



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ ELEKTRONIKI,
TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI



Imię i nazwisko autora rozprawy: Zawisza Jacek Ostrowski
Dyscyplina naukowa: Telekomunikacja

ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim: Badania możliwości wyznaczania położenia i prędkości ruchomych obiektów pływających z wykorzystaniem odchyłek dopplerowskich sygnałów akustycznych

Tytuł rozprawy w języku angielskim: The study of possibilities to determine position and speed of moving objects in the water using Doppler shifts of acoustic signals

Promotor

podpis

prof. dr hab. inż. Roman Salamon

Spis treści

| | |
|---|-----------|
| WYKAZ SYMBOLI | 3 |
| WSTĘP..... | 5 |
| 1. STRUKTURA I ZASADA PRACY ANALIZOWANYCH SYSTEMÓW NAWIGACYJNYCH | 12 |
| 2. EFEKT DOPPLERA | 15 |
| 2.1. EFEKT DOPPLERA NA DRODZE RUCHOMY NADAJNIK - HYDROFON | 15 |
| 2.2. EFEKT DOPPLERA NA DRODZE NADAJNIK – OBSERWOWANY OBIEKT – HYDROFON | 19 |
| 3. SYSTEM NAWIGACYJNY Z RUCHOMYM NADAJNIKIEM | 22 |
| 3.1. MODEL MATEMATYCZNY SYSTEMU | 22 |
| 3.2. METODA NUMERYCZNEGO ROZWIĄZYWANIA UKŁADÓW RÓWNAŃ | 25 |
| 3.2.1. <i>Opis ogólny</i> | 25 |
| 3.2.2. <i>Wyznaczanie miejsc zerowych różnic składowych prędkości</i> | 27 |
| 3.2.3. <i>Eliminacja stałych fałszywych rozwiązań</i> | 30 |
| 3.2.4. <i>Wyznaczanie położenia nadajnika</i> | 32 |
| 3.2.5. <i>Procedura śledzenia ruchu nadajnika</i> | 33 |
| 3.2.6. <i>Wyznaczanie prędkości nadajnika</i> | 34 |
| 3.3. BADANIA SYMULACYJNE SYSTEMU..... | 36 |
| 3.4. BŁĘDY OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH..... | 41 |
| 3.4.1. <i>Błędy spowodowane rozdzielczością widma odchyłek dopplerowskich</i> | 41 |
| 3.4.2. <i>Wpływ błędów pomiaru odchyłek dopplerowskich na parametry systemu</i> | 44 |
| 4. SYSTEM NAWIGACYJNY ZE STACJONARNYMI NADAJNIKAMI | 48 |
| 4.1. MODEL MATEMATYCZNY SYSTEMU | 48 |
| 4.2. PROGRAM DO WYZNACZANIE POŁOŻENIA I PRĘDKOŚCI RUCHOMEGO OBIEKTU..... | 50 |
| 4.2.1. <i>Struktura programu</i> | 50 |
| 4.2.2. <i>Eliminacja stałych fałszywych rozwiązań</i> | 53 |
| 4.2.3. <i>Wyznaczanie położenia początkowego celu</i> | 58 |
| 4.2.4. <i>Wyznaczanie prędkości celu</i> | 60 |
| 4.2.5. <i>Śledzenie celu</i> | 63 |
| 5. BŁĘDY WYNIKAJĄCE Z PROPAGACJI FALI AKUSTYCZNEJ | 68 |
| 5.1. ZAKŁÓCENIA SPOWODOWANE ODBICIAMI..... | 68 |
| 5.1.1. <i>Odbicia w systemie z ruchomym nadajnikiem</i> | 68 |
| 5.1.2. <i>Odbicia w systemie ze stacjonarnymi nadajnikami</i> | 73 |
| 5.2. ZAKŁÓCENIA SZUMOWE | 78 |
| 5.2.1. <i>System z ruchomym nadajnikiem</i> | 78 |
| 5.2.3. <i>System ze stacjonarnymi nadajnikami</i> | 81 |
| 6. MODEL DOŚWIADCZALNY SYSTEMU DO WYZNACZANIA POŁOŻENIA I PRĘDKOŚCI CELU | 86 |
| 6.1. BUDOWA I ZASADA PRACY MODELU SYSTEMU | 86 |
| 6.1.1. <i>Opis ogólny modelu systemu ze stacjonarnymi nadajnikami</i> | 86 |
| 6.1.2. <i>Konstrukcja nadajników i przetworników nadawczych</i> | 90 |
| 6.1.3. <i>Hydrofony i przedwzmacniacze</i> | 90 |
| 6.1.4. <i>Odbiornik (bez części homodynamicznej)</i> | 91 |
| 6.1.5. <i>Odbiornik homodynamiczny</i> | 91 |
| 6.1.6. <i>Układ akwizycji danych</i> | 91 |
| 6.1.7. <i>Model systemu z ruchomym nadajnikiem</i> | 92 |

| | |
|---|------------|
| 6.2. OBLICZENIA SYSTEMOWE PODSTAWOWYCH PARAMETRÓW TECHNICZNYCH MODELU..... | 93 |
| 6.2.1. System z ruchomym nadajnikiem | 93 |
| 6.2.2. System ze stacjonarnymi nadajnikami | 95 |
| 7. WYNIKI POMIARÓW DOŚWIADCZALNYCH..... | 97 |
| 7.1. UKŁAD POMIAROWY | 97 |
| 7.2. METODYKA POMIARÓW..... | 99 |
| 7.3. WYNIKI POMIARÓW | 100 |
| 7.3.1. Wyniki pomiarów modelu z ruchomym nadajnikiem | 100 |
| 7.3.2. Wyniki pomiarów modelu ze stacjonarnymi nadajnikami..... | 105 |
| 7.3.3. Dyskusja wyników pomiarów modelu ze stacjonarnymi nadajnikami | 109 |
| 8. PODSUMOWANIE | 113 |
| BIBLIOGRAFIA | 116 |
| DODATEK 1. WYPROWADZENIE WZORU (2.14) | 120 |
| DODATEK 2. FORMA TRYGNOMETRYCZNA WYZNACZNIKÓW | 121 |
| DODATEK 3. RUCH JEDNOSTAJNY PO TORZE SINUSOIDALNYM..... | 123 |
| DODATEK 4. PROGRAM SYMULUJĄCY FUNKCJONOWANIE SYSTEMU Z RUCHOMYM NADAJNIKIEM | 125 |
| DODATEK 5. PROGRAM SYMULUJĄCY FUNKCJONOWANIE SYSTEMU ZE STACJONARNYMI NADAJNIKAMI .. | 142 |

WYKAZ SYMBOLI

| | |
|----------------------------|--|
| A | wydajność źródła dźwięku [Pa·m] lub amplituda sygnału |
| $A_x, A_y,$ | macierze miejsc zerowych różnic składowych prędkości |
| B | stała zależna od wydajności źródła dźwięku i warunków odbicia fali od celu |
| B_x, B_y | macierze miejsc zerowych różnic składowych prędkości |
| D | macierze fałszywych miejsc zerowych |
| E | energia |
| F | odchyłka dopplerowska |
| K | liczba prążków periodogramu |
| M | macierze wspólnych rozwiązań |
| N | liczba węzłów siatki |
| P(f) | widmo ciśnienia akustycznego |
| P | moc |
| Q | macierz odwrotna |
| R | odległość elementów systemu (oznaczone indeksami) |
| S | pole powierzchni |
| T | czas jednego cyklu pomiarowego sygnału echa |
| T_0 | okres sygnału sinusoidalnego |
| T | temperatura [$^{\circ}$ K] |
| U | napięcie |
| V_x, V_y | macierze różnic składowych prędkości |
| W | macierze wspólnych rozwiązań |
| X, Y, Z | osie kartezjańskiego układu współrzędnych |
| $X_{N1,2}, Y_{N1,2}$ | współrzędne nadajników |
| $X_{1,2,3,4}, Y_{1,2,3,4}$ | współrzędne hydrofonów |
| $a_{1,2,3,4}$ | elementy macierzy |
| $b_{1,2,3,4}$ | elementy macierzy |
| c | prędkość dźwięku w wodzie |
| d(.) | różniczka |
| f_0 | częstotliwość fali akustycznej emitowanej przez nadajnik |
| f_n | częstotliwość fali padającej na cel i fali odbitej |
| $f_{1,2,3,4}$ | częstotliwości fal odbieranych przez hydrofony |
| $g_{1,2,3,4}$ | znormalizowane odchyłki dopplerowskie |
| j | jednostka urojona $\sqrt{-1}$ |
| k | numer prążka widma odpowiadający |
| k, l | indeksy |
| m, n | współrzędne siatki |
| p | ciśnienie fali akustycznej |
| \vec{r} | wektory łączące elementy systemu |
| r | długości powyższych wektorów |
| s(t) | sygnał |
| t | czas |
| \vec{v} | wektor prędkości celu lub nadajnika |
| v | moduł wektora prędkości celu lub nadajnika |
| $v_{x,y}$ | składowe wektora prędkości celu lub nadajnika |
| x, y, z | chwilowe współrzędne położenia celu lub nadajnika |
| x_0, y_0 | współrzędne położenia początkowego celu lub nadajnika |
| x_s, y_s, z_s | współrzędne płaskiej płaszczyzny odbijającej |

| | |
|------------------|---|
| α [deg] | kąt nachylenia wektora \vec{r} |
| β | kąt nachylenia wektora prędkości celu \vec{v} |
| β_0 | ciśnieniowy współczynnik odbicia na płaskiej granicy ośrodków |
| δ, Δ | przyrost wartości |
| λ | długość fali akustycznej |
| π | stała |
| σ | odchylenie standardowe |
| τ | opóźnienie |
| φ | faza sygnału |
| ω | pulsacja |

Parametry równania zasięgu

| | |
|-----------------|--|
| SNR | stosunek sygnału do szumu |
| SL | poziom źródła |
| η | sprawność anteny nadawczej |
| EL | poziom echa |
| B | szerokość pasma przenoszenia odbiornika |
| TL | straty transmisyjne |
| α [dB/m] | logarytmiczny współczynnik tłumienia absorpcyjnego |
| TS | siła celu |
| TS_s | siła wstecznego rozproszenia powierzchniowego |
| VL | poziom napięcia |
| VR | odpowiedź napięciowa hydrofonu |
| DI | indeks kierunkowości anteny |

WSTĘP

Określanie położenia podwodnego obiektu względem punktu odniesienia jest niezbędne w różnego rodzaju działaniach naukowych, gospodarczych i militarnych takich jak monitorowanie siedlisk morskich, badanie dna i toni wodnej wzdłuż dokładnej i powtarzalnej trajektorii, badanie procesów sedymentacji, mapowanie dna, umieszczanie i wyszukiwanie urządzeń dla przemysłu naftowego i gazowego, poszukiwanie min, ochrona i monitoring obiektów podwodnych i nawodnych i wiele innych.

Metody określania położenia obiektów w akwenach można podzielić na dwie główne grupy związane z naturą stosowanych w nich fal. Pierwsza grupa wykorzystująca fale elektromagnetyczne obejmuje systemy nawigacji satelitarnej takie jak: amerykański Navstar (Navigational Satellite Time and Ranging) znany pod nazwą GPS (Global Positioning System), rosyjski Glonass (Global Navigation Satellite System) i będące w fazie wdrażania europejski Galileo oraz chiński Beidou. Ze względu na bardzo wysoki współczynnik tłumienia fal elektromagnetycznych w wodzie zastosowanie tych systemów ograniczone jest jednak tylko do nawigacji obiektów nawodnych. Do wyznaczania położenia obiektów podwodnych konieczne jest użycie drugiej grupy metod, wykorzystujących fale akustyczne.

W ostatnich latach daje się zauważyć rosnące zainteresowanie hydroakustycznymi systemami nawigacyjnymi nawet pomimo tego, że ich dokładność pomiarów jest ograniczona w trudnym dla propagacji fal akustycznych środowisku wodnym. W szczególności dotyczy to systemów nawigacyjnych działających na dużych odległościach. W takim przypadku ma miejsce istotny wpływ niejednorodności związanych ze zmienną prędkością propagacji dźwięku w czasie i przestrzeni wynikającą z różnych rozkładów temperatury i zasolenia wody spowodowanych na przykład podwodnymi prądami. Należy także pamiętać o niejednoznaczności określenia czoła impulsu odbiorczego powodowaną przez wielotorową propagację fali akustycznej.

Hydroakustyczne systemy nawigacyjne stosowane w praktyce i służące do określania położenia obiektów w wodzie można podzielić na systemy z wykorzystaniem znaczników hydroakustycznych (transpondery, respondery, inteligentne boje) oraz systemy sonarowe.

Typowe impulsowe systemy nawigacyjne ze znacznikami zawierają, w zależności od rodzaju, urządzenie nadawczo-odbiorcze (transceiver) i zestaw transponderów albo nadajnik, transponder i zestaw hydrofonów [1, 2]. W skład systemu wchodzi również jednostka obliczeniowa wraz urządzeniem służącym do zobrazowania. Transceivery i transpondery wysyłają i odbierają sygnały akustyczne, na podstawie których, także w zależności od rodzaju systemu, określana są odległość, bądź namiar i odległość do obserwowanego obiektu. Do wyznaczania położenia podwodnego obiektu względem punktu referencyjnego stosuje się metodę trilateracji (wyznaczania współrzędnych punktów na podstawie pomierzonych odległości) [3, 4] lub triangulacji (wyznaczanie współrzędnych punktów na podstawie pomierzonych kątów i jednej odległości). W zależności od dystansu pomiędzy transponderami lub hydrofonami nazywanego bazą, systemy nawigacyjne ze znacznikami dzielą się na:

- systemy z długą bazą (ang. **LBL** - Long Baseline)
- systemy z krótką bazą (ang. **SBL** - Short Baseline)
- systemy z superkrótką bazą (ang. **SSBL** - Super Short Baseline lub **USBL** - Ultra Short Base Line)

Systemy z długą bazą (LBL).

Podstawowy system z długą bazą składa się z jednego układu nadawczo-odbiorczego i co najmniej trzech transponderów rozlokowanych najczęściej na dnie akwenu. W takim układzie wyznaczana jest pozycja układu nadawczo-odbiorczego umieszczanego na obiekcie pływającym po powierzchni (statek, platforma pływająca) albo pod wodą (łódź podwodna, inny załogowy lub zdalnie sterowany bezzałogowy pojazd podwodny). W bardziej złożonych systemach LBL możliwe jest jednoczesne określenie położenia obiektu nawodnego (pełniącego wtedy także rolę punktu odniesienia) i pojazdu podwodnego, na którym umieszcza się dodatkowy transponder [5]. Układ nadawczo-odbiorczy wysyła sygnał o określonej częstotliwości zwanej częstotliwością zapytania do wszystkich transponderów natomiast transpondery odpowiadają na innych częstotliwościach różnych dla każdego z nich (częstotliwości odpowiedzi). Dzięki temu można precyzyjnie zidentyfikować odpowiedzi od każdego transpondera i w łatwy sposób, na podstawie czasu przelotu fali akustycznej i wcześniej pomierzonej prędkości propagacji dźwięku, określić odległość wszystkich transponderów od układu nadawczo-odbiorczego, czyli punktu odniesienia. Następnie metodą trilateracji wyznaczane są współrzędne tego punktu. Przed przystąpieniem do procesu nawigacji system LBL wymaga dokładnej kalibracji w celu określenia położenia każdego transpondera w zestawie. Transpondery umieszczane są na dnie morza lub innych podwodnych konstrukcjach za pomocą statku pływającego po powierzchni, nurków lub podwodnego pojazdu autonomicznego. Ich dokładną lokalizację geograficzną określa się korzystając z radiowych systemów pozycjonujących lub wręcz przy pomocy nawigacji satelitarnej. W przypadku akwenów o dużej głębokości powinna być też znana głębokość osadzenia transponderów. Odległość pomiędzy transponderami (linia bazowa) wynosi od 50m do kilku a nawet kilkunastu kilometrów.

Systemy LBL mogą również działać w innej konfiguracji. Układ nadawczo-odbiorczy nadal znajduje się na obiekcie pływającym po powierzchni lub w toni wodnej, ale zamiast transponderów umieszczonych na dnie morza lub podwodnych konstrukcjach stosuje się inteligentne boje pływające po powierzchni. Ostatnio, dzięki szybkiemu rozwojowi technologii nawigacji satelitarnej, powstały nowe hydroakustyczne systemy nawigacyjne wykorzystujące boje wyposażone w odbiorniki GPS i akustyczne bądź radiowe łącze danych [6, 7, 8]. Przykładami takich systemów są: system GPS Intelligent Buoys (GIB) [6] i Globalny System Pozycjonowania Akustycznego (GAPS).

Dokładność pozycjonowania obiektów zależy od częstotliwości roboczej systemów LBL. Dla większości tych systemów pracujących z częstotliwością około 10 kHz, w przypadku ich zasięgu działania wynoszącego kilka kilometrów dokładność pozycjonowania mieści się w zakresie kilku metrów. Dokładność tą można zwiększyć stosując wyższe częstotliwości robocze, wiąże się to jednak z ograniczeniem zasięgu. Na przykład w przypadku częstotliwości roboczej 300 kHz i przy zasięgu obserwacji rzędu 100 m można uzyskać rozdzielczość określania położenia nawet na poziomie 1 cm [1]. Typowe systemy LBL charakteryzują się rozdzielczością od decymetrów do kilku metrów. Przy nawigacji na dużych obszarach systemy LBL zapewniają większą dokładność niż przedstawione dalej metody pozycjonowania systemów SBL lub SSBL. Ważne jest także to, że dokładność ta jest stała dla całego obserwowanego obszaru i niezależna od głębokości akwenu. Dzięki temu systemy LBL można stosować nawet w badaniach głębinowych.

Systemy LBL charakteryzują się dobrą powtarzalnością, wysoką niezawodnością i są wyjątkowo wytrzymałe. Zwykle stosuje się w nich więcej niż trzy transpondery instalowane na dnie morskim, co zapewnia nadmiarowość obserwacji. Tym niemniej systemy LBL mają również wady. Wymagają zatrudnienia dobrze przeszkolonych operatorów a wysoką dokładność pozycjonowania zapewniają tylko w obszarze ograniczonym przez zestaw transponde-

rów. Na dokładność tą mają jednak niekorzystny wpływ zakłócenia propagacji w trudnym środowisku wodnym, o czym wcześniej wspomniano. Inne źródło błędu pochodzi od niepewności określania dokładnego położenia transponderów. Co więcej same systemy są złożone i skomplikowane, wymagają wszechstronnych kalibracji przy każdym wdrożeniu a także czasochłonnego rozmieszczania transponderów na dnie morskim, co przy większej liczbie instalowanych transponderów generuje wysokie koszty.

Systemy z krótką bazą (SBL).

W systemie SBL, inaczej niż w przypadku systemu LBL, stosowany jest tylko jeden transponder, który jest umieszczany na podwodnym obiekcie pływającym lub innym obiekcie inżynierskim znajdującym się pod wodą (na przykład przy wylocie odwiertu geologicznego). Natomiast urządzenia nadawczo-odbiorcze, czyli jeden przetwornik nadawczy i zestaw najczęściej trzech hydrofonów, zamontowane są w dnie odpowiednio dużego obiektu nawodnego (statek lub platforma pływająca) [9]. Odległość pomiędzy hydrofonami wynosi od 10 m do 50 m w zależności od wielkości obiektu nawodnego. Zwykle jeden z hydrofonów pełni rolę przetwornika nadawczego. Na sygnał z niego nadawany odpowiada na innej częstotliwości transponder. Sygnał odpowiedzi transpondera jest z kolei odbierany przez zestaw hydrofonów. Mierzone są czasy przelotu sygnału z przetwornika nadawczego do transpondera i z powrotem do każdego hydrofonu w zestawie. Następnie zmierzone czasy przelotu przekształcane są na odległości na podstawie znanej, wcześniej pomierzonej prędkości propagacji dźwięku w obserwowanym obszarze. Pozycję transpondera przymocowanego do podwodnego obiektu wyznacza się za pomocą metody trilateracji, podobnie jak w systemie LBL.

Statek lub platforma unoszące się na powierzchni morza mimo zakotwiczenia narażone są na ruchy przechyłowe, obrotowe bądź postępowe. W związku z tym do skorygowania pomiaru pozycji obserwowanego obiektu w odniesieniu do geograficznej siatki współrzędnych w systemach SBL stosuje się dodatkowe czujniki, takie jak żyroskop, echosonda lub czasami system nawigacji powierzchniowej.

W porównaniu do systemów LBL, niska złożoność systemu SBL i jego zwartość sprawia, że jest on znacznie wygodniejszy w użyciu. Jest to system, który z wyjątkiem jednego transpondera, w całości montowany jest na obiekcie pływającym, więc nie ma potrzeby rozmieszczania zestawu transponderów na dnie morza, co oszczędza czas i koszty wdrożenia. Systemy SBL są używane głównie do śledzenia ruchu obiektów podwodnych w stosunku do platformy powierzchniowej (np. platformy wiertniczej) lub do nawigowania platformy pływającej względem podwodnego obiektu (np. wylotu odwiertu geologicznego).

Dokładność pozycjonowania obiektów w wodzie za pomocą systemu SBL poprawia się wraz ze zwiększaniem odległości pomiędzy hydrofonami na obiekcie pływającym. W związku z tym, gdy pozwala na to miejsce, na przykład podczas pracy na większych jednostkach, system SBL może osiągnąć dokładność i stabilność określania położenia podobną do tej, która charakteryzuje systemy LBL średniego zasięgu montowane na dnie morza. Jednak, gdy system jest montowany na mniejszych obiektach pływających, na których odległość między przetwornikami musi być ograniczona, system SBL będzie wykazywać mniejszą dokładność pozycjonowania.

Systemy z superkrótką bazą (SSBL).

System z superkrótką bazą pod pewnymi względami przypomina system SBL. Podobnie jak tam stosuje się w nim jeden transponder mocowany do podwodnego obiektu, którym może być załogowy bądź bezzałogowy pojazd podwodny, nurek czy pojazd poruszający się po dnie. Różnica polega na tym, że w miejsce hydrofonów rozmieszczonych w możliwie największych odległościach w dnie obiektu pływającego stosuje się antenę, której elementy



odbiorcze (co najmniej trzy) są od siebie oddalone na odległość mniejszą niż połowa długości fali sygnału wysyłanego przez transponder [9]. Przy założeniu, że czoło fali tego sygnału jest płaskie, można określić kąty pomiędzy kierunkiem fali przychodzącej a osią anteny systemu (azymut) oraz kierunkiem tej fali a powierzchnią akwenu (kątem elewacji). Podobnie jak w systemie SBL mierzony jest także czas przelotu fali od anteny nadawczo-odbiorczej do transpondera i z powrotem i na jego podstawie otrzymuje się pozycję transpondera wprost we współrzędnych sferycznych lub, po odpowiednich przekształceniach, w kartezjańskich. Jeszcze większe znaczenie niż w systemie SBL ma tutaj zastosowanie czujników żyroskopowych w celu korekty kołysania statku lub platformy pływającej, na której znajduje się antena systemu SSBL.

Wszystkie przetworniki, zarówno nadawczy jak i odbiorcze, zamknięte są w jednej obudowie stanowiącej antenę systemu SSBL co czyni ten system kompaktowym i łatwym do użycia. Nie ma tu także potrzeby pracochłonnego instalowania i kalibracji zestawu transponderów na dnie akwenu. Dokładność pozycjonowania systemu SSBL wiąże się z dokładnością określania kierunku fali akustycznej przychodzącej z transpondera i ulega zmniejszeniu wraz ze wzrostem odległości pomiędzy anteną nadawczo-odbiorczą a transponderem. Zastosowanie systemów SSBL w głębokich akwenach i na dużych obszarach jest więc mocno ograniczone. Ponadto dokładność pozycjonowania zależy od dokładności dodatkowych czujników kompensujących wpływ niepożądanych, związanych na przykład z falowaniem morza, ruchów statku lub platformy, na której zamontowany jest system.

Systemy sonarowe.

Rozwijane od wielu lat systemy sonarowe są urządzeniami o wiele bardziej wszechstronnymi niż opisane wcześniej klasyczne, hydroakustyczne systemy nawigacyjne ze znacznikami. Początkowo sonary stosowane były na okrętach podwodnych w celu unikania różnego rodzaju przeszkód podczas pływania w zanurzeniu, wyszukiwania wrogich jednostek a nawet do komunikacji z obiektami nawodnymi. Wraz z rozwojem technologii wdrażane były do badań naukowych środowiska morskiego, w szeroko pojętej gospodarce morskiej (np. szacowanie zasobów rybnych), w przemyśle wydobywczym czy do poszukiwania różnych obiektów w wodzie (wraki, miny). Spośród szerokiej palety systemów sonarowych [5], najlepszą dokładność określania położenia obiektów w wodzie i wygodę stosowania zapewniają sonary wielowiązkowe [10]. Przy czym im większa liczba wiązek w sonarze, zarówno w płaszczyźnie horyzontalnej jak i wertykalnej (tu najczęściej stosuje się metodę skanowania), tym dokładność pozycjonowania jest większa. Zmniejsza się ona jednak wraz ze wzrostem odległości między obserwowanymi obiektami a anteną sonaru, ponieważ sonary tego typu charakteryzują się stałą rozdzielczością kątową. Warto zauważyć, że podobne zjawisko występuje w systemach SSBL ze względu na to, że naturalnym układem współrzędnych dla obu systemów jest układ sferyczny. Na przykład w przypadku sonaru pracującego na niskich częstotliwościach (8-15 kHz), które zapewniają zakres pomiaru sięgający do 10 km, można uzyskać rozdzielczość kątową 5-10 stopni. Lepszą rozdzielczość kątową (od 0,2 do 1 stopnia) zapewnia zwiększenie częstotliwości pracy sonaru (60-500 kHz) co okupione jest zmniejszeniem zasięgu do 1,5 km [5]. Należy też dodać, że podobnie jak w systemach SBL i SSBL dokładne pozycjonowanie wymaga stosowania dodatkowych urządzeń, czyli żyrostabilizatora anteny sonaru, a ustalenie pozycji obserwowanego obiektu względem geograficznej siatki współrzędnych, systemu nawigacji satelitarnej.

Wygodą stosowania sonaru do pozycjonowania obiektów w wodzie wiąże się głównie z tym, że nie ma potrzeby instalowania żadnych urządzeń zewnętrznych (znaczników) na dnie akwenu lub na obserwowanych obiektach. Sonar montowany jest bezpośrednio na jednostkach pływających, co umożliwia sprawną zmianę monitorowanego obszaru, podążanie za

przemieszczającym się obiektem jak np. pojazdem podwodnym, albo poruszanie się wzdłuż obserwowanego obiektu (podwodny rurociąg). Kolejną zaletą jest możliwość jednoczesnego określania położenia wielu obiektów.

Niestety systemy sonarowe mają też istotne wady. Najważniejszą z nich jest stosunek jakości (w tym wypadku precyzji pozycjonowania) do ceny. Sonar jest urządzeniem o bardzo wysokim stopniu skomplikowania, przez co jest kosztowny i często można go zastąpić prostszym i tańszym systemem SSBL. Ponadto, szczególnie w przypadku dużych zasięgów systemy te generują falę akustyczną o dużej mocy, co wyklucza ze względów bezpieczeństwa, używanie ich do określania położenia nurków w toni wodnej. Warto też pamiętać, że systemy sonarowe obrazują nie tylko monitorowane obiekty, lecz również wiele ech stałych pochodzących od dna akwenu lub różnych obiektów inżynieryjnych czy geologicznych w nim się znajdujących, co powoduje, że muszą być obsługiwane przez bardzo dobrze wyszkolonych operatorów.

Wszystkie opisane wyżej metody nawigacyjne opierają swoje funkcjonowanie na pomiarach czasu, a ściślej – na pomiarach opóźnień między sygnałami nadawanymi i odbieranymi, bądź między kilkoma sygnałami odbieranymi. Pomiar czasu realizowane są poprzez detekcję progową chwilowej wielkości sygnałów, co wymaga zwykle dużego stosunku sygnału do zakłóceń. Ponadto pomiar czasu jest wrażliwy na warunki propagacji fali akustycznej w akwenach, a w tym na refrakcję i odbicia i rozproszenie na niejednorodnościach. Nasuwa się zatem pytanie, czy i w jaki sposób można oprzeć działanie systemów nawigacyjnych na pomiarze innego parametru sygnałów, a mianowicie jego chwilowej częstotliwości. Zjawisko Dopplera powoduje, że chwilowa częstotliwość sygnałów emitowanych przez poruszające się obiekty zależy od ich prędkości i położenia względem odbiornika. Są więc przesłanki do podjęcia próby jego wykorzystania w systemach nawigacyjnych. Za wykorzystaniem pomiaru częstotliwości przemawia, jego większa odporność na zakłócenia i niekorzystne zjawiska propagacyjne.

Pierwsze w Polsce próby opracowania systemu ochrony śródlądowych budowli hydrotechnicznych (zapór i elektrowni wodnych) wykorzystującego efekt Dopplera podjęto w Katedrze Akustyki na Wydziale Elektroniki Politechniki Gdańskiej po koniec lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku, [11]. Zbudowany system hydroakustyczny o nazwie Zapora wykrywał płetwonurków i określał ich prędkość na podstawie mierzonych odchyłek dopplerowskich. Zawierał szereg rozstawionych w dużych odległościach hydrofonów, co umożliwiało – na podstawie poziomu echa – przybliżone określenie odległości celu od poszczególnych hydrofonów. Istniejące wówczas ograniczenia techniczne nie pozwalały na wystarczająco dokładne wyznaczanie chwilowego położenia celu.

Ogólna koncepcja systemu hydroakustycznego umożliwiającego określania położenia ruchomego celu wyłącznie na podstawie zmierzonych odchyłek dopplerowskich fali ciągłej została opracowana w Katedrze Systemów Elektroniki Morskiej, [12,13,14]. Poprawność koncepcji systemu wykazano na drodze analitycznej i w badaniach symulacyjnych jego uproszczonego modelu. W modelu tym przyjęto dwa istotne uproszczenia, a mianowicie odchyłki dopplerowskie w postaci pojedynczych prążków widma oraz lokalizację nadajnika w miejscu posadowienia jednego z hydrofonów. Oba założenia znacznie uproszczają algorytm obliczeń komputerowych, lecz w praktyce ograniczają obszar prawidłowego funkcjonowania systemu i stwarzają techniczny problem separacji sygnału nadanego od sygnałów echa. Ponadto zastosowany algorytm nie eliminował w pełni niejednoznaczności określania położenia celu i w niektórych, rzadko występujących sytuacjach, błędnie określał to położenie.

Celem rozprawy doktorskiej jest zbadanie możliwości wyznaczania położenia i prędkości ruchomych obiektów podwodnych w oparciu wyłącznie na pomiarze odchyłek dopplerowskich sygnałów akustycznych w systemach nawigacyjnych z ruchomym i stacjonarnymi nadajnikami. Zakres pracy obejmuje modyfikację i rozszerzenie wspomnianej wyżej koncepcji systemu oraz nową metodę przetwarzania danych pomiarowych [15,16,17,18]. Cele rozprawy zrealizowane będą z wykorzystaniem obliczeń analitycznych, symulacji komputerowych oraz badań eksperymentalnych zbudowanych modeli systemów w rzeczywistym ośrodku wodnym.

Sformułowane wyżej cele rozprawy zmierzają do udowodnienia następującej tezy:

Możliwe jest wyznaczenie położenia i prędkości ruchomego obiektu podwodnego przy wykorzystaniu odchyłek dopplerowskich sygnałów akustycznych emitowanych przez zainstalowany na nim nadajnik lub na podstawie odchyłek dopplerowskich sygnałów echa od tego obiektu.

W rozprawie rozpatrywane będą dwie wersje hydroakustycznych systemów nawigacyjnych, a mianowicie system, w którym nadajnik generujący ciągły, sinusoidalny sygnał akustyczny jest zainstalowany na poruszającym się obiekcie oraz system, w którym dwa takie nadajniki umieszczone są w stałych punktach na obrzeżach obserwowanego akwenu. W obu systemach sygnały odbierane są przez cztery hydrofony rozmieszczone na skrajach obserwowanego obszaru, przy czym w pierwszym systemie są to sygnały bezpośrednie od nadajnika, a w drugim – sygnały odbite od tego obiektu. Z tego dwoistego nurtu rozważań wynika, przedstawiona niżej, struktura redakcyjna rozprawy.

W rozdziale pierwszym opisano strukturę i ogólną zasadę pracy obu wersji systemów. Przedstawiono także i uzasadniono założenia dotyczące jego teoretycznego i symulacyjnego modelu.

Następny rozdział poświęcony jest efektowi Dopplera, którego wykorzystanie stanowi podstawę funkcjonowania systemów. W pierwszej wersji systemu rozpatrzony zostanie efekt występujący w sytuacji, gdy źródłem sygnału jest ruchomy nadajnik. W drugiej wersji efekt Dopplera zachodzi dwukrotnie: kiedy obiekt jest ruchomym odbiornikiem, a następnie staje się ruchomym nadajnikiem. Efekty te odnoszą się do sytuacji, gdy ruchomy obiekt jest źródłem fali odbitej (sygnału echa). W obu przypadkach obserwowany obiekt może poruszać się w małej lub dużej odległości od przetworników nadawczych i hydrofonów, czego skutkiem jest zróżnicowane widmo odchyłki dopplerowskiej. Analiza tego widma jest niezbędnym warunkiem działania systemów, gdyż dostarcza danych do wykonywanych obliczeń.

Kolejny, trzeci rozdział poświęcony jest systemowi z ruchomym nadajnikiem. Wyprowadzono w nim układy równań kwadratowych, których rozwiązaniem jest chwilowe położenie celu i jego prędkość, przedstawiono numeryczną metodę ich rozwiązywania, wyniki badań symulacyjnych oraz błędy wynikające z obliczeń numerycznych.

Czwarty rozdział dotyczy systemu ze stacjonarnymi nadajnikami. Ma on podobną strukturę co rozdział poprzedni, z pominięciem analizy błędów, która odnosi się do obu systemów.

W rozdziale piątym przedstawiono analizę błędów w funkcjonowaniu systemu wynikających z propagacji fali akustycznej w rzeczywistym ośrodku wodnym. Mogą być one spowodowane błędami w pomiarze odchyłek dopplerowskich, wielodrogowa transmisją sygnałów akustycznych oraz szumami środowiska wodnego i szumami elektrycznymi.

Rozdział szósty poświęcony jest modelowi doświadczalnemu systemu. Zawiera on jego projekt systemowy, którego wynikiem są pożądane parametry techniczne modelu doświadczalnego oraz opis konstrukcji zaprojektowanego i zbudowanego przez autora systemu.

W kolejnym, siódmym rozdziale opisano eksperymenty przeprowadzone w Stacji Badań Hydroakustycznych Katedry Systemów Elektroniki Morskiej zlokalizowanej nad Jeziorem Wdzydze. Zamieszczono wyniki pomiarów obu wersji systemu i dokonano ich analizy.

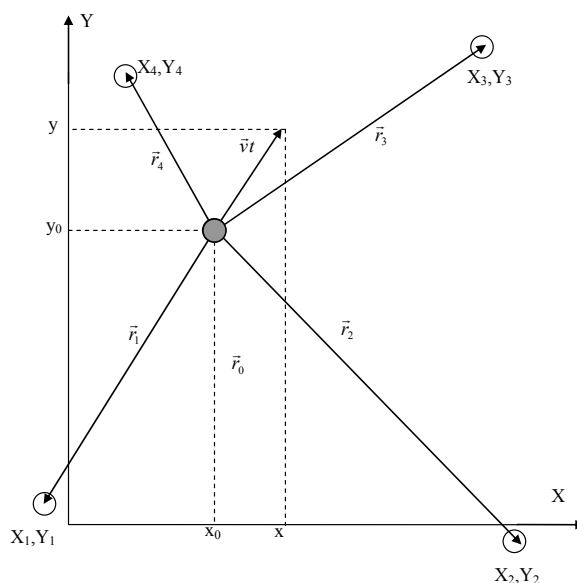
Główną część rozprawy zamyka podsumowanie, w którym autor wymienia elementy rozprawy o oryginalnym – jego zdaniem – charakterze oraz wskazuje na możliwości doskonalenia systemu w celu nadania mu profesjonalnych walorów użytkowych.

Rozprawę uzupełnia bibliografia i pięć dodatków, z których dwa ostatnie zawierają programy komputerowe wykorzystywane w badaniach symulacyjnych i eksperymentalnych.

1. STRUKTURA I ZASADA PRACY ANALIZOWANYCH SYSTEMÓW NAWIGACYJNYCH

W rozprawie dokonano analizy możliwości budowy dwóch systemów nawigacyjnych, w których do określenia współrzędnych ruchomych obiektów pływających wykorzystywany jest wyłącznie efekt Dopplera. W pierwszym z nich nadajnik ciągłego, sinusoidalnego sygnału akustycznego zainstalowany jest na obserwowanym obiekcie pływającym, na przykład na autonomicznym pojeździe podwodnym. Akustyczną część odbiorczą systemu stanowią cztery hydrofony rozmieszczone w znanych miejscach na obrzeżach akwenu, w którym prowadzona jest nawigacja obiektu. W skład odbiorczej, elektronicznej części systemu wchodzi czterokanałowy odbiornik sygnałów emitowanych przez nadajnik, w którym każdy kanał podłączony jest do określonego hydrofonu, konwerter analogowo-cyfrowy przetwarzający sygnały z wyjść odbiornika i komputer wykonujący zaprogramowane obliczenia.

W każdym kanale odbiornika sygnały z hydrofonów są filtrowane i wzmacniane, a następnie poddawane konwersji analogowo-cyfrowej w 4-kanałowym przetworniku A/C. Otrzymane w ten sposób cztery zespolone sygnały cyfrowe są przetwarzane w komputerze. W stałych przedziałach czasu obliczane są sukcesywnie cztery dyskretne widma tych sygnałów echa, a z nich – wyznaczone wartości cyfrowe odchyłek dopplerowskich. Stanowią one wiadome w układach czterech równań, w których niewiadomymi są chwilowe współrzędne celu i składowe wektora jego prędkości. Układy równań są rozwiązywane numerycznie według opracowanego algorytmu, a wynikiem rozwiązania są współrzędne obserwowanego obiektu oraz chwilowa wartość wektora jego prędkości. Rezultaty obliczeń są prezentowane graficznie w formie toru ruchu celu. Opis geometryczny omawianego systemu pokazano na rys. 1.1.



Rys. 1.1. Współrzędne nadajnika (kółko w kolorze szarym) i hydrofonów (okręgi) w systemie I.

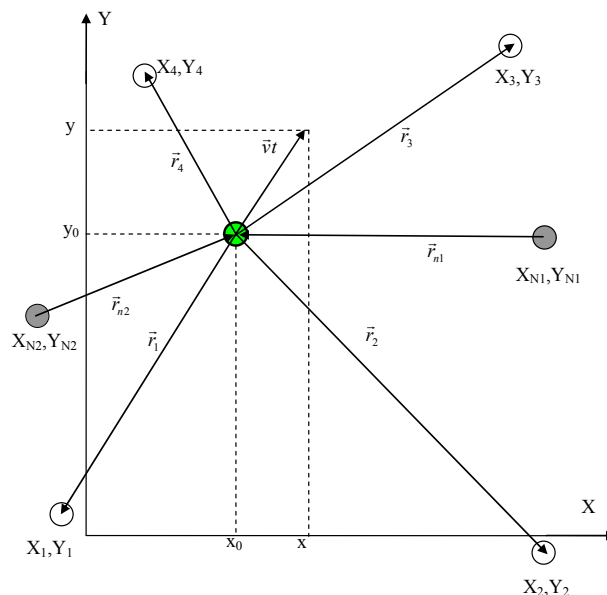
W drugim rozpatrywanym w rozprawie systemie nawigacyjnym, główna zmiana polega na przeniesieniu nadajnika z obiektu pływającego na obrzeże akwenu. W rezultacie do hydrofonów docierają sygnały odbite od obserwowanego obiektu pływającego, co jednakże nie wpływa istotnie na sposób przetwarzania sygnałów w odbiorniku i zastosowane algorytmy obliczania położenia i prędkości obiektu. Z teoretycznego punktu widzenia system może



funkcjonować z jednym źródłem sygnału, lecz mogą wystąpić wówczas trudne do wyeliminowania niejednoznaczności co do rzeczywistego położenia celu. Z tego powodu uzupełniono system o drugi nadajnik, pracujący na innej częstotliwości i zainstalowany także na obrzeżach akwenu w miejscu odległym od pierwszego nadajnika. Konsekwencją tego uzupełnienia jest rozbudowa odbiornika o drugi kanał. W obu kanałach znajdują się układy kwadraturowej, homodynowej przemiany częstotliwości, dostosowane do częstotliwości sygnałów emitowanych przez nadajniki. Zwiększyła się zatem dwukrotnie (do 16-tu) liczba sygnałów zamienianych na postać cyfrową w przetworniku A/C, a także liczby wyznaczanych widm i liczba wyznaczanych odchyłek dopplerowskich. Rozbudowie uległa również część algorytmiczna systemu, w której wykorzystuje się teraz zależności wynikające ze wszystkich (ośmiu) odchyłek dopplerowskich w celu eliminacji niejednoznaczności i usunięcia pojawiających się sporadycznie błędów w funkcjonowaniu systemu.

Szczegółowy opis skonstruowanego modelu systemu zamieszczono w rozdziale 6.

Geometrię rozbudowanej wersji systemu pokazano na rys. 1.2.



Rys. 1.2. Rozmieszczenie nadajników (kółka w kolorze szarym), hydrofonów (okręgi) i obserwowanego obiektu w akwenu (kółko w kolorze zielonym) w systemie II.

Zapowiedzianą we wstępie do rozprawy, jedną z metod analizy możliwości budowy omawianych systemów są komputerowe badania symulacyjne. Jak zwykle, badania takie dotyczą modeli, które są pewną uproszczoną wersją rzeczywistych systemów. Uproszczenia dotyczą tych elementów, których funkcjonowanie jest nieznane, słabo rozpoznane lub trudne do ujęcia w opis algorytmiczny. Stopień zastosowanych uproszczeń nie powinien wszakże wpływać negatywnie w istotny sposób na podstawowe, najważniejsze cechy symulowanego systemu.

W rozpatrywanych tu systemach nawigacyjnych przyjęte uproszczenia dotyczą głównie kanału hydroakustycznego, ze względu na jego nieokreśloną, zmienną konfigurację przestrzenną, kształt dna i jakość osadów dennych, zmienne warunki hydrometeorologiczne, akustyczne zakłócenia ze źródeł zewnętrznych i inne, trudne do przewidzenia warunki eksploatacyjne. Z tego względu w algorytmach przyjęto następujące upraszczające założenia:

- Obserwowany akwen jest płytki, co pozwala zakładać w uproszczeniu, że zanurzenie celu, hydrofonów i nadajników nie ma znaczącego wpływu na ich wzajemne odległości, a przez to na błędy określenia położenia i prędkości obiektu. Akwenty wokół większości budowli hydrotechnicznych, potencjalnego miejsca eksploatacji systemów, nie są bowiem zazwyczaj głębokie. W dalszej analizie rozpatrywana będzie zatem płaska, dwuwymiarowa geometria systemów przy założeniu, że obserwowany obiekt porusza się w tej płaszczyźnie.
- Zaniedbano wielodrogową propagację fal akustycznych między nadajnikami a obiektem i między obiektem a hydrofonami oraz założono, że propagacja odbywa się bez refrakcji (po liniach prostych). Założenie to sprowadza się do analizy w jednorodnym ośrodku nieograniczonym.
- Pominięto rzeczywiste wymiary geometryczne obserwowanego obiektu i założono, że jest on ruchomym punktem w przestrzeni. Rzeczywisty kształt i ustawienie obiektu względem hydrofonów i (w drugiej wersji systemu) nadajników prawdopodobnie zwiększy szerokość widma odchyłek dopplerowskich, szczególnie gdy obiekt będzie przepływał w pobliżu wspomnianych elementów systemu. Rozmaitość kształtów interesujących obiektów i ich usytuowania na obecnym, wstępnym etapie analizy pracy systemów nie wydaje się niezbędna i wykracza poza ramy niniejszej pracy.
- Pominięto wpływ rewerberacji powierzchniowych na generację fałszywych odchyłek dopplerowskich. Mogą one wynikać z falowania powierzchni wody. Konsekwencje tego uproszczenia są trudne do przewidzenia i opisu algorytmicznego. Będą one przedmiotem badań eksperymentalnych systemów.
- Przyjęto, że w obserwowanej przestrzeni znajduje się tylko jeden ruchomy obiekt. Założenie to jest w pełni uzasadnione w odniesieniu do systemu, w którym nadajnik sygnałów akustycznych jest zainstalowany na obserwowanym obiekcie pływającym. W drugiej wersji jednoczesne pojawienie się w obserwowanym akwenu większej liczby pływaków lub pojazdów podwodnych nie wydaje się bardzo prawdopodobne. Ponadto przy większej liczbie ruchomych obiektów system pozostaje systemem alarmowym, lecz nie jest w stanie określić położenia i prędkości obiektów. Rozbudowa systemu o funkcję określania położenia większej liczby obiektów pociąga za sobą konieczność znacznej komplikacji algorytmów, co wykracza poza ramy niniejszej pracy. Algorytmy te byłyby względnie proste, gdyby obiekty pojawiały się w obszarze obserwacji kolejno. Można by wówczas przypisywać odchyłki dopplerowskie oddzielnym, określonym obiektom wykorzystując algorytmy śledzenia z predykcją.

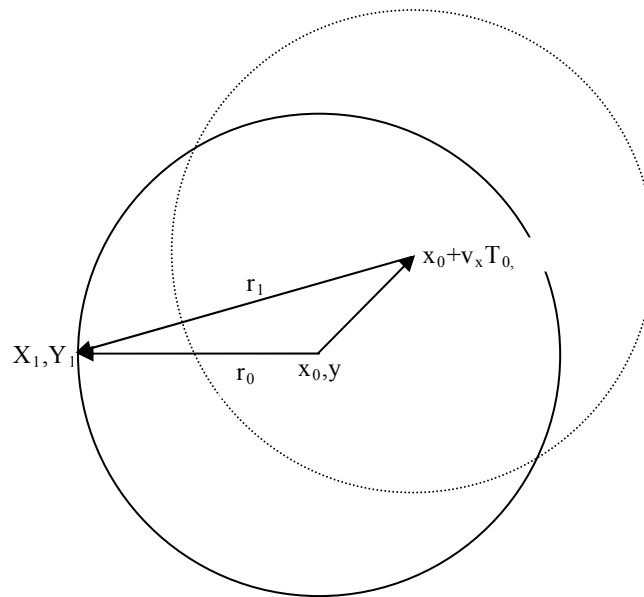
Odstąpiono także od założenia o nieograniczonym ośrodku analizując błędy, które są skutkiem odbicia lustrzanego fali akustycznej od powierzchni wody i pionowych płaszczyzn występujących na jego granicach.

2. EFEKT DOPPLERA

W rozdziale tym przedstawiono opis matematyczny efektu Dopplera, niezbędny do sformułowania równań umożliwiających wyznaczenie położenia i prędkości ruchomych obiektów. Analizę rozpoczęto od sytuacji występującej w systemie, w którym nadajnik sygnału akustycznego jest umieszczony na poruszającej się jednostce pływającej. W następnym punkcie dokonano analizy efektu Dopplera w sytuacji występującej w systemie, w którym nadajnik sygnału akustycznego jest umieszczony na obrzeżach akwenu, a sygnał odbierany przez hydrofon jest wynikiem odbicia fali od obserwowanego, ruchomego obiektu.

2.1. Efekt Dopplera na drodze ruchomy nadajnik - hydrofon

Przetwornik nadawczy jest źródłem akustycznej fali sferycznej o częstotliwości f_0 . Gdy porusza się on z prędkością \vec{v} , następuje zmiana długości emitowanej fali w otaczającej go przestrzeni. Ilustruje to rys. 2.1, na którym pokazano miejsca geometryczne czoła emitowanej fali, gdy prędkość \vec{v} ma składowe v_x, v_y . Czoło fali emitowanej przez nieruchomy przetwornik nadawczy w czasie $t+T_0$ zaznaczono linią ciągłą. Linią kropkowaną pokazano czoło fali w tym samym momencie czasu, gdy przetwornik porusza się z prędkością \vec{v} (v_x, v_y).



Rys. 2.1. Czoła fali sinusoidalnej emitowanej przez ruchomy nadajnik.

Jeżeli nadajnik jest nieruchomy, a T_0 oznacza okres fali emitowanej przez nadajnik, to długości fali jest równa $\lambda = cT_0$, gdzie c jest prędkością propagacji fali akustycznej w wodzie. Jeżeli nadajnik porusza się, to długość fali ulega zmianie. Zmiana długości fali spowodowana efektem Dopplera wynosi więc $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda = r_1 - r_0$. W celu wyznaczenia tej różnicy obliczymy najpierw różnicę kwadratów promieni:

$$r_1^2 - r_0^2 = (x_0 - X_1 + v_x T_0)^2 + (y_0 - Y_1 + v_y T_0)^2 - (x_0 - X_1)^2 - (y_0 - Y_1)^2 \quad (2.1)$$

gdzie x_0 i y_0 są współrzędnymi nadajnika w chwili początkowej, a X_1 i Y_1 są współrzędnymi jednego z hydrofonów.

Po uproszczeniach powyższy wzór przyjmuje następującą postać:

$$r_1^2 - r_0^2 = 2v_x T_0 (x_0 - X_1) + 2v_y T_0 (y_0 - Y_1) + v^2 T_0^2 \quad (2.2)$$

gdzie $v^2 = v_x^2 + v_y^2$,

Jeżeli odległość celu od hydrofonu jest duża, wówczas można pominąć składnik $v^2 T_0^2$. Ponadto wyrażenie $r_1^2 - r_0^2$ można uprościć do postaci $[r_1 - r_0] [r_1 + r_0] \cong 2[r_1 - r_0] \cdot r_0$. Wykorzystując te zależności otrzymujemy:

$$\Delta\lambda = r_1 - r_0 \cong \frac{v_x T_0 (x_0 - X_1) + v_y T_0 (y_0 - Y_1)}{c\sqrt{(x_0 - X_1)^2 + (y_0 - Y_1)^2}} \quad (2.3)$$

Ponieważ $\Delta\lambda = \lambda_l - \lambda = c(T_l - T_0)$, więc okres fali T_l pochodzącej od ruchomego nadajnika wynosi:

$$T_l \cong T_0 \left[1 + \frac{v_x (x_0 - X_1) + v_y (y_0 - Y_1)}{c\sqrt{(x_0 - X_1)^2 + (y_0 - Y_1)^2}} \right] \quad (2.4)$$

Częstotliwość fali emitowanej przez przetwornik nadawczy wynosi $f_0 = 1/T_0$, a odbieranej przez hydrofon jest równa $f_l = 1/T_l$. A zatem mamy:

$$f_l \cong f_0 \cdot \left[1 + \frac{v_x (x_0 - X_1) + v_y (y_0 - Y_1)}{c\sqrt{(x_0 - X_1)^2 + (y_0 - Y_1)^2}} \right]^{-1} \cong f_0 \cdot \left[1 - \frac{v_x (x_0 - X_1) + v_y (y_0 - Y_1)}{c\sqrt{(x_0 - X_1)^2 + (y_0 - Y_1)^2}} \right] \quad (2.5)$$

Odchyłka dopplerowską $F_l = f_l - f_0$ na drodze nadajnik – hydrofon wynosi więc:

$$F_l \cong -f_0 \frac{v_x (x_0 - X_1) + v_y (y_0 - Y_1)}{c\sqrt{(x_0 - X_1)^2 + (y_0 - Y_1)^2}} \quad (2.6)$$

Wyrażenie w liczniku wzoru (2.6) jest iloczynem skalarnym wektorów \vec{r}_0 , i \vec{v} , zaś wyrażenie w mianowniku opisuje długość r_0 wektora \vec{r}_0 , a więc:

$$F_l \cong -\frac{f_0}{c} \frac{\vec{v} \cdot \vec{r}_0}{r_0}, \quad (2.7)$$

Jeżeli wektor prędkości \vec{v} jest nachylony względem osi OX pod kątem β , a wektor \vec{r}_0 pod kątem α , wówczas $(x_0 - X_1)/r_0 = \cos\alpha$, $(y_0 - Y_1)/r_0 = \sin\alpha$, $v_x/v = \cos\beta$, $v_y/v = \sin\beta$ i wzór (2.6) można zapisać jako:

$$F_{l1} \cong -\frac{f_0 v}{c} (\cos\beta \cos\alpha + \sin\beta \sin\alpha) = -\frac{f_0 v}{c} \cos(\beta - \alpha) \quad (2.8)$$

Wyrażenie $v \cos(\beta - \alpha)$ opisuje długość rzutu wektora \vec{v} na prostą łączącą nadajnik z hydrofonem, którą w literaturze określa się często jako prędkość radialną [19].

Warunki, przy których wyprowadzono ostatnie wzory występują w większości systemów radiolokacyjnych i hydrolokacyjnych. W związku z tym podstawowa literatura ogranicza się do opisu efektu Dopplera za pomocą owych wzorów [20,21,22]. W rozpatrywanym tu systemie odległość ruchomego obiektu od hydrofonu może być względnie mała, co nawet przy małej prędkości obiektu nie uzasadnia stosowania wykorzystanych wyżej przybliżeń. Widmo sygnału nie może być wtedy opisywane jedną częstotliwością, gdyż zawiera kilka składowych. Podobny efekt występuje w radarach i sonarach z syntetyczną aperturą [23,24].

Widmo odchyłki dopplerowskiej można wyznaczyć analizując efekt Dopplera w ujęciu sygnałowym, rezygnując z przedstawionej wyżej interpretacji fizycznej tego zjawiska. W tym celu założmy, że przetwornik nadawczy emituje sinusoidalną falę sferyczną, której ciśnienie na powierzchni hydrofonu można zapisać jako:

$$p_n(t) = \frac{A}{r_n} \sin\{2\pi f_0[t - r_n(t)/c]\}, \quad (2.9)$$

gdzie t jest czasem, f_0 częstotliwością fali emitowanej przez przetwornik nadawczy, r_n – chwilową odległością źródła dźwięku od n -tego hydrofonu, a A stałą zależną od wydajności źródła dźwięku.

W wyniku ruchu obserwowanego obiektu odległość $r_n(t)$ zmienia się w czasie, a więc częstotliwość fali padającej na obiekt jest równa pochodnej [25]:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \{2\pi f_0[t - r_n(t)/c]\} = f_0 - \frac{f_0}{c} \frac{dr_n(t)}{dt}. \quad (2.10)$$

Założmy, że w momencie rozpoczęcia obserwacji nadajnik znajduje się w punkcie o współrzędnych x_0, y_0 i porusza się ze stałą prędkością \vec{v} , której wektor pokazano na rys 1.1. Po czasie t odległość obiektu od źródła dźwięku wynosi:

$$r_n(t) = |\vec{r}_n + \vec{v}t| = \sqrt{(x_0 - X_n + v_x t)^2 + (y_0 - Y_n + v_y t)^2}, \quad (2.11)$$

gdzie v_x i v_y są składowymi wektora prędkości obiektu, a X_n i Y_n są współrzędnymi hydrofonów.

Po obliczeniu pochodnej powyższego wyrażenia i podstawieniu jej do wzoru (2.10) otrzymujemy:

$$f_n = f_0 - \frac{f_0}{c} \frac{v_x(x_0 - X_n + v_x t) + v_y(y_0 - Y_n + v_y t)}{\sqrt{(x_0 - X_n + v_x t)^2 + (y_0 - Y_n + v_y t)^2}}. \quad (2.12)$$

Różnica $F_n = f_n - f_0$ jest odchyłką dopplerowską częstotliwości fali akustycznej odbieranej przez n -ty hydrofon, spowodowaną ruchem nadajnika. Jak widać ze wzoru (2.12) odchyłka ta jest w ogólności funkcją czasu. Jeżeli obiekt porusza się z małą prędkością, znajduje się w dużej odległości od przetwornika nadawczego, a czas obserwacji jest krótki, wówczas odchyłka dopplerowska wyraża się wzorem (2.6)

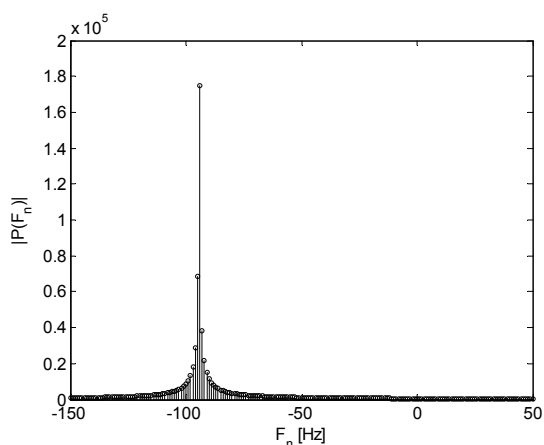
Na rys. 2.2. pokazano moduł widma $|P(F_n)|$ wyznaczonego numerycznie z dyskretnej transformaty Fouriera sygnału $p(t)$, zapisanego wzorem (2.9), gdy spełnione są założenia dotyczące wyprowadzenia wzoru (2.6). Częstotliwość F_1 odczytana z widma wynosi -94 Hz, a obliczona ze wzoru (2.6) jest równa -94.3 Hz. Błąd wynikający z zastosowanego uproszczenia jest więc mniejszy od rozdzielczości widma, która wynosi tu $\Delta f = 1/T = 1$ Hz, gdzie $T = 1$ s jest czasem obserwacji sygnału.

Moduł widma odchyłki dopplerowskiej pokazany na rys. 2.3 odnosi się do sytuacji, gdy obiekt z nadajnikiem przepływa w małej odległości od hydrofonu. Jego szerokość jest wówczas duża i wynosi około 8 Hz. Częstotliwości graniczne widma odchyłki dopplerowskiej $F_n(T)$ można wyznaczyć ze wzoru (2.12) i wynoszą one:

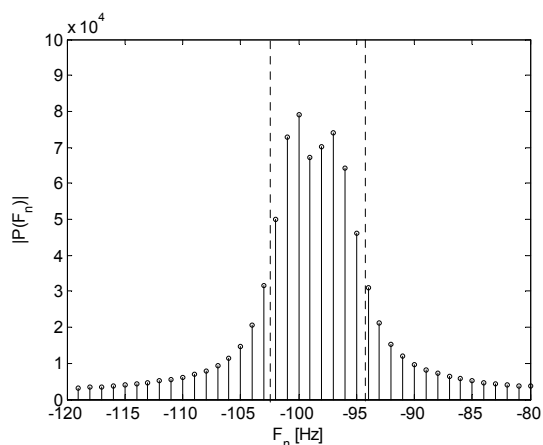
$$F_n(0) = -\frac{f_0}{c} \frac{v_x(x_0 - X_n) + v_y(y_0 - Y_n)}{\sqrt{(x_0 - X_n)^2 + (y_0 - Y_n)^2}} \quad (2.13)$$

$$F_n(T) = -\frac{f_0}{c} \frac{v_x(x_0 - X_n + v_x T) + v_y(y_0 - Y_n + v_y T)}{\sqrt{(x_0 - X_n + v_x T)^2 + (y_0 - Y_n + v_y T)^2}} \quad (2.14)$$

gdzie T jest czasem obserwacji sygnału.

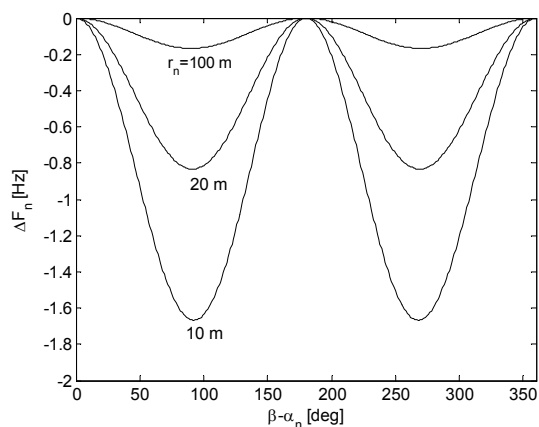


Rys. 2.2. Widmo odchyłki dopplerowskiej fali emitowanej przez ruchomy nadajnik padającej na hydrofon ($f_0=100$ kHz, $x_0-X_I=100$ m, $y_0-Y_n=100$ m, $v_x=1$ m/s, $v_y=1$ m/s, $T=1$ s).

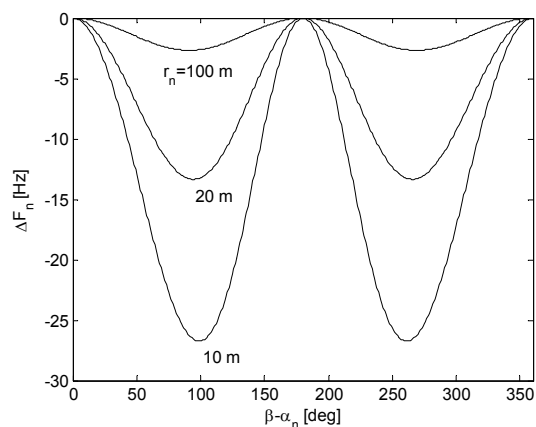


Rys. 2.3. Widmo odchyłki dopplerowskiej fali emitowanej przez ruchomy nadajnik, padającej na hydrofon ($f_0=100$ kHz, $x_0-X_I=10$ m, $y_0-Y_n=10$ m, $v_x=2$ m/s, $v_y=0$ m/s, $T=1$ s).

Jak wynika z powyższych wzorów odchyłka $F_n(0)$ odnosi się do celu o współrzędnych x_0, y_0 , a odchyłka $F_n(T)$ do celu o współrzędnych $x_0+v_x T, y_0+v_y T$. Na rys. 2.3 zaznaczono te odchyłki wyznaczone ze wzorów (2.13) i (2.14). Różnica granicznych odchyłek zależy od drogi, którą przebył cel w czasie T oraz od kąta między wektorem \vec{r}_n i wektorem \vec{v} . Ilustrują to rys. 2.4 i rys. 2.5, na których pokazano różnicę odchyłek dopplerowskich $\Delta F_n = F_n(T) - F_n(0)$ w funkcji różnicy kątów między tymi wektorami.



Rys. 2.4. Szerokość widma odchyłki dopplerowskiej ($f_0=100$ kHz, $v=0.5$ m/s, $T=1$ s)



Rys. 2.5. Szerokość widma odchyłki dopplerowskiej ($f_0=100$ kHz, $v=2$ m/s, $T=1$ s)

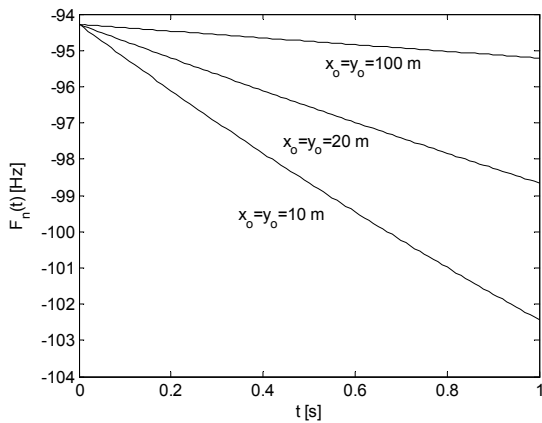
Jest ona najmniejsza, gdy wektory te są równoległe i największa, gdy są prostopadłe. Przy małej prędkości (rys. 2.4) widmo odchyłki dopplerowskiej zawiera się w jednym lub dwóch prążkach przy rozdzielczości $\Delta f=1$ Hz, a więc cel można traktować jako odległy nawet przy odległości $r_n=10$ m. Przy czterokrotnie większej prędkości (rys. 2.5) widmo odchyłki

dopplerowskiej znacznie się poszerza i jego szerokość nie może być zaniedbywana przy odległościach r_n mniejszych od około 100 m.

