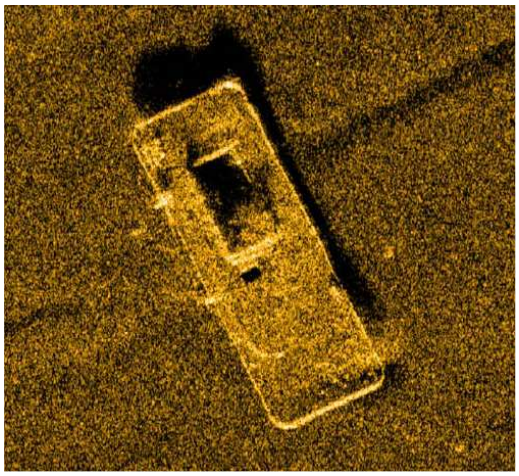
Lp.	Parametr	Wartość
1	Częstotliwość pracy	100 / 500 kHz
2	Horyzontalna szerokość wiązki	100 kHz – 1.2º 500 kHz – 0.5º
3	Maksymalna głębokość zanurzenia	1000 m
4	Maksymalny zasięg sygnału sondującego	500 m (dla częstotliwości 100 kHz)
5	Częstotliwość próbkowania	24 kHz
6	Rozdzielczość obrazów sonarowych	12 bitów
7	Wbudowany kompas do kierunkowania pojazdu z sensorem	dokładność 0.5°
8	Miejsce digitalizacji sygnałów	W rybie

Poszukiwania metod poprawy rozdzielczości poprzecznej (kątowej) doprowadziły do powstania sonarów bocznych z syntetyczną aperturą (ang. *Synthetic Aperture Sonar – SAS*). Koncepcja systemów z syntetyczną aperturą została opracowana wcześniej dla radarów (ang. *Synthetic Aperture Radar – SAR*). Sonary z syntetyczną aperturą działają na tej samej zasadzie, co radary SAR [22]. Przetworniki hydroakustyczne są instalowane na nośniku sonaru bocznego i wykorzystywany jest ruch nośnika – analogicznie jak ruch samolotu. Zasadę działania sonaru bocznego z syntetyczną aperturą przedstawiono na rysunku 2.8.



Rys. 2.8. Zasada pracy sonaru z syntetyczną aperturą

Systemy z syntetyczną aperturą dzielą się na niekoherentne i koherentne. Pierwsze z nich wykorzystują do określenia położenia celu obwiednie sygnałów echa. Ich działanie wykorzystuje zasadę systemów nawigacji hiperbolicznej, a rozdzielczość uzależniona jest od dokładności pomiaru momentów odbioru sygnałów echa. Ponieważ dokładność ta jest niewielka, zwłaszcza przy małym stosunku sygnału do szumu, systemy tego typu mają niewielkie znaczenie, choć są przedmiotem studiów i eksperymentów. Częściej wykorzystywane systemy koherentne, gdzie wykorzystywana jest informacja zawarta w fazie sygnałów echa [88]. Na rysunku 2.9 przedstawiono dwuwymiarowe zobrazowanie barki uzyskane za pomocą sonaru bocznego z syntetyczną aperturą HISAS 1030 firmy Kongsberg.



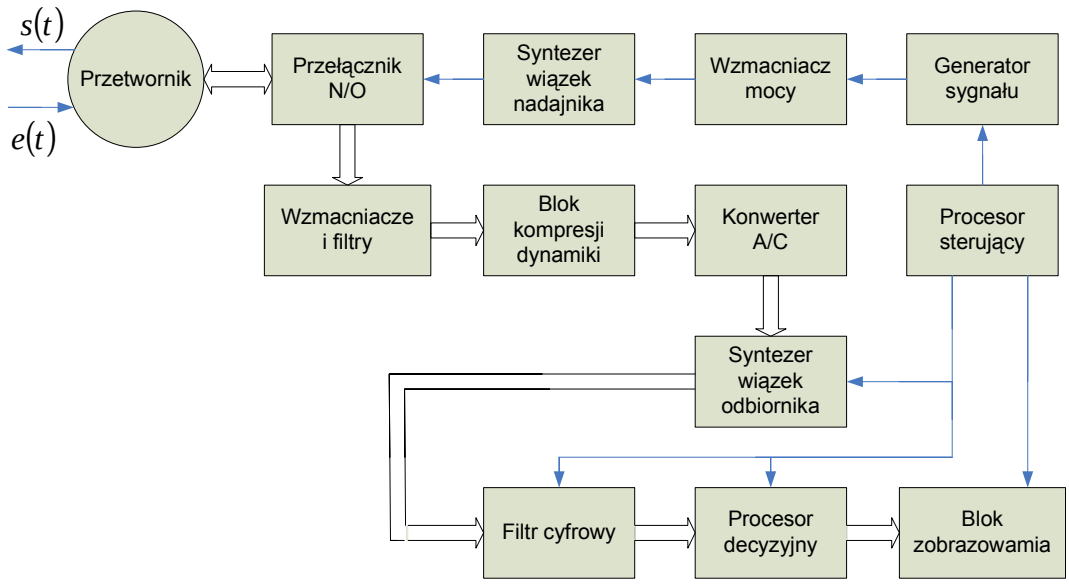
Rys. 2.9. Dwuwymiarowe zobrazowanie barki o wymiarach 10x3 m uzyskane za pomocą sonaru bocznego z syntetyczną aperturą

2.7.3. Sonary wielowiązkowe

W ostatnich latach na szerszą skalę zaczęto wykorzystywać możliwości systemów do szerokokątnego mapowania dna (ang. *swath observation* lub *swath mapping*) znanych, jako systemy MBSS (ang. *Multibeam Sonar System*). Ich powstanie jest wynikiem integracji technologii sonarów wielowiązkowych nowej generacji, wielowymiarowego cyfrowego przetwarzania sygnałów oraz systemów informacji przestrzennej GIS (ang. *Geographic Information System*) [91]. Zasadniczym elementem tych systemów jest sonar wielowiązkowy (ang. *multibeam sonar*), który dzięki wielokierunkowej obserwacji szerokokątnej dna, przy jednoczesnym utrzymaniu wysokiej rozdzielczości kątowej, pozwala na doskonałą batymetrię i obrazowanie dna morskiego z odbieranych sygnałów echa [93]. Przy zastosowaniu nakładających się wielowiązkowych obserwacji, dzięki jednoczesnemu odbiorowi echa z różnych

kierunków, możliwe jest nie tylko obrazowanie i mapowanie dna, lecz także wydobycie informacji ilościowej o geomorfologii dna (nachylenie, nierównomierność, skala itd.). Zastosowanie, opracowanych dla potrzeb GIS cyfrowych modeli terenu DTM (ang. *Digital Terrain Model*) pozwala dodatkowo na generowanie trójwymiarowych map dna i jego wirtualnych obrazów [91].

Na rysunku 2.10 [93] pokazano typową strukturę funkcjonalną współczesnego sonaru z cyfrowym przetwarzaniem sygnałów.

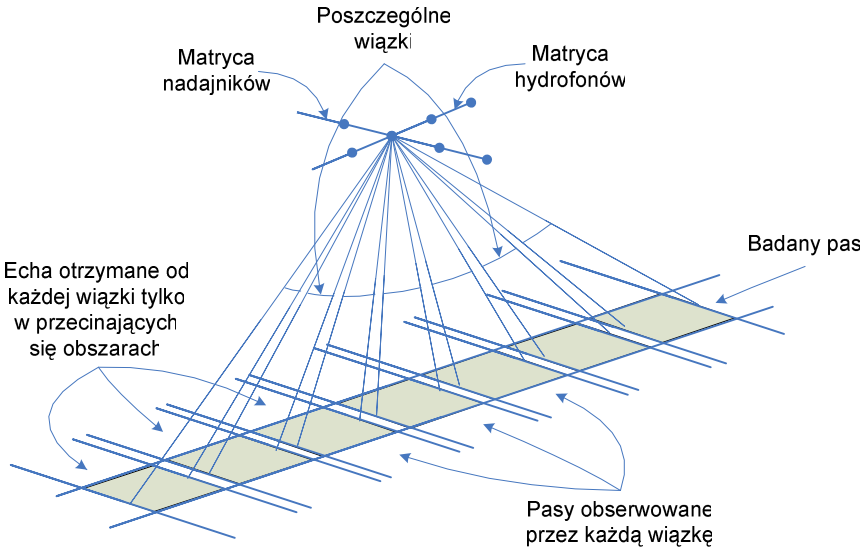


Rys. 2.10. Schemat blokowy sonaru wielowiązkowego

Sygnał sondujacy *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*) [67]. Sygnały te zasilają kolejne elementy przetwornika sonaru, co pozwala na wielowiązkową transmisję sygnału sondującego w ośrodek. Sygnał echa $e(t)$, który powstaje w wyniku odbicia sygnału sondującego od obiektu, przychodzi do przetwornika 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 poddany 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 podany zostaje do syntezera wiązek odbiornika. W bloku tym, w każdym kanale odbiorczym, sygnały z poszczególnych elementów przetwornika poddane zostają filtracji przestrzennej, co najczęściej polega na ich opóźnianiu i sumowaniu w celu uformowania wielowiązkowej charakterystyki kierunkowej odbiornika sonaru [19]. Sygnały z syntezera wiązek poddawane są filtracji cyfrowej, a następnie przetwarzaniu w procesorze decyzyjnym, na wyjściu którego otrzymuje się statystyki detekcyjne, estymacyjne i in., które po redukcji danych przedstawiane są w różnej formie w bloku zobrazowania [67].

Sonar wielowiązkowy – główny element systemów mapowania dna – cechuje wysoka rozdzielczość i duża szerokość kątowa obserwacji [93]. Zasadniczą ideę działania sonaru wielowiązkowego przedstawiono na rysunku 2.11.

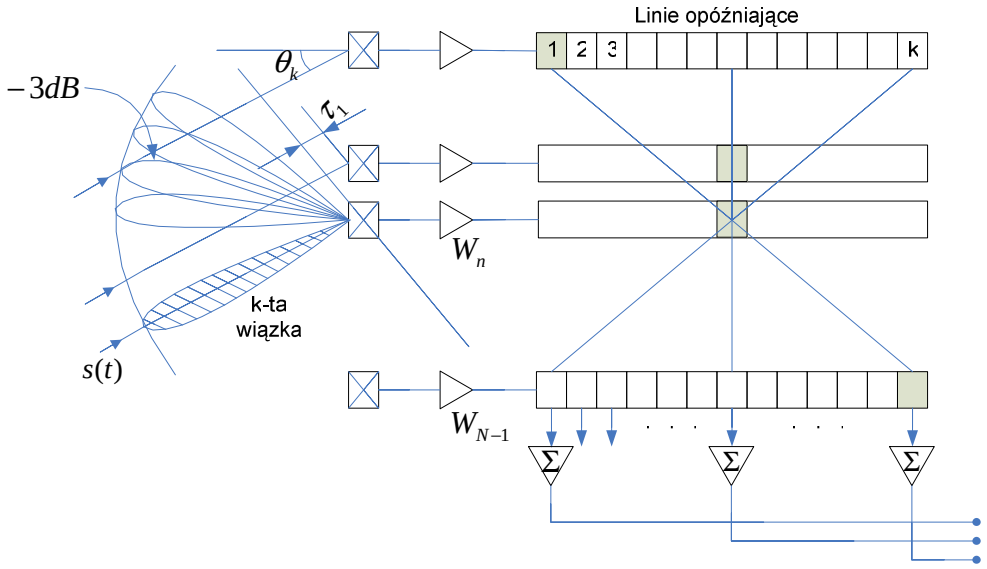


Rys. 2.11. Przykład procesu akwizycji danych dla sonaru wielowiązkowego

Przetwornik sonaru zapewnia odbiór sygnałów ech z różnych kierunków, a obszar pokrycia przeszukiwanego obszaru podzielony jest na qusi-równoległe pasy składające z dużej ilości punktów pomiarowych. W efekcie dostajemy dyskretny obraz batymetryczny dna o dużej rozdzielczości, zależnej głównie od głębokości w kierunku pionowym obserwacji (nadir) oraz ilości wiązek. Duża rozdzielczość kątowa możliwa jest dzięki zastosowaniu zasady filtracji przestrzennej, która oparta jest na bezpośredniej realizacji opóźnień czasowych wykorzystywanych w tzw. opóźnieniowo-sumacyjnych syntezerach 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 dodadzą się w fazie w układzie sumującym, a amplituda sygnału sumarycznego, odpowiadająca koherentnemu frontowi falowemu, będzie maksymalna dla fali przychodzącej z pożądanego kierunku [93].

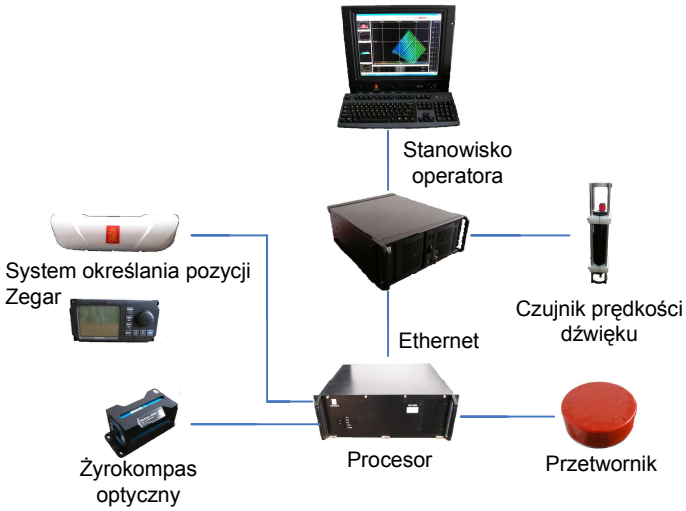
Techniki filtracji przestrzennej w realizacji syntezerów wiązek, stanowią jądro współczesnych sonarów wielowiązkowych. Dzięki nim możliwe jest formowanie wachlarzowej konfiguracji charakterystyk kierunkowych sonarów. Na rysunku 2.12 przedstawiono schemat opóźnieniowo-sumacyjnego syntezera wiązek sonaru wielowiązkowego [93].



Rys. 2.12. Schemat opóźnieniowo-sumacyjnego syntezera wiązek sonaru wielowiązkowego

Duża rozdzielczość i precyzja pomiarów jest wrażliwa na błędy zewnętrzne i złą kalibrację systemu. O ile ta ostatnia z reguły koryguje błędy systematyczne, błędy niesystematyczne są główną przyczyną degradacji wyników pomiaru. Zaliczyć możemy do nich ogólnie 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 rysunku 2.13.



Rys. 2.13. Schemat funkcjonalny systemu wielowiązkowego EM3002

W skład systemu wchodzi echosonda wielowiązkowa o bardzo wysokiej rozdzielczości przeznaczona do wykonywania 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 i detekcję dna, sterowanie głowica antenową (wzmocnienie, przeliczanie pozycji geograficznej, nanoszenie informacji czasowych – zegar zewnętrzny oraz stabilizację – ang. *ping rate*, *pitch*, *roll*, *heading* i *heave*). Stacja robocza klasy PC, na której uruchomiona jest aplikacja, będąca jednocześnie interfejsem użytkownika, odpowiada za instalację oprogramowania echosondy, kontrolę parametrów roboczych echosondy, logowanie i backupowanie danych, przeprowadzane testy oraz uruchamianie aplikacji do postprocesingu 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 waha się w granicach głębokości 150 metrów.

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

Szerokość kątowa wiązki (ang. *beamwidth*) wynosi 1.5° przy częstotliwości przemiatania (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 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 postprocesingu danych. Oprogramowanie Seafloor Information System (SIS) stanowi interfejs do konfiguracji, kalibracji, korekcji i trójwymiarowej wizualizacji danych batymetrycznych a także wizualizacji innych parametrów w czasie rzeczywistym.

Echosonda współpracuje z urządzeniami zewnętrznymi na kilku prędkościach transmisji. Poprzez złącze szeregowe podłączone są: czujnik przechyłu (ang. *roll*, *pitch*, *heave* i *heading*), żyrokompas, system określania pozycji, zegar zewnętrzny, system do określania prędkości dźwięku.

Natomiast poprzez kanał Ethernet podłączony jest główny procesor z komputerem PC w wersji przemysłowej. W tabeli 2.2 zestawiono parametry techniczne systemu wielowiązkowego EM3002.

Tab. 2.2. Parametry techniczne systemu wielowiązkowego EM3002

Lp.	Parametr	Wartość
1	Częstotliwość pracy	300 kHz
2	Częstotliwość przemiatania (ang. ping)	40Hz
3	Maksymalna ilość wiązek w jednym pingu	160
4	Maksymalna liczba punktów pomiarowych	240
5	Szerokość wiązki	1.5 x1.5°
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)

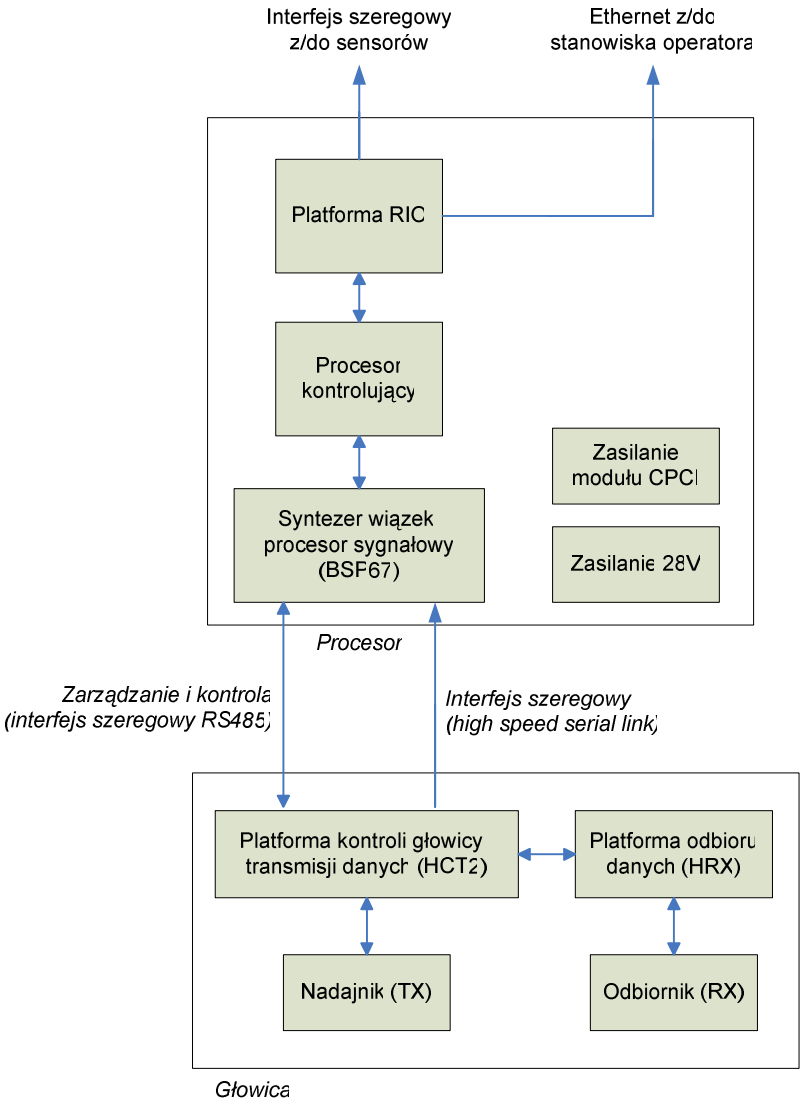
Seatex Seapath 20 jest kompasem wykorzystującym system nawigacji globalnej GPS do określania kursu rzeczywistego. Zastępuje żyrokompas, system GPS, log, urządzenie do pomiaru prędkości zwrotu (ang. *rate of turn indicator*) oraz zegar systemowy. Nie wymaga wstępnej kalibracji. Seapath 20 składa się z trzech zasadniczych części: dwóch anten GPS, jednostki obliczeniowej, wyświetlacza.

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

Z punktu widzenia echosondy system Seapath 20 dostarcza informacji o myszkowaniu statku, jego przechyłach wzdłużnych i poprzecznych. Chwilowe zaniki sygnału GPS powodują automatyczne przełączanie systemu w inercyjny tryb pracy (parametry estymowane). 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 rysunku 2.14 przedstawiono proces przetwarzania danych z sonaru wielowiązkowego. Głównym etapem tego procesu jest synteza wiązek (BSP67) realizowana przez specjalizowane procesory sygnałowe (9 procesorów firmy Texas Instruments). Ważnym 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 może być realizowany w czasie rzeczywistym.

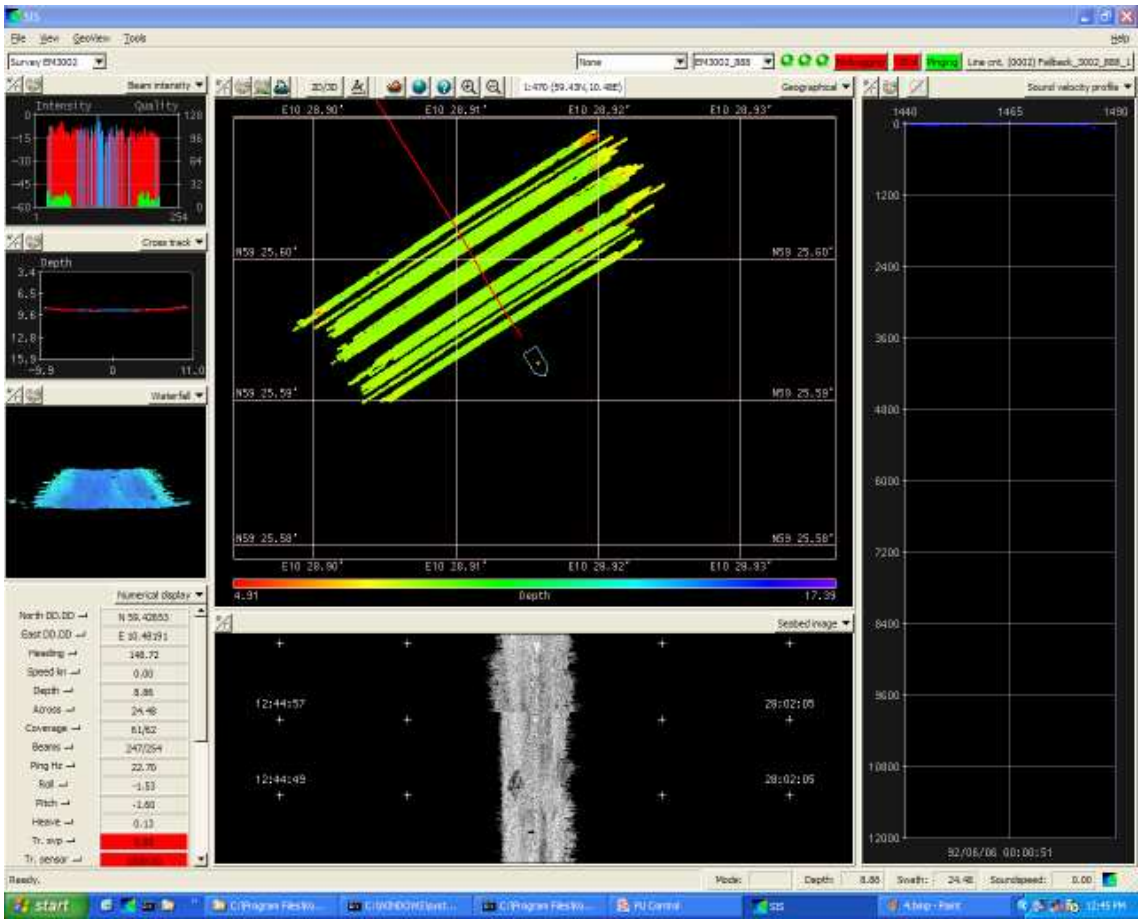


Rys. 2.14. Schemat procesu przetwarzania danych w sonarze wielowiązkowym EM3002

Urządzenie niezależnie od swojego zaawansowania technologicznego i wysoce specjalistycznego charakteru posiada również przemyślany i dobrze zaprojektowany interfejs użytkownika, skupiający uwagę na najważniejszych funkcjach sonaru. Wiele pomysłów łącznie z samą szatą graficzną zapożyczonych zostało z systemów Unix. SIS

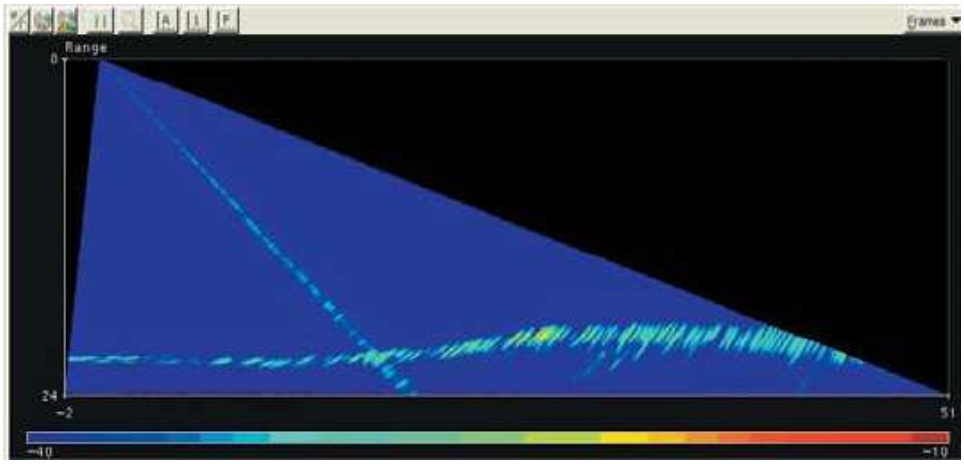
(Seafloor Information System) dostępny jest w wersji na platformę Unix i Windows. Umożliwia on konfigurację prezentowanych paneli w oknie głównym, jak również skorzystanie ze zdefiniowanych trybów pracy, takich jak: tryb kalibracji, nawigacji, sternika oraz tryb użytkownika (ang. *user mode*). Na rysunku 2.15 zaprezentowano przykładową konfigurację dla trybu pracy użytkownika. Równocześnie aplikacja stanowi etap pośredni przetwarzania danych z sonaru, jest elementem filtrującym, weryfikującym dane i dokonującym wizualizacji trójwymiarowej. Poza tym dostępnych jest kilka sposobów wizualizacji, między innymi punktowy, waterfall, itp.

Na rysunku 2.16 przedstawiono rzeczywisty echogram zarejestrowany przez sonar wielowiązkowy EM3002.

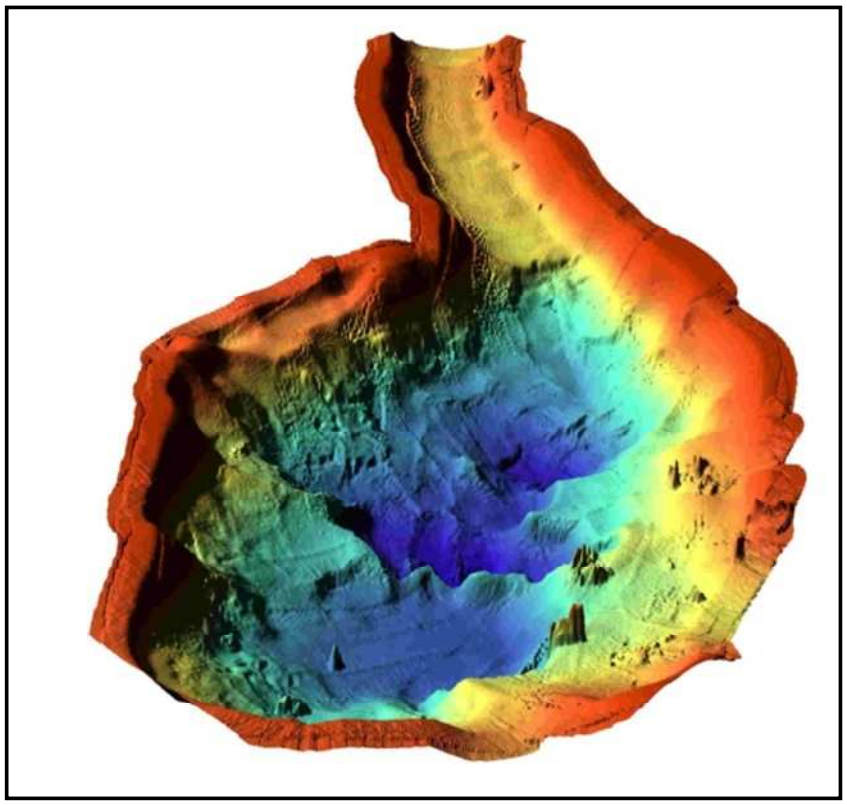


Rys. 2.15. Interfejs użytkownika programu SIS

Efektem pomiarów z wykorzystaniem sonarów wielowiązkowych są głównie trójwymiarowe profile dna. Pomiary mają charakter geograficzny, charakteryzują się dużą dokładnością i rozdzielczością. Typowe trójwymiarowe zobrazowanie dna uzyskane za pomocą danych z sonaru wielowiązkowego EM3002 przedstawiono na rysunku 2.17.



Rys. 2.16. Przykład echogramu zarejestrowanego
przez sonar wielowiązkowy EM3002



Rys. 2.17. Trójwymiarowy model dna uzyskany z danych
zebranych sonarem wielowiązkowym EM3002

2.8. Podsumowanie

W niniejszym rozdziale zostały przybliżone zagadnienia związane z propagacją fali akustycznej w środowisku wodnym, transmisją i odbiorem sygnału w systemie hydroakustycznym oraz omówiono modele rozpraszania fali akustycznej na dnie

morskim. Zagadnienia te, jak i właściwa interpretacja zjawisk z nimi związanych, miały kluczowy wpływ na proces tworzenia algorytmów rekonstrukcji kształtu dna morskiego na podstawie danych z sonaru bocznego. Algorytmy te, jak i rezultaty rekonstrukcji dna morskiego uzyskane za ich pomocą przedstawiono w rozdziale 5.

W rozdziale przedstawiono również specyfikę trzech podstawowych typów sensorów wykorzystywanych w hydroakustyce, a mianowicie: echosond jednowiązkowych, sonarów bocznych oraz echosond, czy sonarów, wielowiązkowych, pod względem akwizycji danych oraz klasycznych metod ich wizualizacji. Dane z tych systemów zostały wykorzystane w procesie tworzenia interaktywnych, trójwymiarowych scen, jako zaproponowany sposób ich wizualizacji. Trójwymiarowa wizualizacja danych hydroakustycznych z wykorzystaniem języków opisu wirtualnej rzeczywistości została przedstawiona w rozdziale 6.

3. Trójwymiarowa rekonstrukcja dna morskiego na podstawie danych z sonaru bocznego

3.1. Wprowadzenie

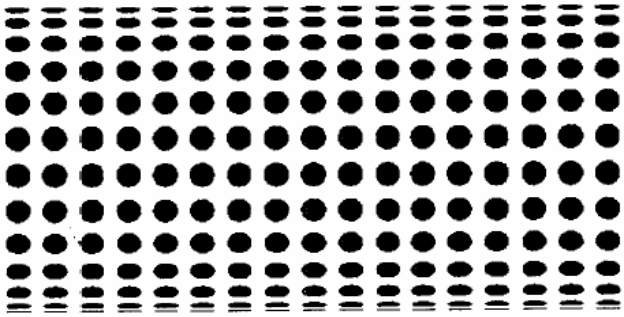
Poprzez zastosowanie nowoczesnych systemów hydroakustycznych, takich jak systemy wielowiązkowe, potrafimy jednoznacznie lokalizować i trójwymiarowo wizualizować obiekty położone na dnie morskim (wraki, miny, rurociągi, itp.). Istnieje jednak wiele danych w postaci dwuwymiarowych obrazów uzyskanych w trakcie przeszukiwań akwenów morskich z wykorzystaniem sonarów bocznych. Z analizy tych obrazów wynika, iż istnieje możliwość wydobywania z nich użytecznych informacji wykorzystywanych przy trójwymiarowej wizualizacji nie tylko samego dna morskiego, ale także obiektów położonych na dnie.

Ze względu na podobieństwa zagadnień rozchodzenia się fali akustycznej w środowisku wodnym oraz zjawisk zachodzących w optyce geometrycznej, w niniejszym rozdziale zaprezentowano techniki odtwarzania trzeciego wymiaru wykorzystywane między innymi w grafice komputerowej o nazwie zapożyczonej z języka angielskiego *Shape from X*. Ideą tych technik jest umiejętne pozyskiwanie informacji (kamera, aparat fotograficzny, skaner i itp.) o obiekcie, tak aby na ich podstawie stworzyć jego numeryczny trójwymiarowy model. Litera *X* w nazwie poszczególnych technik oznacza źródło wiedzy na podstawie, którego może zostać odtworzony kształt obiektu.

3.2. Techniki odtwarzania kształtu

3.2.1. Odtwarzanie kształtu z tekstury

Technika *Shape from Texture* (SFT) zastosowana do trójwymiarowej rekonstrukcji kształtu obiektów, jako źródło informacji, wykorzystuje zdjęcia obiektów, które poddawane są obróbce przez algorytmy analizujące tekstury pokrywające te obiekty. Technika ta opiera się na przeświadczeniu, iż umysł ludzki potrafi poprawnie interpretować niektóre zjawiska optyczne zachodzące na krzywiznach sfotografowanych obiektów. Super i Bovik w swych rozważaniach użyli przykładu cylindra pokrytego teksturą w kropki o jednakowej wielkości [98], pokazanego na rysunku 3.1. Pomimo faktu dwuwymiarowości obrazu obserwator zdaje sobie sprawę z rzeczywistego kształtu obiektu na tym obrazie. Przeniesienie tej zdolności percepcji na problem algorytmiczny nie jest jednak zadaniem prostym.

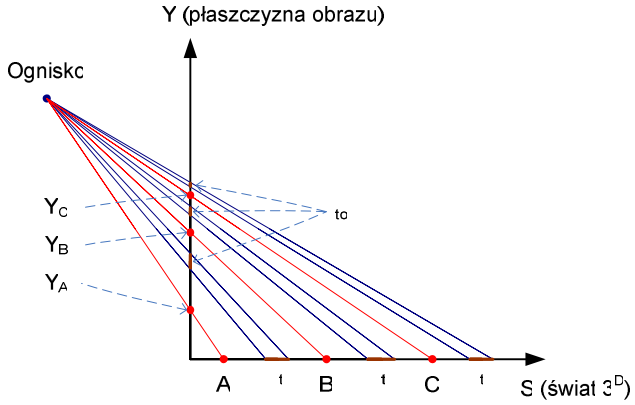


Rys. 3.1. Cylinder pokryty teksturą w kropki o jednakowej wielkości

Analiza takich obrazów zakłada, iż w każdej teksturze można wydzielić mniejsze jej składowe zwane tekselami (ang. *texel*). Pojęcie to wprowadził Gibson, który jako pierwszy zajmował się problematyką trójwymiarowej rekonstrukcji obiektów na podstawie tekstury [47]. Drugim ważnym elementem analizy tekstur jest założenie Gibsona, mówiące o tym, że teksele są jednolicie rozproszone, czego konsekwencją może być nałożenie pewnych uproszczeń na analizowany teksel [47]. Ma to szczególne znaczenie w analizie zdjęć lotniczych naturalnych powierzchni, gdzie występuje globalna regularność cech przechwytywanych obrazów. Kolejnym wykorzystywanym pojęciem jest rzut paraperspektywiczny, będący złożeniem rzutu perspektywicznego i prostopadłego.

Jedne z pierwszych algorytmów odtwarzania kształtu obiektów wykorzystujące technikę SFT opracowali Bajcsy oraz Liberman [2]. Do wstępnej obróbki obrazu wykorzystali dyskretną transformatę Furiera DFT. Widmo mocy uzyskane z DFT

dobrze charakteryzuje obraz, zachowuje kierunkowość, z pominięciem nieistotnych szczegółów analizowanej tekstury. Taka analiza może dostarczyć wielu informacji o cechach, takich jak klasa obiektów, czy kontrast obrazu. Podstawowa teza metody mówi o wpływie rozmiaru teksli na interpretację gradientu (im mniejszy rozmiar tekseli, tym gradient większy). Bajcsy i Liebermann uważali, że niezbędne jest porównanie ich rozmiaru na przekroju całego obrazu oraz ich umiejscowienie w obrazie. W tym celu posłużyli się rzutem perspektywicznym na płaszczyznę, który pokazano na rysunku 3.2 [68].



Rys. 3.2. Rzut perspektywiczny na płaszczyznę

W celu przybliżenia metody wyznaczona zostanie głębia punktów A, B i C (rysunek 3.2). Ich rzuty na płaszczyznę obrazu nazwano Y_A, Y_B oraz Y_C. Natomiast l_{to} jest rozmiarem poszczególnych teksli na obrazie, l_t jest rozmiarem teksela na teksturze obiektu, a Y_i to środki okien podzielonego obrazu. Bajcsy i Lieberman zdefiniowali następnie funkcję projekcji P, jako miarę tego, jak się ma odległość pomiędzy punktami na powierzchni obiektu, do odpowiadającej tym punktom odległości na dwuwymiarowym obrazie. Funkcja ta jest postaci [68]:

$$P = \left(\frac{1}{k_1}\right)\left(\frac{ds}{dy}\right), \tag{3.1}$$

$$S = k_1 \int P dy\,. \tag{3.2}$$

Na podstawie zależności (3.1) i (3.2) można wyznaczyć odległości pomiędzy punktami w dziedzinie S. Postać dyskretną funkcji projekcji można zapisać, jako [68]:

$$P_i(Y_i) = \frac{k_2 l_t}{l_{to}(Y_i)}\,. \tag{3.3}$$

Dyskretna zależność (3.3) interpolowana jest funkcją ciągłą P^*. Po uwzględnieniu jej we wzorze (3.2) i redukcji parametru l_t, otrzymujemy stosunek odległości pomiędzy punktami A i C oraz punktami A i B, w postaci [68]:

$$\frac{\overline{AC}}{\overline{AB}} = \frac{\int_{Y_A}^{Y_C} P^* dy}{\int_{Y_A}^{Y_B} P^* dy}. \tag{3.4}$$

Analizując zależność (3.4), należy zwrócić uwagę, iż nie zawiera ona informacji na temat rozmiaru teksela na teksturze obiektu (l_t).

Zaprezentowany przykład obrazuje zasadę obliczania odległości pomiędzy punktami na dwuwymiarowym obrazie. Taka informacja zaś daje wierny opis jego struktury 3^D. Dzięki zastosowaniu DFT metoda bardzo dobrze sprawdza się w analizie zaszumionych obrazów. Wymaga ona jednak pewnych arbitralnych decyzji, jak ustawienie wielkości okien w oparciu o testowe DFT [68].