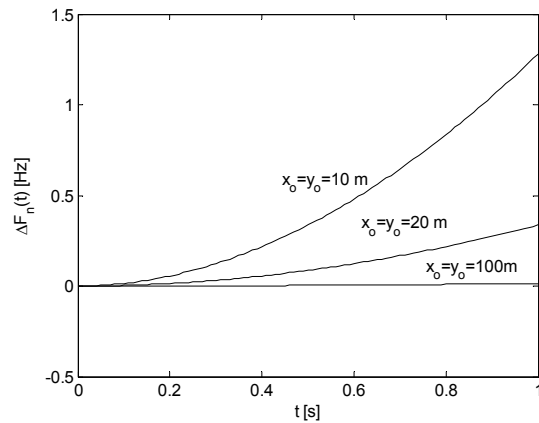
Przekształcając wzór (2.14) (DODATEK 1), można widmo odchyłki dopplerowskiej $F_n(t)$ zapisać w przybliżeniu jako:

$$F_n(t) \cong -\frac{f_0 v}{c} \cos(\beta - \alpha_n) - \frac{f_0 v}{c} \frac{vt}{r_n} \sin^2(\beta - \alpha_n) \quad (2.15)$$

Z powyższej zależności wynika, że efekt Dopplera powoduje liniową modulację częstotliwości. Jak wiadomo, [26,27,28,29,30], widmo zwykłego sygnału sinusoidalnego z liniową modulacją częstotliwości jest prawie prostokątne o częstotliwości środkowej równej częstotliwości nośnej. Efekt Dopplera powoduje dodatkowe przesunięcie skraju widma o odchyłkę $F_n(0)$. Szerokość widma jest opisana drugim członem wzoru (2.15). Na rys. 2.6 pokazano przykładowe zmiany częstotliwości $F_n(t)$, wyznaczone ze wzoru (2.14) a na rys. 2.7 – błędy wynikające z przybliżonego wzoru (2.15). Jak widać, błędy przybliżenia nie mają technicznego znaczenia.



Rys. 2.6. Odchyłki dopplerowskie w funkcji czasu ($f_0=100$ kHz, $v=2$ m/s, $\beta=0^\circ$, $\alpha_n=45^\circ$, $X_n=Y_n=0$).



Rys. 2.7. Błąd odchyłki dopplerowskiej w funkcji czasu ($f_0=100$ kHz, $v=2$ m/s, $\beta=0^\circ$, $\alpha_n=45^\circ$, $X_n=Y_n=0$).

2.2. Efekt Dopplera na drodze nadajnik – obserwowany obiekt – hydrofon

W systemie, którego geometrię pokazano na rys. 1.2 występują dwa odrębne efekty Dopplera. Na drodze między nieruchomym nadajnikiem i poruszającym się obiekcie długość fali w ośrodku nie zmienia się – jej częstotliwość jest równa częstotliwości emitowanej przez nadajnik. Efekt Dopplera pojawia się na powierzchni poruszającego się obiektu jako skutek „obserwacji”. W najprostszym ujęciu, zmienia się pozornie prędkość propagacji c , która przy ruchu obiektu w kierunku nadajnika z prędkością v wynosi $c+v$. Przy stałej długości fali λ , okres odbieranej fali wynosi $T_1 = \lambda/(c+v) = \lambda/[c(1+v/c)] = (\lambda/c)(1-v/c) = T_0(1-v/c)$ dla $v \ll c$. Częstotliwość odbieranej fali jest w przybliżeniu równa $f = f_0(1+v/c)$, a więc odchyłka dopplerowska wynosi $F = f_0 v/c$. Liczbowo odchyłka dopplerowska przy ruchu obiektu jest równa odchyłce przy ruchu źródła dźwięku.

Efekt Dopplera na drodze obserwowany obiekt - hydrofon opisano szczegółowo w p.2.1.

Efekt Dopplera na drodze nadajnik – obserwowany obiekt – hydrofon omówiono posługując się ujęciem sygnałowym. Rozpatrzmy sytuację pokazaną na rys. 1.2, w której akustyczny sygnał sinusoidalny, emitowany przez przetwornik nadawczy o współrzędnych X_{NI}, Y_{NI} , dociera do punktowego, poruszającego się obiektu, od którego odbijają się i dociera do hydro-

fonu o współrzędnych X_I, Y_I . Fala odbita, po pokonaniu drogi $r_I(t)$ ma, na powierzchni hydrofonu, ciśnienie akustyczne, które można opisać wzorem:

$$p_I(t) = \frac{B}{r_{N1}r_1} \sin\{2\pi f_0 \{t - [r_{N1}(t) + r_1(t)]/c\}\} \quad (2.16)$$

gdzie B jest stałą zależną od wydajności źródła dźwięku i warunków odbicia fali od obiektu. Wpływ tłumienia absorpcyjnego w wodzie został pominięty, ze względu na zakładane, krótkie drogi propagacji. Uzasadnienie przedstawiono w rozdziale 6.

Chwilową częstotliwość fali ciśnienia, a zatem i sygnału na wyjściu hydrofonu obliczamy jako pochodną fazy, która zgodnie ze wzorem (2.10) jest równa:

$$f_1 = f_0 - \frac{f_0}{c} \left(\frac{dr_{N1}(t)}{dt} + \frac{dr_1(t)}{dt} \right) \quad (2.17)$$

Odległość $r_I(t)$ jest opisana wzorem (2.11) dla hydrofonu o numerze $n=1$, a odległość nadajnika od obiektu $r_{N1}(t)$ wynosi:

$$r_{N1}(t) = \sqrt{(x_0 - X_{N1} + v_x t)^2 + (y_0 - Y_{N1} + v_y t)^2} \quad (2.18)$$

Po obliczeniu pochodnych $r_I(t)$ i $r_{N1}(t)$ i wstawieniu ich do wzoru (2.17) otrzymujemy:

$$f_1 = f_0 - \frac{f_0}{c} \left[\frac{v_x(x_0 - X_{N1} + v_x t) + v_y(y_0 - Y_{N1} + v_y t)}{\sqrt{(x_0 - X_{N1} + v_x t)^2 + (y_0 - Y_{N1} + v_y t)^2}} + \frac{v_x(x_0 - X_1 + v_x t) + v_y(y_0 - Y_1 + v_y t)}{\sqrt{(x_0 - X_1 + v_x t)^2 + (y_0 - Y_1 + v_y t)^2}} \right] \quad (2.19)$$

Pierwszy ułamek w powyższym wyrażeniu jest proporcjonalny do odchyłki dopplerowskiej na drodze nadajnik-cel (wzór 2.6), a drugi do odchyłki dopplerowskiej na drodze cel-hydrofon. Obie odchyłki dopplerowskie opisane są takimi samymi zależnościami. Zauważmy, że w dużej odległości celu od hydrofonu i przy małej jego prędkości można w drugim ułamku pominąć składniki $v_x t$ i $v_y t$, a wtedy ta odchyłka dopplerowska ma stałą wartość liczbową.

Wzory o postaci (2.19) opisują częstotliwości sygnałów odbieranych przez pozostałe trzy hydrofony, jeżeli w miejsce X_I, Y_I wstawimy ich współrzędne.

Korzystając z przekształceń wzoru (2.14) przedstawionych w DODATKU 1, sumaryczną odchyłkę dopplerowską można zapisać w uproszczeniu jako:

$$F_{N1}(t) + F_1(t) \cong -\frac{f_0 v}{c} \left\{ \cos(\beta - \alpha_{N1}) + \cos(\beta - \alpha_1) + vt \left[\frac{\sin^2(\beta - \alpha_{N1})}{r_{N1}} + \frac{\sin^2(\beta - \alpha_1)}{r_1} \right] \right\} \quad (2.20)$$

Dwa pierwsze składniki powyższej zależności opisują sumaryczną odchyłkę dopplerowską, gdy $vt \ll r_{N1}$ i $vt \ll r_1$. Odchyłkę tę można przedstawić jako:

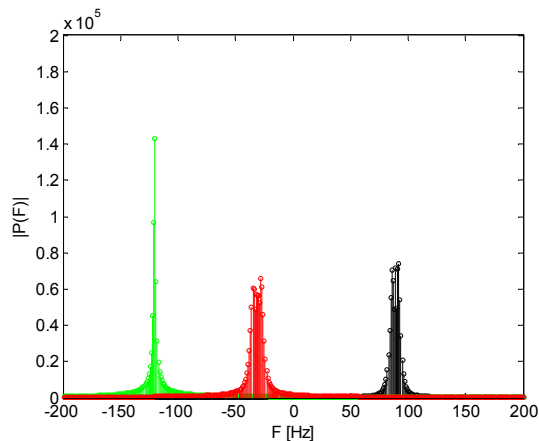
$$F_{N1}(0) + F_1(0) \cong -2 \frac{f_0 v}{c} \cos\left(\beta - \frac{\alpha_{N1} + \alpha_1}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\alpha_{N1} - \alpha_1}{2}\right) \quad (2.21)$$

Jeżeli $\alpha_I = \alpha_{N1} = \alpha$, powyższy wzór upraszcza się do zwykle podawanej w literaturze postaci, [21,22,31]:

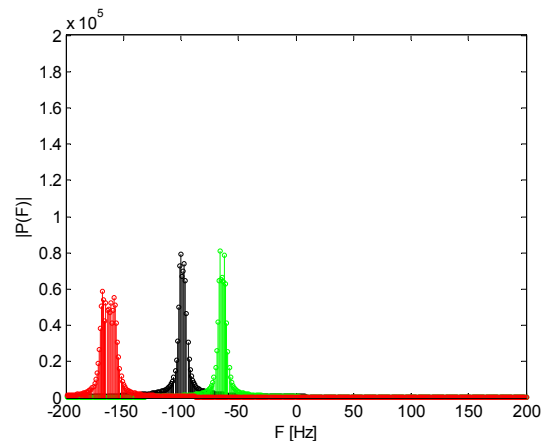
$$F_n(0) + F_1(0) \cong -2 \frac{f_0 v}{c} \cos(\beta - \alpha) \quad (2.22)$$

Gdy dodatkowo $\beta=\alpha$, wartość bezwzględna sumy odchyłek dopplerowskich przyjmuje wartość maksymalną, a gdy $\beta-\alpha=90^\circ$, to suma ta jest zerowa. Wartość maksymalną suma odchyłek przyjmuje, gdy $\beta-\alpha=180^\circ$. Ze wzoru (2.21) wynika, że suma odchyłek dopplerowskich jest zerowa, jeżeli $\alpha_N - \alpha_I = 90^\circ$.

Na rys. 2.8 pokazano widma odchyłek dopplerowskich w sytuacji, gdy obserwowany obiekt zbliża się do nadajnika (dodatnia odchyłka dopplerowska) i oddala się do hydrofonu (ujemna odchyłka dopplerowska). Na rys. 2.9 widma dotyczą sytuacji, gdy cel oddala się od nadajnika i hydrofonu. Na obu rysunkach cel znajduje się blisko nadajnika i hydrofonu w stosunku do drogi o długości vt , a więc widma są stosunkowo szerokie. Zauważmy, że wraz ze wzrostem szerokości widma maleje wysokość jego prążków, co utrudnia detekcję.

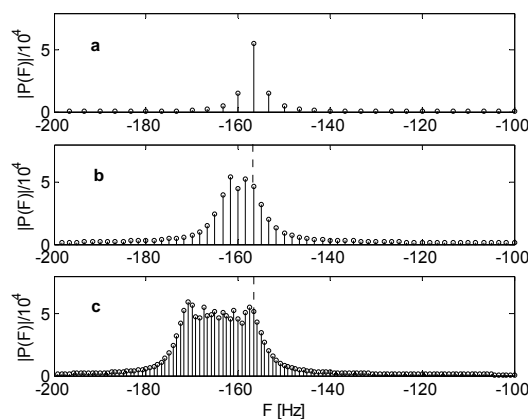


Rys. 2.8. Odchyłki dopplerowskie na drodze: nadajnik-cel (czarne), cel-hydrofon (zielone) i nadajnik-cel -hydrofon (czerwone) ($f_0=100$ kHz, $X_N, Y_N=(0,0)$, $X_I, Y_I=(20,30)$, $(x_0, y_0)=(10,10)$ [m], $v_x=0$ m/s, $v_y=-2$ m/s, $T=1$ s)



Rys. 2.9. Odchyłki dopplerowskie na drodze: nadajnik-cel (czarne), cel-hydrofon (zielone) i nadajnik-cel -hydrofon (czerwone) ($f_0=100$ kHz, $X_N, Y_N=(0,0)$, $X_I, Y_I=(30,0)$, $(x_0, y_0)=(10,10)$ [m], $v_x=0$ m/s, $v_y=2$ m/s, $T=1$ s)

Poszczególne prążki widma odchyłki dopplerowskiej odpowiadają chwilowemu położeniu celu, co wynika ze wzoru (2.20). Z tego wzoru wynika także, że początkowemu położeniu celu (x_0, y_0) odpowiada w przybliżeniu zawsze prawy skrajny prążek widma. Fakt ten będzie wykorzystany w procedurze wyznaczania współrzędnych celu i jego prędkości. Potwierdzają go zamieszczone niżej rysunki, na których pokazano zmiany widma odchyłki dopplerowskiej wraz ze zmianą czasu obserwacji t , czyli ze wzrostem drogi przebytej przez cel.



Rys. 2.10. Widma odchyłki dopplerowskiej (a – $t=0.3$ s, b – $t=0.6$ s, c – $t=1.2$ s).

3. SYSTEM NAWIGACYJNY Z RUCHOMYM NADAJNIKIEM

3.1. Model matematyczny systemu

W rozpatrywanym tu systemie nawigacyjnym, źródłem fali akustycznej jest nadajnik umieszczony na ruchomym celu. Jest to sytuacja opisana w p. 2.1. Odchyłka dopplerowska jest funkcją czasu, opisaną wzorem (2.14). Dla pierwszego hydrofonu o współrzędnych X_1 , Y_1 przyjmuje on następującą postać:

$$F_1(t) = -\frac{f_0}{c} \left[\frac{v_x(x_0 - X_1 + v_x t) + v_y(y_0 - Y_1 + v_y t)}{\sqrt{(x_0 - X_1 + v_x t)^2 + (y_0 - Y_1 + v_y t)^2}} \right] \quad (3.1)$$

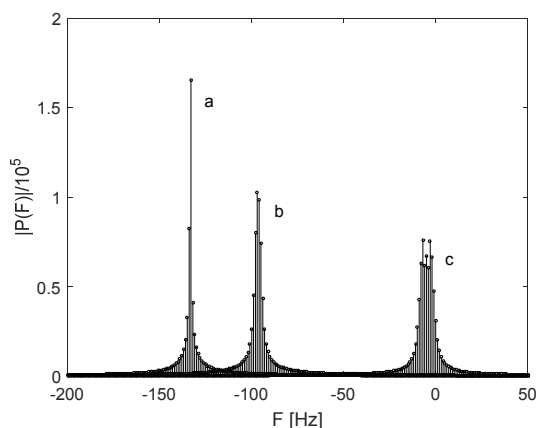
gdzie $x_0 = X_N$ i $y_0 = Y_N$.

Przypomnijmy, że w tym wzorze współrzędne x_0 i y_0 określają położenie początkowe nadajnika, które odnosi się do chwili początkowej okresu obserwacji ($t=0$ s).

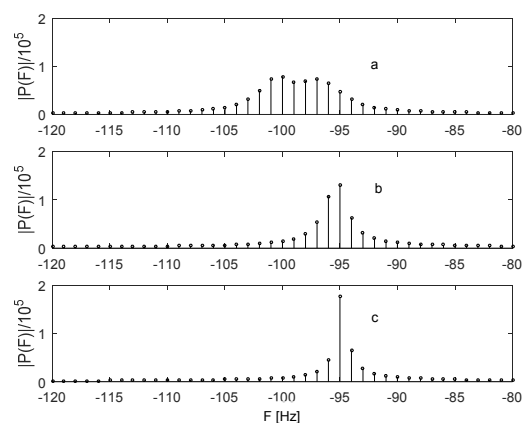
Odchyłki dopplerowskie wyznacza się z widma odebranego sygnału. Położenie tego widma na skali częstotliwości, jego kształt i szerokość zależą od wielkości i położenia wektora prędkości nadajnika względem hydrofonu. Ilustrują to zamieszczone niżej rysunki.

Na rys. 3.1 pokazano widma odchyłki dopplerowskiej dla nadajnika znajdującego się blisko hydrofonu, gdy zmienia się kierunek jego ruchu. Podane kąty odnoszą się do kierunku ruchu obiektu względem prostej łączącej go z hydrofonem. Przykładowo kąt 90^0 oznacza kierunek prostopadły do tej prostej. Obliczenia wykonano dla początkowej odległości celu równej 20 m i prędkości $v=2$ m/s. Częstotliwość emitowanej fali akustycznej wynosi $f_0=100$ kHz.

Rys. 3.2 ilustruje zmiany kształtu i szerokości widma odchyłki dopplerowskiej zachodzące przy zmianie odległości celu od hydrofonu. Nadajnik oddala się od hydrofonu i porusza się z prędkością $v=2$ m/s po prostej łączącej go z hydrofonem.



Rys. 3.1. Widma odchyłki dopplerowskiej dla różnych kierunków ruchu celu: $a - 90^0$, $b - 45^0$, $c - 0^0$.



Rys. 3.2. Widma odchyłki dopplerowskiej dla różnych odległości celu od hydrofonu: $a - 10$ m, $b - 40$ m, $c - 100$ m.

Wartości częstotliwości odchyłek dopplerowskich, które są podstawą zaprezentowanej dalej procedury wyznaczania położenia nadajnika odnoszą się do jego położenia początkowego i są równe w przybliżeniu prawej, granicznej częstotliwości szerokości widma. Na rys. 3.1 częstotliwości te wynoszą -133 Hz, -95 Hz i 0 Hz, a na rys. 3.2 częstotliwości te są identyczne i wynoszą -95 Hz.

Wykorzystując zależność (3.1) można zapisać równania opisujące odchyłki dopplerowskie dla czterech hydrofonów:

$$\begin{aligned}
 F_1 &= -\frac{f_0}{c} \frac{v_x(x_0 - X_1) + v_y(y_0 - Y_1)}{\sqrt{(x_0 - X_1)^2 + (y_0 - Y_1)^2}} \\
 F_2 &= -\frac{f_0}{c} \frac{v_x(x_0 - X_2) + v_y(y_0 - Y_2)}{\sqrt{(x_0 - X_2)^2 + (y_0 - Y_2)^2}} \\
 F_3 &= -\frac{f_0}{c} \frac{v_x(x_0 - X_3) + v_y(y_0 - Y_3)}{\sqrt{(x_0 - X_3)^2 + (y_0 - Y_3)^2}} \\
 F_4 &= -\frac{f_0}{c} \frac{v_x(x_0 - X_4) + v_y(y_0 - Y_4)}{\sqrt{(x_0 - X_4)^2 + (y_0 - Y_4)^2}}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Jest to układ czterech równań z czterema niewiadomymi, a mianowicie współrzędnymi położenia początkowego nadajnika x_0 i y_0 oraz składowymi wektora jego prędkości v_x i v_y . Pozostałe wielkości występujące w układzie są z założenia znane. Znane są bowiem współrzędne czterech hydrofonów oraz uzyskane w wyniku analizy widm sygnałów echa – cztery odchyłki dopplerowskie. Ponieważ równania występujące w układzie (3.2) są kwadratowe, a więc rozpatrywany układ równań nie ma analitycznego rozwiązania. Posłużymy się zatem metodą numeryczną, którą przedstawimy dalej. Jest to nadal układ czterech równań z czterema niewiadomymi x_0 , y_0 , v_x i v_y .

W celu uproszczenia zapisu dalszych wzorów wprowadzimy następujące oznaczenia:

$$\begin{aligned}
 g_1 &= -F_1 \frac{c}{f_0} & g_2 &= -F_2 \frac{c}{f_0} & g_3 &= -F_3 \frac{c}{f_0} & g_4 &= -F_4 \frac{c}{f_0} \\
 x_1 &= x_0 - X_1 & x_2 &= x_0 - X_2 & x_3 &= x_0 - X_3 & x_4 &= x_0 - X_4 \\
 y_1 &= y_0 - Y_1 & y_2 &= y_0 - Y_2 & y_3 &= y_0 - Y_3 & y_4 &= y_0 - Y_4
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Wykorzystując oznaczenia podane we wzorach (3.3) otrzymujemy:

$$g_k = \frac{v_x x_k + v_y y_k}{\sqrt{x_k^2 + y_k^2}} \quad k = 1, 2, 3, 4 \tag{3.4}$$

Powyższe równania można zapisać w uproszczonej formie jako:

$$\begin{aligned}
 g_1 &= v_x a_1 + v_y b_1 \\
 g_2 &= v_x a_2 + v_y b_2 \\
 g_3 &= v_x a_3 + v_y b_3 \\
 g_4 &= v_x a_4 + v_y b_4
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

gdzie

$$a_k = \frac{x_k}{\sqrt{x_k^2 + y_k^2}} \quad \text{oraz} \quad b_k = \frac{y_k}{\sqrt{x_k^2 + y_k^2}} \quad k = 1, 2, 3, 4 \tag{3.6}$$



Jest to układ równań liniowych względem niewiadomych v_x i v_y . Ponieważ wszystkie współczynniki a i b są nieznanne (nieznane są współrzędne nadajnika), więc układ ten nie może być rozwiązany. Można go natomiast wykorzystać do wyznaczenia zależności pomiędzy tymi współczynnikami. W tym celu należy wyeliminować z układu współrzędne prędkości v_x i v_y .

Zapiszmy w formie macierzowej sześć różnych par równań:

$$\begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} g_1 \\ g_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_2 \\ a_3 & b_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} g_1 \\ g_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_4 & b_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_2 & b_2 \\ a_3 & b_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} g_2 \\ g_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_2 & b_2 \\ a_4 & b_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} g_3 \\ g_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_3 & b_3 \\ a_4 & b_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix}$$

Rozwiązania tych układów równań można zapisać jako:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_3 & b_3 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} g_1 \\ g_3 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_4 & b_4 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} g_1 \\ g_4 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_2 & b_2 \\ a_3 & b_3 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_2 & b_2 \\ a_4 & b_4 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} g_2 \\ g_4 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_3 & b_3 \\ a_4 & b_4 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} g_3 \\ g_4 \end{bmatrix}$$

Z powyższych sześciu równań mogą zostać wyeliminowane składowe wektora prędkości. Można w tym celu ułożyć równania, których liczba jest równa liczbie kombinacji różnych zbiorów dwuelementowych ze zbioru sześćoelementowego. Liczba ta wynosi 15. Znaczna większość tych równań zawiera tylko po trzy różne wielkości g , a więc ich rozwiązania wynikają tylko z trzech zmierzonych odchyłek dopplerowskich. Układy równań, w których występują cztery różne wielkości g mają następujące postaci:

$$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_3 & b_3 \\ a_4 & b_4 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} g_3 \\ g_4 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_3 & b_3 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} g_1 \\ g_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_2 & b_2 \\ a_4 & b_4 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} g_2 \\ g_4 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

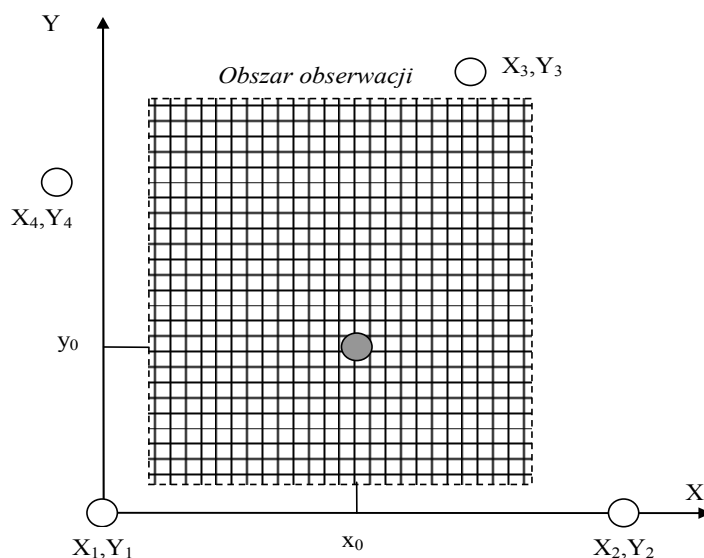
$$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_4 & b_4 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} g_1 \\ g_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_2 & b_2 \\ a_3 & b_3 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Są to układy dwóch równań z dwiema niewiadomymi: x_0 i y_0 . Układów tych nie można rozwiązać analitycznie ze względu na kwadratowe zależności współczynników a i b od niewiadomych x_0 i y_0 . Ponadto rozwiązania mogą, z tego samego względu, być niejednoznaczne. W związku z tym zastosowano numeryczną metodę rozwiązywania układów równań, której wynikiem są przybliżone współrzędne kolejnych położenia celu oraz jego chwilowe wektory prędkości. Metoda ta będzie przedstawiona w kolejnych podrozdziałach rozprawy. W ogólności polega ona na poszukiwaniu takich współrzędnych nadajnika x_0 i y_0 (a więc współczynników a i b) przy których spełnione są równania (3.9), (3.10) i (3.11).

3.2. Metoda numerycznego rozwiązywania układów równań

3.2.1. Opis ogólny

Metoda numerycznego rozwiązywania układów równań polega na poszukiwaniu przybliżonych rozwiązań wybranego układu równań w węzłach siatki współrzędnych pokrywającej założony region. Regionem tym może być cały obszar obserwacji systemu lub mniejszy obszar wokół domniemanego położenia nadajnika. Siatkę taką pokazano na rys. 3.3. Ponieważ węzłom tej siatki przypisywane będą elementy macierzy, więc musi mieć ona kształt prostokątny.



Rys. 3.3. Siatka pokrywająca cały obszar obserwacji.

Zasada przyporządkowywania elementów macierzy współrzędnym węzłów siatki jest następująca. Załóżmy, że oczko siatki jest kwadratem o boku s . Szerokość siatki jest całkowitą wielokrotnością długości boku s i wynosi Ns . Analogicznie wysokość siatki równa się Ms . Tworzymy macierz o wymiarach $(M+1) \times (N+1)$. Współrzędna x siatki jest równa: $x=(n-1)s$, a współrzędna $y=(m-1)s$, gdzie n jest numerem kolumny, a m – numerem wiersza macierzy. Jak widać współrzędnym x przypisane są kolumny macierzy, a współrzędnym y – jej wiersze. W prezentowanych dalej wynikach badań symulacyjnych stosowano zawsze siatkę kwadratową o boku 100 m.

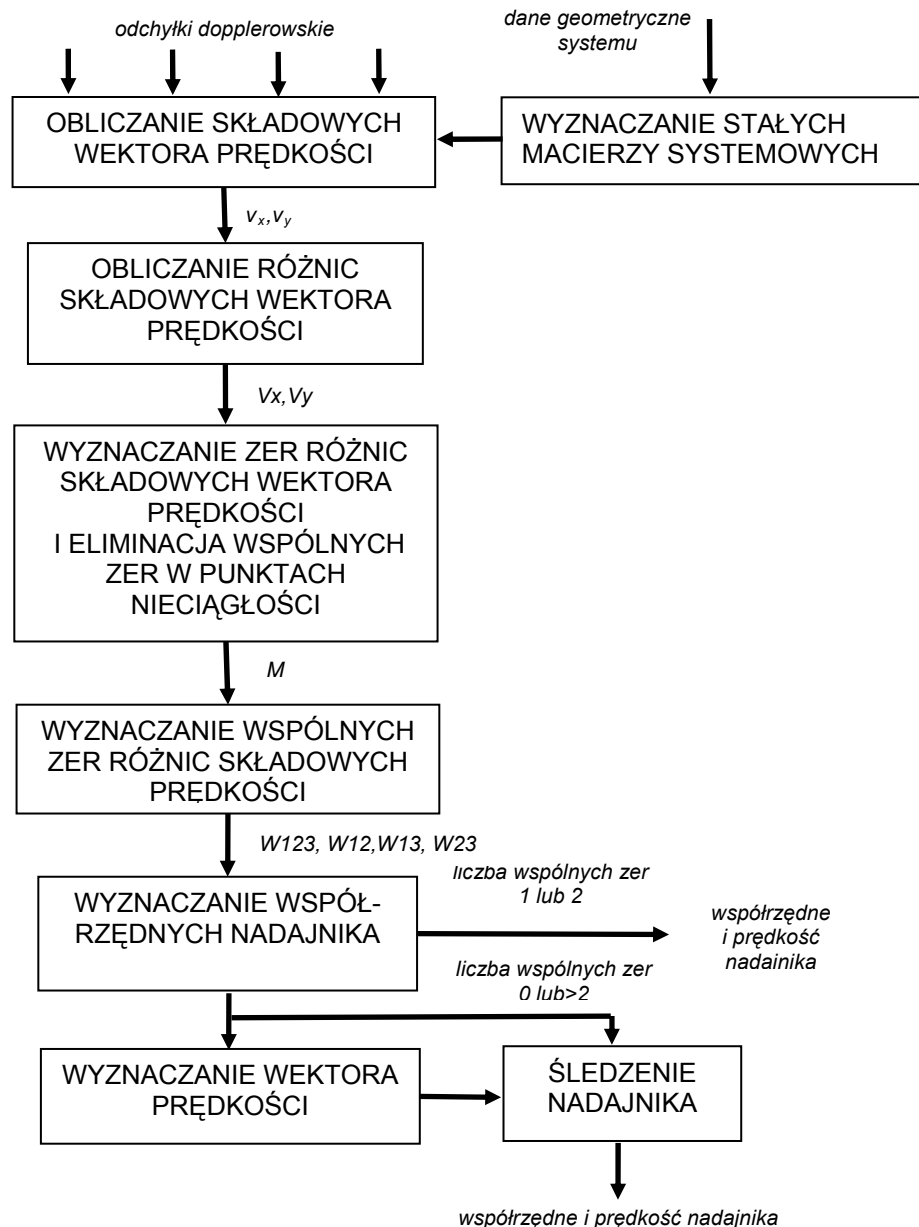
Procedura numerycznego wyznaczania przybliżonych rozwiązań układów równań przedstawia się następująco:

1. Dla każdego węzła siatki obliczamy ze wzorów (3.3) i (3.6) elementy macierzy $a_1(m,n), \dots, a_4(m,n)$, oraz $b_1(m,n), \dots, b_4(m,n)$ wstawiając w miejsce x_0 i y_0 współrzędne x i y węzłów siatki. Obliczenia te są wykonywane jednokrotnie dla określonej konfiguracji geometrycznej systemu i przechowywane w pamięci komputera.
2. Dla wszystkich kombinacji hydrofonów wyznaczamy macierze odwrotne występujące we wzorach (3.8). Dla każdego węzła siatki jest sześć takich macierzy. Macierze te wynikają wyłącznie z założonej konfiguracji systemu, a więc ich wyznaczanie odbywa się jednokrotnie.

3. Z analizy widmowej sygnałów echa wyznaczamy odchyłki dopplerowskie F_1, \dots, F_4 i ze wzorów (3.3) obliczamy znormalizowane odchyłki g_1, \dots, g_4 . W badaniach symulacyjnych znormalizowane odchyłki g_1, \dots, g_4 wyznaczamy z odchyłek dopplerowskich posługując się wzorami (3.2) i (3.3).
4. Posługując się wzorami (3.8) obliczamy składowe prędkości v_{xmn} i v_{ymn} we wszystkich węzłach siatki dla sześciu kombinacji hydrofonów.
5. W każdym węźle siatki obliczamy różnice składowych prędkości v_{xmn} wyznaczonych w p.4. Spośród sześciu takich składowych obliczamy różnice tych składowych prędkości, które wynikają z różnych odchyłek dopplerowskich (wzory 3.9, 3.10 i 3.11). Są to: $Vx1 = v_{x12} - v_{x34}$, $Vx2 = v_{x13} - v_{x24}$ i $Vx3 = v_{x14} - v_{x23}$, gdzie indeksy oznaczają numer hydrofonu i tym samym – numer odchyłki dopplerowskiej. Tak samo postępujemy ze składowymi v_{ymn} otrzymując macierze $Vy1$, $Vy2$ i $Vy3$.
6. Następnym krokiem jest wyznaczanie miejsc zerowych różnic składowych prędkości umieszczonych w macierzach Vx i Vy . Miejsca zerowe macierzy Vx wyznaczane są w wierszach macierzy i oznaczane jako $A1$, a następnie w kolumnach i umieszczanie w macierzy $A2$. Miejsca zerowe mają w macierzach wartość 1 , a pozostałe wyrazy macierzy – 0 . Operacje te powtarzane są dla macierzy Vy , a ich wyniki umieszczane w macierzach $B1$ i $B2$.
7. Stosując operację logiczną $A = A1 + A2 \geq 1$ oraz $B = B1 + B2 \geq 1$ otrzymujemy macierze A i B zawierająca wszystkie miejsca zerowe macierzy Vx i Vy , liczone względem wierszy i kolumn.
8. Mnożąc wyraz po wyrazie macierze A i B otrzymujemy trzy macierze AB , w których zawarte są wspólne miejsca zerowe różnic składowych prędkości Vx i Vy . Wyznaczamy następnie współrzędne tych miejsc i umieszczamy je w wektorach n (współrzędne x) i wektorach m (współrzędne y).
9. Wektory n i m zawierają współrzędne celu, gdyż spełniają równania (3.9), (3.10) i (3.11), lecz także fałszywe rozwiązania związane z niejednoznacznością rozwiązywanych równań. Znaczna część fałszywych rozwiązań ma stałe położenie związane z geometrią systemu. Są one eliminowane z wektorów n i m .
10. Wynikiem opisanych wyżej operacji są trzy pary wektorów n i m (współrzędnych x, y): $(n1, m1)$, $(n2, m2)$ $(n3, m3)$, tworzące macierze dwuwierszowe $M1$, $M2$ i $M3$. W ogólności macierze te mogą być puste, zawierać jedną lub kilka kolumn. W celu znalezienia poszukiwanych współrzędnych nadajnika wyznacza się wspólne miejsca zerowe powyższych macierzy. Wyznaczane są mianowicie wspólne miejsca trzech macierzy i umieszczane są one w dwuwierszowej macierzy $W123$ oraz wspólne miejsca zerowe każdego z par macierzy. Tworzą one macierze dwuwierszowe $W12$, $W13$ i $W23$.
11. Celem dalszych procedur jest wyznaczanie jednego lub dwóch domniemanych położań nadajnika. Możliwość wystąpienia większej liczby rozwiązań wynika z własności efektu Dopplera; taką samą odchyłkę dopplerowską dają źródła dźwięku, których wektory prędkości są położone symetrycznie względem prostej łączącej źródło z hydrofonem. Fałszywe rozwiązania pojawiają się także w wyniku naturalnej niedoskonałości dyskretnej formy wyznaczania punktów przecięcia krzywych. Procedurę wyznaczania położenia źródła dźwięku omówimy w p. 3.2.4.
12. Dla wyznaczonego położenia celu oblicza się składowe wektora prędkości nadajnika korzystając z równań opisanych ogólnie wzorami (3.8).

13. Składowe wektora prędkości i wyznaczone położenie celu są danymi w procedurze śledzenia celu, która oblicza przypuszczalne położenie nadajnika dla kroku obserwacji, w którym nie znaleziono rozwiązania.

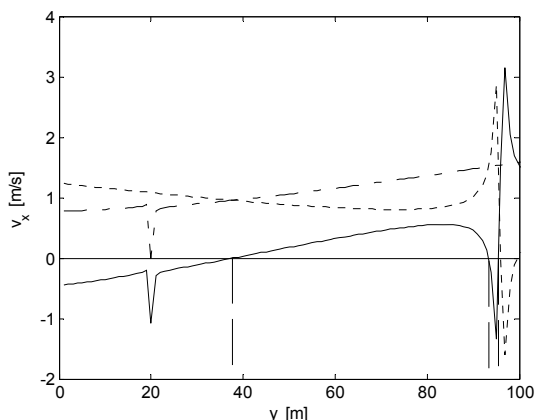
Schemat funkcjonalny programu komputerowego realizującego opisaną wyżej procedurę przedstawiono na rys. 3.4



Rys. 3.4. Schemat funkcjonalny systemu.

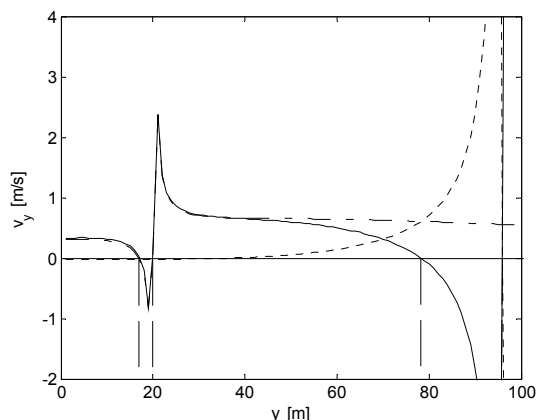
3.2.2. Wyznaczanie miejsc zerowych różnic składowych prędkości

W wyniku opisanych wyżej operacji algebraicznych dysponujemy trzema parami macierzy zawierającymi różnice składowych prędkości V_x i V_y we wszystkich węzłach siatki. Przykładowe składowe prędkości w wybranej kolumnie macierzy oraz ich różnice pokazano na rys. 3.5 i 3.6.



Rys. 3.5. Składowe prędkości i ich różnica Δv_x
 Δv_y

(linia ciągła)

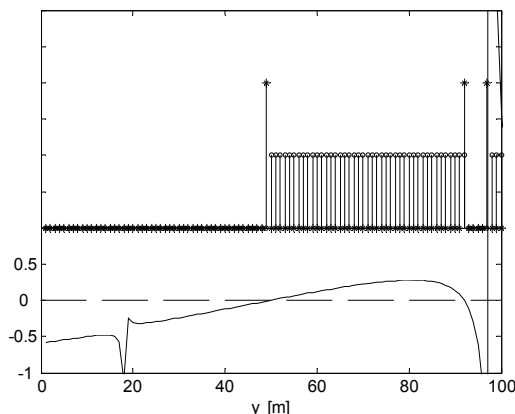


Rys. 3.6. Składowe prędkości i ich różnica Δv_y

(linia ciągła)

Zastosowano następującą procedurę numerycznego wyznaczania przybliżonych miejsc zerowych różnic składowych prędkości, którą ilustruje rys. 3.7. Dla każdej współrzędnej $x(n)$ (kolumny macierzy Vx) węzłów siatki:

- stosując operację logiczną $u(m) = Vx(m,n) > 0$ ($n = \text{const}$) otrzymujemy wektor u , w którym wartości logiczne '1' występują tam, gdzie spełniona jest nierówność, a w pozostałych punktach są zerowe, (górna część rysunku),
- obliczamy numeryczną pochodną wektora u i jej wartość bezwzględną,
- znajdujemy punkty m , w których wartość bezwzględna jest większa od zera, (w górnej części rysunku są to trzy wyższe próbki oznaczone gwiazdkami),
- współrzędne m i n opisują poszukiwane położenie miejsc zerowych różnic prędkości.



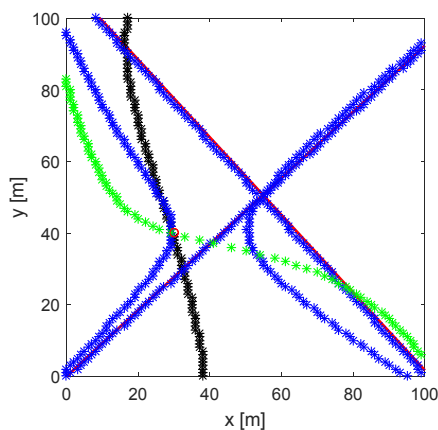
Rys. 3.7. Wyznaczanie przybliżonych miejsc zerowych różnic składowych prędkości.

Stosując opisaną wyżej metodę, wyznaczamy miejsca zerowe różnic składowych prędkości względem wierszy macierzy Vx . Jak to powiedziano w opisie ogólnym, otrzymane w ten sposób macierze $A1$ i $A2$ sumujemy i wyznaczamy macierz A zawierającą wszystkie miejsca zerowe macierzy Vx . W ten sposób eliminujemy nieciągłości występujące przy obliczeniach względem kolumn i wierszy. Nieciągłości te są widoczne na rys. 3.8 i rys. 3.9. a efekt ich eliminacji - na rys. 3.10.

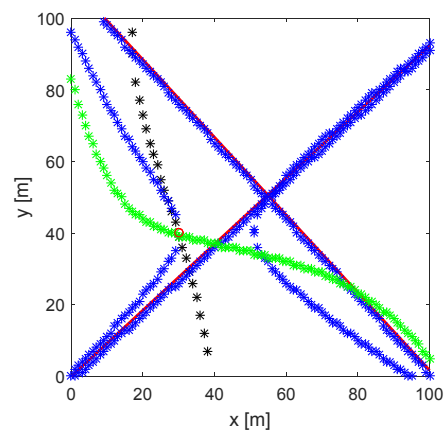
Wszystkie rysunki zamieszczone w tym punkcie wykonano dla jednakowych parametrów systemu, a mianowicie:

- współrzędne hydrofonów $(X_1, Y_1)=(-10, -10)$, $(X_2, Y_2)=(110, -10)$, $(X_3, Y_3)=(120, 110)$, $(X_4, Y_4)=(-10, 120)$ [m],
- współrzędne nadajnika $(x_0, y_0)=30, 40$ [m] (zaznaczone czerwonym kółkiem na rysunkach),
- moduł wektora prędkości $|v| = 2$ m/s,
- kąt nachylenia wektora prędkości $\beta = 70^\circ$,
- częstotliwość sygnału nadawanego $f_0 = 100$ kHz.

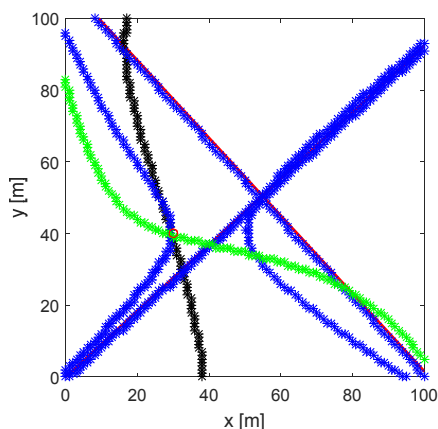
Przy takich parametrach odchyłki dopplerowskie wynoszą: $F_1 = -126$ Hz, $F_2 = -28$ Hz, $F_3 = 113$ Hz, $F_4 = 92$ Hz. Położenie nadajnika oznaczono czerwonym kółkiem. Proste fałszywych rozwiązań, o których będzie mowa w następnym punkcie narysowano czerwoną linią ciągłą.



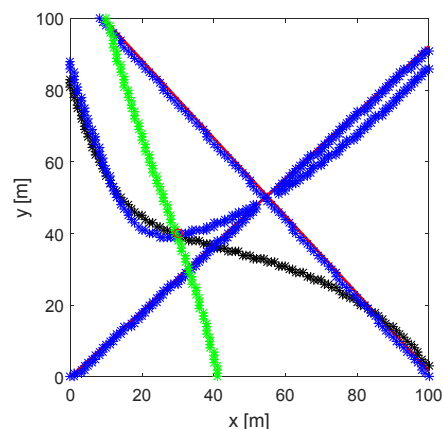
Rys. 3.8. Miejsca zerowe macierzy Vx , liczone względem kolumn.



Rys. 3.9. Miejsca zerowe macierzy Vx liczone względem wierszy.



Rys. 3.10. Miejsca zerowe macierzy Vx liczone względem wierszy i kolumn.



Rys. 3.11. Miejsca zerowe macierzy Vy liczone względem wierszy i kolumn.

Analogiczną procedurę stosuje się przy wyznaczaniu miejsc zerowych różnic prędkości Vy i otrzymujemy najpierw macierze $B1$ i $B2$, a następnie wspólną macierz B . Rezultat pokazano na rys. 3.11.

3.2.3. Eliminacja stałych fałszywych rozwiązań

Na powyższych rysunkach widoczne są miejsca zerowe różnic składowych prędkości układające się wzdłuż linii prostych. Taki sam układ różnic składowych prędkości występuje dla macierzy Vy . W obu przypadkach jest on niezależny od położenia nadajnika i jest stałym elementem określonego rozmieszczenia hydrofonów. Wynika on z zerowych wartości wyznaczników macierzy występujących w równaniach (3.8). Jak wiadomo, [32], równania o zerowej wartości wyznacznika nie mają jednoznacznego rozwiązania.

W DODATKU 2 wykazano, że wyznaczniki mają następującą trygonometryczną postać:

$$W_{kl} = \begin{vmatrix} a_k & b_k \\ a_l & b_l \end{vmatrix} = \sin(\alpha_k - \alpha_l), \quad k, l = 1, 2, 3, 4 \quad k \neq l \quad (3.12)$$

Zerowa wartość wyznacznika pojawia się, gdy $\alpha_k - \alpha_l = \pi$, czyli gdy węzeł siatki leży na prostej łączącej dwa hydrofony. Nie wszystkie proste leżą w obszarze obserwacji, co pokazano na rys. 3.12. Przy $\alpha_k - \alpha_l = 0$ wyznacznik również przyjmuje wartość zerową, jednak warunek ten odnosi się do sytuacji, gdy nadajnik też leży na prostej, lecz na zewnątrz odcinka łączącego hydrofony, co jest sprzeczne z założoną wersją systemu.

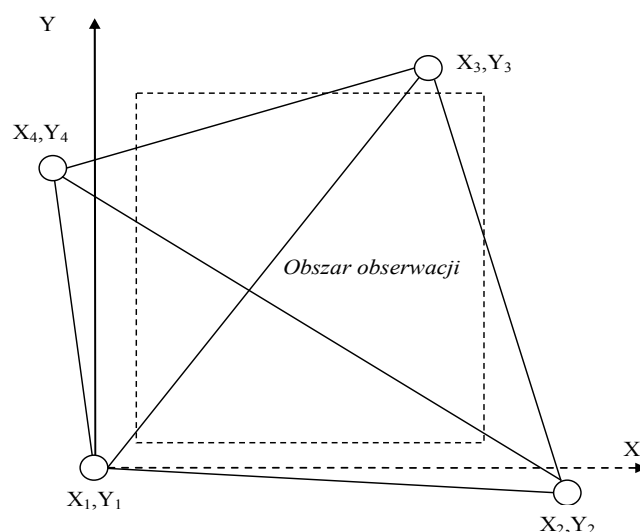
Między odchyłkami dopplerowskim przy zerowej wartości wyznacznika zachodzą następujące relacje:

$$F_1 \cong -\frac{f_0 v}{c} \cos(\beta - \alpha_1) \quad (3.13)$$

oraz

$$F_2 \cong -\frac{f_0 v}{c} \cos(\beta - \alpha_2) = -\frac{f_0 v}{c} \cos(\beta - \alpha_1 - \pi) = \frac{f_0 v}{c} \cos(\beta - \alpha_1) \quad (3.14)$$

z czego wynika, że odchyłki dopplerowskie mają jednakową wartość bezwzględną i przeciwne znaki.



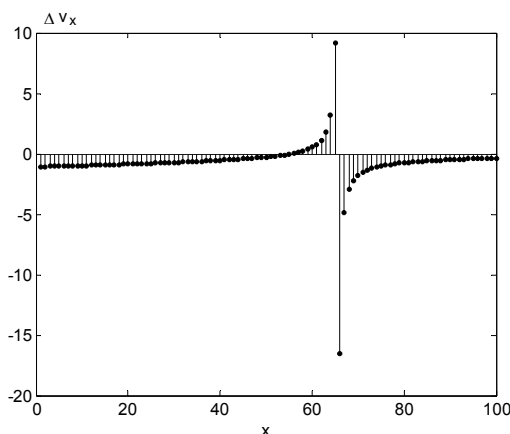
Rys. 3.12. Proste łączące hydrofony.

Na wcześniej pokazanych rysunkach położenia hydrofonów są tak dobrane, że w obszarze obserwacji występują tylko dwie proste. Na zamieszczonych poniżej rysunkach (rys. 3.14 i rys. 3.15) są to proste o kolorze czerwonym.

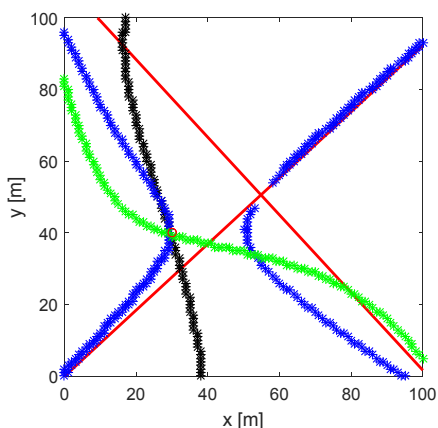
W celu wyeliminowania fałszywych rozwiązań, pojawiających się zawsze w sąsiedztwie omówionych wyżej prostych, uzupełniono procedurę wyznaczania miejsc zerowych różnic składowych prędkości o poszukiwanie nieciągłości występujących przy przekraczaniu wartości zerowej różnic składowych prędkości. Przykład takiej nieciągłości pokazano na rys. 3.13.

Uzupełnienie procedury opisanej w poprzednim punkcie polega na tym, że w każdym wierszu i w każdej kolumnie macierzy Vx wyznacza się wartości bezwzględne różnic składowych prędkości i stosuje się operację logiczną $u_f(m) = |Vx(m,n)| > p$ ($n = \text{const}$), gdzie p jest wartością progową, większą od występujących poza nieciągłościami wartości Vx . (na rys. 3.13 wartość p powinna być większa od 5). W rezultacie w ciągu wartości logicznych 0 występują dwie wartości logiczne 1 , wyznaczające poszukiwany punkt nieciągłości. Punkty te są eliminowane z obliczonych wcześniej miejsc zerowych zawartych w macierzach $A1$, $A2$ i A . Efekt skuteczności takiej procedury pokazano na rysunkach 3.14 i 3.15 w odniesieniu do sytuacji widocznej na rys. 3.10. i rys. 3.11.

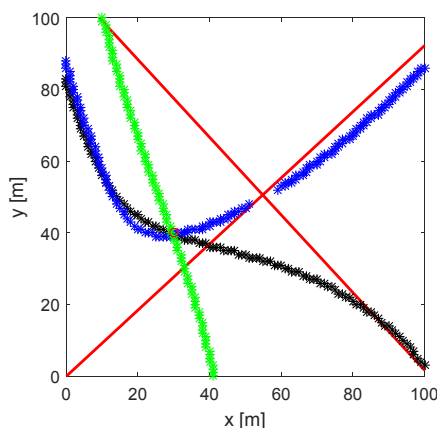
Analogiczne operacje stosuje się względem macierzy Vy , otrzymując macierz B pozbawioną fałszywych miejsc zerowych. Ostatnim krokiem omawianej procedury jest wyznaczenie wspólnych miejsc zerowych macierzy A i B , które są zapisywane w macierzy AB , w której współrzędne miejsc zerowych m i n odpowiadają wartościom 1 jej elementów.



Rys. 3.13. Różnica składowych prędkości z widocznym punktem nieciągłości.

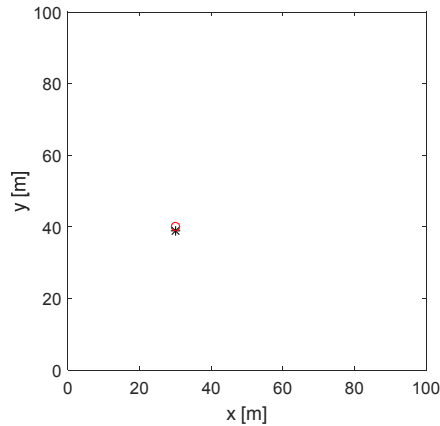


Rys. 3.14. Miejsca zerowe macierzy Vx po eliminacji fałszywych rozwiązań.



Rys. 3.15. Miejsca zerowe macierzy Vy po eliminacji fałszywych rozwiązań.

Kolejnym krokiem jest wyznaczanie wspólnych miejsc zerowych macierzy V_x i V_y , w wyniku czego otrzymujemy trzy macierze dwuwierszowe M_1 , M_2 i M_3 . W pokazywanym wyżej przykładzie, wszystkie macierze są równe i zawierają współrzędne jednego punktu, który jest prawdopodobnym położeniem nadajnika. Położenie tego punktu pokazano na rys. 3.16.

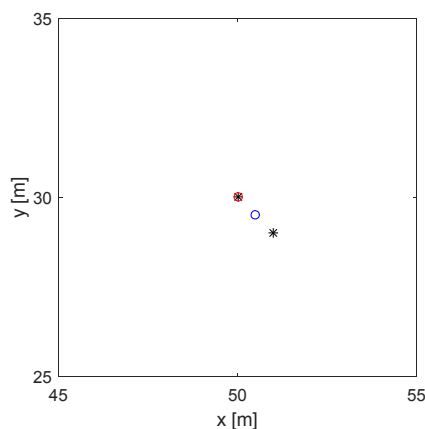


Rys. 3.16. Wspólne miejsca zerowe macierzy V_x i V_y reprezentujące prawdopodobne położenie nadajnika

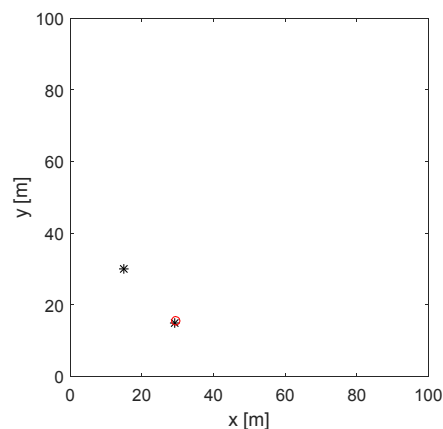
3.2.4. Wyznaczanie położenia nadajnika

Następną procedurą jest poszukiwanie wspólnych miejsc zerowych znajdujących się w macierzach M_1 , M_2 i M_3 . Wyznaczana jest macierz $W_{123}(M_1, M_2, M_3)$ zawierająca wspólne miejsca zerowe wszystkich macierzy oraz trzy macierze $W_{12}(M_1, M_2)$, $W_{13}(M_1, M_3)$, $W_{23}(M_2, M_3)$, w których umieszczone są współrzędne wspólnych miejsc zerowych dwóch macierzy. Miejsca zerowe w tych macierzach bywają takie same lub różne, a ich liczba również bywa taka sama lub różna. Współrzędne występujące w macierzach są następnie porządkowane rosnąco względem współrzędnej y .

Analizowana jest najpierw macierz W_{123} zawierająca wszystkie wspólne miejsca zerowe. Na zamieszczonych niżej rysunkach pokazano występujące przypadki zawartości tej macierzy: przypadek dwóch bliskich rozwiązań (rys. 3.17) i przypadek dwóch odległych rozwiązań (rys. 3.18)



Rys. 3.17. Dwa bliskie miejsca zerowe macierzy W_{123} .



Rys. 3.18. Dwa odległe miejsca zerowe macierzy W_{123} .

W przypadkach pokazanych na powyższych rysunkach podejmowane są następujące działania:

- jeżeli w macierzy W_{123} znajdują się jedna para współrzędnych, to jest ona traktowana jako położenie nadajnika,
- jeżeli w macierzy W_{123} znajdują się dwie pary współrzędnych, to obliczana jest ich odległość,
- jeżeli odległość ta jest mniejsza do podwojonej długości oczka siatki, to wyznaczone są średnie współrzędne i traktowane jako położenie nadajnika (niebieski punkt na rys. 3.18),
- jeżeli odległość ta jest większa do podwojonej długości oczka siatki, to wyznaczone współrzędne traktowane jako dwa domniemane położenia nadajnika (na rys. 3.19),
- jeżeli macierz W_{123} zawiera większą liczbę kolumn, to uruchamiana jest procedura śledzenia opisana w p. 3.2.5,
- jeżeli macierz W_{123} jest pusta, to analizowane są macierze W_{12} , W_{13} i W_{23} ,
- analiza tych macierzy realizuje takie same procedury, jak opisane wyżej dla macierzy W_{123} , a ich rezultatem jest wyznaczenie jednej lub dwu par współrzędnych nadajnika albo przejście do procedury śledzenia.

3.2.5. Procedura śledzenia ruchu nadajnika

W procedurze śledzenia przyjęto, analogicznie jak w wyżej opisanej procedurze, że wynikiem działania systemu są możliwe dwa równorzędne rozwiązania, co jest m.in. skutkiem niejednoznacznej zależności odchyłek dopplerowskich od położenia źródła dźwięku. Uruchamiana jest w przypadku, gdy w pewnym kroku obserwacji znaleziono położenie (lub domniemane położenia) nadajnika, a w następnym kroku położenie to nie zostało wyznaczone. Współrzędne wyznaczone w poprzednim kroku mogą być także wynikiem śledzenia. Jak powiedziano wcześniej, procedura śledzenia uruchamiana jest gdy macierz W_{123} lub macierze W_{12} , W_{13} i W_{23} nie zawierają rozwiązań lub mają więcej niż dwa rozwiązania.

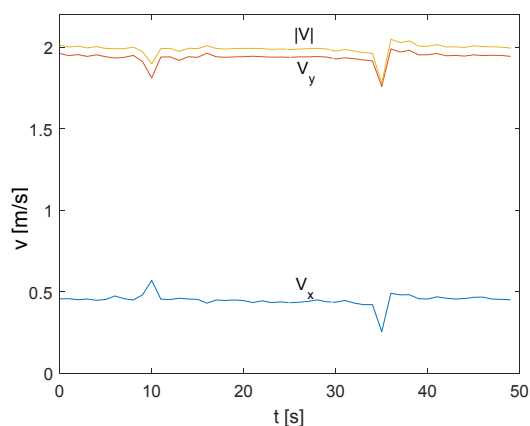
Procedura śledzenia ruchu nadajnika składa się z następujących czynności:

1. W każdym wyznaczonym punkcie położenia nadajnika wyznaczone są współrzędne wektora prędkości, w sposób podany punkcie 3.2.6 tego rozdziału.
2. Znając położenie nadajnika i składowe wektora prędkości w poprzednim kroku śledzenia, wyznacza się jego przypuszczalne położenie w bieżącym kroku.
3. Wyznaczane są następnie minima odległości między domniemanymi punktami położenia obiektu, a punktami znajdującymi się w macierzy W_{123} lub w macierzach W_{12} , W_{13} i W_{23} . Punkty, w których te minima występują, traktowane są jako przypuszczalne współrzędne nadajnika i program przechodzi w następnym kroku do wyznaczania położenia nadajnika według opisanej wyżej procedury.
4. W każdym kroku wyznaczana jest odległość między położeniem nadajnika w tym kroku a położeniem w kroku poprzednim. Jeżeli odległość ta jest większa od wynikającej z obliczonej prędkości, to jako położenie nadajnika przyjmuje się współrzędne wyznaczone w p. 2.

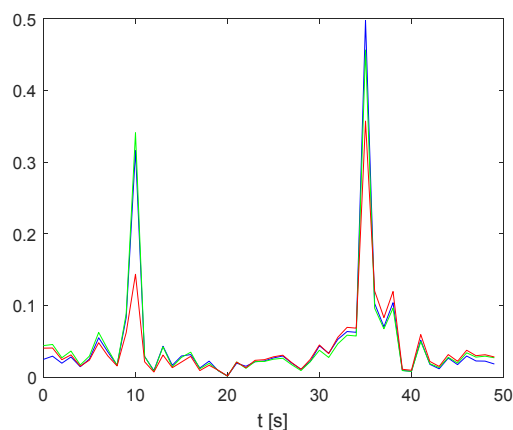
3.2.6. Wyznaczanie prędkości nadajnika

Prędkość nadajnika jest – obok jego położenia – użytecznym w praktyce rezultatem funkcjonowania systemu. Jest także wykorzystywana w opisaney wyżej procedurze śledzenia jego ruchu.

Składowe v_x i v_y wektora prędkości są wyznaczone w każdym kroku obserwacji z sześciu równań (3.8) i następnie uśredniane. Na rys. 3.19 pokazano wynik uśredniania składowych wektora prędkości i jego modułu dla prostoliniowego ruchu jednostajnego. Współrzędne punktu początkowego drogi nadajnika wynoszą $x_0 = 20$ m, $y_0 = 2$ m, a porusza się on z prędkością $|v| = 2$ m/s po torze nachylonym pod kątem $\beta = 77^\circ$. Na rys. 3.20 umieszczono wykresy standardowego odchylenia parametrów ruchu z poprzedniego rysunku.



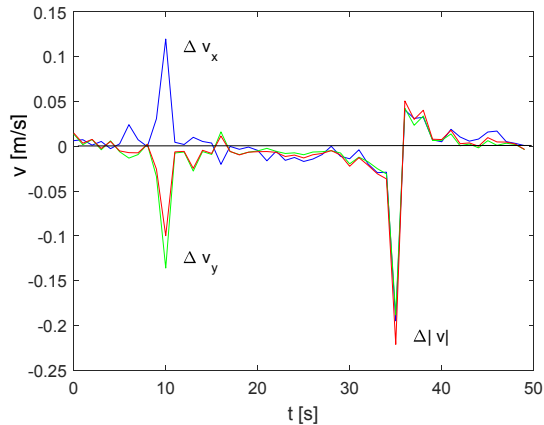
Rys. 3.19. Uśrednione składowe prędkości nadajnika



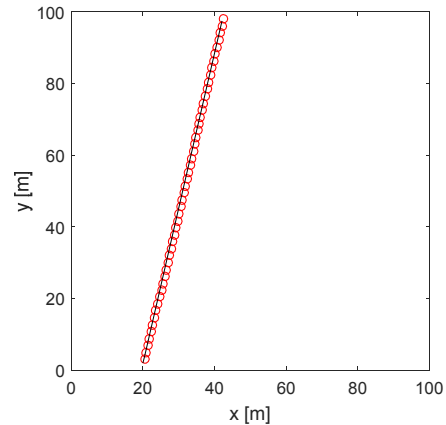
Rys. 3.20. Standardowe odchylenie składowych prędkości (linia czerwona - $|v|$, niebieska v_x , zielona - v_y)

Jak widać na rys. 3.20, składowe wektora prędkości nie odbiegają znacznie od założonych wartości. Niewielkie błędy pokazane na rys. 3.21 wynikają głównie z dyskretyzacji wyznaczanego położenia nadajnika; najczęściej nie znajduje się on w węzłach siatki (sąsiednie węzły są odległe o 1 m). Drugą przyczyną jest niedokładne obliczanie odchyłek dopplerowskich; są one wyznaczone z dokładnością 1 Hz. Rozrzuty wyników obliczeń składowych wektora prędkości w kolejnych krokach obserwacji ruchu nadajnika wynikają z tych samych przyczyn. Jak pokażemy dalej, błędy wyznaczania prędkości nie rzutują w dużym stopniu na jakość systemu. Dowodem tego jest rys. 3.22, na którym pokazano trasę nadajnika wyznaczoną jako całkę prędkości. Należy w tym miejscu zauważyć, że wyznaczanie położenia nadajnika na podstawie jego prędkości nie jest w ogólności możliwe, gdyż nie jest znane jego początkowe położenie. Na rys. 3.22 położenie początkowe wstawiono – w celu przejrzystości rysunku – z założonego przebiegu trasy. Jak pokazano jednak dalej całkowanie prędkości może w szczególnych wypadkach uzupełniać procedurę śledzenia.

Widoczne na rys. 3.19 i rys. 3.20 uskoki przebiegów składowych wektora prędkości występują w sąsiedztwie punktów przecięcia trasy nadajnika z prostymi łączącymi hydrofony, pokazanymi na rys. 3.14 i 3.15. W punktach tych występują nieciągłości przebiegu składowych prędkości, widoczne na rys. 3.13. Z rys. 3.22 widać, że w tym rodzaju ruchu nie wpływa to na poprawne wyznaczenie trasy nadajnika.

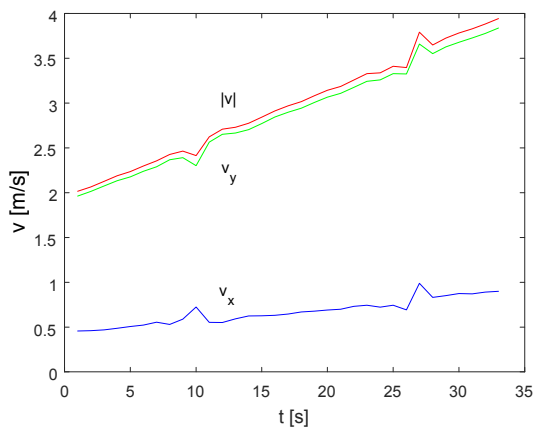


Rys. 3.21. Błędy składowych prędkości nadajnika.

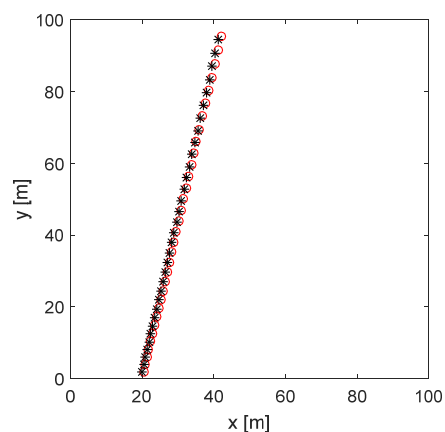


Rys. 3.22. Trasa nadajnika (*linia ciągła – trasa rzeczywista, czerwone kółka – trasa wyznaczona z prędkości*).

Na kolejnych rysunkach pokazano przebiegi składowych prędkości i trasy nadajnika dla prostoliniowego ruchu jednostajnie przyspieszonego (rys. 3.23 i rys. 3.24) oraz jednostajnego ruchu po krzywej sinusoidalnej (rys. 3.25 i rys. 3.26). Trasy nadajnika wyznaczono jako całki z prędkości. Potwierdzają one, że opisana wyżej procedura wyznaczania składowych wektora prędkości nadajnika jest skuteczna.



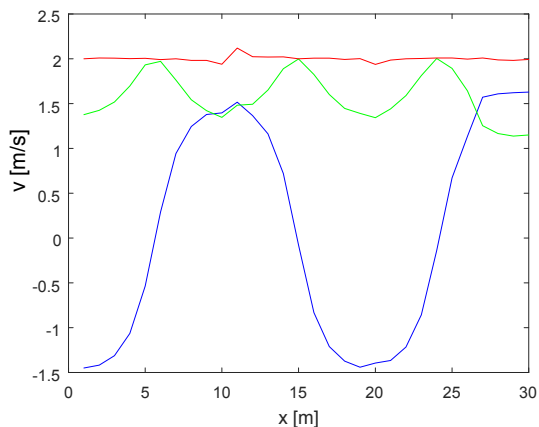
Rys. 3.23. Składowe prędkości nadajnika w ruchu jednostajnie przyspieszonym ($x_0=20$ m, $y_0=20$ m, $v_p=2$ m/s, $a=0.06$ m/s²).



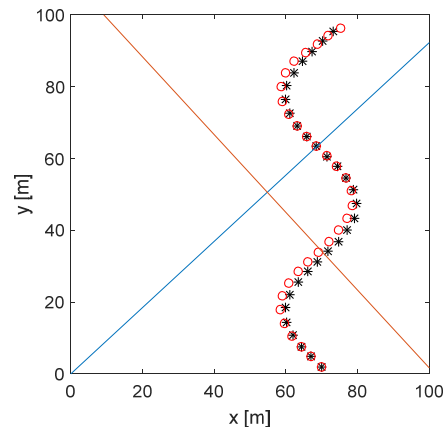
Rys. 3.24. Trasa nadajnika (*gwiazdki – trasa rzeczywista, czerwone kółka – trasa wyznaczona z prędkości*).

Pokazane wyżej przykłady dotyczą sytuacji, gdy oba wyznaczane tory ruchu nadajnika pokrywają się. Obu torom można wówczas przypisać prędkość jednego z nich, co też uczyniono na zademonstrowanych przykładach.

Jeżeli domniemane tory różnią się wyraźnie, można wyznaczać oddzielnie prędkości obiektu poruszającego się po tych torach. Przykłady takich sytuacji pokazano w następnym podrozdziale.



Rys. 3.25. Składowe prędkości nadajnika. w ruchu jednostajnym po torze sinusoidalnym (oznaczenia jak na rys. 3.23).

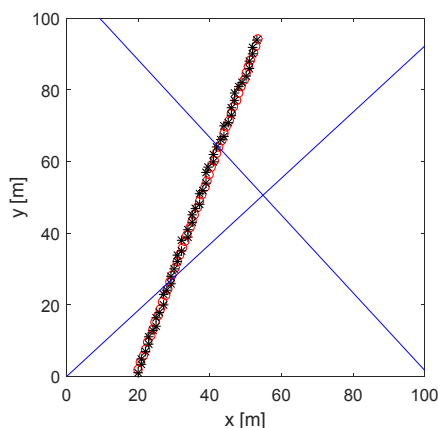


Rys. 3.26. Trasa nadajnika (gwiazdki – trasa rzeczywista, czerwone kółka – trasa wyznaczona z prędkości).

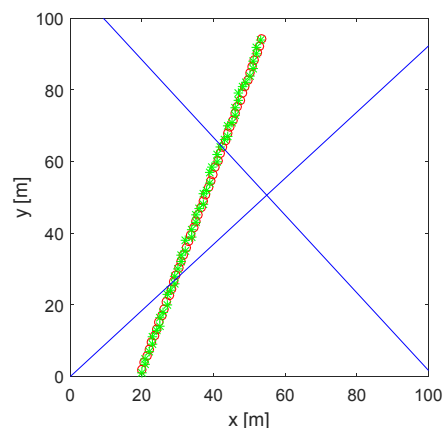
3.3. Badania symulacyjne systemu

Z właściwości zjawiska Dopplera wynika, że w systemie mogą występować co najmniej dwa domniemane położenia nadajnika. Ponadto niejednoznaczności mogą pojawić się gdy tor nadajnika przecina proste łączące hydrofony. Należy zatem zbadać w jakich sytuacjach problemy takie się pojawiają i sprawdzić, czy i w jakim stopniu opisany wyżej program problemy te rozwiązuje. Przedstawione niżej badania symulacyjne wykonano przy założeniu, że odchyłki dopplerowskie wyznaczone są z dokładnością 1 Hz, wynikającą z okresu kroku obserwacji równego $T=1$ s, stosowanego w modelu doświadczalnym systemu. Ma to wpływ na błędy w funkcjonowaniu systemu, które zostaną omówione w następnym podrozdziale.

Jak powiedziano wcześniej, procedury realizowane w programie zakładają możliwość wystąpienia dwóch równoważnych rozwiązań. W niektórych sytuacjach rozwiązania takie pokrywają się w części lub we wszystkich krokach obserwacji ruchu nadajnika, a w innych są rozdzielne. Na rys. 3.27 i rys. 3.28 pokazano przykłady pokrywających się, nierozdzielnych rozwiązań.



Rys. 3.27. Pierwszy tor ruchu nadajnika.



Rys. 3.28. Drugi tor ruchu nadajnika.

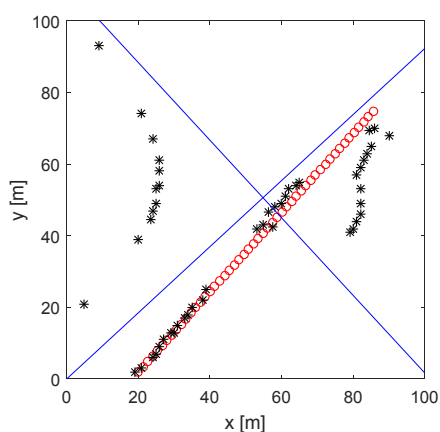
Na rysunkach tych nadajnik porusza się po linii prostej ze stałą prędkością $|v|=2$ m/s. Rzeczywiste, chwilowe położenia nadajnika oznaczone są czerwonymi kółkami, a wyznaczone położenia – gwiazdkami. Proste łączące hydrofony narysowane są liniami ciągłymi. Dwa rozwiązania oznaczone są gwiazdkami o różnym kolorze: jedno rozwiązaniem kolorem czarnym, a drugie kolorem zielonym. Jak widać, rozwiązania się praktycznie nie różnią.

W 50-ciu krokach programu wykonującego powyższe rysunki wystąpiły następujące zdarzenia:

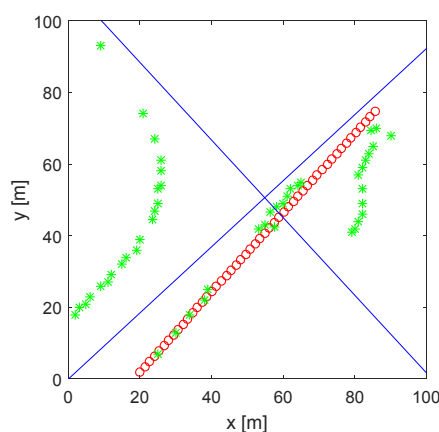
- macierz W_{123} była 7 razy pusta – obliczenia wykonywane były na macierzy W_{12} , W_{13} i W_{23} ,
- macierz W_{123} 7 razy miała dwa bliskie rozwiązania – wykonywane było uśrednianie,
- program ani razu nie wykonywał procedury śledzenia.
- wszystkie rozwiązania dla toru pierwszego i drugiego były równe.

Należy zauważyć, że przekraczanie prostych łączących hydrofony przez tor nadajnika nie spowodowało błędów określania jego pozycji.

Sytuacja pokazana na zamieszczonych wyżej rysunkach jest pozbawiona niejednoznacznych rozwiązań. Występuje ona wtedy, gdy nachylenie torów ruchu nadajnika nie jest równoległe lub prawie równoległe do prostych łączących hydrofony. W przeciwnym wypadku wyznaczane są dwa tory, z których jeden pokrywa się z torem ruchu nadajnika, a drugi jest fałszywy. Zamieszczone niżej rysunki ilustrują przykład, gdy nadajnik porusza się ruchem jednostajnym z prędkością $|v|=2$ m/s, po torze prostoliniowym nachylonym pod kątem 48° względem osi X . Na rys. 3.29 i rys. 3.30 pokazano oba wyznaczone, domniemane tory nadajnika.

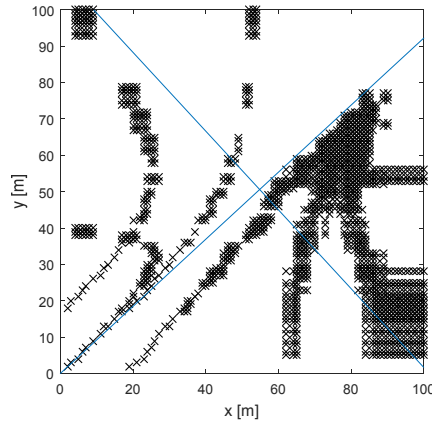


Rys. 3.29. Pierwszy tor ruchu nadajnika.



Rys. 3.30. Drugi tor ruchu nadajnika.

Jak wynika z przedstawionych rysunków, opisane wyżej procedury wyznaczania położenia nadajnika zawodzą w omawianym tu przypadku. Przypadek ten jest szczególnie trudny ze względu na bardzo dużą liczbę potencjalnych rozwiązań znajdujących się w macierzy W_{123} . Pokazano je na rys. 3.31.

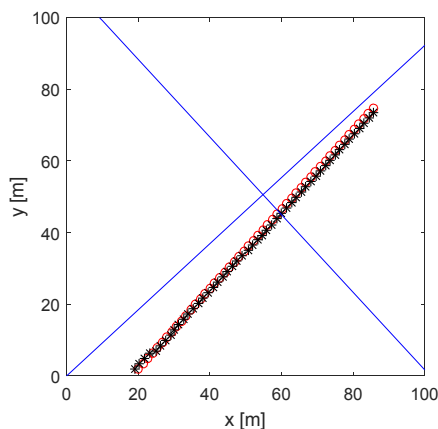


Rys. 3.31. Wszystkie rozwiązania w macierzy W .

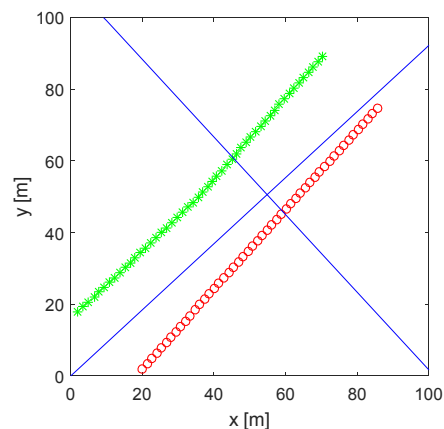
Przyczyną nieskuteczności procedury śledzenia jest jej działanie tylko w jednym kroku programu. Błędny wynik w tym kroku powoduje często fałszywe wyniki w kroku następnym i błąd może się nawarstwiać w kolejnych krokach. W celu eliminacji potencjalnych błędów procedury śledzenia uzupełniono ją o następujące operacje:

- W każdym kroku obserwacji obliczana jest odległość między wyznaczonym położeniem nadajnika w tym kroku i kroku poprzednim.
- Jeżeli odległość ta jest większa od wielkości modułu prędkości pomnożonej przez wyznaczony doświadczalnie współczynnik, to jako położenie nadajnika przyjmuje się współrzędne obliczone w poprzednim kroku powiększone o iloczyn składowych wektora prędkości przez okres kroku.
- Jeżeli odległość ta jest mniejsza od obliczonej z prędkości, to pozostawia się wyznaczone współrzędne położenia nadajnika.

Powyższa procedura wykorzystuje w niektórych krokach, pokazaną wcześniej, metodę całkowania prędkości. Rys. 3.32 i rys. 3.33 ilustrują rezultaty działania uzupełnionej procedury śledzenia w odniesieniu do sytuacji widocznej na rys. 3.29 i rys. 3.30.



Rys. 3.32. Pierwszy tor ruchu nadajnika po uzupełnieniu procedury śledzenia.

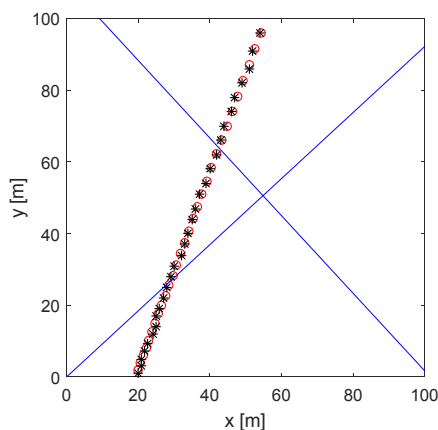


Rys. 3.33. Drugi tor ruchu nadajnika po uzupełnieniu procedury śledzenia.

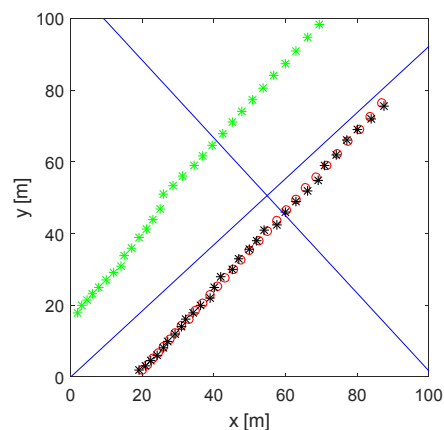
Na powyższych rysunkach widoczna jest w pełni niejednoznaczność w określaniu toru ruchu nadajnika, charakterystyczna przy wykorzystaniu efektu Dopplera. Niejednoznaczności występujące w omawianym systemie nie przekreślają jego użyteczności. Operator systemu może bowiem podjąć decyzję, który z torów odnosi się do rzeczywistego obiektu kierując się następującymi przesłankami:

- jeżeli położenie początkowe obiektu jest w przybliżeniu znane odrzuca się tor o wyraźnie różnym położeniu początkowym,
- jeżeli obszar obserwacji ma charakter toru wodnego, eliminuje się tory rozpoczynające się z brzegu toru (zielony tor na rys. 3.33),
- program podaje liczbę kroków, w którym położenie nadajnika jest wyznaczone metodą całkowania prędkości; w rzeczywistym torze liczba ta jest z reguły mniejsza (na zamieszczonych wyżej rysunkach liczba ta jest równa 24 na lewym i 40 na prawym),
- porównując rys. 3.29 z rys. 3.32 zauważa się większe podobieństwo tych rozwiązań, niż widocznych na rys. 3.30 i rys. 3.33.

System działa poprawnie także dla innych rodzajów ruchu. Dla przykładu na rysunkach 3.34 i 3.35 pokazano jego funkcjonowanie przy prostoliniowym ruchu jednostajnie przyspieszonym. Prędkość początkowa wynosi $|v|=2$ m/s, a przyspieszenie $a=0.1$ m/s².



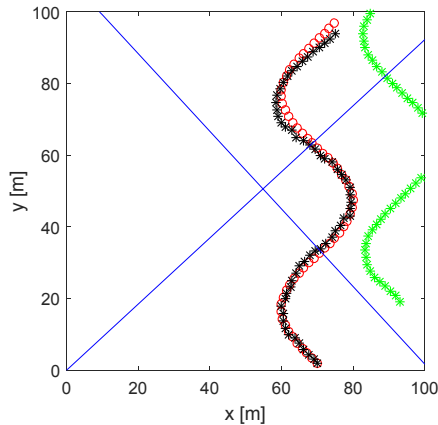
Rys. 3.34. Ruch jednostajnie przyspieszony, prostoliniowy o nachyleniu toru 70° .



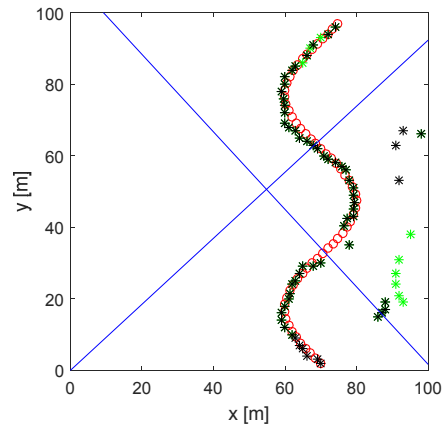
Rys. 3.35. Ruch jednostajnie przyspieszony, prostoliniowy o nachyleniu toru 48° .

W sytuacji widocznej na rys. 3.34 oba tory pokrywają się. Na rys. 3.35 pojawia się niejednoznaczność, charakterystyczna dla torów prawie równoległych do prostych łączących hydrofony.

Przykład ruchu po torze sinusoidalnym pokazano na rysunkach 3.36 i 3.37. Nadajnik porusza się ze stałą prędkością liniową $|v|=2$ m/s, a odchylenie od toru prostoliniowego wynosi ± 10 m.

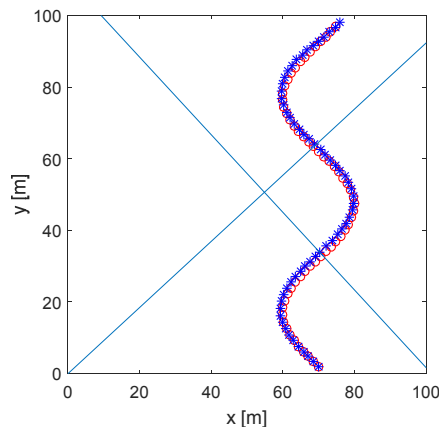


Rys. 3.36. Ruch po torze sinusoidalnym, z uzupełnioną procedurą śledzenia.



Rys. 3.37. Ruch po torze sinusoidalnym bez uzupełnionej procedury śledzenia.

Jak widać na rys. 3.36 rozwiązania są niejednoznaczne, przy czym jeden z wyznaczonych torów nie różni się istotnie od toru rzeczywistego. Wytypowanie właściwego toru nie przysparza trudności, jeśli porówna się rys. 3.36 z rys. 3.37. Tor zaznaczony zielonymi gwiazdkami na rys. 3.36 prawie w całości został wyznaczony z zastosowaniem procedury całkowania prędkości. Na 60 kroków obserwacji tylko 2 pierwsze zostały wyznaczone bez tej procedury. Tor zaznaczony czarnymi gwiazdkami na rys. 3.36 w połowie kroków jest wyznaczony bez całkowania. W procedurze całkowania prędkości kluczowe znaczenie ma bezbłędne wyznaczenie położenia początkowego. Dowodzi tego rys. 3.38, na którym tor nadajnika otrzymano wyłącznie na drodze całkowania prędkości przy prawidłowo wyznaczonym położeniu początkowym. Odchylenia od rzeczywistego toru są mniejsze od toru pokazanego na rys. 3.36.



Rys. 3.38. Tor sinusoidalny wyznaczony przez całkowanie prędkości nadajnika.

Reasumując badania symulacyjne opisywanego wyżej systemu nawigacyjnego można stwierdzić, że opracowana metoda wyznaczania położenia i prędkości z odchyłek dopplerowskich daje oczekiwane, prawidłowe wyniki.

Badania symulacyjne wykonywano na personalnym komputerze z procesorem Intel Core i7 – 3370 @3.4 GHz w środowisku MATLAB® R2016a. Czas wykonywania obliczeń w jednym kroku o okresie 1 s wynosił 0,67 s, co oznacza, że w praktyce system może pracować w czasie rzeczywistym. Czas obliczeń nie obejmuje wyznaczania widma odchyłek dopplerowskich, który nie przekracza 0,1 s.

3.4. Błędy obliczeń numerycznych

3.4.1. Błędy spowodowane rozdzielczością widma odchyłek dopplerowskich

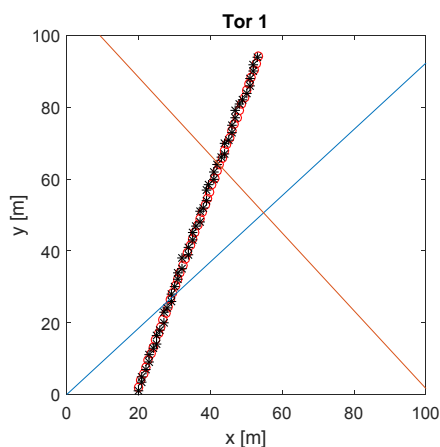
Przyczyny błędów w funkcjonowaniu opisywanego systemu są dwojakiego rodzaju, a mianowicie wynikają z zastosowanej metody obliczeń lub z wpływu zjawisk propagacyjnych w akwenu, w którym system jest eksploatowany. W tym miejscu zostaną omówione błędy związane z metodą obliczeń, zaś błędy wynikające z propagacji fali akustycznej przedstawiono w rozdziale 5.

Oczywistą przyczyną błędów w określaniu położenia i prędkości nadajnika jest przyjęta siatka obliczeń numerycznych; położenie i prędkość nadajnika wyznaczone są bowiem wyłącznie w węzłach tej siatki. Zakładając, że położenie nadajnika jest wyznaczone w najbliższym węźle siatki o boku 1 m, błąd średniokwadratowy względem jego rzeczywistego położenia wynosi 38.4 cm. Taka niewielka wartość błędu może być zaakceptowana w przewidywanych zastosowaniach systemu. Można ją zmniejszyć stosując gęstszą siatkę, co pokazano w rozdziale 4.

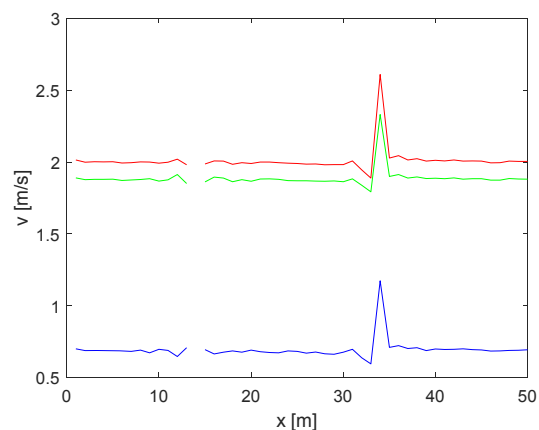
Drugą, ważniejszą przyczyną błędów jest naturalna niedoskonałość opracowanych algorytmów wyznaczania różnic składowych prędkości. Miejsca geometryczne wartości zerowych trzech macierzy V_x i trzech macierzy V_y (przykłady pokazano na rys. 3.15 i 3.16) występują wyłącznie w węzłach siatki, a więc nie są dokładnie położeniami tych miejsc zerowych wynikających z odchyłek dopplerowskich. Rezultatem tego może być brak wspólnych miejsc zerowych lub ich liczba większa od jedności. Opracowane algorytmy w znacznej większości przypadków eliminują wynikające stąd błędy, lecz - zwłaszcza w sąsiedztwie prostych łączących hydrofony - mogą być one przyczyną znacznych błędów.

Błędy określania położenia i prędkości nadajnika są także spowodowane rozdzielczością widma odchyłek dopplerowskich, która wynosi w badaniach symulacyjnych 1 Hz. Przeprowadzono badania pod tym kątem, a typowe ich wyniki przedstawiono na zamieszczonych niżej rysunkach.

Na rys. 3.39 pokazano wyniki wyznaczania toru nadajnika w jednostajnym ruchu prostoliniowym, a na rys. 3.40 – składowe prędkości ruchu nadajnika. Rozdzielczość widma wynosiła 1 Hz. Widoczna jest luka na wykresach prędkości, co oznacza, że program w tych punktach nie znalazł wspólnych miejsc zerowych prędkości. Położenie nadajnika i jego prędkość zostają wtedy wyznaczone metodą predykcji, w której zakłada się, że parametry ruchu w następnym kroku są równe tym parametrom w kroku bieżącym. Błędy pomiaru położenia nadajnika przedstawiono na rys. 3.41, a błędy modułu prędkości – na rys. 3.42.



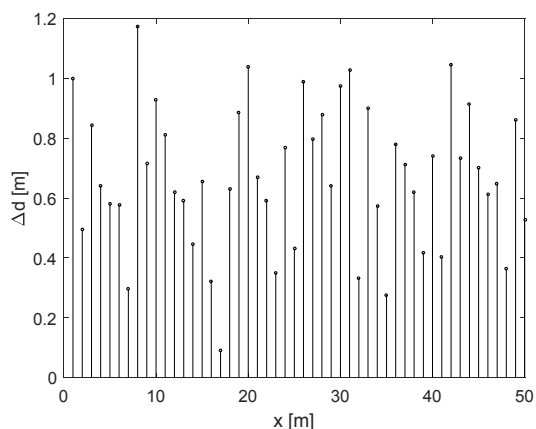
Rys. 3.39. Tor prostoliniowego ruchu jednostajnego. ($\Delta f=1$ Hz, $x_0=20$ m, $y_0=2$ m, $|v|=2$ m/s,



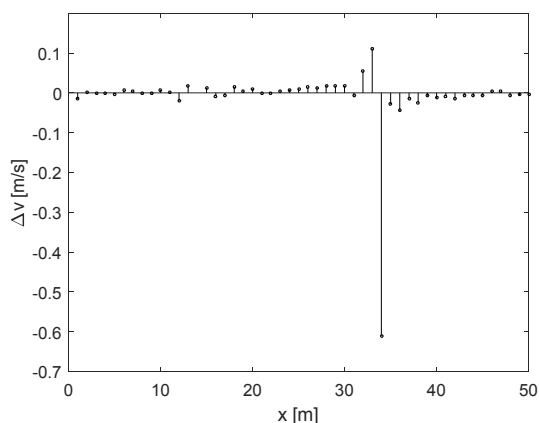
Rys. 3.40. Składowe wektora prędkości (linia: czerwona - $|v|$, zielona - v_y , niebieska -

v_x).

$\beta=70^\circ$).



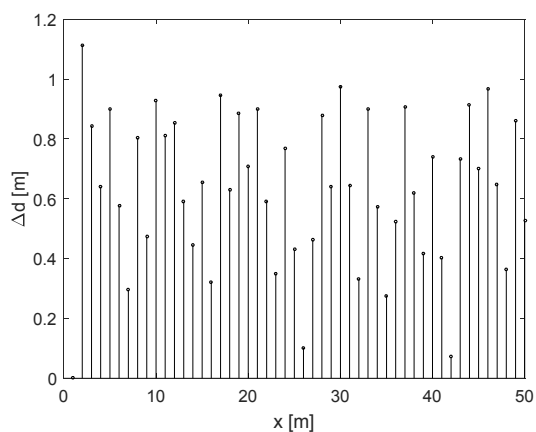
Rys. 3.41. Błędy pomiaru położenia ($\Delta f=1$ Hz).



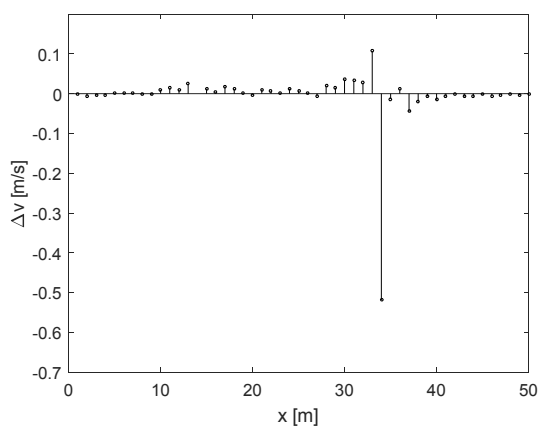
Rys. 3.42. Błędy pomiaru prędkości ($\Delta f=1$ Hz).

Wartość średnia błędów pomiaru położenia nadajnika wynosi 0.67 m, a wartość średnia błędów pomiaru modułu wektora prędkości 0.10 m/s. Wspomniany wyżej brak rozwiązań nie spowodował wzrostu błędów pomiaru położenia i prędkości, co świadczy o skuteczności zastosowanego sposobu predykcji. Duże błędy pomiaru prędkości związane są z okolicą przecięcia się toru nadajnika z prostą łączącą hydrofony.

Na rys. 3.43 i rys. 3.44 pokazano wykresy błędów pomiaru położenia i prędkości, gdy odchyłki dopplerowskie (przy tych samych parametrach ruchu nadajnika) są wyznaczone numerycznie z dokładnością obliczeń w środowisku MATLAB[®] (2^{-23}). Ponieważ wykresy toru nadajnika i jego prędkości nie wykazują dostrzegalnych zmian w stosunku do pokazanych na rys. 3.39 i rys. 3.40, zrezygnowano z ich prezentacji.



Rys. 3.43. Błędy pomiaru odległości (środowisko MATLAB[®], $\Delta f=2^{-23}$ Hz).

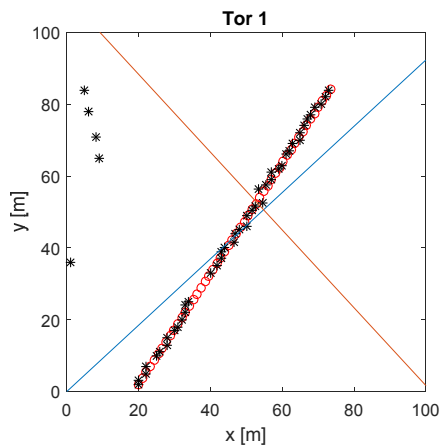


Rys. 3.44. Błędy pomiaru prędkości (środowisko MATLAB[®], $\Delta f=2^{-23}$ Hz).

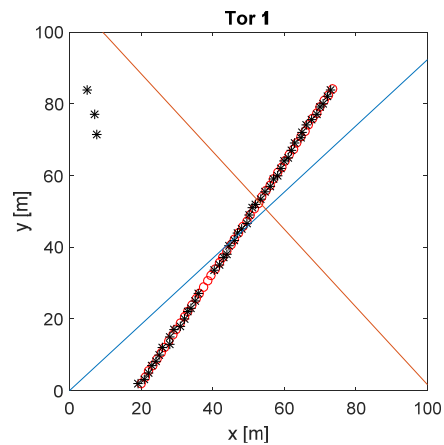
Wartość średnia błędów pomiaru położenia nadajnika wynosi w tym przypadku 0.63 m, a więc nie różni się praktycznie od wartości uzyskanej przy rozdzielczości widma 1 Hz. Wartość średnia błędu pomiaru modułu wektora prędkości wynosi 0.06 m/s i jest blisko dwukrotnie mniejsza niż w pomiarach przy rozdzielczości widma 1 Hz. Średni błąd pomiaru położenia w obu wypadkach jest tylko nieznacznie większy od teoretycznej wartości wynikającej z rozmiarów siatki (0.3 m). Średni błąd pomiaru prędkości jest również niewielki i nie ma technicznego znaczenia w przewidywanych zastosowaniach systemu.

W poprzednim podrozdziale pokazano, że w szczególnych wypadkach system może wyznaczać w niektórych krokach obserwacji fałszywe położenia nadajnika. Na zamieszczo-

nych niżej rysunkach widoczny jest wpływ rozdzielczości widma odchyłek dopplerowskich na te niekorzystne przypadki funkcjonowania systemu. Na rys. 3.45 widoczny jest tor wyznaczony przy rozdzielczości widma 1 Hz, a na rys. 3.46 – przy rozdzielczości obliczeń z precyzją środowiska MATLAB®.



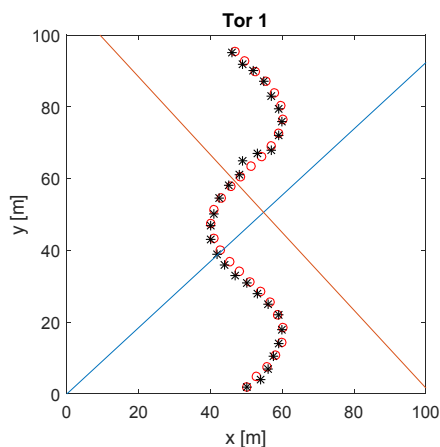
Rys. 3.45. Tor prostoliniowego ruchu jednostajnego przy rozdzielczości widma 1 Hz ($\Delta f=1$ Hz, $x_0=20$ m, $y_0=2$ m, $|v|=2$ m/s, $\beta=57^\circ$).



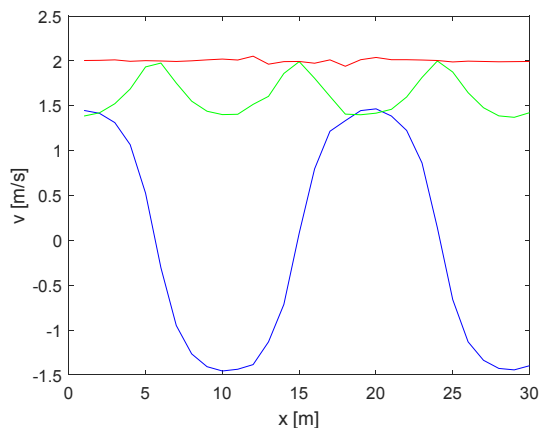
Rys. 3.46. Tor prostoliniowego ruchu jednostajnego przy rozdzielczości obliczeń środowiska MATLAB ($\Delta f=2^{-23}$ Hz).

Widoczny jest korzystny wpływ poprawy rozdzielczości widma odchyłek dopplerowskich. Objawia się on mniejszą liczbą fałszywych rozwiązań (z 5 do 3) oraz zmniejszeniem błędów pomiaru położenia nadajnika. Średni błąd (z pominięciem fałszywych rozwiązań) wynosi przy rozdzielczości 1 Hz 0.78 m, a przy maksymalnej precyzji 0.56 m. Odchylenie standardowe błędów zmniejszyło się z 0.41 m do 0.23 m. Liczne przeprowadzone symulacje wykazały jednak, że opisana tendencja nie jest stała; zdarzają się sporadycznie wypadki, gdy liczba fałszywych rozwiązań nie maleje przy większej rozdzielczości widma, a nawet bywa większa.

Badania wpływu rozdzielczości pomiaru widma na błędy wyznaczania położenia i prędkości nadajnika przeprowadzono dla różnych torów nadajnika. Na zamieszczonych niżej rysunkach pokazano przykładowy wynik takich badań dla toru sinusoidalnego ze stałą prędkością liniową. Na rys. 3.47 widoczny jest tor takiego ruchu, a na rys. 3.48 – składowe prędkości nadajnika wyznaczone dla rozdzielczości widma $\Delta f=1$ Hz.

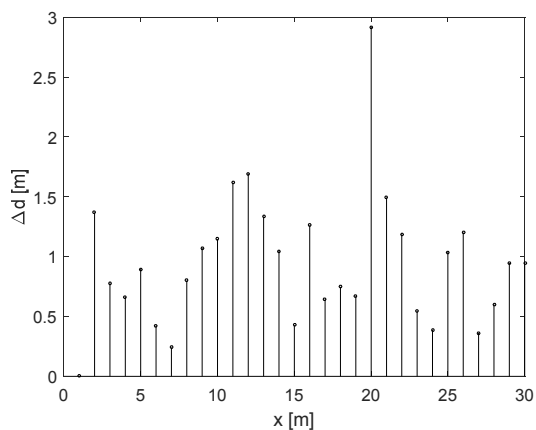


Rys. 3.47. Tor sinusoidalny. ($\Delta f=1$ Hz, $x_0=50$ m, $y_0=2$ m $|v|=2$ m/s, amplituda 10 m).

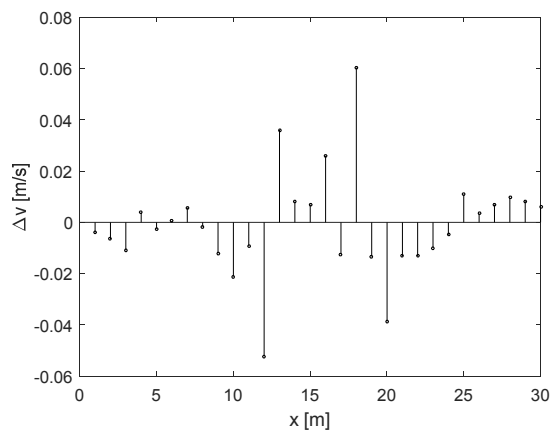


Rys. 3.48. Składowe wektora prędkości (linia: czerwona - $|v|$, zielona - v_y , niebieska - v_x).

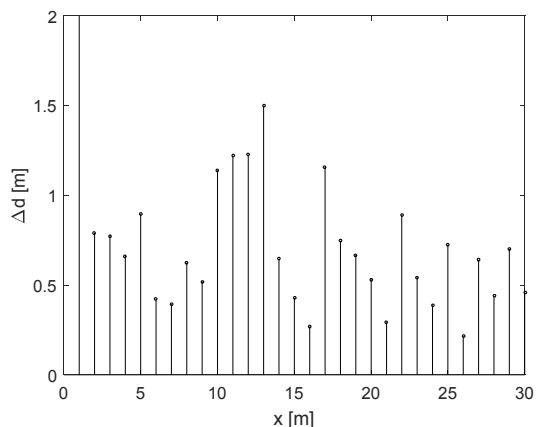
Błędy wyznaczonego położenia nadajnika są widoczne na rys. 3.49, a błędy składowych wektora prędkości – na rys. 3.50. Na kolejnych rysunkach pokazano analogiczne błędy przy rozdzielczości widma uzyskiwanej w środowisku MATLAB®.



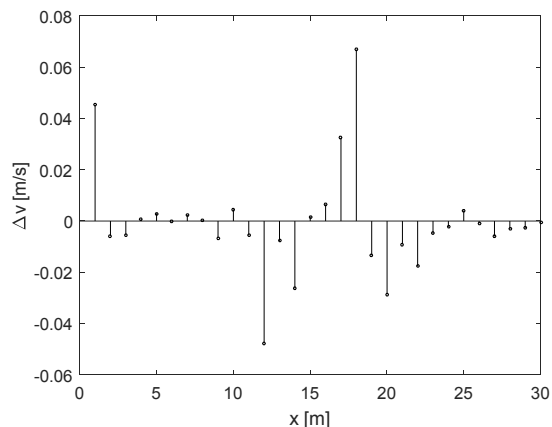
Rys. 3.49. Błędy pomiaru położenia ($\Delta f=1$ Hz).



Rys. 3.50. Błędy pomiaru prędkości ($\Delta f=1$ Hz).



Rys. 3.51. Błędy pomiaru położenia ($\Delta f=2^{23}$ Hz)



Rys. 3.52. Błędy pomiaru prędkości ($\Delta f=2^{23}$ Hz).

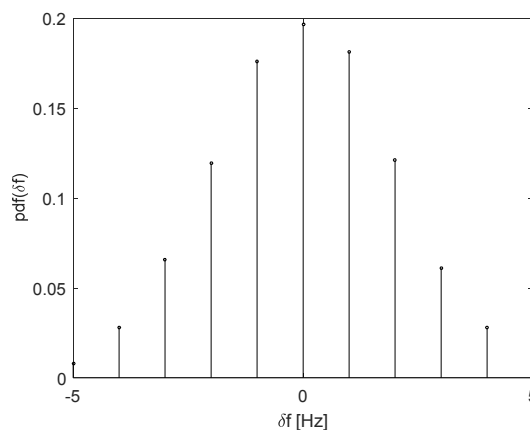
Przy rozdzielczości widma 1 Hz średni błąd wyznaczenia położenia wynosi 0.95 m, a jego odchylenie standardowe 0.56 m. Średni błąd prędkości jest równy -0.001 m/s, a jego odchylenie standardowe 0.02 m/s. Przy bardzo dużej rozdzielczości średni błąd położenia nadajnika jest równy 0.69 m, a jego odchylenie standardowe – 0.32 m. Średni błąd prędkości wynosi 0.002 m/s, a odchylenie standardowe – 0.02 m/s. Wynika stąd, że występuje nieznaczna poprawa wartości błędu położenia i nieznaczne pogorszenie parametrów wyznaczania prędkości.

Reasumując wyniki badań nad wpływem rozdzielczości widma odchyłek dopplerowskich na błędy położenia i prędkości nadajnika można stwierdzić, że rozdzielczość 1 Hz wynikająca z okresu pomiarów nie jest źródłem błędów pogarszających walory eksploatacyjne systemu.

3.4.2. Wpływ błędów pomiaru odchyłek dopplerowskich na parametry systemu

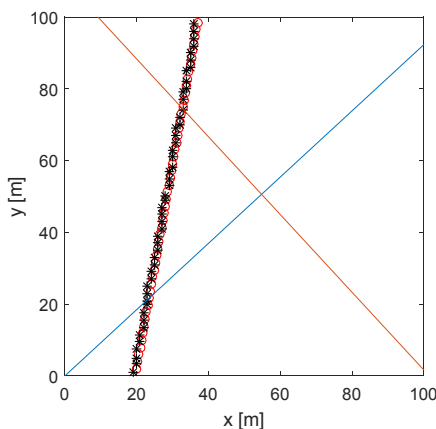
Działanie systemu opiera się na wyborze z widma odchyłek dopplerowskich częstotliwości odpowiadającej położeniu początkowemu nadajnika w każdym kroku obserwacji. Wybór ten jest dokonywany automatycznie na podstawie pomiaru wysokości prążków widma.

Na wysokość tych prążków mają wpływ zakłócenia występujące w systemie, co pokazane będzie w rozdziale 5. Poniżej opisany zostanie wpływ błędnego wyboru odpowiedniej odchyłki dopplerowskiej na błędy wyznaczania położenia i prędkości nadajnika. W tym celu zmieniane będą w sposób przypadkowy częstotliwości odchyłek dopplerowskich wyznaczone, z podanych wyżej, zależności teoretycznych. Założono przy tym, że wprowadzane częstotliwości będą miały rozkład gaussowski o przyjętym odchyleniu standardowym σ i wartości średniej równej odchyłce teoretycznej. Zachowano ponadto, zakładaną w systemie, rozdzielczość pomiaru częstotliwości równą 1 Hz. W celu jednoznacznej oceny błędów ograniczono się do jednostajnego ruchu prostoliniowego, w przypadku którego nie występują znaczne błędy położenia i prędkości. Błędy częstotliwości będą wprowadzane niezależnie w każdym kroku obserwacji. Przykładowy rozkład gęstości prawdopodobieństwa błędów częstotliwości δf pokazano na rys. 3.53.

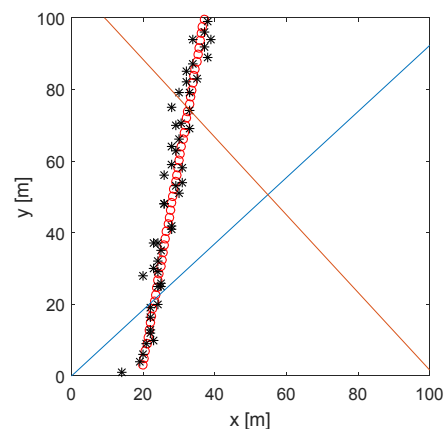


Rys. 3.53. Rozkład gęstości prawdopodobieństwa błędów częstotliwości odchyłek dopplerowskich ($\sigma = 2$).

Wpływ błędów częstotliwości odchyłek dopplerowskich na wyznaczanie położenia i prędkości nadajnika ilustrują poniższe rysunki. Na rys. 3.54 pokazano obliczony tor ruchu nadajnika, gdy odchyłki dopplerowskie są wyznaczone z rozdzielczością 1 Hz. Na rysunku obok widoczny jest tor, gdy do odchyłek dopplerowskich dodano błędy o standardowym odchyleniu $\sigma = 2$. Rozkład gęstości prawdopodobieństwa tych błędów pokazano na rys. 3.53 (wyznaczony numerycznie z 10 000 realizacji). Na obu rysunkach nadajnik porusza się z prędkością $|v| = 2$ m/s pod kątem $\beta = 81^\circ$.

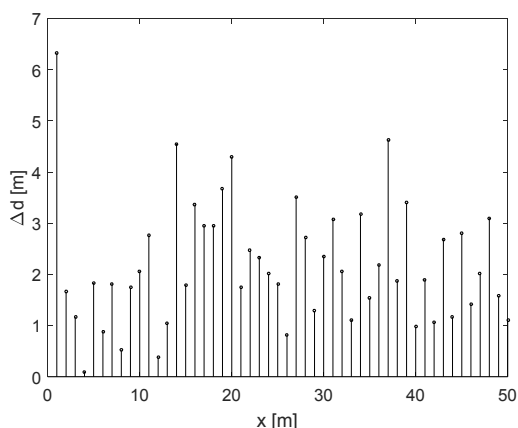


Rys. 3.54. Tor nadajnika przy $\sigma = 0$.

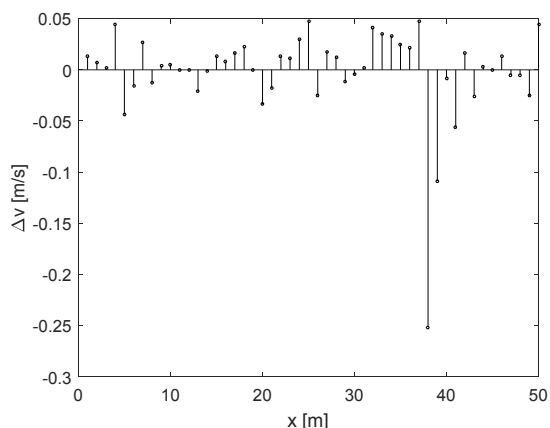


Rys. 3.55. Tor nadajnika przy $\sigma = 2$.

Błędy pomiaru położenia nadajnika dla ruchu z rys. 3.55 pokazano na rys. 3.56, a błędy pomiaru modułu prędkości – na rys. 3.57.



Rys. 3.56. Błędy pomiaru położenia nadajnika.



Rys. 3.57. Błędy pomiaru prędkości.

Odchylenia od rzeczywistego toru nadajnika są względnie duże, lecz nie powinny przysparzać operatorowi trudności w śledzeniu jego ruchu.

W celu ogólnego zbadania wpływu wielkości błędów pomiaru odchyłek dopplerowskich na określenie położenia i prędkości nadajnika wykonano szereg symulacji dla różnych wartości odchylenia standardowego błędów częstotliwości odchyłek i różnych prędkości nadajnika. Wyniki zamieszczono w tabelicy 3.1.

Tabela 3.1. Parametry statystyczne błędów pomiaru położenia nadajnika ($E(d)$ – wartość średnia, σ_d - odchylenie standardowe)

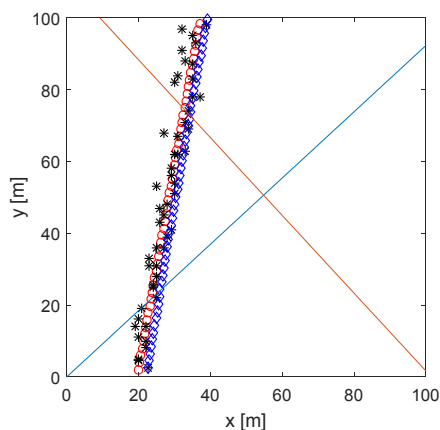
| δf [Hz] | $ v =1$ m/s | | $ v =2$ m/s | | $ v =3$ m/s | |
|--------------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
| | $E(d)$ | σ_d | $E(d)$ | σ_d | $E(d)$ | σ_d |
| 0.5 | 1.4 | 0.8 | 0.8 | 0.4 | 0.8 | 0.4 |
| 1 | 2.1 | 1.2 | 1.2 | 0.7 | 1.0 | 0.4 |
| 2 | 4.0 | 2.5 | 2.2 | 1.2 | 1.5 | 0.9 |
| 3 | 6.0 | 3.6 | 3.1 | 1.9 | 2.1 | 1.6 |

Wartości widoczne w tabelicy ilustrują dwie tendencje, a mianowicie:

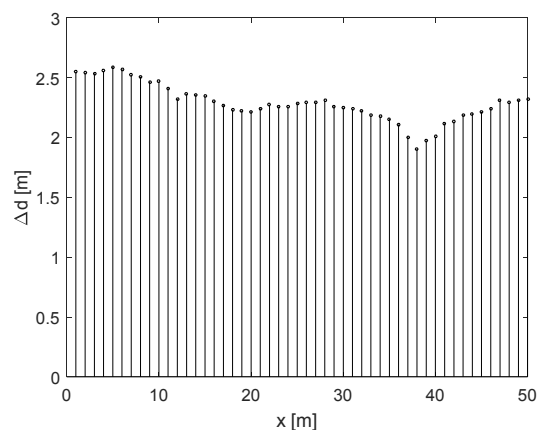
- wzrost wartości średniej i odchylenia standardowego błędu wyznaczania położenia nadajnika ze wzrostem odchylenia standardowego błędu pomiaru odchyłki dopplerowskiej, bez względu na prędkość nadajnika,
- zwiększanie się tych parametrów wraz ze zmniejszaniem się prędkości, bez względu na wielkość odchylenia standardowego błędu pomiaru odchyłki dopplerowskiej.

Prowadzone równoległe badania błędów pomiaru prędkości nadajnika wykazały, że wartości średnie tych błędów i ich odchylenie standardowe są bardzo małe i nie wykazują wyraźnej tendencji w funkcji parametrów występujących w tabelicy 3.1. Można ogólnie powiedzieć, że w przeprowadzonych symulacjach nie przekraczały 10 cm/s. Przykładowo, w sytuacji pokazanej na rys. 3.57, wartość średnia błędu prędkości wynosi 5 mm/s, a jego odchylenie standardowe jest równe 6.4 cm/s.

Bardzo małe błędy prędkości spowodowane błędami pomiaru odchyłek dopplerowskich skłaniają do wykorzystywania, wspomnianej wcześniej metody całkowania prędkości. Jak wcześniej powiedziano, metoda ta nie nadaje się bezpośrednio do wyznaczania chwilowego położenia nadajnika ze względu na zależność wyznaczanego toru od jego położenia początkowego, które może być błędne. Jeżeli na jednym wykresie zamieścimy wyniki uzyskane obiema metodami to wykres wykonany metodą całkowania prędkości (niebieskie trapezy) dokładnie pokazuje kierunek ruchu nadajnika, co ilustruje rys. 3.58. W tym wypadku wyznaczone położenie początkowe jest bliskie rzeczywistości; w rezultacie czego tor otrzymany metodą całkowania nieznacznie odbiega od toru nadajnika. Błędy położenia pokazano na rys. 3.59. Średnia wartość tych błędów wynosi 2.2 m, a ich wartość skuteczna 0.16 i jest znacznie mniejsza od wartości występujących w tabelicy 3.1.



Rys. 3.58. Tory nadajnika wyznaczone metodą poszukiwania położenie chwilowego (czarne gwiazdki) i metodą całkowania prędkości (niebieskie trapezy).



Rys. 3.59. Błędy pomiaru położenia nadajnika przy zastosowaniu metody całkowania prędkości.

Podsumowując, na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych można ogólnie stwierdzić, że wrażliwość systemu na błędy pomiaru odchyłek dopplerowskich jest umiarkowana i nie powinna podważać jego walorów eksploatacyjnych. Błędy pomiaru odchyłek dopplerowskich psują co prawda obraz wyznaczanego toru nadajnika, jednakże pozwalają oszacować jego chwilowe położenie i kierunek ruchu. Standardowe odchylenie błędów pomiaru odchyłek dopplerowskich, a tym samym błędy określania położenia nadajnika będą tym mniejsze im lepszy będzie stosunek sygnału do szumów odbiornika. To zagadnienie zostanie omówione w rozdziale 5.2.

4. SYSTEM NAWIGACYJNY ZE STACJONARNYMI NADAJNIKAMI

Analiza i badania symulacyjne przedstawione w tym rozdziale dotyczą systemu nawigacyjnego, którego ogólny schemat pokazano na rys. 1.2. W odróżnieniu od systemu opisanego w poprzednim rozdziale, źródłem sygnałów akustycznych są dwa nadajniki umieszczone na obrzeżach akwenu, a obiektem obserwacji (celem) może być np. nurek lub pojazd podwodny, od których odbijają się fale akustyczne wyemitowane przez nadajniki. Analogicznie jak w opisanym w poprzednim rozdziale systemie fale odbite (sygnały echa) są odbierane przez cztery hydrofony, przetwarzane w odbiornikach i analizowane w komputerze w celu wyznaczenia położenia i prędkości celu.

4.1. Model matematyczny systemu

Przedstawiona niżej metoda wyznaczania współrzędnych celu i wektora jego prędkości opiera się na założeniu, że częstotliwości odchyłek dopplerowskich są znane z dokładnością zapewnianą przez obliczenia numeryczne wykonywane w środowisku MATLAB[®]. Ponadto założono, że bez względu na odległość celu od nadajnika i hydrofonów oraz bez względu na jego prędkość odchyłki dopplerowskie wyznaczane z sygnałów odbieranych przez poszczególne hydrofony opisane są pojedynczymi prążkami widma. Prążki te można wyznaczyć w praktyce w sposób omówiony w podrozdziale 2.2. Przy takich założeniach, łączna odchyłka dopplerowska na drodze nadajnik – cel – hydrofon wynika ze wzoru (2.22).

Przeprowadzona dalej analiza dotyczy dwóch nadajników. Ponieważ wszystkie zależności są identyczne dla obu nadajników, więc ich położenia oznaczmy ogólnie współrzędnymi X_n, Y_n .

Wykorzystując wzór (2.22) cztery odchyłki dopplerowskie, przypisane do czterech hydrofonów można zapisać jako:

$$\begin{aligned} F_{1n} &= -\frac{f_0}{c} \left[\frac{v_x(x_0 - X_n) + v_y(y_0 - Y_n)}{\sqrt{(x_0 - X_n)^2 + (y_0 - Y_n)^2}} + \frac{v_x(x_0 - X_1) + v_y(y_0 - Y_1)}{\sqrt{(x_0 - X_1)^2 + (y_0 - Y_1)^2}} \right] \\ F_{2n} &= -\frac{f_0}{c} \left[\frac{v_x(x_0 - X_n) + v_y(y_0 - Y_n)}{\sqrt{(x_0 - X_n)^2 + (y_0 - Y_n)^2}} + \frac{v_x(x_0 - X_2) + v_y(y_0 - Y_2)}{\sqrt{(x_0 - X_2)^2 + (y_0 - Y_2)^2}} \right] \\ F_{3n} &= -\frac{f_0}{c} \left[\frac{v_x(x_0 - X_n) + v_y(y_0 - Y_n)}{\sqrt{(x_0 - X_n)^2 + (y_0 - Y_n)^2}} + \frac{v_x(x_0 - X_3) + v_y(y_0 - Y_3)}{\sqrt{(x_0 - X_3)^2 + (y_0 - Y_3)^2}} \right] \\ F_{4n} &= -\frac{f_0}{c} \left[\frac{v_x(x_0 - X_n) + v_y(y_0 - Y_n)}{\sqrt{(x_0 - X_n)^2 + (y_0 - Y_n)^2}} + \frac{v_x(x_0 - X_4) + v_y(y_0 - Y_4)}{\sqrt{(x_0 - X_4)^2 + (y_0 - Y_4)^2}} \right] \end{aligned} \quad (4.1)$$

Jest to układ czterech równań z czterema niewiadomymi, a mianowicie współrzędnymi położenia celu x_0 i y_0 oraz składowymi wektora jego prędkości v_x i v_y . Pozostałe wielkości występujące w układzie są z założenia znane. Znane są bowiem współrzędne nadajnika i czterech hydrofonów oraz uzyskane w wyniku analizy widm sygnałów echa – cztery odchyłki dopplerowskie. Ponieważ równania występujące w układzie (4.1) są kwadratowe, a więc rozpatrywany układ równań nie ma analitycznego rozwiązania, a rozwiązania drogą numeryczną nie są jednoznaczne. W celu eliminacji ewentualnych niejednoznaczności zastosowano drugi nadajnik o innej częstotliwości pracy. Odchyłki dopplerowskie dla tego nadajnika są również

opisane układem równań (4.1) przy czym wartości odchyłek dopplerowskich są na ogół inne ze względu na inną częstotliwość f_0 i inne współrzędne nadajnika X_n, Y_n . W rezultacie dysponujemy nadmiarową liczbą równań, co powinno skutkować wyeliminowaniem niejednoznaczności w wynikach określania położenia celu.

Proponowana metoda rozwiązywania układu równań (4.1) nie różni się od opisanej w poprzednim rozdziale. Rozbudowie ulegają jedynie poszczególne wyrażenia ze względu poszerzoną formę równań (4.1). Używając oznaczeń zawartych we wzorach (3.3) otrzymujemy:

$$\begin{aligned}
 g_1 &= \frac{v_x x_n + v_y y_n}{\sqrt{x_n^2 + y_n^2}} + \frac{v_x x_1 + v_y y_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} \\
 g_2 &= \frac{v_x x_n + v_y y_n}{\sqrt{x_n^2 + y_n^2}} + \frac{v_x x_2 + v_y y_2}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}} \\
 g_3 &= \frac{v_x x_n + v_y y_n}{\sqrt{x_n^2 + y_n^2}} + \frac{v_x x_3 + v_y y_3}{\sqrt{x_3^2 + y_3^2}} \\
 g_4 &= \frac{v_x x_n + v_y y_n}{\sqrt{x_n^2 + y_n^2}} + \frac{v_x x_4 + v_y y_4}{\sqrt{x_4^2 + y_4^2}}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Wyrażenia pierwiastkowe są odległościami celu od nadajnika r_n i poszczególnych hydrofonów r_1, \dots, r_4 . Powyższe wyrażenia można zapisać zatem prościej jako:

$$\begin{aligned}
 g_1 &= v_x \left(\frac{x_n}{r_n} + \frac{x_1}{r_1} \right) + v_y \left(\frac{y_n}{r_n} + \frac{y_1}{r_1} \right) \\
 g_2 &= v_x \left(\frac{x_n}{r_n} + \frac{x_2}{r_2} \right) + v_y \left(\frac{y_n}{r_n} + \frac{y_2}{r_2} \right) \\
 g_3 &= v_x \left(\frac{x_n}{r_n} + \frac{x_3}{r_3} \right) + v_y \left(\frac{y_n}{r_n} + \frac{y_3}{r_3} \right) \\
 g_4 &= v_x \left(\frac{x_n}{r_n} + \frac{x_4}{r_4} \right) + v_y \left(\frac{y_n}{r_n} + \frac{y_4}{r_4} \right)
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

Wyrażenia w nawiasach oznaczmy jako:

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \frac{x_n}{r_n} + \frac{x_1}{r_1} & b_1 &= \frac{y_n}{r_n} + \frac{y_1}{r_1} \\
 a_2 &= \frac{x_n}{r_n} + \frac{x_2}{r_2} & b_2 &= \frac{y_n}{r_n} + \frac{y_2}{r_2} \\
 a_3 &= \frac{x_n}{r_n} + \frac{x_3}{r_3} & b_3 &= \frac{y_n}{r_n} + \frac{y_3}{r_3} \\
 a_4 &= \frac{x_n}{r_n} + \frac{x_4}{r_4} & b_4 &= \frac{y_n}{r_n} + \frac{y_4}{r_4}
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

Przy takich oznaczeniach układ równań przyjmuje prostą formę:

$$\begin{aligned}
g_1 &= v_x a_1 + v_y b_1 \\
g_2 &= v_x a_2 + v_y b_2 \\
g_3 &= v_x a_3 + v_y b_3 \\
g_4 &= v_x a_4 + v_y b_4
\end{aligned}
\tag{4.5}$$

Dalsze postępowanie jest analogiczne do opisanego w rozdziale 3. Układamy mianowicie sześć równań o postaci:

$$\begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix}
\tag{4.6}$$

których rozwiązania można zapisać jako:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix}
\tag{4.7}$$

Z powyższych sześciu równań można wyeliminować składowe wektora prędkości. Z 15 możliwych układów równań, wybieramy układy równań, w których występują cztery różne wielkości g , czyli cztery różne odchyłki dopplerowskie. Mają one następujące postaci:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_3 & b_3 \\ a_4 & b_4 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} g_3 \\ g_4 \end{bmatrix} \\
\begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_3 & b_3 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} g_1 \\ g_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_2 & b_2 \\ a_4 & b_4 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} g_2 \\ g_4 \end{bmatrix} \\
\begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_4 & b_4 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} g_1 \\ g_4 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_2 & b_2 \\ a_3 & b_3 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} g_2 \\ g_3 \end{bmatrix}
\end{aligned}
\tag{4.8}$$

Chociaż każdy z powyższych układów równań zawiera tylko dwie niewiadome x_0, y_0 (a więc jego rozwiązanie jest możliwe), to liczba rozwiązań może być duża i większa niż w rozpatrywanym wyżej systemie z ruchomym nadajnikiem. Wiąże się to z występowaniem dwu form kwadratowych w elementach macierzy a i b . Przeprowadzone próby z wykorzystaniem jednego nadajnika nie eliminowały skutecznie występujących niejednoznaczności rozwiązań. Zastosowanie drugiego nadajnika podwaja liczbę równań (4.8) i w praktycznie rozwiązuje problem niejednoznaczności.

4.2. Program do wyznaczanie położenia i prędkości ruchomego obiektu

4.2.1. Struktura programu

Metoda rozwiązywania układów równań (4.8) nie różni się od zaprezentowanej w poprzednim rozdziale. Wyznaczane są składowe wektora prędkości celu w węzłach siatki pokazanej na rys. 3.3, a następnie wyszukiwane są te węzły siatki, w których w przybliżeniu spełnione są równania (4.8). Jednakże program komputerowy realizujący tę metodę jest bardziej złożony, gdyż uwzględnia osiem odchyłek dopplerowskich związanych z dwoma nadajnikami, a z powodu zależności tych odchyłek od sygnału echa – bardziej złożone są algorytmy wyznaczania prędkości w węzłach siatki.

Program wyznacza chwilowe położenie i prędkość celu w dyskretnych momentach czasu w odstępie 1 s lub 2 s. Dla obu nadajników wykorzystuje cztery ciągłe sygnały echa od ruchomego celu pochodzące z czterech hydrofonów i zamieniane w przetwornikach analogowo – cyfrowych na sygnały cyfrowe. Oprócz tych sygnałów do programu wprowadzane są ręcznie współrzędne nadajników i hydrofonów, częstotliwości sygnałów sinusoidalnych emitowanych przez nadajniki oraz prędkość propagacji fali akustycznej.