Porównując przedstawioną propozycję z innymi wykorzystującymi technikę SFT zwrócić należy uwagę przede wszystkim na różnorodność założeń wstępnych przyjmowanych przez ich twórców. Witkin odrzucał zasady Gibsona, a więc większość założeń Bajcsy i Lieberman [68]. Nie stosował on DFT, przez to jego algorytm tracił odporność na szumy. Za to był dużo mniej restrykcyjny i nie wymagał umiejscowienia tekseli w obrazie (głównie dlatego, że taka detekcja nie jest prosta w warunkach rzeczywistych). Nie opierał się na ryzykownym podziale obrazu na segmenty i otrzymywał dobre wyniki nie tylko dla globalnie zorientowanych obrazów, ale również dla mocno pofałdowanych powierzchni. Witkin inaczej również interpretował rozmiar tekseli na dwuwymiarowym obrazie, stosował dwie zasady: im mniejszy teksel tym dalszy oraz im mniejszy teksel tym większy gradient. Kolejnym uproszczeniem metody było zastosowanie rzutu prostopadłego, który uprościł część obliczeń [105].

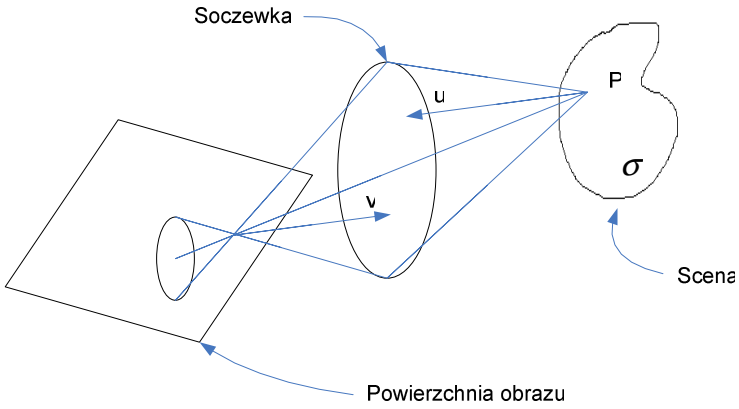
Aloimonos z kolei wprowadził do analizy tekstur rzut paraperspektywiczny, który daje podobne wyniki, jak bardziej restrykcyjny rzut perspektywiczny, jednak jest łatwiejszy w implementacji [68]. Jego propozycja jest swego rodzaju odpowiedzią na zarzuty Witkina do podejścia Gibsona i udowadnia, że możliwe jest modelowanie powierzchni na podstawie „jednolitości tekseli” [1]. Umożliwiła ona diagnozę różnych krzywizn, w przeciwieństwie do rezultatów otrzymanych przez Blosteina i Ahuja [68].

Zaproponowany przez Blosteina i Ahuja algorytm cechuje możliwość odtwarzania kształtu na podstawie naturalnych tekstur, niezróżnicowanych w aspekcie globalnym. Jednak jego zalety były inne, gdyż autorzy ci, jako pierwsi zwrócili uwagę na trójwymiarowość tekstur. Blostein i Ahuja wprowadzili teksle w postaci dużych dysków, zawierających mniejsze, zwane podtekslami i zaproponowali podejście opierające się na skalowaniu tekstur [17].

Podsumowując należy zwrócić uwagę, iż zakres działania przedstawionych algorytmów różni się znacznie pomiędzy sobą. Niektóre lepiej sobie radzą z płaskimi powierzchniami, inne ze zróżnicowanymi. Technika SFT opiera się na pojedynczych obrazach, jest próbą odwzorowania ludzkiego postrzegania rzeczywistości, nierzadko wymaga ręcznego parametryzowania (przy klasyfikacji) i nie radzi sobie zbyt dobrze z grą świateł pomiędzy obiektami.

3.2.2. Odtwarzanie kształtu z ogniskowania

Technika *Shape from Focus and Defocus* do odtwarzania kształtu obiektów wykorzystuje dwa, lub więcej zdjęcia obiektu wykonane z tego samego miejsca. Metoda korzysta z założenia, że obraz silnie zależy zarówno od kształtu obiektów, jak i ich jasności. Jest to swoiste połączenie dwóch podejść, pierwsze *Shape from Defocus* (SFD), która polega na wydobywaniu głębi z wielu zdjęć wykonanych z różną ogniskową oraz *Shape from Focus* (SFF), która zbiera informacje z kilku obrazów w obrębie wyspecyfikowanego zespołu parametrów. Na rysunku 3.3 przedstawiono proces pozyskiwania danych.



Rys. 3.3. Proces pozyskiwania danych

Formowanie dwuwymiarowego obrazu opiera się na ścisłej zależności pomiędzy każdym punktem na płaszczyźnie tego obrazu, a umiejscowieniem ich na fotografowanej trójwymiarowej scenie. Taka zależność często nazywana jest funkcją punktowego rozproszenia (ang. *point spread function*). Wynikowa jasność poszczególnych pikseli obrazu jest wypadkową energii wypromieniowanej z określonego miejsca sceny, z uwzględnieniem ustawień układu optycznego oraz parametrów środowiska, w którym fotografia jest wykonana. Niech R oznacza radiancję, zaś σ zespół parametrów określających trójwymiarową przestrzeń. Natomiast aparat optyczny, to układ soczewki oraz powierzchni obrazu. Istnieje możliwość zmiany geometrii takiego przyrządu, zmieniając wzajemne położenie tych elementów, modyfikując ogniskową soczewki, bądź też regulując szerokość przesłony. Dla pewnego k (zależnego od ilości parametrów określających stan aparatury) definicja przestrzeni ma postać [42]:

$$u \in U \subset R^k . \tag{3.5}$$

Obraz I_u uzyskiwany jest za pomocą [42]:

$$I_u(x,y) = \int h_u^{\sigma}(x,y) dR , \tag{3.6}$$

gdzie $I_u(x,y)$ jest wynikową jasnością piksela w punkcie (x,y), h jest funkcją rozproszenia światła w punkcie (x,y), z parametrami σ i u, σ jest wektorem parametrów określających przestrzeń, u jest wektorem parametrów definiujący ustawienia układu optycznego.

Wzór (3.6) nie zapewnia stabilnego rozwiązania jednocześnie σ i R, dlatego konieczne jest zastosowanie kilku zdjęć o różnych geometriach soczewek. Wiedza na temat R dostarcza informacji o głębi obrazu, jednak, aby ją uzyskać należy przeprowadzić obliczenia opracowane po raz pierwszy przez Soatto i Mennucci [42].

Zatem odtwarzanie kształtu obiektów z wykorzystaniem techniki SFT można przedstawić, jako zadanie optymalizacyjne sformułowane następująco: mając zestaw obrazów L, wykonanych dla różnych ustawień u (u_1, ..., u_L), należy wyznaczyć estymatę σ oraz rozproszoną na powierzchni energię R. Tworzona jest w tym celu kolekcja obrazów w postaci wektora [42]:

$$I = \left[I_{u_1}, ..., I_{u_L} \right]^T , \tag{3.7}$$

gdzie I_{ui} jest i-tym obrazem z parametrami kamery u_i, u_i jest wektorem parametrów definiujący ustawienia układu optycznego i-tego obrazu.

Podobnie należy uczynić z [42]:

$$\left\{h_{u_l}\right\}_{l=1,...L}, \tag{3.8}$$

otrzymując następującą postać wzoru (3.6) [42]:

$$I(x,y)=\int h^{\sigma}(x,y)dR, \tag{3.9}$$

gdzie x, y należą do dziedziny D (obszar obrazu). Zakładając, że dziedzina D jest siatką punktów [42]:

$$D=[x_1,...,x_N]\times[y_1,...,y_M], \tag{3.10}$$

gdzie M i N mają charakter wymiaru analizowanego obrazu. Otrzymuje się w ten sposób nową postać wzoru (3.6) [42]:

$$I(x_i,y_j)=\int h^{\sigma}(x_i,y_j,\tilde{x},\tilde{y})r(\tilde{x},\tilde{y})d\tilde{x}d\tilde{y}, \tag{3.11}$$

gdzie $i=1...N$, $j=1...M$.

Ponieważ w ogólności nie istnieje jednoznaczne rozwiązanie, stosuje się odpowiednie kryteria optymalizacyjne. Każda funkcja celu oznaczona jest za pomocą symbolu $\|\bullet\|$ i ma postać [42]:

$$\hat{\sigma},\hat{r}=\arg\min_{\sigma,r}\|n\|. \tag{3.12}$$

Po podstawieniu do równania (3.11) otrzymuje się przykładową funkcję celu dla algorytmu optymalizacji, w postaci [42]:

$$I(x_i,y_j)=\int h^{\sigma}(x_i,y_j,\tilde{x},\tilde{y})r(\tilde{x},\tilde{y})d\tilde{x}d\tilde{y}+n(x_i,y_j)\forall(x,y)\in D. \tag{3.13}$$

3.2.3. Odtwarzanie kształtu z ruchu

Technika *Shape from Motion* (SFM) do odtwarzania kształtu obiektów wykorzystuje zarejestrowany za pomocą kamery ich ruch. W tym celu należy wybrać kierunek poruszania się kamery w układzie 3^D, a następnie określić przedział czasu (t, $t+\delta t$) pomiędzy kolejnymi klatkami animacji. Po zarejestrowaniu kilku obrazów można je traktować jak dane wejściowe dla algorytmów odtwarzania kształtu obiektów. Pamiętać należy jednak o tym, że zmiany pomiędzy obrazami są bardzo niewielkie (są to klatki filmu). Ważne jest zatem, aby scena pozostawała „sztywna" podczas ruchu, czyli pozostawały stałe wzajemne położenia pomiędzy obiektami sceny [98]. Dodatkowo przekształcenie pomiędzy obrazami nie musi być pojedynczą transformacją 3^D.

Najpopularniejszy algorytm SFM zaproponowali Tomasi i Kanade. Zastosowali metodę faktoryzacji, która kompletuje punkty pomiarowe w macierz będącą produktem „macierzy ruchu i macierzy kształtu" [90].

Kolejną propozycją w tej dziedzinie była metoda Szeliskiego, gdzie do odtworzenia struktury 3^D wykorzystał obrót, a nie ruch prosty. Opierając się na filozofii SFM, zastosował on podejście przyrostowe podczas estymacji głębi [97].

Bardzo często algorytmy bazujące na technice SFM dzielone są na dwa etapy. Pierwszy polega na śledzeniu punktów cechujących obiekt, dokonywaniu estymacji kolejnych klatek, wyznaczaniu na tej podstawie błędu oraz zebraniu, jak najwięcej informacji na podstawie tych wyników. Etap ten opiera się na analizie dużej liczby, bardzo podobnych do siebie klatek, które ułatwiają śledzenie wyróżnionych obszarów obrazu. Wyzwaniem dla algorytmów bazujących na technice SFM pozostaje jednak wciąż drugi etap, czyli rekonstrukcja kształtu obiektów. Przechwytywanie klatek podczas ruchu generuje sporo szumów, powstają również niedokładności w określaniu parametrów zewnętrznych układu optycznego.

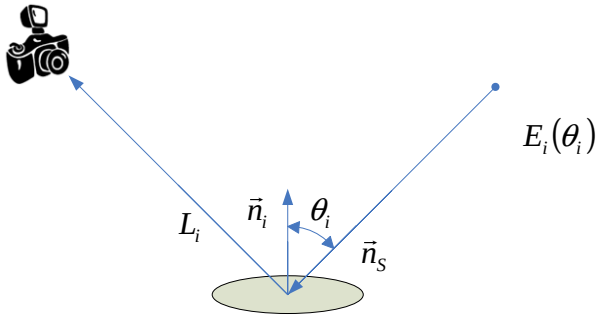
3.2.4. Odtwarzanie kształtu z odcieni szarości (SFS)

Technika *Shape from Shading* (SFS) jest zdecydowanie najpopularniejszą z opisywanych metod odtwarzania kształtu obiektów. Jej inną, mniej znaną nazwą jest fotoklinometria. Do obliczeń wykorzystuje jeden dwuwymiarowy obraz obiektu, dla uproszczenia obliczeń jest on najczęściej w odcieniach szarości.

Jak sama nazwa wskazuje, podstawową informacją wykorzystywaną w procesie rekonstrukcji kształtu obiektów jest stopień zacienienia różnych jego fragmentów na dwuwymiarowym jego obrazie. Do obliczeń niezbędna jest wiedza na temat kierunku padania światła na scenę. Należy także przyjąć model odbicia światła od powierzchni obiektu, który określać będzie moc odbitego światła w zależności od kąta jego padania, kąta pod jakim obiekt jest obserwowany i odległości źródła światła od obiektu. Dodatkowe informacje dotyczą współczynników, takich jak: przezroczystość ośrodka, w którym wykonano zdjęcie obiektu, współczynnik odbicia zwierciadlanego (ang. *specular*) a także współczynnik rozpraszania (ang. *diffuse*). Jako, że współczynniki te są określane przeważnie na potrzeby powstających modeli odbicia światła, oczywistym jest, że nie wszystkie brane są pod uwagę w każdym z tych modeli. Nie wszystkie też mają swój sens fizyczny, jak na przykład współczynnik rozpraszania w rozumieniu

Phong'a, jednak dzięki nim możliwe jest lepsze odwzorowania rzeczywistego zachowania światła.

W opisach techniki SFS często upraszcza się rozważania wprowadzając, jako model odbicia światła model Lambert'a, bądź model Phong'a. Model Lamberta – stosowany również w akustyce (podrozdział 2.5.1) – opisuje jasność obiektu jako funkcję jedynie kąta pomiędzy wektorem padania światła na punkt obiektu, a wektorem normalnym do powierzchni w tym punkcie. Na rysunku 3.4 przedstawiono schemat odbicia światła dla modelu Lamberta.



Rys. 3.4. Schemat odbicia światła dla modelu Lamberta

Zależność na jasności każdego punktu obiektu na jego dwuwymiarowym obrazie można zapisać, jako:

$$L_i = \frac{1}{\pi} E_i \cos\theta_i , \tag{3.14}$$

gdzie L jest energią światła odbitego od obiektu, E jest energią światła padającego na powierzchnię obiektu, θ jest kątem pomiędzy promieniem światła, a normalną do powierzchni, i oznacza i-ty punkt na powierzchni obiektu.

Wyrażenie $\cos\theta$ dla każdego punktu na powierzchni obiektu wyznaczane jest na podstawie wektora padania światła ($\vec{n}_S$) oraz wektora normalnego w tym punkcie ($\vec{n}_i$), jako:

$$\cos\theta = \frac{1 + p_s p + q_s q}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}\sqrt{1 + p_s^2 + q_s^2}} = R(p,q), \tag{3.15}$$

gdzie p i q są odpowiednio gradientami wysokości powierzchni obiektu z w kierunku osi x i y ($p = \partial z / \partial x$, $q = \partial z / \partial y$), p_S i q_S są odpowiednio składowymi x i y wektora padania światła dla i-tego punktu powierzchni obiektu, R jest mapą gradientów powierzchni obiektu.

Po podstawieniu (3.15) do (3.14) otrzymuje się pełny opis obiektu z niewiadomymi wektorami normalnymi $\vec{n}$. Po ich wyznaczeniu uzyskuje się globalną mapę wektorów $R(p,q)$, która jest jedną z postaci opisu trójwymiarowego obiektu.

Podstawową zaletą techniki SFS odtwarzania kształtu obiektów jest fakt, iż oparta jest na pojedynczym obrazie. Łatwo więc zaadoptować ją do szerokiej gamy problemów (doskonale nadaje się do opisu dalekich obiektów). Jest analogiczna do ludzkiego postrzegania, jednak nie uwzględnia tekstury pokrywającej obiekt. Do jej prawidłowego działania niezbędne jest nałożenie pewnych restrykcji, takich jak ograniczenie integralności, gładkości itp. W przeciwnym przypadku rozwiązanie równania (3.14) nie musi być jednoznaczne. Do problemów dodać należy również zachodzące krawędzie obiektów, światło odbite od innych części obiektów, różne współczynniki odbicia światła (dla różnych materiałów), zakłócenia i wiele innych.

3.3. Technika wykorzystująca zdjęcia stereo

Technika zdjęć stereo (ang. *photometric stereo*) jest kolejną próbą pasywnej symulacji zjawisk, jakie zachodzą w ludzkim mózgu. Próbuje ona symulować proces tworzenia trójwymiarowych projekcji na podstawie dwóch dwuwymiarowych obrazów z przesuniętymi względem siebie punktami obserwacji sceny.

Przesunięcie punktów obserwacji sceny realizuje się wykorzystując układ kamer przechwytujących obraz z różnych (ściśle określonych) lokalizacji. Na wstępie stosuje się szereg algorytmów poszukujących tzw. *punktów cechowych*, tj. elementów obiektu, które można jednoznacznie zidentyfikować na obu obrazach. Na podstawie znajomości parametrów układu optycznego (mowa tutaj o orientacji oraz położeniu kamer) oraz innych parametrów (m.in. projekcji), korzystając z zjawiska niezgodności stereoskopowej (w ang. *disparity*), możliwe jest obliczenie odległości tych punktów od obserwatora.

Technika jest dość złożona obliczeniowo, gdyż kryje się za nią sporo operacji macierzowych. Często problem ten rozwiązuje się stosując interpolacje pomiędzy punktami cechowymi, co jednak zmniejsza rozdzielczość otrzymywanej mapy głębokości. Ewolucja algorytmów wspomagających ulepszanie efektów pracy tej metody, doprowadziła do szeregu nowych koncepcji. Powstają nowe systemy śledzenia obiektów, które można zastosować do efektywniejszego kojarzenia punktów

cechowych. Z pomocą przychodzi również metoda linii bazowych (ang. *baseline*), tj. fotografowanie sceny w punktach oddalonych od siebie. Sekwencje wideo, bądź obrazy z wielu ujęć zwiększają dokładność odwzorowania, zwiększając tym samym gęstość pozyskiwanej mapy.

Strecha oraz Tuytelaars [97] zaproponowali własną realizację powyższych postulatów. Opracowany przez nich algorytm na wstępie poszukuje afiniczne i niezmienne obszary na wszystkich elementach wektora obrazów, dokonuje jednocześnie samokalibracji, aby zminimalizować błędy wynikające ze złego określenia parametrów kamer. Dla każdego obrazu oblicza się wstępną mapę głębokości, wraz z poziomami pewności każdego piksela. Następnie integruje się wszystkie mapy uwzględniając pewne kryterium integracyjne (minimalizacja funkcjonału energii dla każdej z kamer). Funkcjonał ten składa się z trzech współczynników: określający gradient intensywności w punktach cechowych, normujący odwrotność głębi oraz odpowiadający za płynne skalowanie jasności obrazu. Najogólniej mówiąc problem minimalizacji rozwiązuje się systemem cząstkowych równań różniczkowych z zastosowaniem metody spadku gradientów.

Niektóre podejścia opierają się na modelach bayesowskich. Ich niezaprzeczalną wadą w porównaniu do poprzedniego przykładu jest wymóg dokładnej znajomości parametrów kamery. Każdy obraz jest równocześnie przeliczany na lokalną mapę głębokości, co daje możliwość rozstrzygania „w locie” zjawisk typu śledzenie promieni, czy też zapewniania spójności map. Kolejnym krokiem podejścia jest poszukiwanie *maximum a posteriori* w wyrażeniu na prawdopodobieństwo warunkowe o postaci:

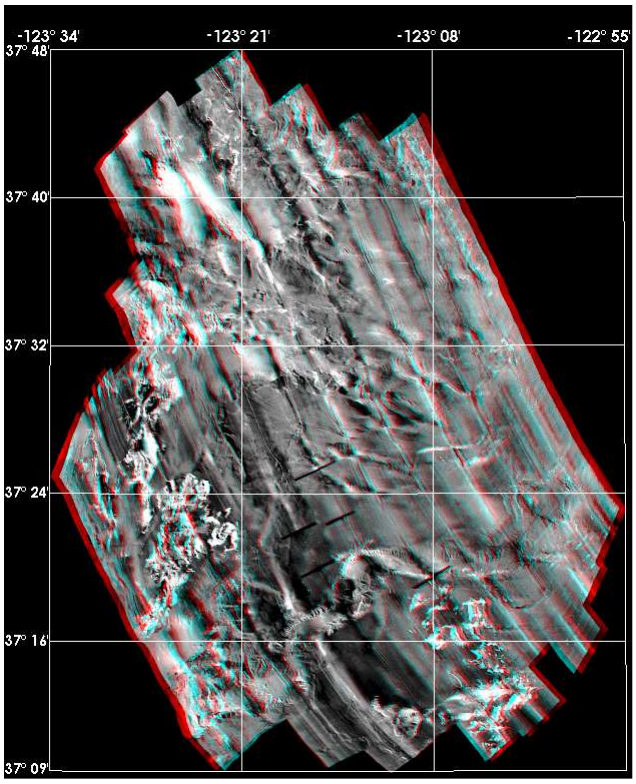
$$p(\theta \mid I) \propto p(I \mid \theta) p(\theta), \tag{3.16}$$

gdzie θ jest szukanym modelem sceny, I jest obrazem wejściowym.

Proces tworzenia map głębi odbywa się iteracyjnie, maksymalizując podobieństwo pikseli obrazów wyjściowych do ich odpowiedników z modelu.

Nister zastosował sekwencję klatek video, bez wstępnej kalibracji. Główna zaleta tej techniki leży raczej w narzędziach numerycznych zastosowanych do zwiększenia efektywności. Wstępne wytwarzanie map głębi następuje w wielu wariantach, opartych o modele bajesowskie z dużą liczbą różnych hipotez. Nister dokonuje najpierw mieszania tych hipotez, a następnie spaja wyniki stosując fuzję medianową – czyli wybór mapy będącej medianą spośród średnich głębokości otrzymanych map.

Na rysunku 3.5 przedstawiono przykład obrazu stereo wykonanego dla danych pochodzących z sonaru bocznego [59].



Rys. 3.5. Obraz stereo otrzymany dla danych pochodzących z sonaru bocznego

3.4. Algorytmy do odtwarzania kształtu obiektów bazujące na technice SFS

Pierwsze algorytmy odtwarzania kształtu obiektów bazujące na technice SFS powstały na początku lat 70-tych. Za ich twórcę uważa się B. K. P. Horn'a [52]. W książce „Robot Vision" opublikowanej w 1986 [53] przedstawił on szereg bardzo interesujących, wszechstronnych oraz użytecznych rozważań. Od czasu tej publikacji pojawiło się wielu zwolenników podejścia SFS. Zaczęło powstawać coraz więcej modyfikacji istniejących już rozwiązań. Dogłębna analiza problematyki widzenia przez maszyny wymagała szerokiej wiedzy z przetwarzania obrazów (segmentacja oraz dyskretyzacja obrazów, wykrywanie krawędzi), optyki (modele odbicia światła, próby optymalnego przechwytywania sceny) oraz matematyki (układy nieliniowe itp.). W niniejszym podrozdziale przybliżono teoretyczne podstawy techniki SFS oraz przeanalizowano ważniejsze algorytmy bazujące na tej technice.

Podstawową ideą algorytmów bazujących na technice SFS jest pozyskiwanie informacji o trójwymiarowej scenie na podstawie opisu pochodzącego z jednego, bądź

kilku dwuwymiarowych obrazów. Obiekty mogą być opisywane za pomocą punktów w przestrzeni trójwymiarowej, za pomocą mapy wektorów normalnych opisującej obiekt, jak również mapy gradientów powierzchni [108]. Wykorzystanie mapy gradientów powierzchni w procesie rekonstrukcji kształtu obiektów wydaje się mieć największe zastosowanie w rozważaniach teoretycznych.

Zanim zostanie przedstawiona klasyfikacja algorytmów SFS i przybliżone szczegóły ich implementacji, należy wyjaśnić, na czym polegają główne przyczyny niestabilności tych algorytmów. Wydaje się, że ogólną odpowiedzią na tak postawione pytanie byłaby złożoność i wielka ilość zjawisk świetlnych zachodzących nawet na sztucznie przygotowanej scenie. Wzajemne odbicia, w zasadzie dążą do nieskończonej liczby, trudnych do przewidzenia ścieżek. Oprócz tego występują jeszcze efekty perspektywy, zniekształcające obiekty w różnoraki sposób oraz krawędzie zachodzące na siebie, które fizycznie uniemożliwiają powstanie w oparciu o jeden obraz wiernej rekonstrukcji trójwymiarowej sceny. Pojawiają się również niepożądane zjawiska dotyczące samych obiektów, a mianowicie zmiany właściwości materiału, z jakiego zbudowany jest obiekt. Pociąga to za sobą zmianę wszystkich współczynników istotnych przy rozpraszaniu światła. Podczas oświetlania sceny światłem polichromatycznym, jak na przykład światło białe, trzeba brać pod uwagę fakt różnego zachowania się jego składowych widma. Rozszczepianie światła oraz różne współczynniki załamania w przypadku rzeczywistych zwierciadeł mogą się wiązać z różnym kątem odbicia. Wiązka światła najpierw przejdzie do innego środowiska (szkło), gdzie ulegnie rozszczepieniu, dopiero potem się odbije, i ponownie zmieni środowisko propagacji. Efekt ten nie zawsze jest obserwowalny gołym okiem, jednak uświadamiając sobie liczbę tego typu drobnych zdarzeń występujących na scenie, ich kumulacja zaczyna nabierać dużego znaczenia.

Innym problemem może być praca algorytmów z wieloma źródłami światła. Nie jest to bowiem jedynie kwestia wykonania kilku iteracji tego samego przepisu.

Dokładne zdefiniowanie samego światła jest również problematyczne. Ciężko jest chociażby, dostatecznie dokładne określenie kierunku dla wektora padania światła. Pozostaje też kwestia tego, czy jest to światło słoneczne, dla którego można założyć, że promienie są równoległe, a odległość względna obiektów od źródła jest pomijalna (brak efektów zacieniania obiektu znajdującego się dalej), czy też jest to punktowe źródło w niewielkiej odległości od sceny. Dla tego drugiego przypadku kąt padania na płaską powierzchnię obiektu zmienia się w każdym jego punkcie. Kwestię dystansu należy

również rozważyć w kontekście tłumienia światła, w próżni bowiem światło przemierza setki lat świetlnych, w wodzie tylko od kilku do kilkudziesięciu metrów. Tłumienie ma wpływ nie tylko na jasność, ale również na wynikową barwę obiektu.

Kolejne utrudnienia wprowadza sama specyfika techniki SFS. Podstawowymi operacjami w trakcie digitalizacji zdjęć są rasteryzacja oraz kwantyzacja cyfrowego obrazu. Są to oczywiście informacyjnie działania nieodwracalnie stratne i powodują przekłamania w tak powstałym obrazie sceny. Szczególne znaczenie ma tutaj rasteryzacja w przypadku zdjęć dużych obszarów. Przy takich obrazach dobór rozdzielczości ma duże znaczenie i kiedy jest niewystarczająca, pozostaje tylko opcja fraktalno-statystycznego traktowania obiektów na obrazie, nie zaś modelowania ściśle geometrycznego.

Powyższe trudności są główną przyczyną dużej liczby publikacji, w których autorzy przedstawiają różne podejścia do problemu SFS [25, 26, 39, 108]. Cechą wspólną dla nich pozostają główne założenia techniki SFS, u podstaw których leży wiedza na temat sposobu otrzymywania obrazu oraz obowiązujących reguł rządzących optyką geometryczną. Większość autorów wykorzystuje model Lamberta rozpraszania światła na powierzchni obiektów. Aby dodatkowo uprościć obliczenia, redukuje się często problem do analizy zdjęć czarno-białych oraz pomijane są te zjawiska, które nie mają istnego wpływu na otrzymywane rezultaty odtwarzania kształtu obiektów. Mimo tych wszystkich zabiegów, próbując opisać głębię obrazu za pomocą wektorów normalnych, otrzymuje się równanie nieliniowe z trzema niewiadomymi. Jeśli za wystarczający opis obiektu zostaną przyjęte gradienty powierzchni otrzymuje się równanie nieliniowe z dwiema niewiadomymi [52]. Mówi się, że SFS jest matematycznie niestabilne, ponieważ niezwykle trudno uzyskać jednoznaczne rozwiązanie tego równania. W tym celu stosuje się szereg ograniczeń nakładanych na te równanie. W ograniczeniach tych leży istota różnic pomiędzy poszczególnymi podejściami do zagadnienia rekonstrukcji kształtu obiektów z wykorzystaniem techniki SFS.

Najczęściej algorytmy bazujące na technice SFS dzieli się na cztery grupy: algorytmy minimalizacji, algorytmy propagacji, algorytmy lokalnej sferyczności powierzchni oraz algorytmy liniowej aproksymacji funkcji odbicia, które zostały zestawione w tabeli 3.1 wraz z autorami ważniejszych publikacji [108].

Podejście stosowane w algorytmach minimalizacji opiera się na ograniczeniu liczby rozwiązań minimalizując funkcję energii obrazu. Propagacja początkowej informacji po wszystkich pikselach obrazu jest domeną drugiej propozycji. Algorytmy lokalnej

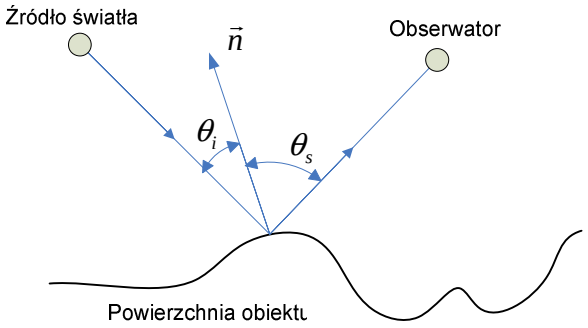
sferyczności powierzchni bazują na wstępnych założeniach o typie powierzchni, zaś algorytmy liniowej aproksymacji funkcji odbicia dokonują linearyzacji charakterystyki odbić obrazu.

Wszystkie te metody opisane w kontekście pracy zostaną przedstawione kolejnych podrozdziałach.

Tab. 3.1. Klasyfikacja algorytmów bazujących na technice SFS

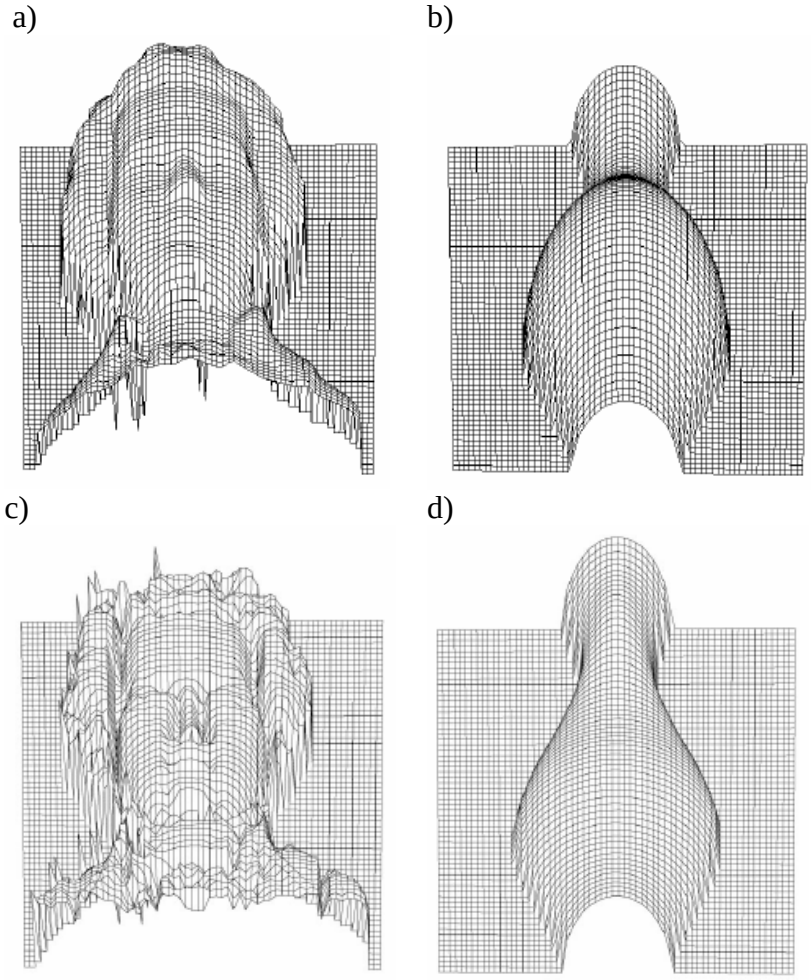
Algorytmy minimalizacji	Algorytmy propagacji	Algorytmy lokalnej sferyczności powierzchni	Algorytmy liniowej aproksymacji funkcji odbicia
Ikeuchi & Horn (81)	Horn (70)	Pentland (84)	Pentland (88)
Brooks & Horn (85)	Rouy & Tourin (92)	Lee & Rosefeld (85)	Tsai & Shah (92)
Frankot & Chellappa (88)	Dupuis & Oliensis (92)		
Horn (89)	Kimmel & Bruckstein (92)		
Malik & Maydan (89)	Bichsel & Pentland (92)		
Szeliski (91)			
Zheng & Chellappa (91)			
Lee & Kuo (91)			
Leclerc & Bobick (93)			
Vega & Yang (93)			

Na rysunku 3.6 przedstawiono geometrię wykorzystywaną przez algorytmy bazujące na technice SFS, gdzie $\vec{n}$ jest wektorem normalnym, θ_i jest kątem pomiędzy promieniem padającego światła, a wektorem normalnym do powierzchni obiektu, θ_s jest kątem pomiędzy wektorem normalnym, a odbitym promieniem docierającym do obserwatora [108].

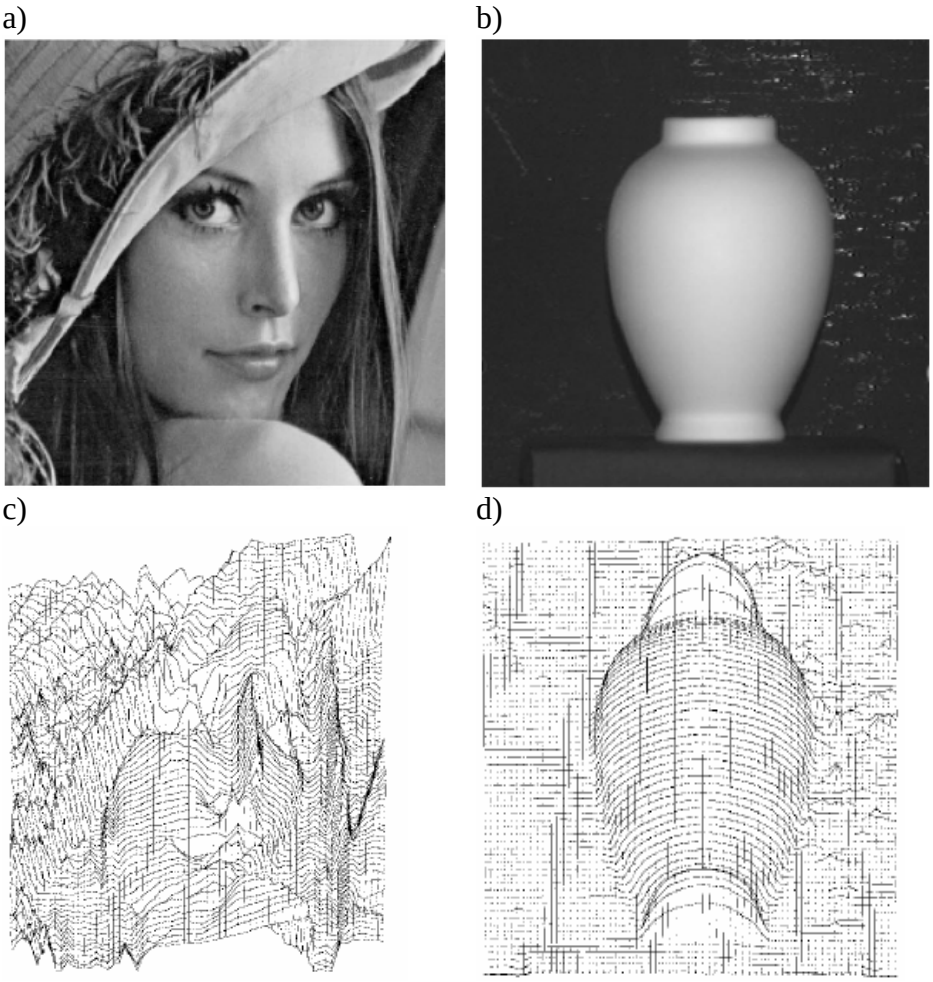


Rys. 3.6. Geometria wykorzystywana przez algorytmy bazujące na technice SFS

Wyniki rekonstrukcji kształtu obiektów na podstawie danych syntetycznych zostały przedstawione na rysunku 3.7, a dla danych rzeczywistych na rysunku 3.8 [108]. Jako dane syntetyczne zostały wykorzystane modele twarzy Mozarta (rysunek 3.7a) oraz model wazonu (rysunek 3.7b). Natomiast, jako dane rzeczywiste zdjęcia kobiety (rysunek 3.8a) oraz wazonu (rysunek 3.8b). Jak widać na rysunkach 3.7c i 3.7d uzyskane wyniki dla danych syntetycznych są praktycznie kopią obiektów na podstawie których zostały one wygenerowane. Natomiast dla danych rzeczywistych (rysunek 3.8c i 3.8d) dobre wyniki uzyskano dla zdjęcia wazonu, który posiada gładkie kształty. Dzieje się tak również dlatego, gdyż w przypadku danych syntetycznych informacja na temat powstania obrazu jest pełniejsza, niż w przypadku danych rzeczywistych.



Rys. 3.7. Dane syntetyczne, a) model twarzy Mozarta, b) model wazonu; uzyskane wyniki przez algorytm SFS c) dla modelu twarzy Mozarta, d) dla modelu wazonu



Rys. 3.8. Dane rzeczywiste, a) zdjęcie kobiety, b) zdjęcie wazonu; uzyskane wyniki przez algorytm SFS c) dla zdjęcia kobiety, d) dla zdjęcia wazonu

3.4.1. Algorytmy minimalizujące funkcję energii obrazu

Algorytmy minimalizujące funkcję energii obrazu poszukują rozwiązania równania, które reprezentuje najmniejszą energię obrazu. Autorami tego typu algorytmów są Ikeuchi i Horn [108], którzy zaproponowali przyjęcie dwóch ograniczeń: na jasność obrazu i na gładkość powierzchni. Odtwarzanie kształtu obiektu następowało poprzez minimalizację obu ograniczeń. Przedstawiona metoda wymagała jednak zainicjalizowania kształtu krawędzi zachodzących na siebie. Później ją ulepszano, wprowadzając dodatkowe ograniczenia i założenia.

Ograniczenie jasności *BC* (ang. *brightness constraint*) jest wskaźnikiem całkowitego błędu jasności odtworzonego obrazu obiektu, w porównaniu z obrazem wejściowym i wyraża się wzorem [108]:

$$BC = \iint (I - R)^2 \, dxdy \,, \tag{3.17}$$

gdzie I jest pomierzoną jasnością obrazu, R jest estymowaną charakterystyką odbić (ang. *reflectance map*).

Ograniczenie gładkości SC (ang. *smoothness constraint*) zapewnia gładką powierzchnię obiektu, w celu uzyskania jednoznacznego rozwiązania i wyraża się wzorem [108]:

$$SC = \iint \left(p_x^2 + p_y^2 + q_x^2 + q_y^2 \right) dxdy , \tag{3.18}$$

gdzie p i q są gradientami powierzchni wzdłuż kierunków osi x i y.

Wprowadzone później ograniczenie całkowalności IC (ang. *intergrability constraint*) zapewnia prawidłowo określoną powierzchnię, $Z_{x,y} = Z_{y,x}$ i można je wyrazić za pomocą następujących wzorów [108]:

$$IC = \iint \left(p_y - q_x \right)^2 dxdy , \tag{3.19a}$$

$$IC = \iint \left(\left(Z_x - p \right)^2 + \left(Z_y - q \right)^2 \right) dxdy . \tag{3.19b}$$

Kolejnym wprowadzonym ograniczeniem było ograniczenie gradientu jasności obrazu IGC (ang. *intensity gradient constraint*). Wymaga ono, aby gradient jasności obrazu rekonstruowanego był zbliżony do gradientu jasności obrazu wejściowego w obu kierunkach (wzdłuż osi x oraz y) i wyraża się wzorem:

$$IGC = \iint \left(\left(R_x - I_x \right)^2 + \left(R_y - I_y \right)^2 \right) dxdy . \tag{3.20}$$

Wreszcie ograniczenie jednostkowości wektorów normalnych UNC (ang. *unit normal constraint*) wymusza, aby wektory normalne do powierzchni w danym punkcie były jednostkowe. Ograniczenie to wyraża się wzorem [108]:

$$UNC = \iint \left(\left\| \vec{n} \right\|^2 - 1 \right) dxdy . \tag{3.21}$$

W algorytmie opracowanym przez Zheng i Chellappa [108] ograniczenie gradientu jasności obrazu zastąpiło ograniczenie gładkości powierzchni obiektu. Funkcja energii przyjęła zatem postać [108]:

$$EF = \iint \left(\left(I - R \right)^2 + \left(\left(R_x - I_x \right)^2 + \left(R_y - I_y \right)^2 \right) + \mu \left(\left(Z_x - p \right)^2 + \left(Z_y - q \right)^2 \right) \right) dxdy . \tag{3.22}$$

Jak widać funkcja ta jest liniową kombinacją trzech ograniczeń. I tak, składnik $\left(\left(R_x - I_x \right)^2 + \left(R_y - I_y \right)^2 \right)$ jest ograniczeniem gładkości powierzchni obiektu, $\left(I - R \right)^2$ jest ograniczeniem gradientu jasności obrazu, zaś składowa $\left(\left(Z_x - p \right)^2 + \left(Z_y - q \right)^2 \right)$ jest ograniczeniem integralności. Obliczenia oparte są o uproszczone równania Eulera, poprzez uwzględnienie tylko pierwszego wyrazu rozwinięcia w szereg Taylora

dyskretnej reprezentacji charakterystyki odbić obrazu. Następnie iteracyjnie wyznaczane są gradienty i wysokości kolejnych punktów powierzchni obiektu. Metoda nie wymaga przyjmowania żadnych szczególnych warunków początkowych. Autorzy metody sugerowali zastosowanie współczynnika $\mu = 1$ we wzorze (3.22).

3.4.2. Algorytmy propagacji

Najstarszy z gałęzi algorytmów propagacji wprowadzony został przez Horna [108], który jednocześnie wprowadził podstawowe pojęcie, tzw. *charakterystycznego paska*. Taki pasek jest linią podążającą za zmianą głębokości i orientacji powierzchni. Może on być obliczony, jeśli znany jest jego początek. Horn konstruował – korzystając z aproksymacji sferycznej – początkowe krzywe wokół pojedynczych punktów mających lokalnie największą jasność. Informacja o kształcie przenosi się jednocześnie wzdłuż pasków na zewnątrz, nie krzyżując się z przyległymi paskami. W przypadku, gdy paski są oddalone od siebie zanadto, należy interpolować położenie nowych, aby zadbać o odpowiednią gęstość powstałej mapy [108].

Algorytm zaproponowany przez Bischela i Pentlanda [108] jest rozwinięciem metody tzw. *minimalnego stoku*, dzięki czemu gwarantuje odtworzenie powierzchni ciągłych. Propagacja informacji następuje w 8 kierunkach dyskretnego obrazu, co gwarantuje przeszukanie całego obrazu oraz prawidłowe zakończenie procesu. Po uwzględnieniu ograniczenia równoległych stoków oraz umiejętnym przyrównaniu pierwszej pochodnej charakterystyki odbić do zera otrzymujemy równania na poszczególne składowe gradientów:

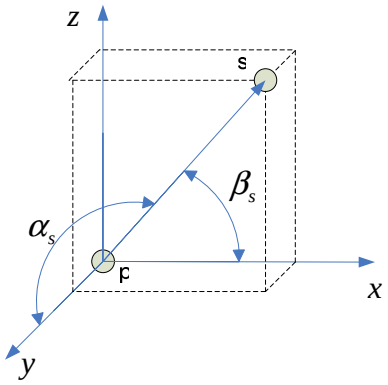
$$p = \frac{-s_x s_z \pm \sqrt{\left(1-R^2\right)\left(R^2 - s_y^2\right)}}{R^2 - s_x^2 - s_y^2}, \qquad q = \frac{p s_y s_x - s_y s_z}{R^2 - s_y^2}. \tag{3.23}$$

gdzie (s_x, s_y, s_z) są składowymi x, y, z wektora kierunkowego padania światła, natomiast R jest charakterystyką odbić zdefiniowaną według wybranego modelu.

3.4.3. Algorytmy bazujące na lokalnej sferyczności powierzchni

Algorytmy bazujące na metodzie lokalnej sferyczności powierzchni obiektu wychodzą z założenia, że jego powierzchnia jest w każdym punkcie lokalnie sferyczna. Z założenia tego wyszedł Pentland [108] dodając, iż można odtworzyć kształt obiektu

na podstawie jasności punktów obrazu oraz ich pierwszej i drugiej pochodnej. Podobnie Lee i Rosenfeld [108] wyznaczyli kąty nachylenia α_S, β_S związane z położeniem źródła światła w sferycznym układzie współrzędnych, względem punktu na powierzchni obiektu (ang. *slant* i *tilt*), co zostało przedstawione na rysunku 3.9.



Rys. 3.9. Źródło światła w sferycznym układzie odniesienia

W algorytmie Lee i Rosenfeld [108] wyznaczane są lokalne kąty nachylenia powierzchni obiektu we współrzędnych sferycznych względem źródła światła, następnie są one transformowane z powrotem do układu współrzędnych obserwatora. Autorzy udowodnili ponadto, że nachylenie wektorów normalnych powierzchni obiektu może być wyznaczone ze wzoru [108]:

$$\beta = \arctan \frac{I_y \cos\beta_S - I_x \sin\beta_S}{I_x \cos\beta_S \cos\alpha_S + I_y \cos\alpha_S \sin\beta_S}, \tag{3.24}$$

gdzie I_x, I_y są natężenia odbitego światła w kierunkach x i y, α_S i β_S są kątami związanymi z położeniem źródła światła w sferycznym układzie odniesienia, zdefiniowanymi powyżej.

Innowacje wprowadzone przez autorów, znacznie przyśpieszają podejście, zaproponowane przez Pentland'a [108], gdyż dzięki nim metoda korzysta jedynie z pierwszej pochodnej. Powoduje to jednak mniejszą odporność na szumy. Metoda wyróżnia się rotacjami obrazu pomiędzy współrzędnymi obserwatora, a źródła światła. Nie wymaga jednak określenia parametrów wejściowych dla algorytmu.

3.4.4. Algorytmy bazujące na liniowej aproksymacji funkcji odbicia

W metodzie tej Pentland użył liniowej aproksymacji funkcji odbicia w celu obliczenia gradientu. Funkcja ta przyjmuje wówczas postać:

$$I(x,y) = R(p,q) = \frac{\cos\alpha_S + p\cos\beta_S \sin\alpha_S + q\sin\beta_S \sin\alpha_S}{\sqrt{1+p^2+q^2}}, \tag{3.25}$$

gdzie α_S i β_S są kątami związanymi z położeniem źródła światła w sferycznym układzie odniesienia, natomiast p i q są składowymi wektora gradientu w rozkładzie reflektancji.

Biorąc tylko pierwszy składnik rozwinięcia w szereg Taylor'a oraz ignorując pozostałe (wokół p_0 i q_0) otrzymujemy aproksymację:

$$I(x,y) = R(p_0,q_0) + (p-p_0)\frac{\partial R}{\partial p}(p_0,q_0) + (q-q_0)\frac{\partial R}{\partial q}(p_0,q_0). \tag{3.26}$$

Dla modelu Lamberta $p_0 = q_0 = 0$ i funkcja redukuje się do postaci:

$$I(x,y) = \cos\alpha_S + p\cos\beta_S \sin\alpha_S + q\sin\beta_S \sin\alpha_S . \tag{3.27}$$

Następnym krokiem jest transformacja Fouriera obu stron równania. Ponieważ pierwszy czynnik po prawej jest stały w dziedzinie (x, y), można go pominąć i stosując przekształcenie:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial x} Z(x,y) \leftrightarrow F_Z(w_1,w_2)(-iw_1), \\ &\frac{\partial}{\partial y} Z(x,y) \leftrightarrow F_Z(w_1,w_2)(-iw_2), \end{aligned} \tag{3.28}$$

otrzymujemy:

$$F_I = F_Z(w_1,w_2)(-iw_1)\cos\beta_S \sin\alpha_S + F_Z(w_1,w_2)(-iw_2)\sin\beta_S \sin\alpha_S , \tag{3.29}$$

gdzie F_Z jest transformatą Fourier'a funkcji $Z(x,y)$, natomiast F_I jest transformatą Fourier'a na wykonaną na obrazie $I(x,y)$.

Po zmianach w powyższych współczynnikach, można na podstawie równania (3.29) i transformaty odwrotnej uzyskać mapę lokalnych nachyleń powierzchni obiektu.

3.5. Podsumowanie

Ze względu na podobieństwa zagadnień rozchodzenia się fali akustycznej w środowisku wodnym oraz zjawisk zachodzących w optyce, w rozdziale tym zostały przedstawione techniki odtwarzania kształtu obiektów wykorzystywane w grafice komputerowej.

Efekty końcowe procesu przetwarzania danych hydroakustycznych, jakim są obrazy sonarowe, opartego na wyświetlaniu natężenia echa fali akustycznej, mogą być zbliżone do czarno-białych zdjęć. Dlatego technika SFS wydaje się być najbardziej przydatną w procesie odtwarzania kształtu dna morskiego oraz obiektów na dnie z obrazów sonarowych. W rozdziale 5 zostały przedstawione opracowane w tym celu algorytmy bazujące na technice SFS oraz rezultaty otrzymane za ich pomocą.

4. Analiza wybranych algorytmów optymalizacji

4.1. Wprowadzenie

Ogólny podział metod optymalizacji, uważanych za najbardziej reprezentatywne, przedstawia rysunek 4.1 [57]. Teoria i metody obliczeniowe optymalizacji są opisane w literaturze [43, 89]. Są to konwencjonalne, klasyczne metody optymalizacji oraz, stosunkowo nowe, metody optymalizacji globalnej.

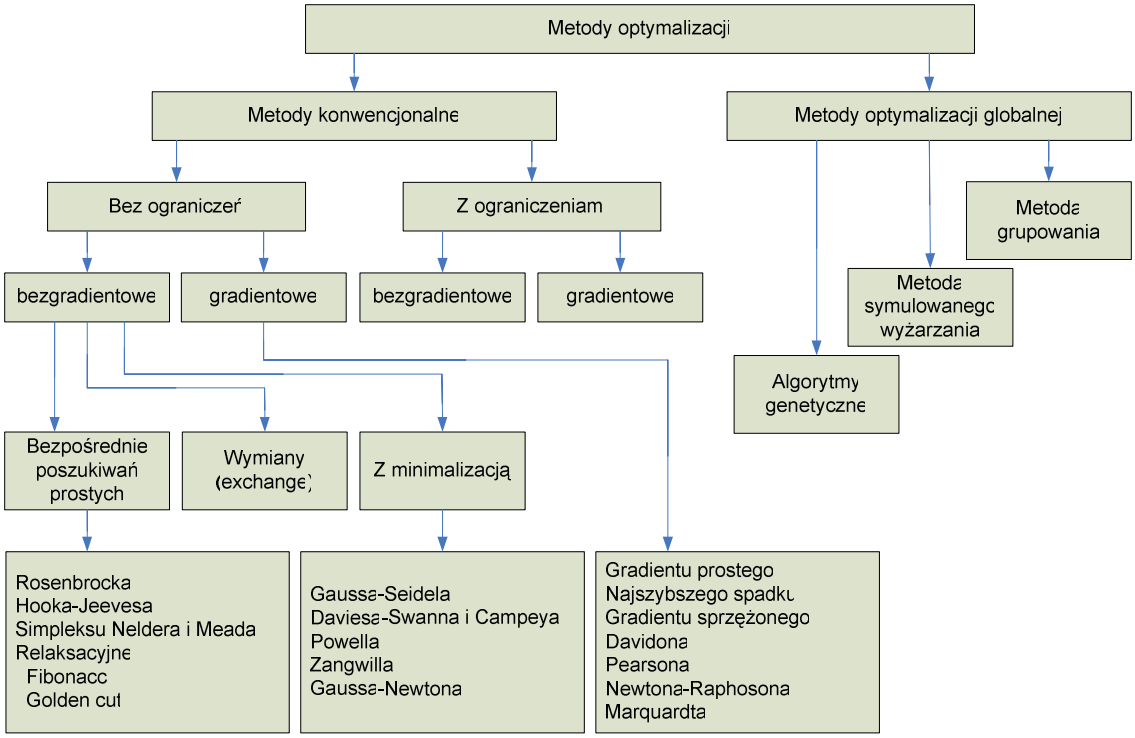
Wśród klasycznych metod optymalizacji bez ograniczeń, wyróżnia się:

- metody bezgradientowe, które w każdej iteracji wykorzystują informacje tylko o wartościach funkcji celu Q,
- metody gradientowe, które w każdej iteracji wykorzystują informacje o wartościach funkcji celu Q oraz o wartościach jej gradientu ∇Q.

Metody z ograniczeniami muszą dodatkowo uwzględniać odpowiednio wartości funkcji celu Q i funkcji ograniczających G, oraz wartości ich gradientów ∇Q i ∇G.

Podziału metod optymalizacji można dokonać także ze względu na sposób rozwiązywania zadania i tu wyróżnia się:

- metody wymiany (ang. *exchange algorithms*),
- metody bezpośrednie (ang. *direct search*),
- metody aproksymacyjne (metoda funkcji kary, metoda aproksymacji kwadratowych).



Rys. 4.1. Podstawowe metody optymalizacji

Metody bezgradientowe są łatwiejsze w implementacji, ale wolniejsze. W metodach gradientowych wyznaczany jest kierunek poszukiwania minimum. Jednakże metody postępujące ścieżką największego spadku zawodzą w pobliżu minimum funkcji celu, gdyż mają one tendencję do błądzenia. Z powyższego wynika zasadność stosowania algorytmów kombinowanych: dla punktów przestrzeni parametrów relatywnie dalekich od minimum funkcji celu stosuje się metodę największego spadku, a w pobliżu minimum zastępuje się ją metodą linearyzacji funkcji regresji, np. metodą Gaussa-Newtona. Tak właśnie przebiegają obliczenia według metody Marquardta-Levenberga. Jest ona metodą kombinowaną, wykorzystującą zalety zarówno metody gradientowej jak i bezgradientowej. W metodzie tej kierunek w przestrzeni parametrów dający najszybszy spadek wartości funkcji celu jest wyznaczany w oparciu o wartości współczynników czułości tej funkcji względem poszczególnych jej parametrów oraz na podstawie wyniku obliczeń w poprzednim kroku. W pobliżu minimum funkcji celu, kiedy metoda najszybszego spadku traci efektywność, zastępuje się ją metodą Gaussa-Newtona. Funkcję rozwija się w szereg Taylora i ogranicza do jej składnika liniowego. Następnie, poszukiwanie minimum jest poprzedzone analitycznym określeniem jego położenia, tak jakby zagadnienie było liniowe. Dalsze ewentualne iteracje służą do precyzyjnego zlokalizowania minimum. Może to być konieczne ze względu na błąd

związany z uproszczeniem zagadnienia do liniowego. Ta kombinowana metoda Marquardta-Levenberga jest często rekomendowana jako efektywna.

Stosunkowo nową grupą metod optymalizacji są metody optymalizacji globalnej. Należą tu: metoda grupowania (ang. *clustering method*), metoda symulowanego wyżarzania (ang. *simulated annealing*) i algorytmy genetyczne. Metody te są stosowane do wyznaczania parametrów zapewniających minimum funkcji celu zdefiniowanej np. jako suma kwadratów odchyłek. Są one również stosowane do analizy danych pomiarowych, a także do rozwiązywania tzw. zagadnień źle uwarunkowanych.

Konwencjonalne metody poszukiwania minimum startują z obranego punktu początkowego i poszukując w jego pobliżu mniejszej (niż poprzednia) wartości funkcji celu, zmierzają do minimum. Poszukiwanie takie uzależnione jest od obranego punktu startowego i nie zawsze kończy się w minimum globalnym. Algorytmy globalnej optymalizacji ukierunkowane są na zwiększenie prawdopodobieństwa osiągnięcia minimum globalnego. Wykorzystywane są w tym celu różne metody stochastyczne. Metody globalne nie gwarantują uzyskania rozwiązania optymalnego, jednak prawdopodobieństwo błędu można uczynić bardzo małym.

W metodach optymalizacji globalnej obliczane są wartości funkcji celu dla pewnego zestawu stochastycznie wybranych punktów – różne metody oznaczają różne strategie doboru zestawu punktów. Skuteczność konkretnej metody zależy od właściwości danej funkcji celu, dlatego nie można mówić o metodach globalnej optymalizacji ogólnego zastosowania. Metoda i jej parametry muszą być dopasowane do specyfiki problemu.

Tradycyjnie minimum globalne może być wyznaczone poprzez, po pierwsze, wybór wielkiej liczby lokalizacji punktów startowych, po drugie, rozpoczęcie poszukiwań dla każdego z punktów startowych. Jednak niektóre spośród punktów startowych mogą prowadzić do tego samego minimum lokalnego. Oznacza to, że te same obszary mogą być wielokrotnie przeszukiwane. Liczba oszacowań funkcji celu będzie wówczas bardzo duża.

4.2. Algorytmy bezgradientowe

W metodzie Rosenbrocka [43] poszukiwane jest ekstremum w n wzajemnie ortogonalnych, stałych kierunkach ulegających zmianom w wyniku obrotu. Baza

wyjściowa $S_1...S_n$ tworzona jest najczęściej z wektorów jednostkowych (wersorów) układu współrzędnych kartezjańskich. Na wstępie wykonuje się po jednym kroku o długości e w każdym z tych kierunków. Jeśli w danym kierunku zostanie osiągnięty sukces, to następuje zwiększenie długości kroku w tym kierunku (poprzez przemnożenie bieżącej długości kroku przez współczynnik a). Natomiast w przeciwnym przypadku, długość kroku mnożona jest przez współczynnik b z przedziału (-1 .. 0), a więc wykonywany jest krótszy krok w przeciwnym do danego kierunku. Procedura taka jest powtarzana aż do momentu, gdy wykonanie kroku we wszystkich n kierunkach daje efekt niepomyślny, czyli $f(x_j) > f(x_{j-1})$ dla wszystkich j. W tej sytuacji jeżeli jest spełnione kryterium na ekstremum, to procedurę można uznać za zakończoną, w przeciwnym wypadku zaś wykonywany jest algorytm obrotu współrzędnych i rozpoczyna się działanie algorytmu od początku.

Kryterium zbieżności tej metody zaproponowane przez Rosenbrocka opiera się na założeniu, iż bieżący punkt można uznać za minimum, jeśli w czasie pięciu kolejnych obrotów współrzędnych (i wykonaniu kroków we wszystkich ortogonalnych kierunkach po każdym obrocie) nie wystąpił żaden pomyślny krok. Jednak w realizacjach praktycznych ze względu na zbytnie przedłużenie czasu wykonywania procedury stosuje się zwykle znacznie prostsze kryterium narzucając z góry ilość iteracji. Po wykonaniu tej liczby iteracji porównuje się uzyskany wynik z oczekiwaniami i ewentualnie przyjmuje nową wartość ilości iteracji startując z ostatnio wyliczonego punktu. Współczynniki a, b należy dobrać eksperymentalnie, w przypadkach rozpatrywanych przez Rosenbrocka, jako optymalne wartości przyjęto $a = 3$ i $b = 0{,}5$.

Algorytm Rosenbrocka składa się z trzech głównych kroków [60]. Krok pierwszy polega na obliczeniu wartości funkcji w punkcie startowym i wyznaczeniu wartości funkcji $f(x_{j-1} + e_j S_j)$ dla wszystkich kierunków bazy ($j = 1...n$). Gdy $f(x_{j-1} + e_j S_j) < f(x_{j-1})$, to obliczana jest suma pomyślnych kroków $d_j = d_{j-1} + e_j$, przy czym $d_0 = 0$, przesunięcie punktu $x_j = x_{j-1} + e_j S_j$ oraz zwiększany jest krok ($e_j = a e_j$). W przeciwnym przypadku zmniejszany jest krok ($e_j = -b e_j$) oraz następuje podstawienie $x_j = x_{j-1}$. Krok ten jest powtarzany aż do momentu, gdy $d_j = 0$ dla wszystkich $j = 1...n$. Jeżeli nastąpiło to po jego jednokrotnym wykonaniu, to przechodzimy do kroku drugiego, w którym następuje zmiana punktu startowego x_0 i

powtórzenie kroku pierwszego. W przeciwnym wypadku, jeśli minimum nie zostało osiągnięte, następuje przejście do kroku trzeciego, w którym. wykonywany jest obrót ortogonalnego układu współrzędnych S i powrót do wykonywania kroku pierwszego.

Kolejnym algorytmem bezgradientowym jest metoda simpleksu Neldera i Meada [43]. Polega ona na utworzeniu w przestrzeni E^{n+1} n-wymiarowego simplexu o $n+1$ wierzchołkach tak, aby można było go wpisać w powierzchnię reprezentującą badaną funkcję celu. Jednowymiarowym simplexem jest odcinek o dwóch wierzchołkach, simplexem dwuwymiarowym jest trójkąt. Uogólniając, simplexem n-wymiarowym o $n+1$ wierzchołkach jest zbiór wszystkich punktów określonych przez wektory:

$$x = \sum_{j=1}^{n+1} x_j S_j \text{ , przy czym } \sum_{j=1}^{n+1} x_j = 1 \text{ oraz } x_j \geq 0, \tag{4.1}$$

czyli jest to wielościan o $n+1$ wierzchołkach rozpiętych na $n+1$ wektorach bazowych (S_j). Współrzędne punktów simplexu oznaczono jako x_j. Na początku procedury wyliczane są współrzędne punktów wierzchołkowych simplexu P_j (dla $j = 1...n+1$), przy założeniu pewnej odległości między tymi wierzchołkami (czyli kroku). W następnych iteracjach dokonuje się przekształceń simplexu, aż odległość pomiędzy jego wierzchołkami w pobliżu poszukiwanego ekstremum będzie mniejsza od założonej dokładności obliczeń e. To właśnie zostało przyjęte jako kryterium zbieżności dla tej metody. Podczas wykonywania algorytmu metody simplex stosuje się trzy podstawowe operacje:

- odbicie punktu P_h względem $P'(P^* = (1+a)P' - aP_h)$,
- ekspansja punktu P^{**} względem $P'(P^{**} = (1-c)P^* - cP')$,
- kontrakcja punktu P_h względem $P'(P^{***} = bP_h + (1-b)P')$.

Oznaczenie przyjęte we wzorach, to: x_0 – punkt startowy, e – wymagana dokładność obliczeń, d – początkowa odległość pomiędzy wierzchołkami wyjściowego simplexu, a – współczynnik odbicia punktu ($a > 0$), b – współczynnik kontrakcji punktu ($0 < b < 1$), c – współczynnik ekspansji punktu ($c > 1$), n – liczba zmiennych niezależnych, P_h – wybrany punkt wierzchołkowy simplexu spośród $n+1$ wierzchołków P_i, w którym wartość badanej funkcji osiąga maksimum, P_L – wybrany punkt wierzchołkowy simplexu spośród $n+1$ wierzchołków P_i, w którym wartość

badanej funkcji osiąga minimum, P' – środek symetrii simplexu z wyłączeniem punktu P_h zdefiniowany jako:

$$P' = \frac{\sum_{j=1}^{n+1} P_j}{n}, \text{ przy czym } j \neq h. \tag{4.2}$$

Wartości współczynników a, b, c dobiera się w sposób eksperymentalny, choć w przykładach rozpatrywanych przez autorów metody jako optymalne przyjęto wartości $a = 1, b = 0{,}5$ oraz $c = 2$.

Algorytm simpleksu Neldera i Meada składa się z jedenastu głównych kroków [60]. Krok pierwszy polega na obliczeniu wartości funkcji celu w punktach wierzchołkowych simplexu $F_j = f(P_j)$, dla $j = 1...n+1$. W krok drugim wyznaczane jest h i L takie, że $f(P_h) = \max$ oraz $f(P_L) = \min$ spośród zbioru F_j. Krok trzeci to obliczenie środka symetrii simplexu P'. W kroku czwartym wyznaczane jest odbicie $P*$ punktu P_h względem P'. Krok piąty to obliczenie wartości funkcji $F_S = f(P')$ oraz $F_o = f(P*)$. Jeśli $F_o < \min$, następuje przejście do kroku szóstego, w którym następuje obliczenie $P**$ (ekspansja) i wartości funkcji $F_e = f(P**)$. W kroku siódmym, jeśli $F_e < \max$ następuje podstawienie $P_h = P**$, w przeciwnym przypadku $P_h = P*$. Krok ósmy to powtórzenie procedury od kroku pierwszego, o ile nie jest spełnione kryterium na minimum. Natomiast jeśli $F_o > \min$, algorytm przechodzi do kroku szóstego i jeśli $F_o \geq f(P_j)$, dla $j = 1...n+1$ (z pominięciem $j = h$) oraz $F_o \geq \max$, następuje przejście do następnego kroku algorytmu. Jeśli zaś $F_o < \max$ to wykonywane jest podstawienie $P_h = P*$. Krok siódmy to wykonanie kontrakcji $P***$ punktu P_h względem P'. W kroku ósmym obliczane jest $F_k = f(P***)$. Krok dziewiąty, jeżeli $F_k \geq \max$, to wykonanie redukcji simplexu według wzoru $P_j = 0{,}5*(P_j + P_L)$, dla $j = 1...n+1$. Jeżeli natomiast $F_k < \max$, następuje podstawienie $P_h = P***$ i przejście do kroku jedenastego algorytmu. W kroku dziesiątym, jeśli $F_o < f(P_j)$, dla $j = 1...n+1$ (z pominięciem $j = h$), wykonywane jest podstawienie $P_h = P*$. Ostatni krok jedenasty to powtórzenie procedury od kroku pierwszego, jeśli nie zostało spełnione kryterium na minimum.

Innym przykładem algorytmu bezgradientowego jest metoda Powella [43]. W metodzie tej modyfikację bazy uzyskuje się przez wprowadzenie na miejsce jednego ze starych kierunków poszukiwań, nowego kierunku sprzężonego z pozostałymi. Przy wykonywaniu tego rodzaju operacji należy pamiętać o zachowaniu niezależności liniowej kierunków w nowo utworzonej bazie, gdyż w przeciwnym razie może nastąpić redukcja jej wymiaru, co w efekcie będzie prowadzić do rozbieżności metody. Koncepcja tej metody oparta została na następujących twierdzeniach:

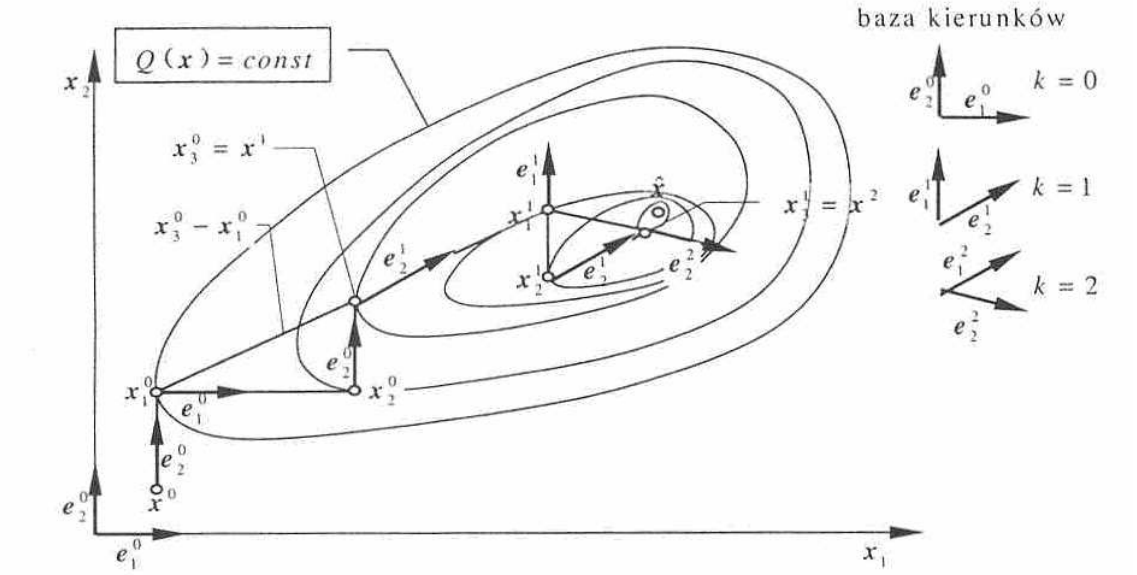
- Jeśli $e_1^k ... e_i^k ... e_n^k$, są kierunkami wzajemnie sprzężonymi względem dodatnio określonej macierzy A, a ponadto wraz z punktem startowym $x_0 \in R^n$ określają n-wymiarową rozmaitość (rozmaitość jest równa całej przestrzeni R^n), to minimum formy kwadratowej $f(x) = q + b^T x + \frac{1}{2} x^T A x$ może być wyznaczone w skończonej liczbie iteracji, w wyniku minimalizacji funkcji $f(x)$ wzdłuż każdego z tych kierunków e_i^k tylko raz.
- Jeśli x_0 jest minimum w kierunku d należącym do pewnej rozmaitości oraz jeśli x_1 jest minimum na tym samym kierunku d, lecz w innej rozmaitości zawierającej ten kierunek, to kierunek $(x_1 - x_0)$, łączący te dwa minima, jest sprzężony z kierunkiem d.

Danymi wejściowymi dla algorytmu Powella są: $x_0 = (x_{10},..., x_{n0})$ – dowolnie wybrany punkt startowy, $\zeta_1,...\zeta_n$ – baza wzajemnie ortogonalnych wersorów, ε_j ($j = 1,...n$) – wymagana dokładność obliczeń minimum funkcji celu w j-tym kierunku, ε_0 – wymagana dokładność obliczeń minimum globalnego.

Algorytm Powella składa się z czterech kroków [60]. W kroku pierwszym wybierany jest punkt startowy x_0, zakłada się $k = 0$ oraz początkową bazę kierunków poszukiwań określoną przez wersory kartezjańskiego układu współrzędnych $e_1^k ... e_i^k ... e_n^k$. Następnie w kroku drugim, wychodząc z punktu x_k, wykonywana jest minimalizacja funkcji $Q(x)$ kolejno w kierunkach bazy wersorów e_i^k, a otrzymane w jej wyniku minimum x_i^k w kierunku e_i^k przyjmuje się za pośredni punkt startowy następnej minimalizacji. Postępowanie powtarza się dla kolejnych kierunków $i = 1,2,...,n-1,n$. W kolejnym kroku trzecim, ostatni z punktów x_{n+1}^k przyjmowany jest za nowy punkt

startowy x_{k+1}. Jeżeli $\left\|x^{k+1}-x^{k}\right\|<\varepsilon$, to następuje koniec obliczeń, przyjmując $\hat{x}=x^{k+1}$. W ostatnim czwartym kroku wyznaczy jest kierunek sprzężony $e_{n+1}^{k}=\dfrac{x_{n+1}^{k}-x_{1}^{k}}{\left\|x_{n+1}^{k}-x_{1}^{k}\right\|}$ oraz wykonywana jest modyfikacja kierunków bazy, a mianowicie: $e_{i}^{k+1}=e_{i+1}^{k}$ dla $i=1,2,...,n-1,n$. Jeżeli wersory wyznaczające zmodyfikowaną bazę kierunków poszukiwań są liniowo niezależne, tzn. gdy wyznacznik $\left|e_1^k...e_i^k...e_n^k\right|=0$ następuje powrót do kroku drugiego algorytmu. W przeciwnym przypadku przywracana jest początkowa baza kierunków poszukiwań i algorytm wraca do kroku drugiego.

Na rysunku 4.2 przedstawiono kolejne kroki algorytmu Powella [60].



Rys. 4.2. Kolejne kroki algorytmu Powella

Metoda Powella jest bardzo czuła na dobór punktu startowego. W przypadku punktów źle dobranych, krzywa zbieżności tej metody zbliżona jest do krzywej kwadratowej. Oznacza to, że w początkowym okresie zbieżności jest dosyć wolna, natomiast w otoczeniu minimum zaczyna przyspieszać. Tego rodzaju przebieg można wyjaśnić tym, że początkowo poszukiwanie odbywa się wzdłuż ortogonalnej bazy kierunków, w wyniku czego przesunięcie jest znikomo małe, dopiero utworzenie sprzężonych kierunków określa właściwy kierunek poszukiwania minimum i od tego momentu efektywność minimalizacji rośnie. W przypadku natomiast lepszego doboru punktów startowych krzywa zbieżności metody Powella ma charakter wykładniczy typu $1-e^{-y}$, a więc znacznie lepszy od liniowego.

4.3. Algorytmy gradientowe

Algorytm gradientu sprzężonego jest metodą poszukiwania minimum funkcji bez ograniczeń [43]. Zakłada się, że funkcja celu $Q(x)$ jest klasy $C1$ (czyli pierwsza pochodna Q' funkcji Q jest funkcją ciągłą w danym przedziale (a,b) oraz że jest funkcją wypukłą (wykres funkcji leży ponad wykresem stycznej dla każdego punktu x_0 z przedziału (a,b). W przypadku funkcji różniczkowalnej zapisuje się to zależnością:

$$\forall_{x,x_0\in(a,b)}\ Q(x)\geq Q(x_0)+Q'(x_0)(x-x_0). \tag{4.3}$$

W metodzie tej konieczna jest znajomość wartości funkcji celu w dowolnym punkcie oraz gradientu funkcji celu.

Gradientem funkcji wielu zmiennych jest wektor złożony z pochodnych cząstkowych względem poszczególnych zmiennych. Czyli dla funkcji $Q(x_1,...,x_2)$ gradient będzie wyglądał następująco:

$$\nabla Q=\left[\frac{\partial Q(x_1,...,x_n)}{\partial x_1},...,\frac{\partial Q(x_1,...,x_n)}{\partial x_n}\right]. \tag{4.4}$$

Cechy gradientu, to:

- zwrot wektora gradientu wskazuje kierunek, w którym dana wielkość Q rośnie najszybciej,
- długość wektora gradientu

$$\nabla Q=\vec{u}\quad to\quad \left|\vec{u}\right|=\sqrt{u_1^2+...+u_n^2} \tag{4.5}$$

określa jak szybko dana wielkość Q zmienia się w tym kierunku,

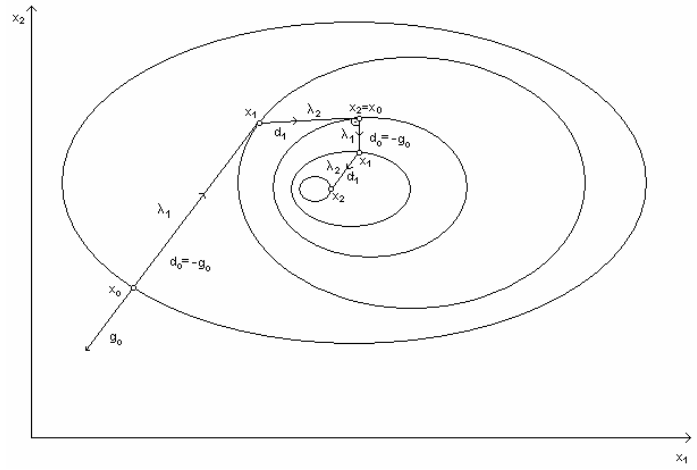
W układzie współrzędnych kartezjańskich wektor gradientu wynosi

$$\nabla Q=\left[\frac{\partial Q}{\partial x},\frac{\partial Q}{\partial y},\frac{\partial Q}{\partial z}\right], \tag{4.6}$$

lub inaczej

$$\nabla Q=\frac{\partial Q}{\partial x}\vec{i}+\frac{\partial Q}{\partial y}\vec{j}+\frac{\partial Q}{\partial z}\vec{k}\ , \tag{4.7}$$

gdzie $\vec{i},\vec{j},\vec{k}$ są wersorami osi kartezjańskiego układu współrzędnych. Na rysunku 4.3 przedstawiono kolejne kroki algorytmu gradientu sprzężonego.