Ogólną strukturę programu pokazano na rys. 4.1. Po uruchomieniu programu wykonuje on wstępne obliczenia wynikające wyłącznie z rozmieszczenia nadajników i hydrofonów. Ten fragment programu opisany jest na schemacie jako WYZNACZANIE MACIERZY SYSTEMOWYCH. Dla obu nadajników wyznaczone są w każdym punkcie siatki elementy macierzy a_1, a_2, a_3, a_4 i b_1, b_2, b_3, b_4 występujące w układach równań (4.8) oraz wyznaczniki tych macierzy. Elementy macierzy obliczane są z zależności (4.4) i - w odróżnieniu od systemu z ruchomym nadajnikiem – oprócz współrzędnych hydrofonów zależą także od współrzędnych obu stacjonarnych nadajników.

WYZNACZANIE MACIERZY DO ELIMINACJI FAŁSZYWYCH ROZWIĄZAŃ opisano w dalszej części rozdziału. Zastosowano tu inną metodę eliminacji niż zaprezentowaną w poprzednim rozdziale. Obliczenia wykonywane są jednokrotnie po uruchomieniu programu.

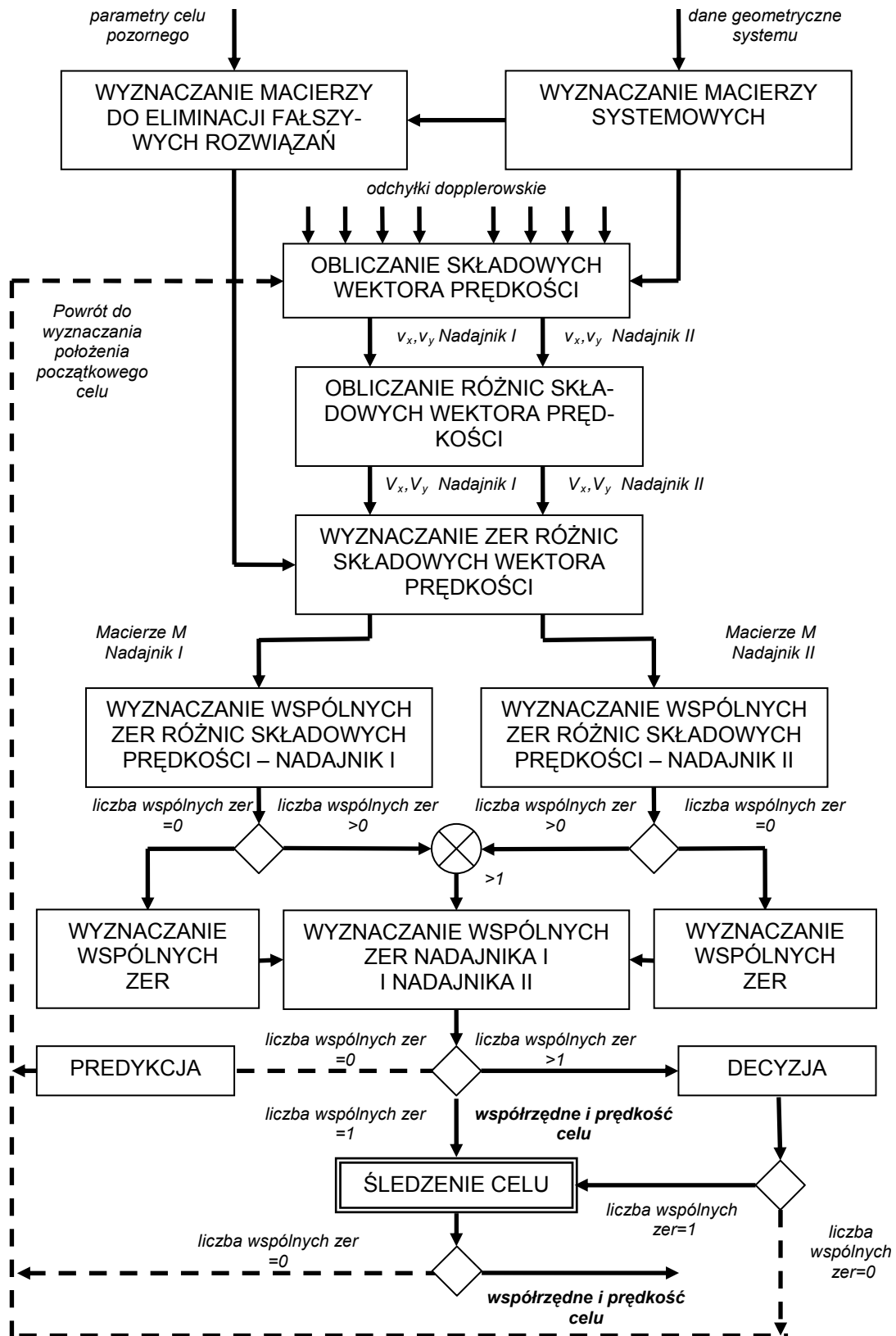
OBLICZANIE SKŁADOWYCH WEKTORA PRĘDKOŚCI polega na rozwiązywaniu równań typu (4.7). Wykorzystywane są wyznaczone wartości elementów macierzy a_1, a_2, a_3, a_4 i b_1, b_2, b_3, b_4 , ich wyznaczniki oraz znormalizowane odchyłki dopplerowskie g_1, g_2, g_3 i g_4 . Obliczenia wykonywane są oddzielnie dla odchyłek dopplerowskich pochodzących z obu nadajników.

W modelu systemu odchyłki dopplerowskie wyznaczone są z zastosowaniem dyskretnego przekształcenia Fouriera sygnałów echa odbieranych przez cztery hydrofony. Rozdzielenie widm pochodzących od dwóch nadajników odbywa się w odbiornikach homodynamicznych, co będzie szczegółowo omówione w rozdziale 6. Po obliczeniu widm odchyłek dopplerowskich wyznaczone są odchyłki odpowiadające położeniu początkowemu celu w każdym kroku obserwacji. Są to – analogicznie jak w poprzednio omówionym systemie - prawie skrajne częstotliwości graniczne widma. W badaniach symulacyjnych odchyłki dopplerowskie wyznaczone są numerycznie z zależności 4.1.

W każdym węźle siatki obliczane są, oddzielnie dla obu nadajników RÓŻNICE SKŁADOWYCH WEKTORA PRĘDKOŚCI, a następnie odbywa się WYZNACZANIE MIEJSC ZEROWYCH RÓŻNIC SKŁADOWYCH WEKTORA PRĘDKOŚCI. Od macierzy zawierających położenia różnic składowych wektora prędkości odejmowane są macierze, których obliczone w procedurze WYZNACZANIE MACIERZY DO ELIMINACJI FAŁSZYWYCH ROZWIĄZAŃ. Jest to alternatywna metoda w stosunku do opisanej w poprzednim rozdziale.

Kolejnym krokiem programu jest WYZNACZANIE WSPÓLNYCH MIEJSC ZEROWYCH RÓŻNIC SKŁADOWYCH WEKTORA PRĘDKOŚCI. Procedura ta jest wykonywana oddzielnie dla każdego z dwóch nadajników.

Wspólne miejsca zerowe z obu torów są przekazywane do programu WYZNACZANIE WSPÓLNYCH MIEJSC ZEROWYCH NADAJNIKA I i NADAJNIKA II. Poszukiwanie tych wspólnych miejsc z obu nadajników jest istotną różnicą tego programu i programu stosowanego w systemie z ruchomym nadajnikiem. Ma ono służyć do eliminacji opisywanych w poprzednim rozdziale niejednoznaczności w określaniu obserwowanego obiektu.



Rys. 4.1. Struktura programu do wyznaczania położenia i prędkości celu w systemie nawigacyjnym z dwoma nadajnikami.

Jeżeli wynikiem wyznaczania wspólnych miejsc zerowych obu nadajników jest jedno rozwiązanie, wówczas program przechodzi do procedury ŚLEDZENIA CELU. Przy większej liczbie rozwiązań realizowana jest procedura DECYZJA, której wynikiem są współrzędne i prędkość celu. Przy braku rozwiązań następuje powrót do poszukiwania położenia początkowego celu. Jako współrzędne celu w tym kroku przyjmowane są współrzędne w kroku poprzednim powiększane (pomniejszane) o składowe drogi, którą przebyłby cel poruszając się z prędkością wyznaczoną w poprzednim kroku. Prędkość w tym kroku przyjmowana jest jako prędkość w poprzednim kroku.

Program funkcjonuje w dwóch ogólnych cyklach, a mianowicie w cyklu wyznaczania położenia początkowego celu oraz w cyklu śledzenia. Cykl wyznaczania położenia początkowego celu rozpoczyna się od pierwszego kroku obserwacji i trwa do kroku, w którym wyznaczone zostaną współrzędne celu. Zwykle następuje to w pierwszym lub drugim kroku obserwacji. Po wyznaczeniu położenia celu realizowany jest cykl śledzenia. Procedura śledzenia celu jest realizowana w kolejnych krokach obserwacji, aż do momentu, w którym nie daje ona jednoznacznego rozwiązania. Program powraca wówczas do cyklu wyznaczania położenia początkowego celu. Sposób wyznaczania współrzędnych celu i jego prędkości jest taki sam jak w procedurze wyznaczania położenia początkowego celu.

Cykle te są realizowane do ostatniego kroku obserwacji.

Większość procedur używanych w opisywanym tu systemie nie różni się od stosowanych i opisanych w rozdziale 3. Ograniczymy się zatem do omówienia różnic występujących w obu programach.

4.2.2. Eliminacja stałych fałszywych rozwiązań

Analogicznie jak w poprzednio omówionym systemie, pojawiają się fałszywe rozwiązania związane z geometrią systemu. Ich przyczyną są zerowe lub bliskie zero wartości wyznaczników w macierzach odwrotnych występujących we wzorach (4.7) i (4.8). W DODATKU 2 wykazano, że wyznaczniki występujące w tych macierzach można przedstawić w formie trygonometrycznej jako:

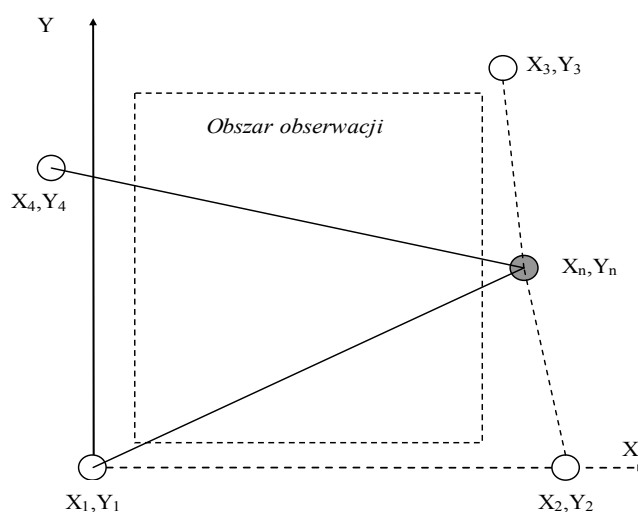
$$\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix} = \sin(\alpha_n - \alpha_1) - \sin(\alpha_n - \alpha_2) + \sin(\alpha_2 - \alpha_1) \quad (4.9)$$

gdzie α_1 jest nachyleniem prostej łączącej określony (ale dowolny) węzeł siatki z pierwszym hydrofonem, α_2 - nachyleniem prostej łączącej ten punkt z drugim hydrofonem, a α_n - nachyleniem prostej łączącej tenże punkt z nadajnikiem. Każdy węzeł siatki jest traktowany jako domniemane położenie obserwowanego obiektu.

Rozpatrzmy warunki, przy których może pojawić się zerowa wartość wyznacznika:

1. $\alpha_1 - \alpha_2 = 0$ - taka sytuacja geometryczna nie występuje w systemie,
2. $\alpha_1 - \alpha_2 = \pi$ - wartość wyznacznika wynosi $-2\sin(\alpha_n - \alpha_1)$ i jest równa zero gdy cel leży na prostej łączącej nadajnik z hydrofonem,
3. $\alpha_n - \alpha_1 = \pi$ gdyż $-\sin(\pi + \alpha_1 - \alpha_2) + \sin(\alpha_2 - \alpha_1) = 0$;
z tego warunku wynika, że nadajnik, cel i pierwszy hydrofon leżą na tej samej prostej.
4. $\alpha_n - \alpha_2 = \pi$ gdyż $\sin(\pi + \alpha_2 - \alpha_1) + \sin(\alpha_2 - \alpha_1) = 0$;
warunek jest spełniony, gdy nadajnik, cel i drugi hydrofon leżą na tej samej prostej.

Analizując w ten sam sposób pozostałe zależności podane w DODATKU 2 można dojść do ogólnego wniosku, że wszystkie wyznaczniki macierzy występujących w układach równań typu (4.8) przyjmują wartości zerowe, jeżeli cel leży na prostych łączących nadajnik z hydrofonami. Proste takie dla jednego z nadajników są pokazane na rys. 4.2.



Rys. 4.2. Miejsca geometryczne położenia węzła siatki, przy których wyznaczniki mają wartość zerową.

Jak widać na rysunku, gdy poszukiwanie rozwiązań układów równań ogranicza się do określonego obszaru obserwacji, to niektóre miejsca geometryczne położenia celu powodujące zerową wartość wyznacznika nie są brane pod uwagę, gdyż leżą poza tym obszarem.

Abstrahując od tego rozwiązania rozstrzygniemy kwestię warunków, przy których zerowa wartość wyznacznika prowadzi do rozwiązań niejednoznacznych, bądź do sprzecznego układu równań. W tym celu zapiszmy zależność (2.20) opisującą odchyłkę dopplerowską w uproszczonej formie trygonometrycznej obowiązującej dla dużej odległości celu od nadajnika i pierwszego hydrofonu:

$$F_1 \cong -\frac{f_0 v}{c} [\cos(\beta - \alpha_N) + \cos(\beta - \alpha_1)] \quad (4.10)$$

Wstawiając do tego wzoru warunek $\alpha_n = \alpha_1 + \pi$ otrzymujemy:

$$F_1 \cong -\frac{f_0 v}{c} [\cos(\beta - \alpha_1 - \pi) + \cos(\beta - \alpha_1)] = 0 \quad (4.11)$$

Wynika stąd, że jeżeli cel leży na prostej łączącej nadajnik z pierwszym hydrofonem, to odchyłka dopplerowska sygnału echa z tego hydrofonu jest zerowa. Analogiczny warunek występuje dla drugiej prostej pokazanej na rys. 4.2.

Ponieważ gdy $F_1=0$ to $g_1=0$, więc układ równań (4.7) nie jest sprzeczny, gdy [32]

$$\begin{vmatrix} 0 & b_1 \\ g_2 & b_2 \end{vmatrix} = -b_1 g_2 = 0 \quad \text{i} \quad \begin{vmatrix} a_1 & 0 \\ a_2 & g_2 \end{vmatrix} = -A_1 g_2 = 0. \quad (4.12)$$

czyli dla odchyłki dopplerowskiej $F_2=0$ lub przy $b_1=0$ i $a_1=0$

Sprawdźmy najpierw, czy i kiedy elementy macierzy a_1 i b_1 są równe zero. Zgodnie ze wzorami (4.4) są one równe:

$$a_1 = \frac{x_0 - X_n}{r_n} + \frac{x_0 - X_1}{r_1} \quad b_1 = \frac{y_0 - Y_n}{r_n} + \frac{y_0 - Y_1}{r_1} \quad (4.13)$$

Jeżeli cel leży na prostej łączącej nadajnik z hydrofonem, to ułamki opisują nachylenie tej prostej. Mamy zatem:

$$a_1 = \cos \alpha_n + \cos \alpha_1 = 0 \quad b_1 = \sin \alpha_n + \sin \alpha = 0, \quad (4.14)$$

gdyż $\alpha_n = \alpha_1 + \pi$.

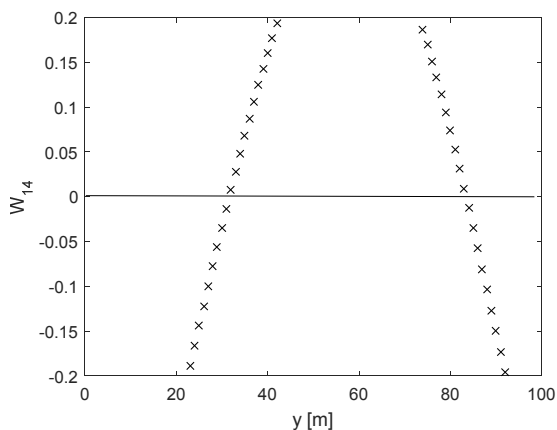
Reasumując, jeżeli cel leży na prostej łączącej nadajnik z pierwszym hydrofonem, to elementy macierzy a_1 i b_1 mają wartość zerową, a w konsekwencji wyznacznik macierzy i odchyłka dopplerowska F_{1n} są również zerowe. Układ równań (4.8) redukuje się do jednego równania:

$$g_2 = a_2 v_x + b_2 v_y \quad (4.15)$$

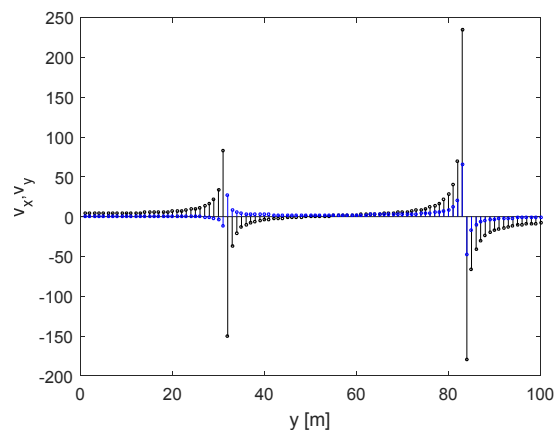
które nie ma jednoznacznego rozwiązania. W tej sytuacji nie ma potrzeby oddzielnego rozpatrywania warunku $F_2=0$.

Analogiczne rozważania można powtórzyć dla drugiej prostej pokazanej na rys. 4.2, a także dla podobnych prostych związanych z drugim nadajnikiem. W każdym wypadku odpowiednia odchyłka dopplerowska jest równa zero, a układ równań redukuje się do pojedynczego równania o niejednoznacznych rozwiązaniach. W rezultacie, gdy cel leży na jednej z omawianych prostych dysponujemy trzema równaniami spośród czterech zapisanych wzorami (4.8). Pomimo tego zagadnienie jest nadal rozwiązywalne, gdyż czwartym niezbędnym równaniem jest równanie prostej, na której leży cel.

Należy zauważyć, że dotychczasowe rozważania dotyczą idealnej sytuacji geometrycznej, w której punkty odpowiadające domniemanemu położeniu celu istnieją i leżą na omawianych prostych. W opisywanym tu systemie liczba i położenie punktów ograniczają się do węzłów siatki zbudowanej podobnie jak dla systemu z ruchomym nadajnikiem (rys. 3.3). Prawdopodobieństwo, że węzły siatki leżą dokładnie na wyznaczonych prostych jest bliskie zero, a więc w praktyce nie pojawiają się zerowe wartości wyznaczników. Ilustruje to rys. 4.3, na którym pokazano wartości wyznacznika W_{14} dla pionowej linii siatki ($x=60$ m), a na rys. 4.4 wartości składowych prędkości na tej linii.



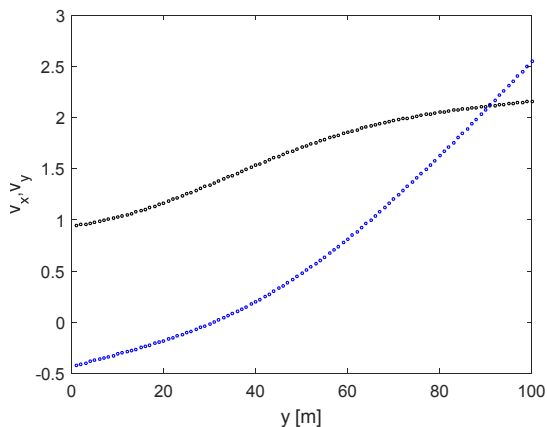
Rys. 4.3. Wartości wyznacznika W_{14} .



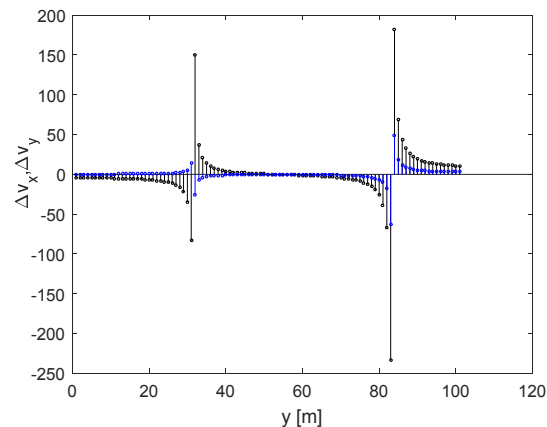
Rys. 4.4. Składowe wektora prędkości v_x (kolor czarny) i v_y (kolor niebieski).

Parametry systemu na obu rysunkach są jednakowe i równe: $X_n = 110$ m, $Y_n = 61$ m, $X_l = -11$ m, $Y_l = -11$ m, $X_d = -9$ m, $Y_d = 111$ m, a obiekt znajdując się w punkcie o współrzędnych $x_0 = 50$ m, $y_0 = 50$ m porusza się z prędkością $|v| = 2$ m/s pod kątem $\beta = 70^\circ$.

Pomimo, że wartości wyznacznika W_{14} w węzłach siatki nie mają wartości zerowych, to składowe wektora prędkości w sąsiednich punktach wykazują nieciągłość, widoczną na rys. 4.4. Nieciągłość ta powoduje, że różnica składowych prędkości wyznaczana z ostatniego równania (4.8) także wykazuje nieciągłość. Składowe wektora prędkości, wyznaczone wzdłuż tej samej, pionowej linii siatki, pokazane na rys. 4.5 są bowiem monotoniczne, a zatem różnica składowych prędkości z tego rysunku i rys. 4.4 ma przebieg widoczny na rys. 4.6.

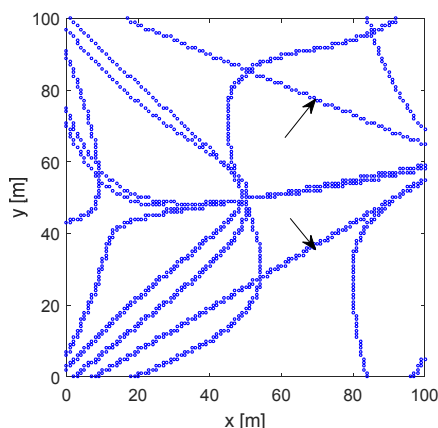


Rys. 4.5. Składowe wektora prędkości wyznaczone z wyznacznika W_{23} v_x (kolor czarny) i v_y (kolor niebieski).

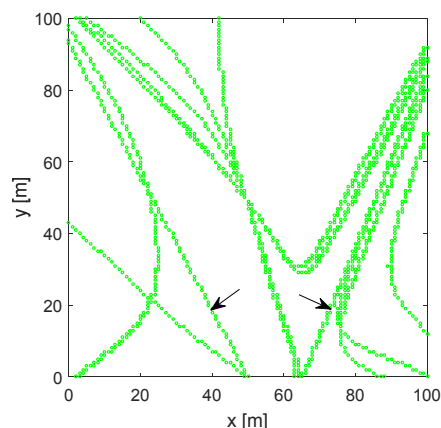


Rys. 4.6. Różnica składowych wektorów prędkości z rys. 4.4 i rys. 4.5.

Opisaną wyżej właściwość różnicy składowych wektora prędkości wykorzystano do eliminacji fałszywych rozwiązań w systemie przedstawionym w rozdziale 3. W omawianym tu systemie zastosowano inną metodę. Opiera się ona na zauważonej prawidłowości, że położenie punktów nieciągłości nie zależy od położenia celu i jego prędkości i powtarza się w każdych różnicach składowych wektorów prędkości wyznaczanych we wszystkich kombinacjach macierzy danych wzorami (4.8). Pozostałe miejsca zerowe różnic składowych prędkości występują w różnych punktach i zależą od chwilowego położenia i prędkości celu. Przykładowe miejsca zerowe omawianych różnic pokazano na zamieszczonych niżej rysunkach.



Rys. 4.7. Miejsca zerowe różnic składowych wektorów prędkości dla pierwszego nadajnika (strzałki wskazują stałe fałszywe rozwiązania).



Rys. 4.8. Miejsca zerowe różnic składowych wektorów prędkości dla drugiego nadajnika (strzałki wskazują stałe fałszywe rozwiązania).

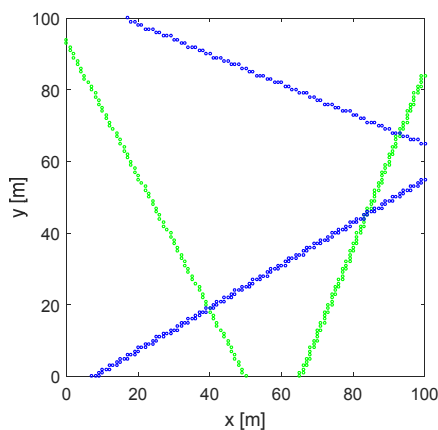
Współrzędne hydrofonów i pierwszego nadajnika są takie same jak na poprzednich rysunkach, a drugi nadajnik ma współrzędne $X_n = 59$ m, $Y_n = -16$ m. Cel znajduje się w punkcie $x_0 = 50$ m, $y_0 = 50$ m i porusza się z prędkością $|v| = 2$ m/s pod kątem $\beta = 70^\circ$. W opisaney dalej procedurze, położenie celu i jego prędkość są dowolne. Strzałkami zaznaczono linie, na których leżą punkty nieciągłości – stałe fałszywe rozwiązania.

Procedura eliminacji fałszywych rozwiązań związanych z punktami nieciągłości odbywa się jednokrotnie po uruchomieniu programu i składa się z następujących działań:

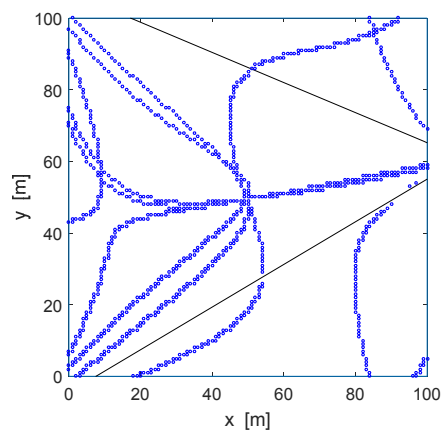
- wybieramy współrzędne dowolnego punktu siatki (celu) i przyjmujemy prędkość tego celu,
- wyznaczamy odchyłki dopplerowskie, oddzielnie dla obu nadajników,
- obliczamy we wszystkich węzłach siatki składowe wektora prędkości, oddzielnie dla obu nadajników,
- wyznaczamy różnice składowych wektora prędkości według wzorów (4.8),
- tworzymy macierze, w których różnice składowych prędkości są zerowe i oznaczamy je jako 1 w odpowiednich elementach macierzy; mamy po sześć macierzy dla obu nadajników,
- dodajemy otrzymane macierze oddzielnie dla obu nadajników (oznaczymy je jako C_1 i C_2)
- wykonujemy operacje logiczne $D_1 = C_1 < 4$ i $D_2 = C_2 < 4$;

Macierze D_1 i D_2 mają wartość 1 we wszystkich punktach nieciągłości, a w pozostałych wartość 0. Położenie wyznaczonych w ten sposób stałych fałszywych rozwiązań, występujących na rys. 4.7 i rys. 4.8 pokazano na rys. 4.9.

Macierze D_1 i D_2 odejmowane są od wszystkich macierzy zawierających zera różnic składowych prędkości. Rezultat w odniesieniu do sytuacji widocznej na rys. 4.7 pokazano na rys. 4.10.



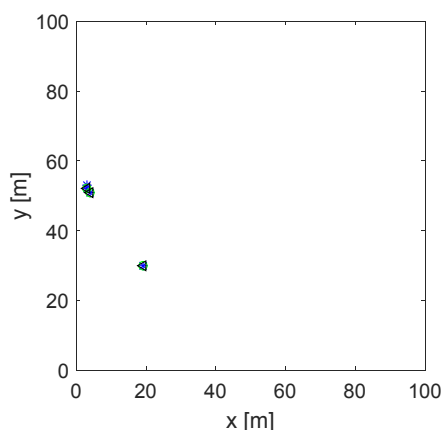
Rys. 4.9. Położenia stałych fałszywych rozwiązań dla nadajnika pierwszego (niebieskie) i drugiego (zielone).



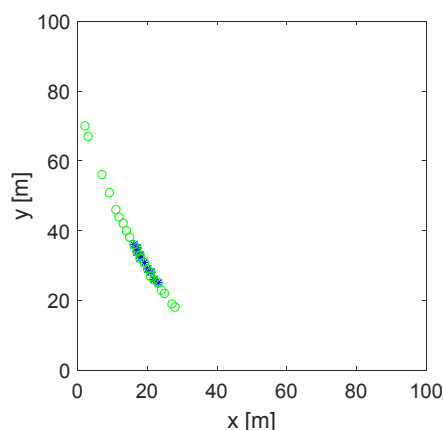
Rys. 4.10. Eliminacja stałych fałszywych rozwiązań dla nadajnika pierwszego widocznych na rys. 4.7.

4.2.3. Wyznaczanie położenia początkowego celu

Pierwsze kroki procedury wyznaczania położenia początkowego celu odbywają się oddzielnie dla sygnałów z obu nadajników i nie różnią się od opisanych w podrozdziale 3.2. Ich wynikiem są wspólne miejsca zerowe zawarte w trzech macierzach oddzielnie dla obu nadajników. Przykładowe ich położenie pokazano na rys. 4.11 i rys. 4.12. Rozmieszczenie nadajników i hydrofonów jest takie same, jak na rys. 4.7 i następnych. Cel o początkowych współrzędnych $x_0=20$ m i $y_0=30$ m, porusza się z prędkością $|v|=2$ m/s pod kątem $\beta = 60^\circ$. Położenie wspólnych miejsc zerowych oznaczono markerami o różnych kształtach i kolorach.

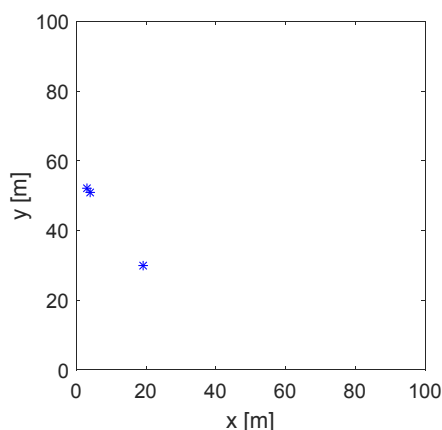


Rys. 4.11. Położenie miejsc zerowych trzech macierzy nadajnika pierwszego.

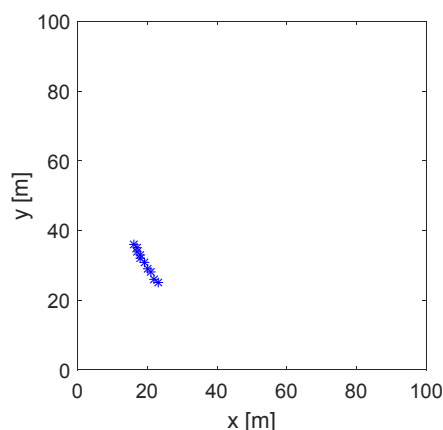


Rys. 4.12. Położenie miejsc zerowych trzech macierzy nadajnika drugiego.

Kolejnym krokiem - analogicznym jak dla ruchomego nadajnika – jest wyznaczenie wspólnych miejsc zerowych znajdujących się w trzech macierzach. Na rys. 4.13 pokazano położenie takich miejsc dla nadajnika pierwszego, a na rys. 4.14 – dla nadajnika drugiego.



Rys. 4.13. Położenie miejsc zerowych dla nadajnika pierwszego.



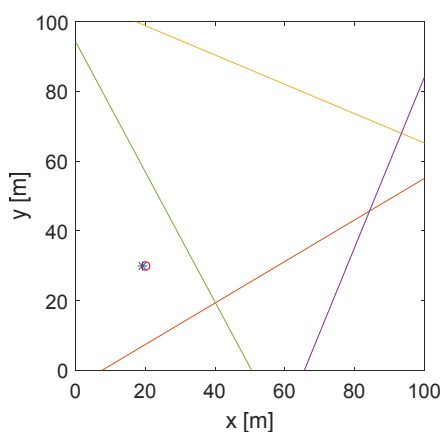
Rys. 4.14. Położenie miejsc zerowych dla nadajnika drugiego.

Wyniki pokazane na powyższych rysunkach potwierdzają słuszność tezy, że posługiwanie się w systemie jednym nadajnikiem może skutkować niejednoznacznością określenia położenia celu. Dysponując wynikami uzyskanymi z dwóch nadajników znacząco ograniczamy możliwość występowania niejednoznaczności. Poszukujemy mianowicie wspólnych miejsc zerowych obu nadajników. W licznych wypadkach występuje jedno takie miejsce i wtedy jego położenie traktowane jest jako współrzędne celu. W sytuacji pokazanej na powyższych rysunkach sytuacja taka nie występuje. Współrzędne miejsc zerowych są bowiem takie, jak w poniższym zestawieniu (tablica 4.1).

Tablica 4.1. Współrzędne miejsc zerowych

| | | | | | | | | | | | |
|-------|-------------|----|----|----|----|----|-----------|----|----|----|----|
| x [m] | Nadajnik I | 3 | 4 | | | | 19 | | | | |
| | Nadajnik II | 16 | 17 | 17 | 18 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 24 |
| y [m] | Nadajnik I | 52 | 51 | | | | 30 | | | | |
| | Nadajnik II | 36 | 34 | 35 | 32 | 33 | 31 | 29 | 28 | 26 | 26 |

Przy braku wspólnych rozwiązań uruchomiana jest procedura poszukiwania bliskich rozwiązań. Obliczana jest odległość wszystkich miejsc zerowych z obu nadajników i wybierane współrzędne tych miejsc, których odległość jest mniejsza od założonej. Założoną, minimalną odległość dobiera się doświadczalnie, a w tym przykładzie wynosi ona 3 m. Z reguły występuje jeden punkt spełniający to kryterium. W rozpatrywanej sytuacji jest to punkt o współrzędnych $x_0=19$ m, $y_0=30$ m, który pokazano na rys. 4.15. Położenie celu system wyznaczył z błędem 1 m, co jest skutkiem omówionych w rozdziale 3 zaokrągleń częstotliwości odchyłek dopplerowskich i rozdzielczości siatki.



Rys. 4.15. Położenie miejsc zerowych dla nadajnika.

W systemie występują sporadycznie sytuacje szczególne, których rozwiązanie przewidziano w programie. W części programu, w której wyznaczane są współrzędne celu oddzielnie dla obu nadajników, sytuacje szczególne omówiono w p. 3.2.4. Kolejne różnice w funkcjonowaniu programu systemu ze stacjonarnymi nadajnikami występują w dalszych częściach algorytmu, w których poszukiwane są wspólne rozwiązania dla obu nadajników. Zastosowano następujące procedury:

- *Występują wspólne miejsca zerowe w obu nadajnikach*

Poszukuje się wspólnych miejsc zerowych występujących w obu nadajnikach. Jeżeli istnieje jedno miejsce, jego współrzędne traktowane są jako położenie początkowe celu i program przechodzi do procedury śledzenia.

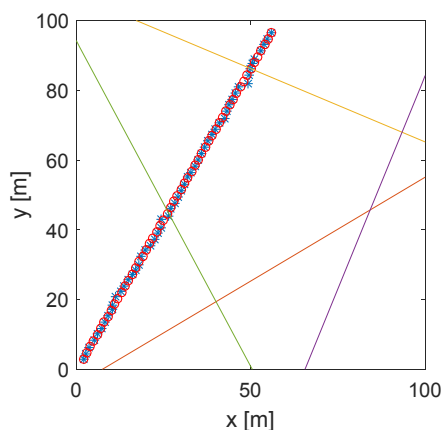
Jeżeli występuje brak wspólnych rozwiązań uruchomiana jest – opisana wyżej – procedura poszukiwania bliskich rozwiązań. Gdy wynikiem jest jedno rozwiązanie, to program przechodzi do procedury śledzenia. Jeżeli występuje większa liczba takich rozwiązań, to realizowana jest procedura kontroli skupienia rozwiązań. Polega ona na obliczaniu standardowego odchylenia rozwiązań. Jeżeli odchylenie to mieści się w założonych granicach (np. 3 m), to jako współrzędne celu przyjmowane są ich wartości średnie i program przechodzi do procedury śledzenia. W przeciwnym wypadku program przechodzi do następnego kroku poszukiwania położenia początkowego celu – występuje luka w śledzonym torze celu.

- *Występują wspólne miejsca zerowe w jednym nadajniku*
Program stosuje procedury analogiczne jak dla dwóch nadajników w dwóch wypadkach, a mianowicie dla jednego i większej liczby rozwiązań. Rezultatem jest położenie początkowe celu, co powoduje przejście do procedury śledzenia lub brak rozwiązania i przejście do następnego kroku poszukiwania początkowego położenia celu.
- *Brak wspólnych miejsc zerowych w obu nadajnikach*
Program przechodzi do następnego kroku poszukiwania położenia początkowego. W badaniach symulacyjnych nie zaobserwowano takiej sytuacji, lecz w modelu systemu może ona wystąpić np. wypadku chwilowego zaniku sygnałów echa.

4.2.4. Wyznaczanie prędkości celu

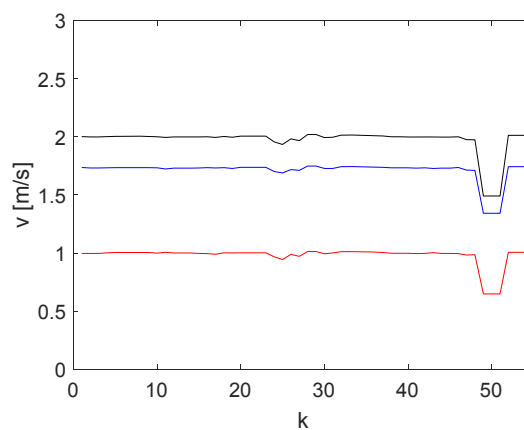
Wyznaczanie prędkości celu odbywa się w sposób opisany w p. 3.2.6. z tą różnicą, że średnie wartości składowych v_x i v_y obliczane są z wyników otrzymanych z pierwszego i drugiego nadajnika. Procedura realizowana jest każdorazowo po wyznaczeniu położenia początkowego celu oraz w każdym kroku śledzenia. Jeżeli w pewnym kroku śledzenia nie są wyznaczone współrzędne celu, wówczas uruchomiana jest procedura predykcji, a w niej zakłada się, że prędkości w następnym kroku jest równa prędkości w kroku bieżącym.

Na zamieszczonych niżej rysunkach pokazane są wyniki pomiarów prędkości uzyskane łącznie w krokach poszukiwania położenia początkowego i krokach śledzenia. Na rys. 4.16 widoczny jest tor jednostajnego ruchu prostoliniowego, na rys. 4.17 – składowe jego wektora prędkości, a na rys. 4.18 – błędy pomiaru modułu prędkości. Jak widać pomiar prędkości obarczony jest bardzo małym błędem z wyjątkiem kroków, w których tor celu przecina proste łączące nadajniki z hydrofonami. Towarzyszą temu większe błędy określenia położenia celu. W tych punktach działa – omówiona wyżej – procedura predykcji (kolejne prędkości są takie same).

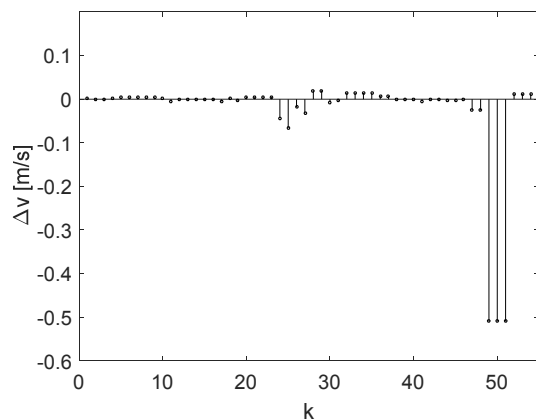


Rys. 4.16. Tor prostoliniowego ruchu jednostajnego. ($\Delta f=1$ Hz, $x_p=2$ m, $y_p=3$ m, $|v|=2$ m/s, v_x).

$$\beta=60^\circ).$$

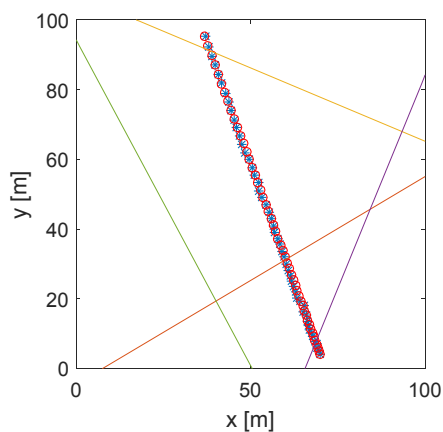


Rys. 4.17. Składowe wektora prędkości (linia: czerwona - $|v|$, niebieska - v_y , czarna - v_x).

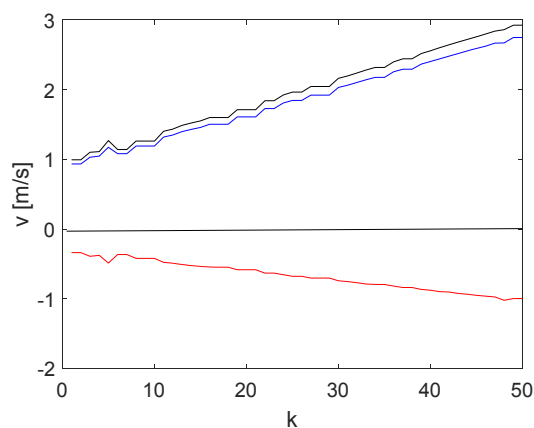


Rys. 4.18. Błędy pomiaru modułu prędkości.

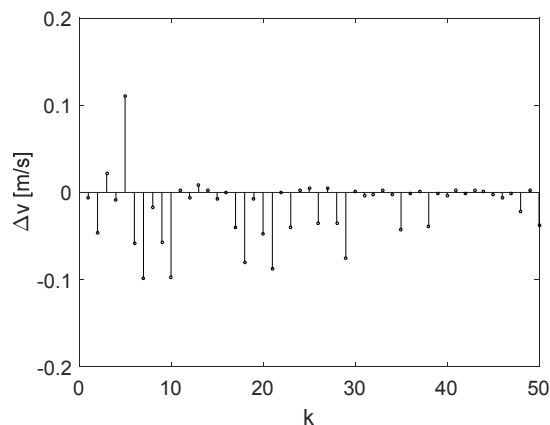
Na poniższych rysunkach zamieszczono wykresy toru celu poruszającego się prostoliniowym ruchem jednostajnie przyspieszonym, składowe jego prędkości i błędy pomiaru modułu prędkości. W tym wypadku nie pojawiły się większe błędy w obszarze, w którym tor celu przecina się z liniami łączącymi nadajniki z hydrofonami.



Rys. 4.19. Tor prostoliniowego ruchu jednostajnie przyspieszonego ($\Delta f=1$ Hz, $x_p=70$ m, $y_p=4$ m, $|v_p|=1$ m/s, m/s, $|v_k|=3$ m/s, $\beta=110^\circ$).

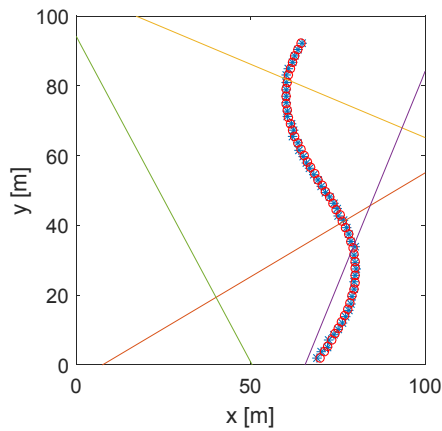


Rys. 4.20. Składowe wektora prędkości (linia: czerwona - $|v|$, niebieska - v_y , czarna - v_x).

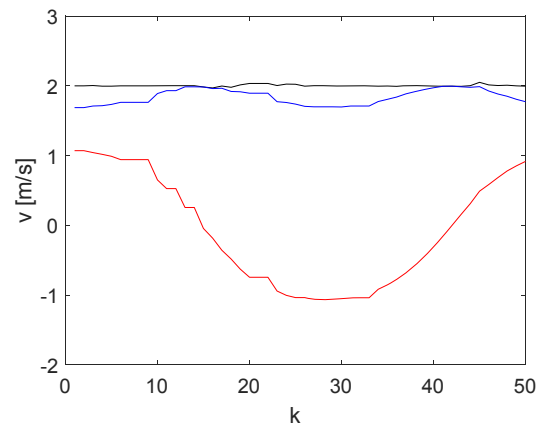


Rys. 4.21. Błędy pomiaru modułu prędkości.

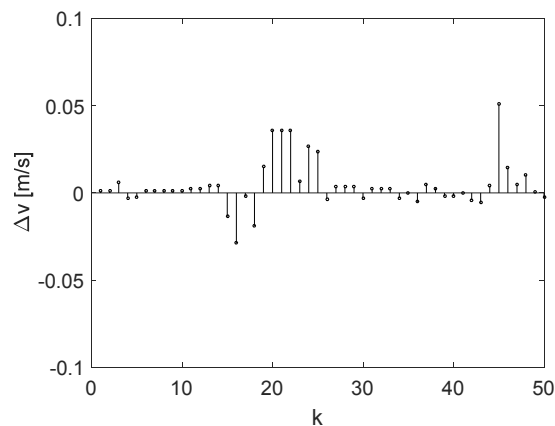
Poniżej pokazano jeszcze przykład ruchu po torze sinusoidalnym ze stałą prędkością liniową. Tor celu widoczny jest na rys. 4.22, składowe wektora jego prędkości – na rys. 4.23, a błędy pomiaru prędkości – na rys. 4.24. Także w wypadku ruchu krzywoliniowego, błędy pomiaru prędkości są niewielkie i nie mają istotnego wpływu na funkcjonowanie systemu.



Rys. 4.22. Tor sinusoidalny ze stałą prędkością liniową ($\Delta f=1$ Hz, $x_p=70$ m, $y_p=2$ m, $|v|=2$ m/s).

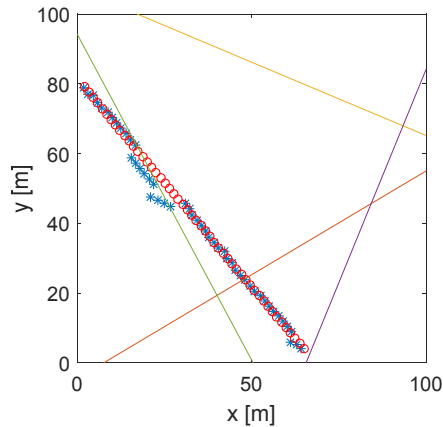


Rys. 4.23. Składowe wektora prędkości (linia: czerwona - $|v|$, niebieska - v_y , czarna - v_x).



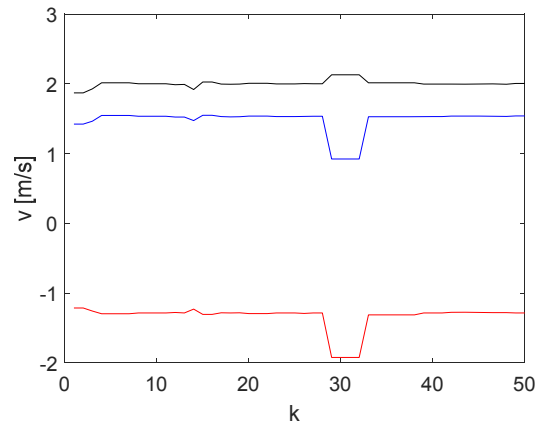
Rys. 4.24. Błędy pomiaru modułu prędkości liniowej.

Większe błędy pomiaru prędkości pojawiają się, gdy nachylenie toru celu jest bliskie nachyleniu jednej z prostych łączących nadajniki z hydrofonami. Przykład takiej sytuacji pokazano na poniższych rysunkach. Pomimo względnie dużych błędów składowych wektora prędkości, błędy jego modułu są niewielkie, co widać na rys. 4.27.

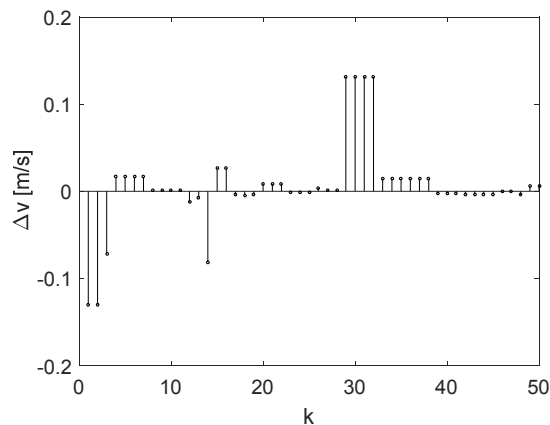


Rys. 4.25. Tor prostoliniowego ruchu jednostajnego. ($\Delta f=1$ Hz, $x_p=65$ m, $y_p=4$ m, $|v|=2$ m/s, v_x).

$$\beta=130^\circ).$$



Rys. 4.26. Składowe wektora prędkości (linia: czerwona - $|v|$, niebieska - v_y , czerwona - v_x).



Rys. 4.27. Błędy pomiaru modułu prędkości.

4.2.5. Śledzenie celu

Po wyznaczeniu początkowego położenia celu uruchomiana jest procedura jego śledzenia. Jej zadaniem jest skrócenie czasu wykonywania programu, a także unikanie pojawiających się niekiedy przypadków braku rozwiązania. Procedura rozpoczyna się od wyznaczenia przewidywanego położenia celu po czasie T , będącego okresem cyklu pomiarowego. Współrzędne przewidywanego położenia celu x_s, y_s oblicza się ze współrzędnych początkowego położenia celu x_p, y_p i składowych wektora prędkości v_{xp} i v_{yp} z następujących wzorów:

$$x_s = x_p + v_{xp}T \quad y_s = y_p + v_{yp}T \quad (4.17)$$

Składowe wektora prędkości obliczane są w sposób omówiony w p. 3.2.6.

Następnym krokiem procedury jest wyznaczanie siatki, w której węzłach poszukiwane będzie przybliżone położenie śledzonego celu. Bok oczka siatki jest mniejszy od boku siatki używanej w procedurze wyznaczania początkowego położenia celu, a w prowadzonych w pracy symulacjach wynosi 0.2 m, czyli 1/5 boku siatki podstawowej. Gęstsza siatka poprawia dokładność określenia położenia celu i – jak pokażemy dalej – pozwala w większości wypadków unikać braku rozwiązań. Siatka ma kształt kwadratu o boku 6 m, co oznacza że liczba jej węzłów wnosi $31 \times 31 = 961$. Liczba ta jest około dziesięciokrotnie mniejsza od liczby

węzłów siatki podstawowej ($101 \times 101 = 10201$). Powoduje to, że liczba operacji komputerowych w procesie śledzenia jest również znacznie mniejsza i że znacznie skraca się czas obliczeń w każdym cyklu pomiarowym.

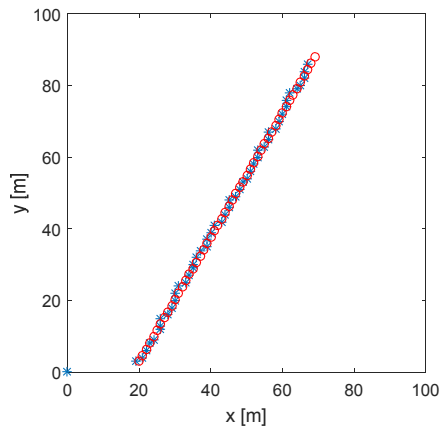
Punkt środkowy siatki umieszcza się w najbliższym węźle w stosunku do wyznaczonych współrzędnych x_s, y_s . Po wyznaczeniu siatki wykonywane są takie same procedury, jak dla wyznaczania położenia początkowego celu. Ze względu na zmienne położenie siatki, jednokrotne procedury używane przy poszukiwaniu początkowego położenia celu są realizowane w każdym cyklu pomiarowym. Tak więc procedura śledzenia realizuje kolejno następujące operacje omówione w p.4.2.1:

- wyznaczanie macierzy systemowych w każdym kroku śledzenia, obliczanie składowych wektora prędkości,
- obliczanie różnic składowych wektora prędkości,
- wyznaczanie wspólnych miejsc zerowych różnic składowych prędkości dla nadajnika I,
- wyznaczanie wspólnych miejsc zerowych różnic składowych prędkości dla nadajnika II,
- wyznaczanie wspólnych miejsc zerowych różnic składowych prędkości dla nadajnika I i nadajnika II,
- uruchomienie specjalnych procedur w przypadku większej od jednego liczby wspólnych miejsc zerowych,
- wyznaczanie współrzędnych celu i składowych wektora jego prędkości.

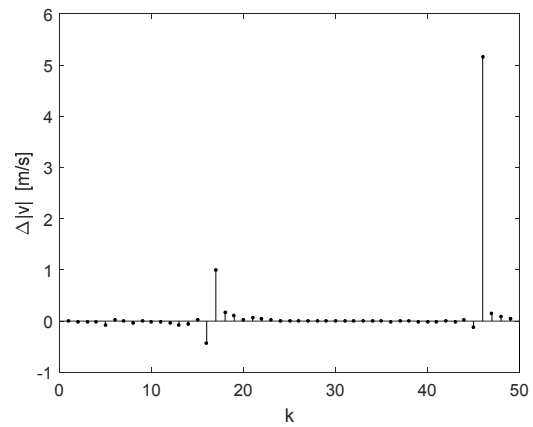
Wyznaczone współrzędne celu x_p, y_p i składowe wektora jego prędkości v_{xp}, v_{yp} stanowią dane wejściowe dla następnego cyklu śledzenia, odbywającego się według omówionej wyżej procedury.

W procedurze śledzenia celu nie jest stosowany algorytm eliminacji fałszywych rozwiązań, używany w procedurze poszukiwania położenia początkowego. Wynika to z dążenia do uproszczenia procedury śledzenia, która wydłużałaby ten algorytm, gdyż procedura eliminacji musiałaby być uruchamiana oddzielnie dla każdego cyklu pomiarowego. Wynika to ze zmiennego położenia siatki przy śledzeniu. W to miejsce zastosowano procedurę eliminacji używaną w systemie z ruchomym nadajnikiem, opisaną w p. 3.2.3.

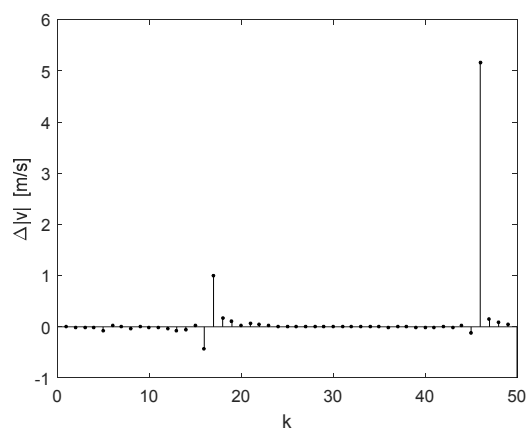
W przykładach pokazanych w poprzednim rozdziale używana była procedura śledzenia celu (nadajnika). Dlatego ograniczymy się tutaj do pokazania w jakim stopniu jej zastosowanie wpływa na błędy pomiaru położenia celu, jego prędkości i czasu wykonywania obliczeń. W tym celu porównamy wyznaczanie toru i jego prędkości bez procedury śledzenia i z jej wykorzystaniem. W obu wypadkach parametry ruchu celu są jednakowe i wynoszą: $x_p = 20\text{m}$, $y_p = 3\text{ m}$, $|v| = 2\text{ m/s}$, $\beta = 60^\circ$. Rys. 4.28 do 4.30 odnoszą się do braku procedury śledzenia, a trzy kolejne rysunki – do obliczeń z zastosowaniem tej procedury.



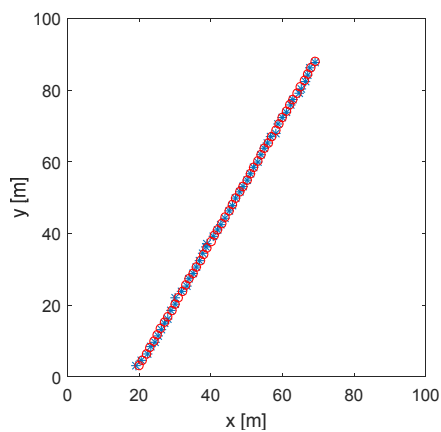
Rys. 4.28. Tor prostoliniowego ruchu jednostajnego
- brak śledzenia.



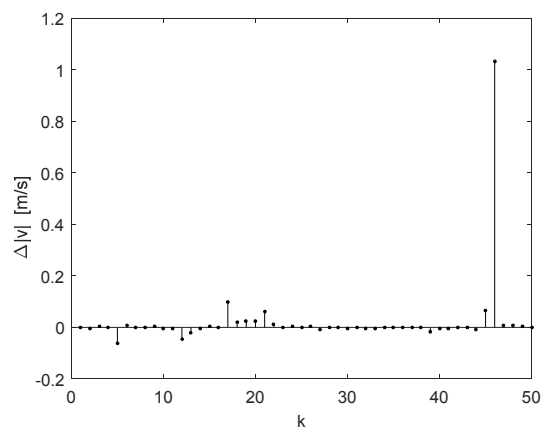
Rys. 4.29. Błędy pomiaru położenia celu
- brak śledzenia.



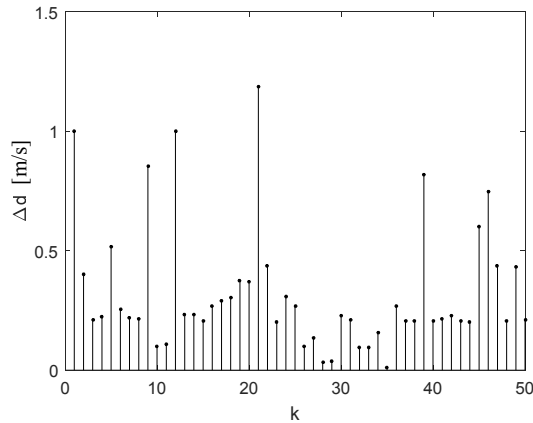
Rys. 4.30. Błędy pomiaru modułu prędkości
- brak śledzenia.



Rys. 4.31. Tor prostoliniowego ruchu jednostajnego
- zastosowane śledzenie.



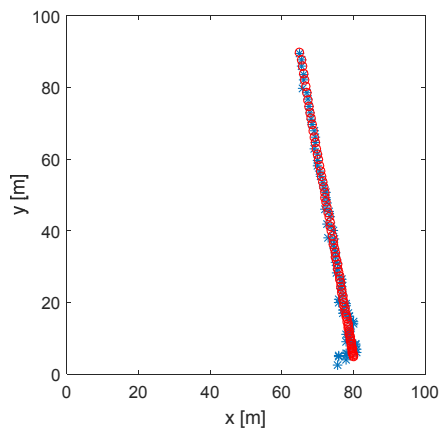
Rys. 4.32. Błędy pomiaru położenia celu
- zastosowane śledzenie.



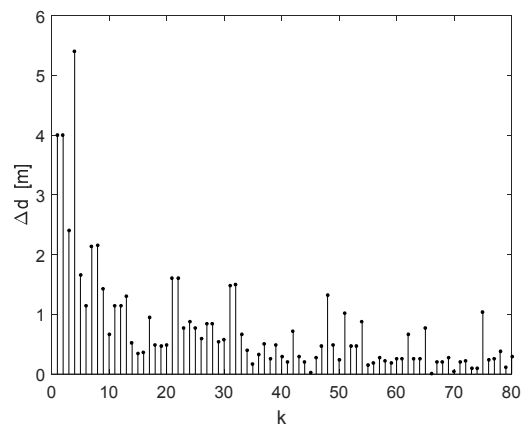
Rys. 4.33. Błędy pomiaru modułu prędkości - zastosowane śledzenie.

W przykładzie pokazanym na powyższych rysunkach, na 50 cyklach w 7 cyklach wyznaczane było położenie początkowe celu, a w pozostałych 43 cyklach wykonywana była procedura śledzenia. Średni błąd położenia bez procedury śledzenia wynosi 0.71 m, a przy użyciu tej procedury 0.33 m. Średni błąd pomiaru prędkości wynosi odpowiednio 0.08 m/s i 0.024 m/s. Standardowe odchylenie błędu prędkości jest równe odpowiednio 0.8 m/s i 0.15 m/s. Obliczenia wykonane na komputerze z procesorem Intel Core i7 – 3370 @3.4 GHz w środowisku MATLAB[®] bez procedury śledzenia trwały 45 s, a z zastosowaniem tej procedury 19 s. Porównanie przytoczonych wyżej parametrów wskazuje wyraźnie na korzyści wynikające z zastosowania opisanej wyżej procedury śledzenia celu.

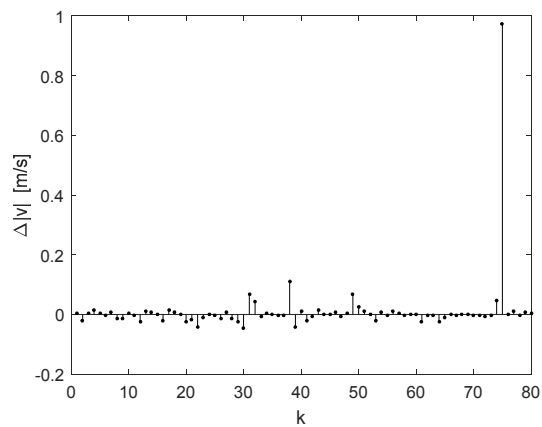
Na rysunkach 4.34 – 4.36 pokazano kolejny przykład funkcjonowania systemu z wykorzystaniem procedury śledzenia przy prędkości celu zmieniającej się w szerokich granicach od 0.2 m/s do 2 m/s. Parametry toru są następujące: $x_p = 81\text{m}$, $y_p = 5\text{ m}$, $\beta = 100^\circ$. W początkowej fazie ruchu, przy bardzo małych prędkościach celu system popełniał spore błędy, które stopniowo malały. W 50 cyklach w 13 wypadkach system poszukiwał położenia początkowego, a w 67 cyklach dokonywał śledzenia celu. Cykle śledzenia są rozróżnialne na rys. 4.35, gdyż odznaczają się mniejszymi błędami pomiaru położenia. Wynika to z gęstszej siatki stosowanej w procedurze śledzenia. Pomimo występujących błędów można uznać, że jakość otrzymanych wyników jest wystarczająca dla praktycznego oszacowania toru celu.



Rys. 4.34. Tor prostoliniowego ruchu jednostajnego przyspieszonego - zastosowane śledzenie.



Rys. 4.35. Błędy pomiaru położenia celu - zastosowane śledzenie.



Rys. 4.36. Błędy pomiaru modułu prędkości
- zastosowane śledzenie.