Rys. 4.3. Kolejne kroki algorytmu gradientu sprzężonego

Metoda gradientów sprzężonych ma wiele zalet. Występują jednak także ujemne strony stosowania tej metody. Jest ona bardzo „kosztowna numerycznie", ponieważ w każdym kroku stosowania algorytmu należy odwrócić macierz drugich pochodnych. Wymagane jest obliczenie macierzy drugich pochodnych, co nie jest zgodne z ideą metody wstecznej propagacji błędów. Metoda ta jest niestabilna numerycznie, zwłaszcza w przypadku, gdy punkt startowy nie jest położony dostatecznie blisko poszukiwanego rozwiązania.

W celu uniknięcia tych niedogodności w praktyce stosuje się metody wywodzące się z metody Newtona, ale odpowiednio zmodyfikowane. Jedną z najpopularniejszych takich modyfikacji jest algorytm Marquardta-Levenberga [43]. Jest to metoda oparta na modelu obszaru (ang. *model-trust region approach*), która działa w następujący sposób: zamiast przeprowadzać poszukiwanie w jakimkolwiek kierunku (tak czy inaczej wyznaczonym), przyjmuje się założenie, że powierzchnia ma jakiś ustalony prosty kształt, tak że jej minimum może zostać wyznaczone (i osiągnięte) bezpośrednio, w jednym kroku. Następnie przeprowadza się optymalne dopasowanie założonego modelu do posiadanych danych. Powstaje w ten sposób prosty model złożonej (w rzeczywistości) powierzchni błędu. W oparciu o ten model wyznacza się (obliczeniowo) hipotetyczne położenia minimum. Następnie model jest testowany w celu określenia, jak dobre jest sugerowane rozwiązanie. Jeśli test wykaże użyteczność modelu, wówczas wskazany przez model punkt jest przyjmowany jako kolejny punkt startowy (do wykonania kolejnej przymiarki modelu i kolejnej próby "ustrzelenia" poszukiwanego minimum). Po sukcesie próby dopasowywania modelu następny krok wykonywany jest podobnie, ale z większym zaufaniem do modelu. Jeśli natomiast test wykaże, że model

nie spełnia pokładanych w nim nadziei – powraca się (częściowo) do bezpiecznej, ale czasochłonnej metody najszybszego spadku. W typowych modelach zakłada się, że modelowana powierzchnia funkcji błędu charakteryzuje się łagodnym kształtem, dobrze opisywalnym za pomocą prostych wzorów matematycznych oraz posiadającym dobrze zaznaczone minimum. Najczęściej zakłada się, że jest to po prostu paraboloida, co w obszarze położonym dostatecznie blisko poszukiwanego minimum jest założeniem dosyć prawdopodobnym. W obszarach odległych od minimum wspomniane założenie może być jednak całkowicie nieprawdziwe i model zbudowany na podstawie tego założenia może poprzez swoje minimum wskazać krańcowo nieodpowiedni punkt – gdyby do tego właśnie punktu nastąpiło przesunięcie procesu poszukiwania minimum funkcji błędu może nastąpić znaczne pogorszenie procesu uczenia. Dlatego konieczna jest kontrola i ewentualna korekta. Doświadczenie wykazuje, że przy złym dopasowaniu modelowi można zaufać wyłącznie w najbliższym otoczeniu bieżącego punktu. Kłopot polega na tym, że wielkość tego otoczenia nie jest znana i musi być ustalona empirycznie. Z tego powodu nowy wybrany punkt (w przypadku niepowodzenia zastosowania "czystego" modelu) jest kompromisem między punktem sugerowanym przez model, a tym, który jest sugerowany przez (opartą na gradiencie) metodę największego spadku. Jeśli nowy punkt jest dobry, to następuje przejście do niego i zostaje wzmocniona rola modelu przy wyborze nowego punktu. Jeśli punkt jest źle wybrany – to nie jest wykonywane przejście do niego, ale jest wzmacniana rola metody gradientowej w wyborze kolejnego punktu i próba jest ponawiana. Jeżeli nadal wytypowany punkt nie spełnia oczekiwań – jeszcze raz zmniejszana jest rola modelu, a wzmacniana rola składnika pochodzącego od gradientu. Ta procedura może być wypróbowywana wielokrotnie, przy czym za każdym razem zmniejszana jest wielkość kroku wykonywanego we wskazanym kierunku.

4.4. Algorytmy optymalizacji globalnej

Metoda grupowania [57], należąca do grupy algorytmów optymalizacji globalnej, identyfikuje zgrupowania punktów wokół minimów funkcji celu. Dla przypadkowo wybranych lokalizacji początkowych poszukiwane są minima lokalne. Po kilku iteracjach lokalizacje minimów zaznaczają się, jako zgrupowania. Zgrupowania te zostają rozdzielone w taki sposób, że każdy ich punkt zostaje zaliczony do klasy

reprezentowanej przez najbliższy punkt centralny. W ten sposób zostaje zredukowana liczba poszukiwań w tych samych obszarach. Następnie minima lokalne są klasyfikowane według odpowiednich algorytmów, a ich punkty centralne są uaktualniane w kolejnym kroku optymalizacji.

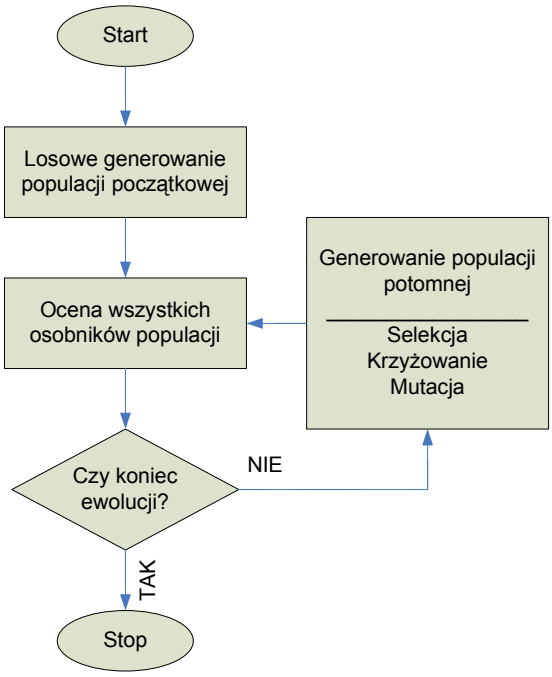
Optymalizacja z zastosowaniem symulowanego wyżarzania [57] jest często przeprowadzana przy użyciu symulacji Metropolis będącej narzędziem statystyki fizycznej. W każdym cyklu obliczana jest wartość funkcji celu w pewnym, przypadkowo wybranym punkcie. Jeśli otrzymana wartość jest mniejsza od poprzedniej, punkt zostaje bezwarunkowo zaakceptowany. Jeśli jednak nowa wartość jest większa od poprzedniej, badany punkt zostaje zaakceptowany z prawdopodobieństwem P zależnym od zmiany wielkości funkcji celu ΔE_R oraz zależnym od parametru T:

$$P(\Delta E_R, T) = exp\left[\frac{-\Delta E_R}{T}\right]. \tag{4.8}$$

Im mniejsza jest wartość parametru T, tym mniejsza jest szansa zaakceptowania nowego punktu. Podczas wykonywania algorytmu wartość parametru sterującego T jest stopniowo obniżana. Przy pewnej, małej wartości T, faktycznie nie są już akceptowane żadne zmiany i algorytm zatrzymuje się.

Idea algorytmów genetycznych polega na naśladowaniu ewolucji gatunków. Przez miliony lat ewolucji natura stworzyła ogromną różnorodność form i zachowań organizmów żywych, często doprowadzonych do perfekcji, które od zarania dziejów fascynują człowieka i są dla niego wciąż niedoścignionym wzorem do naśladowania. Źródłem inspiracji w rozwiązywaniu problemów stała się również sama ewolucja i właśnie na jej mechanizmach oparte są algorytmy genetyczne. Za ich twórcę uważa się Johna Hollanda, który w 1975 roku opublikował książkę na temat algorytmów genetycznych pt. *Adaptation in Natural and Artificial Systems* [51]. Od tego czasu powstało wiele ulepszeń i rozszerzeń pierwotnej metody: programowanie genetyczne, programowanie ewolucyjne, genetyczne odprężanie, strategie ewolucyjne i inne. Działanie algorytmów genetycznych zaczyna się od stworzenia losowej populacji algorytmów, które mogą być rozwiązaniem jakiegoś problemu, bądź przepisem na jego rozwiązanie. Następnie tworzone są nowe populacje poprzez wybranie z poprzedniej algorytmów lepszych i ich modyfikowanie przez operatory genetyczne: krzyżowanie, mutację i reprodukcję, w ten sposób, aby nowa populacja miała średnio lepsze własności. Proces tworzenia następnych populacji kończy się, jeżeli najlepszy algorytm w populacji spełnia określone kryteria. Algorytmy genetyczne znalazły zastosowanie do

rozwiązywania problemów optymalizacji, w tym również NP-trudnych problemów optymalizacji kombinatorycznej, przewidywania ruchów na giełdzie, rozpoznawania obrazów, tworzenia grafiki oraz projektowania budynków i maszyn. Na rysunku 4.4 przedstawiono ogólny schemat algorytmu genetycznego.



Rys. 4.4. Ogólny schemat algorytmu genetycznego

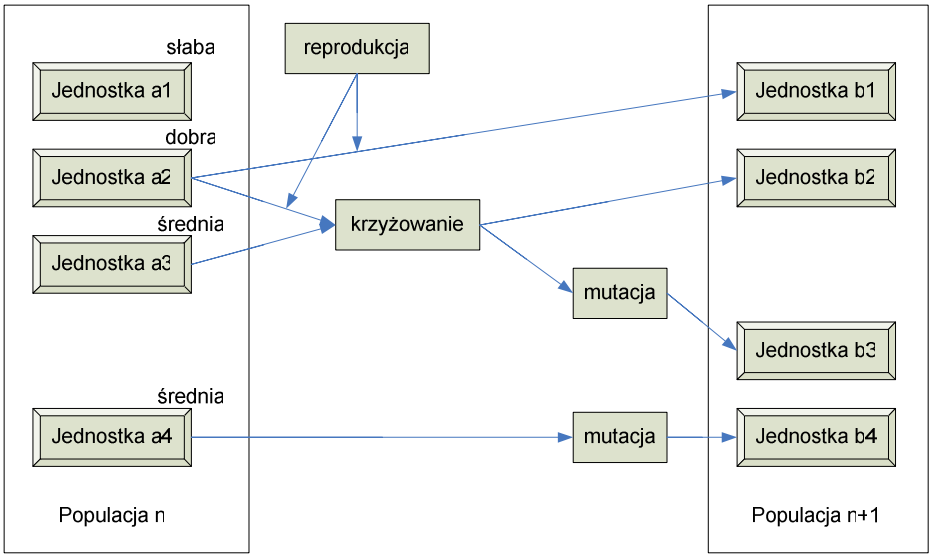
Krzyżowanie tworzy dwie nowe jednostki poprzez wymieszanie informacji z dwóch jednostek rodzicielskich [51]. Kojarzenie ma sprawić, że potomek dwóch osobników rodzicielskich ma zespół cech, który jest kombinacją ich cech.

Mutacja wprowadza do genotypu losowe zmiany [51]. Jej zadaniem jest wprowadzanie różnorodności w populacji, czyli zapobieganie (przynajmniej częściowe) przedwczesnej zbieżności algorytmu.

Selekcja polega na losowaniu ze zwracaniem osobników z populacji bazowej do populacji rodzicielskiej [51]. Losowanie odbywa się metodą probabilistyczną za pomocą współczynnika prawdopodobieństwa obliczanego za pomocą wartości funkcji przystosowania [51]. Jest to typowy mechanizm naturalny odrzucający słabsze osobniki, dający największą szansę przetrwania osobnikom najlepiej przystosowanym. Najczęściej stosowaną metodą selekcji jest metoda koła ruletki [51].

Operatory genetyczne modyfikują tylko jednostki o najwyższej wartości funkcji dopasowania [51]. Proces tworzenia nowej populacji przedstawiony został na rysunku 4.5. Proces rozwiązywania problemu można znacznie przyspieszyć wykorzystując

wiedzę o problemie, przy określaniu struktury jednostki i konstruowaniu operatorów genetycznych.



Rys. 4.5. Proces tworzenia nowej populacji

4.5. Podsumowanie

Metody optymalizacji przedstawione w niniejszym rozdziale stanowią podstawę dla opracowanych algorytmów rekonstrukcji kształtu dna morskiego dla danych uzyskiwanych z pomiarów sonarem bocznym. Jako sposób optymalnego rozwiązania problemu odtwarzania kształtu z odcieni szarości pozwalają na globalną minimalizację błędu średniokwadratowego w całym rekonstruowanym obszarze dna i stanowią najbardziej zaawansowaną algorytmicznie technikę.

W wyniku analizy algorytmów optymalizacji wydaje się, iż najbardziej odpowiednią grupą, dla procesu rekonstrukcji kształtu dna morskiego, byłyby algorytmy bezgradientowe, ze względu na złożoność minimalizowanej funkcji celu w procesie rekonstrukcji dna morskiego z echogramów sonaru bocznego (rozdział 5).

5. Opracowane algorytmy do trójwymiarowej rekonstrukcji kształtu dna morskiego oraz obiektów położonych na dnie

5.1. Wprowadzenie

Trójwymiarowe obrazowanie dna morskiego za pomocą systemów hydroakustycznych jest coraz częściej wykorzystywane do takich celów, jak: planowanie przebiegu i nadzorowanie rurociągów, wyszukiwanie i badanie wraków, wyszukiwanie min oraz monitorowanie i charakteryzowanie środowiska morskiego, a w szczególności samego dna. Współczesne systemy hydroakustyczne są bardziej niezawodne oraz potrafią obrazować dużo większe obszary dna morskiego w porównaniu z innymi wykorzystywanymi w tym celu technikami takimi, jak: podwodne kamery video, autonomiczne pojazdy podwodne AUV (ang. *Autonomous Underwater Vehicles*), ROV (ang. *Remotely Operated Vehicles*) i inne. Ponadto systemy hydroakustyczne w odróżnieniu od wymienionych urządzeń nie są wrażliwe na stopień przejrzystości wody.

Systemy hydroakustyczne wyposażone w sonary boczne są coraz częściej wykorzystywane do obrazowania dna morskiego oraz obiektów na dnie. Sonary boczne są stosunkowo tanie i łatwe w użytkowaniu w porównaniu z innymi sensorami, takimi jak echosondy wielowiązkowe, lub sonary z syntetyczną aperturą. Mają one jednak pewne ograniczenia, gdyż z uwagi na naturę swego funkcjonowania, generowane obrazy reprezentujące amplitudę sygnału odbieranego od kolejnych fragmentów dna są dwuwymiarowe, natomiast odtworzenie trzeciego wymiaru z tych danych nie jest

zadaniem trywialnym. Większość atrakcyjnych zobrazowań dna morskiego oraz obiektów na dnie jest otrzymywana za pomocą systemów wyposażonych w sonary wielowiązkowe, które umożliwiają ich bezpośrednią trójwymiarową wizualizację [13]. Mimo tego istnieje wiele obrazów dwuwymiarowych dna, uzyskanych z echogramów z sonarów bocznych, które mogą zostać przekształcone w ich trójwymiarową reprezentację. Stosowane są w tym celu algorytmy, które do odtworzenia trzeciego wymiaru wykorzystują informację o natężeniu echa zawartą w odcieniach szarości obrazu sonarowego.

Wybrane techniki trójwymiarowej rekonstrukcji kształtu dna morskiego oraz obiektów na dnie na podstawie danych z sonaru bocznego, w postaci dwuwymiarowych obrazów zostały przedstawione w podanej literaturze [25, 26, 39]. Przedstawione tam podejścia bazują głównie na klasycznej, wspomnianej już, technice wykorzystywanej w grafice komputerowej *Shape form Shading* (SFS) [7, 108]. W czasie tworzenia trójwymiarowych map rzeźby dna morskiego technika SFS, do obliczania lokalnego kąta nachylenia dna, wykorzystuje informację zawartą w echogramie sonaru w skali szarości. Podejście to zakłada, że poziom szarości poszczególnych pikseli wyraża zależność współczynnika rozpraszania fali akustycznej na powierzchni dna od kąta padania sygnału sondującego (co odpowiada modelowi odbicia w klasycznym SFS). Jako model rozpraszania fali akustycznej wykorzystywany jest najczęściej, zapożyczony z optyki geometrycznej, model Lamberta. Przytoczony model może być stosowany dla kątów padania od około 50° do 85° w dużym stopniu niezależnie od częstotliwości sygnału sondującego [64].

W niniejszej rozdziale zostaną zaprezentowane dwie metody trójwymiarowej rekonstrukcji dna morskiego i obiektów na dnie na podstawie danych z sonaru bocznego, opracowane i zaimplementowane przez autora rozprawy.

Pierwsza metoda przetwarzania danych z sonarów bocznych została opracowana do rekonstrukcji kształtu obiektów (np. wraków), w celu ich trójwymiarowej wizualizacji. Bezpośrednie zastosowanie klasycznej techniki SFS do odtwarzania kształtu wraków wydaje się tu nie być właściwe, ponieważ prowadzi do uzyskania bardzo gładkich kształtów obiektów, które znacznie różnią się od rzeczywistych. Proponowane modyfikacje klasycznego podejścia polegają, po pierwsze – lokalnej estymacji gradientu wysokości za pomocą algorytmu SFS, przy użyciu prawa Lamberta, jako modelu rozpraszania fali akustycznej na dnie. Po drugie – estymacji wysokości obiektów przy użyciu rozmiaru „cienia akustycznego”. Cień akustyczny jest to obszar

„niewidoczny” dla fali akustycznej, fragment powierzchni, do którego nie dotarł i na której nie rozproszył się sygnał echa, ponieważ jest zasłonięty przez inne elementy obiektu.

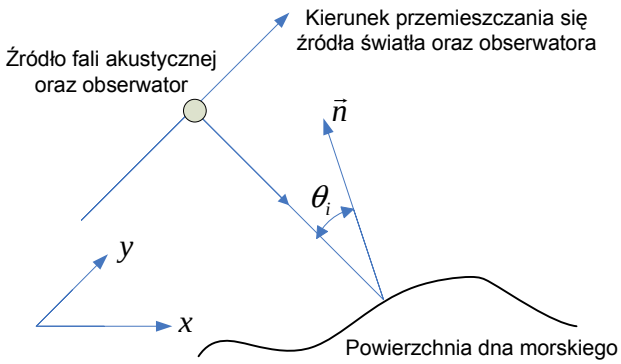
Druga metoda została opracowana w celu trójwymiarowej rekonstrukcji rzeźby dna morskiego, również oparta na technice SFS i jest modyfikacją i rozszerzeniem metody rekonstrukcji kształtu wraków.

5.2. Rekonstrukcja dna morskiego z wykorzystaniem techniki SFS

Bezpośrednie zastosowanie klasycznej techniki SFS do odtwarzania kształtu obiektów na dnie morskim powoduje, iż uzyskane wyniki znacznie odbiegają od rzeczywistości. Różnice wynikają z tendencji wygładzania kształtu obiektów przez klasyczne algorytmy SFS. W przypadku dna morskiego, gdzie dominują gładkie kształty, podjęto próby wykorzystania klasycznego SFS do odtwarzania jego kształtu.

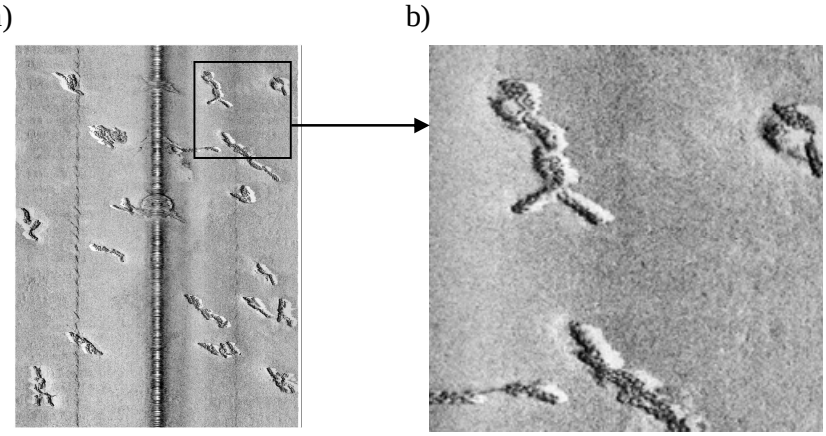
W procesie rekonstrukcji kształtu dna morskiego za pomocą klasycznego SFS wykorzystano kody źródłowe napisane w języku C [108], wprowadzając dwie istotne modyfikacje. Pierwsza polegała na umieszczeniu źródła fali akustycznej oraz obserwatora w jednym punkcie (rysunek 5.1). Druga wprowadza przemieszczanie się źródła fali (w klasycznym SFS źródło jest nieruchome), w każdym kroku działania algorytmu wzdłuż osi y. W dalszej części pracy algorytm ten nazywany jest zmodyfikowanym algorytmem SFS.

Jako model rozpraszania dźwięku na dnie wykorzystano prawo Lamberta (wzór 2.18).



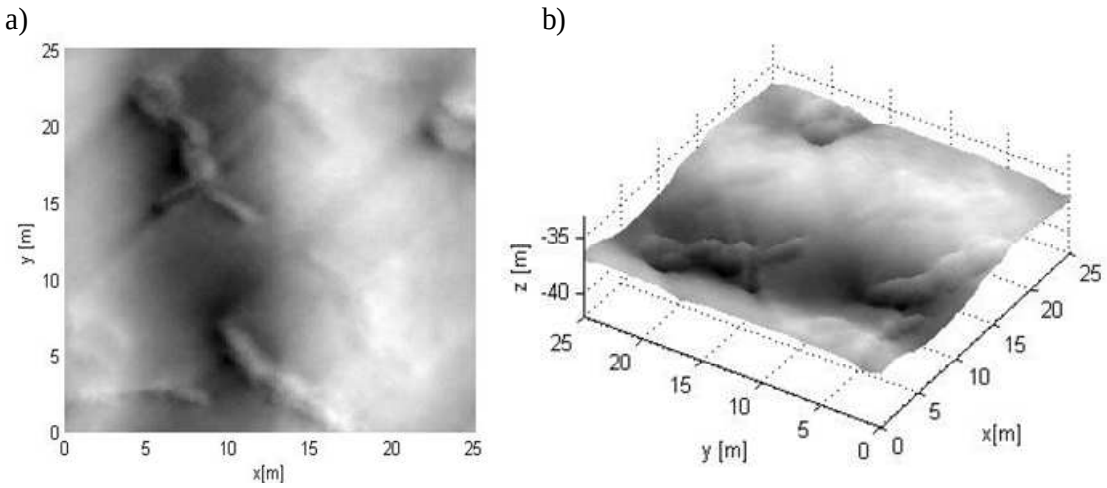
Rys. 5.1. Geometria wykorzystywana w zmodyfikowanym algorytmie SFS

Na rysunku 5.2 przedstawiono echogram z sonaru bocznego oraz wycięty jego fragment będący źródłem danych w procesie rekonstrukcji dna morskiego z wykorzystaniem zmodyfikowanego algorytmu SFS.



Rys.5.2. a) obraz sonarowy b) powiększony fragment tego obrazu

Na rysunku 5.3 przedstawiono wyniki działania zmodyfikowanego algorytmu SFS.

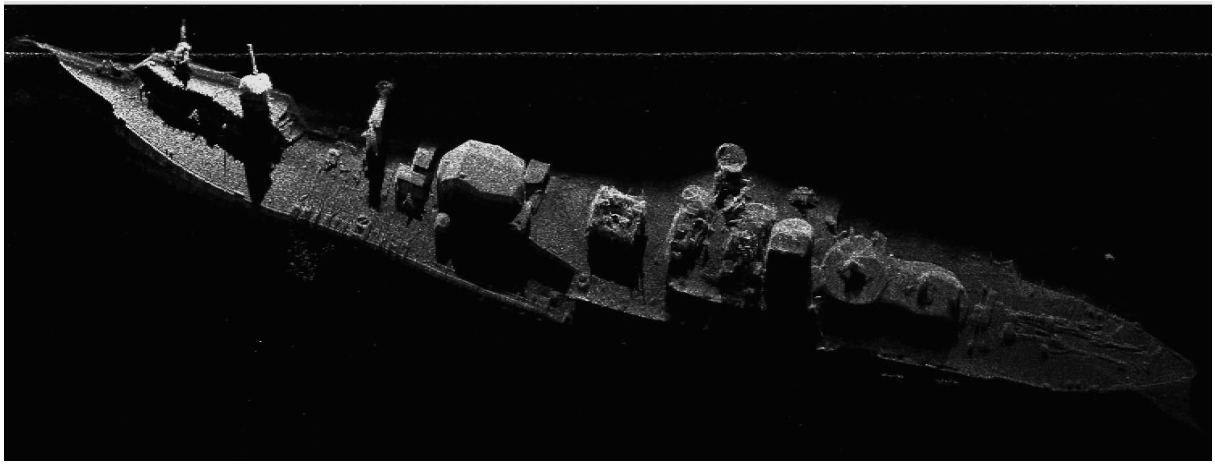


Rys. 5.3. Wynik działania zmodyfikowanego algorytmu SFS, a) widok 2^D, b) widok 3^D

Jak widać na rysunku 5.3 wyniki uzyskane za pomocą zmodyfikowanego algorytmu SFS potwierdzają przydatność zastosowania tej techniki w procesie rekonstrukcji kształtu dna morskiego z echogramów sonaru bocznego.

5.3. Algorytm do trójwymiarowej rekonstrukcji obiektów położonych na dnie morskim

Opracowana procedura trójwymiarowej rekonstrukcji kształtu wraków została przetestowana dla danych z sonaru bocznego Marine Sonic Technology Ltd. [58]. Dane te zostały zebrane przy użyciu systemu Sea Scan Centurion wyposażonego w sonar boczny pracujący na częstotliwości 600kHz. Dwuwymiarowy obraz sonarowy wraku statku USS Utah leżącego w pobliżu Perl Harbor został przedstawiony na rysunku 5.4.



Rys. 5.4. Obraz wraku USS Utah leżącego w pobliżu Pearl Harbor niedaleko Wysp Forda, uzyskany przez 7 oddział Inżynieryjny Armii USA przy użyciu systemu Sea Scan Centurion pracującego z częstotliwością sygnału sondującego wynoszącą 600kHz

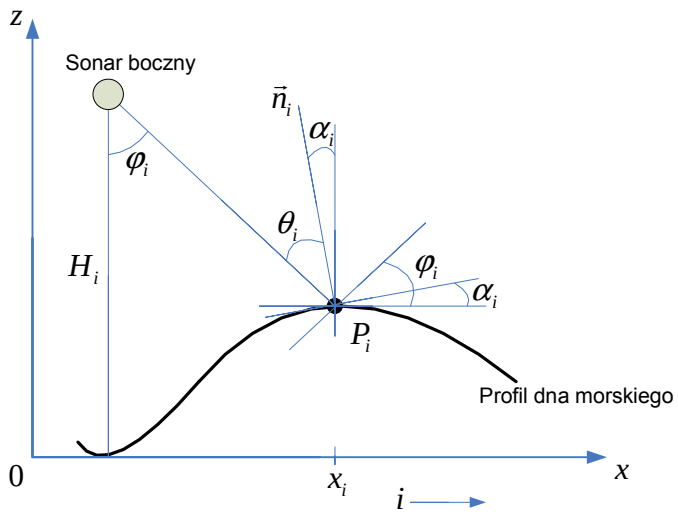
Przy opracowywaniu algorytmu trójwymiarowej rekonstrukcji kształtu obiektów położonych na dnie morskim zostały przyjęte następujące założenia [14]:

1. rozchodzenie się fali akustycznej w wodzie odbywa się po linii prostej (optyka geometryczna),
2. model rozpraszania fali akustycznej na obiekcie jest znany,
3. wysokość H przetwornika sonaru nad dnem jest znana,
4. wektor normalny do insonifikowanej powierzchni jest prostopadły do osi y, tzn. do kierunku przemieszczania się przetwornika. Jest to najprostszy sposób usuwania problemu niejednoznaczności w relacji pomiędzy współczynnikiem odbicia, a orientacją elementu powierzchni, gdzie ten drugi ma zazwyczaj dwa stopnie swobody),
5. odtwarzany rozmiar obiektu wzdłuż osi z (tj. wysokości elementów obiektu) jest mały w porównaniu z wysokością przetwornika sonaru nad dnem,

6. natężenie (skala szarości) poszczególnych pikseli w obrazie sonarowym jest proporcjonalna do akustycznego natężenia sygnału ech.

Opracowana metoda przy wykorzystaniu tych założeń nazwana została algorytmem „1^D" w dalszej pracy, ponieważ zakłada jeden stopień swobody dla jednostkowej powierzchni odtwarzanego kształtu obiektu, w odróżnieniu od algorytmu „2^D", który zakłada dwa stopnie swobody dla powierzchni jednostkowej. Algorytm ten służy do rekonstrukcji kształtu dna morskiego zaprezentowanego w dalszej części rozdziału. Dzieje się tak ze względu na założenie 4. przedstawione powyżej.

Geometria wykorzystana przy konstrukcji algorytmu została zaprezentowana na rysunku 5.5 [5].



Rys. 5.5. Geometria wykorzystana przez opracowany algorytm: H_i – wysokość przetwornika sonaru nad dnem, $\vec{n}_i$ – wektor normalny do powierzchni dna, α_i – kąt nachylenia dna, θ_i – kąt pomiędzy wektorem normalnym do powierzchni, a sygnałem sondującym, φ_i – kąt pomiędzy kierunkiem padania sygnału sondującego i kierunkiem pionowym

Na dwuwymiarowym obrazie uzyskanym z przeszukiwań akustycznych sonarem bocznym, każdy piksel należący do danej linii reprezentuje próbkę obwiedni echa w danej chwili t_i i odpowiada punktowi P_i na powierzchni dna morskiego lub obiekcie na dnie. Współrzędna x_i tego punktu może zostać obliczona następująco [5]:

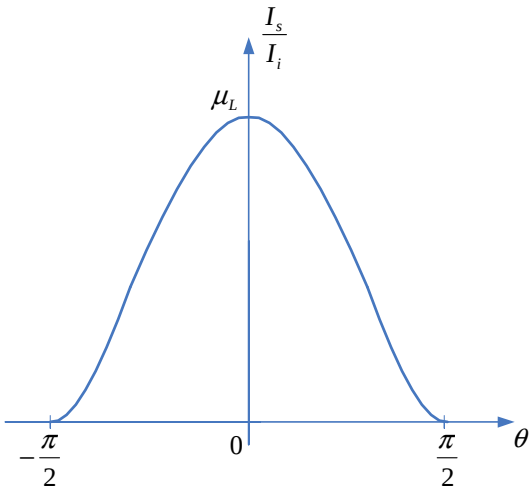
$$x_i = \sqrt{\left(\frac{ct_i}{2}\right)^2 - H^2}, \tag{5.1}$$

gdzie $t_i \geq \frac{2H}{c}$, c jest prędkością rozchodzenia się dźwięku w wodzie.

Opracowany algorytm estymacji wysokości powierzchni dna morskiego, lub obiektu na dnie (współrzędna z) został zastosowany niezależnie do każdej linii obrazu sonarowego. Kolejne etapy działania algorytmu, to po pierwsze, początkowa wartość wysokości z oznaczona, jako z_0 jest wartością założoną. Po drugie, jeśli obecnie otrzymywany i-ty piksel nie został rozpoznany jako początek obszaru „cienia akustycznego" (np. jego natężenie było wyższe niż przyjęta wartość progowa I_{th}), to ma zastosowanie schemat przetwarzania oparty na technice SFS. Oznacza to, że lokalny kąt pomiędzy normalną do powierzchni, a kątem natarcia sygnału sondującego θ_i jest estymowany na podstawie stopnia szarości piksela proporcjonalnego do natężenia echa akustycznego, z wykorzystaniem modelu rozpraszania fali akustycznej na powierzchni dna morskiego, lub obiektu na dnie. Jako model zależności współczynników rozpraszania na dnie (s_s), od kąta insonifikacji (θ_i), zostało wykorzystane prawo Lamberta, o postaci:

$$s_s(\theta_i) = \frac{I_s}{I_i} = \mu_L \cos^2 \theta_i , \tag{5.2}$$

gdzie I_s jest natężeniem fali rozproszonej na dnie, I_i jest natężeniem fali padającej, μ_L to stała Lamberta. Wykres tej zależności został przedstawiony na rysunku 5.6.



Rys. 5.6. Prawo Lamberta, jako zależność kątowa współczynnika odbicia od powierzchni dna

W algorytmie odtwarzania kształtu obiektów na dnie morskim wysokość z_{i+1} kolejnego punktu P_{i+1} została wyznaczona przy założeniu lokalnego gradientu wysokości powierzchni wzdłuż osi x, jako:

$$\nabla_x z\left(x_j, y_i\right) = \frac{\partial z(x,y)}{\partial x}\left(x_j, y_i\right) = \tan\alpha_i, \tag{5.3}$$

przybliżonego za pomocą różnic skończonych, jako:

$$\frac{\Delta z_i}{\Delta x_i} = \frac{z_{i+1} - z_i}{x_{i+1} - x_i}. \tag{5.4}$$

Na podstawie powyższych równań, z_{i+1} można wyznaczyć, jako:

$$z_{i+1} = z_i + \left(x_{i+1} - x_i\right)\tan\alpha_i, \tag{5.5}$$

gdzie zależność kąta nachylenia jednostkowej powierzchni α_i, od kątów φ_i i θ_i ma postać:

$$\alpha_i = \varphi_i - \theta_i, \tag{5.6}$$

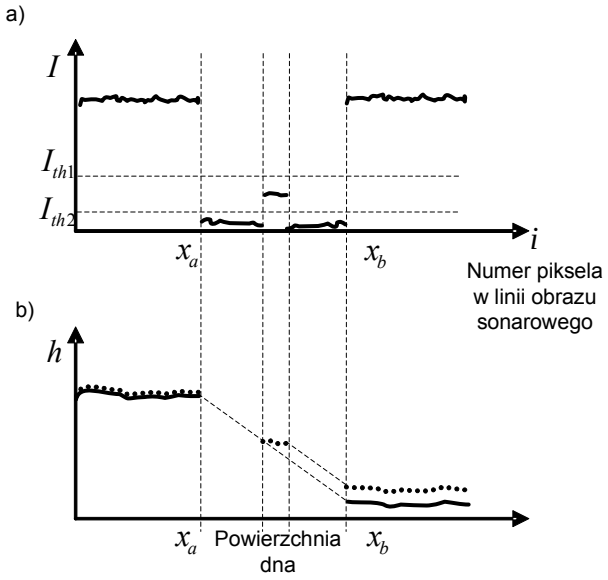
gdzie φ_i – lokalny kąt transmisji oszacowany jako $\arctan\left(x_i / H\right)$.

Natomiast w przypadku wykrycia strefy „cienia akustycznego", jego rozmiar wzdłuż osi *x* jest wyznaczany, jako $\Delta x_{sh} = x_{i+j} - x_i$, gdzie j jest kolejnym numerem piksela należącego do obecnie wykrytego obszaru cienia. Wówczas wartości wysokości od z_{i+1} do z_{i+j} są jest traktowane, jako niewiadome, a wartość wysokości z_{i+j+1} jest obliczana, jako:

$$z_{i+j+1} = z_i - \frac{\Delta x_{sh}}{\tan\varphi_i}, \tag{5.7}$$

tzn., dno pomniejszone w stosunku do z_i o wysokość lokalnego elementu tworzącego obszar „cienia akustycznego" o rozmiarze Δx_{sh}, która jest obliczana, jako $\Delta x_{sh} / \tan\varphi_i$.

Na rysunku 5.7 przedstawiono, w sposób schematyczny wpływ wartości progowej natężenia fali rozproszonej I_{th} na otrzymywane wyniki pracy algorytmu dla dwóch różnych wartości parametru I_{th}. Na rysunek 5.7a przedstawiono przebieg zależności natężenia fali rozproszonej I, od współrzędnej x dla pojedynczej linii w obrazie sonarowym zawierającym obszar „cienia akustycznego", wraz z dwoma różnymi wartościami wartości progowej natężenia fali rozproszonej I_{th1} i I_{th2}. Na rysunku 5.7b przedstawiono przebieg profilu zrekonstruowanego fragmentu dna morskiego dla tych samych wartości parametru I_{th}. W przypadku I_{th2} pojawia się większa strefa cienia.

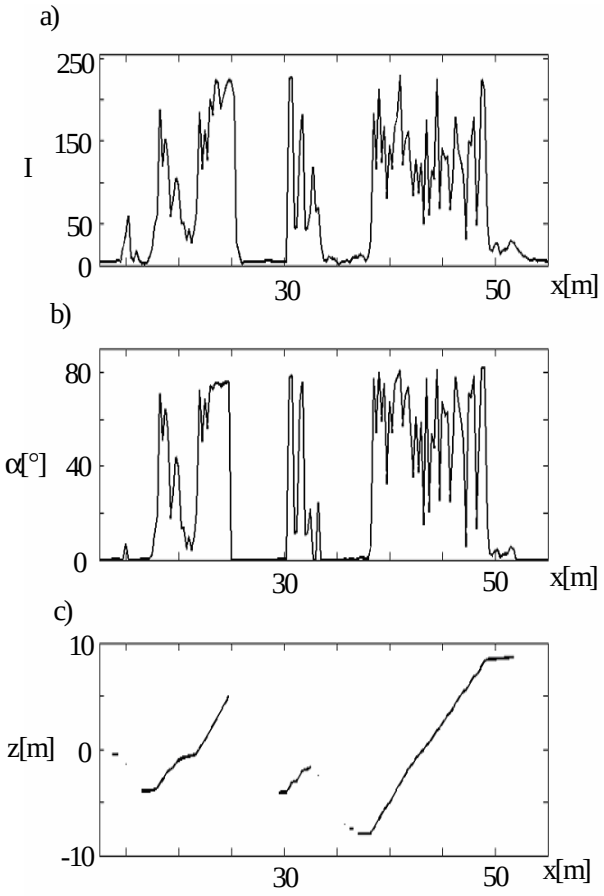


Rys. 5.7. Wpływ progowej wartości cienia I_{th} na wyniki algorytmu rekonstrukcji wysokości

Przykładowe wyniki uzyskane za pomocą opracowanego algorytmu trójwymiarowej rekonstrukcji kształtu obiektów na dnie morskim zaprezentowano na rysunku 5.8. Natomiast na rysunku 5.9 zilustrowano wyniki kolejnych etapów pracy algorytmu dla wybranej linii obrazu sonarowego. Na rysunku 5.9a przedstawiono przebieg natężenia odcieni szarości w skali od 0 do 255 (rozdzielczość 8 bitów). Rysunek 5.9b przedstawia przebieg wartości kąta nachylenia powierzchni dna α wyznaczonego za pomocą algorytmu. Natomiast na rysunku 5.9c przedstawiono odtworzony kształt obiektu dla wybranej linii obrazu sonarowego, z którego zostały usunięte fragmenty będące obszarami „cienia akustycznego”.

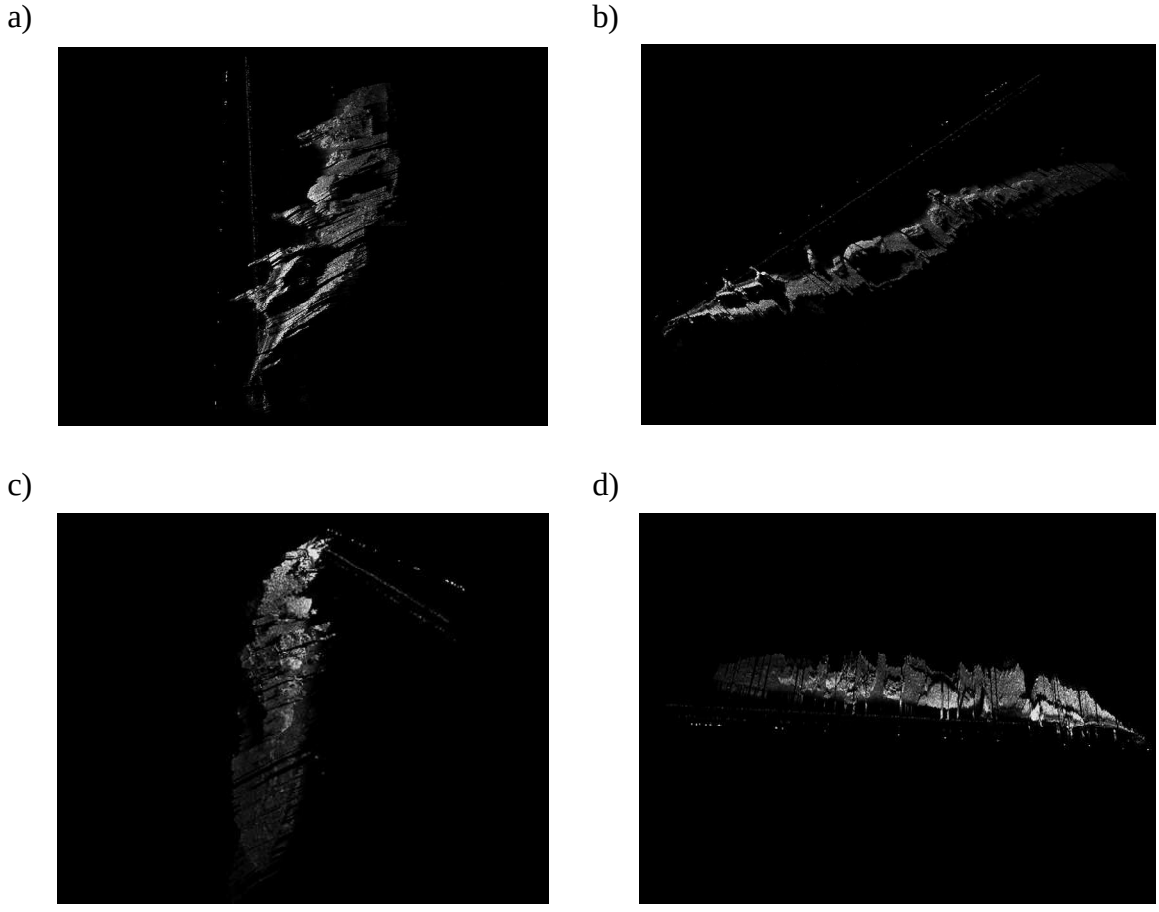
Rys. 5.8. Trójwymiarowa rekonstrukcja wrazi z obrazu sonarowego zaprezentowanego na rysunku 5.4. Punkt obserwacji został ustawiony nad wrakiem

Trójwymiarowa wizualizacja zrekonstruowanego wraku została wykonana przy użyciu języka opisu wirtualnej rzeczywistości VRML [48] i została przedstawiona na rysunku 5.10. W chwili, gdy zrekonstruowany trójwymiarowy kształt badanego obiektu zostanie przedstawiony, jako zestaw punktów opisanych przez współrzędne trójwymiarowe (*x*, *y*, *z*), jego wizualizacja może być łatwo przeprowadzona dla różnych lokalizacji ustawień opisujących miejsca, z którego obiekt jest obserwowany, tj. lokalizacja tzw. kamery i kierunek, w jakim obserwuje ona trójwymiarową wirtualną scenę, typ trójwymiarowej perspektywy etc. Przy porównaniu wyników z rysunku 5.8 i rysunku 5.10 z oryginalnym dwuwymiarowym obrazem sonarowym z rysunku 5.4, widoczny jest całkiem dobrze zachowany ogólny kształt wraku, nawet w jego drobnych szczegółach. Widoczne artefakty, w formie ciemnych poprzecznych linii, są rezultatem relatywnie małych natężeń fali akustycznej I rozproszonej na obiekcie, np. poniżej zastosowanej wartości progowej I_{th}.

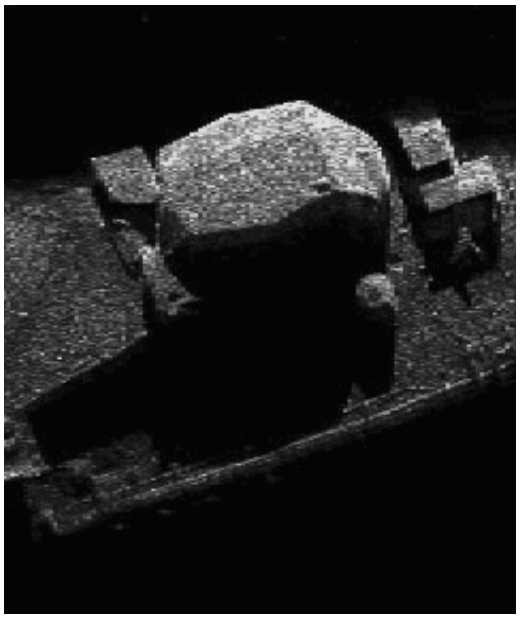


Rys. 5.9. Kolejne etapy algorytmu dla wybranej linii obrazu sonarowego, a) zmienność natężenia pikseli wzdłuż osi x, b) zmienność oszacowanego kąta nachylenia wzdłuż osi x, c) odtworzona wysokość elementów rekonstruowanego obiektu (brak wartości estymowanych z obszarów cienia akustycznego)

Dodatkowo, porównanie rezultatów uzyskanych przez opracowany algorytm przy wykorzystaniu dwóch różnych wartości progowych parametru I_{th} ($I_{th1} = 0{,}05 I_{\max}$ oraz $I_{th2} = 0{,}1 I_{\max}$) przedstawiono na rysunku 5.12, który następuje po rysunku 5.11 pokazującym powiększenie części uzyskanego oryginalnego obrazu sonarowego z rysunku 5.4. Można zauważyć, iż w przypadku niższej wartości I_{th} (rysunek 5.12a), więcej szczegółów rekonstruowanego kształtu obiektu jest widocznych, niż w przypadku większej wartości I_{th} (rysunek 5.12b). Ale z drugiej strony, jeśli I_{th} będzie zbyt niskie, artefakty mogą pojawić, jako konsekwencja wykorzystania informacji z bardzo ciemnych i możliwie zakłóconych pikseli, przy odtwarzaniu lokalnego nachylenia wysokości obiektu.

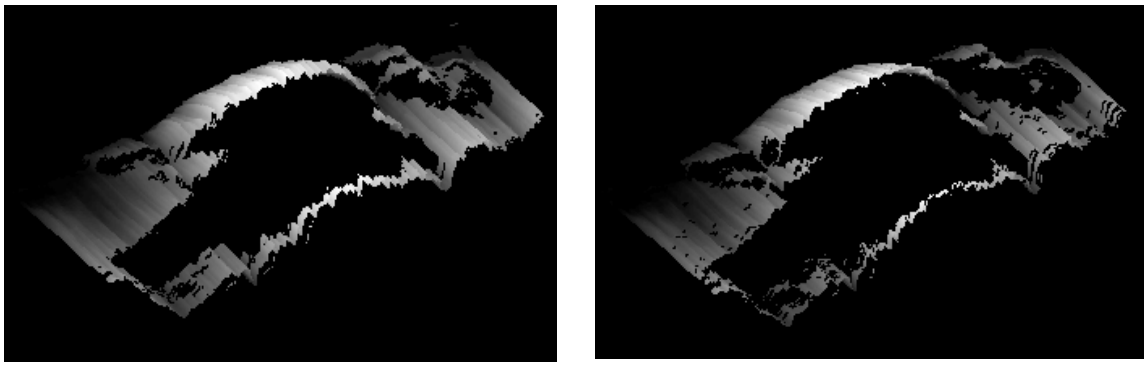


Rys. 5.10. Ta sama scena trójwymiarowa jak na rysunku 5.8 obserwowana z różnych perspektyw, a) azymut = 5º, elewacja = 45 º, b) azymut = 85 º, elewacja 45 º, c) azymut = 180 º, elewacja = 45 º, d) azymut = 275 º, elewacja = 45 º



Rys. 5.11. Powiększenie części obrazu z rysunku 5.4

a) b)



Rys. 5.12. Wyniki trójwymiarowej rekonstrukcji kształtu wraku przy użyciu dwóch różnych wartości parametru I_{th}

5.4. Trójwymiarowa rekonstrukcja kształtu dna morskiego

W niniejszym podrozdziale zaprezentowano opracowaną metodę trójwymiarowej rekonstrukcji rzeźby dna morskiego z danych z sonaru bocznego w postaci dwuwymiarowych obrazów. Metoda ta jest związana z algorytmem „2^D" i również bazuje na podejściu stosowanym w technice SFS. Została rozwinięta, jako modyfikacja i rozszerzenie metody „1^D" opisanej w podrozdziale 5.3. W procesie opracowywania

algorytmu, zostały przyjęte te same założenia, jakie zastosowano w metodzie „1^D", z dwoma wyjątkami [73]:

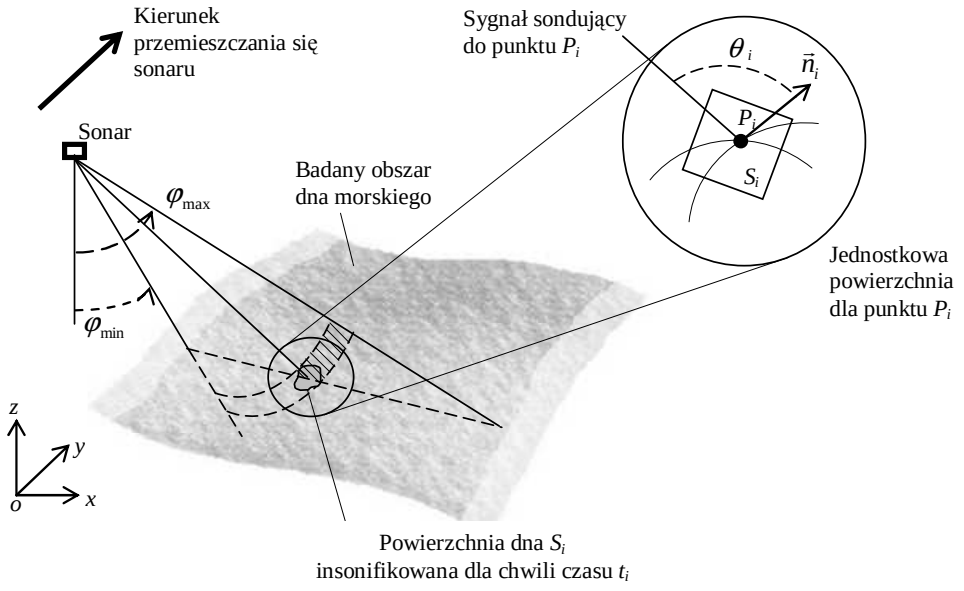
1. założenie 4. nie zostało zastosowane, co skutkuje tym, że orientacja lokalnego elementu powierzchni ma dwa stopnie swobody,
2. nie założono występowania strefy „cienia akustycznego".

Geometria zastosowana w procesie opracowywania algorytmu rekonstrukcji została przedstawiona na rysunku 5.13. Jak widać na przedstawionym rysunku, wiązka z sonaru bocznego pokrywa sektor kątowy od $\varphi_{\min}$ do $\varphi_{\max}$.

Podobnie jak w przypadku rekonstrukcji kształtu wraku, zależność pomiędzy chwilą czasu t_i w obwiedni echa, a prostopadłą do kierunku przemieszczania się przetwornika współrzędną x_i odpowiadającego jej punktu P_i na powierzchni dna morskiego, może być wyrażona przez równanie (5.1). W chwili czasu t_i jednostkowa powierzchnia dna S_i jest insonifikowana, a obszar ten może być wyrażony za pomocą klasycznego równania w przypadku płaskiego dna [104]:

$$S_i = \varphi_v R_i \frac{c\tau}{2\sin\varphi_i}, \tag{5.8}$$

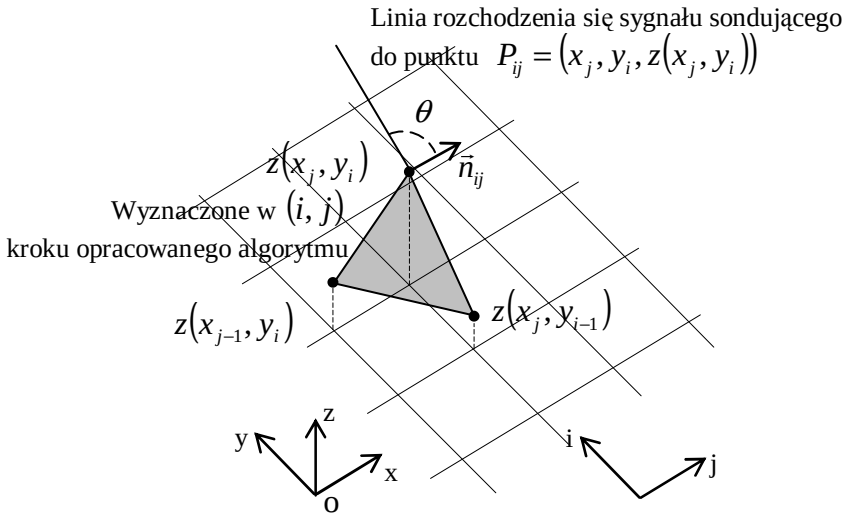
gdzie φ_v jest szerokością wiązki w kierunku przemieszczania się przetwornika, R_i jest odległością pomiędzy przetwornikiem, a punktem na powierzchni dna P_i, τ, to czas trwania transmitowanego sygnału sondującego.



Rys. 5.13. Geometria wykorzystana przy wyprowadzeniu algorytmu „2^D" rekonstrukcji rzeźby dna morskiego

W prezentowanym algorytmie, jako model rozpraszania wstecznego fali akustycznej na powierzchni dna, została wykorzystana również reguła Lamberta (5.2). Jednak w odróżnieniu od poprzedniego przypadku, kąt θ_i pomiędzy wektorem normalny $\vec{n}_i$, a sygnałem sondującym punkt P_i, nie musi być zdefiniowany w płaszczyźnie pionowej *xoz*.

Opracowany algorytm odtwarza trójwymiarową rzeźbę dna morskiego poprzez wyznaczenie wysokości $z(x,y)$ dla ciągu kolejnych punktów dyskretnych (x,y) na płaszczyźnie, przy użyciu schematu zobrazowanego na rysunku 5.14.



Rys. 5.14. Ilustracja procesu estymacji wysokości dna $z(x_j, y_i)$ w (i, j) iteracji algorytmu

Dla iteracji (i, j), gdzie i jest numerem kolejnej linii w obrazie sonarowym, odpowiadającym pojedynczemu pingowi, natomiast j, to numer piksela należący do tej linii, tj. punktu $P_{ij} = (x_j, y_i, z(x_j, y_i))$, dla którego estymowana jest wysokość z_{ij} dna morskiego, brany jest pod uwagę lokalny trójkątny element powierzchni. Tworzą go wierzchołki $P_{i-1\,j} = (x_j, y_{i-1}, z(x_j, y_{i-1}))$ i $P_{ij-1} = (x_{j-1}, y_i, z(x_{j-1}, y_i))$ o wysokościach oszacowanych wcześniej oraz bieżący punkt P_{ij}. Wykorzystując Lambertowski model rozpraszania fali akustycznej na dnie, wektor normalny $\vec{n}_i$ do płaszczyzny powierzchni w bieżącym punkcie P_{ij} oraz kąt θ_i, wyznacza się wartość lokalnego natężenia rozproszonej fali akustycznej I_i. W kolejnym kroku iteracji obliczona wartość I_i porównywana jest z oryginalnym obrazem sonarowym. Znalezienie optymalnej

wartości wysokości z_{ij}, dla której wartości natężeń rozproszonej na dnie fali akustycznej obliczanej i pochodzącej z pomiarów, jest generalnie niemożliwe w sposób analityczny. Z drugiej strony można pokazać, iż w stosowanym modelu Lamberta natężenie $I_i(z)$ jest funkcją monotoniczną z wartością z_{ij} zawierającą się w przedziale $\lfloor z_{ij\,\min}, z_{ij\,\max} \rfloor$, gdzie $z_{ij\,\min}$ odpowiada kątowi $\theta_{ij\,\min} = 0°$, natomiast $z_{ij\,\max}$ kątowi $\theta_{ij\,\max} = 90°$. Zatem można zaproponować prosty, binarny algorytm poszukiwania optymalnej wartości z_{ij}, który będzie przeszukiwał zakres $\lfloor z_{ij\,\min}, z_{ij\,\max} \rfloor$. Algorytm ten jest iteracyjny, w którym każda k-ta iteracja wyznacza nowe z_{ijkmid}, jako punkt środkowy obecnego przedziału $\lfloor z_{ijk\,\min}, z_{ijk\,\max} \rfloor$, a następnie redukuje przedział do jego lewej, lub prawej połowy. Mianowicie, jeżeli natężenie echa I obliczone dla z_{ijkmid} jest mniejsze niż dla obecnie przetwarzanego piksela z obrazu sonarowego, to lewa połówka zostanie wybrana dla kolejnej iteracji, w przeciwnym wypadku wybrana zostanie prawa połówka.

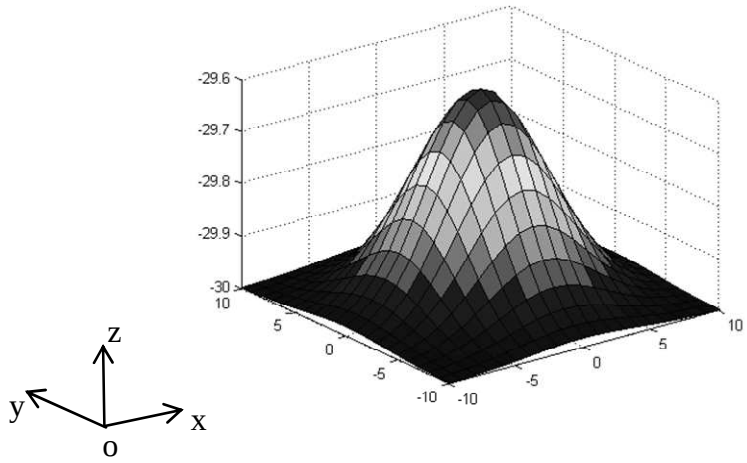
Zazwyczaj w schemacie algorytmu opisanym powyżej jest zagwarantowane, że optymalne z_{ij} dające pożądaną wartość natężenia echa I będzie zawsze znalezione w przedziale $\lfloor z_{ij\,\min}, z_{ij\,\max} \rfloor$, szczególnie podczas przetwarzania rzeczywistych danych sonarowych. W takim przypadku, po prostu zostanie wykorzystany algorytm „1^{D}" do estymacji bieżącej wartości wysokości z_{ij} zamiast algorytmu „2^{D}".

W pierwszej kolejności opracowany algorytm został przetestowany dla symulowanych danych zakładających dwuwymiarowy Gaussowski kształt powierzchni dna morskiego określony wzorem:

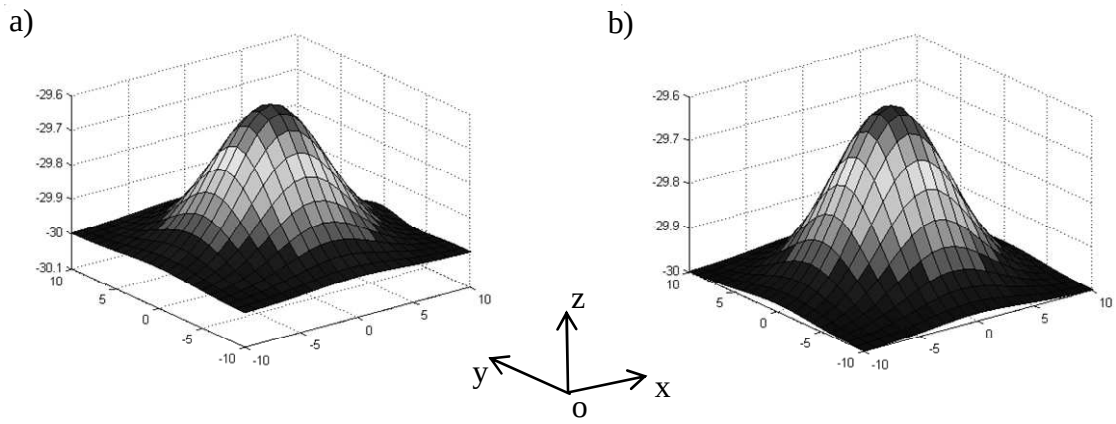
$$z(x,y) = Z_0 \exp\left(-\left(\frac{x - x_0}{\sigma_x} \right)^2 - \left(\frac{y - y_0}{\sigma_y} \right)^2 \right). \tag{5.9}$$

Na rysunku 5.15 pokazano kształt symulowanego dna morskiego (z dowolnie dobraną stałą proporcjonalności Z_0, średnimi x_0 i y_0 oraz odchyleniem standardowym σ_x i σ_y). Wyniki rekonstrukcji uzyskane przy wykorzystaniu „1^{D}" wersji algorytmu, który został opisany w podrozdziale 5.2, ale z założeniem braku obszarów „cienia akustycznego", zostały zaprezentowane na rysunku 5.16a. Natomiast wyniki uzyskane za pomocą algorytmu dwuwymiarowego „2^{D}" opisanego w niniejszym podrozdziale zostały zaprezentowane na rysunku 5.16b. Różnice pomiędzy kształtami odtworzonym

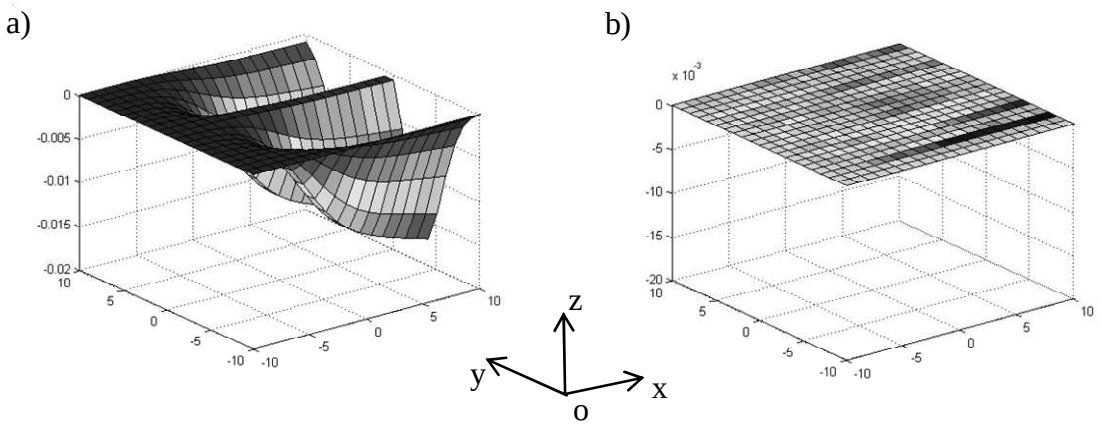
z rysunku 5.16 i oryginalną symulowaną powierzchnią dna morskiego z rysunku 5.15 nie są łatwe do zauważenia, dlatego dodatkowo wykreślono błędy estymacji z obu wersji algorytmów, co ujawnia różnice w wynikach uzyskanych w tych dwóch przypadkach. Wykresy błędów estymacji wysokości *z* dla obu wersji algorytmów zostały zaprezentowane odpowiednio na rysunkach 5.17a dla wersji „1^D" i 5.17b dla wersji „2^D". Łatwo zauważyć, iż w algorytm w wersji "2^D" generuje dużo mniejsze błędy, niż algorytm w wersji „1^D". Błędy wprowadzone przez algorytm „1^D" są stosunkowo duże, szczególnie dla obszarów, gdzie oryginalny kształt powierzchni dna morskiego ma większe nachylenie w kierunku prostopadłym do płaszczyzny *xoz*. Powiększają się w wyniku kumulowania kolejnych błędów wyniku analizy następujących po sobie fragmentów obrazu sonarowego względem osi x.



Rys. 5.15. Sztucznie wygenerowana Gaussowska powierzchnia dna morskiego wykorzystywana do testowania algorytmów rekonstrukcji kształtu dna morskiego

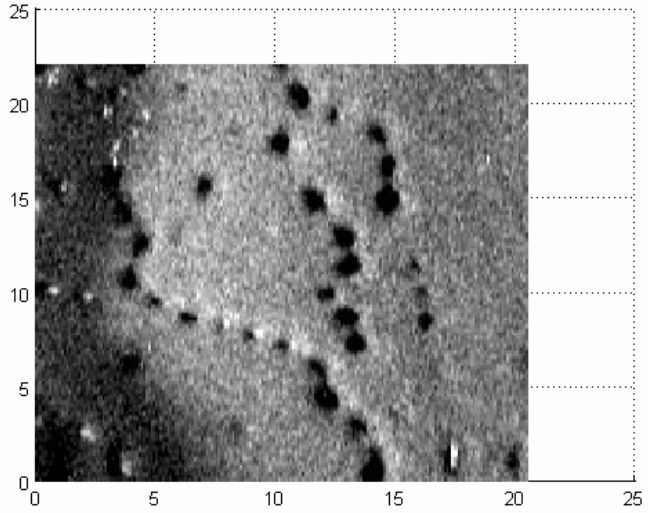


Rys. 5.16. Wyniki rekonstrukcji symetrycznego fragmentu dna z rysunku 5.15, a) przy użyciu algorytmu w wersji "1^D", b) przy wykorzystaniu algorytmu wersji "2^D"



Rys. 5.17. Błędy powstałe w czasie rekonstrukcji sztucznie wygenerowanego fragmentu dna, a) za pomocą algorytmu w wersji "1^D" b) za pomocą algorytmu w wersji "2^D"

Następnym krokiem weryfikacji opracowanych algorytmów trójwymiarowej rekonstrukcji dna morskiego było testowanie ich na danych rzeczywistych z sonaru bocznego. Przykładowy dwuwymiarowy obraz dna morskiego uzyskany za pomocą danych z sonaru bocznego przedstawiono na rysunku 5.18. Wyniki rekonstrukcji uzyskane za pomocą algorytmu w wersji „1^D" zostały przedstawione na rysunku 5.19a, natomiast wyniki uzyskane za pomocą algorytmu w wersji „2^D" opisanego niniejszym podrozdziale przedstawiono na rysunku 5.19b. Powiększone obrazy wybranych fragmentów zrekonstruowanej powierzchni dna morskiego zostały przedstawione odpowiednio na rysunkach 5.20a i 5.20b.

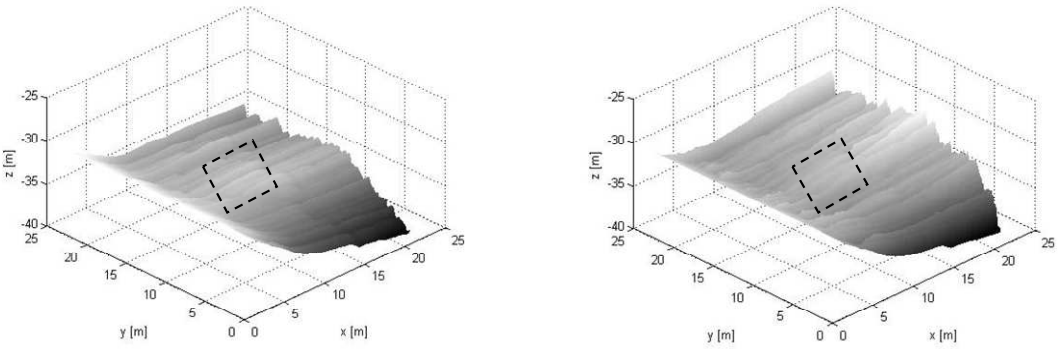


Rys. 5.18. Przykładowy obraz dna morskiego uzyskany z danych sonaru bocznego

Co jest łatwo zauważyć, wyniki przedstawione na rysunkach 5.19a i 5.19b nie są tak dobre, jak w przypadku sztucznie wygenerowanych danych. Mimo to, kilka szczegółów topografii dna pokazanych na rysunku 5.18 może być rozpoznanych na

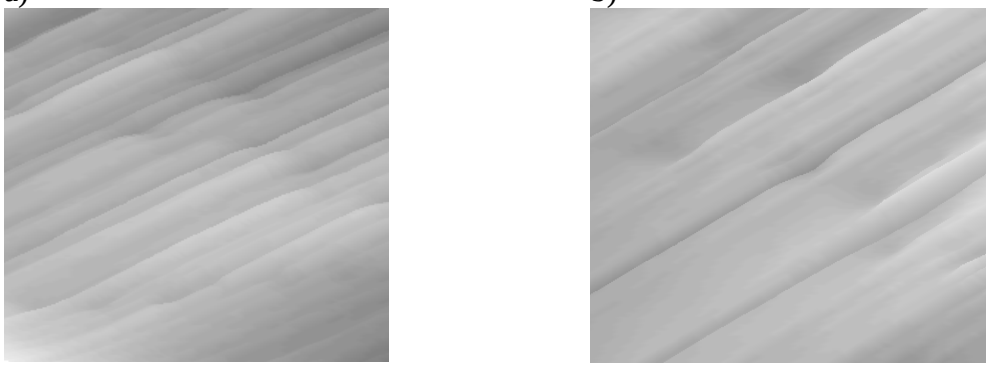
rysunkach 5.19a i 5.19b. Duże rozbieżności w estymowanym *z*, dla kolejnych pionowych przekrojów $z(x, y)$ równoległych do osi *x*, skutkują dużymi oscylacjami z wzdłuż osi y odtworzonej powierzchni, co jest niestety wyraźnie widoczne. Dzieje się tak, ponieważ każda i-ta linia wartości $z(x_j, y_i)$ odpowiadająca jednemu pingowi jest estymowana w kierunku od lewej do prawej strony i całkiem niezależnie od poprzednich szacowanych wartości linii $z(x_j, y_{i-1})$ w przypadku algorytmu „1^D", a także w pewnym stopniu niezależnie od poprzedniej linii w przypadku algorytmu „2^D". Tym niemniej, efekt wspomniany wyżej jest mniej widoczny dla pewnych części powierzchni dna powiększonych na rysunku 5.20b w porównaniu zawartością rysunku 5.20a, co częściowo potwierdza zalety algorytmu trójwymiarowej rekonstrukcji dna w wersji „2^D".

a) b)



Rys. 5.19. Wyniki rekonstrukcji rzeźby dna, a) przy użyciu algorytmu w wersji „1^D", b) przy użyciu algorytmu w wersji „2^D"

a) b)



Rys. 5.20. Wyniki rekonstrukcji rzeźby dna, a) przy użyciu algorytmu w wersji „1^D" b) przy użyciu algorytmu w wersji „2^D". Powiększenie wybranych części powierzchni z rysunku 5.19

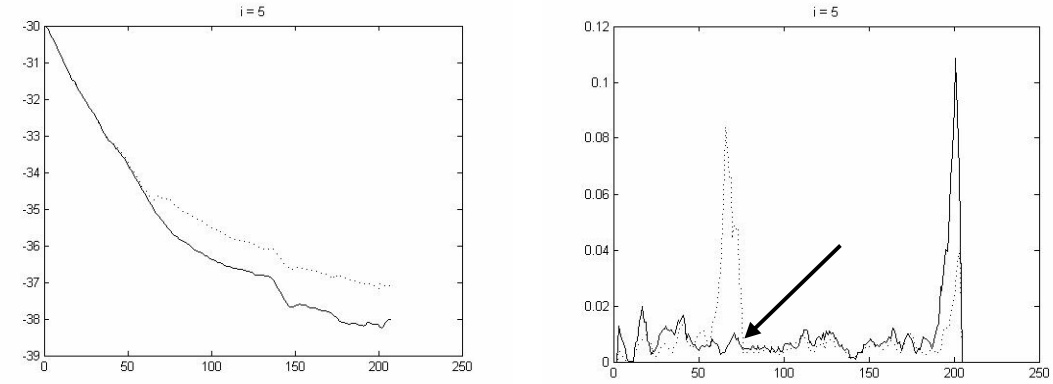
Biorąc pod uwagę niezadowalającą jakość otrzymanych wyników zarówno dla algorytmu w wersji „1^D”, jak i „2^D” została wprowadzona modyfikacja tych algorytmów. Aby zilustrować tę modyfikację na rysunku 5.21 przedstawiono przykład dwóch kolejnych przekrojów pionowych rzeźby rekonstruowanego dna morskiego $z(x,y)$ z rysunku 5.19b, równoległych do osi x, odpowiadających dwom kolejnym pingom sonaru bocznego. Analizując przebiegi na rysunku 5.21 można zauważyć, iż:

- rozpoczynając od pewnej wartości x (dla 4 metrów) na rysunku 5.21a wysokości krzywych zaczynają być rozbieżne,

ale:

- lokalne nachylenia dwóch prezentowanych profili są w zasadzie zgodne,
- na prawo od punktu rozbieżności różnica pomiędzy wartościami *z* dla dwóch przekrojów pozostaje niemal stała dla większości wartości współrzędnej x,
- kilka szczegółów topografii dna morskiego, takich jak „dziury” blisko prawej strony obrazka są reprezentowane całkiem podobnie w pierwszej (ciągłej) i drugiej (kropkowanej) krzywej.

a) b)



Rys. 5. 21. a) Przykład dwóch kolejnych pionowych przekrojów zrekonstruowanego $z(x,y)$ z rysunku 5.19b wzdłuż osi x, b) lokalne średnie nachylenie $z(x,y)$ w kierunku x dla tych punktów

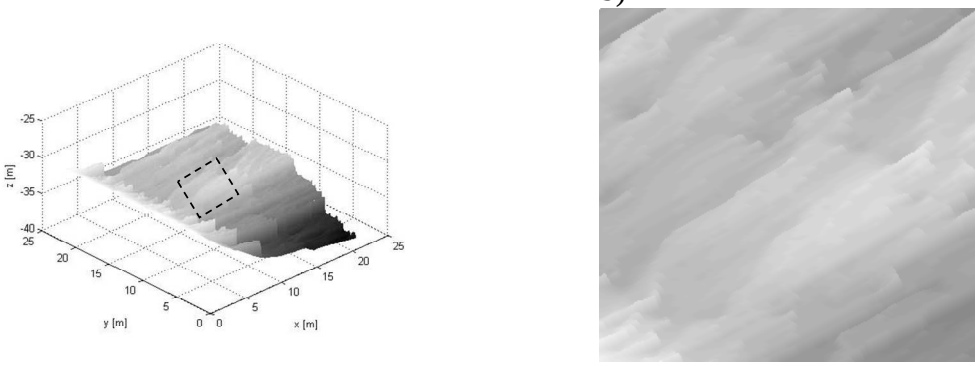
Wydaje się, iż kiedy pewne „perturbacje” kształtu dna morskiego są wykrywane (a nie zostały wykryte podczas przetwarzania poprzedniego pingu), jak na przykład, coś podobnego do „dziury” w lewej części drugiej krzywej – w miejscu rozbieżności, algorytm nie jest w stanie zawsze powrócić na właściwą wysokość, dla relatywnie płaskiego obszaru dna morskiego wokół obszaru „zakłócenia”. Może być to konsekwencją pewnej niezgodności pomiędzy zakładanym modelem rozproszenia wstecznego Lamberta, a rzeczywistością.

Dodatkowe uzasadnienie powyższego efektu, zmienności oszacowanego lokalnego nachylenia powierzchni wzdłuż osi x odpowiadającej dwóm kolejnym transmisjom sonaru (tym samym, co na rysunku 5.21a) zaprezentowano na rysunku 5.21b. Przed wykreśleniem przebiegu dna, lokalne nachylenie jest uśredniane w grupie pięciu bieżących próbek przyległych wzdłuż osi x. Wydaje się, że dla obszarów „perturbacji", uśrednione nachylenie różni się znacząco od dwóch kolejnych przekrojów, podczas gdy jest całkiem podobne dla obu w pozostałych regionach.

Biorąc po uwagę powyższy fakt, następujące modyfikacje zostały wprowadzone do algorytmu rekonstrukcji dna, a mianowicie podczas przetwarzania bieżącego pingu, jeśli szacowane lokalne nachylenie dla bieżącego przekroju pionowego dna morskiego zaczyna z powrotem być podobne do nachylenia w poprzednim profilu odpowiadającym poprzedniemu pingowi), po pewnym obszarze znaczących różnic pomiędzy tymi pochyłościami (tak, jak w miejscu wskazanym przez strzałkę na rysunku 5.21b), wówczas wartość z_{ij} jest ustawiana na wartość z_{i-1}. Następnie algorytm jest kontynuowany w podobny sposób jak poprzednio. Aby rozróżnić, kiedy nachylenie dwóch kolejnych profili jest podobne, a kiedy nie, bieżąca różnica tych dwóch nachyleń jest obliczana i porównywana ze stosowaną wartością progową.