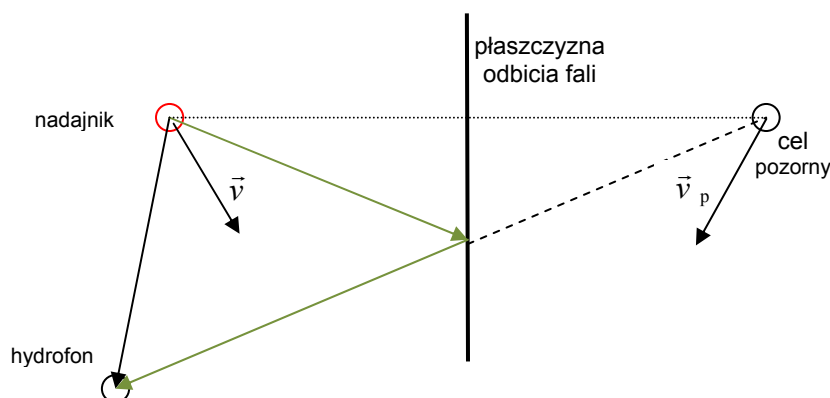
5. BŁĘDY WYNIKAJĄCE Z PROPAGACJI FALI AKUSTYCZNEJ

W systemie pracującym w rzeczywistym środowisku wodnym mogą wystąpić zakłócenia powodujące błędy w jego funkcjonowaniu. Z zasady pracy systemu wynika, że – poza niedoskonałością algorytmu – błędy te wynikać mogą wyłącznie z fałszywych wyników pomiaru odchylek dopplerowskich. Pomiary te opierają się na analizie widma odchylek dopplerowskich, a zatem rozpatrzeć należy te zakłócenia, które mogą zniekształcić to widmo. Zniekształcenia widma mogą być spowodowane odbiciami fali od granic ośrodka, szumami akustycznymi i rewerberacjami.

5.1. Zakłócenia spowodowane odbiciami

5.1.1. Odbicia w systemie z ruchomym nadajnikiem

Wpływ odbić fali akustycznej od granic ośrodka rozpatrzmy analizując sytuację pokazaną na rys. 5.1, która dotyczy systemu z ruchomym nadajnikiem. Założymy, że granicą ośrodka jest rozległa płaszczyzna, prostopadła do powierzchni wody, np. ściana budowli hydrotechnicznej.



Rys. 5.1. Odbicie fali akustycznej od płaskiej granicy ośrodka.

Fala sferyczna emitowana przez nadajnik odbija się od płaskiej powierzchni i osiąga hydrofon po drodze zaznaczonej kolorem zielonym. Jak wiadomo, odbicie fali sferycznej można opisać posługując się tzw. źródłami pozornymi, [33,34]. Źródło pozorne jest symetryczne względem źródła rzeczywistego, a osią symetrii jest ślad powierzchni odbijającej na płaszczyźnie rysunku. Symetryczny jest także wektor prędkości \vec{v}_p względem wektora rzeczywistej prędkości nadajnika \vec{v} .

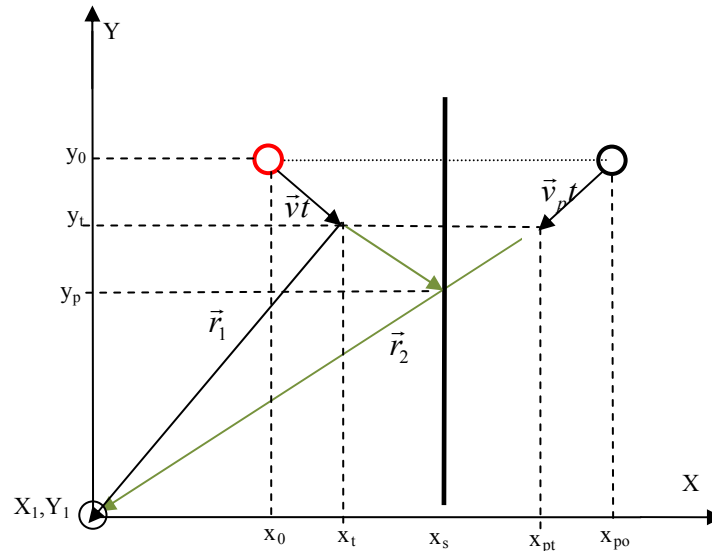
Na rys. 5.2 pokazano oznaczenia obiektów geometrycznych występujących w dalszej analizie. Układ współrzędnych dobrano tak, aby uprościć zapisy wzorów. Hydrofon znajduje się w centrum układu, płaszczyzna odbijająca jest równoległa do osi Y , a jej ślad przecina oś X w punkcie x_s . Przyjęto ponadto, że współczynnik odbicia ciśnienia akustycznego od tej płaszczyzny wynosi β_0 .

W celu wyznaczenia ciśnień fal bezpośrednich i odbitych posłużymy się zapisem zastosowanym we wzorze (2.19). Dla fali bezpośredniej (kolor czarny) mamy zatem:

$$p_1(t) = \frac{B_1}{r_1} \sin\{2\pi f_0 [t - r_1(t)/c]\} \quad (5.1)$$

Ciśnienie fali odbitej opisane jest wzorem:

$$p_2(t) = \frac{\beta_0 \cdot B_1}{r_2} \sin\{2\pi f_0 [t - r_2(t)/c]\} \quad (5.2)$$



Rys. 5.2. Współrzędne nadajnika (okół czerwony), źródła pozornego (okół czarny), hydrofonu i powierzchni odbijającej.

Posługując się oznaczeniami pokazanymi na rysunku, odległości występujące w powyższych wzorach można wyznaczyć z następujących zależności:

$$r_1(t) = \sqrt{(x_t - X_1)^2 + (y_t - Y_1)^2}, \quad (5.3)$$

$$r_2(t) = \sqrt{x_{pt}^2 + y_{pt}^2}, \quad (5.4)$$

gdzie współrzędne chwilowego położenia celu wynoszą:

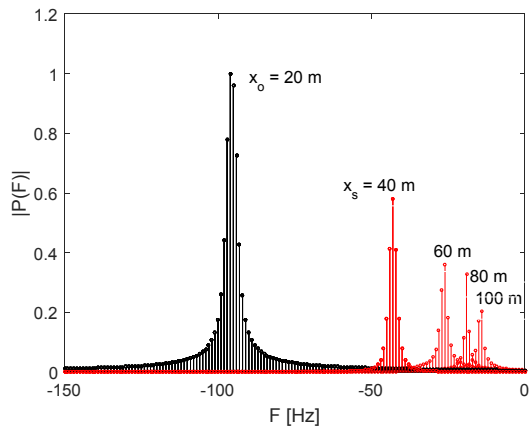
$$x_t = x_0 + v_x t, \quad y_t = y_0 + v_y t, \quad (5.5)$$

a współrzędne pozornego nadajnika i pozornego celu można zapisać jako:

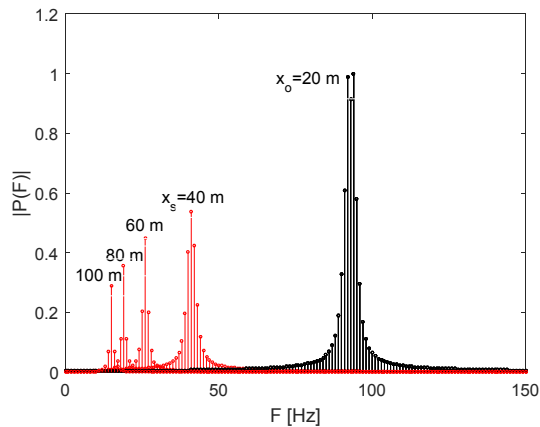
$$x_{pt} = 2x_s - x_t, \quad y_{pt} = y_t \quad (5.6)$$

Wykorzystując podane wyżej zależności można obliczyć numerycznie odchyłki dopplerowskie fali bezpośredniej i fali odbitej stosując dyskretną transformację Fouriera. Przykładowe wyniki obliczeń pokazano na zamieszczonych niżej rysunkach. Na wszystkich rysunkach hydrofon znajduje się w początku układu współrzędnych. Na rys. 5.3 nadajnik w chwili początkowej ma współrzędne $x_o = 20$ m i $y_o = 20$ m i porusza się z prędkością $v = 2$ m/s równoległe do powierzchni odbijającej o współrzędnej x_s , oddalając się od hydrofonu. Widma wyznaczono dla odległości x_s pokazanych na rysunku. Widma sygnałów odbitych są normalizowane względem wartości maksymalnej widma sygnału bezpośredniego. Czas pomiaru sygnału wynosił na tym i następujących rysunkach 1 s. Przyjęto, że na powierzchni następuje pełne odbicie fali.

Widmo pokazane na rys. 5.4 dotyczy takiej samej sytuacji geometrycznej, przy czym nadajnik porusza się w kierunku przeciwnym, zbliżając się do hydrofonu.

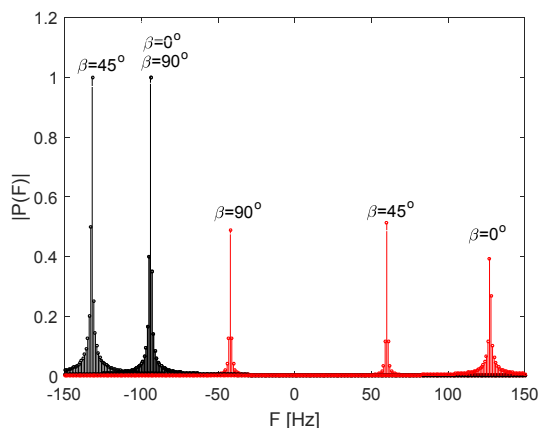


Rys. 5.3. Widma sygnału bezpośredniego (kolor czarny) i odbitego (kolor czerwony), $\beta = 90^\circ$.

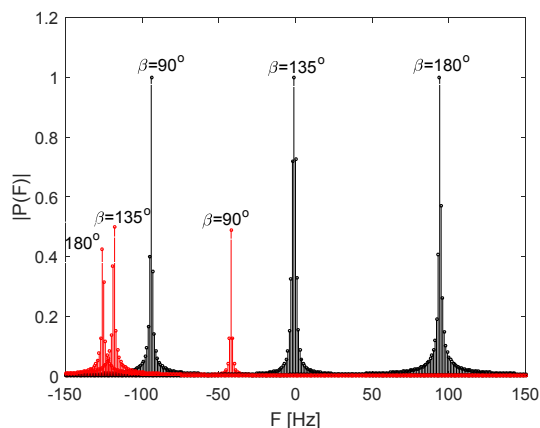


Rys. 5.4. Widma sygnału bezpośredniego (kolor czarny) i odbitego (kolor czerwony) $\beta = -90^\circ$.

Następne dwa rysunki ilustrują wpływ kierunku ruchu nadajnika na widma sygnałów odbitych. Nadajnik ma współrzędne $x_o = 50$ m i $y_o = 50$ m, a powierzchnia odbijająca - $x_s = 100$ m. Kąt β oznacza kierunek ruchu nadajnika, którego prędkość wynosi $v = 2$ m/s.



Rys. 5.5. Widma sygnału bezpośredniego (kolor czarny) i odbitego (kolor czerwony), $x_s = 100$ m, $\beta = 0^\circ, 45^\circ$ i 90° .



Rys. 5.6. Widma sygnału bezpośredniego (kolor czarny) i odbitego (kolor czerwony) $x_s = 100$ m, $\beta = 90^\circ, 135^\circ$ i 180° .

Rys. 5.3 i rys. 5.4 ilustrują wpływ odległości powierzchni odbijającej od nadajnika. Czym odległość ta jest większa, tym mniejsza jest wartość maksymalna widma sygnałów odbitych. Wzrasta także różnica odchyłek dopplerowskich sygnału bezpośredniego i sygnałów odbitych. Sytuacja pokazana na rysunkach jest najbardziej niekorzystna z punktu widzenia funkcjonowania systemu, gdyż zakłada płaską powierzchnię odbijającą, prostopadłą do powierzchni wody i pełne odbicie. W rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych warunki odbicia od powierzchni granicznych są na ogół korzystniejsze; współczynnik odbicia jest z reguły mniejszy od jedności, a powierzchnia odbijająca pochylona i o nieregularnym kształcie.

Ogólnie można przypuszczać, że odbicia fali akustycznej od rozpatrywanych wyżej granic ośrodka nie będą wpływać negatywnie na funkcjonowanie systemu.

W każdym akwenu, w którym pracuje rozpatrywany system występują odbicia fali akustycznej od powierzchni wody i od dna. W literaturze traktuje się je jako sumę odbicia

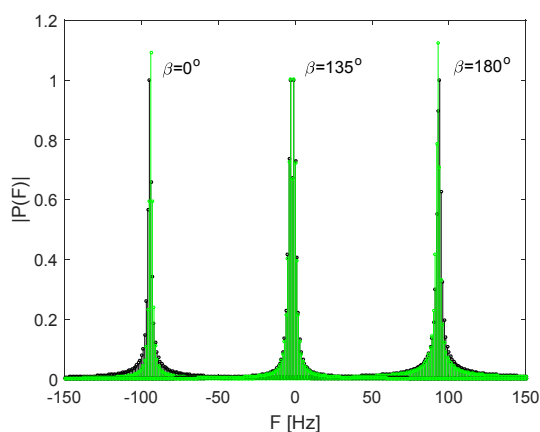
o charakterze lustrzanym i rozproszenia na nierównościach tych powierzchni [35,36,37]. W aktywnych systemach hydrolokacyjnych odbicie o charakterze lustrzanym ma małe znaczenie praktyczne, gdyż nie zachodzi w kierunku odbiornika. Odwrotna sytuacja występuje w systemach komunikacyjnych, których przykładem jest analizowany system, gdyż fala odbita rozchodzi się w kierunku odbiornika i sumuje się z użyteczną falą bezpośrednią. Może to mieć negatywny wpływ na warunki detekcji, co zostanie pokazane dalej.

Fale rozproszone na nierównościach dna i powierzchni wody traktowane są jako rewerberacje powierzchniowe [38,39]. Znane są w literaturze zależności opisujące poziom rewerberacji, lecz ich przydatność jest ograniczona, gdyż w przypadku dna poziom ten zależy od jego ukształtowania, rodzaju elementów rozpraszających falę akustyczną, ich gęstości powierzchniowej, kąta padania fali i innych czynników. Można go oszacować jedynie w stacjonarnych systemach pracujących w określonych akwenach. Jednakże w takich systemach bardziej wiarygodne rezultaty dają pomiary.

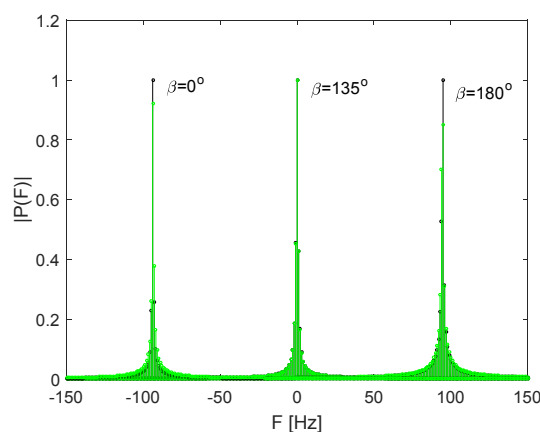
Nieco prostsza sytuacja występuje w przypadku rewerberacji pochodzących od powierzchni wody. Ich przyczyną jest zafalowanie spowodowane wiatrem oraz – przy dużym zafalowaniu – pęcherzyki powietrza znajdujące się w warstwie przypowierzchniowej, [40]. Jednakże i w tym wypadku teoretyczny opis poziomu rewerberacji jest trudny, a użyteczne rezultaty dają pomiary.

Z opisanych powodów zostaną tu pominięte teoretyczne rozważania nad poziomem rewerberacji na rzecz obserwacji ich wpływu na funkcjonowanie systemu w trakcie badań modelu doświadczalnego. Ograniczono się jedynie do badania symulacyjnego odbicia lustrzanego do płaskiej, niezafalowanej powierzchni wody. Metoda obliczeń jest taka sama, jak zastosowana wyżej do zbadania wpływu odbicia do powierzchni prostopadłej do dna na widmo odchyłek dopplerowskich.

Posłużymy się prostokątnym układem współrzędnych, w którym hydrofon znajduje się w jego początku, a powierzchnia wody jest równoległa do płaszczyzny X, Y i jest od niej oddalona o z_s . Nadajnik leży w punkcie o współrzędnych x_0, y_0, z_0 . Źródło pozorne ma zatem współrzędne $x_0, y_0, z_s + z_s - z_0$. Nadajnik porusza się równoległe do powierzchni wody ze stałą prędkością $|v| = 2$ m/s pod kątem β względem osi X . Na rys. 5.7 i rys. 5.8 pokazano widma odchyłek dopplerowskich sygnału bezpośredniego (kolor czarny) i odbitego (kolor zielony) dla trzech kątów nachylenia wektora prędkości. Zakładamy, że odbicie jest pełne.

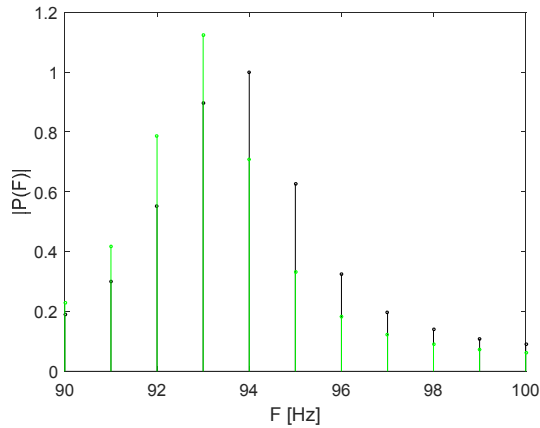


Rys. 5.7. Widma sygnału bezpośredniego i odbitego ($x_0=y_0=30$ m, $z_0=2$ m, $z_s=4$ m).

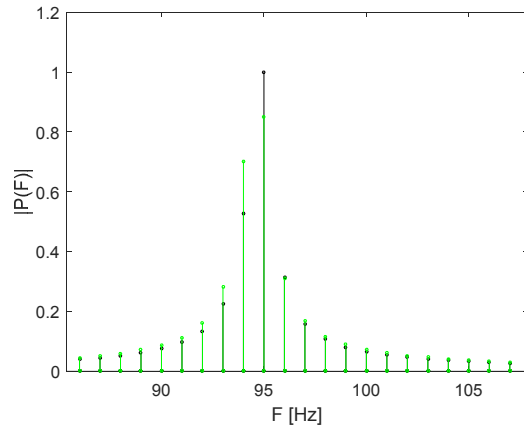


Rys. 5.8. Widma sygnału bezpośredniego i odbitego ($x_0=y_0=81$ m, $z_0=2$ m, $z_s=4$ m).

Na lewym rysunku nadajnik znajduje się w mniejszej odległości od hydrofonu, w wyniku czego widma są szersze od pokazanych na prawym rysunku, na którym nadajnik leży w większej odległości. Na obu rysunkach widma sygnału bezpośredniego i odbitego prawie się pokrywają. Widać to wyraźnie na rys. 5.9 i rys. 5.10, na których pokazano powiększone fragmenty rys. 5.7 i rys. 5.8.

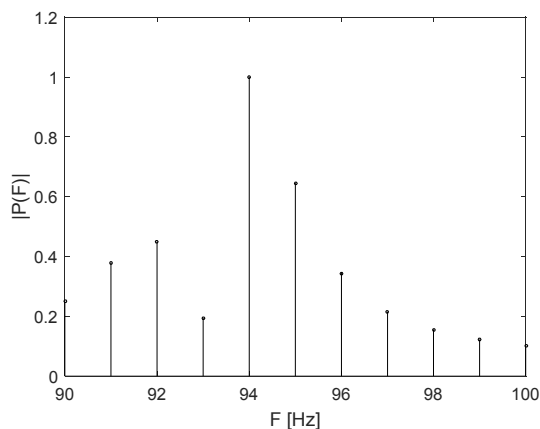


Rys. 5.9. Widma sygnału bezpośredniego i odbitego ($x_0=y_0= 30$ m, $z_0=2$ m, $z_s= 4$ m).

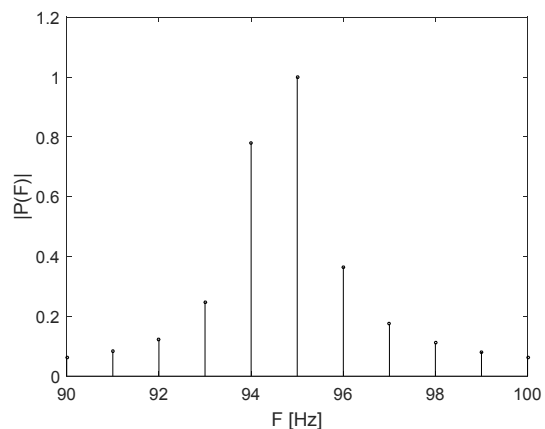


Rys. 5.10. Widma sygnału bezpośredniego i odbitego ($x_0=y_0= 81$ m, $z_0=2$ m, $z_s= 4$ m).

Widma sumy sygnału bezpośredniego i odbitego zamieszczono na rys. 5.11 i rys. 5.12. Różnią się one od widma sygnału bezpośredniego (szczególnie na rys. 5.11), lecz częstotliwości odchyłek dopplerowskich wykorzystywane do określania położenia i prędkości nadajnika (95 Hz) nie uległy zmianie. Oznacza to, że przy warunkach pracy systemu uwzględnionych w obliczeniach, lustrzane odbicia od powierzchni wody nie mają negatywnego oddziaływania.



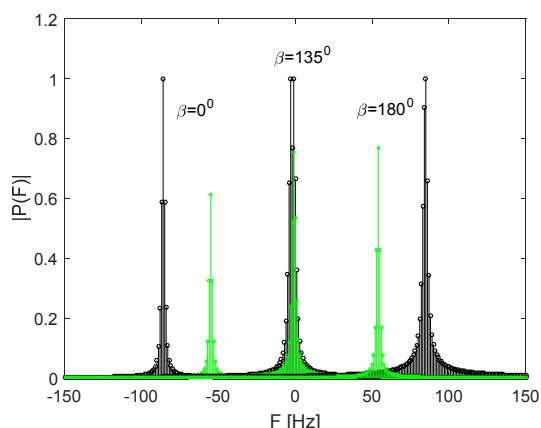
Rys. 5.11. Widma sumy sygnału bezpośredniego i odbitego ($x_0=y_0= 30$ m, $z_0=2$ m, $z_s= 4$ m).



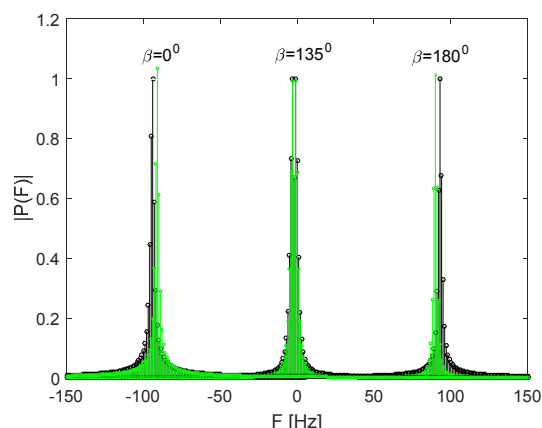
Rys. 5.12. Widma sumy sygnału bezpośredniego i odbitego ($x_0=y_0= 81$ m, $z_s= 4$ m, $z_0=2$ m).

Sytuacja ulega niekorzystnym zmianom, gdy hydrofon i nadajnik znajdują się na większych głębokościach. Ilustruje to rys. 5.13, na którym widoczne jest rozdzielenie widm sygnału bezpośredniego i odbitego. Prążki widma sygnału odbitego są mniejsze od prążków sygnału bezpośredniego, co wynika ze znacznie dłuższej drogi sygnału odbitego. Różnica wysokości prążków umożliwia prawidłową detekcję odchyłki dopplerowskiej. W sytuacji pośredniej,

pokazanej na rys. 5.14, widma sygnałów bezpośrednich i odbitych są trudne do rozróżnienia, a więc błędy pomiaru odchyłek dopplerowskich są nieuniknione.



Rys. 5.13. Widma sygnału bezpośredniego i odbitego ($x_0=y_0=30$ m, $z_0=20$ m, $z_s=40$ m.).



Rys. 5.14. Widma sygnału bezpośredniego i odbitego ($x_0=y_0=81$ m, $z_0=4$ m, $z_s=8$ m.).

Z poczynionych obserwacji można wyciągnąć praktyczne wnioski dotyczące zanurzenia hydrofonów. Jeżeli system jest przeznaczony do nawigacji jednostek nawodnych głębokość zanurzenia hydrofonu nie ma istotnego znaczenia, gdyż zachodzi wówczas sytuacja pokazana na rys. 5.7 i rys. 5.8 – widma zachodzą na siebie. Jeżeli system jest przeznaczony do nawigacji pływających głęboko pojazdów podwodnych, hydrofon należy umieszczać blisko powierzchni wody; widma będą również nakładać się na siebie i błędy pomiarów odchyłek dopplerowskich będą akceptowalne.

5.1.2. Odbicia w systemie ze stacjonarnymi nadajnikami

Fala akustyczna emitowana przez nadajnik odbija się od celu poruszającego się z prędkością \vec{v} i dociera do hydrofonu. Jest to droga bezpośrednia zaznaczona na rysunku 5.15 kolorem czarnym. Fala odbita od celu odbija się od płaskiej powierzchni i dociera do hydrofonu po linii zielonej. W sytuacji pokazanej na rysunku mamy dwa źródła pozorne, a mianowicie nieruchomy, pozorny nadajnik oraz poruszający się cel pozorny.

W celu wyznaczenia ciśnień fal bezpośrednich i odbitych posłużymy się zapisem zastosowanym we wzorze (2.16). Dla fali bezpośredniej (kolor czarny) mamy zatem:

$$p_1(t) = \frac{B_1}{r_1 r_2} \sin\{2\pi f_0 \{t - [r_1(t) + r_2(t)]/c\}\} \quad (5.7)$$

gdzie B_1 jest współczynnikiem odbicia od celu, a poszczególne odległości w tym i kolejnych wzorach pokazane są na rys. 5.15.

Fale docierające do hydrofonu w wyniku odbić mają następujące postaci:

- fala emitowana przez nadajnik, odbita od przeszkody, odbita od celu i odbierana przez hydrofon (linie niebieska i czarna)

$$p_2(t) = \frac{\beta_0 B_2}{r_1 r_3} \sin\{2\pi f_0 \{t - [r_1(t) + r_3(t)]/c\}\} \quad (5.8)$$

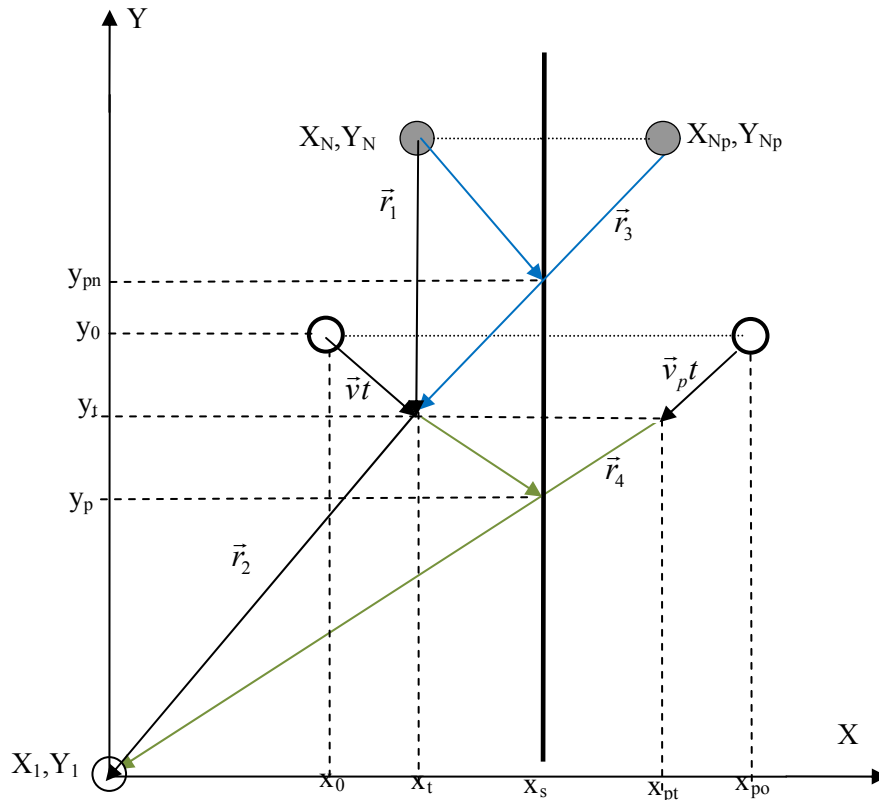
gdzie β_0 jest współczynnikiem odbicia ciśnienia akustycznego od płaskiej powierzchni

- fala emitowana przez nadajnik, odbita od celu, odbita od przeszkody i odbierana przez hydrofon (linie czarna i zielona)

$$p_3(t) = \frac{\beta_0 B_3}{r_1 r_4} \sin\{2\pi f_0 \{t - [r_1(t) + r_4(t)]/c\}\} \quad (5.9)$$

- fala emitowana przez nadajnik, odbita od przeszkody, odbita od celu, odbita od przeszkody i odbierana przez hydrofon (linie niebieska i zielona)

$$p_4(t) = \frac{\beta_0 B_4}{r_3 r_4} \sin\{2\pi f_0 \{t - [r_3(t) + r_4(t)]/c\}\} \quad (5.10)$$



Rys. 5.15. Sytuacja geometryczna odbicia fali od przeszkody.

Odległości występujące w powyższych można wyznaczyć z następujących zależności:

$$r_1(t) = \sqrt{(x_t - X_N)^2 + (y_t - Y_N)^2}, \quad (5.11)$$

$$r_2(t) = \sqrt{x_t^2 + y_t^2}, \quad (5.12)$$

$$r_3(t) = \sqrt{(x_t - X_{Np})^2 + (y_t - Y_{Np})^2}, \quad (5.13)$$

$$r_4(t) = \sqrt{x_{pt}^2 + y_t^2}, \quad (5.14)$$

gdzie współrzędne chwilowego położenia celu wynoszą:

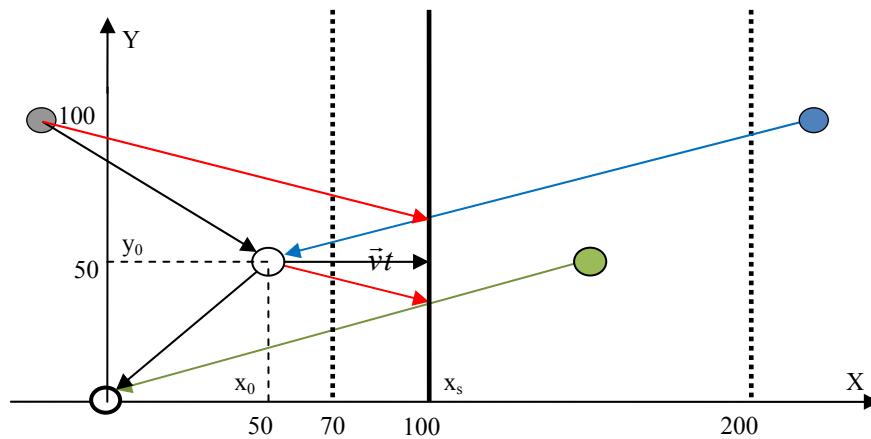
$$x_t = x_0 + v_x t, \quad y_t = y_0 + v_y t, \quad (5.15)$$

a współrzędne pozornego nadajnika i pozornego celu można zapisać jako:

$$X_{Np} = 2x_s - x_0, \quad Y_{Np} = Y_N. \quad (5.16)$$

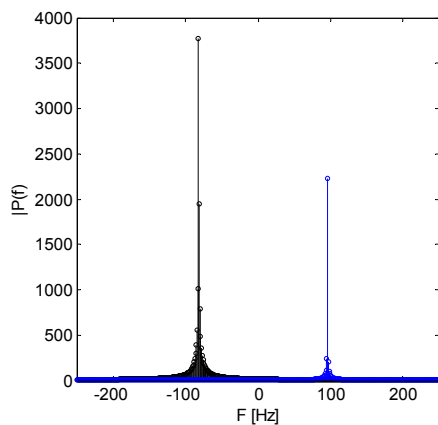
Ze względu na symetrię źródeł rzeczywistych i pozornych, współrzędne y obu rodzajów źródeł są jednakowe.

Wyprowadzone wyżej zależności umożliwiają numeryczne wyznaczenie chwilowych wartości ciśnień $p_1(t) \dots p_4(t)$. Po obliczeniu ich dyskretnego widma otrzymujemy widma odchyłek dopplerowskich. Przykładowe, charakterystyczne widma pokazano na zamieszczonych niżej rysunkach. Na wszystkich rysunkach przyjęto jednakowe położenie nadajnika $X_N = -20$ m i $Y_N = 100$ m, stałe położenie początkowe celu $x_0 = y_0 = 50$ m oraz stałą wartość prędkości celu $|\vec{v}| = 1.5$ m/s. Rozpatrywaną sytuację geometryczną pokazano na rys. 5.16.

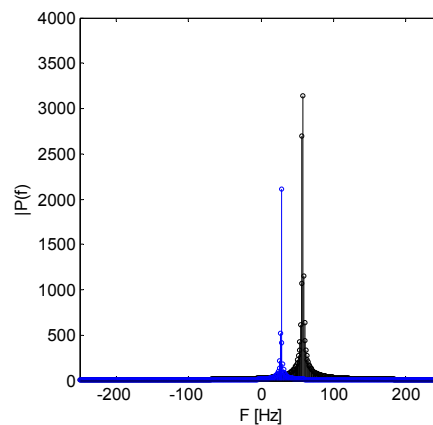


Rys. 5.16. Geometria odbicia fal.

Rys. 5. 17 i rys. 5.18 ilustrują wpływ zjawiska odbicia na odchyłkę dopplerowską. I tak, na pierwszym z nich cel porusza się prostopadłe do płaszczyzny odbijającej. Pokazano dwa widma odchyłki dopplerowskiej, a mianowicie na drodze r_1 (fala bezpośrednia) oraz na drodze r_3 (fala odbita). Jak widać, znaki odchyłek dopplerowskich są przeciwne, co wynika z symetrii wektorów prędkości. Prążek widma odchyłki na drodze r_3 jest mniejszy od prążka widma fali odbitej, co jest regułą, gdyż droga bezpośrednia jest zawsze krótsza od drogi, którą przebywa fala odbita. Szerokości widm odchyłek dopplerowskich nie są jednakowe, gdyż nieco inne są kąty padania na cel fali bezpośredniej i odbitej.



Rys. 5.17. Odchyłki dopplerowskie fali bezpośredniej (linia czarna) i fali odbitej (linia niebieska), $\beta = 0^\circ$.

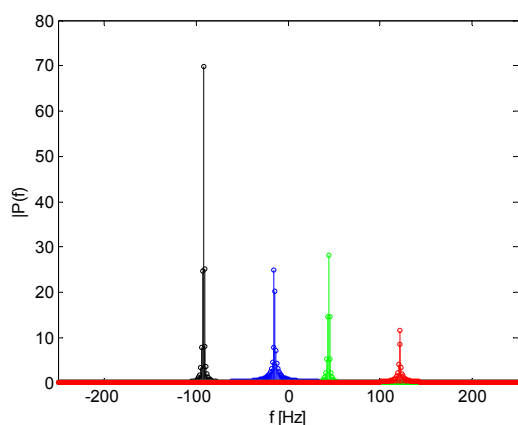


Rys. 5.18. Odchyłki dopplerowskie fali bezpośredniej (linia czarna) i fali odbitej (linia niebieska), $\beta = 90^\circ$.

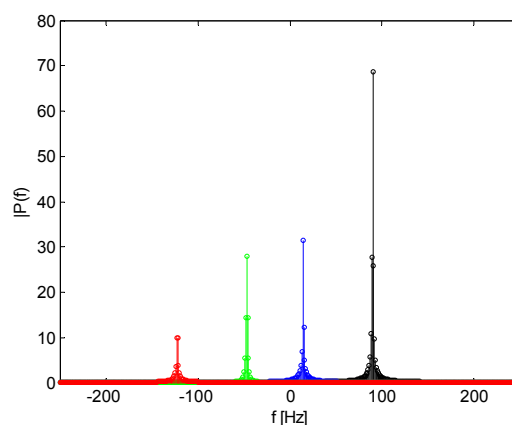
Rys. 5.19 i rys. 5.20 ilustrują wpływ kierunku ruchu celu na widmo odchyłek dopplerowskich. Pokazano na nich widma wszystkich odchyłek dopplerowskich. Kolorem czarnym zaznaczono odchyłkę dopplerowską dla fali bezpośredniej, kolorem niebieskim – odchyłkę na drodze nadajnik-płaszczyzna odbijająca (pozorny nadajnik)-hydrofon, kolorem zielonym – odchyłkę na drodze nadajnik-cel- płaszczyzna odbijająca (pozorny cel)- hydrofon, a kolorem czerwonym – odchyłkę na drodze nadajnik-płaszczyzna odbijająca (pozorny nadajnik)-cel-płaszczyzna odbijająca (pozorny cel)-hydrofon. Zachowano sytuację geometryczną z rysunku 5.16.

Lewy rysunek odnosi się do nachylenia wektora prędkości $\beta=50^\circ$. Ponieważ cel oddala się od nadajnika i hydrofonu, to odchyłka dopplerowska na drodze bezpośredniej jest ujemna. Odchyłka zaznaczona kolorem niebieskim jest bliska zeru, gdyż cel zbliża się do pozornego nadajnika i oddala od hydrofonu. Analogiczne rozumowanie tłumaczy położenie pozostałych odchyłek dopplerowskich na skali częstotliwości. W stosunku do sytuacji pokazanych na poprzednich rysunkach, poprawiły się proporcje wysokości prążków widma na korzyść fali poruszającej się po drodze bezpośredniej.

Na prawym rysunku widmo odchyłek dopplerowskich uległo dużej zmianie w wyniku odwrotnego kierunku ruchu celu ($\beta=230^\circ$). Jak widać, rozkład widma uległ prawie odwróceniu. Odwrócenie nie jest dokładne, gdyż przy zmianie znaku wektora prędkości obie sytuacje geometryczne nie są dokładnie symetryczne.

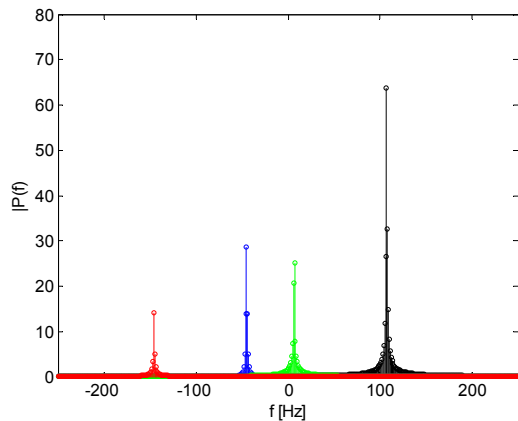


Rys. 5.19. Odchyłki dopplerowskie fali bezpośredniej i fal odbitych, $\beta=50^\circ$.

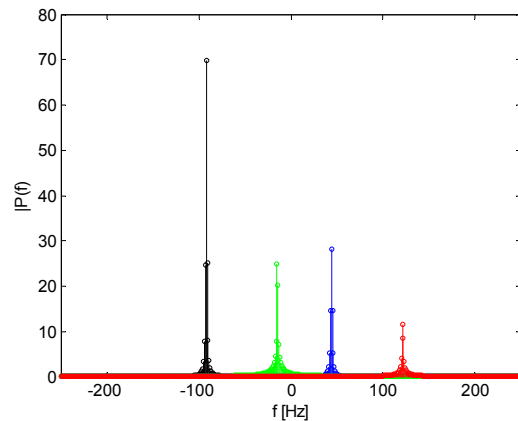


Rys. 5.20. Odchyłki dopplerowskie fali bezpośredniej i fal odbitych, $\beta=230^\circ$.

Widma dla kierunków prostopadłych do kierunków z dwu poprzednich rysunków ilustrują rys. 5.21 i rys. 5.22.

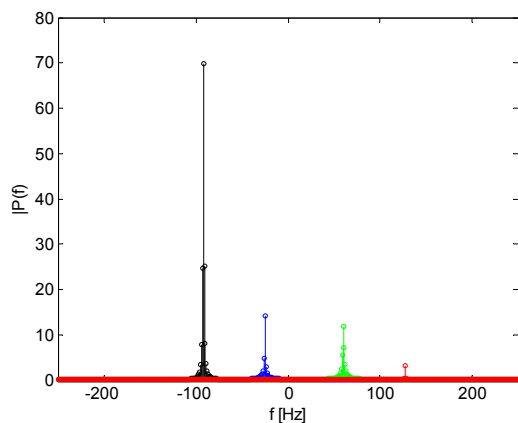


Rys. 5.21. Odchyłki dopplerowskie fali bezpośredniej i fal odbitych, $\beta=140^\circ$.

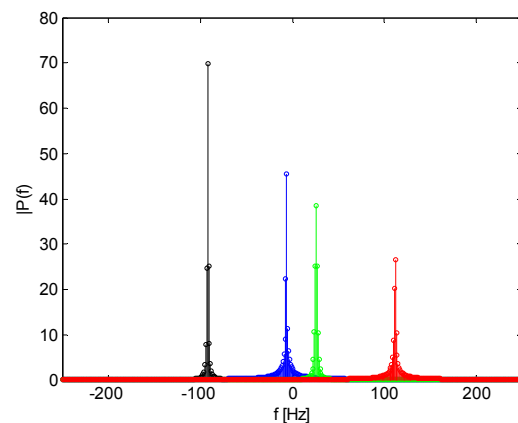


Rys.5.22. Odchyłki dopplerowskie fali bezpośredniej i fal odbitych, $\beta=320^\circ$.

Rys. 5.23 i rys. 5.24 pokazują wpływ odległości płaszczyzny odbijającej na widma odchyłek dopplerowskich.



Rys. 5.23. Odchyłki dopplerowskie fali bezpośredniej i fal odbitych, $\beta=50^\circ$, $x_s=200$ m.



Rys. 5.24. Odchyłki dopplerowskie fali bezpośredniej i fal odbitych, $\beta=50^\circ$, $x_s=70$ m.

Na podstawie obserwacji wyżej przedstawionych widm odchyłek dopplerowskich można wyciągnąć wniosek, że zjawisko odbicia fal nie utrudni wyodrębnienia prążka widma fali bezpośredniej od prążków fal odbitych. Prążki widma fal odbitych są mniejsze z powodu dłuższej drogi tych fal. Zmiana kierunku wektora prędkości dla fal odbitych nie powoduje również istotnego zwiększenia wysokości prążków. Korzystna z punktu widzenia funkcjonowania systemu jest zawsze duża odległość powierzchni odbijającej od celu i nadajnika. Należy jednak zauważyć, że wyniki obliczeń pokazane na rysunkach dotyczą uproszczonej sytuacji, gdy współczynnik odbicia od celu i od przeszkody jest równy jedności (pełne odbicie). W przypadku odbicia fali od rozpatrywanej płaszczyzny współczynnik odbicia jest w przybliżeniu równy jedności dla pionowych ścian wykonanych z betonu, które niekiedy ograniczają akwenu (np. kanały lub baseny portowe). W zaporach wodnych ściany takie są zwykle pochylone, co wydatnie zmniejsza wartość współczynnika odbicia, sprzyjając tym samym warunkom detekcji. Większość naturalnych zbiorników wodnych jest ograniczona dnem piaszczystym lub kamienistym o nieregularnym kształcie, a współczynnik odbicia jest wtedy znacznie mniejszy od jedności. Można przypuszczać, że większy wpływ na warunki detekcji ma zmienność współczynnika odbicia fali od celu. Współczynnik ten dla określonego celu może

się różnić znacznie w zależności od sytuacji geometrycznej pokazanej na rysunkach, co podkreślono opatrując ten współczynnik indeksami w podanych wyżej wzorach (5.8 do 5.10). Zależy on od kierunku padania fali padającej i kierunku obserwowanej fali odbitej. Może się zdarzyć, że jest on mniejszy dla fali bezpośredniej niż dla fali odbitej, co oczywiście pogarsza warunki detekcji. Teoretyczna, ilościowa analiza tego problemu nie wydaje się sensowna ze względu na nieregularne, zmienne indywidualnie kształty interesujących nas celów (płetwonurków, pojazdów podwodnych). Nie mniej należy zakładać, że niekorzystne proporcje współczynników odbicia fali bezpośredniej i fal odbitych mogą powodować zakłócenia w funkcjonowaniu systemu.

W systemie ze stacjonarnymi nadajnikami występują również odbicia od dna i powierzchni wody fali o charakterze lustrzanym oraz rozproszenie fali – rewerberacje. Sytuacja jest przez to bardziej złożona, lecz ogólne wnioski sformułowane dla systemu z ruchomym nadajnikiem pozostają w mocy. W celu uniknięcia negatywnego wpływu odbić lustrzanych należy tak skonfigurować system, aby długość dróg fal odbitych była możliwie bliska długości drogi fali bezpośredniej. Problem rewerberacji powierzchniowym zostanie omówiony w opisie badań modelu doświadczalnego w rozdziale 7.

5.2. Zakłócenia szumowe

5.2.1. System z ruchomym nadajnikiem

Detekcja w rozpatrywanych systemach polega na wykrywaniu prążka widma sygnału odpowiadającego poszukiwanej odchyłce dopplerowskiej. Jak to opisano wcześniej, odchyłka dopplerowska jest prawą, skrajną częstotliwością widma. Przy dużych odległościach źródła dźwięku od hydrofonu szerokość widma jest mała i poszukiwana odchyłka dopplerowska jest bliska częstotliwości prążka widma o maksymalnej wysokości. Istotny wpływ szumów na funkcjonowanie systemów występuje zawsze wtedy, gdy obierany sygnał jest mały, a najmniejszy sygnał w systemie z ruchomym nadajnikiem pojawia się, gdy nadajnik porusza się na granicy zakładanego zasięgu [41]. Łącząc te fakty dochodzimy do wniosku, że badanie wpływu szumów powinno polegać na obserwacji maksymalnego prążka w widmie odbieranego sygnału. Jako kryterium poprawnej detekcji przyjmujemy sytuację, gdy prążek o maksymalnej wysokości ma właściwą odchyłkę dopplerowską lub różni się od niej o +/- 2 Hz.

Przeprowadzone badania symulacyjne zakłóceń szumowych zmierzają do określenia wejściowego stosunku sygnału do szumu SNR , przy którym wystąpi założone prawdopodobieństwo spełnienia podanego wyżej kryterium. Założono, że ruchomy nadajnik porusza się z prędkością $|v|=2$ m/s (kierunek ruchu nie ma znaczenia) poczynając od punktu $x_0=100$ m, $y_0=100$ m, a hydrofon znajduje się w początku układu współrzędnych. W przyjętej siatce cel leży w maksymalnej odległości od hydrofonu. Nadajnik generuje sygnał sinusoidalny o częstotliwości $f_o=100$ kHz. Na wejściu odbiornika znajduje się filtr wąskopasmowy o częstotliwości środkowej f_o i paśmie przenoszenia o szerokości $B=810$ Hz, co odpowiada założonej, maksymalnej odchyłce dopplerowskiej. Wejściowy stosunek sygnału do szumu jest zdefiniowany jako:

$$SNR = 10 \log \frac{A^2}{2\sigma^2} \quad (5.17)$$

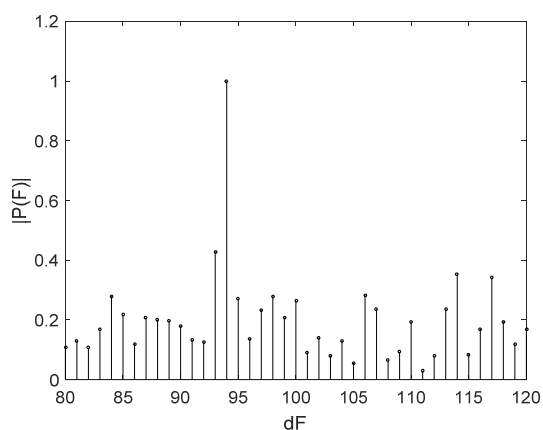
gdzie A jest amplitudą odbieranego sygnału, a σ^2 – wariancją szumu białego w paśmie przenoszenia odbiornika. Standardowe odchylenie szumu w symulacji wykonywanej w środowisku MATLAB[®] wyznaczano ze wzoru:

$$\sigma^2 = \left(\frac{f_s}{2B} \right) 10^{-SNR/10} \quad (5.18)$$

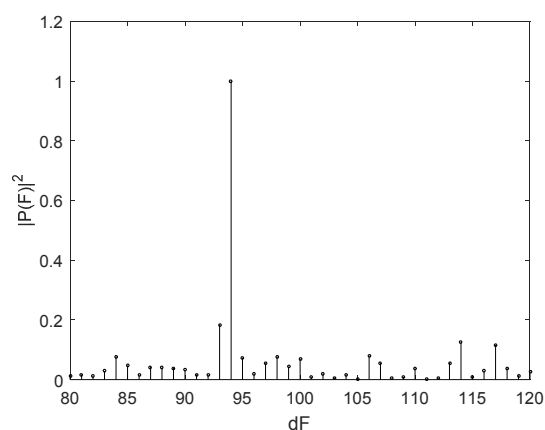
gdzie $f_s=4f_o$.

Widmo odchyłki dopplerowskiej obliczano z sygnału będącego sumą odbieranego sygnału sinusoidalnego danego wzorem 2.16 i szumu białego o standardowym odchyleniu σ . Równolegle prowadzono obliczenia wykorzystujące periodogram (kwadrat modułu wyznaczonego widma). W tysiącu realizacji badanych procesów wyznaczano wartości maksymalne modułu widma i periodogramu, a następnie widma, których prążki są większe od połowy wartości maksymalnych. Jako zmierzone odchyłki dopplerowskie przyjmowano częstotliwości prawych skrajnych prążków tak otrzymanego widma. W każdej realizacji wyznaczano różnice tych częstotliwości i poprawnej odchyłki dopplerowskiej. Po tysiącu prób sporządzano histogram błędów. Prawdopodobieństwo detekcji obliczano z pięciu prążków histogramu leżących w granicach -2 Hz do 2 Hz. Jak wykazano w p.3.4.2, błędy o takiej wielkości są akceptowalne z punktu widzenia użyteczności systemu.

Zamieszczone niżej rysunki ilustrują kolejne kroki wykonywanych obliczeń. I tak na rys. 5.25 widoczny jest przykładowy moduł widma odchyłki dopplerowskiej, a na rys. 5.26 odpowiadający mu periodogram. Wejściowy stosunek sygnału do szumu jest równy -15 dB, a prawidłowa odchyłka dopplerowska wynosi 94 Hz. Na periodogramie widoczny jest wyraźnie mniejszy poziom prążków widma szumów, co przemawia za stosowaniem go do wyznaczania poszukiwanej odchyłki dopplerowskiej.

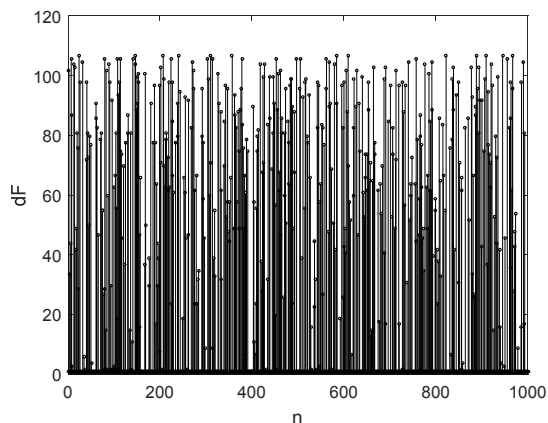


Rys. 5.25. Moduł widma odchyłki dopplerowskiej.

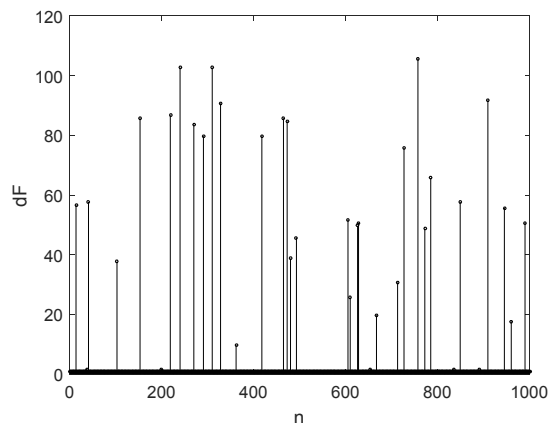


Rys. 5.26. Periodogram odchyłki dopplerowskiej.

Na rys. 5.27 i rys. 5.28 pokazano błędy pomiaru odchyłek dopplerowskich odpowiednio dla modułu widma i periodogramu. Widać wyraźnie, że liczba błędów występujących w periodogramie jest znacznie mniejsza.

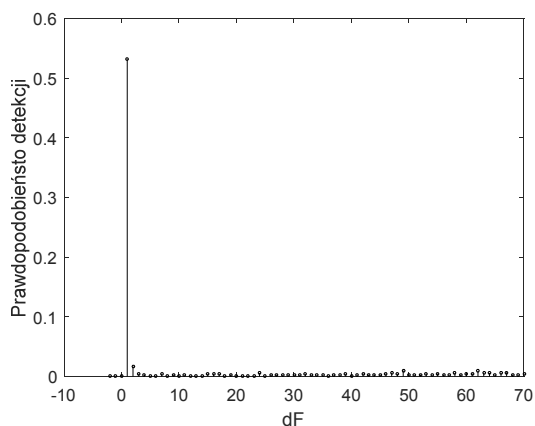


Rys. 5.27. Błędy pomiaru odchyłki dopplerowskiej z modułu widma.

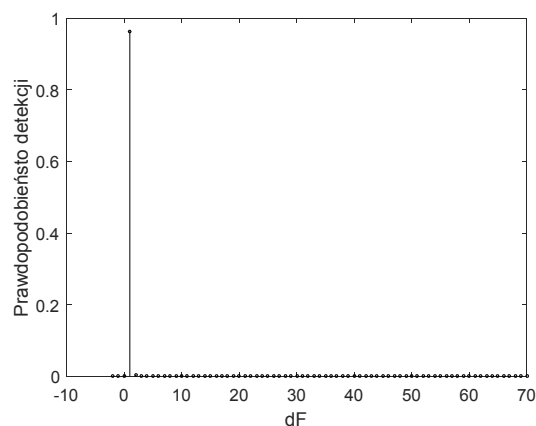


Rys. 5.28. Błędy pomiaru odchyłki dopplerowskiej z periodogramu.

Wykorzystując histogram wyznaczono rozkład prawdopodobieństwa detekcji prążków modułu widma i periodogramu, dla sytuacji pokazanych na powyższych rysunkach. Wysokość poszczególnych prążków jest równa prawdopodobieństwu ich detekcji. Wyniki obliczeń pokazano na rys. 5.29 i rys. 5.30. Prążki widma występują tu dla błędu $dF = 1$ Hz co wynika z rozdzielczości widma 1 Hz i przyjęcia jako prawidłowej, odchyłki dopplerowskiej wyznaczonej analitycznie ze wzoru 2.13.

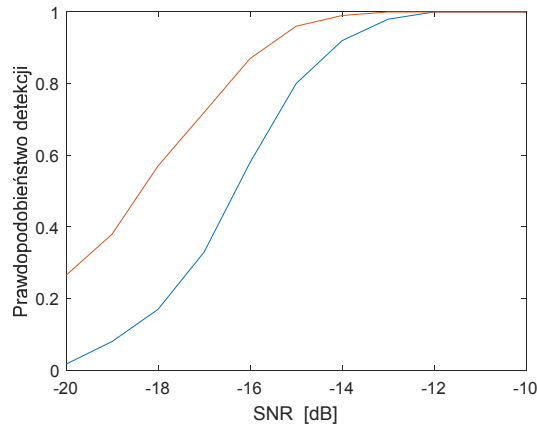


Rys. 5.29. Prawdopodobieństwo detekcji prążka o błędzie częstotliwości dF w module widma.



Rys. 5.30. Prawdopodobieństwo detekcji prążka o błędzie częstotliwości dF w periodogramie.

Jak to powiedziano wyżej, wynikowe prawdopodobieństwo detekcji wyznaczono sumując wysokości pięciu prążków z otoczenia prążka o maksymalnej wysokości. Na rys. 5.31 zamieszczono wyniki obliczeń w funkcji stosunku sygnału do szumu dla modułu widma (linia niebieska) i periodogramu (linia czerwona).



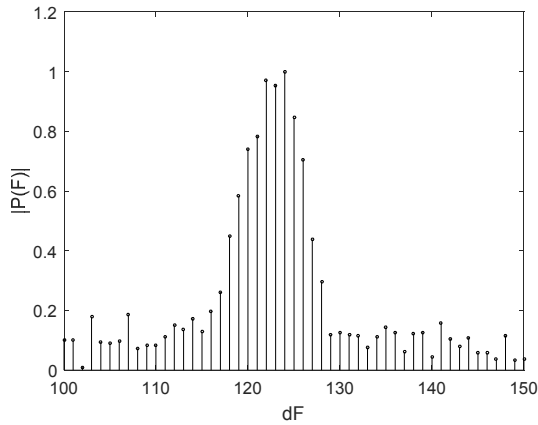
Rys. 5.31. Prawdopodobieństwo poprawnej detekcji.

Z przeprowadzonych obliczeń, których wynik jest widoczny na rys. 5.31, wynika, że do wyznaczania odchyłek dopplerowskich należy wykorzystywać periodogram odebranych sygnałów. Ponadto można oszacować wartość minimalnego stosunku sygnału dla maksymalnego zasięgu systemu. Przyjmując, że wynosi ona $SNR = -14$ dB otrzymujemy prawdopodobieństwo detekcji $PD = 0.99$, co oznacza, że błąd pomiaru odchyłki dopplerowskiej przekracza ± 2 Hz średnio co 100 s. Przy zakładanej w obliczeniach prędkości nadajnika 2 m/s, przebywa on w tym czasie drogę o długości 200 m.

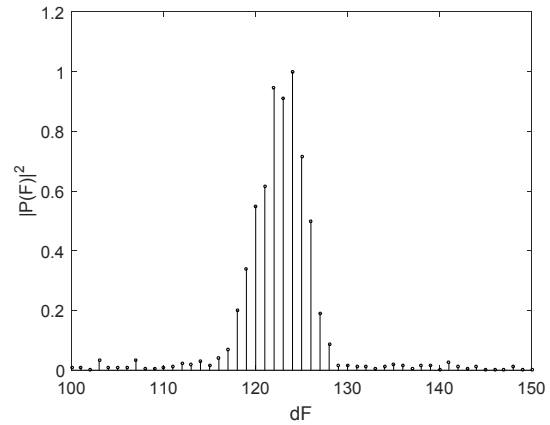
5.2.3. System ze stacjonarnymi nadajnikami

W systemie tym nie można wyznaczać minimalnej wartości stosunku sygnału do szumu na wejściu odbiornika przy założeniu maksymalnej odległości celu od hydrofonu. O wielkości sygnału użytecznego decyduje bowiem odległość celu od hydrofonu, odległość celu od nadajnika oraz właściwości odbijające celu. Te ostatnie zależą od licznych czynników, m. in. od wielkości celu oraz od jego usytuowania względem nadajnika i hydrofonu. Wpływ tych czynników opisują charakterystyki kierunkowe celu, [42,43,44]. Uwzględnianie tych czynników w obliczeniach stosunku sygnału do szumu nie jest jednak konieczne, gdyż nie mierzymy do wyznaczania ani bezwzględnej miary szumów, ani bezwzględnej wartości sygnału użytecznego. Ponieważ stosunek sygnału do szumu jest wielkością względną, a detekcji podlega częstotliwość odchyłki dopplerowskiej, a nie bezwzględne wartości sygnałów, więc analizę można ograniczyć do czynników wpływających na widmo odchyłki dopplerowskiej. Szerokość widma zależy od odległości celu od nadajnika i hydrofonu.

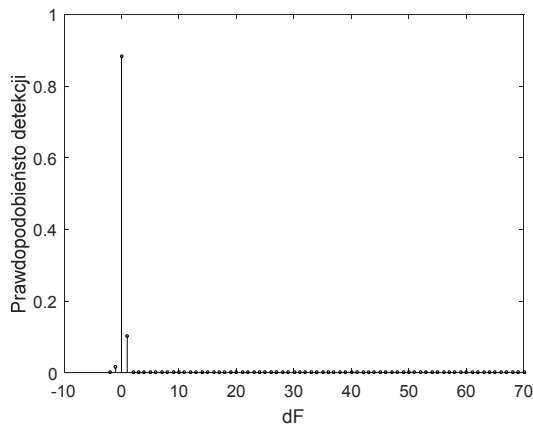
Stosując sposób detekcji używany w poprzednim punkcie, wyznaczono prawdopodobieństwo detekcji dla dwu typowych sytuacji geometrycznych systemu. Na kolejnych rysunkach (5.32 – 5.34) pokazano widma i periodogramy odchyłek dopplerowskich, gdy cel w położeniu początkowym ma współrzędne $x_0 = 20$ m, $y_0 = 20$ m i porusza się z prędkością $|v| = 2$ m/s pod kątem $\beta = -90^\circ$ względem osi X , a nadajnik jest umieszczony na tej osi w odległości 100 m od hydrofonu. Prawidłowa częstotliwość odchyłki dopplerowskiej wynosi 127 Hz, a stosunek sygnału do szumu $SNR = -5$ dB.



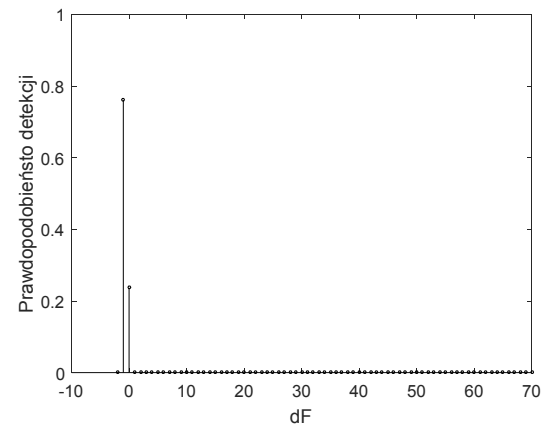
Rys. 5.32. Moduł widma odchyłki dopplerowskiej.



Rys. 5.33. Periodogram odchyłki dopplerowskiej.



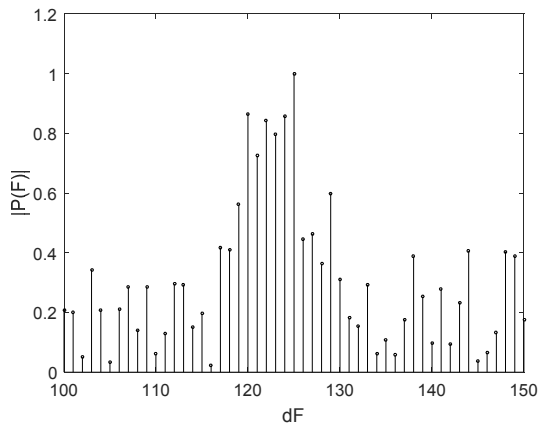
Rys. 5.34. Prawdopodobieństwo detekcji prążka o błędzie częstotliwości dF w module widma.



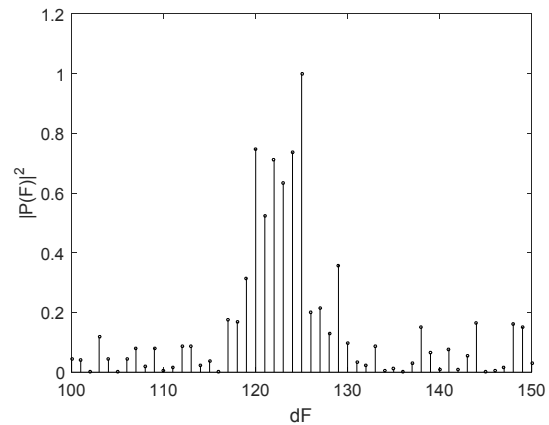
Rys. 5.35. Prawdopodobieństwo detekcji prążka o błędzie częstotliwości dF w periodogramie.

Przy podanym, względnie dużym stosunku sygnału do szumu, mimo szerokiego widma prawdopodobieństwo detekcji jest bliskie jedności zarówno przy detekcji modułu widma, jak periodogramu.

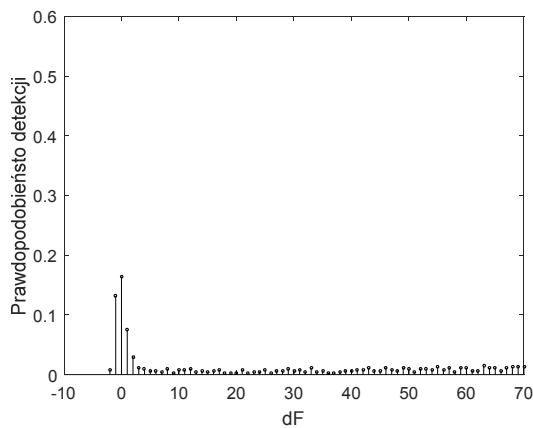
Na kolejnych czterech rysunkach można zaobserwować niekorzystny wpływ pogorszenia stosunku sygnału do szumu. Wynosi on teraz $SNR = -10$ dB, a pozostałe parametry są takie, jak na powyższych rysunkach.



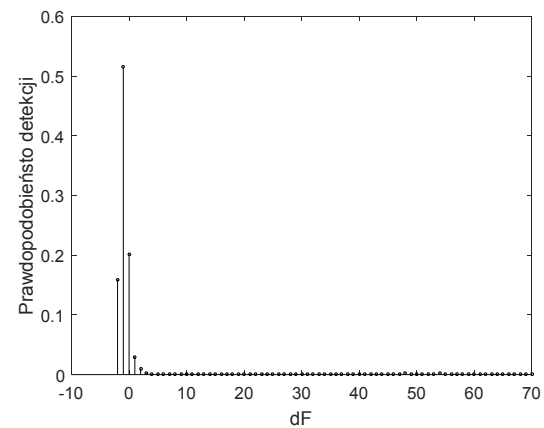
Rys. 5.36. Moduł widma odchyłki dopplerowskiej.



Rys. 5.37. Periodogram odchyłki dopplerowskiej.



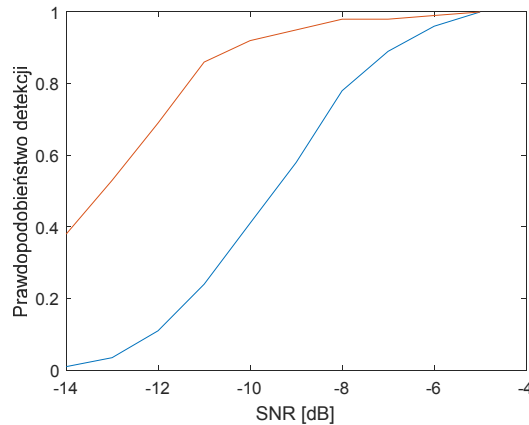
Rys. 5.38. Prawdopodobieństwo detekcji prążka o błędzie częstotliwości dF w module widma.



Rys. 5.39. Prawdopodobieństwo detekcji prążka o błędzie częstotliwości dF w periodogramie.

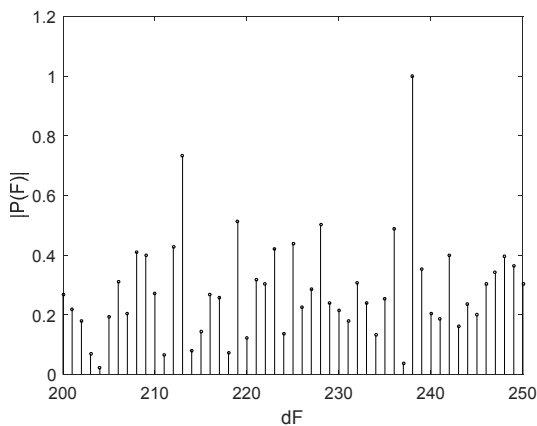
Jak widać na rysunkach, warunki detekcji uległy znacznemu pogorszeniu, zwłaszcza przy detekcji modułu widma. W tym wypadku prawdopodobieństwo detekcji wynosi około 0.2, a w wypadku periodogramu – około 0.55. Przy takim stosunku sygnału do szumu liczba i wielkość popełnianych błędów pomiaru odchyłki dopplerowskiej powoduje nadmierne błędy określania położenia i prędkości celu.

Na rys. 5.40 przedstawiono wyniki obliczeń prawdopodobieństwa detekcji w funkcji stosunku sygnału do szumu dla podanej wyżej konfiguracji systemu.

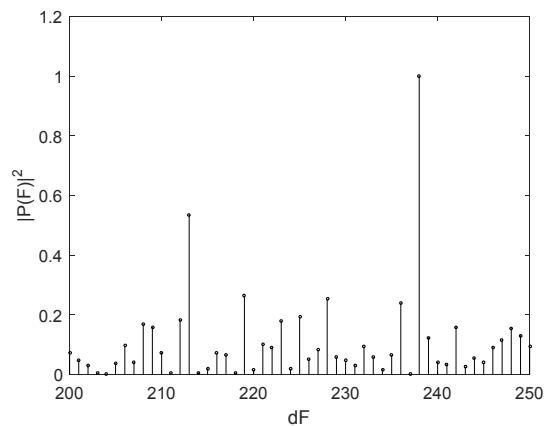


Rys. 5.40. Prawdopodobieństwo poprawnej detekcji,
(dla periodogramu linia czerwona, dla modułu widma linia niebieska).

Przy oddalaniu się celu od nadajnika i hydrofonu szerokość widma odchyłek dopplerowskich zmniejsza się i w konsekwencji maleje negatywny wpływ szumów na warunki detekcji. Ilustrują to poniższe rysunki wykonane przy założeniu, że położenie początkowe celu ma współrzędne $x_0=50\text{m}$, $y_0=100\text{ m}$ i porusza się on w taki sposób, jak w poprzednich przykładach. Odchyłkę dopplerowską wyznacza wówczas jeden prążek o częstotliwości 238 Hz. Rysunki widma wykonano dla $SNR=-18\text{ dB}$

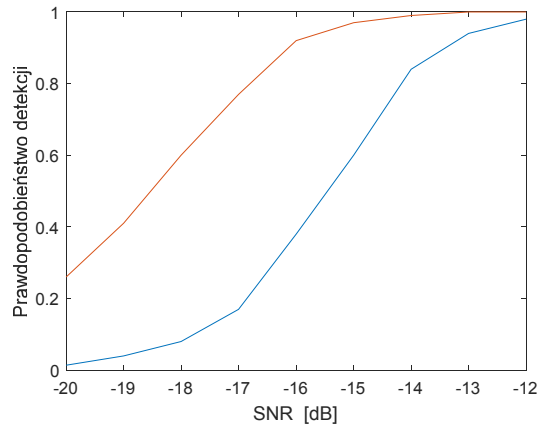


Rys. 5.41. Moduł widma odchyłki dopplerowskiej.



Rys. 5.42. Periodogram odchyłki dopplerowskiej.

Dla podanej sytuacji geometrycznej, prawdopodobieństwo detekcji w funkcji stosunku sygnału do szumu pokazano na rys. 5.43.



Rys. 5.43. Prawdopodobieństwo poprawnej detekcji, (dla periodogramu linia czerwona, dla modułu widma linia niebieska).

Porównanie rys. 5.40 z rys. 5.43 potwierdza sformułowaną wyżej tezę, że ruch celu w większych odległościach od nadajnika i hydrofonu stwarza lepsze warunki detekcji. Wynika stąd praktyczny wniosek dotyczący konfiguracji geometrycznej systemu: jeżeli obszar obserwacji celu pokrywa prawie całą szerokość akwenu należy projektować system zakładając dużą wartość stosunku sygnału do szumu (większą od -5 dB), a jeżeli akwen jest szerszy, to należy umieszczać nadajniki i hydrofony na zewnątrz obszaru obserwacji i zakładać mniejszy stosunek sygnału do szumu (np. -14 dB). Zwiększanie odległości nadajników od hydrofonów powoduje jednak wzrost strat transmisyjnych, co może ograniczyć lub zniweczyć korzyści wynikające z mniejszej wartości stosunku sygnału do szumu. Konieczna jest zatem, na etapie projektowania systemu, optymalizacja jego konfiguracji przestrzennej.

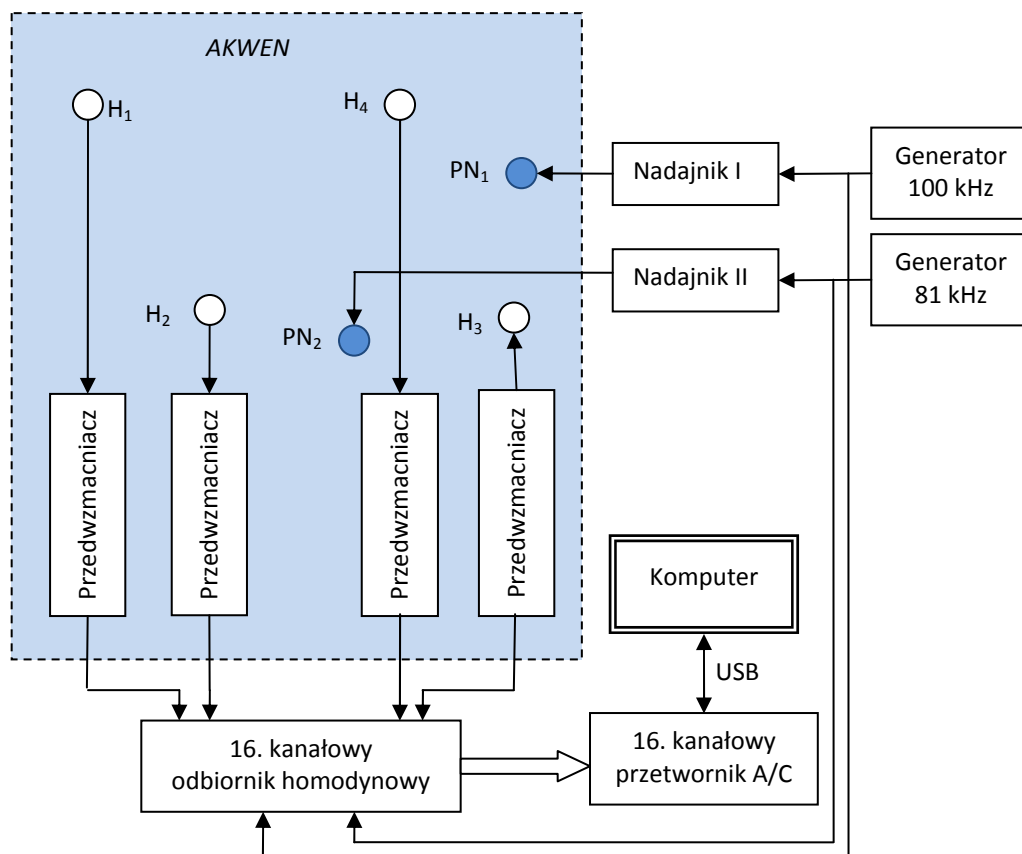
6. MODEL DOŚWIADCZALNY SYSTEMU DO WYZNACZANIA POŁOŻENIA I PRĘDKOŚCI CELU

6.1. Budowa i zasada pracy modelu systemu

Projektując model doświadczalny zakładano, że będzie on wykorzystany do zbadania możliwości zbudowania opisanych wcześniej systemów nawigacyjnych z ruchomym nadajnikiem oraz ze stacjonarnymi nadajnikami i ruchomym celem. Głównym celem badań była eksperymentalna weryfikacja zaproponowanej zasady pracy systemów i opracowanych algorytmów przetwarzania sygnałów. Większość elementów systemu (oprócz hydrofonów, przetworników nadawczych i układu akwizycji danych) zostało zaprojektowanych i wykonanych przez autora. Model doświadczalny zaprojektowano tak, aby bez istotnych zmian konstrukcyjnych mógł być wykorzystany w badaniach obu systemów. Ponieważ system ze stacjonarnymi nadajnikami jest bardziej rozbudowany przyjęto, że system z ruchomym nadajnikiem będzie jego uproszczoną wersją. Z tego względu poniżej opisano najpierw pełny model doświadczalny, a następnie jego uproszczoną wersję.

6.1.1. Opis ogólny modelu systemu ze stacjonarnymi nadajnikami

Rozwiązania zastosowane w zaprojektowanym i zbudowanym modelu doświadczalnym systemu ze stacjonarnymi nadajnikami wynikają z ograniczeń technicznych związanych głównie z dynamiką odbieranych sygnałów. Sygnały odbierane przez hydrofony są sumą bardzo małych sygnałów echa i sygnałów emitowanych przez nadajniki, docierających do hydrofonów po drodze bezpośredniej. Sygnały te są znacznie większe od sygnałów echa i mogą przekraczać zakresy liniowej pracy elementów odbiornika, a zwłaszcza zakres przetwornika analogowo-cyfrowego. Częstotliwość sygnałów bezpośrednich nie jest obciążona odchyłką dopplerowską, a więc ograniczenie wielkości tych sygnałów może polegać na zastosowaniu filtrów zaporowych na częstotliwościach emitowanych przez nadajniki. Jednakże realizacja analogowych filtrów o częstotliwościach środkowych 100 kHz i 81 kHz i szerokości pasma zaporowego 1 Hz jest praktycznie niemożliwa. W związku z tym zastosowano przemianę częstotliwości, która przesuwa widmo odbieranych sygnałów do zakresu dolnopasmowego. Częstotliwościom 100 kHz i 81 kHz odpowiadają wówczas częstotliwości zerowe, a pasmo sygnałów obejmuje odchyłki dopplerowskie. Eliminacja zerowych składowych widma jest wówczas możliwa. Brak sygnałów o częstotliwości zerowej w analizie widmowej jest automatycznie korygowany w algorytmach przetwarzania sygnałów.



Rys. 6.1. Schemat blokowy modelu systemu ze stacjonarnymi nadajnikami (kolorem niebieskim zaznaczono część podwodną, H_n – hydrofony, PN_n – przetworniki nadawcze).

Ogólny schemat modelu doświadczalnego pokazano na rys. 6.1. Model składa się z części podwodnej i części nawodnej. W skład części podwodnej wchodzi dwa przetworniki nadawcze PN_1 i PN_2 oraz cztery hydrofony z przedwzmacniaczami, oznaczone na rysunku jako $H_1 \div H_4$. Część nawodną stanowią dwa nadajniki z generatorami, wielokanałowy odbiornik, 16-kanałowy konwerter A/C i komputer.

Dwukanałowy nadajnik składa się z dwóch generatorów sygnałowych oraz z dwóch wzmacniaczy mocy. Generatory generują ciągłe sygnały sinusoidalne o częstotliwościach 100 kHz (nadajnik I) i 81 kHz (nadajnik II), które są wzmacniane we wzmacniaczach mocy i przesyłane izolowanymi kablami do dwóch przetworników nadawczych (odpowiednio PN_1 i PN_2). Jednocześnie sygnały sinusoidalne z generatorów są podawane do odbiornika, w którym jest dokonywana przemiana częstotliwości sygnałów odebranych przez hydrofony.

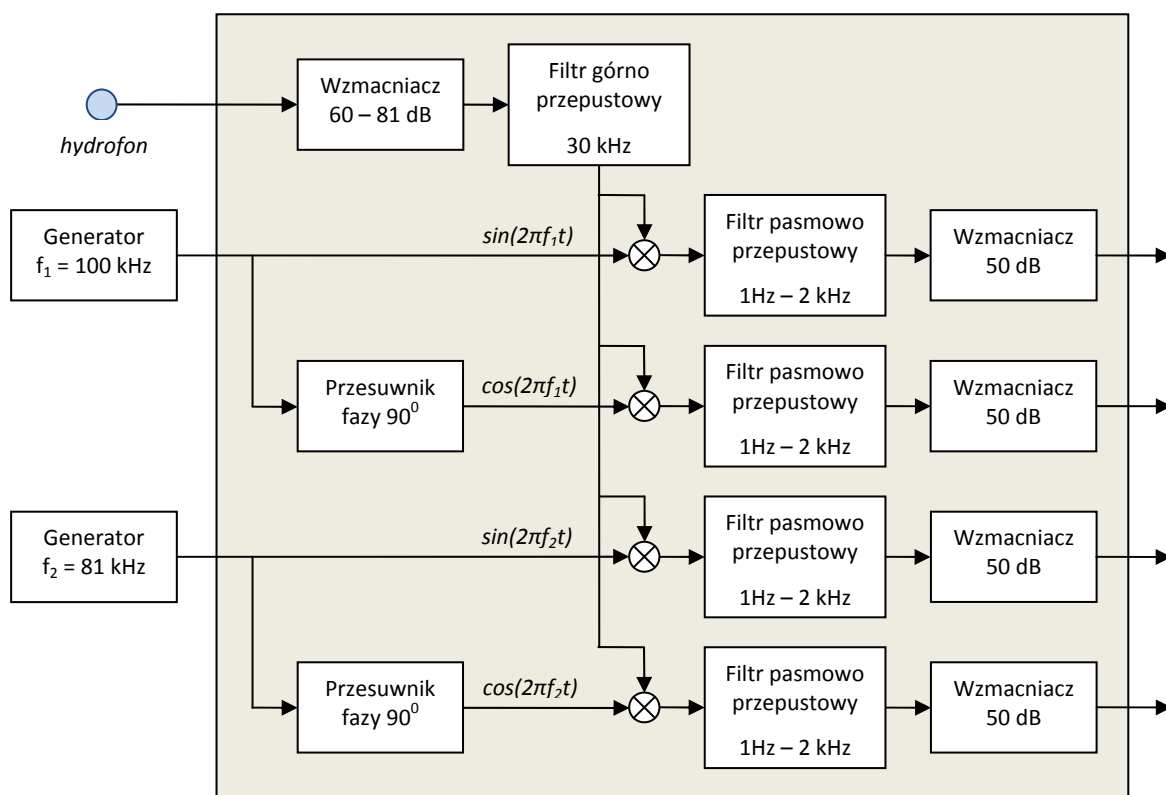
Każdy z hydrofonów połączony jest z przedwzmacniaczem zapewniającym wstępne wzmocnienie sygnałów elektrycznych wychodzących z hydrofonu, a także odfiltrowanie zakłóceń pochodzących głównie od sieci energetycznej oraz dopasowanie impedancji hydrofonu do impedancji kabla połączeniowego.

Kolejną częścią systemu jest wielokanałowy homodynowy odbiornik, czyli odbiornik z przemianą częstotliwości realizowaną przez mnożenie sygnałów odebranych z odpowiednimi sygnałami nadawanymi. Schemat blokowy odbiornika pokazano na rys. 6.2. Po wzmocnieniu, mnożeniu homodynowym i filtracji pasmowo-przepustowej w odbiorniku,

16-kanalowy konwerter A/C przekształca sygnały z kanałów odbiorczych na postać cyfrową i poprzez interfejs USB przekazuje je do komputera, gdzie są zapisywane w formie plików w pamięci masowej. Następnie zgromadzone dane przetwarzane są w trybie off-line'owym w środowisku MATLAB®.

Odbiornik składa się z czterech jednakowych kanałów, z których każdy zawiera wzmacniacz wysokoczęstotliwościowy o regulowanym wzmocnieniu wraz z filtrem górno-przepustowym, 4 mnożniki analogowe i 4 aktywne filtry pasmowo-przepustowe o wzmocnieniu 50 dB. Ponadto wspólne dla wszystkich kanałów są dwa przesuwniki fazy zapewniające mnożenie kwadraturowe.

Regulacja wzmocnienia ma na celu maksymalne wykorzystanie dynamiki toru odbiorczego przed procesem mnożenia. Dla określonej sytuacji geometrycznej poligonu wzmocnienie ustawia się tak, aby suma sygnałów bezpośrednich odebranych przez poszczególne hydrofony nie doprowadziła do przesterowania całego toru odbiorczego.



Rys. 6.2. Schemat blokowy jednego kanału odbiornika homodynowego.

Sygnały z każdego toru odbiorczego są podawane do czterech mnożników analogowych. Sygnały te są tam poddawane kwadraturowemu mnożeniu homodynowemu z dwoma sygnałami, które jednocześnie wysterowują przetworniki nadawcze [45]. Mnożenie homodynowe powoduje, że częstotliwość sygnału bezpośredniego pochodzącego z danego kanału nadawczego przesuną się do zera, a z sygnału echa wyodrębniony jest sygnał o częstotliwości poszukiwanej odchyłki dopplerowskiej F [46,47]. Natomiast mnożenie sygnałów z toru odbiorczego ze składową sinusoidalną i kosinusoidalną określonego sygnału nadawczego umożliwia odtworzenie znaku odchyłki dopplerowskiej w dalszym procesie zespolonej transformacji FFT [47,48] sygnału po konwersji analogowo-cyfrowej. Ilustrują to następujące wzory odnoszące się do pierwszego nadajnika:

składowa synfazowa

$$\begin{aligned}
 x_i(t) &= \{s_c \sin[2\pi(f_1 + F)t + \varphi_c] + s_{b1} \sin(2\pi f_1 t + \varphi_{b1}) + s_{b2} \sin(2\pi f_2 t + \varphi_{b2})\} \sin(2\pi f_1 t) = \\
 &= \frac{1}{2} [s_c \cos(2\pi F t + \varphi_c) - s_c \cos[2\pi(2f_1 + F)t + \varphi_c]] + \\
 &+ \frac{1}{2} [s_{b1} \cos(\varphi_{b1}) - s_{b1} \cos(4\pi f_1 t + \varphi_{b1})] + \\
 &+ \frac{1}{2} \{s_{b2} \cos[2\pi(f_2 - f_1) + (\varphi_{b2} - \varphi_{b1})] - s_{b2} \cos[4\pi(f_2 + f_1) + (\varphi_{b2} - \varphi_{b1})]\}
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

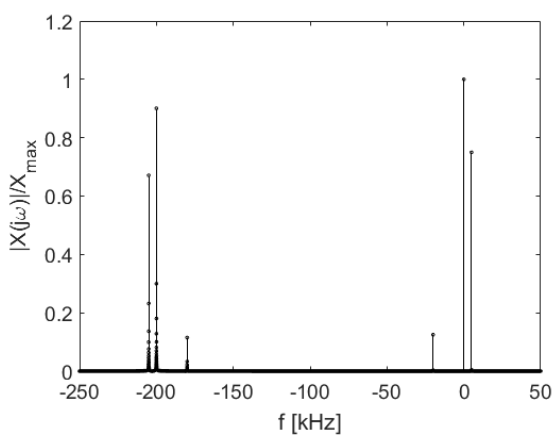
składowa kwadraturowa

$$\begin{aligned}
 x_q(t) &= \{s_c \sin[2\pi(f_1 + F)t + \varphi_c] + s_{b1} \sin(2\pi f_1 t + \varphi_{b1}) + s_{b2} \sin(2\pi f_2 t + \varphi_{b2})\} \cos(2\pi f_1 t) = \\
 &= \frac{1}{2} [s_c \sin(2\pi F t + \varphi_c) - s_c \sin[2\pi(2f_1 + F)t + \varphi_c]] + \\
 &+ \frac{1}{2} [s_{b1} \sin(\varphi_{b1}) - s_{b1} \sin(4\pi f_1 t + \varphi_{b1})] + \\
 &+ \frac{1}{2} \{s_{b2} \sin[2\pi(f_2 - f_1) + (\varphi_{b2} - \varphi_{b1})] - s_{b2} \sin[4\pi(f_2 + f_1) + (\varphi_{b2} - \varphi_{b1})]\}
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

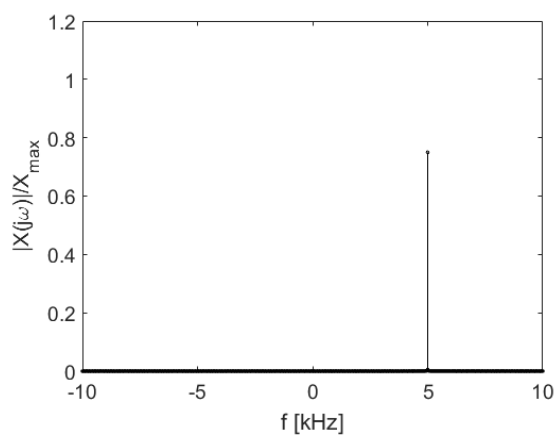
gdzie amplitudy sygnałów odebranych przez hydrofon, oznaczono jako: s_c - odbitego od celu, s_{b1} - bezpośredniego od nadajnika I, s_{b2} - bezpośredniego od nadajnika II, f_1 jest częstotliwością sygnału emitowanego przez nadajnik I, f_2 - przez nadajniki II, a φ są fazami odpowiednich sygnałów.

Filtracja pasmowo-przepustowa po mnożeniu analogowym ma na celu redukcję składowej stałej odpowiadającej sygnałowi bezpośredniemu oraz usunięcie niepożądanych składowych widma pochodzących od drugiej częstotliwości pracy systemu.

Na rys. 6.3 pokazano widmo sygnału zespolonego $x(t)=x_i(t)+jx_q(t)$, a na rys. 6.4 widmo sygnału po filtracji pasmowo-przepustowej. Dla przejrzystości rysunków przyjęto dużą częstotliwość odchyłki dopplerowskiej $F=5$ kHz.



Rys. 6.3. Widmo obieranego sygnału zespolonego.



Rys. 6.4. Widmo sygnału zespolonego po filtracji.

6.1.2. Konstrukcja nadajników i przetworników nadawczych.

Dwukanałowy nadajnik składa się z dwóch generatorów sygnałowych RIGOL typu DG2041A oraz z dwóch wzmacniaczy mocy. Generatory generują ciągłe sygnały sinusoidalne o częstotliwościach: 100kHz (nadajnik I) i 81kHz (nadajnik II), które są wzmacniane we wzmacniaczu mocy i przesyłane izolowanymi kablami do dwóch przetworników nadawczych (odpowiednio *PN1* i *PN2*). Do skonstruowania obu nadajników zostały wykorzystane scalone wzmacniacze mocy LM1875 [49] charakteryzujące się stosunkowo dużym prądem wyjściowym (około 4A).

W każdym z dwóch kanałów nadawczych zastosowano regulację napięcia wyjściowego. Pozwala to na odpowiednie ustalenie poziomu sygnału wyjściowego przy wybranej konfiguracji położenia przetworników nadawczych względem hydrofonów tak, aby nie dochodziło do przesterowania wywołanego odbiorem sygnału bezpośredniego w żadnym z torów odbiorczych.

W modelu systemu wykorzystano ultradźwiękowe przetworniki nadawcze o dookólnej charakterystyce kierunkowej w płaszczyźnie horyzontalnej. Jeden z nich, pracujący z częstotliwością nadawczą 100kHz został wyprodukowany przez firmę International Transducer Corporation. Jest to szerokopasmowy hydrofon o symbolu ITC-1089D, który po zastosowaniu układu dopasowującego pełni rolę przetwornika nadawczego. Przy współpracy z zaprojektowanym nadajnikiem jego maksymalny poziom źródła dla częstotliwości 100kHz wynosi $SL=57$ dB. Drugi przetwornik jest konstrukcją Katedry Systemów Elektroniki Morskiej PG. Przy maksymalnymysterowaniu nadajnika nieznieskształconym sygnałem sinusoidalnym o częstotliwości 81kHz przetwornik ten charakteryzuje się poziomem źródła SL około 60 dB.

6.1.3. Hydrofony i przedwzmacniacze.

Sygnały hydroakustyczne emitowane przez przetworniki nadawcze po odbiciu od celu są odbierane przez hydrofony *H1, ..., H4*. Wszystkie cztery hydrofony są produktami firmy Teledyne Reson o symbolu TC4013. Cechują się one dookólną charakterystyką kierunkową zarówno w płaszczyźnie horyzontalnej jak i wertykalnej oraz płaską charakterystyką czułości w zakresie częstotliwości od 5 do 150kHz. Odpowiedź napięciowa w tym zakresie częstotliwości wynosi $VR= -91$ dB względem 1V/Pa. Napięcie skuteczne szumów na wejściu przedwzmacniacza wynosi 2 μ V.

Każdy z hydrofonów połączony jest z odpowiednim przedwzmacniaczem za pośrednictwem kabla o długości ok. 80 cm. Zadaniem przedwzmacniacza jest dopasowanie impedancji hydrofonu do impedancji kabla połączeniowego, wstępne wzmocnienie sygnałów elektrycznych wychodzących z hydrofonu, a także odfiltrowanie zakłóceń pochodzących głównie od sieci energetycznej. Przedwzmacniacze są typowymi, aktywnymi filtrami górnoprzepustowymi trzeciego rzędu z ujemnym sprzężeniem zwrotnym [50,51,52] o dolnej częstotliwości granicznej 500Hz i wzmocnieniu napięciowym 36dB. Ich konstrukcja opiera się na wzmacniaczach operacyjnych AD797 [53] o bardzo niskim poziomie szumów i szerokim paśmie przenoszenia. Tłumienie sygnału o częstotliwości 50Hz wynosi 62dB. W konstrukcji zastosowano zasilanie niesymetryczne, co pozwoliło na redukcję liczby przewodów w kablu łączącym przedwzmacniacze z odbiornikiem, w którym znajdują się układy zasilające wszystkie przedwzmacniacze. Każdy z przedwzmacniaczy umieszczony jest w ekranowanej obudowie, zakończonej wodoszczelnym gniazdem. Rozwiązanie takie umożliwia łatwe dobranie długości kabli połączeniowych dla dowolnego poligonu pomiarowego.

6.1.4. Odbiornik (bez części homodynowej).

Wstępnie wzmocnione sygnały z przedwzmacniaczy trafiają do czterokanałowego odbiornika, którego zadaniem jest ostateczne wzmocnienie sygnałów i odfiltrowanie pozostałych zakłóceń. Podobnie jak w przypadku przedwzmacniaczy wszystkie cztery kanały odbiorcze zostały zaprojektowane w układzie filtra górnoprzepustowego trzeciego rzędu. W pierwszym stopniu każdego kanału odbiornika znajduje się, podobnie jak w przedwzmacniaczu, wzmacniacz operacyjny AD797 o bardzo niskim poziomie szumów i szerokim paśmie przenoszenia. W drugim stopniu zastosowano natomiast wzmacniacz operacyjny AD825 [54] o dużym zakresie zmian napięcia wyjściowego ($26V_{pp}$ dla częstotliwości 300kHz przy obciążeniu $1k\Omega$) i dużej odporności na przesterowanie. W efekcie zastosowanych rozwiązań pasmo przenoszenia każdego z czterech kanałów w odbiorniku zawiera się w przedziale 30–300kHz, tłumienie zakłóceń o częstotliwości 1kHz wynosi 60dB a maksymalne wzmocnienie sygnału użytecznego sięga 54dB. Zapewnia to wzmocnienie całego toru odbiorczego na poziomie od 56 do 90dB w zależności od zastosowanej regulacji wzmocnienia. W obudowie odbiornika umieszczone są również układy zasilające przedwzmacniacze hydrofonowe.

6.1.5. Odbiornik homodynowy.

W modelu systemu ze stacjonarnymi nadajnikami zaistniała potrzeba mieszania sygnałów odbiorczych z sygnałami sterującymi oba nadajniki. Każdy kanał odbiorczy połączony jest z czterema scalonymi mnożnikami analogowymi AD633 [55]. Do dwóch pierwszych dochodzi sygnał o częstotliwości 100kHz (ten sam, który wysterowuje nadajnik) z tym, że na drugim mnożniku występuje sygnał przesunięty w fazie o 90° . Dzięki temu po mnożeniu otrzymujemy niskoczęstotliwościową składową sinusoidalną i kosinusoidalną sygnału odebranego przez hydrofon, co umożliwi określenie znaku odchyłki dopplerowskiej [46]. Dwa następne mnożniki obsługują drugą częstotliwość nadawczą występującą w systemie czyli 81kHz. Oba sygnały o częstotliwościach 100kHz i 81kHz podawane są na mnożniki poprzez układ buforujący i przesuwnik fazy zrealizowane na wzmacniaczach operacyjnych AD8599.

Za każdym mnożnikiem znajduje się aktywny filtr pasmowo-przepustowy o pasmie przenoszenia 1Hz-2kHz i wzmocnieniu 50dB. Filtry pasmowo-przepustowe, wykonane także przy użyciu wzmacniaczy operacyjnych AD8599 [56], to złożenie dwóch filtrów trzeciego rzędu [50,51,52]: dolno-przepustowego o częstotliwości granicznej 1Hz i górno-przepustowego tłumiącego sygnały powyżej 2kHz. Tłumienie sygnału niepożądanego pochodzącego od drugiej częstotliwości nadawczej dla każdego filtru pasmowo-przepustowego wynosi 76dB.

Ponieważ do każdego kanału hydrofonowego podłączone są cztery mnożniki analogowe wraz z filtrami pasmowo-przepustowymi otrzymujemy ostatecznie szesnaście kanałów odbiorczych odbiornika homodynowego.

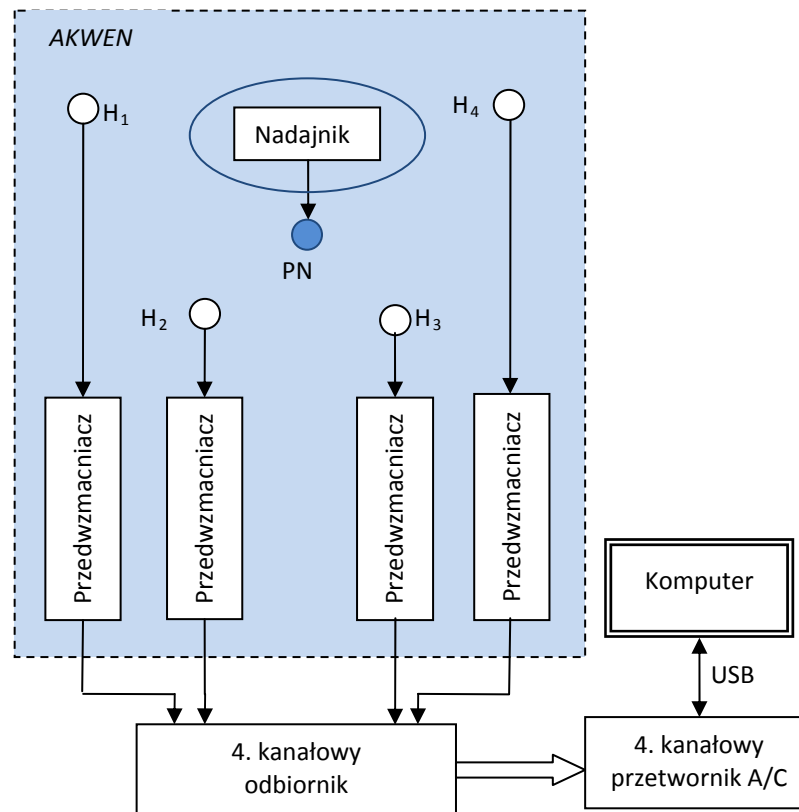
6.1.6. Układ akwizycji danych.

Po wzmocnieniu i odfiltrowaniu zakłóceń w przedwzmacniaczach i odbiorniku homodynowym sygnały z szesnastu kanałów odbiorczych przekazywane są do wykonanego w Katedrze Systemów Elektroniki Morskiej PG układu akwizycji danych. Tam podlegają konwersji analogowo-cyfrowej z częstotliwością próbkowania 50kHz i rozdzielczością 14 bitową. Układ akwizycji danych ma konstrukcję modułową. Każdy z modułów wykonany jest w formie płytki nakładkowej, na której znajduje się dwukanałowy konwerter analogowo-cyfrowy AD7367 [57] firmy Analog Devices. Jeden taki konwerter zapewnia przepustowość na poziomie 1MSPS (milion próbek na sekundę) na kanał. Dane z konwerterów przesyłane są szybkim łączem szeregowym kompatybilnym z SPI®, QSPI™ i MICROWIRE.

Zebrane sygnały cyfrowe z szesnastu kanałów przesyłane są z układu akwizycji danych do połączonego złączem USB komputera PC, gdzie są zapisywane w formie plików w pamięci masowej. Następnie zgromadzone dane przetwarzane są w trybie off-line'owym w środowisku MATLAB[®] za pomocą opisanych w rozdz. 3 opracowanych, specjalnie dla prezentowanego systemu algorytmów obliczeniowych.

6.1.7. Model systemu z ruchomym nadajnikiem.

Schemat blokowy modelu z ruchomym nadajnikiem pokazano na rys. 6.5



Rys. 6. 5. Schemat blokowy modelu systemu z ruchomym nadajnikiem (kolorem niebieskim zaznaczono część podwodną, H_n – hydrofony, PN – przetwornik nadawczy).

System z ruchomym nadajnikiem różni się od systemu ze stacjonarnymi nadajnikami jedynie tym, że w tym pierwszym nie występuje mnożenie sygnałów czyli nie ma odbiornika homodynowego. W związku z tym cały odbiornik jest czterokanałowy, a jego konstrukcję omówiono w p. 6.1.4. Parametry wszystkich komponentów czyli nadajnika, przedwzmacniaczy i odbiornika są identyczne jak w poprzednio omawianym systemie.

W układzie akwizycji danych po wzmacnieniu i odfiltrowaniu zakłóceń w przedwzmacniaczach i odbiorniku sygnały z czterech kanałów odbiorczych podlegają konwersji analogowo-cyfrowej z częstotliwością próbkowania 300kHz i rozdzielczością 14-to bitową. Układ akwizycji danych składa się więc jedynie z dwu dwukanałowych konwerterów analogowo-cyfrowych AD7367 firmy Analog Devices.

Sygnały cyfrowe z czterech kanałów odbiorczych przesyłane są do połączonego złączem USB komputera PC, gdzie podobnie jak poprzednio są zapisywane w formie plików w pamięci masowej. Przetwarzanie danych odbywa się w trybie off-line'owym w środowisku MATLAB[®] według algorytmów opracowanych dla systemu z ruchomym nadajnikiem, opisanych w rozdziale 3.

6.2. Obliczenia systemowe podstawowych parametrów technicznych modelu

Celem obliczeń systemowych jest oszacowanie podstawowych parametrów technicznych modelu systemu, które zapewnią spełnienie stawianych mu wymagań o charakterze eksploatacyjnym.

Parametry techniczne zostały wyznaczone na podstawie równania zasięgu, powszechnie używanego w hydroakustyce, [58,26]. Z tego względu pominięto definiowanie poszczególnych parametrów równania. Wartości liczbowe niektórych z tych parametrów różnią się w zależności od przyjętego standardu odniesienia. W przedstawionych niżej obliczeniach przyjmujemy jako wielkość odniesienia skuteczne ciśnienie akustyczne równe $p_l=1\text{Pa}$. Pozostałe wielkości odniesienia są zgodne z system jednostek SI.

Równanie zasięgu można rozpatrywać na trzy sposoby, w zależności od zakłóceń dominujących w systemie. W klasycznym ujęciu zakłada się, że w systemie dominują szumy akustyczne ośrodka. Założenie to weryfikuje się w zależności od wielkości szumów elektrycznych na wejściu odbiornika; jeżeli przekraczają one poziom szumów pochodzenia akustycznego, wówczas przyjmuje się, że dominują szumy elektryczne. W dalszych obliczeniach założymy z góry, że w modelu systemu przeważają szumy elektryczne, co jest typowe w systemach pracujących na wysokich częstotliwościach. Niekiedy równanie zasięgu rozwiązuje się przy założeniu dominacji rewerberacji granicznych lub objętościowych. Jakkolwiek ten rodzaj zakłóceń może rzeczywiście dominować w rozpatrywanym systemie, to nie będziemy go rozpatrywać (podobnie jak w większości systemów hydrolokacyjnych), ze względu na trudny do oszacowania poziom rewerberacji. Zależy on bowiem silnie od lokalnych warunków propagacji i aktualnych warunków pogodowych.

6.2.1. System z ruchomym nadajnikiem

W zbudowanym modelu doświadczalnym zmierzono napięcie skuteczne szumów elektrycznych na wejściu odbiornika w paśmie przenoszenia systemu $B = 810 \text{ Hz}$. Wynosi ono $U_n = 2\mu\text{V}$.

Wykorzystane są hydrofony, których odpowiedź napięciowa jest równa $VR = -91 \text{ dB}$ (re 1 V/1 Pa). Tak więc poziom szumów można obliczyć jako:

$$NL = 20 \log \left(\frac{U_n}{U_1} \right) - VR = -114 + 91 = -23 \text{ dB} \quad (6.3)$$

gdzie $U_1=1\text{V}$.

W podrozdziale 5.2 wyznaczono minimalny stosunek sygnału do szumu SNR , który w nomenklaturze równania zasięgu oznacza się jako próg detekcji DT . Korzystając ze wcześniejszych obliczeń przyjęto, że $DT=-14 \text{ dB}$. Można zauważyć, że ujemna wartość progu detekcji jest charakterystyczna w systemach, w których do detekcji wykorzystywana jest transformata Fouriera sygnału odebranego.

Ponieważ dominują szumy elektryczne, a więc indeks kierunkowości hydrofonu nie powinien być uwzględniany i minimalny poziom odbieranego sygnału EL opisany jest zależnością:

$$EL = NL + DT = -23 - 14 = -37 \text{ dB} \quad (6.4)$$

$$EL = NL + DT = -23 + 14 = -37 \text{ dB} \quad (6.5)$$



Wartość skuteczna napięcia sygnału użytecznego oblicza się ze wzoru:

$$20 \log \left(\frac{U}{U_1} \right) = EL + VR = -37 - 91 = -128 \text{ dB} \quad (6.6)$$

skąd $U=0.4 \mu\text{V}$.

Znając niezbędną wartość poziomu echa EL można wyznaczyć poziom źródła SL z poniższego wzoru:

$$SL = EL + TL \quad (6.7)$$

gdzie TL są stratami transmisji na drodze nadajnik – hydrofon.

Zakładając sferyczny model propagacji fali akustycznej w akwenu, straty transmisji TL można wyznaczyć z zależności:

$$TL = 20 \log \left(\frac{R}{R_1} \right) + \alpha R \quad (6.8)$$

gdzie R [m] jest zasięgiem systemu, $R_1=1$ m, a α [dB/m] jest logarytmicznym współczynnikiem tłumienia absorpcyjnego w wodzie. Przyjęto wykorzystywanie modelu doświadczalnego w wodach śródlądowych o zerowym zasoleniu i wtedy dla częstotliwości $f_0=100$ kHz, współczynnik α jest równy: $\alpha=0.04$ dB/m [26,59]. Po wstawieniu $R=140$ m (przekątna siatki) i wyznaczonej wartości α otrzymujemy:

$$TL = 20 \log 140 + 0.04 \cdot 140 = 43 + 5.6 = 48.6 \text{ dB} \quad (6.9)$$

Wykorzystując wyznaczone wartości EL i TL ze wzoru (6.7) otrzymujemy pożądaną wielkość poziomu źródła, która wynosi $SL=-37+48.6= 11.6$ dB

Moc nadajnika P_n związana jest z poziomem źródła następującą zależnością:

$$10 \log \left(\frac{P_n}{P_1} \right) = SL - 51 - 1 - \log \eta - DI \quad (6.10)$$

gdzie η jest sprawnością nadawczego przetwornika ultradźwiękowego, DI – indeksem jego kierunkowości, a $P_1=1\text{W}$. Zmierzona sprawność przetwornika wynosi $\eta=0.2$, (-7 dB), a wskaźnik kierunkowości $DI = 7$ dB. Wstawiając te wielkości do wzoru (6.10) otrzymujemy: $P_n= 115\mu\text{W}$.

Reasumując parametry systemu są następujące:

- | | |
|---|-----------------------------------|
| • częstotliwości pracy nadajników | $f_{01}=81$ kHz, $f_{02}=100$ kHz |
| • moc nadajnika | $P_n=115 \mu\text{W}$ |
| • szerokość pasma przenoszenia odbiornika | $B=810$ Hz |
| • czas pojedynczej obserwacji | $T= 1$ s |
| • maksymalna odległość celu od nadajnika i odbiornika | $R=140$ m |
| • prawdopodobieństwo detekcji | $PD= -14$ dB |
| • napięcie skuteczne szumów | $U_n=2 \mu\text{V}$ |
| • napięcie skuteczne sygnału użytecznego | $U=0.4 \mu\text{V}$ |
| • maksymalna prędkość nadajnika | $v_{max}= 4$ m/s |

W modelu doświadczalnym dokonano korekty powyższych parametrów kierując się względami technicznymi, które omówiono w poprzedniej części tego rozdziału.

6.2.2. System ze stacjonarnymi nadajnikami

Budując opisany dalej model doświadczalny systemu zakładano, że poszczególne jego elementy będą wykorzystywane w obu jego wersjach. Zmianie ulegnie jedynie oprogramowanie komputera. Wymagania techniczne dotyczące systemu ze stacjonarnymi nadajnikami będą jednak większe ze względu na jego echolokacyjny charakter. W przedstawionych niżej obliczeniach wykorzystano niektóre, wyżej wyznaczone parametry odbiornika, a zatem obliczenia te zmierzają do wyznaczenia minimalnej mocy nadajnika.

Zgodnie z przeprowadzonymi wcześniej obliczeniami przyjęto, że próg detekcji wynosi $DT = -5$ dB. W związku z tym rośnie minimalny poziom echa i jest równy: $EL = -23 - 5 = -28$ dB.

Straty transmisyjne w systemie są sumą strat TL_{nc} na drodze nadajnik – cel i strat TL_{ch} na drodze cel – hydrofon. W obu wypadkach są to straty jednostronne opisane wzorami, [26]:

$$TL_{nc} = 20 \log \frac{R_{nc}}{R_1} + \alpha R_{nc} \quad TL_{ch} = 20 \log \frac{R_{ch}}{R_1} + \alpha R_{ch} \quad (6.11)$$

gdzie R_{nc} jest odległością celu od przetwornika nadawczego, R_{ch} – odległością celu od hydrofonu, zaś α - logarytmicznym współczynnikiem tłumienia fali akustycznej w wodzie. W rezultacie łączne straty transmisyjne wynoszą:

$$TL = TL_{nc} + TL_{ch} \cong 20 \log \frac{R_{nc} R_{ch}}{R_1^2} + 2\alpha(R_{nc} + R_{ch}) \quad (6.12)$$

Dla kwadratowego obszaru obserwacji o oboku 100 m, hydrofonu zainstalowanego na wierzchołku kwadratu w punkcie $x_h = y_h = 0$ m i nadajnika umieszczonego po przeciwnej stronie kwadratu w punkcie o współrzędnych $x_n = 100$ m i $y_n = 50$, maksymalne straty transmisyjne wynoszą $TL = 90$ dB

W rozpatrywanym systemie poziom źródła SL jest równy:

$$SL = EL + TL - TS \quad (6.13)$$

gdzie TS jest siłą celu obserwowanego obiektu.

Ze względu na słabsze odbicie fali w kierunkach różniących się od kierunku padania fali, a taka sytuacja występuje zawsze w rozpatrywanym systemie, przyjmiemy w dalszych obliczeniach małą wartość siły celu, a mianowicie $TS = -20$ dB. Po wstawieniu do wzoru (6.13) tej i wcześniej obliczonych wartości otrzymujemy: $SL = -28 + 90 + 20 = 84$ dB.

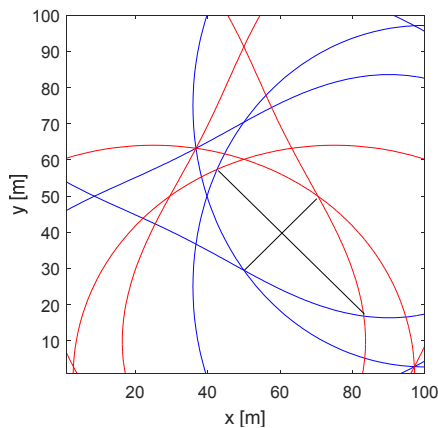
Moc elektryczną nadajnika obliczamy ze wzoru (6.10):

$$10 \log \left(\frac{P_n}{P_1} \right) = 84 - 51 + 7 - 7 = 33 \text{ dB} \quad (6.14)$$

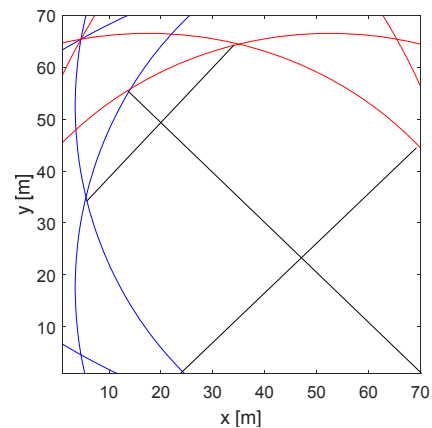
Stąd wynika, że pożądana moc nadajnika wynosi $P_n = 2$ kW.

W zbudowanym modelu doświadczalnym zmniejszono znacznie moc nadajnika w stosunku do podanej wyżej wielkości. Wynikało to z występowania przesłuchów między nadajnikami i hydrofonami powodujących przekraczanie liniowego zakresu napięć wejściowych odbiornika. Zagadnienie to było omówione w poprzedniej części tego rozdziału. Przy ograni-

czonej mocy nadajnika zmierzono poziom źródła SL , który wynosi $SL=60$ dB. Przy takim poziomie źródła zasięg systemu jest ograniczony, co pokazano na rys. 6.6. Hydrofony umieszczone są w wierzchołkach kwadratowego obszaru obserwacji o boku 100 m, jeden z nadajników ma współrzędne $X_{N1}=50$ m, $Y_{N1}=0$ m, a drugi: $X_{N2}=100$ m, $Y_{N1}=50$ m. Obszar, w którym spełnione jest równanie zasięgu zaznaczono czarnymi liniami. Obszar ten można powiększyć zmniejszając potencjalne pole obserwacji, co pokazano na rys. 6.7. Hydrofony znajdują się w wierzchołkach kwadratu o boku 70 m, a nadajniki mają współrzędne: $X_{N1}=35$ m, $Y_{N1}=0$ m, a drugi: $X_{N2}=70$ m, $Y_{N1}=35$ m.



Rys. 6.6. Obszar zasięgu dla pola obserwacji o boku 100 m.



Rys. 6.7. Obszar zasięgu dla pola obserwacji o boku 70 m.

Obszar pokazany na rys. 6.7 jest wystarczająco duży do prowadzenia wstępnych badań modelu systemu.

7. WYNIKI POMIARÓW DOŚWIADCZALNYCH

Głównym celem przeprowadzonych badań doświadczalnych było sprawdzenie poprawności zaproponowanej metody określania położenia i prędkości ruchomych obiektów podwodnych opartej wyłącznie na pomiarach odchyłek dopplerowskich. W szczególności badania służyły do doświadczalnej weryfikacji opracowanych i sprawdzonych symulacyjnie algorytmów przetwarzania sygnałów i danych pomiarowych. Drugim celem pomiarów było zbadanie wpływu warunków propagacyjnych w rzeczywistym akwenu na funkcjonowanie systemów. Do realizacji tych celów wykorzystano modele systemów opisane w poprzednim rozdziale. Modele systemów były testowane przez autora na etapie ich konstruowania przy zastosowaniu standardowych metod pomiarów układów elektronicznych oraz pomiarów akustycznych w basenie Katedry Systemów Elektroniki Morskiej PG. Wyniki badań laboratoryjnych podano w opisie konstrukcji modeli systemu w rozdziale 6.

7.1. Układ pomiarowy

Pomiary terenowe prowadzono na Jeziorze Wdzydze w Stacji Badań Hydroakustycznych Katedry Systemów Elektroniki Morskiej PG [60,61,62] oraz w zatoce tego jeziora leżącej w pobliżu półwyspu Lipa. Warunki propagacji w tym jeziorze są podobne do tych, które występują w strefie przybrzeżnej w Bałtyku [63]. Na rys. 7.1 pokazano stanowisko pomiarowe Stacji Badań Hydroakustycznych, a na rys. 7.2 – łódź, z zamontowanym nadajnikiem, w trakcie badań modelu systemu. Czerwone boje widoczne na rys. 7.2 oznaczają położenie dwóch hydrofonów.



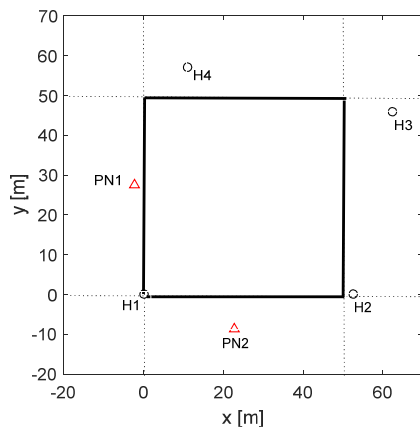
Rys. 7.1. Stanowisko pomiarowe na Jeziorze Wdzydze.



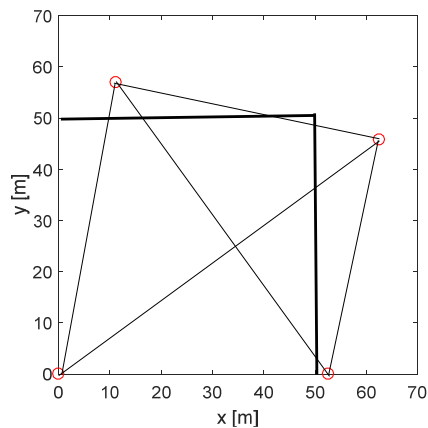
Rys. 7.2. Łódź motorowa w trakcie pomiarów.

Usytuowanie elementów układu pomiarowego wykorzystywanego do badania systemu ze stacjonarnymi nadajnikami pokazano na rys. 7.3. Pogrubione linie ograniczają przyjęty obszar obserwacji. Przetworniki nadawcze i hydrofony z przedwzmacniaczami połączone były kablami podwodnymi odpowiednio z nadajnikiem i odbiornikiem, które to znajdowały się na pomoście pływającym, zacumowanym w pobliżu obszaru obserwacji.

Na rys. 7.4 widoczne jest położenie hydrofonów oraz linie łączące hydrofony, których otoczenie jest miejscem potencjalnych fałszywych rozwiązań w systemie z ruchomym nadajnikiem. Symbolem PN1 oznaczono przetwornik nadawczy emitujący sygnał o częstotliwości 100 kHz, a symbolem PN2 – o częstotliwości 81 kHz.



Rys. 7.3. Położenie elementów modelu systemu ze stacjonarnymi nadajnikami.



Rys. 7.4. Położenie hydrofonów w modelu systemu z ruchomym nadajnikiem.

Średnia głębokość obszaru obserwacji wynosiła 5 m, a głębokości zanurzenia przetworników nadawczych i hydrofonów – 2 m. Były one przytwierdzone do lin łączących boje z kotwicami posadowionymi na dnie. Położenie hydrofonów pokazywały boje sygnalizacyjne widoczne na rys. 7.2. W systemie z ruchomym nadajnikiem obserwowano położenie łodzi pomiarowej, na której zainstalowany był nadajnik i przetwornik nadawczy. W systemie ze stacjonarnymi nadajnikami, obiektem obserwacji był płetwonurek wyposażony w standardowy akwalung, pokazany na rys. 7.5.



Rys. 7.5. Płetwonurek – obiekt obserwacji w systemie ze stacjonarnymi nadajnikami.

7.2. Metodyka pomiarów

W badaniach modelu systemu ze stacjonarnymi nadajnikami płetwonurek pływał na głębokości około 2 m po różnych torach wewnątrz obszaru obserwacji z prędkością około 0.5 m/s. Sygnały z hydrofonów były przetwarzane w części elektronicznej modelu, przesyłane w formie cyfrowej do komputera i rejestrowane w jego pamięci. Po przebyciu każdej trasy przez płetwonurka, w komputerze obliczane były widma sygnałów echa i wykonywane obliczenia według algorytmów opisanych w rozdziale 4.

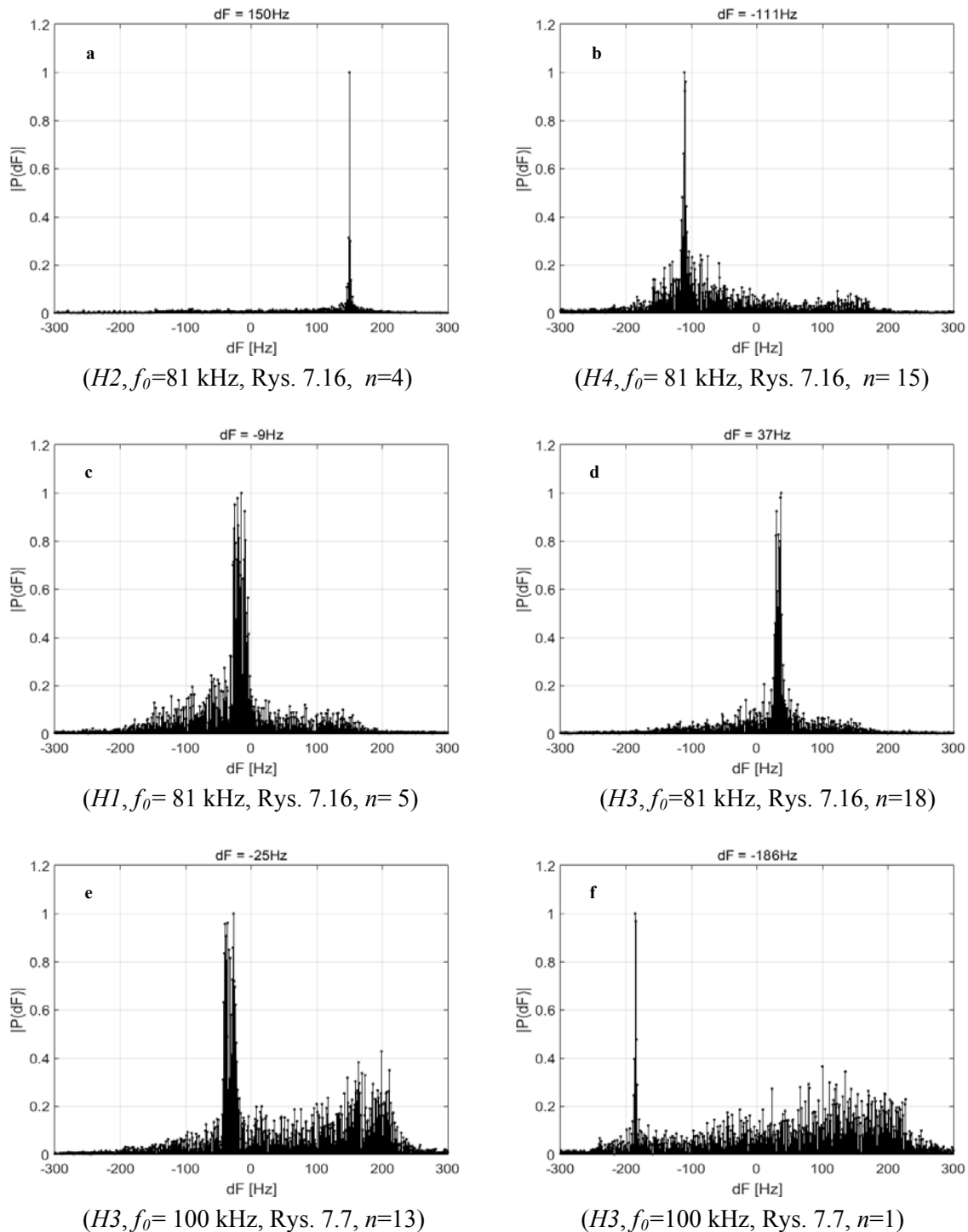
Badania modelu z ruchomym nadajnikiem odbywały się w ten sam sposób przy czym dodatkowo trasa łodzi była wyznaczana z odbiornika GPS i rejestrowana w komputerze.

Pomiary prowadzono w różnych warunkach hydrometeorologicznych, a zwłaszcza przy różnych prędkościach i kierunkach wiatru i związanych z tym różnych stanach zafalowania powierzchni jeziora.

7.3. Wyniki pomiarów

7.3.1. Wyniki pomiarów modelu z ruchomym nadajnikiem

Badania terenowe modelu prowadzono w dwu seriach pomiarowych. Po wstępnych badaniach w pierwszej serii dokonano regulacji w odbiorniku. Typowe wyniki drugiej serii pomiarowej przedstawiono na zamieszczonych niżej rysunkach. W drugiej serii pomiarowej prędkość wiatru wynosiła do 9 m/s, czemu towarzyszyło znaczne zafalowanie powierzchni wody. Na rys. 7.6 pokazano przykładowe znormalizowane widma odchyłek dopplerowskich wyznaczone z sygnałów odebranych przez hydrofony.



Rys. 7.6. Znormalizowane widma odchyłek dopplerowskich.

Częstotliwości prążków, które są traktowane jako dane do wyznaczania położenia i prędkości nadajnika podano nad rysunkami. Podpisy pod rysunkami zawierają numer hydrofonu H , częstotliwość nadajnika f_0 , numer rysunku, na którym wyznaczona jest trasa nadajnika oraz numer n odpowiadający konkretnej sekundzie obserwacji położenia nadajnika na rysunku, do którego odnosi się widmo.

Rysunki 7.6a,b,c,d odnoszą się do tej samej trasy, którą pokonuje nadajnik. Widmo widoczne na rys. 7.6a dotyczy sygnału odbieranego przez hydrofon $H2$, emitowanego przez nadajnik poruszający się w jego kierunku i znajdujący się w dużej od niego odległości. Zgodnie z przewidywaniami, widmo odchyłki dopplerowskiej jest wąskie – zawiera tylko jeden prążek o dużej wysokości.

Na rys. 7.6b pokazano widmo sygnału odebranego przez hydrofon $H4$. Odchyłki dopplerowskie są ujemne, gdyż nadajnik oddala się od hydrofonu. Szerokość widma nieznacznie wzrasta, gdyż zwiększył się kąt między wektorem prędkości, a prostą łączącą nadajnik z hydrofonem.

Na rys. 7.6c,d obserwuje się znaczny wzrost szerokości widma odchyłki dopplerowskiej, co jest charakterystyczne dla sytuacji, gdy nadajnik przemieszcza się w pobliżu hydrofonów, a wektor jego prędkości jest odchyłony od kierunku prostej przechodzącej przez nadajnik i hydrofon.

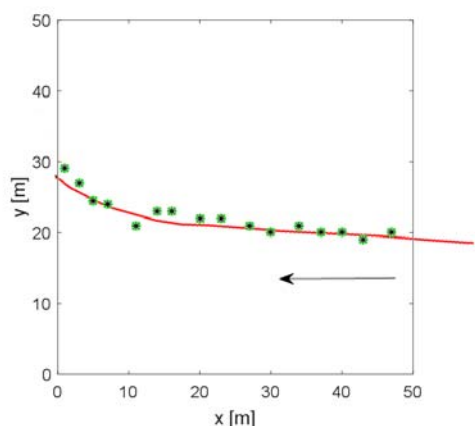
Widma zamieszczone na rys. 7.6e,f wyznaczono z sygnałów z hydrofonu $H3$, gdy nadajnik porusza się po torze pokazanym na rys. 7.7. Na rys. 7.6e wektor prędkości jest prawie prostopadły do prostej łączącej nadajnik z hydrofonem, a więc szerokość widma jest duża. Widmo pokazane na rys. 7.6f jest wąskie, gdyż odległość nadajnika od hydrofonu jest duża. Na obu rysunkach widoczne są liczne i wysokie prążki odchyłek dopplerowskich znacznie oddalone od właściwej odchyłki dopplerowskiej. Są to widma odchyłek dopplerowskich wynikających z odbić fali akustycznej od śladu torowego poruszającej się łodzi motorowej, na której zamocowany był przetwornik nadawczy.

Widma pokazane na rys. 7.6 są normalizowane względem ich wartości maksymalnej. Nie jest zatem widoczny spadek wysokości prążków widma wraz ze wzrostem jego szerokości. Normalizacji dokonano dlatego, że z punktu widzenia detekcji istotna jest względna różnica wysokości między właściwym prążkiem odchyłki dopplerowskiej a prążkami wynikającymi z zakłóceń.