Wyniki otrzymane za pomocą algorytmu z tą modyfikacją zaprezentowano na rysunku 5.22. Jest widoczna poprawa uzyskanych wyników w porównaniu z tymi zaprezentowanymi na rysunkach 5.19 i 5.20. Oscylacje powierzchni wzdłuż osi y zostały do pewnego stopnia usunięte. Jest to szczególnie widoczne przy porównaniu przypadków powiększonej zrekonstruowanej powierzchni – rysunek 5.20 i 5.22b.

a) b)



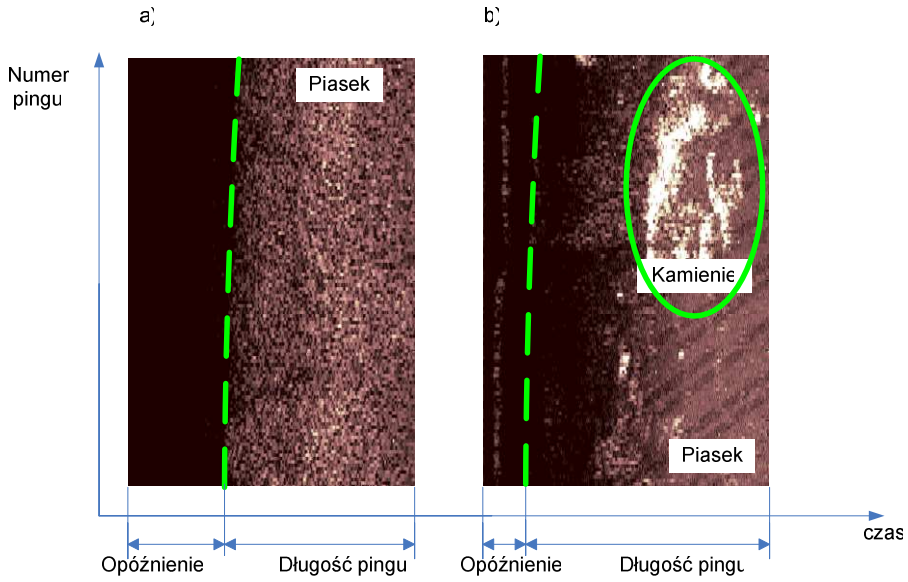
Rys. 5..22. a) Wyniki zastosowania zmodyfikowanej wersji algorytmu rekonstrukcji rzeźby dna morskiego, b) powiększenie wybranej części (tej samej jak na rysunku 5.20) zrekonstruowanej powierzchni dna morskiego z punktu a)

5.5. Metody optymalizacyjne w algorytmach rekonstrukcji dna morskiego

Opracowany algorytm optymalizacji w zagadnieniu odwrotnym, jakim jest rekonstrukcja dna morskiego na podstawie danych z sonaru bocznego, jako dane wejściowe wykorzystuje:

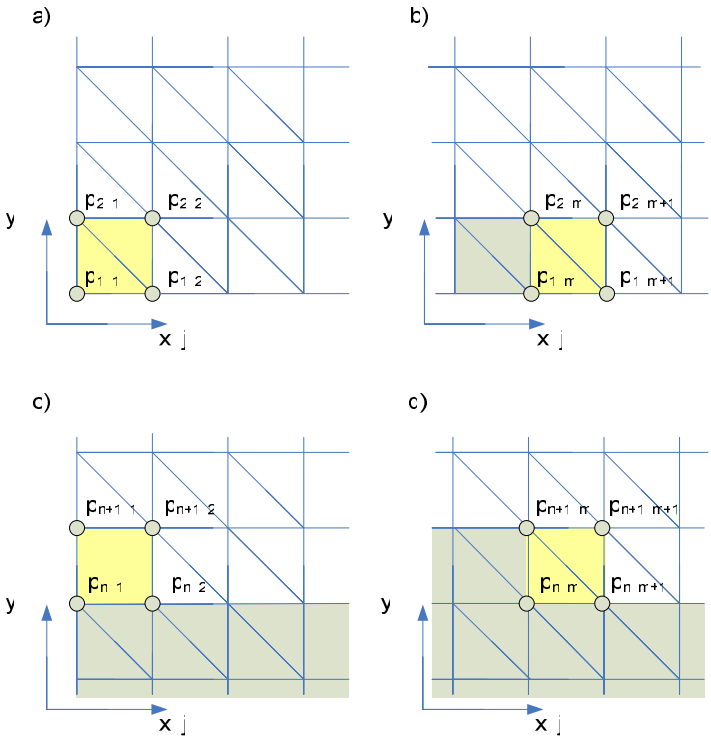
- zapisy przeszukiwań dna morskiego, wykonane przy pomocy sonaru bocznego, jako dwuwymiarowe echogramy,
- informacje na temat warunków, w jakich prowadzono badania (wysokość przetwornika nad dnem, prędkość przemieszczania się przetwornika, częstotliwość próbkowania, rozmiar przeszukiwanego obszaru),
- informacje na temat rodzaju dna na przeszukiwanym obszarze (na podstawie tej informacji przyjmowany jest model rozpraszania dźwięku),
- w przypadku, gdy na przeszukiwanym obszarze znajduje się więcej niż jeden typ dna morskiego, należy wyróżnić obszary na obrazie sonarowym, którym zostaną przyporządkowane odpowiednie modele rozpraszania,
- informację nawigacyjną (georeferencję) z systemu GPS.

Na rysunku 5.23 przedstawiono przykłady zobrazowań sonaru, gdzie na rysunku 5.23a przedstawiono obraz z jednym typem dna (piasek), natomiast na rysunku 5.23b przedstawiono obraz z zaznaczonymi obszarami o różnych typach dna (piasek, kamienie). Na rysunku zaznaczono również czas opóźnienia odbieranego echa od dna, na podstawie którego wyznaczana jest głębokość początkowa dla każdego pingu.



Rys. 5.23. Obrazy uzyskane za pomocą danych z sonaru bocznego, a) dla piaszczystego dna, b) dla dna piaszczystego z obszarem pokrytym kamieniami

Na rysunku 5.24 przedstawiono, w sposób obrazowy, zasadę działania opracowanego algorytmu.



Rys. 5.24. Zasada działania algorytmu odtwarzania kształtu dna morskiego na podstawie obrazu sonarowego, a) dla pierwszego piksela w pierwszym wierszu, b) dla m-tego piksela w pierwszym wierszu, c) dla pierwszego piksela w n-tym wierszu, d) dla m-tego piksela w n-tym wierszu

Zakłada on regularną siatkę dla współrzędnych x i y dna morskiego, natomiast w każdym kroku wyznaczana jest współrzędna z dla kolejnych węzłów siatki. Na rysunku 5.24a przedstawiono pierwszy krok działania algorytmu. Współrzędne z punktów $p_{1,1}$ i $p_{2,1}$ wyznaczane są na podstawie długości opóźnienia dla pingu oraz prędkości rozchodzenia się dźwięku w wodzie, natomiast współrzędne z punktów $p_{1,2}$ i $p_{2,2}$ są wynikiem działania algorytmu optymalizacji pochodzącego z pakietu *Optimization Toolbox* środowiska *Matlab* [76]. Sposób wykorzystania tego algorytmu w procesie odtwarzania kształtu dna morskiego zostanie przedstawiony w dalszej części niniejszego podrozdziału. Rysunek 5.24b przedstawia m-ty krok działania algorytmu dla pierwszej linii obrazu sonaru. Współrzędne z punktów $p_{1,m}$ i $p_{2,m}$ pochodzą z kroku poprzedniego działania algorytmu, natomiast współrzędne z punktów $p_{1,m+1}$ i $p_{2,m+1}$ są wynikiem działania algorytmu optymalizacji. Z kolei na rysunku 5.24c

przedstawiono pierwszy krok działania algorytmu dla n-tej linii obrazu sonaru. Współrzędne z punktów $p_{n,1}$ i $p_{n,2}$ to wynik działania algorytmu dla poprzedniego pingu, natomiast współrzędna z punktu $p_{n+1,1}$ wyznaczana jest na podstawie długości obszaru opóźnienia dla bieżącego pingu oraz prędkości rozchodzenia się dźwięku w wodzie, natomiast współrzędna z punktu $p_{n+1,2}$ jest wynikiem działania algorytmu optymalizacji. Z kolei rysunek 5.24d przedstawia m-ty krok działania algorytmu dla n-tej linii obrazu sonaru. Współrzędna z punktu $p_{n+1,m}$ pochodzi z kroku poprzedniego działania algorytmu, współrzędna z punktu $p_{n,m}$ to wynik działania algorytmu dla poprzedniego pingu, natomiast współrzędna z punktu $p_{n+1,m+1}$ jest wynikiem działania algorytmu optymalizacji.

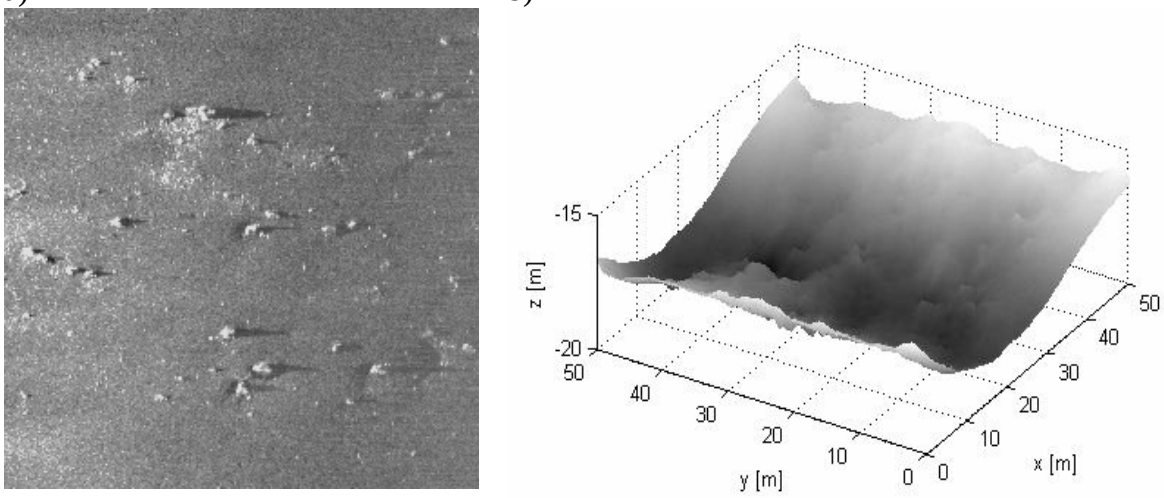
Dla algorytmów optymalizacji funkcja celu Q, dla każdej linii obrazu sonaru, ma postać:

$$Q_{n,n} = \left(I_{n,m} - \hat{I}\left(\theta_{n,m}\right)\right)^2, \tag{5.10}$$

gdzie n jest kolejną linią obrazu sonarowego, m jest kolejnym pikselem w danej linii, I jest natężeniem fali rozproszonej z obrazu sonaru, $\hat{I}$ jest estymowanym natężeniem fali rozproszonej, θ jest kątem pomiędzy kierunkiem transmisji sygnału sondującego, a normalną do powierzchni dna.

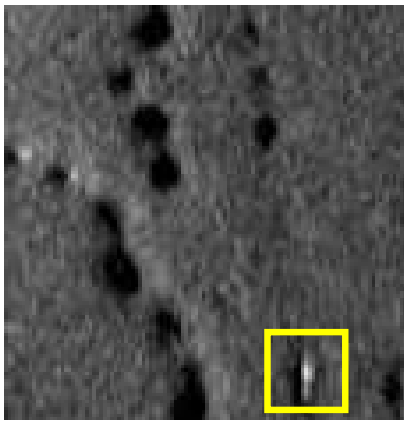
Na rysunku 5.25 przedstawiono wyniki uzyskane za pomocą zaproponowanego algorytmu rekonstrukcji kształtu dna morskiego.

a) b)



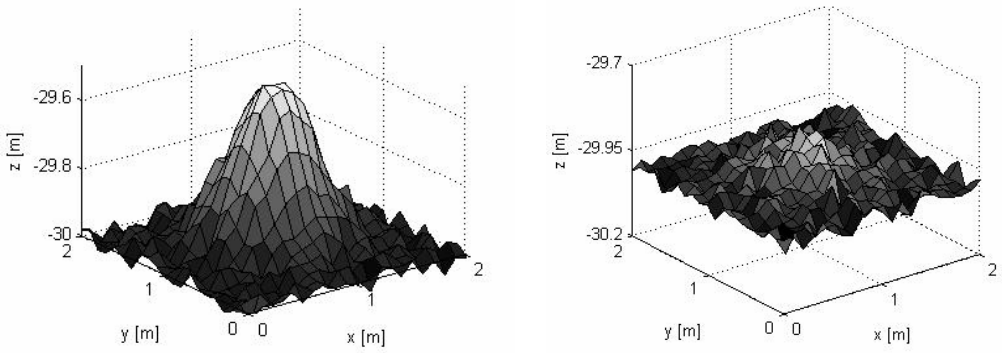
Rys. 5.25. a) echogram sonaru, b) wynik działania algorytm rekonstrukcji kształtu dna morskiego

Istotne znaczenie dla jakości otrzymanych wyników ma wstępna analiza obrazów pod względem rozróżnienia obszarów o różnym typie dna morskiego. Każdy typ dna charakteryzują inne parametry modelu rozpraszania dźwięku, co uwidacznia się na obrazie sonarowym inną wartością średnią natężenia fali rozproszonej I. Zastosowanie prostych algorytmów przetwarzania obrazów wykrywających krawędzie [75] pozwoliło zautomatyzować proces rozróżniania typów dna morskiego na obrazie sonarowym. Na rysunku 5.27 przedstawiono wyniki działania algorytmu dla dwóch różnych interpretacji typu dna morskiego dla zaznaczonego (żółty prostokąt) fragmentu obrazu sonaru przedstawionego na rysunku 5.26. Rysunek 5.27a przedstawia wyniki uzyskane przy założeniu jednego typu dna, natomiast rysunek 5.27b przedstawia wyniki uzyskane przy założeniu dwóch różnych typów dna.



Rys. 5.26. Obraz sonarowy z dwoma różnymi typami dna morskiego

a) b)



Rys. 5.27. wyniki działania algorytmu a) przy założeniu jednego typu dna, b) przy założeniu dwóch różnych typów dna

5.6. Podsumowanie

W niniejszym rozdziale zaprezentowano opracowane przez autora dwie metody, bazujące na technice *Shape from Shading* (SFS), trójwymiarowej rekonstrukcji dna morskiego oraz kształtu obiektów na dnie na podstawie danych z sonaru bocznego. Zaletą zaprezentowanych metod jest ich prostota i zdolność sekwencyjnego „jednoprzebiegowego" przetwarzania obrazu otrzymywanego z danych z sonaru bocznego. Zaprezentowane rezultaty są obiecujące zarówno dla rekonstrukcji rzeźby dna morskiego, jak i dla odtwarzania kształtu obiektów na dnie.

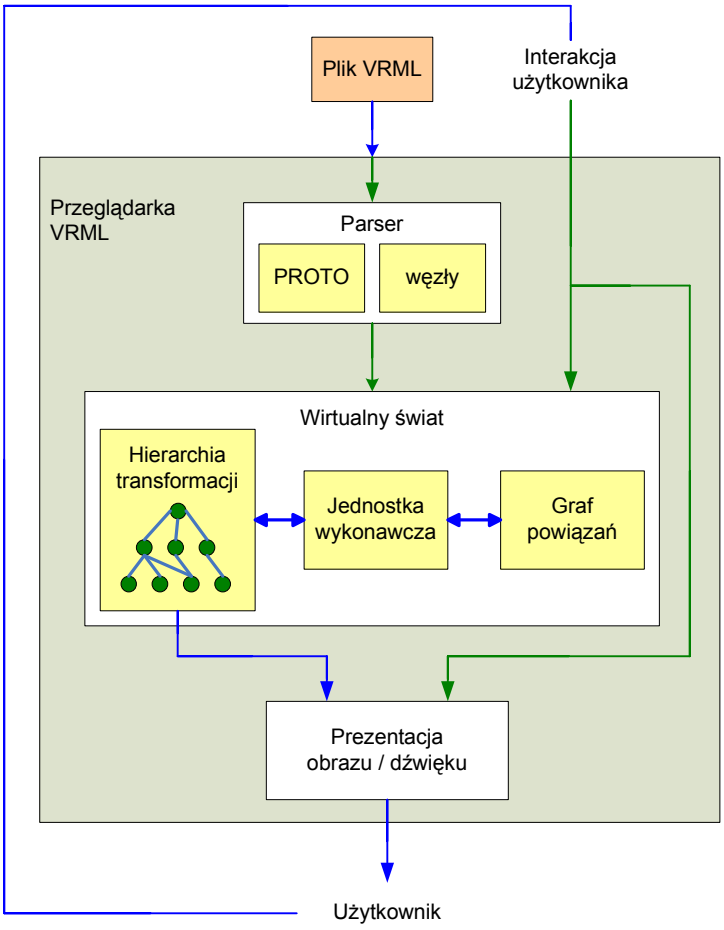
Systemy hydroakustyczne wykorzystywane obecnie są w stanie gromadzić w czasie pracy bardzo dużą ilość danych. Szczególnie dotyczy to systemów wyposażonych w sonary boczne, lub echosondy wielowiązkowe, ze względu na wysoką rozdzielczość gromadzonych danych oraz duży rozmiar przeszukiwanego obszaru dna w czasie jednej transmisji sygnału sondującego. Przetwarzanie tak dużych ilości danych, a następnie ich wizualizacja w czasie rzeczywistym, pomimo szybkiego rozwoju technologii informacyjnych, jest ograniczona przede wszystkim ze względu na zdolności obliczeniowe współczesnych komputerów. Zastosowanie metod optymalizacji w zagadnieniu odwrotnym, jakim jest rekonstrukcja dna morskiego z obrazów sonarowych, w znacznym stopniu przyspiesza pracę opracowanych algorytmów trójwymiarowej wizualizacji danych hydroakustycznych w czasie niemal rzeczywistym.

6. Zastosowanie języków opisu wirtualnej rzeczywistości do wizualizacji danych hydroakustycznych

6.1. Wprowadzenie

Wprowadzenie języka VRML (ang. *Virtual Reality Modeling Language*), najpopularniejszego obecnie języka opisu wirtualnej rzeczywistości, datuje się na rok 1994, kiedy to na konferencji World Wide Web (WWW) w Genewie dyskutowano na temat wzbogacenia stron WWW o elementy wirtualnej rzeczywistości. VRML powstał w wyniku naturalnego rozwoju ogólnoświatowej sieci Internet, która od działania w trybie tekstowym przeszła ewolucję, aż do ery WWW. Ewolucję tę napędza potrzeba graficznej prezentacji informacji zawartych w Internecie. VRML jest językiem opisu wieloskładnikowych interaktywnych symulacji. Symulacje te są dostarczane użytkownikowi poprzez Internet i połączone wzajemnie poprzez WWW. Budowane są z predefiniowanych prostych obiektów 3^D, tworząc skomplikowane sceny i wirtualne trójwymiarowe światy. VRML charakteryzuje się trzema cechami, które odróżniają go od innych aplikacji grafiki 3^D. Pierwszą z tych cech jest dostępność – możliwość oglądania symulacji na duże odległości poprzez sieć Internet. Drugą z tych cech jest możliwość poruszania się po scenie – wszystkie obiekty można oglądać z każdej strony poprzez „chodzenie" wokół nich (nie można uzyskać tego efektu w tradycyjnych aplikacjach do grafiki 3^D, takich jak: AutoCad, czy 3DStudio). Wreszcie trzecią zaletą jest interakcyjność – możliwość wpływu na zachowanie się obiektów na scenie poprzez zaimplementowane różnego rodzaju tzw. czujniki. Odtwarzanie symulacji może odbywać się na dwa sposoby: poprzez oprogramowanie specjalnie do tego celu

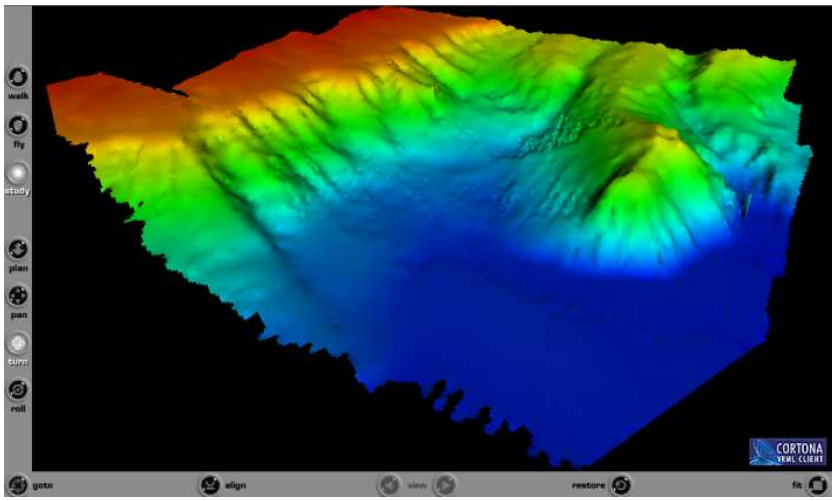
stworzone, lub z wykorzystaniem odpowiednich plug-in'ów do innych aplikacji. Ponieważ współczesne przeglądarki WWW posiadają możliwość interpretacji języka VRML, wyniki badań można udostępniać i prezentować w sieci Internet. Pliki VRML uruchamiane są na tej samej zasadzie co strony HTML, a przeglądarka WWW powinna być zaopatrzona w odpowiedni plug-in. Nazwa języka VRML sugeruje jego bliski związek z językiem HTML (ang. *HyperText Markup Language*) używanym do opisu stron WWW. Podobieństwa są jednak niewielkie. Podstawową cechą charakteryzującą oba języki jest to, iż jednym z celów jakie postawili sobie ich projektanci było zminimalizowanie ilości informacji przesyłanych przez łącza sieciowe. Dzięki temu zarówno w przypadku języka VRML, jak i HTML strona WWW nie jest przesyłana w postaci mapy bitowej, lecz jako ciąg znaków składających się na tekst i komendy formatujące, które zostaną zamienione na stosowny obraz dopiero przez przeglądarkę na komputerze odbiorcy. Na rysunku 6.1 zaprezentowano koncepcję przeglądarki plików VRML [21].



Rys. 6.1. Koncepcja przeglądarki plików VRML

6.2. Charakterystyka języków opisu wirtualnej rzeczywistości

W przypadku pierwszej wersji języka VRML, której specyfikacja została upubliczniona w maju 1995 roku [4], odpowiednie komendy pozwalały przeglądarce na tworzenie szeregu trójwymiarowych brył, które mogły być następnie oglądane pod dowolnym kątem i z dowolnej odległości. Język VRML w wersji 1.0 powstał dzięki okrojeniu języka programu Open Inventor znanego posiadaczom komputerów Silicon Graphics. Język ten dawał do dyspozycji trzy rodzaje komend, nazywanych tutaj węzłami. Pierwsze, to węzły tworzące obiekty trójwymiarowe. Kolejne pozwalające manipulować tymi obiektami (skalować, przesuwać, itp.). Wreszcie trzecie, umożliwiające zorganizowanie pozostałych komend w strukturę drzewiastą, co znacznie ułatwia pracę nad projektem. Przykład trójwymiarowej wizualizacji dna morskiego wykonanej przez autora rozprawy za pomocą języka VRML v.1.0 przedstawiono na rysunku 6.2. Język VRML v.1.0 pozwalał na tworzenie wirtualnych światów z ograniczonymi możliwościami interakcji. Nie była możliwa animacja zdefiniowanych obiektów, nie można było również opisać różnego rodzaju czujników, ułatwiających interakcje użytkownika z wirtualnym światem. Dawał jedynie możliwość definiowania trójwymiarowych obiektów, nadawania im różnych kształtów, kolorów, czy tekstur oraz poruszania się między nimi.



Rys. 6.2. Trójwymiarowa wizualizacja dna morskiego wykonana za pomocą języka VRML v.1.0

Twórcy pierwszej wersji języka VRML mieli świadomość, że nie jest on tworem doskonałym. Prace nad jego udoskonaleniem doprowadziły do powstania jego kolejnej wersji o nazwie VRML97 (VRML v.2.0), która w grudniu 1997 roku została oficjalnie

uznana przez Międzynarodową Organizację Standaryzacji ISO (ang. *International Organization for Standardization*) za standard międzynarodowy [21]. Druga wersja języka VRML, w porównaniu z pierwszą, po raz pierwszy wprowadziła możliwość wpływu na zachowanie się obiektów na scenie, poprzez zaimplementowanie różnego rodzaju tzw. czujników, jak również możliwość ruchu w statycznych do tej pory wirtualnych światach. Nowością jest również możliwość definiowania prototypów własnych węzłów oraz stosowanie innych języków (Java, JavaScript) w kodzie języka VRML [30].

Kod programu napisanego w języku VRML jest zespołem węzłów występujących w pewnej hierarchii. Każdy z węzłów składa się z nazwy, pól i zdarzeń oraz wartości domyślnych dla pól. Węzły te można podzielić na kilka grup. Węzły grupujące służą do tworzenia przekształceń grup obiektów na wirtualnej scenie. Węzły geometryczne odpowiadają za modelowanie brył. Węzły zależne od czasu, które aktywują i dezaktywują swoją działalność w określonym czasie. Węzły interpolacji używane w celu określania zmiany między podanymi wartościami kluczowymi. Węzły czujnikowe, dzięki którym użytkownik ma wpływ na zachowanie się obiektów na wirtualnej scenie. Największe znaczenie mają węzły grupujące, gdyż to, które z nich i w jakiej kolejności zgrupujemy, decyduje o przyszłym wyglądzie sceny.

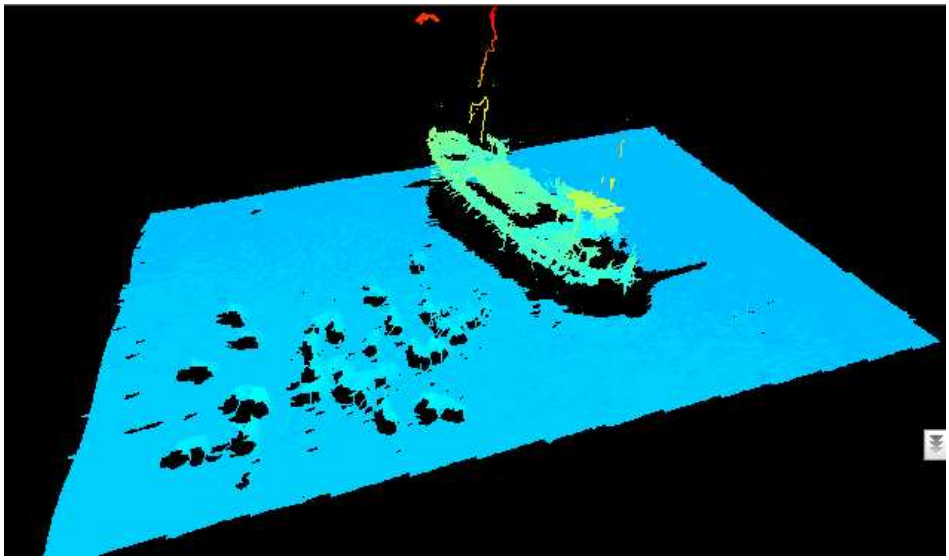
Możliwość wpływu na zachowanie się obiektów na scenie uzyskano poprzez mechanizm generowania i przyjmowania zdarzeń przez poszczególne węzły. Większość z nich ma zdefiniowane przynajmniej jedno pole, za pomocą którego może generować zdarzenia (typu `eventOut`) oraz przynajmniej jedno pole, za pomocą którego może przyjmować zdarzenia (typu `eventIn`). Generowane zdarzenia są wiadomościami wysyłanymi do innych węzłów w celu zmiany stanu węzła przyjmującego zdarzenie. Generowane zdarzenie może zostać bezpośrednio przekazane do węzła docelowego za pomocą komendy `ROUTE`, jak również może zostać wcześniej przetworzone przez węzeł `Script`.

Tworzenie prototypów pozwala na zdefiniowanie dowolnej liczby nowych typów węzłów w kodzie języka VRML. Pozwala to na parametryzację geometrii, atrybutów, zachowań lub różnych ich kombinacji [21]. Raz utworzony prototyp może być później używany jak węzeł wbudowany w specyfikację języka VRML97.

Połączenie języka VRML97 z innymi językami daje ogromne możliwości udoskonalenia kreowanego wirtualnego świata. Język, który będzie dołączony do kodu

VRML, musi być interpretowalny przez przeglądarkę. Jest to podstawowy warunek, który ten język musi spełniać, gdyż w przeciwnym przypadku jego polecenia nie będą zrozumiane, a zatem ich wykonanie będzie niemożliwe. Językami, których elementy są najczęściej dołączane do kodu VRML, są Java i JavaScript. Dzieje się tak ze względu na popularność i spore możliwości jakie dają te języki. Różnice pomiędzy Java i JavaScript, pomimo zbliżonej nazwy są dość spore. Java jest językiem programowania, w pełni tego słowa znaczeniu. Natomiast JavaScript jest raczej rozszerzeniem języka HTML i VRML niż samodzielnym językiem programowania. Z zapotrzebowania na język skryptu mocniej zintegrowany z VRML powstał język VRMLScript. VRMLScript jest podzbiorem języka JavaScript, w którym typy danych języka VRML są traktowane jako wbudowane obiekty JavaScript. Do łączenia języka VRML z innymi językami służy węzeł `Script` [21].

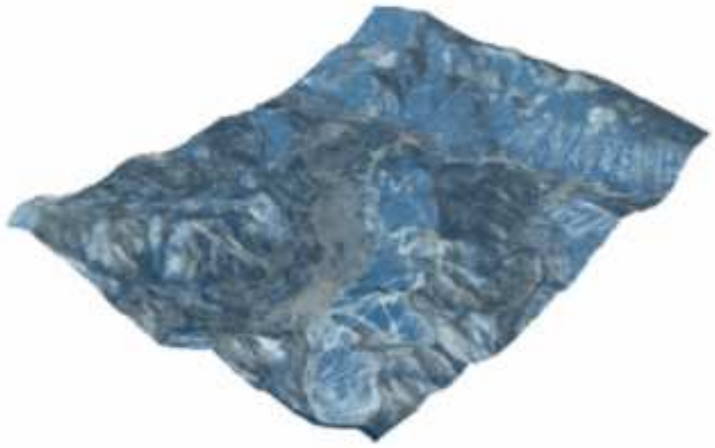
Przykład wirtualnego świata wykonanego przez autora pracy w języku VRML97, przedstawiający model wraku statku, pokazano na rysunku 6.3.



Rys 6.3. Model wraku statku wykonany w języku VRML97

GeoVRML jest rozszerzeniem standardu VRML. Nazwa jego pochodzi od oficjalnej nazwy grupy roboczej wchodzącej w skład Web3D Consortium utworzonej w 1998 roku. Grupa ta postawiła sobie za cel rozwój narzędzi do wizualizacji danych w kontekście geograficznym wykorzystując język VRML. GeoVRML wykorzystuje dwa mechanizmy języka VRML, a mianowicie możliwość definiowania prototypów własnych węzłów oraz możliwość połączenia języka VRML z językiem Java. Nowe węzły zostały zdefiniowane tak, aby dane w kontekście geograficznym mogły być

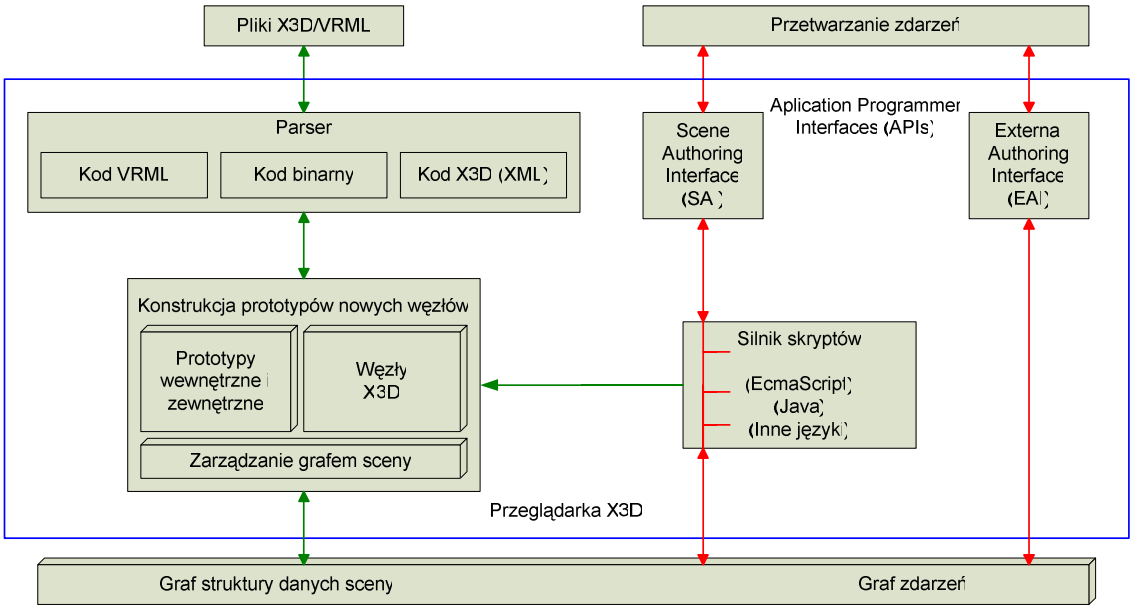
bezpośrednio wprowadzane do ich pól. Natomiast zadaniem kodu Javy jest konwersja tych danych, zapisywanych jako ciąg znaków, do typu wymaganego przez język VRML. Ponieważ w języku VRML liczby są typu zmiennoprzecinkowego o pojedynczej precyzji, dla danych w globalnej skali można uzyskać rozdzielczość rzędu 10 m. Twórcom języka GeoVRML udało się zwiększyć precyzje prezentowanych danych poprzez zdefiniowanie lokalnych kartezjańskich układów współrzędnych, co pozwoliło na uzyskanie rozdzielczości rzędu milimetrów [87]. Na rysunku 6.4 przedstawiono model doliny wykonany za pomocą języka GeoVRML.



Rys. 6.4. Model doliny zdefiniowany w języku GeoVRML

Natomiast język X3D (ang. *Extensible* 3^D), jako następca języka VRML97, jest rezultatem kilkuletniej pracy rozwojowej X3D Task Group i utworzonej niedawno Browser Working Group zrzeszonych w Web3D Consortium. Obie te grupy ściśle współpracując ze sobą w celu stworzenia specyfikacji języka X3D. W listopadzie 2004 roku, po zakończeniu procesu weryfikacji przez Międzynarodową Komisję Standaryzacji ISO, język X3D został oficjalnie uznany za standard międzynarodowy [54]. Wymagania jakie zostały postawione nowemu językowi, to zgodność z istniejącym standardem języka VRML97, przeglądarkami i narzędziami. Język X3D ma rozszerzać mechanizmy pozwalające na wprowadzanie nowych właściwości, szybką ocenę przydatności i formalną adaptację tych rozszerzeń w specyfikacji. Powinien posiadać małe, proste „jądro" pozwalające na szeroką dowolność adaptacji elementów 3^D. Wymaga się, aby większy, w pełni kompatybilny profil VRML obsługiwał istniejące bogactwo obiektów. Język X3D powinien być obsługiwany przez inne dekodery, włączając XML, dla ścisłej integracji z technologią i narzędziami WWW. Wymagania te zostały zrealizowane poprzez wprowadzenie architektury komponentu

bazowego, którego zadaniem jest adresowanie rozszerzeń, niekompatybilności, błędów dekodowania, jako osobnych tematów (elementów). Na rysunku 6.5 przedstawiono architekturę standardu języka X3D [54].



Rys. 6.5. Architektura standardu X3D

6.3. Wizualizacja danych hydroakustycznych za pomocą języka VRML

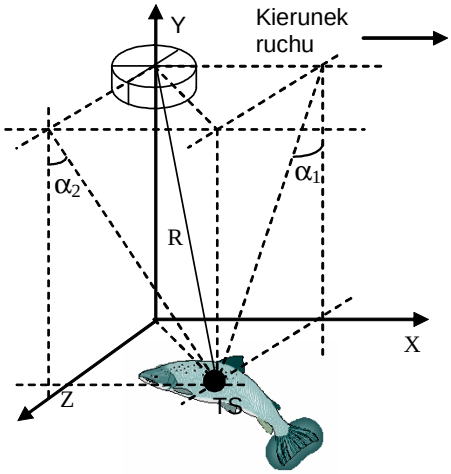
Języki opisu wirtualnej rzeczywistości obok typowych aplikacji w grafice komputerowej znalazły również zastosowanie w wielu dyscyplinach naukowych. Przykładowo, w chemii stosuje się je do zobrazowania modeli atomowych cząsteczek, w medycynie do wizualizacji organów ludzkich, w astronomii do przedstawienia ruchu planet, a w geografii i nawigacji do tworzenia trójwymiarowych map. W rozdziale tym zaprezentowano wykorzystanie języków opisu wirtualnej rzeczywistości do trójwymiarowej wizualizacji danych hydroakustycznych.

6.3.1. Wizualizacja w języku VRML przemieszczania się ryb pelagicznych w wiązce echosondy

W ciągu ostatnich trzech dekad w hydroakustyce rybackiej stosowane są coraz bardziej złożone systemy akwizycji i przetwarzania danych. Najczęściej stosowane echosondy naukowe wspomagane są odpowiednim oprogramowaniem służącym nie tylko do rejestracji danych, ale też do ich obrazowania i specjalistycznej analizy. Z racji dużej liczby danych ich wizualizacja prowadzona była najczęściej z wykorzystaniem

technik opartych na grafice 2^D. Do standardowych zaliczyć należy zobrazowanie typu A i M [82] na oscyloskopie lub monitorze komputerowym prezentujące echa zarejestrowane po nadaniu impulsu sondującego. Zobrazowania takie służące najczęściej analizie ech uzupełnia się zwykle kolorowym echogramem obrazującym sekwencje kolejnych ech w sukcesywnych transmisjach. Oba rodzaje zobrazowań posiadają często wspólną oś (podstawę czasu) wyskalowaną w metrach. Zobrazowania tego typu wykorzystuje się zarówno w echosondach jednowiązkowych, jak i prostych sonarach. Nowsze systemy, wykorzystywane nie tylko do wykrywania ryb pelagicznych, a także do estymacji ich siły celu, wyposażone są w dwa przetworniki tworząc tzw. system dwuwiązkowy (ang. *dual-beam*), lub cztery tworząc system z rozszczepioną wiązką.