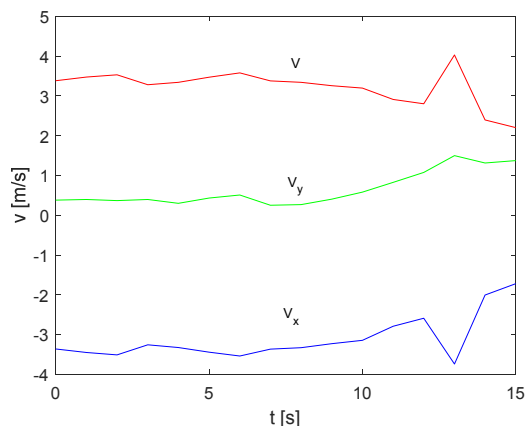
Poza prążkami widma odchyłek dopplerowskich widoczne są inne, które są wynikiem zakłóceń wynikających z propagacji fali akustycznej, a głównie z rewerberacji powierzchniowych. Skutkiem występowania tych prążków mogą być błędy w określeniu właściwych odchyłek dopplerowskich, lecz – co pokazano dalej – w systemie z ruchomym nadajnikiem nie wpływają one znacząco na dokładność określania jego położenia i prędkości.

Na rys. 7.7 pokazano wyznaczony tor nadajnika, a na rys. 7.8 – składowe jego prędkości. Kierunek ruchu pokazuje strzałka, a częstotliwość pracy nadajnika podano w podpisie pod rysunkiem. Tor otrzymany w wyniku obliczeń wykonywanych w modelu systemu nie odbiega znacznie od toru wyznaczonego przez odbiornik GPS, zaznaczony linią ciągłą. Tor nadajnika wyznaczano przy założeniu istnienia dwóch potencjalnych rozwiązań, opisanych w rozdziale 3. Jedno z rozwiązań opisano czarną gwiazdką, a drugie zielonym kółkiem. Jak widać w tym wypadku rozwiązania te pokrywają się. Widoczne są odchylenia zmierzonych położenia nadajnika od toru wyznaczonego przez system nawigacyjny GPS. Zauważalne są także nierówne odległości pomiędzy poszczególnymi położeniami nadajnika. Przyczyny tych błędów omówimy na zakończenie tego punktu.

Składowe wektora prędkości pokazane na rys. 7.8 wyznaczone są z równań zamieszczonych w rozdziale 3. Odnoszą się one do kolejnych położenia nadajnika widocznych na rys. 7.7. Błędy tych położenia przenoszą się więc na błędy składowych prędkości. Niemniej, obliczone składowe prędkości dobrze odzwierciedlają ruch nadajnika.



Rys. 7.7. Tor ruchu nadajnika (100 kHz).

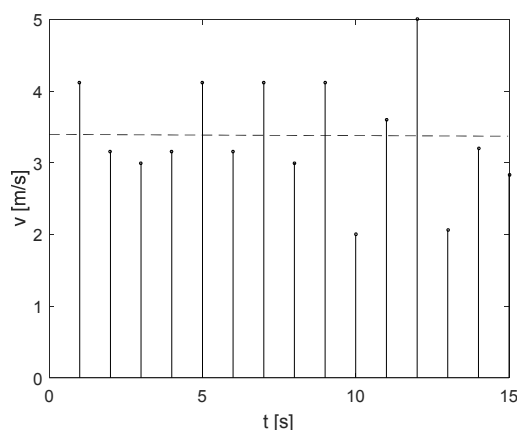


Rys. 7.8. Składowe prędkości nadajnika. ($v=3.2$ m/s, $L=51.5$ m).

Średnia prędkość nadajnika wyznaczona z wyników pokazanych na rys. 7.7 wynosi 3.2 m/s. Poruszając się z taką prędkością odbiornik przebyłby drogę 51.5 m. Droga obliczona z toru zamieszczonego na rys. 7.6 wynosi 50.6 m, co wskazuje na poprawność uzyskanych wyników. Zauważmy, że położenia nadajnika są wyznaczone w węzłach siatki o boku 1 m, a więc wyniki muszą być obarczone pewnym błędem.

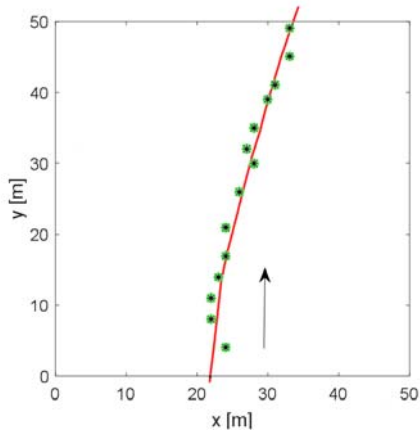
Prędkość nadajnika można obliczyć z jego toru, gdyż czas pomiarów jest znany (cykl 1 s). Wynik obliczeń pokazano na rys. 7.9.

Średnia prędkość wyznaczona z przebytej drogi wynosi 3.4 m/s, a więc nie różni się znacznie od prędkości obliczonej z równań. Widoczne są natomiast znaczne wahania kolejnych jej wartości, co wynika z dyskretnych położenia nadajnika – występują one w węzłach siatki.

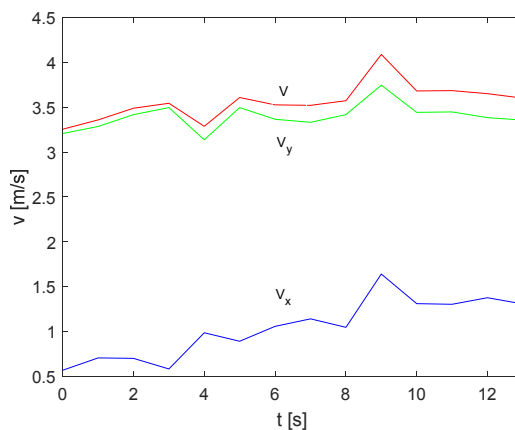


Rys. 7.9. Prędkość nadajnika wyznaczona z drogi.

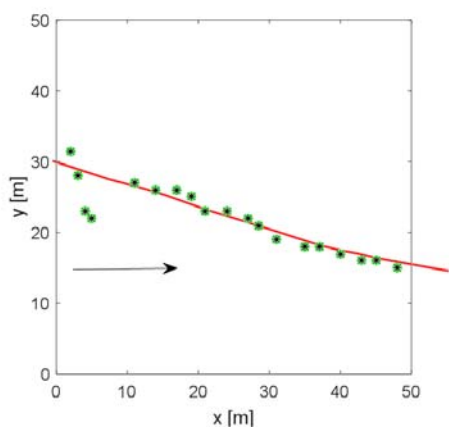
Na kolejnych rysunkach pokazano wyniki pomiarów dla różnych prędkości nadajnika i różnych kierunków jego ruchu. W podpisach pod rysunkami podano obliczone średnią prędkość v i drogę L , którą powinien przebyć nadajnik poruszając się z tą prędkością.



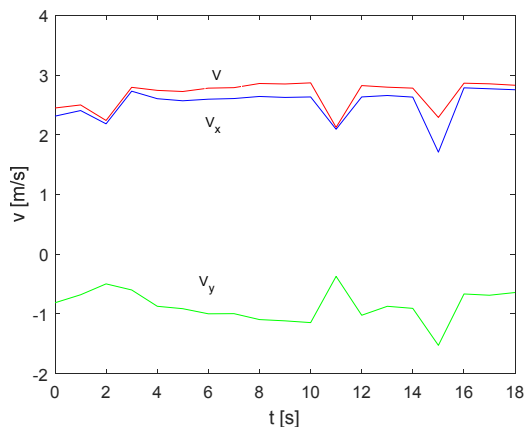
Rys. 7.10. Tor ruchu nadajnika (100 kHz).



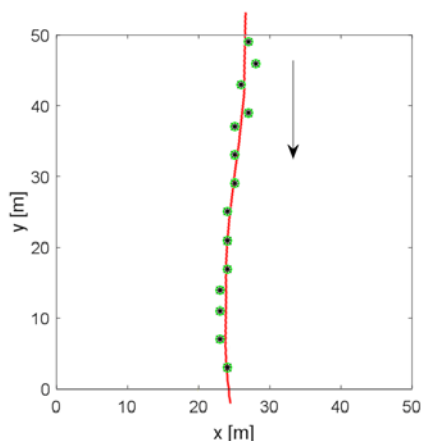
Rys. 7.11. Składowe prędkości nadajnika ($v=3.6$ m/s, $L=50.4$ m).



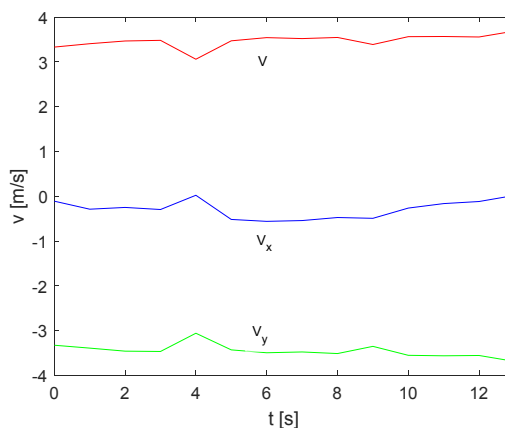
Rys. 7.12. Tor ruchu nadajnika (100 kHz).



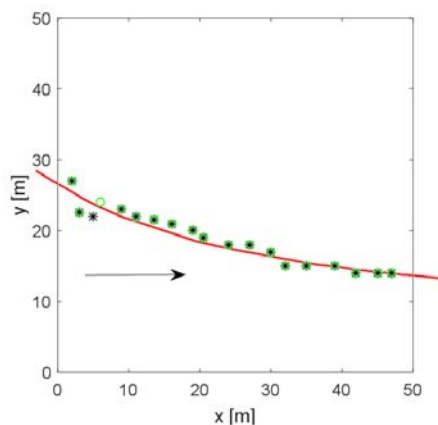
Rys. 7.13. Składowe prędkości nadajnika ($v=2.6$ m/s, $L=51$ m).



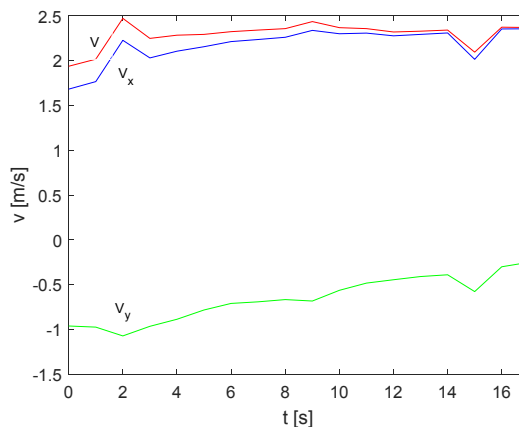
Rys. 7.14. Tor ruchu nadajnika (100 kHz).



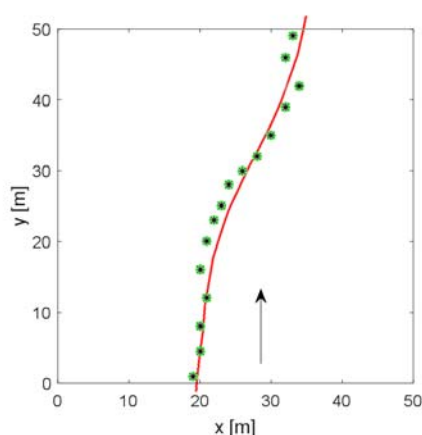
Rys. 7.15. Składowe prędkości nadajnika ($v=3.5$ m/s, $L=48.5$ m).



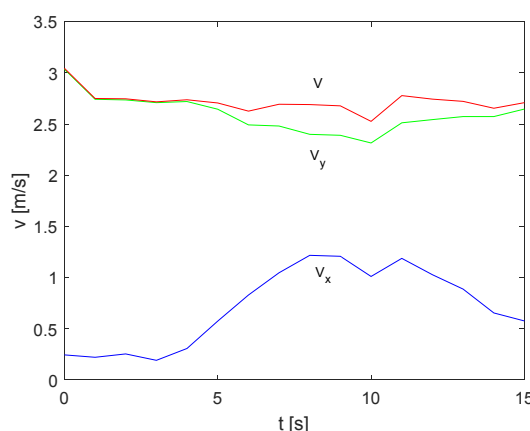
Rys. 7.16. Tor ruchu nadajnika (81 kHz).



Rys. 7.17. Składowe prędkości nadajnika ($v=2.3$ m/s, $L=41.3$ m).



Rys. 7.18. Tor ruchu nadajnika.(81 kHz).



Rys. 7.19. Składowe prędkości nadajnika ($v=2.7$ m/s, $L=43.5$ m).

Przedstawione wyżej wyniki pomiarów modelu systemu pokazują, że wyznaczony tor nadajnika jest prawie zbliżony z torem otrzymanym z systemu nawigacji satelitarnej GPS. Różnice obu torów mogą wynikać zarówno z błędów modelu systemu, jak i z błędnych wskazań nawigacji satelitarnej. Błąd określania położenia zastosowanego odbiornika GPS¹ wynosi około 1 m i jest mniejszy od widocznych na rysunkach błędów badanego systemu. Błędy te mają dwójaki charakter, a mianowicie zależą od odchylenia zmierzonych położzeń od toru wyznaczonego przez GPS oraz zmianie odległości kolejnych położzeń nie wynikających ze zmiany prędkości. Błędy nie zależą w zauważalny sposób od częstotliwości emitowanego sygnału. Przyczyny błędów są lub mogą być następujące:

- położenia nadajnika wyznaczone są w węzłach siatki, co powoduje błąd dochodzący do 1.4 m,
- odchyłki dopplerowskie są wyznaczone z dokładnością 1 Hz, co jest przyczyną błędów oszacowanych w rozdziale 3,

¹ Błąd określania położenia w odbiornikach GPS jest na ogół stały w dłuższych przedziałach czasu i powoduje zwykle pewne przesunięcie mierzonej trasy.

- widma odchyłek dopplerowskich mogą ulegać deformacji w wyniku odbić fali akustycznej od dna i powierzchni wody, co skutkuje błędnym określeniem odchyłek stanowiących dane do obliczeń,
- położenie hydrofonów określono metodą akustyczną poprzez pomiar czasu propagacji impulsów akustycznych na drodze od nadajnika do hydrofonów; pomimo zmierzenia prędkości rozchodzenia się fali, błędy określenia geometrii modelu systemu mogą przekraczać 10 cm, co jest źródłem błędów obliczeniowych,
- położenie hydrofonów mogło ulegać zmianom w wyniku wiatru powodującego ruch wody na głębokości ich zanurzenia.

Należy zauważyć, że w profesjonalnej wersji systemu część opisanych błędów może być wyeliminowana poprzez stabilną konstrukcję mocowania hydrofonów i dokładniejsze określenie geometrii systemu (np. metodą laserową).

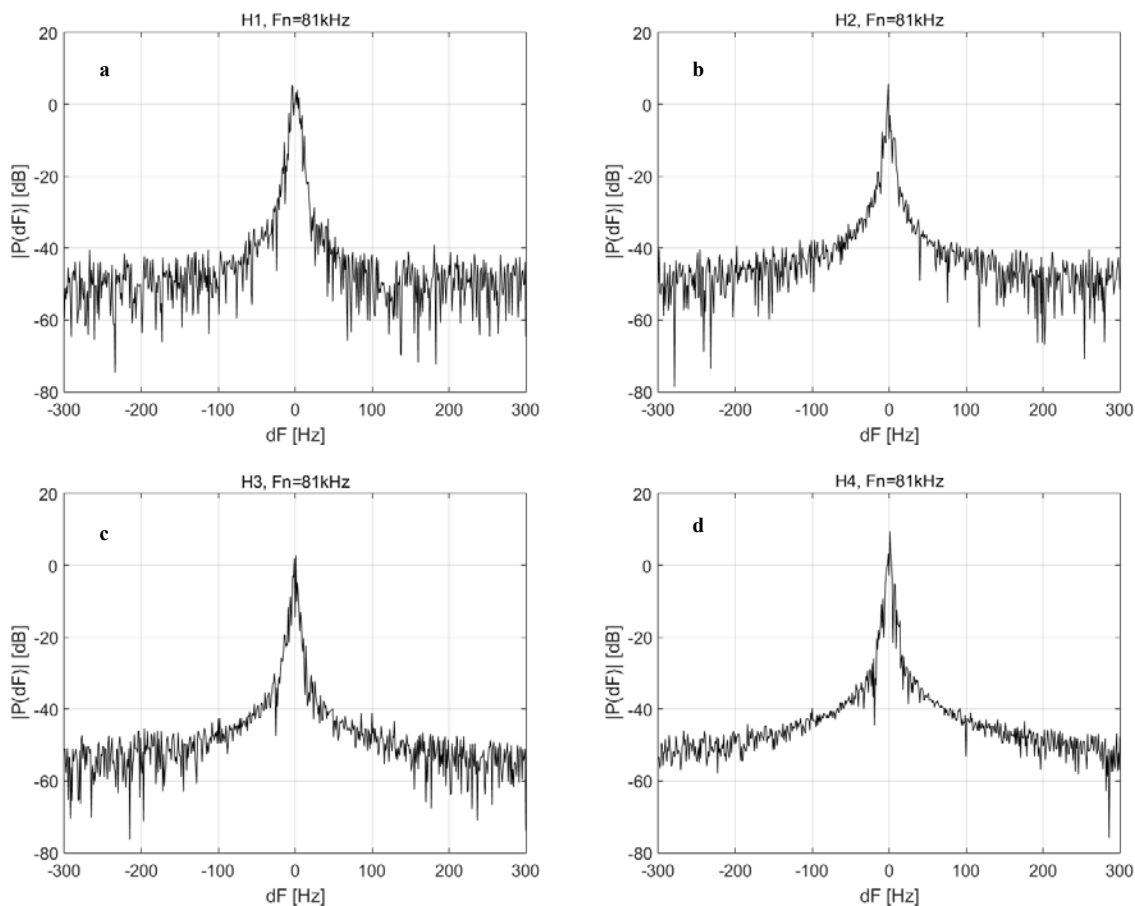
Pomiary prędkości nadajnika są również obciążone pewnymi błędami, których źródłem są opisane wyżej czynniki. Dodatkowo, ocena błędów pomiaru prędkości na podstawie jej wartości średniej wyznaczonej z równań nie jest w pełni wiarygodna, gdyż procedura obliczania położenia nadajnika nie opiera się na średniej prędkości lecz na prędkościach otrzymanych z poszczególnych równań. Prędkości te mogą w niektórych wypadkach znacznie się różnić.

Reasumując wyniki badań modelu systemu można stwierdzić, że – mimo występujących błędów – wykazały one poprawność zaproponowanej metody nawigacji ruchomych obiektów opartej na pomiarze odchyłek dopplerowskich sygnałów akustycznych. Poprawne są również algorytmy wyznaczania położenia i prędkości nadajnika.

7.3.2. Wyniki pomiarów modelu ze stacjonarnymi nadajnikami

Pomiary modelu ze stacjonarnymi nadajnikami prowadzono na poligonie doświadczalnym w Stacji Badań Hydroakustycznych oraz w zatoce przy Półwyspie Lipa. Pomiary rozpoczęto od zbadania efektów propagacji fali akustycznej na drogach bezpośrednich łączących nadajniki z hydrofonami. W badaniach nie uczestniczył płetwonurek. Prędkości wiatru osiągała 6 m/s, co powodowało widoczne zafalowanie powierzchni jeziora.

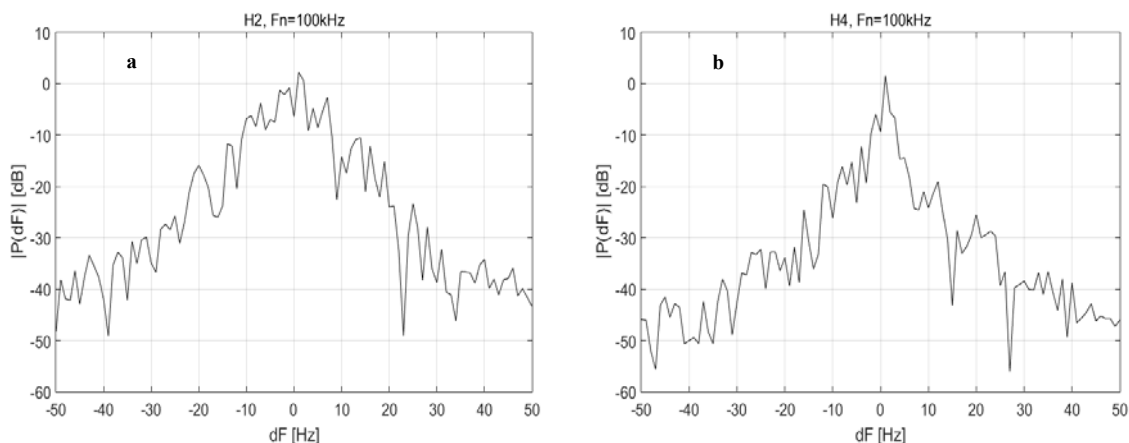
Na zamieszczonym niżej rysunku przedstawiono typowe widma odchyłek dopplerowskich sygnałów odbieranych przez cztery hydrofony, a emitowanych przez jeden nadajników. Widma wyznaczono dla tego samego, jednosekundowego cyklu obserwacji. Ze względu na bardzo dużą rozpiętość wysokości prążków widma użyto skali logarytmicznej. Poziom 0 dB odpowiada sytuacji, gdy na wejściu przetwornika A/C amplituda sygnału wynosi 10 V. W efekcie wartości widma są proporcjonalne (w skali liniowej) do wielkości odbieranych sygnałów. W tytułach rysunków podano numery hydrofonów i częstotliwość pracy nadajnika.



Rys. 7.20. Widma odchyłek dopplerowskich sygnałów odbieranych przez hydrofony przy nieobecności płetwonurka.

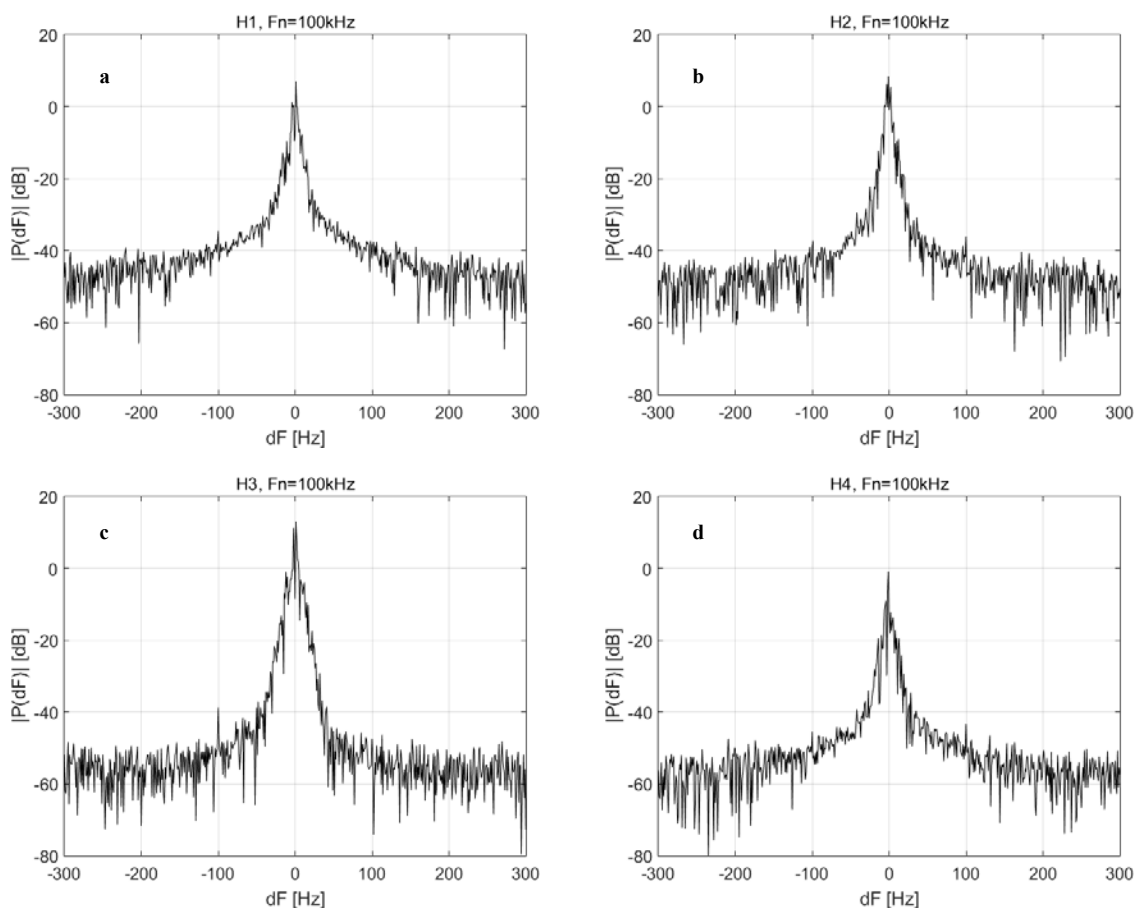
Widma wyznaczone dla drugiego nadajnika i odnoszące się do innych cykli pomiarowych nie różnią się w istotny sposób od pokazanych wyżej. W przedziale małych częstotliwości widma odchyłek dopplerowskich osiągają bardzo wysoki poziom w stosunku do ich poziomu dla większych częstotliwości. Jest to spowodowane rewerberacjami od poruszających się fal na powierzchni wody, a w znacznie mniejszym stopniu do ruchu hydrofonów i przetworników nadawczych. Zauważono, że szerokość widma odchyłek dopplerowskich wywołanych rewerberacjami rośnie ze wzrostem zafalowania i zależy także od kąta między kierunkiem propagacji fali akustycznej a kierunkiem ruchu falowego powierzchni wody. Jest to widoczne na rysunku 7.21.

Prążek widma odchyłki dopplerowskiej częstotliwości zerowej jest stłumiony w wyniku zastosowania filtra w odbiorniku. W efekcie dla częstotliwości zerowej występuje lokalne minimum widma, widoczne na rys. 7.21a i 7.21b.



Rys. 7.21. Centralna część widma odchyłek dopplerowskich sygnałów odbieranych przez hydrofony.

Następny etap badań eksperymentalnych polegał na pomiarach odchyłek dopplerowskich sygnałów echa od pływającego płetwonurka, odbieranych przez hydrofony. Płetwonurek pływał w obszarze obserwacji systemu w zanurzeniu do 2 m, z prędkością nie przekraczającą 0.5 m/s. Nadajniki emitowały sygnały o częstotliwościach 100 kHz i 81 kHz. Typowe wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 7.22.

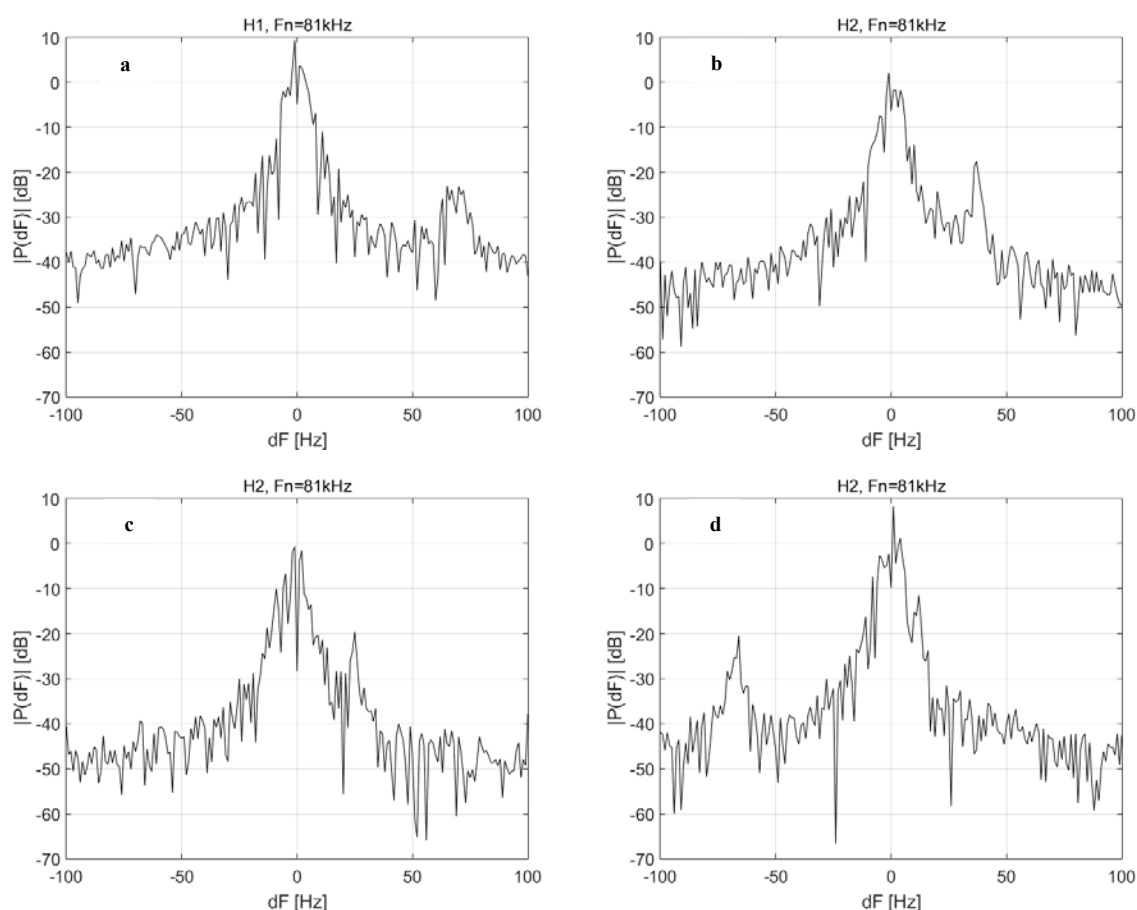


Rys. 7.22. Widma odchyłek dopplerowskich sygnałów echa od płetwonurka.

W żadnym z wykonanych pomiarów nie zaobserwowano widm odchyłek dopplerowskich sygnałów echa o stabilnej wysokości i położeniu na osi częstotliwości, co wykluczało

ich wykorzystanie jako danych w systemie. Przy małej prędkości pływająca, maksymalna odchyłka dopplerowska wynosiła około 50 Hz, a więc widmo odchyłek dopplerowskich pokrywało się praktycznie z pasmem centralnej części widma odchyłek dopplerowskich rewerberacji.

W celu zaobserwowania, czy widma odchyłek dopplerowskich pojawiają się ze wzrostem prędkości celu wykonano serię pomiarów, w których śledzonym obiektem był cel kulisty wypełniony powietrzem, przymocowany do rufy łodzi wiosłowej, poruszającej się z prędkością ok. 1 m/s. Typowe wyniki pomiarów zamieszczono na rys. 7.23.



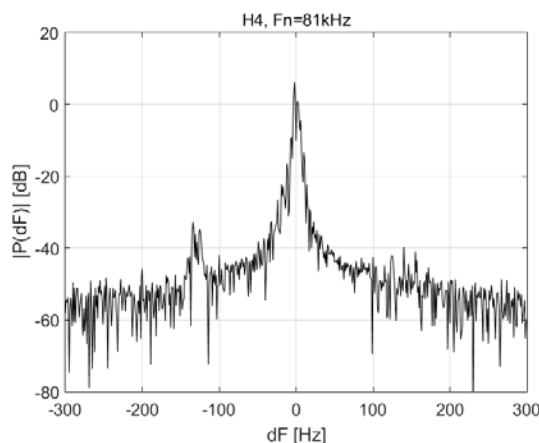
Rys. 7.23. Widma odchyłek dopplerowskich sygnałów echa od celu kulistego.

Na rys. 7.23a,b pokazane są widma dopplerowskie sygnałów echa od celu o tym samym położeniu, odbieranych przez dwa hydrofony. Widoczne są dwie odchyłki dopplerowskie o różnych częstotliwościach, spowodowane różnym usytuowaniem celu względem hydrofonu. Widma odchyłek dopplerowskich z jednego z pozostałych hydrofonów są niewidoczne – znajdują się one w paśmie dużych rewerberacji, co uniemożliwia obliczenia w systemie.

Na rys. 7.23c,d zamieszczono widma odchyłek dopplerowskich sygnałów echa odbieranych przez jeden hydrofon w dwóch różnych momentach czasu. Częstotliwości tych odchyłek mają różne znaki, co wynika z drogi przebytej przez cel. W tych samych momentach czasu nie zaobserwowano wyraźnych odchyłek dopplerowskich sygnałów odbieranych przez wszystkie pozostałe hydrofony, co uniemożliwiło uruchomienie programu do wyznaczenia położenia i prędkości celu.

Ten sam cel umocowano na motorowej łodzi, poruszającej się z prędkością około 2 m/s, co odpowiada maksymalnej odchyłce dopplerowskiej ok. 200 Hz. Łódź poruszała się na zewnątrz obszaru obserwacji, oddalając się od hydrofonów. Widma odchyłek dopplerowskich

pojawiały się w sygnałach echa odbieranych przez wszystkie hydrofony i znajdowały się w ujemnym zakresie częstotliwości. Przykładowe widmo pokazano na rys. 7.24. Jakkolwiek można było wyznaczyć cztery odchyłki dopplerowskie niezbędne do wyznaczenia położenia i prędkości celu, to były one nieużyteczne, gdyż dotyczyły położenia celu poza obszarem obserwacji. Ponadto, odchyłki dopplerowskie o zbliżonych wartościach są przyczyną znacznych błędów wynikających z małej różnicy kątów między prostymi będącymi miejscem geometrycznym tych odchyłek [18]. Jest to znany efekt występujący w innych systemach nawigacyjnych, [64,65].

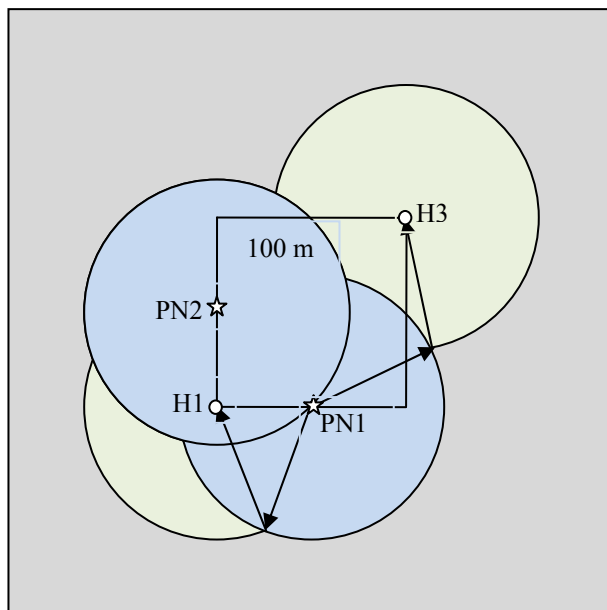


Rys. 7.24. Widmo odchyłki dopplerowskiej sygnału echa od celu cylindrycznego zamontowanego na łodzi motorowej.

7.3.3. Dyskusja wyników pomiarów modelu ze stacjonarnymi nadajnikami

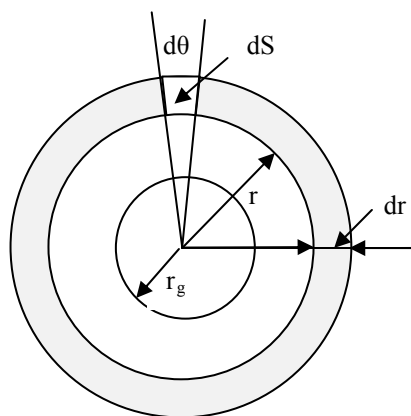
Negatywny wynik pomiarów spowodowany był dużym poziomem rewerberacji powierzchniowych, widocznym na zamieszczonych wyżej rysunkach w p 7.2.3. Główną przyczyną rewerberacji jest rozproszenie sygnału nadawanego. Poziom rewerberacji pochodzący od sygnału echa jest znacznie mniejszy i nie musi być to rozpatrywany.

Zachodzi pytanie, jakie zabiegi techniczne mogą poprawić stosunek sygnału echa do rewerberacji. Ponieważ poziom sygnału echa i poziom rewerberacji w ten sam sposób zależą od poziomu źródła SL , więc stosunku sygnału echa do rewerberacji nie można poprawić zwiększając moc nadajników, [26]. Jedynym sposobem pozostaje zmniejszenie powierzchni lustra wody naświetlanej przez przetwornik nadawczy i zmniejszenie powierzchni, z której odbierane są sygnały na niej rozproszone. Cel ten można osiągnąć stosując przetworniki nadawcze i odbiorcze o wąskich charakterystykach kierunkowych w przekroju pionowym. Mogą to być liniowe szyki przetworników cylindrycznych o dużej długości. Jak wiadomo, mają one dookólną charakterystykę kierunkową w przekroju poziomym i wąską w przekroju pionowym. Ponadto wąskim charakterystykom towarzyszy duża długość pola bliskiego, w którym wiązka jest praktycznie nierozbieżna, [66,67]. Przykładowo linia o długości $L=1\text{m}$ przy częstotliwości $f=100\text{ kHz}$ ma kątową szerokość wiązki 0.75° , a długość pola bliskiego wynosi $fL^2/c=67\text{ m}$. Na rys. 7.25 pokazano obszary powierzchni rewerberacji (kolor szary) dla przetworników odbiorczych H1 i H3, przy założeniu, że obszary te leżą poza granicą pola bliskiego przetworników nadawczych i odbiorczych. Pominięto rewerberacje pochodzące od sygnałów odbitych od celu. Strzałkami zaznaczono najbliższe obszary rewerberacji dla obu przetworników nadawczych, gdy górne części przetworników nadawczych i odbiorczych znajdują się na głębokości 0.5 m pod powierzchnią wody.



Rys. 7.25. Powierzchnie rewerberacji.

Jeżeli przyjąć, że granicą obszaru rewerberacji jest okrąg o promieniu, przy którym wiązka o szerokości 0.75° od przetwornika zanurzonego na głębokości 0.5 m przecina powierzchnię wody, to promień tego okręgu wynosi $r_0 = 150$ m. Przyjmując, że obszar rewerberacji występuje na zewnątrz okręgu o promieniu r_g i rozciąga się do nieskończoności, można oszacować poziom rewerberacji RL posługując się modelem pokazanym na rys. 7.26.



Rys. 7.26 Wyznaczanie obszaru rewerberacji (rzut poziomy).

Załóżmy, że natężenie fali akustycznej w odległości $r_1=1$ m od przetwornika wynosi I_t . W odległości r wynosi ono:

$$I_i = I_t \left(\frac{r_1}{r} \right)^2 10^{-\alpha r / 10} \quad (7.1)$$

gdzie α jest logarytmicznym współczynnikiem tłumienia.

Oznaczmy siłę wstecznego rozproszenia powierzchniowego jako ts_s , co oznacza, że fala akustyczna o natężeniu I_i rozpraszana na powierzchni o polu $dS = r_1^2 = 1 \text{ m}^2$ ma wartość $I_r = I_i ts_s$. Natężenie fali rozproszonej przez powierzchnię dS pokazaną na rys. 7.26 wynosi:

$$dI_s = I_i ts_s \frac{dS}{r_1^2} = I_i ts_s \frac{r dr}{r_1^2} d\theta \quad (7.2)$$

Fala rozproszona przez powierzchnię dS rozchodzi się jako fala sferyczna, a więc zgodnie ze wzorem (7.1) dociera do przetwornika odbiorczego i ma wtedy natężenie:

$$dI_r = I_i ts_s \frac{r_1^2}{r^3} 10^{-2\alpha r/10} d\theta dr \quad (7.3)$$

Ponieważ nadajnik emituje sinusoidalną falę ciągłą, więc do odbiornika dociera suma natężeń z obszaru rozciągającego się (teoretycznie) od okręgu o promieniu r_g do nieskończoności. Sumę tę opisuje następująca całka:

$$I = I_i ts_s \int_{r_g}^{\infty} \int_0^{2\pi} \frac{r_1^2}{r^3} 10^{-2\alpha r/10} d\theta dr = 2\pi I_i ts_s r_1^2 \int_{r_g}^{\infty} \frac{1}{r^3} 10^{-2\alpha r/10} dr \quad (7.4)$$

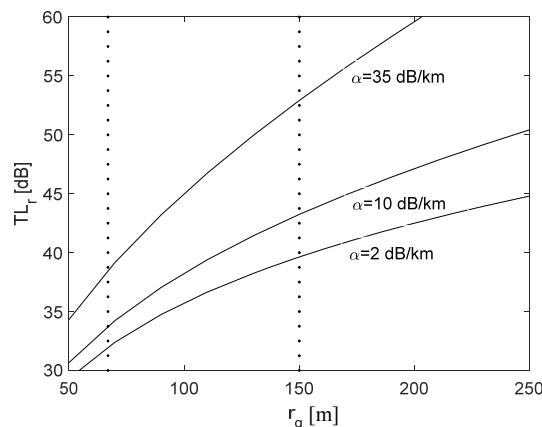
Po przekształceniach otrzymujemy poziom rewerberacji RL równy:

$$RL = SL + TS_s + 2TL_r \quad (7.5)$$

gdzie $2TL_r$ są dwustronnymi stratami propagacyjnymi rewerberacji, wynoszącymi:

$$2TL_r = 10 \log(2\pi_s r_1^2 \int_{r_g}^{\infty} \frac{1}{r^3} 10^{-2\alpha r/10} dr) \quad (7.6)$$

Straty te można obliczyć numerycznie, a ich wielkość w funkcji promienia r_g granicznego obszaru rewerberacji pokazano na poniższym rysunku. Straty te zależą od tłumienia absorpcyjnego, opisanego logarytmicznym współczynnikiem α , a te z kolei - od zasolenia wody. Wykresy odnoszą się do zasolenia wody oceanicznej ($S=35\text{‰}$, $\alpha=35 \text{ dB/km}$), średniego zasolenia wody w Bałtyku ($S=7\text{‰}$, $\alpha=10 \text{ dB/km}$) i wody słodkiej ($\alpha=2 \text{ dB/km}$), [68]. Na rysunku zaznaczono, wyznaczone wcześniej, promienie graniczne ($r_g=67 \text{ m}$, i $r_g=150 \text{ m}$),



Rys. 7.26. Straty transmisyjne rewerberacji w funkcji granicy ich obszaru.

Wykorzystując wyniki obliczeń strat transmisyjnych rewerberacji można oszacować stosunek sygnału echa do rewerberacji, który zależy ponadto od siły celu TS obserwowanego obiektu i siły wstecznego rozproszenia rewerberacji powierzchniowych TS_r , [69], gdyż:

$$EL - RL = -(2TL - 2TL_r) + (TS - TS_r) \quad (7.7)$$

W zamieszczonej niżej tabelicy 7.1 podano wyniki obliczeń stosunku sygnału echa do rewerberacji dla przypadku, gdy straty transmisyjne $2TL$ dla celu odnoszą się do maksymalnej odległości między nadajnikiem celem i hydrofonem, siła celu wynosi $TS=-20$ dB, a siła rozproszenie rewerberacji jest równa $TS_r=-80$ dB, [70].

Tabela 7.1 Stosunek sygnału echa do rewerberacji

| r_g [m] | Parametr [dB] | α [dB/km] | | |
|-----------|-----------------------|------------------|-------------|-------------|
| | | 35 | 10 | 2 |
| 67 | 2TL | 92.6 | 86.3 | 84.3 |
| | 2TL _r | 38.5 | 33.7 | 32.0 |
| | 2TL- 2TL _r | 54.1 | 52.6 | 52.3 |
| | EL-RL | 5.9 | 7.4 | 7.7 |
| 150 | 2TL _r | 52.9 | 43.2 | 39.6 |
| | 2TL- 2TL _r | 39.7 | 41.1 | 44.7 |
| | EL-RL | 20.3 | 18.9 | 15.3 |

Wyniki obliczeń przedstawione w tabelicy pokazują, że zastosowanie przetworników nadawczych i odbiorczych o wąskich charakterystykach kierunkowych w przekroju wertykalnym prowadzi do dodatnich wartości stosunku sygnału do rewerberacji, co powinno skutkować możliwością detekcji poszukiwanych prążków widma odchyłek dopplerowskich. Stosunek sygnału do rewerberacji nie przekłada się bezpośrednio na zależność między wysokością prążków widma odchyłek dopplerowskich a wysokością prążków zakłóceń, gdyż ta wynika także z relacji między szerokością obu widm. Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że szerokość widma rewerberacji jest z reguły większa od szerokości widma sygnału echa, a więc energia rewerberacji rozprasza się na większą liczbę prążków widma, co powoduje (z zasady zachowania energii), że wysokość tych prążków jest mniejsza. Poprawia to dodatkowo warunki detekcji w systemie. Zagadnienie rewerberacji w kontekście efektu Dopplera jest omawiane w literaturze, jednakże tylko w odniesieniu do sonarów monostatycznych [71,72], które nie są przedmiotem niniejszej rozprawy.

Reasumując można z dużą dozą prawdopodobieństwa zakładać, że negatywne wyniki pomiarów nie podważają możliwości wykorzystania systemu ze stacjonarnymi nadajnikami do określania położenia i prędkości ruchomych obiektów podwodnych. Przemawiają za tym następujące przesłanki:

- poprawność zaproponowanej w rozprawie metody wyznaczania położenia i prędkości ruchomych obiektów podwodnych z wykorzystaniem wyłącznie odchyłek dopplerowskich została potwierdzona badaniami symulacyjnymi i pomiarami modelu systemu w warunkach rzeczywistych w odniesieniu do systemu z ruchomym nadajnikiem,
- metoda i opracowane algorytmy przetwarzania sygnałów nie różnią się istotnie w systemie z ruchomym nadajnikiem i stacjonarnymi nadajnikami,
- badania symulacyjne systemu ze stacjonarnymi nadajnikami potwierdziły prawidłowe jego funkcjonowanie,
- wykazano możliwość usprawnień technicznych systemu, które powinny zapewnić jego poprawną pracę.

8. PODSUMOWANIE

Celem rozprawy było zbadanie możliwości budowy hydroakustycznych systemów nawigacyjnych, których działanie opiera się wyłącznie na pomiarach odchyłek dopplerowskich sygnałów akustycznych emitowanych przez obiekty poruszające się pod wodą. Rozpatrywano dwie wersje systemu, a mianowicie takiego, w którym sygnał emitowany jest przez nadajnik zainstalowany na ruchomym obiekcie oraz takiego, w którym sygnał emitowany przez obiekt powstaje w wyniku odbicia fali akustycznej pochodzącej od zewnętrznego źródła.

W realizacji celu rozprawy wykorzystano trzy metody badawcze: teoretyczną, symulacyjną i eksperymentalną.

Posługując się metodą teoretyczną wyprowadzono dokładne wzory opisujące odchyłki dopplerowskie dla trzech sytuacji występujących w rozpatrywanych systemach, czyli odnoszące się do nieruchomego hydrofonu i poruszającego nadajnika, ruchomego celu i nieruchomego nadajnika oraz sygnału odbitego od celu i odbieranego przez nieruchomy hydrofon. Analizując widma odchyłek dopplerowskich wyznaczono te ich prążki, które odpowiadają chwilowemu położeniu początkowemu obiektu i stanowią dane do obliczania jego położenia i prędkości. Cztery zależności opisujące częstotliwości tych prążków potraktowano jako układ równań, w których niewiadomymi są współrzędne obiektu i składowe wektora jego prędkości. Zaproponowano metodę rozwiązywania tego układu równań opisaną w rozdziałach 3 i 4, która – mówiąc ogólnie – polega na analizie składowych wektora prędkości w węzłach siatki utworzonej na obszarze obserwacji. Węzły siatki, w których składowe wektora prędkości spełniają określone kryteria są traktowane jako położenia obserwowanego obiektu. Opisaną metodę zastosowano do systemu z ruchomym nadajnikiem i systemu ze stacjonarnymi nadajnikami, przy czym w drugim systemie analizowane są odchyłki dopplerowskie wynikające z emisji sygnałów o różnych częstotliwościach. Umożliwiło to wyeliminowanie niejednoznacznych rozwiązań związanych z fizyczną naturą efektu Dopplera.

W celu wykonania badań symulacyjnych opracowano programy w środowisku MATLAB[®], które numerycznie realizują algorytmy opracowane teoretycznie. W programach tych wyznaczone są odchyłki dopplerowskie dla różnych kształtów torów nadajnika bądź celu poruszających się z dowolną prędkością. Wykorzystując te programy dokonano wszechstronnych badań symulacyjnych pracy obu systemów. W szczególności zbadano funkcjonowanie systemów w warunkach idealnych oraz wpływy szumów i propagacji wielodrogowej sygnałów akustycznych na pracę tych systemów. Badania symulacyjne wykazały poprawność opracowanych algorytmów oraz dobrą odporność systemu na zasymulowane w nich zakłócenia.

Dla potrzeb badań eksperymentalnych zaprojektowano i skonstruowano model doświadczalny systemów, a następnie wykonano pomiary w rzeczywistym środowisku wodnym. Pomiary modelu systemu z ruchomym nadajnikiem potwierdziły poprawności zaproponowanej metody nawigacyjnej i jej technicznej realizacji. Pomiary modelu systemu ze stacjonarnymi nadajnikami wykazały, że jego techniczne rozwiązanie uniemożliwia prowadzenie nawigacji płetwonurka. Jednakże dostarczyły ważnych informacji, które powinny być wykorzystane przy budowie profesjonalnego systemu. Najważniejszą z nich jest wpływ dużego poziomu rewerberacji spowodowanego sygnałami rozchodzącymi się na bezpośredniej drodze między nadajnikami i hydrofonami. Należy wszakże podkreślić, że brak pozytywnych wyników pomiarów użytego modelu nie wynika z błędów proponowanej metody i nie oznacza braku możliwości budowy i stosowania systemu ze stacjonarnymi nadajnikami. Podstawowe algorytmy używane w systemie ze stacjonarnymi nadajnikami są bowiem takie same jak w systemie z ruchomym nadajnikiem, co można stwierdzić porównując wydruki programów zamieszczone w DODATKU 5 i DODTAKU 6. Ponadto przeprowadzone badania symulacyjne wykazały poprawność funkcjonowania systemu. Można zakładać, że wprowadzenie

zmian technicznych umożliwi poprawną pracę systemu w rzeczywistym środowisku wodnym. Zmiany te powinny polegać na zastosowaniu kierunkowych przetworników nadawczych i hydrofonów, stabilizacji ich położenia oraz ewentualnemu zwiększeniu mocy nadajników.

Charakterystyki kierunkowe przetworników nadawczych i hydrofonów powinny być na tyle wąskie w płaszczyźnie pionowej, aby minimalizowały rewerberacje od powierzchni wody. W płaszczyźnie poziomej szerokości charakterystyk kierunkowych powinny być tak ukształtowane, aby powodowały znaczne obniżenie poziomu sygnałów rozchodzących się po drodze bezpośredniej między nadajnikami i hydrofonami i jednocześnie pokrywały obszar obserwacji. Z geometrii systemu wynika, że taki zabieg może być skuteczny tylko dla hydrofonów leżących w sąsiedztwie przetworników nadawczych. Dla hydrofonów leżących po przeciwnych stronach jest on sprzeczny z koniecznością pokrycia przez wiązki obszaru obserwacji. Jednakże w odniesieniu do tych hydrofonów problem propagacji po drogach bezpośrednich występuje z mniejszą ostrością. Szerzej zagadnienie wpływu propagacji fal po drogach bezpośrednich na konstrukcję systemu omówiono w rozdziale 6.

Reasumując, biorąc pod uwagę wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych można stwierdzić, że istnieją techniczne możliwości budowy hydroakustycznych systemów nawigacji ruchomych obiektów podwodnych. Tym samym należy uznać, że teza rozprawy została udowodniona.

W niniejszej pracy zaproponowano system określania położenia i prędkości obiektu ruchomego wykorzystujący zjawisko Dopplera. Wersję komunikacyjną tego systemu (z ruchomym nadajnikiem) można byłoby zaliczyć do klasy systemów na pograniczu krótkiej i długiej bazy, ale zasadnicza różnica polega na tym, że pracuje on z falą ciągłą i jego części składowe są znacznie prostsze niż w systemach SBL i LBL. Zamiast używania stosunkowo skomplikowanego transpondera przymocowywanego do ruchomego obiektu stosuje się bardzo prosty nadajnik małej mocy z przetwornikiem nadawczym generujący ciągłą falę akustyczną o stabilnej częstotliwości. Na granicy monitorowanego obszaru w akwenu umieszczane są cztery hydrofony odbierające falę o częstotliwości zmienionej o odchyłkę dopplerowską. W systemie LBL rolę tę pełniły transpondery, a w systemie SBL oprócz hydrofonów musiało być zastosowane urządzenie nadawczo-odbiorcze. Po obróbce sygnału i wszystkich obliczeniach otrzymuje się jednocześnie pozycję i prędkość obserwowanego, ruchomego obiektu. System nie wymaga skomplikowanej obsługi, może wręcz pracować autonomicznie.

Koncepcję hydroakustycznego systemu nawigacyjnego, wykorzystującego wyłącznie zmierzone odchyłki dopplerowskie sygnałów echa, opracowano z udziałem autora w Katedrze Systemów Elektroniki Morskiej Politechniki Gdańskiej [13,14,15,16,17,18]. Jest to metoda oryginalna, gdyż efekt Dopplera jest zwykle wykorzystywany do pomiarów prędkości, [73, 74,75,76]. Metoda ta, sprawdzona symulacyjnie, polegała na poszukiwaniu punktów przecięcia prostych będących miejscami geometrycznymi punktów o zmierzonych odchyłkach dopplerowskich. Niniejsza rozprawa doktorska stanowi modyfikację i rozszerzenie tej metody oraz jej symulacyjną i eksperymentalną weryfikację. Zdaniem autora za oryginalne jej elementy można uznać:

- utworzenie układów równań opisujących położenie i prędkość obserwowanego obiektu w funkcji zmierzonych odchyłek dopplerowskich,
- opracowanie metody ich rozwiązywania poprzez poszukiwanie miejsc zerowych różnic składowych wektora prędkości w węzłach siatki rozpiętej na obszarze obserwacji,
- zastosowanie opracowanych układów równań i metody ich rozwiązywania dla systemu z ruchomym nadajnikiem i systemu ze stacjonarnymi nadajnikami,

- opracowanie skutecznych i wydajnych algorytmów numerycznego wyznaczania rozwiązań i ich zaimplementowanie w środowisku MATLAB[®] dla obu systemów,
- wykonanie badań symulacyjnych obu systemów pod kątem sprawdzenia poprawności metody i algorytmów przetwarzania sygnałów oraz odporności systemów na szumy i zakłócenia występujące w środowisku wodnym,
- wykonanie projektu i konstrukcji modeli doświadczalnych,
- przeprowadzenie badań eksperymentalnych modeli systemów w rzeczywistym ośrodku wodnym, potwierdzających prawidłowe funkcjonowanie modelu z ruchomym nadajnikiem,
- zbadanie wpływu rewerberacji powierzchniowych na widmo odchyłek dopplerowskich w systemie ze stacjonarnymi nadajnikami.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Leonard J. J., Bennett A. A., Smith Ch. M., Feder H. J. S., 1998, "Autonomous underwater vehicle navigation", MIT Marine Robotics Laboratory Technical Memorandum 98-1, 1-17.
- [2] Vickery, K., 1998, "Acoustic positioning systems - a practical overview of current systems", Proceedings of the Workshop on Autonomous Underwater Vehicles, 5-17, Aug. 1998, 20-21.
- [3] Ferrel J., Barth M., 1998, "The Global Positioning System and Inertial Navigation", S. Chapman [Ed.], McGraw-Hill Education - Europe, United States, 340p.
- [4] Gamroth E. D. H., 2009, "Design, implementation and testing of an underwater global positioning system", Master Thesis, University of Victoria, 150p.
- [5] Milne P. H., 1983, "Underwater Acoustic Positioning Systems", Gulf Publishing, Houston, 284p.
- [6] Alcocer A., Oliveira P., Pascoal A., 2006, "Underwater acoustic positioning systems based on buoys with GPS", S. M. Jesus and O. C. Rodriguez Carvoeiro [Eds.], Proceedings of the Eighth European Conference on Underwater Acoustics Portugal, 8th ECUA, 12-15 June 2006, 1-8.
- [7] Kussat N. H., Chadwell C. D., Zimmerman R., 2005, "Absolute positioning of an autonomous underwater vehicle using GPS and acoustic measurements", IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 30, (1), 153-164.
- [8] Spiess F. N., Chadwell C. D., Hildebrand J. A., Young L. E., Purcell G. H. Jr., Dragert H., 1998, "Precise GPS/acoustic positioning of seafloor reference points for tectonic studies", Physics of the Earth and Planetary Interiors, vol. 108, 101-112.
- [9] Zhou L., 2010, "A Precise Underwater Acoustic Positioning Method Based on Phase Measurement", Master Thesis, University of Victoria, 114p.
- [10] Stepnowski A., 2001, „Systemy akustycznego monitoringu środowiska morskiego”, Wyd. Gdańskiego Towarzystwa Naukowego, Gdańsk, 283p.
- [11] Czarnecki Z., [Ed.], „Dokumentacja techniczna systemu *Zapora*”, praca zbiorowa, Archiwum Katedry Systemów Elektroniki Morskiej Politechniki Gdańskiej.
- [12] Marszał J., Salamon R., 2010, "Multistatic Doppler Sonar for Man-Made Lakes and Water-Power Plants Antiterroristic Protection", T. Akal [Ed.], Proc. of the 10th European Conference on Underwater Acoustic, Istanbul, 5-9 July 2010, 1333-1339.
- [13] Salamon R., Marszał J., 2010, "Doppler estimation method for moving target location", Hydroacoustics, vol. 13, 225-234.
- [14] Salamon R., 2012, „Efekt Dopplera w systemach hydrolokacyjnych”, A. Józefczak [Ed.], Materiały 59 Otwartego Seminarium z Akustyki, Poznań-Boszkowo, 10-14.09.2012, Polskie Towarzystwo Akustyczne, 23-28.
- [15] Ostrowski Z. J., 2015, „Multistatyczny, dopplerowski system określania położenia i prędkości ruchomych celów w wodzie”, K. J. Opieliński [Ed.], Postępy akustyki, Polskie Towarzystwo Akustyczne, Wrocław, 631-642.
- [16] Ostrowski Z. J., 2014, "The Doppler effect in a bistatic system for determining the position of moving targets", Hydroacoustics, vol. 17, 225-234.

- [17] Ostrowski Z. J., 2015, "Receiver of Doppler multistatic system for moving target detection and tracking", *Hydroacoustics*, vol. 18, 141-152.
- [18] Ostrowski Z., Marszał J., Salamon R., 2018, "Underwater Navigation System Based on Doppler Shifts of a Continuous Wave", J. Marszał, I. Kochańska [Eds.], *Proc. of Joint Conference – Acoustics*, Ustka, 11-14 Sept. 2018, Polish Acoustical Society, Gdańsk Division 1-9.
- [19] Lindegren L., Dravins D., 2003, "The fundamental definition of radial velocity", *Astronomy and Astrophysics*, vol 401(3), 1185-1202.
- [20] Feynman R. Ph., Leighton R.B., Sands M., 1974, "Feynmana wykłady z fizyki" Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.
- [21] Pierce A. D., [Ed.], 1994, "Acoustics – An introduction to Its Physical Principles and Applications", Acoustical Society of America through the American Institute of Physics, 460p.
- [22] Nowicki A., 2010, „Ultradźwięki w medycynie – wprowadzenie do współczesnej ultrasonografii”, Roztoczańska Szkoła Ultrasonografii, Warszawa, 303p.
- [23] Curlander J. C., McDonough R. N., 1991, "Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing", Wiley Series in Remote Sensing and Image Processing, John Wiley&Sons, 672p.
- [24] Callow H. J., 2003, "Signal Processing for Synthetic Aperture Sonar Image Enhancement", thesis for the degree of Doctor of Philosophy, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 255p.
- [25] Haykin S., 1998, „Systemy telekomunikacyjne”, WKŁ, Warszawa, 835p.
- [26] Salamon R., 2006, „Systemy hydrolokacyjne”, Wyd. Gdańskiego Towarzystwa Naukowego, Gdańsk, 807p.
- [27] Marszał J., Salamon R., Zachariasz K., Schmidt A., "Doppler Effect in the CW FM Sonar", *Hydroacoustics 2011*, Vol. 14, 157-164.
- [28] Marszał J., Salamon R., 2012, "Distance Measurement Errors in Silent FM-CW Sonar with Matched Filtering", *Metrology and Measurement Systems*, Vol. XIX, No. 2, 321-332.
- [29] Marszał J., Salamon R., 2013, "Silent Sonar for Maritime Security Applications", Acoustical Society of America, *Proceedings of Meetings on Acoustics*, Vol. 17.
- [30] Jedel A., Marszał J., Salamon R., 2016, "Continuous wave sonar with hyperbolic frequency modulation keyed by pseudo-random sequence", *Hydroacoustics*, Vol. 19, 185-196.
- [31] Nowicki A., Secomski W., Karłowicz P., Łypacewicz G., 1994, „High-frequency Doppler Ultrasound Flowmeter”, *Archives of Acoustic* vol. 19(4), 435-449.
- [32] Gancarzewicz J., 2009, „Algebra liniowa i jej zastosowania”, Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, 503p.
- [32] Skudrzyk E., 1971, "The Foundations of Acoustics", Springer Verlag, New York, Wien, 790p.
- [34] Ziomek L. J., 1995, "Fundamentals of Acoustic Field Theory and Space-Time Signal Processing", CRS Press, 720p.

- [35] Brekhovskikh L. M., Lysanov Y., 1982, "Fundamentals of Ocean Acoustics", Springer Verlag, Berlin, 250p.
- [36] Medwin H., Clay C.S., 1997, "Fundamentals of Acoustical Oceanography" Academic Press, 712p.
- [37] Tolstoy I., Clay C. S., 1987, "Ocean Acoustics: Theory and Experiment in Underwater Sound", Acoustical Society of America, 381p.
- [38] Ziomek L. J., 1985, "Underwater Acoustics. A Linear Systems Theory Approach", Academic Press, New York, 302p.
- [39] Dashen R., Henyey F. S.; Wurmser, D., 1990, "Calculations of acoustic scattering from the ocean surface", J. Acoust. Soc. Am. 88 (1), 310-323.
- [40] Klusek Z., 1996, "Linear and nonlinear sound scattering from subsurface bubble layer", J. S. Papadakis [Ed], Proc. of the Third European Conference on Underwater Acoustics, Heraklion, Crete, vol. 2, 1173-1178.
- [41] Marage JP., Mori Y., 2013, "Sonar and Underwater Acoustics", ISTE Ltd, London 640p.
- [42] Urban H. G., 2002, "Handbook of Underwater Acoustic Engineering", STN ATLAS Elektronik GmbH, Bremen, 296p.
- [43] Albers V. M., 1965, "Underwater Acoustics Handbook", Pennsylvania State University Press, University Park, Pennsylvania, 290p.
- [44] Burdic W. S., 2003, "Underwater Acoustic System Analysis", Peninsula Publishing, 489p.
- [45] Marasek K., Nowicki A., 1993, „Bias and Standard Deviation of Digital Mean and Maximum Doppler Frequency Estimators”, Archives of Acoustic vol. 18(4), 553-575.
- [46] Szabatin J., 1990, „Podstawy teorii sygnałów”, WKŁ, Warszawa, 499p.
- [47] Lyons R. G., 2010, "Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów", Zarzycki J., Szymbor J. (tłum.), wyd. 2 rozszerzone, WKŁ, Warszawa, 648p.
- [48] Zieliński T. Z., 2014, "Cyfrowe przetwarzanie sygnałów", WKŁ, Warszawa, 832p.
- [49] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm1875.pdf>, (2019-05-09).
- [50] Tietze U., Schenk Ch., 2009, "Układy Półprzewodnikowe", Błaszowski A. (tłum.), WNT, Warszawa, 1657 p.
- [51] Nadachowski M., Kulka Z., 1983, „Analogowe układy scalone”, WKŁ, Warszawa, 668p.
- [52] Filipkowski A., 2006, „Układy Elektroniczne Analogowe i Cyfrowe”, WNT, Warszawa, 720p.
- [53] <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD797.pdf>, (2019-05-09).
- [54] <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad825.pdf>, (2019-05-09).
- [55] <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD633.pdf>, (2019-05-09).