Metoda rozszczepionej wiązki wykorzystuje specjalną konfigurację przetwornika echosondy. Podzielony jest on elektrycznie na cztery sektory (kwadranty), które w trybie nadawczym pobudzane są równolegle z jednakową amplitudą i fazą, formując wspólnie jedną, tzw. pełną wiązkę (ang. *full beam*) [93]. W reżimie odbiorczym, sygnał echa odbity od pojedynczego celu (ryby) odbierany jest przez każdy sektor oddzielnie, a następnie porównywane są fazy ech odebranych w dwóch parach segmentów położonych w prostopadłych płaszczyznach. (wzdłuż i w poprzek osi statku) – jak pokazano na rysunku 6.6 [79].



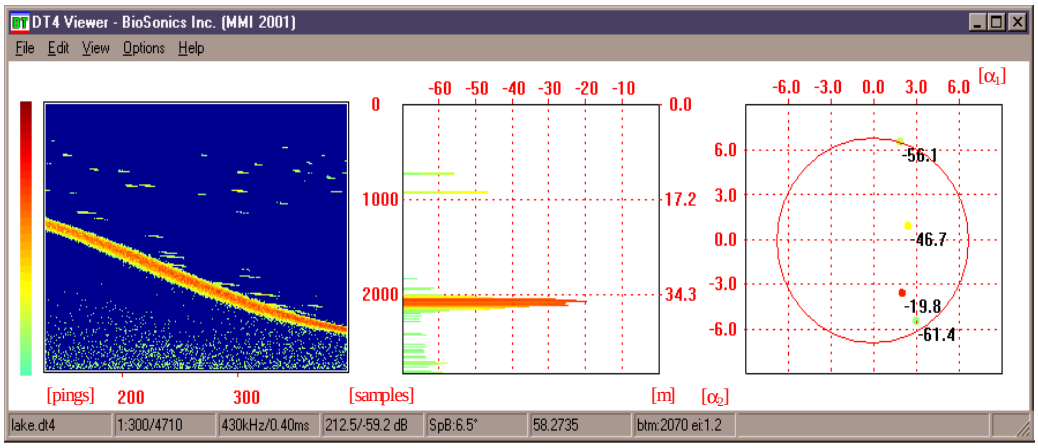
Rys. 6.6. Układ współrzędnych dla danych z echosondy

Położenie celu we współrzędnych kartezjańskich otrzymuje się przez prostą transformację współrzędnych sferycznych [93]:

$$\begin{cases} y = R * \cos\theta \\ x = y * \tan\alpha_1 \\ z = y * \tan\alpha_2 \end{cases} \tag{6.1}$$

gdzie kąt $\theta = \arctan\sqrt{\tan^2\alpha_1 + \tan^2\alpha_2}$, R jest odległością od celu, a kąty α_1 i α_2 pokazano na rysunku 6.6.

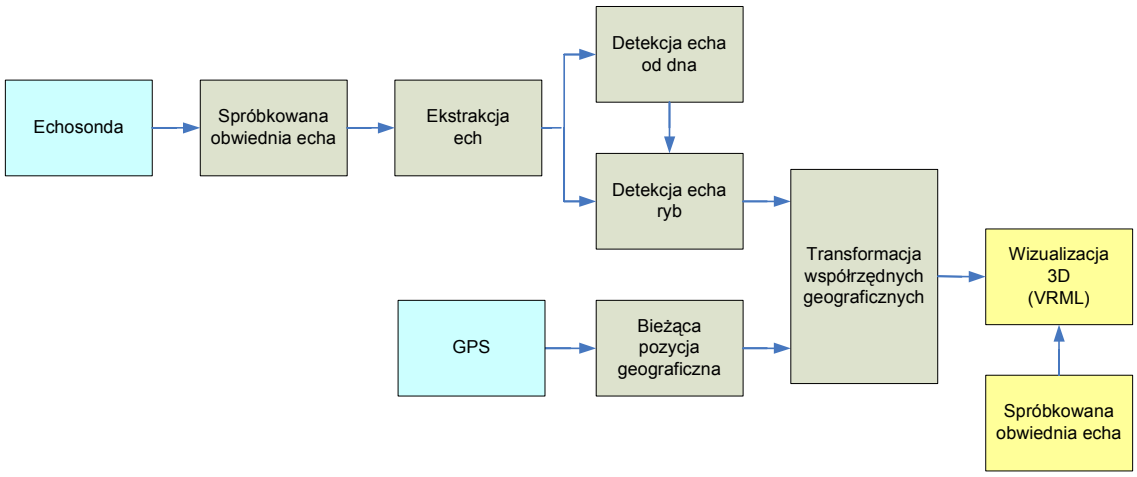
Tak więc system z rozszczepioną wiązką gwarantuje pełną lokalizacje celu. W obecności danych z systemu GPS zapewnia możliwość prezentacji danych w kontekście geograficznym. Technika rozszczepionej wiązki została opracowana i wdrożona w serii echosond EY przez norweską firmę SIMRAD [93]. Przykład typowego zobrazowania danych pochodzących z echosondy z rozszczepioną wiązką (DTX Biosonic Inc.) pokazano na rysunku 6.7. Zawiera on także typowe zobrazowanie lokalizacji kątowej celu możliwe tylko dla systemu z rozszczepioną wiązką i nazywane popularnie "oko byka" (ang. *bulls-eye*).



Rys. 6.7. Typowe zobrazowanie danych zebranych przez echosondę z rozczepioną wiązką (echogram, histogram siły celu – poziom echa, lokalizacja kątowa celu)

Proces przetwarzania danych hydroakustycznych dla potrzeb trójwymiarowej wizualizacji przedstawiono na rysunku 6.8 [12]. Dane w postaci rekordów próbek obwiedni echa w kolejnych transmisjach echosondy analizowane są pod kątem wyodrębniania ech od ryb i kojarzeniu ech z kolejnych transmisji jako tych, które pochodzą od jednej poruszającej się w wiązce ryby (ang. *fish tracking*). Algorytm ten wymaga niezawodnego algorytmu detekcji echa, który ogranicza zakres powodzenia algorytmu zliczania ryb. Dane wzbogacone o informację kątową z rozszczepionej wiązki mogą teraz być przekształcone do względnych współrzędnych kartezjańskich i transformowane do współrzędnych bezwzględnych po uwzględnieniu informacji o

bieżącej długości i szerokości geograficznej statku. Dane te podawane są do modułu realizującego konwersję na scenę opisaną w języku VRML [78].



Rys. 6.8. Schemat przetwarzania danych hydroakustycznych pochodzących z echosondy z rozszczepioną wiązką

Z danych pomiarowych konstruowana jest scena opisana w języku VRML składająca się z: modelu akwenu, modelu statku wraz z echosondą oraz modelu celu (ryby). Model akwenu został wykonany za pomocą węzła `ELEVATIONGRID` [21] z nałożoną teksturą piasku (dno) oraz węzła `BOX` [21] z nałożoną teksturą tafli wody (powierzchnia akwenu). Model statku został stworzony za pomocą programu VRCreator 2.0 z gotowych elementów znajdujących się w bazie tego programu. Model ryby został wykonany za pomocą węzła `INDEXFACESET` [21]. Zaimplementowano także ruch tylnej płetwy ryby za pomocą węzła `COORDINATEINTERPOLATOR` [21]. Dane wejściowe dla opisu ryby posiadają następującą postać: numer celu (ryby), czas pojawienia się echa od celu [s], położenie celu w wiązce echosondy w kartezjańskim układzie współrzędnych (x, y, z) [m], wielkość celu, siła celu, orientacja celu w płaszczyźnie *yoz* [rad]. Czas pojawienia się echa od celu wyznacza się na podstawie jego numeru oraz częstotliwości powtarzania impulsu sondującego. Położenie celu wyznacza się przy pomocy zależności (6.1). Rozmiar celu l został wyznaczony na podstawie empirycznej regresyjnej zależności siły celu *TS* (ang. *target strength*) od długości ryby [44]:

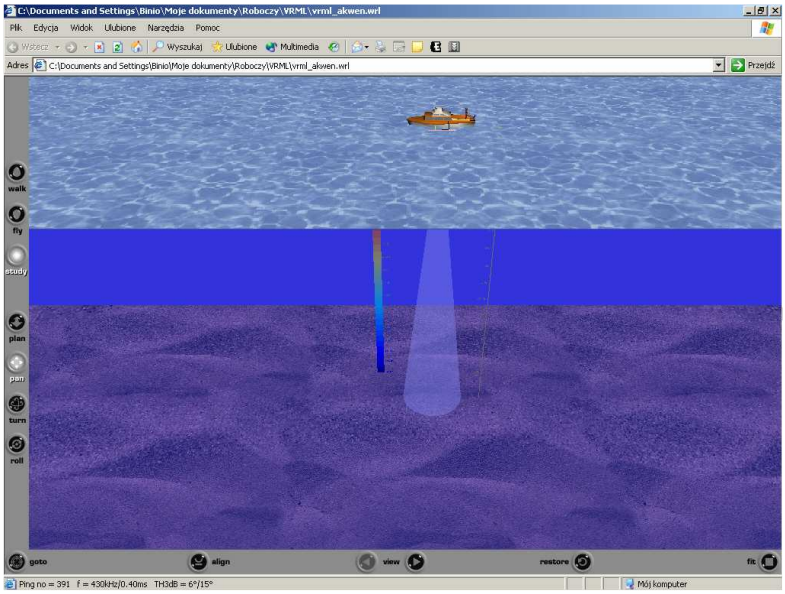
$$\overline{TS} = 20 \log l - 29{,}2 \,. \tag{6.2}$$

Rybie przypisuje się kolor według skali kolorów siły celu TS [80]. Orientację celu w płaszczyźnie *yoz* wyznacza się na podstawie dwóch kolejnych położeń celu w wiązce echosondy. Po scenie można poruszać się swobodnie, natomiast umieszczone na niej

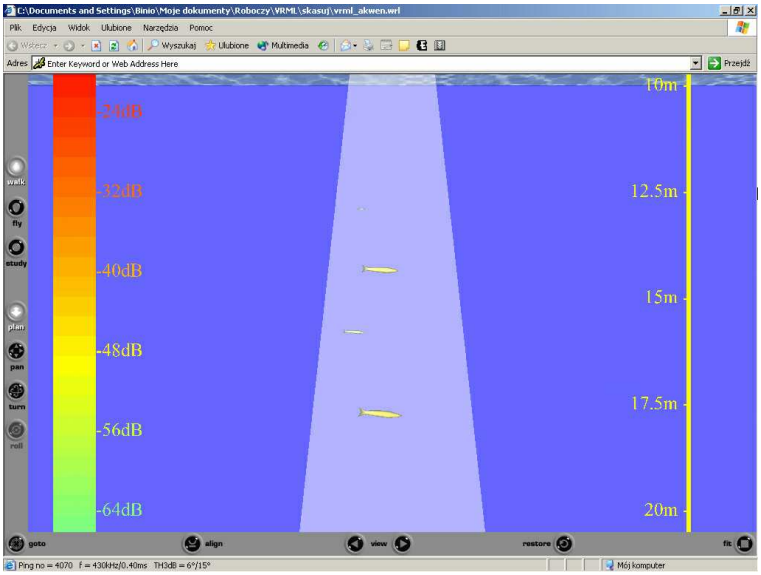
kamery ułatwiają obserwacje przebiegu symulacji. W celu poprawienia komfortu obserwacji symulacji skorzystano z węzła `LOD` [21] (ang. *Level Of Detail*), dzięki któremu możliwe jest określenie odległości minimalnej przy której są widoczne poszczególne elementy sceny.

Przykładową dynamiczną wizualizację wykonano przy wykorzystaniu rzeczywistych danych pomiarowych zebranych w trakcie przeszukiwań akustycznych na Jeziorze Waszyngtona (ang. *Lake Washington*) za pomocą echosondy cyfrowej DT6000 pracującej na częstotliwości $f = 420\text{kHz}$. Dane te rozpowszechniane są z systemem DT, jako dane przykładowe. Zawierają one 4710 rekordów transmisji echosondy, z których każdy składa się 2825 próbek. Dzięki przetwarzaniu wydzielono 8000 ech, wśród których wyodrębniono ponad 1000 ryb. Ponieważ dane zostały zebrane z częstotliwością powtarzania wynoszącą 5 transmisji na sekundę, czas trwania akwizycji danych wynosił około 17 minut. W opisie sceny zadbano, aby czas ten był wiernie odtwarzany przez symulację. Na rysunku 6.9 został zaprezentowany widok ogólny sceny, natomiast na rysunku 6.10 widok z boku wiązki echosondy, a na rysunku 6.11 widok z góry wraz z zaznaczonym przekrojem wiązki echosondy.

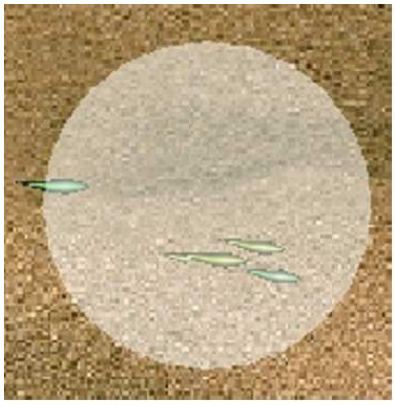
Oprogramowanie do konwersji danych binarnych zarejestrowanych przez system akwizycji na język skryptowy VRML wykonane zostało w języku C oraz języku Matlab przez autora pracy. Zastosowanie języka Matlab pozwoliło jednocześnie kontrolować poprawność danych i ich transformacji. Jak się okazało interpretacja powstałej sceny wymaga dużej mocy obliczeniowej, aby płynnie ją odtwarzać. Należy jednak zaznaczyć, że chociaż użytkownik może dowolnie poruszać się po całym wirtualnym akwenie to jednak widoczne są jedynie ryby zarejestrowane przez echosondę. Ich rozmiar wyznaczany jest na podstawie przybliżonej zależności regresyjnej stosowanej w hydroakustyce rybackiej [44], a ruch, kierunek i orientacja jest jedynie przybliżeniem interpolowanym na podstawie danych z sondowań.



Rys. 6.9. Widok ogólny sceny



Rys. 6.10. Widok z boku – trójwymiarowy odpowiednik echogramu



Rys. 6.11. Widok z góry z zaznaczonym przekrojem poprzecznym wiązki echosondy – odpowiednik zobrazowania typu „oko-byka”

6.3.2. Wizualizacja w języku VRML obiektów na dnie morskim z wykorzystaniem danych pochodzących z echosondy wielowiązkowej

Programy do akwizycji danych, gromadzące dane z systemów wielowiązkowych, wyposażone są w narzędzia do prostej dwuwymiarowej wizualizacji. W dedykowanych do tego typu zadań pakietach znajdują się narzędzia do obróbki i prezentacji danych uzyskiwanych z sonarów wielowiązkowych, interferometrów oraz sonarów bocznych. Przykładowo należy tutaj wspomnieć o pakiecie MB-system, którego rozwój jest kontynuowany głównie przez National Science Foundation (NFS), SeaBeam Instruments i NOAA [20]. Najnowszym podejściem do prezentacji danych pomiarowych jest ich trójwymiarowa wizualizacja. Specyficzne narzędzia do trójwymiarowej wizualizacji ekosystemów morskich są przeznaczone do ułatwiania integracji i interpretacji bardzo dużych i złożonych zbiorów danych wraz z ich przestrzenną wieloskładnikową prezentacją [46]. Dane z systemów wielowiązkowych mogą być także czytane przez popularne oprogramowanie naukowe (przykładowo MATLAB). Typowa reprezentacja danych dla tego typu oprogramowania to trzykolumnowe macierze w kartezjańskim układzie współrzędnych *xyz*, gdzie *xy* są współrzędnymi położenia typowymi dla sytemu UTM (ang. *Universal Transverse Mercator*), natomiast *z* jest współrzędną reprezentująca głębokość. Współrzędne sytemu UTM wyznaczone za pomocą systemu GPS zintegrowane razem z danymi z systemu wielowiązkowego tworzą spójną całość.

Typowe zobrazowania dna morskiego za pomocą danych z systemów wielowiązkowych są tworzone bezpośrednio w wyniku przetwarzania sygnałów echa od obiektów podwodnych, zwykle w kolejnych transmisjach sonaru lub echosondy, ze skalą kolorów reprezentującą głębokość. Macierze reprezentujące prawie regularną siatkę mogą być zorganizowane w kolorowe powierzchnie tworzące obraz dna morskiego [32, 35]. Powierzchnie te mogą być przetwarzane za pomocą takich technik, jak triangulacja i decymacja dla osiągnięcia kompromisu pomiędzy dokładnością (rozdzielczością), a szybkością wyświetlania otrzymywanego obrazu komputerowego. W przypadku wizualizacji obrazów z sonarów wielowiązkowych zawierających obiekty osadzone na dnie, bezpośrednia ich wizualizacja prowadzi do artefaktów związanych z łączeniem sąsiadujących punktów w powierzchnie.

Dane pochodzące z systemów wielowiązkowych mogą być w stosunkowo łatwy sposób osadzone w prostej trójwymiarowej scenie poprzez wykorzystanie własności

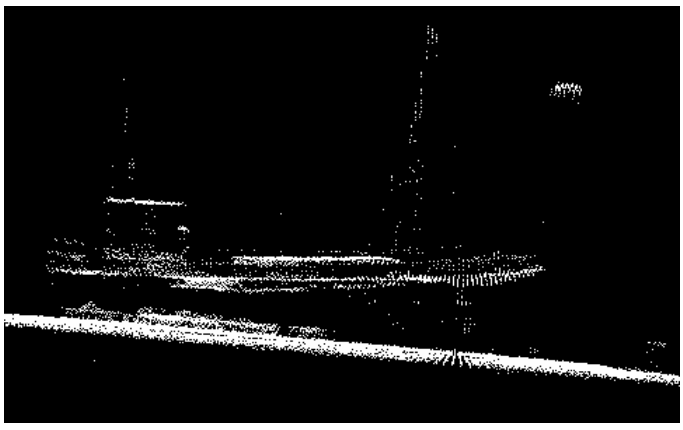
języka VRML. W kilku liniach kodu z użyciem węzła `PointSet` [21] VRML pozwala na stworzenie prostej trójwymiarowej sceny przedstawionej na rysunku 6.12 [11]. Na rysunku 6.12a przedstawiono fragment kodu źródłowego wirtualnej sceny wizualizacji wraku statku, natomiast na rysunku 6.12b został przedstawiony obiekt reprezentowany jest przez jednokolorowe punkty. Poprzez dodanie innego węzła zawierającego informacje o kolorze każdego z punktów z węzła `PointSet` uzyskuje się trójwymiarowe zobrazowanie przedstawiające kolejne echa za pomocą sekwencji punktów, natomiast głębokość za pomocą kolorów. Takie zobrazowanie może nie być satysfakcjonujące, ponieważ nie zawiera informacji, które z punktów tworzą wspólnie powierzchnie zamkniętą.

W przypadku obrazowania samego dna bez obiektów poprzez drobną modyfikacje kodu VRML można umieścić w scenie dodatkową informacje, o tym które z punktów tworzą powierzchnie zamkniętą. W tym celu można wykorzystać węzeł `ElevationGrid`, lub kombinację węzła `IndexedFaceSet` z węzłem `IndexedLineSet`.

a)

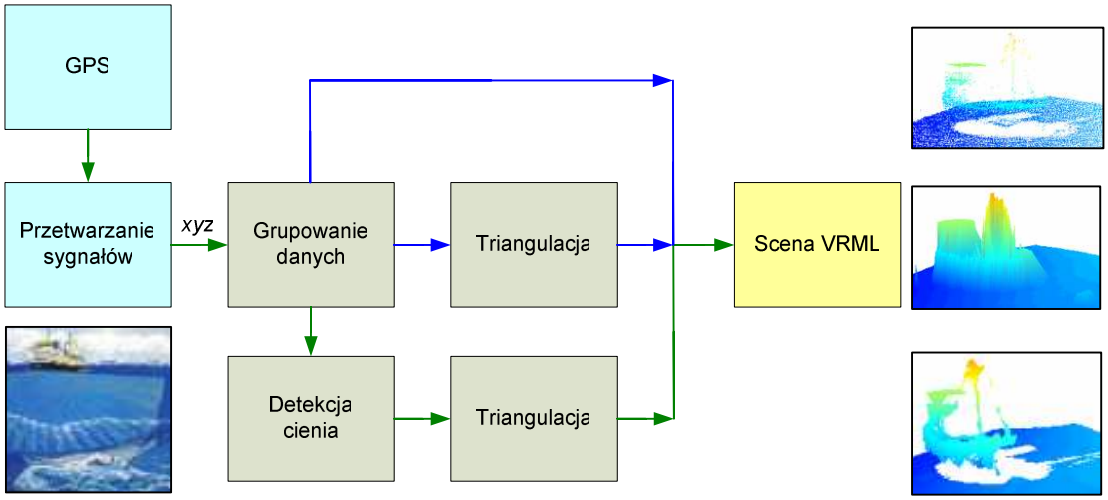
```
#VRML V2.0 utf8
Shape {
   Geometry PointSet {
      Coord Coordinate {
         Point [
            ...
         współrzędne xyz
         z danych akustycznych
            ...
         ]
      }
   }
}
```

b)



Rys. 6.12. Przykład trójwymiarowej sceny zawierającej wrak statku a) fragment kodu źródłowego w języku VRML, b) zrzut ekranu

W przypadku, gdy na dnie morza znajdują się nietypowe obiekty (np.: wraki, miny) w celu ich identyfikacji wskazane jest zastosowanie specjalnego algorytmu przetwarzania danych. Schemat blokowy algorytmu przedstawiono na rysunku 6.13 [11]. Najprostszą wersję działania algorytmu przedstawiono linią przerywaną na schemacie blokowym, w której dane analizowane są sekwencyjnie ping po pingu. Taki algorytm zaimplementowany w systemie pomiarowym może analizować i wizualizować dane w czasie rzeczywistym. Chociaż dane potrzebne do wizualizacji otrzymywane są prosto z systemu pomiarowego, nie zawierają informacji, które z nich tworzą powierzchnie zamkniętą. Dlatego przed triangulacją następuje proces decyzyjny, które z ech mogą utworzyć takie powierzchnie. Algorytm taki zawarty jest w bloku „detekcja cienia", w którym następuje usunięcie niektórych powierzchni zamkniętych. Czynnikiem decydującym o tym, które powierzchnie mogą zostać usunięte jest odległość pomiędzy kolejnymi punktami.

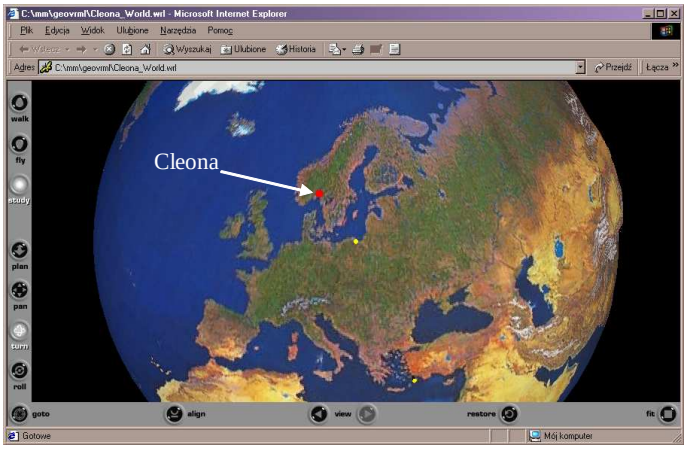


Rys. 6.13. Schemat blokowy tworzenia wirtualnej sceny

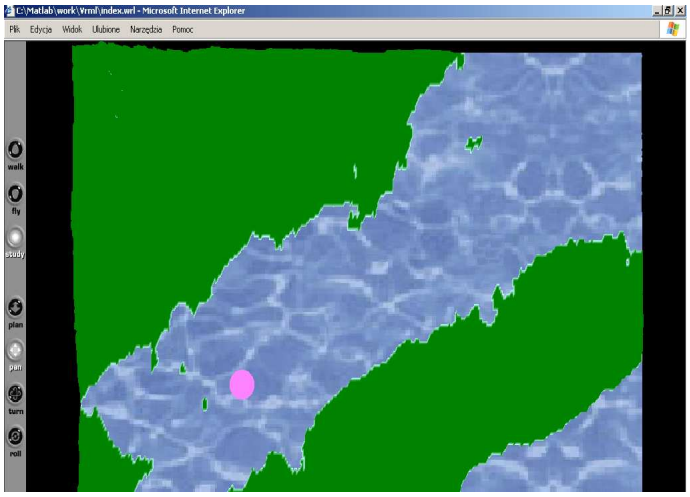
Tak przetworzone dane wraków mogą teraz zostać zanurzone w scenie VRML z wykorzystaniem współrzędnych geograficznych. Do tego zadania została wykorzystana technologia GeoVRML, która pozwala prezentować w sposób trójwymiarowy dane geograficzne. Rezultat uzyskany dzięki tej technice, dla trzech poziomów szczegółowości (węzeł `GEOLOD` [87]) prezentuje rysunek 6.14 [10]. Wybór punktu symbolizującego wrak pozwala na szczegółowe wyświetlenie obrazu wraku. Innym sposobem na szczegółowe wyświetlenie obrazu wraku jest zastosowanie węzła `LOD`

(ang. *Level of Detail*). Pozwala on na zdefiniowanie skali szczegółowości wyświetlanych elementów w scenie w funkcji ich odległości od obserwatora.

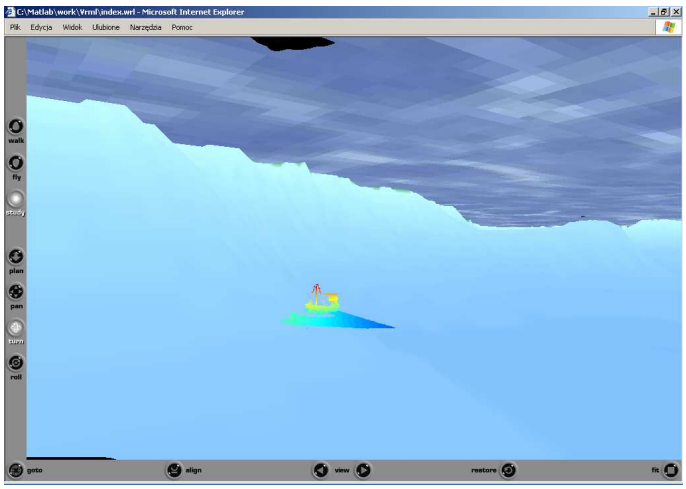
a)



b)



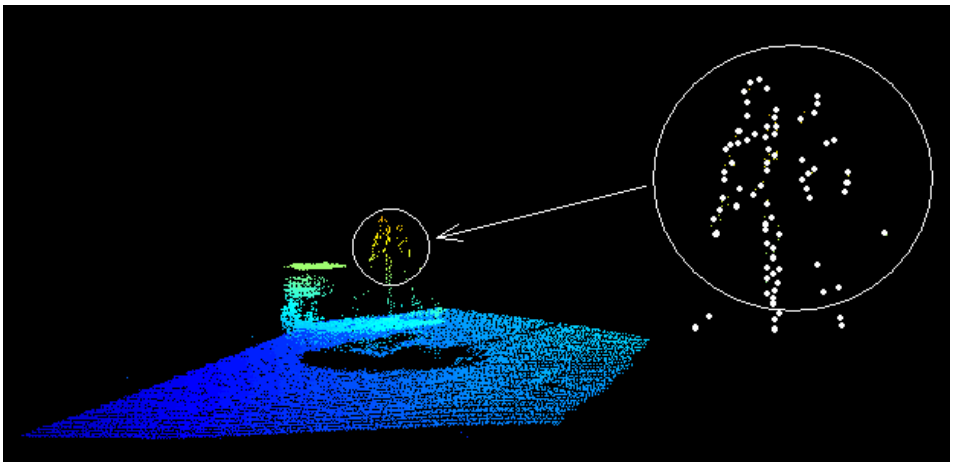
c)



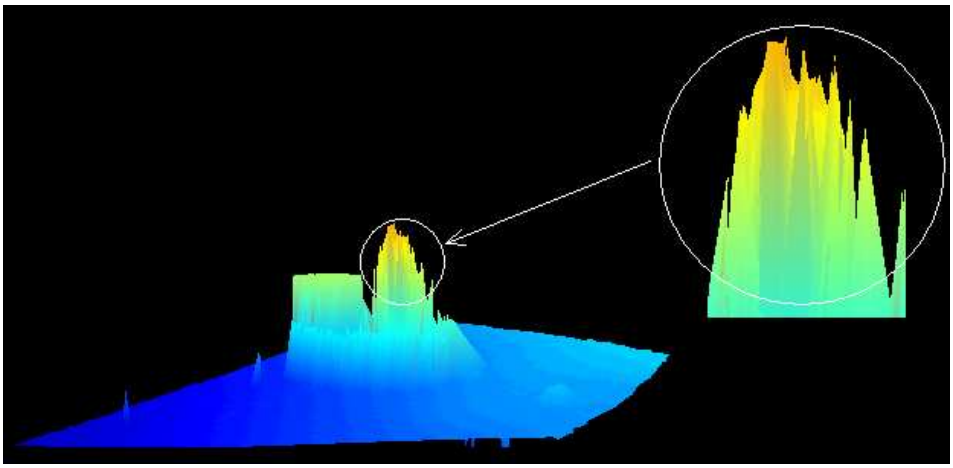
Rys. 6.14. Scena stworzona w języku GeoVRML przedstawiająca lokalizację wraku Cleony w Zatoce Oslo dla trzech poziomów szczegółowości

W celu weryfikacji zaproponowanego algorytmu wykorzystano przykładowe dane o wraku pochodzące z przeszukiwań akustycznych wykonanych w Zatoce Oslo przy pomocy sonaru wielowiązkowego SEABAT. Dane te otrzymano w ramach współpracy z duńską firmą Reson, która jest producentem tego typu sonarów. Przedstawiają one wrak statku Cleona, który został zwodowany w Borhaug w 1918 roku i służył do transportu drewna. Po wojnie funkcjonował jako jednostka transportowa w Zatoce Oslo. Zatonął w okolicach Leangbukta i spoczywa na dnie na głębokości piętnastu metrów w relatywnie dobrym stanie.

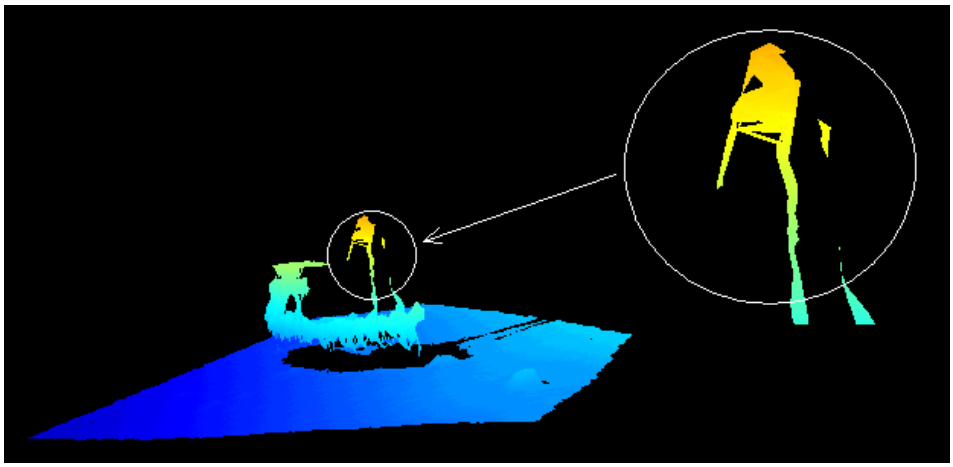
Na rysunkach od 6.15 do 6.17 przedstawiono zrzuty ekranu trójwymiarowych scen prezentujących wyniki uzyskane za pomocą proponowanych algorytmów.



Rys. 6.15. Kolorowa prezentacja Cleony za pomocą węzła `PointSet`



Rys. 6.16. Kolorowa prezentacja Cleony za pomocą węzła `IndexedFaceSet` po triangulacji



Rys. 6.17. Kolorowa prezentacja Cleony za pomocą węzła `IndexedFaceSet` po triangulacji oraz algorytmie detekcji cienia

Rysunek 6.15 prezentuje trójwymiarową scenę zawierającą wrak zobrazowany za pomocą punktów reprezentujących kolejne echa. Taka forma prezentacji może być wykorzystana, gdy obserwator znajduje się niezbyt blisko obiektu. Rysunek 6.16 pokazuje typowy obraz wraku po automatycznym połączeniu punktów w powierzchnie zamknięte za pomocą triangulacji. Rysunek 6.17 przedstawia rezultat uzyskany z zastosowaniem algorytmu detekcji cienia. Przedstawia on tylko te powierzchnie, które po detekcji cienia zostały zakwalifikowane, jako te reprezentujące rzeczywiste powierzchnie.

6.3.3. Wizualizacja danych w Morskim Systemie Informacji Przestrzennej SIS

6.3.3.1. System SIS, jako przykład Morskiego Systemu Informacji Przestrzennej

Systemy Informacji Przestrzennej odgrywają coraz większą rolę we współczesnym świecie. Ich rola ogranicza się nie tylko do składowania pewnych informacji o charakterze geoprzestrzennym, ale także ich wizualizacji. Systemy GIS coraz częściej stają się nie tylko pomocą dla różnego rodzaju instytucji, firm i przedsiębiorstw, ale są użyteczne przy monitorowaniu zagrożeń i badaniu miejsc, których zbadanie gołym okiem jest niemożliwe [33, 34, 70, 71]. Coraz dynamiczniej rozwijającą się gałęzią Systemów Informacji Przestrzennej są tzw. Morskie Systemy Informacji Przestrzennej (ang. *Seafloor Information Systems – SIS*), czyli systemy do przechowywania i prezentacji danych o obszarach morskich.

Podczas tworzenia systemu SIS często jednym z podstawowych wymogów jest akwizycja i prezentacja danych w czasie rzeczywistym. Tworząc oprogramowanie, mające spełnić powyższe wymagania, należy mieć na uwadze dwa podstawowe ograniczenia, które będą decydowały o jakości stworzonego systemu, a mianowicie:

- złożoność pamięciowa, czyli ilość pamięci potrzebnej do tego, aby system mógł zgromadzić informacje potrzebną do wizualizacji danych przestrzennych,
- złożoność obliczeniowa, czyli ilość operacji, jakie procesor musi wykonać, aby dokonać wizualizacji danych zawartych w pamięci programu.

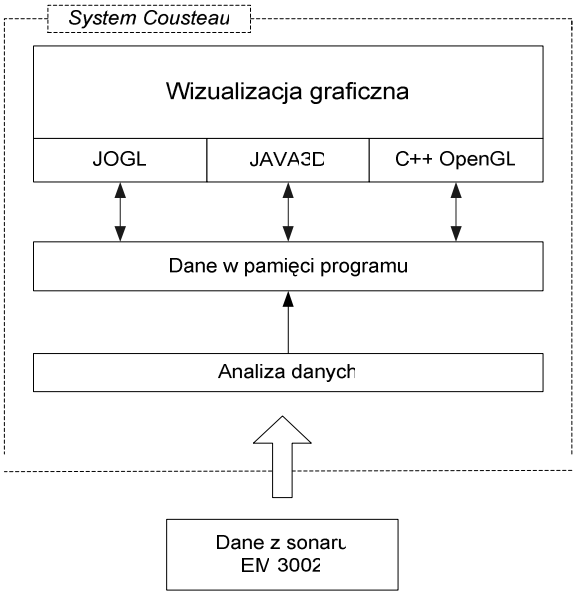
Warto w tym miejscu wspomnieć, że dane przestrzenne system musi najczęściej przechowywać w pamięci operacyjnej komputera lub w pamięci karty graficznej. Szybkość dostępu do tych informacji decyduje bowiem o szybkości działania całego oprogramowania i wpływa na płynność wykonywania operacji graficznych.

Mając na uwadze powyższe wymogi koniecznym wydaje się być stosowanie technologii, usprawniających wykonywanie operacji graficznych i zarządzanie pamięcią, w której są przechowywane dane. Aby to osiągnąć można się posłużyć koncepcją akceleracji graficznej, której schemat blokowy zaprezentowano na rysunku 6.18.

Alternatywą dla klasycznych Morskich Systemów Informacji Przestrzennej [8, 9, 91] jest wykorzystanie technologii służących do tworzenia gier i programów komputerowych działających w trybie 3D. W celu weryfikacji możliwości zastosowań tych technologii w systemach typu SIS, zaprojektowano system o roboczej nazwie „Cousteau”, który został wykonany w trzech różnych językach programowania. Zadaniem Cousteau jest wizualizacja danych pochodzących z sonaru wielowiązkowego EM3002, produkowanego przez norweską firmę Kongsberg, będącego w posiadaniu Katedry Systemów Geoinformatycznych [37]. Echosonda wielowiązkowa, wchodząca w skład systemu EM3002, to zaawansowane technologicznie urządzenie, które dzięki wielokierunkowej obserwacji szerokokątnej dna, przy jednoczesnym utrzymaniu wysokiej rozdzielczości kątowej, pozwala na doskonałą batymetrię i obrazowanie dna morskiego z odbieranych sygnałów echa.

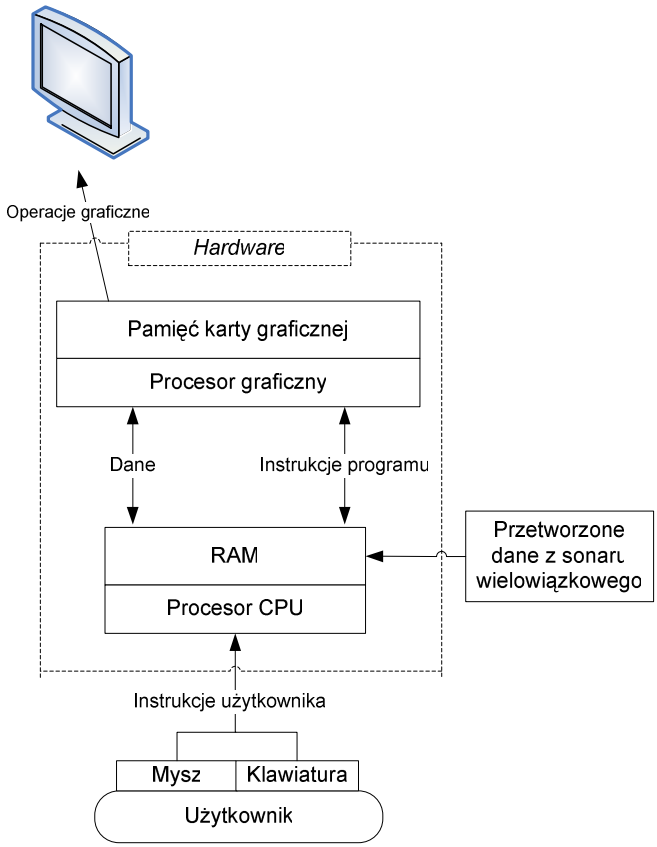
6.3.3.2. Technologie obrazowania 3^D zaimplementowane w Morskim Systemie Informacji Przestrzennej

System „Cousteau", opracowany przez autora pracy i mgr inż. Andrzeja Chybickiego, wykorzystuje trzy różne technologie programistyczne, a mianowicie: OpenGL [49], Java 3D [3], JOGL [29]. Rozwiązanie to pozwala porównać wydajność użytych języków programowania i określić ich przydatność w tworzeniu systemów typu SIS. Technologie te wspomagają i przyśpieszają wykonywanie operacji graficznych mających na celu trójwymiarową wizualizację danych pomiarowych, a tym samym pozwalają na efektywne przyśpieszenie działania całego systemu. Schemat wykorzystania technologii obrazowania 3^D zaimplementowanych w systemie „Cousteau" na rysunku 6.18 [24].



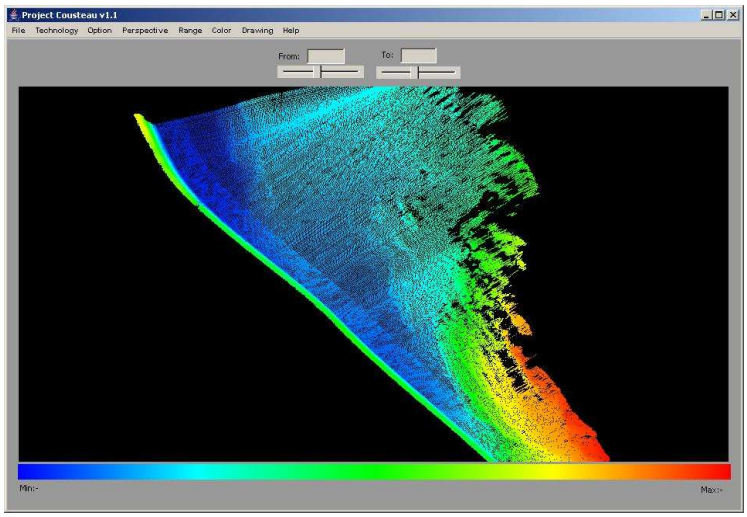
Rys. 6.18. Schemat wykorzystania technologii obrazowania 3^D zaimplementowanych w systemie „Cousteau"

Ideą wykorzystywania technologii 3^D jest przeniesienie części obliczeń związanych z wykonywaniem operacji graficznych z głównego procesora komputera do dedykowanego procesora graficznego umieszczonego najczęściej w karcie graficznej (rysunek 6.19) [6]. Rozwiązanie to odciąża procesor główny z obliczeń i wysyłania ich wyników do karty graficznej, co powoduje znaczne przyśpieszenie wykonywania operacji graficznych.

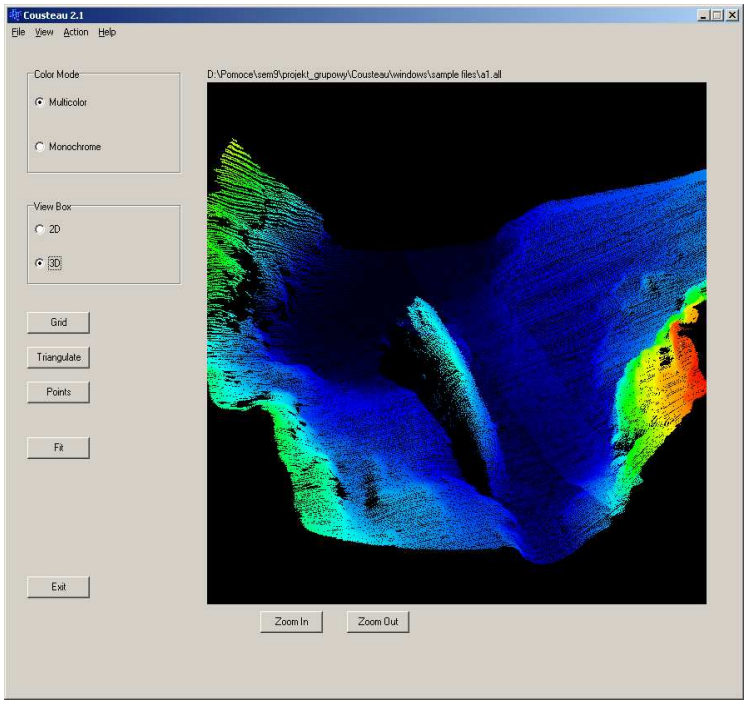


Rys. 6.19. Sposób wykorzystania karty graficznej w systemie „Cousteau”

W toku prac nad prezentowanym systemem stworzono dwa odrębne moduły programistyczne. Analizują one dane pochodzące z echosondy wielowiązkowej oraz dokonują ich trójwymiarowej wizualizacji, wzbogacając jednocześnie funkcjonalność systemu o proste operacje graficzne, takie jak: obrót, przesuwanie i skalowanie. Oprogramowanie to jest alternatywą dla klasycznego systemu SIS stworzonego przez firmę Kongsberg, wchodzącego w skład systemu wielowiązkowego EM3002. „Cousteau” analizuje surowe dane gromadzone w czasie pomiarów echosondą (pliki w formacie firmowym z rozszerzeniem *.all) oraz dane po wstępnej obróbce (pliki w formacie tekstowym z rozszerzeniem *.xyz). Na rysunkach od 6.20 do 6.23 zaprezentowano zrzuty ekranów wykonane w trakcie działania systemu. Rysunek 6.20 przedstawia trójwymiarową wizualizację dna morskiego wykonaną w technologii Java OpenGL. Rysunek 6.21 przedstawia te same dane zobrazowane z wykorzystaniem technologii OpenGL. Na dnie wyraźnie widać wrak okrętu Bluecher. Algorytmy analizy plików i wizualizacji zostały opracowane dla wszystkich technologii wspólnie. Wyniki wykorzystania różnych technologii są podobne, choć występują różnice w szybkości działania systemu.

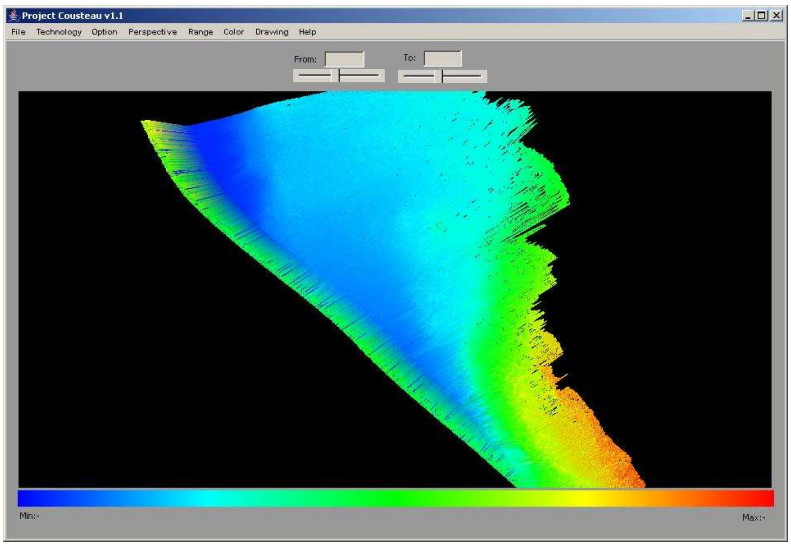


Rys. 6.20. Trójwymiarowa wizualizacja dna morskiego wykonana w technologii JOGL

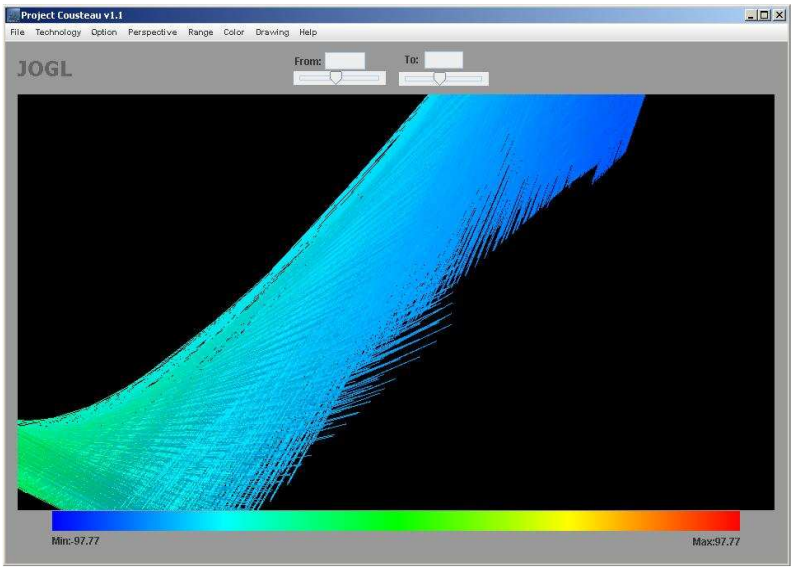


Rys. 6.21. Trójwymiarowa wizualizacja dna morskiego wykonana w technologii OpenGL

System wizualizacji wzbogacono także o algorytmy rysowania siatki i triangulacji na podstawie punktów pomiarowych. Na rysunkach 6.22 i 6.23 przedstawiono wynik działania algorytmu rysowania danych pomiarowych w postaci siatki w technologii Java3D (rysunek 6.22) oraz JOGL (rysunek 6.23). Dane pomiarowe pochodzą z przeszukiwań akustycznych wykonanych w Zatoce Oslo i zawierają wrak okrętu Blucher. Pliki z danymi, za pomocą których system został przetestowany, miały rozmiar od kilku do kilkuset megabajtów.



Rys. 6.22. Wizualizacja danych w postaci siatki TIN



Rys. 6.23. Wizualizacja danych w postaci siatki (powiększony fragment z rysunku 6.22)

Zastosowane w systemie technologie do wytwarzania grafiki 3^D umożliwiają „poruszanie się” po wirtualnym trójwymiarowym świecie w sposób płynny i szybki. Widoczne są jednak, dla plików z danymi o rozmiarze kilkuset megabajtów, różnice w płynności i szybkości działania systemu. Wynikają one z cech charakterystycznych zastosowanych w systemie języków programowania (C++, Java).

Systemy SIS to dynamicznie rozwijająca się gałąź Systemów Informacji Przestrzennej dedykowanych do zastosowań morskich. Wobec rosnących możliwości technologicznych w zakresie współpracy nowoczesnych urządzeń hydroakustycznych z systemami komputerowymi oraz zwiększania mocy obliczeniowej samego sprzętu

komputerowego, oczekiwania w stosunku do oprogramowania rosną. Systemy, które w prosty sposób dokonują wizualizacji informacji dostarczanej przez sprzęt pomiarowy, często nie spełniają specyficznych wymagań użytkowników. Od twórców oprogramowania oczekuje się tworzenia systemów, które szybko i płynnie dokonują trójwymiarowej wizualizacji danych batymetrycznych pochodzących z sonaru oraz w pełni wykorzystają możliwości sprzętowe maszyn, na których pracują.

Stosowanie grafiki 3^D w systemach SIS, gdzie wymóg pracy w czasie rzeczywistym jest podstawą projektowania, wydaje się być uzasadnione i perspektywiczne. Technologie 3D są w stałym rozwoju a ich implementacja jest zadaniem stosunkowo łatwym. Systemy SIS oparte na grafice 3^D dają znacznie więcej możliwości pod względem funkcjonalnym przy stosunkowo niewielkim nakładzie programistycznym i finansowym.

7. Wnioski

Głównym celem pracy doktorskiej było opracowanie algorytmów mających na celu odtwarzanie kształtu dna morskiego oraz obiektów na dnie z danych akustycznych. Kolejnym celem było stworzenie systemu interaktywnych trójwymiarowych scen wirtualnych obejmujących wybrane rozległe i rozproszone obiekty podwodne z zapewnieniem możliwości udostępniania ich w sieci Internet.

Pierwszy cel został osiągnięty poprzez zaadaptowanie technik odtwarzania kształtu obiektów wywodzących się z grafiki komputerowej i ich implementację w systemie przetwarzania danych hydroakustycznych. Techniki te zostały wybrane ze względu na podobieństwa zagadnień rozchodzenia się fali akustycznej w środowisku wodnym oraz zjawisk zachodzących w optyce. W szczególności przydatna do tego celu okazała się technika *Shape from Shading* (SFS). Technika SFS, jako źródło informacji o trzecim wymiarze obiektów wykorzystuje informacje zawarte w jego dwuwymiarowym obrazie (zdjęcie). Informacje te uzupełniane są o wiedzę na temat położenia źródła światła oraz model jego odbicia na nierównościach obiektu. Technika SFS została zastosowana nie przypadkowo, gdyż nowsze sonary boczne potrafią obrazować dno z dużą rozdzielczością, która pozwala na uzyskiwanie jakości obrazów zbliżonych do fotografii. Takie zobrazowania dna morskiego uzupełnione o informację na temat położenia przetwornika w toni wodnej (analogia do położenia źródła światła) oraz model rozpraszania dźwięku na nierównościach dna (analogia do modelu odbicia światła) pozwalają na odtwarzanie jego kształtu. Opracowane w tym celu algorytmy bazują na technice SFS i są jej modyfikacjami. Wyniki modelowe uzyskiwane są poprzez zastosowanie teorii Lamberta i Gaussa opisujących problem rozpraszania fal

akustycznych na nierównościach dna morskiego. Zaletą opracowanych metod jest ich prostota i zdolność sekwencyjnego „jednoprzebiegowego" przetwarzania obrazu otrzymywanego z danych z sonaru bocznego. Zaprezentowane rezultaty są obiecujące zarówno dla rekonstrukcji rzeźby dna morskiego, jak i dla odtwarzania kształtu obiektów na dnie (wraki). Na zakończenie dokonano weryfikacji opracowanych algorytmów przy wykorzystaniu danych rzeczywistych uzyskanych z przeszukiwań akustycznych sonarami bocznymi.

Współczesne systemy hydroakustyczne potrafią gromadzić ogromne ilości danych. Dotyczy to głównie systemów wyposażonych w sonary boczne, lub echosondy wielowiązkowe, ze względu na wysoką rozdzielczość gromadzonych danych oraz duży rozmiar przeszukiwanego obszaru dna w czasie jednej transmisji sygnału sondującego. Pomimo szybkiego rozwoju technologii informacyjnych, przetwarzanie takich ilości danych, a następnie ich wizualizacja w czasie rzeczywistym jest ograniczona przede wszystkim ze względu na zdolności obliczeniowe współczesnych komputerów.

Drugi cel został osiągnięty poprzez wykorzystanie języków modelowania wirtualnej rzeczywistości. Dzięki zaletom języka VRML udało się stworzyć system interaktywnych trójwymiarowych scen wirtualnych, obejmujących wybrane rozległe i rozproszone obiekty, na podstawie danych pochodzących z systemów hydroakustycznych z zapewnieniem możliwości udostępniania tych scen w sieci Internet. Opracowane w tym celu algorytmy pozwalają na trójwymiarową wizualizację przemieszczania się ryb pelagicznych w wiązce echosondy, trójwymiarową wizualizację dna morskiego oraz obiektów na dnie. Język VRML, w porównaniu z innymi technikami programowania wykorzystującymi biblioteki graficzne, charakteryzuje się niskim nakładem pracy, porównywalnie szybki, dzięki wewnętrznemu użyciu OpenGL, ograniczenia pamięciowe.

Wszystkie opracowane algorytmy odtwarzania kształtu dna morskiego i obiektów na dnie z danych pochodzących z sonaru bocznego oraz algorytmy optymalizacji zostały zaimplementowane w środowisku Matlab. W procesie optymalizacji rekonstrukcji dna morskiego zostały dodatkowo wykorzystane algorytmy wchodzące w skład pakietu *Optimization toolbox*, będącego częścią składową środowiska Matlab. Jego zastosowanie pozwoliło jednocześnie kontrolować poprawność danych i ich transformacji. W ten sposób przygotowane dane zostały wykorzystane w procesie tworzenia trójwymiarowych wirtualnych scen za pomocą języka VRML.

Zdaniem autora na uwagę zasługują następujące oryginalne, lub częściowo oryginalne elementy niniejszej pracy:

- opracowano i zaimplementowano wspomniane wyżej algorytmy do odtwarzania kształtu dna morskiego oraz obiektów na dnie na podstawie danych z sonaru bocznego,
- opracowano i zaimplementowano algorytmy do trójwymiarowej wizualizacji przemieszczania się ryb pelagicznych w wiązce echosondy,
- opracowano i zaimplementowano algorytmy do trójwymiarowej wizualizacji dna morskiego oraz obiektów na dnie na podstawie danych z echosondy wielowiązkowej,
- zastosowano języki opisu wirtualnej rzeczywistości do trójwymiarowej wizualizacji danych pochodzących z systemów hydroakustycznych.

Przedstawione wyniki badań stanowią kolejny krok w rozwiązywaniu problemów związanych z odtwarzaniem kształtu dna morskiego na podstawie danych z sonaru bocznego i echosond wielowiązkowych. Zaproponowane metody rozwiązywania tego problemu mogą być dobrym punktem wyjściowym do prowadzenia dalszych badań. Kolejne prace nad tym zagadnieniem, zdaniem autora, powinny skupić się na zastosowaniu bardziej zaawansowanych algorytmów SFS. W szczególności autor przewiduje, iż w prezentowanych algorytmach rekonstrukcji dna morskiego, podczas przetwarzania obrazów sonarowych, może zostać poprawiona skuteczność poprzez uwzględnienie informacji uzyskanych nie tylko z bieżącego pingu i jednego poprzedzającego, ale również z wielu poprzednio przetworzonych pingów, wraz z zastosowaniem np. techniki średniej ważonej.

Autor twierdzi, iż szybki rozwój języków opisu wirtualnej rzeczywistości, jak również technologii informacyjnych pozwoli na tworzenie coraz bardziej efektywnych wirtualnych scen obejmujących nie tylko fragmenty, ale całe ekosystemy morskie.

Literatura

[1] J. Aloimonos, Shape from texture, Biological Cybernetics, Vol. 58, s. 345-360, 1988

[2] R. Bajscy, L. Lieberman, Texture gradient as a depth cue, Computer Graphics and Image Processing, Vol. 5, s. 52-67, 1976

[3] J. Barrilleaux, 3^D User Interfaces with Java 3D, Manning Publications Co., USA, 2000

[4] G. Bell, A. Parisi, M. Pesce, The Virtual Reality Modeling Language version 1.0 specification, 1995

[5] **K. Bikonis**, Z. Lubniewski, 3^D Seafloor and Submerged Objects Reconstruction Using Data from Side Scan Sonar, w trakcie recenzji w czasopiśmie Acta Acustica united with Acustica

[6] **K. Bikonis**, M. Moszynski, A. Chybicki, P. Kocinski, 3^D Imaging Software Tools for Multibeam Sonar Data, Hydroacoustics vol. 9, pp. 17-22, 2006

[7] **K. Bikonis**, M. Moszynski: 3^D Reconstruction of Seafloor From Side-Scan Records, Hydroacoustics vol. 8, pp. 9-14, 5^{th} EAA International Symposium on Hydroacoustic, Puck, Poland, 16-19 May 2005

[8] **K. Bikonis**, J. Demkowicz, M. Moszynski, A. Stepnowski: Integrated Multiscale 3^D Imaging Geographic Information System Using Acoustic Data, Proceedings of the 8th European Conference on Underwater Acoustics, pp.585-590, Carvoeiro, Portugal, 12-15 June, 2006

[9] **K. Bikonis**, A. Partyka, Z. Lubniewski, M. Moszynski, A. Stepnowski: GIS for Shallow Water Pollution Awareness and Emergency Management Supporting, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security and Safety, pp. 45-50, Gdansk, Poland, 28-30 Sept, 2005

[10] **K. Bikonis**, M. Moszynski, A. Stepnowski, Application of Virtual Reality Modeling Language for 3^D Seafloor Imaging, Proceedings of the 7th European Conference on Underwater Acoustics, pp.807-812, Delft, Holand, 5-8 July, 2004

[11] **K. Bikonis**, M. Moszyński, A. Stepnowski, Trójwymiarowa wizualizacja obiektów na dnie morskim z zastosowaniem technik wirtualnej rzeczywistości, Zeszyty Naukowe ETI Politechniki Gdańskiej, Seria: Technologie Informacyjne, 2004, pp. 883-890, II

Krajowa Konferencja Technologie Informacyjne (in Polish), 16-18 May, 2004, Gdansk, Poland

[12] **K. Bikonis**, M. Moszyński, Wizualizacja w języku VRML przemieszczania się ryb pelagicznych w wiązce echosondy, Zeszyty Naukowe ETI Politechniki Gdańskiej, Seria: Technologie Informacyjne, 2003, str. 1-7, I Krajowa Konferencja Technologie Informacyjne (in Polish), Gdansk, Poland, 18-21 May, 2003

[13] **K. Bikonis**, M. Moszynski, A. Stepnowski, Submerged object imaging using virtual reality modeling language, Proceedings of International Congress on the Application of Recent Advances in Underwater Detection and Survey Techniques to Underwater Archeology, pp. 215-220, Bodrum, Turkey, 2004

[14] **K. Bikonis**, M. Moszynski, Z. Lubniewski, A. Stepnowski, Three-dimensional Imaging of Submerged Objects by Side-Scan Sonar Data Processing, 1st International Conference on Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results, Heraklion, Greece, 2005

[15] F. Binachetti, The ECDIS paradox, a controversial view on navigation, freedom and safety at sea, The Journal of Navigation, Vol. 47(1), 1994

[16] P. Blondel, B. J. Murton, Handbook of seafloor sonar imagery, J. Wiley & Sons, Wiley-Praxis Series in Remote Sensoring, Chichester, Wlk. Brytania, 1997

[17] D. Blostein and N. Ahuja, Shape from texture: integrating texture-element extraction and surface estimation, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 11(12), s. 1233-1251, 1989

[18] L. M. Brekhovskikh, Yu. Lysanov, Fundamentals of ocean acoustics, Springer-Verlag, Berlin, 1982

[19] W. S. Burdic, Underwater acoustic system analysis, Prentice Hall, Signal Processing Series, 1984

[20] D. W. Caress, D. N. Chayes, materiały dostępne w wersji Internetowej pod adresem http://www.ldeo.columbia.edu/res/pi/MB-System/html/mbsystem_home.html

[21] R. Carey, G. Bell, Ch. Marrin, VRML97 – The Virtual Reality Modeling Language specification, 1997

[22] J. Chatilon, M. J. Bouhier, M. Zakharia, Synthetic aperture sonar for seabed imaging: relative merits of narrow-band and wideband approaches, IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 17, number 1, s. 95-105, January 1992

[23] R. Chivers, N. Emerson, D. R. Burns, New acoustic processing for underway surveying, The Hydrographic Journal 56, s. 8-17, 1990

[24] A. Chybicki, P. Kociński, E. Rogala, **K. Bikonis**, M. Moszyński, Zastosowanie grafiki 3^D do wizualizacji dna morskiego, Zeszyty Naukowe ETI Politechniki

Gdańskiej, Seria: Technologie Informacyjne, 2006, pp. 301-308, IV Krajowa Konferencja Technologie Informacyjne (in Polish), 21-24 May, 2006, Gdansk, Poland

[25] E. Coiras, Y. Petillot, D. Lane, Automatic rectification of side-scan sonar images, Proceedings of the International Conference Underwater Acoustic Measurements: Technologies & Results, Heraklion, Crete, Greece, 2005

[26] J. M. Cushieri, M. Hebert, Three-dimensional map generation from side-scan sonar images, Journal of Energy Resources Technology, Vol. 112, pp. 96-102, 1990

[27] R. M. Crutcher, R. L. Plante, P. Rajlich, VRML and Collaborative Environments: New Tools for Networked Visualization, Astronomical Data Analysis Software and Systems VII, ASP Conference Series, Vol. 145, s. 3-6, 1998

[28] R. A. Davies, N. W. John, J. N. MacDonald , K. H. Hughes, Visualization of molecular quantum dynamics: a molecular visualization tool with integrated Web3D and haptics, Proceedings of the tenth international conference on 3D Web technology, s. 143-150, Bangor, United Kingdom, 2005

[29] G. Davis, Learning Java Bindings for OpenGL, Paperback, USA, 2004

[30] K. Dąbkowski, VRML97 trzeci wymiar sieci, Wydawnictwo ZNI Mikom, Warszawa, 1997

[31] D. R. Del Balzo, J. H. Leclere, M. J. Collins, Critical angle and seabed scattering issues for active-sonar performance predictions in shallow water, High frequency acoustics in shallow water, SACLANTCEN Conf. Proc. Ser. CP-45, La Spezia, s. 148-156, 1997

[32] J. Demkowicz, **K. Bikonis**, Combined Spline Wavelet Decomposition for 3^D Seafloor Imaging from Multibeam Sonar Echoes, Acta Acustica united with Acustica, 2006, vol. 92, No. 1, pp. 168-170

[33] J. Demkowicz, **K. Bikonis**, A. Chybicki, A. Stepnowski, Coastal Zone Critical Infrastructure Protection Using Dedicated Geographical Information System, Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security and Safety, pp. 129-136, Istanbul, Turkey, 9-13 October, 2006

[34] J. Demkowicz, **K. Bikonis**, A. Partyka, Safety Enhancement Uding 3^D Multibeam Sonar Imaging in Shaloow Water Areas, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security and Safety, pp. 51-56, Gdansk, Poland, 28-30 Sept, 2005

[35] J. Demkowicz, Z. Lubniewski, A. Stepnowski, **K. Bikonis**: Geocorrection of 3^D Bottom Images from Multibeam Sonar Records, [CD-ROM] Proceedings of the Congress on Ultrasonics 2003, pp. 233-236, Paris, France, 7-10 Sept, 2003

[36] J. Demkowicz, Trójwymiarowe obrazowanie dna morskiego ze szczególnym uwzględnieniem wód płytkich, Rozprawa doktorska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Politechnika Gdańska, 2005

[37] J. Demkowicz, **K. Bikonis**, Instalacja i wstępna analiza danych batymetrycznych pochodzących z echosondy wielowiązkowej, Zeszyty Naukowe ETI Politechniki Gdańskiej, Seria: Technologie Informacyjne, 2005

[38] E. Dura, J. Bell, D. Lane, Reconstruction of textured seafloor from side-scan sonar images, IEEE Proc.-Radar Sonar Navig., Vol. 151(2), s. 114-126, 2004

[39] E. Dura, D. Lane, J. Bell, Automatic 3D reconstruction of mine geometric using multiple side scan sonar images, In GOATS 2000, La Spezia, Italy, E. Bovio, A. Schmidt, SACLANTCEN CP-46, 2001

[40] J. D. M. Edwards, Ch. Hand, MaPS: Movement And Planning Support For Navigation In An Immersive VRML Browser, Proceedings of the second symposium on Virtual reality modeling language, s. 65-73, Monterey, California, United States, 1997

[41] G. R. Elston, J. M. Bell, Pseudospectral time-domain modeling of non-rayleigh reverberation: synthesis and statistical analysis of a sidescan sonar image of sand ripples, IEEE J. Ocean. Eng., Vol. 29(2), s. 317-329, 2004

[42] P. Favaro, Shape form Focus / Defocus, Washington University, Department of Electrical Engineering, Electronic Signals and Systems Research Lab, USA

[43] W. Findeisen, J. Szymanowski, A. Wierzbicki, Teoria i metody obliczeniowe optymalizacji, PWN Warszawa, 1980

[44] K. G. Forte, Target strength of fish, Encyklopedia of acoustics, Edited by Malcolm J. Crocker, John Wley & Sons Inc., 1997

[45] T. Garlan, X. Demoulin, Sedimentlogical acoustics: an attempt to reduce the gap between acoustical modeling and sedimentlogical survey, High frequency acoustics in shallow water, SACLANTCEN Conf. Proc. Ser. CP-45, La Spezia, 1997

[46] L. Gee, M. Paton, L. A. Mayer, C. Ware, B. Reed, J. Depner, Interactive 3^D visualization and analisys of multi-sensor, multi-resolution data sets, Proceedings of the 3rd International Conference on High Resolution Surveys in Shallow Water, Sydney, Australia, November 17-20, 2003

[47] J. J. Gibson, The perception of the visual world, Houghton Miffin, Boston, 1950

[48] J. Hartman, J. Wernecke, VRML 2.0 Handbook, Addison Wesley Professional, 1996

[49] D. Hearn, M. P. Baker, Computer Graphics with OpenGL, Prentice Hall, USA, 2004

[50] I. Hilal, V. Burdin, E. Stindel, Ch. Roux, Ch. Lefevre, Human gait simulation using virtual reality, Proceedings of the 20th Annual International Conference of the ZEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Vol. 20(3), 1998

[51] J. H. Holland, Adaptation in natural and artificial systems, MIT Press, 1975

[52] B. K. P. Horn, M. J. Brooks, Shape from shading, Mit Press Series Of Artificial Intelligence Series, 1989

[53] B. K. P. Horn, Robot vision, MIT Press,1986

[54] http://www.web3d.org/x3d/specifications/, strona internetowa konsorcjum Web3D

[55] http://ec.europa.eu/research/fp7/index_en.cfm, strona internetowa Komisji Europejskiej do spraw 7. Programu Ramowego

[56] http://www.benthos.com/seafloor-bottom-mapping-survey-sonar-c3d.asp, strona internetowa firmy Teledyne Benthos

[57] http://www-med.eti.pg.gda.pl/~renatak, strona internetowa dr hab. inż. Renaty Kalickiej, pracownika PG

[58] http://www.marinesonic.com, strona internetowa firmy Marine Sonic Technology, Ltd.

[59] http://terraweb.wr.usgs.gov/TRS/projects/Farallones/index.html#2, strona internetowa Terrestrial Remote Sensing Flagstaff Field Center

[60] http://www.kmg.ps..pl, strona internetowa dr hab. inż. Konstantego M. Gawrylczyka, prof. nadzw. Politechniki Szczecińskiej

[61] M. Huet, ECDIS, TSMAD and the digital sailing directions, Symposium of Digital Sailing Directions, St. John's, Canada, 1998

[62] R.B. Husbey, O. Milvang, A. S. Solberg, K. W. Bjerde, Seabed classification from multibeam echosounder data using statistical method, Proceedings of the IEEE Conf. OCEANS'93, s. 229-233, 1993

[63] A. N. Ivakin, Y. P. Lysanov, Underwater sound scattering by volume inhomogeneities of bottom medium bounded by a rough surface, Sov. Phys. Acoust., Vol. 27(3), s. 212-215, 1981

[64] D. R. Jackson, D. P. Winebrenner, A. Ishimaru, Application of the composite roughness model to high-frequency bottom backscattering, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 79(5), s. 1410-1422, 1986

[65] D. St. Jacques, P. Travaglini, S. Blasco, Multibeam surveys for resource mapping in the Canadian great lakes, A Spatial Odyssey: 42nd Australian Surveyors Congress, 2001

[66] C. M. Kinney, C. D. Anderson, Measurement of backscattering of sound from the ocean bottom, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 36(1), s. 158-163, 1964

[67] W. C. Knight, et al, Digital signal processing for sonar, Proc. IEEE, vol. 69, Nr 11, s. 1451-1506, 1981

[68] V. Levesque, Shape form texture: Literature review, Center for Intelligent Machines and McGill University

[69] X. Lurton, An introduction to uderwater acoustics, Principles and applications, Springer-Verlag, Praxis Publishing Ltd., 2002

[70] Łubniewski Z., A. Partyka, A. Stepnowski, **K. Bikonis**, A. Ruciński., P. Czarnul, Krawczyk H.: System informacji przestrzennej do analizy, wizualizacji i zdalnego udostępniania danych o infrastrukturach krytycznych, Zeszyty Naukowe ETI Politechniki Gdańskiej, Seria: Technologie Informacyjne, 2006, pp. 607-612, IV Krajowa Konferencja Technologie Informacyjne (in Polish), 21-24 May, 2006, Gdansk, Poland

[71] Z. Łubniewski, A. Partyka, **K. Bikonis**, M. Moszyński, System GIS czasu rzeczywistego do zdalnego monitorowania zanieczyszczeń w środowisku morskim, Zeszyty Naukowe ETI Politechniki Gdańskiej, Seria: Technologie Informacyjne, 2005, pp. 483-502, III Krajowa Konferencja Technologie Informacyjne (in Polish), Gdansk, Poland, 22-25 May, 2005

[72] Z. Łubniewski, Zastosowanie analizy fraktalnej i filtracji odwrotnej do zdalnej klasyfikacji i monitoringu dna morskiego, Rozprawa doktorska Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej, 2001

[73] Z. Łubniewski, **K. Bikonis**, Seafloor relief reconstruction from side scan sonar data, Hydroacoustics vol. 10, pp. 101-106, 24th Symposium on Hydroacoustic, Leba, Poland, 15-18 May, 2007

[74] K. V. Mackenzie, Bottom reverberation for 530 and 1030 cps sound in deep water, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 33(11), s. 1498-1506, 1961

[75] W.Malina, M. Smiatacz, Metody cyfrowego przetwarzania obrazów, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 2005

[76] Matlab Optimization Toolbox – User's Guide

[77] H. Medwin, C. S. Clay, Fundamentals of acoustical oceanography, Academic Press, 1998

[78] M. Moszynski, **K. Bikonis**, J. Demkowicz, VRML Visualization of Pelagic Fish Movement in the Echosounder Beam, Hydroacoustics, vol. 6, 2003, pp. 53-58, 20th Symposium on Hydroacoustic (SHA'20), Jurata, Poland, 27-30 May, 2003

[79] M. Moszynski, **K. Bikonis**, A. Stepnowski, Dynamic 3^{D} Visualization of Fish Movement from Split-Beam Data, [CD-ROM] Proceedings of the Congress on Ultrasonics 2003, pp. 221-224, Paris, France, 7-10 Sept, 2003

[80] M. Moszynski, A. Stepnowski, **K. Bikonis**, Modeling of Fish Target Strength Angular Dependence for Indirect Target Strength Estimation Methods, [CD-ROM] Fortschritte der Akustik DAGA'03, pp. 324-325, Deutsche Jahrenstagung fur Akustik, Aachen, Germany, March 18-20, 2003

[81] M. Moszyński, Metody rozwiązywania zagadnienia odwrotnego w estymacji siły celu ryb, Rozprawa doktorska Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej, 1997

[82] A. Nowicki, Diagnostyka ultradźwiękowa, Wydawnictowo medyczne MAKmed, Gdańsk, 2000

[83] J. C. Novarini, J. W. Caruthers, A simplified approach to backscattering from a rough sea floor with sediment inhomogeneities, IEEE J. Ocean. Eng., Vol. 23(3), s. 157-166, 1998

[84] E. Pouliquen, O. Bergen, N. G. Pace, Time-evolution modeling of seafloor scatter, I. Concept, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 105(6), s. 3136-3141, 1999

[85] J. M. Preston, W. A. Kinney, S. Jespers, Estimates of monostatic and bistatic reverberation using low-frequencylinear fm pulses, SACLANTCEN Tech. Rep, SR-182, 1991

[86] M. Reddy, Y. G. Leclerca, L. Iversona, N. Blettera, K. Vidimce, Modeling the Digital Earth in VRML, Proc. SPIE Vol. 3905, s. 113-121, 2000

[87] M. Reddy, L. Iverson, GeoVRML 1.1 Specification, 2002

[88] R. Salamon, Systemy hydrolokacyjne, Gdańskie Towarzystwo Naukowe, Gdańsk, 2006

[89] J. Seidler, A. Badach, Molisz, Metody rozwiązywania zadań optymalizacji, WNT Warszawa, 1980

[90] S. M. Seitz, An overview of passive vision techniques, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University

[91] SIS – Seafloor Information System – Operator manual

[92] A. Stepnowski, Z. Lubniewski, Partyka A., **K. Bikonis**, M. Moszyński, J. Demkowicz, Nearly Real-time, Safety-related, Remotely Accessible Marine GIS, [CD-ROM] Ocean 2005 Europe IEEE Conference, Brest, France, 20-23 June, 2005

[93] A. Stepnowski, Systemy akustycznego monitoringu środowiska morskiego, Gdańskie Towarzystwo Naukowe, Gdańsk, 2001

[94] A. Stepnowski, Zarys teorii i technika hydroakustycznych metod oceny siły celu i populacji ryb, rozprawa habilitacyjna, Zeszyty Naukowe, Akademia Marynarki Wojennej, 111C, Gdynia, 1991

[95] D. D. Sternlicht, C. P. de Moustier, Time-dependent seafloor acoustic backscatter (10-100kHz), J. Acoust. Soc. Am., Vol. 114(5), s. 2709-2725, 2003

[96] J. H. Stockhausen, Scattering from the volume of an inhomogeneous halfspace, Tech. Rep. 63/9, Nav. Res. Establish., Dortmund, 1963

[97] C. Strecha, Multi-View Stereo as an Inverse Inference Problem, Ph.D Dissertation, KU Leuven, 2007

[98] B. J. Super, A. C. Bovik, Shape from texture using local spectra moments, IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, Vol. 17(4), s. 333-343, 1995

[99] R. Szeliski, Shape from rotation, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'91), s. 625-630, Maui, Hawaii, 1991

[100] J. Tęgowski, Akustyczna klasyfikacja osadów dennych, Monografia habilitacyjna, Polska Akademia Nauk, Instytut Oceanologii w Sopocie, 2006

[101] R. J. Trick, The backsattering of sound from a Harbour Bottom, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 26(2), s. 231-235, 1954

[102] S. M. Tuovila, SEARAY sonar simulation model, NCSN Lett. Rep. 3240-U-85-01, 1985

[103] R. J. Urick, Principles of underwater sound, wyd. 3, Mc Graw-Hill, 1983

[104] J. Urick, Principles of underwater sound for engineers, McGraw-Hill Book Company, New York, 1975

[105] A. P. Witkin, Recovering surface shape and orientation from texture, Artificial Inteligene, Vol. 17, s. 17-45, 1981

[106] D. J. Wright, Geographic Information System for RIDGE research, RIDGE Events, Vol. 5(2), 1994

[107] H. L.Van Tress, Detection, estimation and modulation theory, Part III – Radar/Sonar Signal Processing, John Wiley and Sons, 1997

[108] R. Zhang, P. S. Tsai, J. E. Cryer, M. Shah, Shape from shading: A survey, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 21, pp. 690-705, 1999