- [56] https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8597_8599.pdf, (2019-05-09).
- [57] https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7366_7367.pdf, (2019-05-09).
- [58] Urick R. J., 2013, "Principles of Underwater Sound" Peninsula Pub, 442p.
- [59] <http://resource.npl.co.uk/acoustics/techguides/seaabsorption/>, (2019-05-09).
- [60] Gawrysiak J., Salamon R., Zachariasz K., Marszał J., 1996, „Pomiary profili prędkości dźwięku w Jeziorach Wdzydzkich”, Prace XIII Sympozjum z Hydroakustyki, SHA'96, Jurata, 97-102.
- [61] Gawrysiak J., 2001, „Badania wpływu warunków propagacji fal akustycznych na parametry systemów hydroakustycznych”, Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Gdańsk.
- [62] Gawrysiak J., „Pomiary zmian kierunku rozchodzenia się fal akustycznych pod wpływem gradientów temperatury”, W. Rdzanek, L. Leniowska [Eds.], Prace XLVII Otwartego Seminarium z Akustyki, Tom I, OSA 2000, Jawor 2000, 175-180.
- [63] Klusek Z., 1990, „Warunki propagacji dźwięku w Południowym Bałtyku”, Rozprawy i monografie Instytutu Oceanologii PAN, 269p.
- [64] Narkiewicz J., 1999, „Podstawy układów nawigacyjnych”, WKŁ, Warszawa, 140p.
- [65] Jagodziński Z., 1961, „Systemy radionawigacyjne”, Wydawnictwo MON, Warszawa, 503p.
- [66] Balanis C. A., 2016 “Antenna Theory, Analysis and Design”, John Wiley & Sons, Inc., 4nd ed. 1104p.
- [67] Kino G. S., 1987, “Acoustic waves: devices, imaging, and analog signal processing”, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 601p.
- [68] Shulkin M., Marsh H. W., 1962, “Sound Absorption in Sea Water”, The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 34(6), 864.
- [69] Makris N., Avelino L., Menis R., 1995, “Deterministic reverberation from ocean ridges”, The Journal of the Acoustical Society of America. vol. 97(6), 3547-3574.
- [70] McDaniel S. T., 1994, “A small-slope theory of rough surface scattering”, The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 95(4), 1858-1864.
- [71] Robertsson J., Levander A., 1995, “A numerical study of seafloor scattering”, The Journal of the Acoustical Society of America. vol. 97(6), 3532-3546.
- [72] Schulkin M., Schaffer R., 1964, “Backscattering of sound from the sea surface”, The Journal of the Acoustical Society of America vol. 36(9), 1699-1703.
- [73] Nowicki A., 1995, „Podstawy ultrasonografii dopplerowskiej”, PWN, Warszawa, 335p.
- [74] Skolnik M. L., 2001, “Introduction to Radar Systems”, Tata McGraw Hill, New York, 772p.
- [75] Kreiner J. M., 1992, „Astronomia z astrofizyką”, Wydawnictwo Naukowe PWN, 282p.
- [76] Brzęcki M., 2013, „Elektroniczne systemy ochrony osób i mienia”, Wyd. KaBe, Krosno, 290p.

DODATEK 1. WYPROWADZENIE WZORU (2.14)

Zmiana odchyłki dopplerowskiej w funkcji czasu jest opisana następującym wzorem:

$$F_n(t) = -\frac{f_0}{c} \frac{v_x(x_0 - X_N + v_x t) + v_y(y_0 - Y_N + v_y t)}{\sqrt{(x_0 - X_N + v_x t)^2 + (y_0 - Y_N + v_y t)^2}} \quad (D1.1)$$

Dzieląc licznik i mianownik przez vr_n otrzymujemy:

$$F_n(t) = -\frac{f_0}{c} \frac{v_x(x_0 - X_N)/vr_n + v_y(y_0 - Y_N)vr_n + (v_x^2 + v_y^2)t/vr_n}{\frac{1}{vr_n} \sqrt{(x_0 - X_N)^2 + (y_0 - Y_N)^2 + 2v_x t(x_0 - X_N) + 2v_y t(y_0 - Y_N) + (v_x^2 + v_y^2)t^2}} \quad (D1.2)$$

Wyrażenia ułamkowe w liczniku można zastąpić funkcjami trygonometrycznymi, w wyniku czego mamy:

$$F_n(t) = -\frac{f_0 v}{c} \frac{\cos \beta \cos \alpha_N + \sin \beta \sin \alpha_N + vt/r_N}{\frac{1}{r_n} \sqrt{r_n^2 + 2v_x t(x_0 - X_N) + 2v_y t(y_0 - Y_N) + v^2 t^2}} \quad (D1.3)$$

W analogiczny sposób można przekształcić wyrażenie w mianowniku. Po uwzględnieniu znanej tożsamości trygonometrycznej Otrzymujemy wtedy:

$$F_n(t) = -\frac{f_0 v}{c} \frac{\cos(\beta - \alpha_N) + vt/r_N}{\sqrt{1 + 2vt \cos(\beta - \alpha_N)/r_N + v^2 t^2 / r_n^2}} \quad (D1.4)$$

W celu uproszczenia powyższego wzoru pominiemy ostatni składnik wyrażenia pod pierwiastkiem, który jest zawsze mniejszy od jedności i prawie zawsze od drugiego składnika. Ponieważ drugi składnik jest zawsze mniejszy od jedności, pierwiastek można rozwinąć w szereg potęgowy i ograniczyć się do dwóch pierwszych jego wyrazów. W wyniku tych uproszczeń otrzymujemy:

$$F_n(t) \cong -\frac{f_0 v}{c} \frac{\cos(\beta - \alpha_N) + vt/r_N}{1 + vt \cos(\beta - \alpha_N)/r_N} \quad (D1.5)$$

Podane wyżej warunki umożliwiają dalsze uproszczenie wzoru do postaci:

$$F_n(t) \cong -\frac{f_0 v}{c} \left[\cos(\beta - \alpha_N) + \frac{vt}{r_n} \left[1 - \frac{vt \cos(\beta - \alpha_N)}{r_N} \right] \right] \quad (D1.6)$$

Po wykonaniu mnożenia mamy:

$$F_n(t) \cong -\frac{f_0 v}{c} \left[\cos(\beta - \alpha_n) + \frac{vt}{r_n} - \frac{vt \cos^2(\beta - \alpha_n)}{r_n} - \frac{v^2 t^2 \cos(\beta - \alpha_n)}{r_n^2} \right] \quad (D1.7)$$

Ostatnie wyrażenie, jako znacznie mniejsze od pozostałych, można pominąć, w wyniku czego otrzymujemy:

$$F_n(t) \cong -\frac{f_0 v}{c} \left\{ \cos(\beta - \alpha_N) + \frac{vt}{r_n} [1 - \cos^2(\beta - \alpha_N)] \right\} \quad (D1.8)$$

i stąd ostatecznie:

$$F_n(t) \cong -\frac{f_0 v}{c} \cos(\beta - \alpha_N) - \frac{f_0 v}{c} \frac{vt}{r_n} \sin^2(\beta - \alpha_N) \quad (D1.9)$$

DODATEK 2. FORMA TRYGNOMETRYCZNA WYZNACZNIKÓW

Wyznaczniki występujące w zależnościach (3.8) i (4.7) mają następującą ogólną postać:

$$W_{12} = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix} = a_1 b_2 - a_2 b_1 \quad (\text{D2.1})$$

W systemie z ruchomym nadajnikiem, korzystając ze wzorów (3.3) i (3.6) powyższy wzór można zapisać jako:

$$W_{12} = \frac{x_1}{r_1} \frac{y_2}{r_2} - \frac{x_2}{r_2} \frac{y_1}{r_1} \quad (\text{D2.2})$$

Ponieważ $x_1/r_1 = (x-X_1)/r_1 = \cos(\alpha_1)$, $x_2/r_2 = (x-X_2)/r_2 = \cos(\alpha_2)$, $y_1/r_1 = (y-Y_1)/r_1 = \sin(\alpha_1)$, $y_2/r_2 = (y-Y_2)/r_2 = \sin(\alpha_2)$, gdzie α_1 i α_2 są kątami nachylenia wektorów łączących punkt siatki o współrzędnych (x,y) z hydrofonami o współrzędnych (X_1, Y_1) i (X_2, Y_2) , to zależność (D2.2) przybiera następującą formę trygonometryczną:

$$W_{12} = \cos \alpha_1 \sin \alpha_2 - \cos \alpha_2 \sin \alpha_1 = \sin(\alpha_2 - \alpha_1) \quad (\text{D2.3})$$

Pozostałe wyznaczniki można ogólnie zapisać jako:

$$W_{kl} = \sin(\alpha_k - \alpha_l) \quad (\text{D2.4})$$

W systemie ze stacjonarnymi nadajnikami, dla nadajnika o współrzędnych (X_N, Y_N) , wyznacznik (D2.1) przyjmuje postać:

$$W = \left(\frac{x_N}{r_N} + \frac{x_1}{r_1} \right) \left(\frac{y_N}{r_N} + \frac{y_2}{r_2} \right) - \left(\frac{x_N}{r_N} + \frac{x_2}{r_2} \right) \left(\frac{y_N}{r_N} + \frac{y_1}{r_1} \right) \quad (\text{D2.5})$$

Powyższa zależność upraszcza się do postaci:

$$W = \frac{1}{r_N^2 r_1 r_2} [(x_N r_1 + x_1 r_N)(y_N r_2 + y_2 r_N) - (x_N r_2 + x_2 r_N)(y_N r_1 + y_1 r_N)] \quad (\text{D2.6})$$

Po wykonaniu mnożenia i uproszczeń otrzymujemy:

$$W = \frac{1}{r_N r_1 r_2} [(x_1 y_N - x_N y_1) r_2 + (x_N y_2 - x_2 y_N) r_1 + (x_1 y_2 - y_1 x_2) r_N] \quad (\text{D2.7})$$

Stąd mamy:

$$W = \frac{(x_1 y_N - x_N y_1)}{r_1 r_N} + \frac{(x_N y_2 - x_2 y_N)}{r_2 r_N} + \frac{(x_1 y_2 - y_1 x_2)}{r_1 r_2} \quad (\text{D2.8})$$

Używając wcześniej wprowadzonych oznaczeń oraz wstawiając $x_n/r_N = (x-X_N)/r_N = \cos(\alpha_N)$, $y_n/r_N = (y-Y_N)/r_N = \sin(\alpha_N)$, zastąpimy wyrażenia ułamkowe odpowiednimi funkcjami trygonometrycznymi i otrzymujemy:

$$W = (\cos \alpha_1 \sin \alpha_N - \cos \alpha_N \sin \alpha_1) + (\cos \alpha_N \sin \alpha_2 - \cos \alpha_2 \sin \alpha_N) + (\cos \alpha_1 \sin \alpha_2 - \sin \alpha_1 \cos \alpha_2) \quad (\text{D2.9})$$

Postępując w analogiczny sposób z pozostałymi wyznacznikami i korzystając ze znanych tożsamości trygonometrycznych mamy ostatecznie:

$$\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix} = \sin(\alpha_N - \alpha_1) - \sin(\alpha_N - \alpha_2) + \sin(\alpha_2 - \alpha_1) \quad (\text{D2.10})$$

$$\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_3 & b_3 \end{vmatrix} = \sin(\alpha_N - \alpha_1) - \sin(\alpha_N - \alpha_3) + \sin(\alpha_3 - \alpha_1) \quad (\text{D2.11})$$

$$\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_4 & b_4 \end{vmatrix} = \sin(\alpha_N - \alpha_1) - \sin(\alpha_N - \alpha_4) + \sin(\alpha_4 - \alpha_1) \quad (\text{D2.12})$$

$$\begin{vmatrix} a_2 & b_2 \\ a_3 & b_3 \end{vmatrix} = \sin(\alpha_N - \alpha_2) - \sin(\alpha_N - \alpha_3) + \sin(\alpha_3 - \alpha_2) \quad (\text{D2.13})$$

$$\begin{vmatrix} a_2 & b_2 \\ a_4 & b_4 \end{vmatrix} = \sin(\alpha_N - \alpha_2) - \sin(\alpha_N - \alpha_4) + \sin(\alpha_4 - \alpha_2) \quad (\text{D2.14})$$

$$\begin{vmatrix} a_3 & b_3 \\ a_4 & b_4 \end{vmatrix} = \sin(\alpha_N - \alpha_3) - \sin(\alpha_N - \alpha_4) + \sin(\alpha_4 - \alpha_3) \quad (\text{D2.15})$$

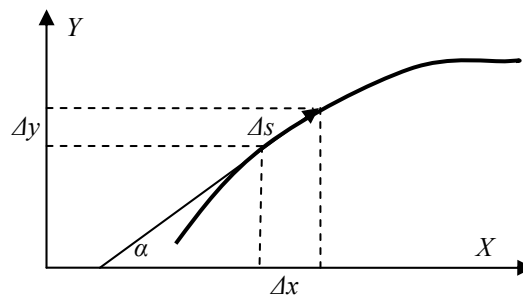
DODATEK 3. RUCH JEDNOSTAJNY PO TORZE SINUSOIDALNYM

Przyjmijmy, że cel porusza się ze stałą prędkością liniową v po torze sinusoidalnym opisanym zależnością:

$$x = x_a \sin(2\pi y / y_o) \quad (D3.1)$$

gdzie x_a jest maksymalnym odchyleniem od toru prostoliniowego, a y_o – okresem funkcji opisującym tor celu.

Założymy, że prędkość liniowa v w każdym punkcie toru jest równa długości wektora \vec{v} stycznego do toru w tym punkcie. W krótkim przedziale czasu Δt cel przebywa drogę $\Delta s = v \cdot \Delta t$. Wektor tej drogi $\Delta \vec{s}$ jest styczny do toru, jak to pokazano na rys. D3.1.



Rys. D3.1. Zależności geometryczne w ruchu po torze sinusoidalnym.

W kartezjańskim układzie współrzędnych wektor $\Delta \vec{s}_i$ ma składowe Δx i Δy , pokazane na rysunku. Składowe wektora prędkości są zatem równe $v_{xi} = \Delta x_i / \Delta t$ oraz $v_{yi} = \Delta y_i / \Delta t$. Z rysunku wynika, że:

$$\Delta x_i = \Delta s \sin \alpha_i \quad \Delta y_i = \Delta s \cos \alpha_i \quad (D3.2)$$

gdzie α_i jest kątem nachylenia krzywej w punkcie o współrzędnych x_i, y_i , a tangens tego kąta jest równy:

$$\operatorname{tg} \alpha_i = \frac{x_{i+1} - x_i}{y_{i+1} - y_i} \cong \left. \frac{dx}{dy} \right|_{x_i, y_i} \quad (D3.3)$$

Ze wzoru (D3.1) otrzymujemy:

$$\operatorname{tg} \alpha_i \cong \frac{2\pi x_a}{y_o} \cos(2\pi y_i / y_o) \quad (D3.4)$$

Korzystając ze znanych tożsamości trygonometrycznych, wzory (D3.2) można przekształcić do postaci:

$$\Delta x_i = \Delta s \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_i}} \quad \Delta y_i = \Delta s \frac{\operatorname{tg} \alpha_i}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_i}} \quad (D3.5)$$

Z powyższych wzorów wyznaczamy składowe prędkości, które są równe:

$$v_{x_i} = v \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_i}} \quad v_{y_i} = v \frac{\operatorname{tg} \alpha_i}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_i}} \quad (\text{D3.6})$$

Współrzędne kolejnego punktu, który osiąga cel wynikają ze wzorów (D3.2), (D3.3) oraz (D3.5). Można je zapisać jako:

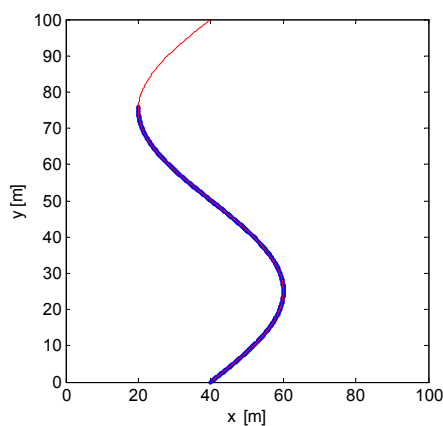
$$x_{i+1} = x_i + \Delta x_i = x_i + \Delta s \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_i}} \quad y_{i+1} = y_i + \Delta y_i = y_i + \Delta s \frac{\operatorname{tg} \alpha_i}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_i}} \quad (\text{D3.7})$$

W celu wyznaczenia współrzędnych celu stosuje się procedurę iteracyjną, której kroki przedstawiają się następująco:

1. wyznaczamy współrzędne początkowe x_1, y_1 ($i=1$) położenia celu na krzywej opisanej wzorem (D3.1),
2. obliczamy pochodną w tym punkcie ze wzoru (D3.4),
3. wyznaczamy współrzędne przyrostu drogi ze wzoru (D3.5) i współrzędne prędkości ze wzoru (D3.6),
4. obliczamy współrzędne punktu x_2, y_2 ($i=2$) ze wzoru (D3.7)
5. obliczamy pochodną punkcie x_2, y_2 ze wzoru (D3.4) itd.

Należy zauważyć, że błędy wynikające z przybliżonego charakteru wzoru (D3.3) sumują się z każdym krokiem iteracji. Z tego względu przyrost drogi Δs powinien być bardzo mały względem okresu y_a i – ze względu na większe nachylenia krzywej – powinien być tym mniejszy im większe jest odchylenie toru od prostej x_1 .

Przykład wyznaczania parametrów ruchu celu po torze sinusoidalnym pokazano na zamieszczonym niżej rysunku. Założono, że cel porusza się z prędkością $v=1$ m/s po torze o okresie $y_o=100$ m o odchyleniu od toru prostoliniowego $x_a=20$ m. Z wymieniowych wyżej powodów przyjęto, że $\Delta s=0.1$ m, a czas obserwacji $t=100$ s. Liczba iteracji wynosi zatem 1000. Na rys. D3.2. linią czerwoną pokazano sinusoidalny tor celu, a linią niebieską – drogę przebytą przez cel w czasie obserwacji.



Rys. D3.2. Tor celu poruszającego się ze stałą prędkością liniową.

DODATEK 4. PROGRAM SYMULUJĄCY FUNKCJONOWANIE SYSTEMU Z RUCHOMYM NADAJNIKIEM

Program działa w środowisku MATLAB® R2016a.

```
disp('START PROGRAMU')
```

```
% Program symuluje systemu nawigacyjnego, w którym na ruchomej  
% jednostce pływającej zamontowany jest nadajnik.
```

```
% Program wyznacza współrzędne poruszającego się obiektu  
% a następnie wektor jego prędkości.  
% W wersji symulacyjnej odchyłki dopplerowskie są wyznaczone  
% z uproszczonych równań i zaokrąglane do 1 Hz.
```

```
% Budowa programu jest następująca:
```

```
% 1. DANE SYSTEMOWE  
% 3. TRASA NADAJNIKA - wyznaczenie kolejnych współrzędnych i prędkości nadajnika  
% 4. ODCHYLENKI DOPPLEROWSKIE - wyznaczenie odchyłek dopplerowskich  
% w kolejnych punktach trasy nadajnika. W wersji doświadczalnej odchyłki  
% dopplerowskie obliczane są z widma sygnałów odebranych przez hydrofony  
% 5. POŁOŻENIE NADAJNIKA  
% 6. PRĘDKOŚĆ NADAJNIKA  
% BŁĘDY I WYKRESY
```

```
% W programie M_start wykorzystuje się kolejno programy:
```

```
% M_geometria - program wykonywany jednokrotnie  
% M_track (funkcja) - program wykonywany w badaniach symulacyjnych  
% M_deflections (funkcja) - program wykonywany w badaniach symulacyjnych
```

```
% Programy wykonywane w każdym kroku wyznaczające położenia i prędkości
```

```
% M_velocity  
% M_solution (funkcja)  
% M_zera (funkcja)  
% M_selekcja (funkcja)  
% M_sel (funkcja w M_selekcja)  
% M_decyzja (funkcja)  
% M_tracking (funkcja w M_decyzja)
```

```
clear
```

```
close all
```

```
% 1.DANE SYSTEMOWE
```

```
% Parametry
```

```
c=1500;      % prędkość propagacji [m/s]  
fo=10^5;    % częstotliwość nadajnika [Hz]  
h=fo/c;     % stała częstotliwościowa  
T=1;       % czas jednego cyklu pomiarowego [s]
```

```
% Współrzędne hydrofonów [m]
```

```
X1=-10;Y1=-10;X2=110;Y2=-10;X3=120;Y3=110;X4=-10;Y4=120;  
X=[X1 X2 X3 X4];  
Y=[Y1 Y2 Y3 Y4];
```

```
% Wyznaczanie prostych łączących hydrofony
```

```
x=0:100;  
ypp=((Y3-Y1)/(X3-X1))*(x-X1)+Y1;  
ypl=((Y4-Y2)/(X4-X2))*(x-X2)+Y2;
```

```

% Program wyznacza wielkości stałe dla założonej geometrii systemu
M_geometria;

% 3.TRASA NADAJNIKA
% Parametry ruchu

disp('Typ toru: prosta <pr>, ruch jednostajnie przyspieszony po prostej <jp>, ruch jednostajny po torze sinusoidalnym <si>')
typ=input('typ = ');
if typ=='si'
    xp=0;yp=0;vp=0;vk=0;b=0;to=0;
    disp('Predykcja toru wg prędkości nie działa')
else
    disp('xp Położenie początkowe [m]')
    xp=input('xp = ');
    disp('yp Położenie początkowe [m]')
    yp=input('yp = ');
    disp('vp Prędkość początkowa [m/s]')
    vp=input('vp = ');
    disp('vk Prędkość końcowa [m/s]')
    vk=input('vk = ');
    disp('b Nachylenie toru [deg]')
    b=input('b = ');
    disp('to Czas obserwacji [s]')
    to=input('to = ');
end

% Współrzędne nadajnika i składowe jego prędkości
[Xo,Yo,Vxt,Vyt,K]=M_track(typ,xp,yp,vp,vk,b,to);

%4.ODCHYLEKI DOPPLEROWSKIE

% Funkcja wyznacza wektor znormalizowanych odchyłek dopplerowskich
% w kolejnych punktach położenia nadajnika
Fd=zeros(K,4);
for k=1:K
    xo=Xo(k); %Współrzędne nadajnika
    yo=Yo(k);
    vx=Vxt(k); %Składowe prędkości nadajnika
    vy=Vyt(k);
    [f]=M_deflections(X,Y,xo,yo,vx,vy);
    Fd(k,:)=f; %Macierz odchyłek dopplerowskich
end

F=round(h*Fd); %Macierz odchyłek dopplerowskich zaokrąglonych do 1Hz
disp('Odchyłki dopplerowskie');
disp(F);
fd=F/h; %Macierz znormalizowanych, zaokrąglonych odchyłek dopplerowskich

% UWAGA:W pracy rzeczywistego systemu, odchyłki są mierzone (analiza fft).
% i należy je wpisać jako macierz Fp(K,4)i dopisać
% fd=Fd/h

%5.WSPÓŁRZĘDNE NADAJNIKA

% Rezerwacje
xv1=zeros(1,K);yv1=zeros(1,K);xv2=zeros(1,K);yv2=zeros(1,K);
Xk1=zeros(1,K);Yk1=zeros(1,K);Xk2=zeros(1,K);Yk2=zeros(1,K);
WW12=[];WW13=[];WW23=[];WW123=[];
VX=[];VY=[];VM=[];

```

```

VXs=[];VYs=[];VS=[];

% Pętla dla operacji wyznaczania położenia i prędkości nadajnika w krokach o numerze k

for k=1:K
    disp('Numer kroku k')
    disp(k)
    f=fd(k,:); %Wektor odchyłek dopplerowskich

% Program wyznacza macierze prędkości vx,vy w punktach siatki oraz różnice
% tych prędkości Vx, Vy
M_velocity;

% Funkcja wyznacza współrzędne m,n wspólnych miejsc zerowych różnic
% składowych prędkości
% m-1 - współrzędna y, n-1 - współrzędna x
% s - liczba wspólnych zer

[m1,n1,s1]=M_solution(Vx1,Vy1,N);
[m2,n2,s2]=M_solution(Vx2,Vy2,N);
[m3,n3,s3]=M_solution(Vx3,Vy3,N);

% Funkcja wyznacza wspólne miejsca zerowe
[W12,W13,W23,W123]=M_zera(m1,n1,m2,n2,m3,n3);

% Funkcja wyznacza jedną macierzy W zawierającą wszystkie miejsca zerowe
[W]=M_selekcja(W12,W13,W23);

% Funkcja wyznacza współrzędne domniemanego położenia nadajnika
[x1,y1,x2,y2]=M_decyzja(W123,W,Xk1,Yk1,Xk2,Yk2,VX,VY,k);

% Tor I
Xk1(k)=x1;
Yk1(k)=y1;
% Tor II
Xk2(k)=x2;
Yk2(k)=y2;

```

%6.PRĘDKOŚĆ NADAJNIKA

```

Vx12=[];Vx13=[];Vx14=[];Vx23=[];Vx24=[];Vx34=[];
Vy12=[];Vy13=[];Vy14=[];Vy23=[];Vy24=[];Vy34=[];

% Zamiana współrzędnych na numery wierszy i kolumn
mw=round([y1+1 y2+1]);
nw=round([x1+1 x2+1]);

% Wyznaczanie prędkości nadajnika w punktach (x1,y1) i (x2,y2)
for p=1:2
    m=mw(p);
    n=nw(p);

% Składowe Vx w punktach położenia nadajnika
Vx12(p)=vx12(m,n);
Vx13(p)=vx13(m,n);
Vx14(p)=vx14(m,n);
Vx23(p)=vx23(m,n);
Vx24(p)=vx24(m,n);
Vx34(p)=vx34(m,n);

```



```
% Składowe Vy w punktach położenia nadajnika
```

```
Vy12(p)=vy12(m,n);  
Vy13(p)=vy13(m,n);  
Vy14(p)=vy14(m,n);  
Vy23(p)=vy23(m,n);  
Vy24(p)=vy24(m,n);  
Vy34(p)=vy34(m,n);
```

```
end
```

```
% Składowe prędkości w kolejnych krokach
```

```
Vx=[Vx12; Vx13; Vx14; Vx23; Vx24; Vx34];  
Vy=[Vy12; Vy13; Vy14; Vy23; Vy24; Vy34];
```

```
% Średnie składowe prędkości w punktach położenia nadajnika
```

```
Vxm=mean(Vx);  
Vym=mean(Vy);  
Vm=sqrt(Vxm.^2+Vym.^2);
```

```
% Odchylenie standardowe prędkości w punktach położenia nadajnika
```

```
Vxs=std(Vx);  
Vys=std(Vy);  
Vs=std(sqrt(Vx.^2+Vy.^2));
```

```
% Prędkości wzdłuż drogi
```

```
VX=[VX;Vxm];  
VY=[VY;Vym];  
VM=[VM;Vm];
```

```
% Odchylenia standardowe wzdłuż drogi
```

```
VXs=[VXs;Vxs];  
VYs=[VYs;Vys];  
VS=[VS;Vs];
```

```
% Predykcja położenia nadajnika wyznaczona wyłącznie z prędkości
```

```
xv1(1)=Xk1(1);  
yv1(1)=Yk1(1);  
xv2(1)=Xk2(1);  
yv2(1)=Yk2(1);  
xv1(k+1)=xv1(k)+T*Vxm(1);  
yv1(k+1)=yv1(k)+T*Vym(1);  
xv2(k+1)=xv2(k)+T*Vxm(2);  
yv2(k+1)=yv2(k)+T*Vym(2);
```

```
% Predykcja położenia nadajnika wyznaczona z położenia i prędkości
```

```
Xv1(1)=Xk1(1);Yv1(1)=Yk1(1);Xv2(1)=Xk2(1);Yv2(1)=Yk2(1);  
Xv1(k+1)=Xk1(k)+T*Vxm(1);  
Yv1(k+1)=Yk1(k)+T*Vym(1);  
Xv2(k+1)=Xk2(k)+T*Vxm(2);  
Yv2(k+1)=Yk2(k)+T*Vym(2);
```

```
end %Koniec pętli wyznaczania położenia i prędkości celu
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% BŁĘDY I WYKRESY
```

```
figure  
plot(Xo,Yo,'ro')  
xlabel('x [m]')  
ylabel('y [m]')
```

```

hold on
plot(Xk1,Yk1,'k*')
plot(0:100,ypp)
plot(0:100,ypl)
title('Tor 1')
set(gca,'fontsize',12)
axis([0 100 0 100])
set(gcf,'color','white')
axis square

```

```

figure
plot(Xo,Yo,'ro')
xlabel('x [m]')
ylabel('y [m]')
hold on
plot(Xk2,Yk2,'g*')
plot(0:100,ypp)
plot(0:100,ypl)
title('Tor 2')
set(gca,'fontsize',12)
axis([0 100 0 100])
set(gcf,'color','white')
axis square

```

```

figure
plot(Xo,Yo,'ko')
xlabel('x [m]')
ylabel('y [m]')
hold on
plot(xv1,yv1,'b+')
plot(xv2,yv2,'gx')
plot(0:100,ypp)
plot(0:100,ypl)
title('Tory wg prędkości')
set(gca,'fontsize',12)
axis([0 100 0 100])
set(gcf,'color','white')
axis square

```

```

figure
plot(Xo,Yo,'ro')
xlabel('x [m]')
ylabel('y [m]')
hold on
plot(Xv1,Yv1,'g+')
plot(Xv2,Yv2,'gx')
plot(0:100,ypp)
plot(0:100,ypl)
title('Tory wg położenia i prędkości')
set(gca,'fontsize',12)
axis([0 100 0 100])
set(gcf,'color','white')
axis square

```

```

figure
plot(VX(:,1),'b')
xlabel('x [m]')
ylabel('v [m/s]')
title('Prędkość w torze 1')
hold on

```

```

plot(VY(:,1),'g')
plot(sqrt(VX(:,1).^2+VY(:,1).^2),'r')
set(gca,'fontsize',12)
set(gcf,'color','white')

```

```

figure
plot(VX(:,2),'b')
xlabel('x [m]')
ylabel('v [m/s]')
title('Prędkość w torze 2')
hold on
plot(VY(:,2),'g')
plot(sqrt(VX(:,2).^2+VY(:,2).^2),'r')
set(gca,'fontsize',12)
set(gcf,'color','white')

```

```
%BŁĘDY
```

```
% Błąd pomiaru położenia
```

```

d=sqrt((Xo-Xk1).^2+(Yo-Yk1).^2);
disp('Średni błąd pomiaru położenia')
disp(mean(d));
disp('Odchylenie standardowe błędu pomiaru położenia')
disp(std(d));
figure
stem(d)
title('Błąd pomiaru położenia toru 1')
set(gca,'fontsize',12)
set(gcf,'color','white')
xlabel('x [m]')
ylabel('\Delta d [m]')
h=get(gca,'children');
set(h,'MarkerSize',2,'color','k')

```

```
%Błąd pomiaru prędkości
```

```

v=sqrt(Vxt.^2+Vyt.^2);
dv1=v'-VM(:,1);
disp('Średni błąd pomiaru prędkości')
disp(mean(dv1));
disp('Odchylenie standardowe błędu pomiaru prędkości')
disp(std(dv1));
figure
stem(dv1)
title('Błąd pomiaru prędkości toru 1')
set(gca,'fontsize',12)
set(gcf,'color','white')
xlabel('x [m]')
ylabel('\Delta v [m/s]')
h=get(gca,'children');
set(h,'MarkerSize',2,'color','k')

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%M_geometria'
```

```

% Program wyznacza stałe związane z konstrukcją systemu
% Są to macierze 2x2 i ich wyznaczniki dla wszystkich kombinacji

```

```
%STAŁE OBLICZENIA SYSTEMOWE
```

```
%wykonywane jednokrotnie po uruchomieniu systemu
```

```
%Rezerwacje dla stałych elementów systemu
```

```
RM=zeros(101,101);
a1=RM;a2=RM;a3=RM;a4=RM;b1=RM;b2=RM;b3=RM;b4=RM;
d12=RM;d13=RM;d14=RM;d23=RM;d24=RM;d34=RM;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
for n=1:101
    x=n-1;      %Współrzędne x siatki
for m=1:101
    y=m-1;      %Współrzędne y siatki
```

```
%Obliczenia wspólne dla obu nadajników
%Odległości punktów siatki od hydrofonów
```

```
r1=sqrt((x-X1).^2+(y-Y1).^2);
r2=sqrt((x-X2).^2+(y-Y2).^2);
r3=sqrt((x-X3).^2+(y-Y3).^2);
r4=sqrt((x-X4).^2+(y-Y4).^2);
```

```
%Parametry równań dla siatki
```

```
a1(m,n)=(X1-x)/r1;
a2(m,n)=(X2-x)/r2;
a3(m,n)=(X3-x)/r3;
a4(m,n)=(X4-x)/r4;
```

```
b1(m,n)=(Y1-y)/r1;
b2(m,n)=(Y2-y)/r2;
b3(m,n)=(Y3-y)/r3;
b4(m,n)=(Y4-y)/r4;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%Macierze dla nadajnika
```

```
W12=[a1(m,n) b1(m,n);a2(m,n) b2(m,n)];
W13=[a1(m,n) b1(m,n);a3(m,n) b3(m,n)];
W14=[a1(m,n) b1(m,n);a4(m,n) b4(m,n)];
W23=[a2(m,n) b2(m,n);a3(m,n) b3(m,n)];
W24=[a2(m,n) b2(m,n);a4(m,n) b4(m,n)];
W34=[a3(m,n) b3(m,n);a4(m,n) b4(m,n)];
```

```
%Wyznaczniki dla nadajnika
```

```
d12(m,n)=det(W12);
d13(m,n)=det(W13);
d14(m,n)=det(W14);
d23(m,n)=det(W23);
d24(m,n)=det(W24);
d34(m,n)=det(W34);
```

```
end
end
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [Xo,Yo,Vx,Vy,K]=M_track(typ,varargin)
```

```
%Funkcja wyznacza parametry ruchu nadajnika
```

```
if strcmp(typ,'pr')||strcmp(typ,'jp')
```

```
    xp=varargin{1}; %Położenie początkowe
    yp=varargin{2}; %Położenie początkowe
    vp=varargin{3}; %Prędkość początkowa
```

```

vk=varargin{4}; %Prędkość końcowa
b=varargin{5}; %Nachylenie toru
to=varargin{6}; %Czas obserwacji

K=to; %Liczba kroków dla ruchu jednostajnego i jednostajnie przyspieszonego
disp('Liczba kroków K')
disp(K);

Xo=zeros(1,K);
Yo=zeros(1,K);
Vx=zeros(1,K);
Vy=zeros(1,K);
end

%TRASA CELU
T=1; %Okres pomiarów
if strcmp(typ,'pr')

%RUCH JEDNOSTAJNY PO LINII PROSTEJ

%Składowe wektora prędkości
vx=vp*cos(b*pi/181);
vy=vp*sin(b*pi/181);

%Kolejne położenia
for k=1:K
    Xo(k)=xp+vx*(k-1)*T; %Wektor współrzędnej x nadajnika
    Yo(k)=yp+vy*(k-1)*T; %Wektor współrzędnej y nadajnika
end
Vx(1:K)=vx;
Vy(1:K)=vy;

%%%%%%%%%%%%%
elseif strcmp(typ,'jp')
disp('Liczba kroków K')

%RUCH JEDNOSTAJNIE PRZYSPIESZONY PO LINII PROSTEJ
%Parametry początkowe ruchu obiektu
ao=(vk-vp)/(K*T) %przyspieszenie [m/s2]

%Kolejne prędkości i położenia celu
for k=1:K
    v=vp+ao*(k-1)*T;
    Vx(k)=v*cos(b*pi/181); %Składowe wektora prędkości
    Vy(k)=v*sin(b*pi/181);
    s=vp*(k-1)*T+0.5*ao*((k-1)*T)^2;
    Xo(k)=xp+s*cos(b*pi/181); %Wektor współrzędnej x celu
    Yo(k)=yp+s*sin(b*pi/181); %Wektor współrzędnej y celu
end
else

%%%%%%%%%%%%%
%RUCH JEDNOSTAJNY PO TORZE SINUSOIDALNYM - STAŁA PRĘDKOŚĆ LINIOWA

%Parametry ruchu obiektu
T=30; %Czas pomiaru
t=0.2; %Okres pomiarów
v=2; %Prędkość liniowa
ds=v*t; %Przyrost drogi
ys=T*v; %Droga=okres sinusoidy

```

```

K=2*T/t;      %Liczba punktów sinusoidy
xp=50;       %Współrzędna początkowa
yp=2;        %Współrzędna początkowa
xo=10;       %Wychylenie od toru prostoliniowego
disp('Liczba kroków K')

```

```

%Rezerwacje
X=zeros(1,K); Y=zeros(1,K); vx=zeros(1,K); vy=zeros(1,K); Y(1)=0; X(1)=0;

```

```

%Tor obiektu
for k=1:K
    z(k)=2*pi*xo*cos(2*pi*Y(k)/ys)/ys;
    X(k+1)=ds*z(k)/sqrt(1+z(k)^2)+X(k);
    Y(k+1)=ds/sqrt(1+z(k)^2)+Y(k);
    vx(k)=v*z(k)/sqrt(1+z(k)^2);
    vy(k)=v/sqrt(1+z(k)^2);

```

```

end
%Pomiar
P=K/10;
p=1:P;
Xo=X((p-1)*10+1)+xp;
Yo=Y((p-1)*10+1)+yp;
Vx=vx((p-1)*10+1);
Vy=vy((p-1)*10+1);
K=P
plot(Xo,Yo,'ro')
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [f]=M_deflections(X,Y,xo,yo,vx,vy)

```

%Program wyznacza znormalizowane odchyłki dopplerowskie z dokładnością MATLABA

```

X1=X(1);X2=X(2);X3=X(3);X4=X(4);
Y1=Y(1);Y2=Y(2);Y3=Y(3);Y4=Y(4);

```

```

R1=sqrt((xo-X1).^2+(yo-Y1).^2);
R2=sqrt((xo-X2).^2+(yo-Y2).^2);
R3=sqrt((xo-X3).^2+(yo-Y3).^2);
R4=sqrt((xo-X4).^2+(yo-Y4).^2);

```

% Odchyłki dopplerowskie [Hz] wyznaczone analitycznie

```

F1=(vx*(X1-xo)+vy*(Y1-yo))/R1;
F2=(vx*(X2-xo)+vy*(Y2-yo))/R2;
F3=(vx*(X3-xo)+vy*(Y3-yo))/R3;
F4=(vx*(X4-xo)+vy*(Y4-yo))/R4;

```

%Znormalizowane odchyłki dopplerowskie

```

f=[F1 F2 F3 F4];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

%M_velocity'

% Program wyznacza składowe prędkości vx i vy w punktach siatki
% i różnice prędkości z poszczególnych równań

```

%Odchyłki dopplerowskie
f1=f(1);f2=f(2);f3=f(3);f4=f(4);

```

```

%Rezerwacje dla obliczeń bieżących
N=101;

```

```
O=zeros(N,N);
vx12=O;vx13=O;vx14=O;vx23=O;vx24=O;vx34=O;
vy12=O;vy13=O;vy14=O;vy23=O;vy24=O;vy34=O;
```

```
for m=1:N
    for n=1:N
```

```
%Macierze odwrotne
```

```
O12=[b2(m,n) -b1(m,n);-a2(m,n) a1(m,n)]/d12(m,n);
O13=[b3(m,n) -b1(m,n);-a3(m,n) a1(m,n)]/d13(m,n);
O14=[b4(m,n) -b1(m,n);-a4(m,n) a1(m,n)]/d14(m,n);
O23=[b3(m,n) -b2(m,n);-a3(m,n) a2(m,n)]/d23(m,n);
O24=[b4(m,n) -b2(m,n);-a4(m,n) a2(m,n)]/d24(m,n);
O34=[b4(m,n) -b3(m,n);-a4(m,n) a3(m,n)]/d34(m,n);
```

```
%Wyznaczanie składowych prędkości vx i vy
```

```
%Rozwiązywanie równań
```

```
v12=O12*[f1;f2];
v13=O13*[f1;f3];
v14=O14*[f1;f4];
v23=O23*[f2;f3];
v24=O24*[f2;f4];
v34=O34*[f3;f4];
```

```
%Składowe vx w punktach siatki
```

```
vx12(m,n)=v12(1);
vx13(m,n)=v13(1);
vx14(m,n)=v14(1);
vx23(m,n)=v23(1);
vx24(m,n)=v24(1);
vx34(m,n)=v34(1);
```

```
%Składowe vy w punktach siatki
```

```
vy12(m,n)=v12(2);
vy13(m,n)=v13(2);
vy14(m,n)=v14(2);
vy23(m,n)=v23(2);
vy24(m,n)=v24(2);
vy34(m,n)=v34(2);
```

```
%Różnice składowych prędkości dla nadajnika w punktach siatki (macierze NxN)
```

```
Vx1=(vx12-vx34);
Vx2=(vx13-vx24);
Vx3=(vx14-vx23);
```

```
Vy1=(vy12-vy34);
Vy2=(vy13-vy24);
Vy3=(vy14-vy23);
```

```
end
end
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
function [m,n,s]=M_solution(dVx,dVy,N)
```

```
% Funkcja wyznacza współrzędne przejść przez zero różnic prędkości dVx,dVy
% oznaczonych w velocity.m jako Vx1,Vx2,...Vy1, metodą opisaną w opracowaniu
% Następnie funkcja wyznacza wspólne miejsca zerowe różnic prędkości
% n-1 -współrzędna x
% m-1 - współrzędna y
```

```
%Rezerwacje
```

```
A1=zeros(N,N); B1=A1; A2=A1; B2=A1;
```

```
%Miejsca zerowe liczone w wierszach
```

```
for m=1:N
```

```
    a=(dVx(m,:))>=0;
```

```
    b=(dVy(m,:))>=0;
```

```
    da=abs(diff(a));
```

```
    db=abs(diff(b));
```

```
    [z,nxo]=find(da);
```

```
    [h,nyo]=find(db);
```

```
%Eliminacja zer w punktach nieciągłości
```

```
vx=abs(dVx(m,nxo));
```

```
vy=abs(dVy(m,nyo));
```

```
dvx=vx<2;
```

```
dvy=vy<2;
```

```
ax=nxo.*dvx;
```

```
by=nyo.*dvy;
```

```
[e,e,nx]=find(ax);
```

```
[e,e,ny]=find(by);
```

```
    A1(m,nx)=1;
```

```
    B1(m,ny)=1;
```

```
end
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%Miejsca zerowe liczone w kolumnach
```

```
for n=1:N
```

```
    a=(dVx(:,n))>=0;
```

```
    b=(dVy(:,n))>=0;
```

```
    da=abs(diff(a));
```

```
    db=abs(diff(b));
```

```
    [mxo,z]=find(da);
```

```
    [myo,nz]=find(db);
```

```
%Eliminacja zer w punktach nieciągłości
```

```
vx=abs(dVx(mxo,n));
```

```
vy=abs(dVy(myo,n));
```

```
dvx=vx<2;
```

```
dvy=vy<2;
```

```
ax=mxo.*dvx;
```

```
by=myo.*dvy;
```

```
[e,e,mx]=find(ax);
```

```
[e,e,my]=find(by);
```

```
    A2(mx,n)=1;
```

```
    B2(my,n)=1;
```

```
end
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%Suma miejsc zerowych liczonych względem wierszy i kolumn
```

```
A=(A1+A2)>=1;
```

```
B=(B1+B2)>=1;
```

```
%Współrzędne wspólnych rozwiązań
```

```
AB=(A.*B);
```

```
[m,n]=find(AB);
```



```
s=size(m,1);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function[W12,W13,W23,W123]=M_zera(m1,n1,m2,n2,m3,n3)
```

```
%Funkcja znajduje wspólne miejsca zerowe trzech macierzy (m,n).
%Zwraca współrzędne tych wspólnych miejsc zerowych w macierzach W
```

```
%Forma macierzowa
```

```
MN1=[m1 n1];
```

```
MN2=[m2 n2];
```

```
MN3=[m3 n3];
```

```
%Długość wektorów
```

```
s1=length(m1);
```

```
s2=length(m2);
```

```
s3=length(m3);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%Wspólne zera MN1 i MN2
```

```
W12=[];
```

```
if s1~=0&& s2~=0
```

```
    if s1<=s2
```

```
        for k=1:s1
```

```
            for l=1:s2
```

```
                if MN1(k,:)==MN2(l,)
```

```
                    W12=[W12;MN1(k,)];
```

```
                end
```

```
            end
```

```
        end
```

```
    else
```

```
        for k=1:s2
```

```
            for l=1:s1
```

```
                if MN1(l,:)==MN2(k,)
```

```
                    W12=[W12;MN2(k,)];
```

```
                end
```

```
            end
```

```
        end
```

```
    end
```

```
s12=size(W12,1);
```

```
%Wspólne zera MN1 i MN3
```

```
W13=[];
```

```
if s1~=0&& s3~=0
```

```
    if s1<=s3
```

```
        for k=1:s1
```

```
            for l=1:s3
```

```
                if MN1(k,:)==MN3(l,)
```

```
                    W13=[W13;MN1(k,)];
```

```
                end
```

```
            end
```

```
        end
```

```
    else
```

```
        for k=1:s3
```

```
            for l=1:s1
```

```
                if MN1(l,:)==MN3(k,)
```

```
                    W13=[W13;MN3(k,)];
```

```
                end
```

```
            end
```

```
        end
```

```

    end
end
s13=size(W13,1);

%Wspólne zera MN2 i MN3
W23=[];
if s2~=0&& s3~=0
    if s2<=s3
        for k=1:s2
            for l=1:s3
                if MN2(k,)==MN3(l,)
                    W23=[W23;MN2(k,)];
                end
            end
        end
    else
        for k=1:s3
            for l=1:s2
                if MN2(l,)==MN3(k,)
                    W23=[W23;MN3(k,)];
                end
            end
        end
    end
end
s23=size(W23,1);

```

```

%Wspólne zera trzech macierzy
W123=[];
W=[];
if s12~=0&& s13~=0
    if s12<=s13
        for k=1:s12
            for l=1:s13
                if W12(k,)==W13(l,)
                    W=[W;W12(k,)];
                end
            end
        end
    else
        for k=1:s13
            for l=1:s12
                if W12(l,)==W13(k,)
                    W=[W;W13(k,)];
                end
            end
        end
    end
end
s=size(W,1);

```

```

if s~=0&& s23~=0
    if s<=s23
        for k=1:s
            for l=1:s23
                if W(k,)==W23(l,)
                    W123=[W123;W(k,)];
                end
            end
        end
    end
end

```

```

else
    for k=1:s23
        for l=1:s
            if W(l,)==W23(k,:)
                W123=[W123;W23(k,:)];
            end
        end
    end
end
end
end
end
W123=W123';
W12=W12';
W13=W13';
W23=W23';
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function[W]=M_selekcja(W12,W13,W23)

```

%Funkcja wyznacza macierz W zawierającą wszystkie zera macierz W12,W13,W23

```

s12=size(W12,2);
s13=size(W13,2);
s23=size(W23,2);

s=[s12 s13 s23];
[sm,p]=max(s); %p -pozycja najdluzszej macierzy

if p==1
    W1=W12;
end
if p==2
    W1=W13;
end
if p==3
    W1=W23;
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
b=[2 3 4;1 3 4;1 2 4;1 2 3];
a=b(p,:);
for k=1:3

    if a(k)==1
        W2=W12;
        [Ww]=M_sel(W1,W2);
    end

    if a(k)==2
        W2=W13;
        [Ww]=M_sel(W1,W2);
    end

    if a(k)==2
        W2=W23;
        [Ww]=M_sel(W1,W2);
    end
    W1=Ww;
end
W=Ww;

```

```
function[W]=M_sel(W1,W2,s1,s2)
```

```
% Funkcja wyznacza wspólną macierz W
```

```
s1=size(W1,2);
s2=size(W2,2);
W=W1;

if s2==0
    W=W1;
end
if s2==s1
    if W1==W2;
        W=W1;
    end
else
    for k=1:s1
        for l=1:s2
            if W1(:,k)==W2(:,l);
                W=W1;
                continue
            end
            W=[W W2(:,l)];
        end
    end
end
end
```

```
function [x1,y1,x2,y2]=M_decyzja(W123,W,Xk1,Yk1,Xk2,Yk2,VX,VY,k)
```

```
%Funkcja wyznacza domniemane położenia nadajnika
```

```
s=size(W123,2);
sw=size(W,2);
if s==0&&sw==0 %Obie macierze puste
    x1=1;y1=1;x2=1;y2=1;
end
```

```
%Sortowanie rosnąco wzdłuż osi Y
```

```
if s>0
    [w1,I]=sort(W123(1,:));
    w2=W123(2,I);
    disp('Macierz W123 w decyzji')
    W123=[w1;w2]
end
if sw>0
    [w1,I]=sort(W(1,:));
    w2=W(2,I);
    disp('Macierz W w decyzji')
    W=[w1;w2]
end
```

```
%Analiza macierzy W123
```

```
if s==1;
    x1=W123(2,1)-1;
    y1=W123(1,1)-1;
    x2=x1;
    y2=y1;
```

```

end
if s==2
    dWx=W123(2,1)-W123(2,2);
    dWy=W123(1,1)-W123(1,2);
    if abs(dWx)<2&&abs(dWy)<2
        x1=(W123(2,1)+W123(2,2))/2-1; %Położenie jako średnia
        y1=(W123(1,1)+W123(1,2))/2-1;
        x2=x1;
        y2=y1;
    else
        x1=W123(2,1)-1;           %Oddzielne położenia celu
        y1=W123(1,1)-1;
        x2=W123(2,2)-1;
        y2=W123(1,2)-1;
    end
end
if s>2
    if k==1
        x1=0;
        y1=0;
        x2=0;
        y2=0;
    else
        [x1,y1,x2,y2]=M_tracking(W123,Xk1,Yk1,Xk2,Yk2,VX,VY,k);
    end
end

```

```

if s==0    %Macierz W123 pusta
disp('Macierz W123 pusta')

```

```

%Analiza macierzy W

```

```

%Sortowanie rosnąco wzdłuż osi Y

```

```

if sw>0

```

```

[w1,I]=sort(W(1,:));

```

```

w2=W(2,I);

```

```

disp('Macierz W w decyzji')

```

```

W=[w1;w2]

```

```

end

```

```

if sw==1;

```

```

    x1=W(2,1)-1;

```

```

    y1=W(1,1)-1;

```

```

    x2=x1;

```

```

    y2=y1;

```

```

    'W1'

```

```

end

```

```

if sw==2

```

```

    dWx=W(2,1)-W(2,2);

```

```

    dWy=W(1,1)-W(1,2);

```

```

    if abs(dWx)<2&&abs(dWy)<2

```

```

        x1=(W(2,1)+W(2,2))/2-1; %Położenie jako średnia

```

```

        y1=(W(1,1)+W(1,2))/2-1;

```

```

        x2=x1;

```

```

        y2=y1;

```

```

    else

```

```

        x1=W(2,1)-1;    %Oddzielne położenia celu

```

```

        y1=W(1,1)-1;

```

```

        x2=W(2,2)-1;

```

```

        y2=W(1,2)-1;

```

```

    end

```

```

    'W2'

```

```

end
if sw>2
    if k==1
        x1=0;
        y1=0;
        x2=0;
        y2=0;
    else
        'W3'
        [x1,y1,x2,y2]=M_tracking(W,Xk1,Yk1,Xk2,Yk2,VX,VY,k);
    end
end
end
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [x1,y1,x2,y2]=M_tracking(W,Xk1,Yk1,Xk2,Yk2,VX,VY,k)

```

%Program śledzenia celu przy niejednoznacznych rozwiązaniach

```

x1=0;y1=0;x2=0;y2=0;
disp('Tracking')
if k>1
    %Współrzędne poprzedniego punktu
    X1=Xk1(1,k-1)+2*VX(k-1,1);
    Y1=Yk1(1,k-1)+2*VY(k-1,1);
    X2=Xk2(1,k-1)+2*VX(k-1,2);
    Y2=Yk2(1,k-1)+2*VY(k-1,2);

    dx1=abs(W(2,:)-1-X1);
    dy1=abs(W(1,:)-1-Y1);
    d=sqrt(dx1.^2+dy1.^2);
    [dm,I]=min(d); %Wybór najmniejszej odległości od (X1,Y1)
    x1=W(2,I)-1;
    y1=W(1,I)-1;

    dx2=abs(W(2,:)-1-X2);
    dy2=abs(W(1,:)-1-Y2);
    d=sqrt(dx2.^2+dy2.^2);
    [dm,I]=min(d); %Wybór najmniejszej odległości od (X2,Y2)
    x2=W(2,I)-1;
    y2=W(1,I)-1;
end

```

DODATEK 5. PROGRAM SYMULUJĄCY FUNKCJONOWANIE SYSTEMU ZE STACJONARNYMI NADAJNIKAMI

Program działa w środowisku MATLAB® R2016a.

```
disp("DOPPLER_START")
```

```
% Program inicjuje działanie symulacji i wyznacza współrzędne
% poruszającego się obiektu a następnie wektor jego prędkości.
% Odchyłki dopplerowskie są wyznaczane z uproszczonych równań.
% System wykorzystuje dwa nadajniki pracujące jednocześnie na
% dwóch różnych częstotliwościach i cztery hydrofony.

% Program składa się z następujących działów:
% 1. DANE SYSTEMOWE - współrzędne nadajników, hydrofonów i częstotliwości
%   nadawanych sygnałów
% 2. STAŁE GEOMETRYCZNE - program geometria.m - wyznacza stałe
%   związane z geometrią systemu
% 3. ELIMINACJA - zespół programów do eliminacji fałszywych rozwiązań
% 4. TRASA CELU - wyznaczanie kolejnych współrzędnych i prędkości celu
%   i związanych z tym odchyłek dopplerowskich
% 5. POŁOŻENIE POCZĄTKOWE i PRĘDKOŚĆ CELU
% 6. ŚLEDZENIE CELU

% W dziale ELIMINACJA wykorzystuje się kolejno programy:
% - deflections (funkcja)
% - velocity.m
% - solution_k (funkcja)

% W dziale TRASA CELU wykorzystuje się kolejno funkcje :
% - track
% - deflections

% W dziale POŁOŻENIE POCZĄTKOWE i PRĘDKOŚĆ CELU działa program:
% - velocity.m
% oraz funkcje:
% - solution
% - zera3
% - zera
% - decyzja
% - skupienie

% Dział ŚLEDZENIE CELU wykorzystuje kolejno programy:
% - geometria_s
% - deflections.m
% - velocity.m
% - solution_s.m
% - predykcja.m
% oraz funkcje:
% zera3
% zera
% skupienie

clear
close all

% 1. DANE SYSTEMOWE
c=1500;      % prędkość propagacji [m/s]
fN1=10^5;   % częstotliwość Nadajnika I [Hz]
```

```
fN2=0.8*10^5; % częstotliwość Nadajnika II [Hz]
h1=fN1/c; % stała częstotliwościowa
h2=fN2/c; % stała częstotliwościowa
T=1; % czas jednego cyklu pomiarowego [s]
N=101; % liczba linii siatki
```

```
% Współrzędne nadajników [m]
XN1=110;YN1=61;XN2=59;YN2=-16;
XN=[XN1 XN2];
YN=[YN1 YN2];
```

```
% Współrzędne hydrofonów [m]
X1=-11;Y1=-11;X2=110;Y2=-5;X3=111;Y3=111;X4=-9;Y4=111;
X=[X1 X2 X3 X4];
Y=[Y1 Y2 Y3 Y4];
```

```
% Wyznaczanie prostych łączących nadajniki z hydrofonami
x1=X1:X2;
y11=((YN1-Y1)/(XN1-X1))*(x1-X1)+Y1;
y14=((YN1-Y4)/(XN1-X4))*(x1-X4)+Y4;
y23=((YN2-Y3)/(XN2-X3))*(x1-X3)+Y3;
y24=((YN2-Y4)/(XN2-X4))*(x1-X4)+Y4;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 2. STAŁE GEOMETRYCZNE
geometria;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 3. ELIMINACJA
disp('ELIMINACJA')
```

```
% Celem programów jest wyznaczenie macierzy D1 i D2, które są wykorzystywane
% do eliminacji fałszywych rozwiązań związanych z prostymi łączącymi nadajnik z hydrofonami.
% W programie nie wykorzystuje się danych pomiarowych!
% Program wykonuje się raz przy konfiguracji systemu.
```

```
% Parametry początkowe ruchu obiektu
xo=50; %Współrzędna początkowa
yo=50; %Współrzędna początkowa
vka=2; %Moduł prędkości celu [m/s]
b=75; %Kierunek ruchu celu [deg]
```

```
%Składowe wektora prędkości
vxo=vka*cos(b*pi/180);
vyo=vka*sin(b*pi/180);
```

```
% Funkcja wyznacza znormalizowane odchyłki dopplerowskie z dokładnością środowiska MATLAB
[fd1,fd2]=deflections(XN,YN,X,Y,xo,yo,vxo,vyo);
```

```
% Odchyłki dopplerowskie zaokrąglone do 1 [Hz]
F1=round(h1*fd1);
F2=round(h2*fd2);
f1=F1/h1;
f2=F2/h2;
```

```
%Odchyłki dopplerowskie w poszczególnych hydrofonach
f11=f1(1,1);f21=f1(1,2);f31=f1(1,3);f41=f1(1,4);
f12=f2(1,1);f22=f2(1,2);f32=f2(1,3);f42=f2(1,4);
```

```
% Program wyznacza macierze różnic prędkości w punktach siatki
```


velocity;

% Funkcja wyznacza macierze miejsc zerowych różnic składowych prędkości

%Nadajnik I

```
[A11,B11]=solution_k(Vx11,Vy11,xo,yo);  
[A21,B21]=solution_k(Vx21,Vy21,xo,yo);  
[A31,B31]=solution_k(Vx31,Vy31,xo,yo);
```

%Nadajnik II

```
[A12,B12]=solution_k(Vx12,Vy12,xo,yo);  
[A22,B22]=solution_k(Vx22,Vy22,xo,yo);  
[A32,B32]=solution_k(Vx32,Vy32,xo,yo);
```

%Suma macierzy

```
C1=A11+B11+A21+B21+A31+B31;  
C2=A12+B12+A22+B22+A32+B32;
```

D1=C1>=5; %Macierz do eliminacji fałszywych rozwiązań dla nadajnika I

D2=C2>=5; %Macierz do eliminacji fałszywych rozwiązań dla nadajnika II

D1(49:52,49:52)=0; %Zerowanie elementów centralnych

D2(49:52,49:52)=0; %Zerowanie elementów centralnych

%%%

% 4. TRASA CELU

disp(' Rozdzaj toru:')

disp(' - prostoliniowy ruch jednostajny <pr>')

disp(' - prostoliniowy ruch jednostajnie przyspieszony <jp>')

disp(' - ruch po torze sinusoidalnym ze stałą prędkością liniową <si>')

% Zmian parametrów ruchu po torze sinusoidalnym można dokonać w funkcji "track"

% Wprowadzanie parametrów ruchu jednostajnego i przyspieszonego

disp('Typ ruchu')

typ=input('typ = ');

if strcmp(typ,'pr')||strcmp(typ,'jp')

disp('Polozenie początkowe xo')

xo=input('xo = ');

disp('Polozenie początkowe yo')

yo=input('yo = ');

disp('Prędkości początkowa vp')

vp=input('vp = ');

disp('Prędkości końcowa vk')

vk=input('vk = ');

disp('Nachylenie b wektora v [deg]')

b=input('b = ');

% Wyznaczanie maksymalnego czasu obserwacji

if vp==vk %Ruch jednostajny

vx=vp*cos(pi*b/180);

vy=vp*sin(pi*b/180);

ty=(100-yo)/vy;

if b<=90

tx1=(100-xo)/vx;

tomax=min([ty tx1]);

else

tx2=xo/abs(vx);

tomax=min([ty tx2]);

end

else %Ruch jednostajnie przyspieszony

ty=(100-yo)/(0.5*(vp+vk)*sin(pi*b/180));

```

if b<=90
    tx1=(100-xo)/(0.5*(vp+vk)*cos(pi*b/180));
    tomax=min([ty tx1]);
else
    tx2=xo/abs((0.5*(vp+vk)*cos(pi*b/180)));
    tomax=min([ty tx2]);
end
end
disp('Maksymalny czas obserwacji')
disp(fix(tomax))
disp('Czas obserwacji to')
to=input('to = ');

% Funkcja wyznacza parametry ruchu obiektu
[Xo,Yo,Vxt,Vyt,K]=track(typ,xo,yo,vp,vk,b,to);
else
% Funkcja wyznacza parametry ruchu sinusoidalnego
[Xo,Yo,Vxt,Vyt,K]=track(typ);
end
Vt=sqrt(Vxt.^2+Vyt.^2);

% Program wyznacza znormalizowane odchyłki dopplerowskie
% W pracy rzeczywistego systemu, odchyłki są mierzone (analiza fft)
% i należy wpisać w miejscu oznaczonym *)
F1=zeros(K,4);
F2=zeros(K,4);
for k=1:K
% Bieżące parametry celu
    xo=Xo(k);
    yo=Yo(k);
    vxo=Vxt(k);
    vyo=Vyt(k);

% Odchyłki dopplerowskie bez zaokrąglenia
    [fd1,fd2]=deflections(XN,YN,X,Y,xo,yo,vxo,vyo);

% Odchyłki dopplerowskie zaokrąglone do 1 [Hz]
    F1(k,:)=round(h1*fd1); % *)
    F2(k,:)=round(h2*fd2); % *)
    f1=F1/h1; %Macierz znormalizowanych odchyłek dopplerowskich, nadajnik I
    f2=F2/h2; %Macierz znormalizowanych odchyłek dopplerowskich, nadajnik II
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%5.POŁOŻENIE POCZĄTKOWE i PRĘDKOŚĆ CELU

% W pierwszym lub następnych cyklach pomiarowych program wyznacza
% początkowe położenie celu i jego prędkość

% Rezerwacje pamięci
x=zeros(1,K); %Składowa x toru
y=zeros(1,K); %Składowa y toru
vx=zeros(1,K); %Składowa wektora prędkości
vy=zeros(1,K); %Składowa wektora prędkości
v=zeros(1,K); %Prędkość
kp=0; %Liczba kroków poszukiwania położenia początkowego
ks=0; %Liczba kroków śledzenia
k=0; %Krok bieżący
wkp=[]; %Numer procedury położenia początkowego

```

```

for kc=1: K-(kp+ks)    %Pętla powrotów do położenia początkowego
disp('PEŁTŁA GŁÓWNA')
if K-(kp+ks)==0
disp('KONIEC')
break    %Wyjście z obliczeń
end

% Położenie początkowe
for u=1:K-(kp+ks)
disp('POŁOŻENIE POCZĄTKOWE')
N=101;
kp=kp+1;    %Licznik kroków poszukiwania położenia początkowego
k=kp+ks;    %Bieżący krok toru
wkp=[wkp k];
disp('Krok bieżący');
disp(k);

% Odchyłki dopplerowskie
f11=f1(k,1);f21=f1(k,2);f31=f1(k,3);f41=f1(k,4);
f12=f2(k,1);f22=f2(k,2);f32=f2(k,3);f42=f2(k,4);

% Program oblicza macierze wynikające z geometrii systemu
geometria

% Program wyznacza macierze różnic prędkości w punktach siatki
velocity

% Wektory wspólnych miejsc zerowych różnic prędkości
% n-1 - współrzędna x, m-1 - współrzędna y, wektora W(m,n)
% s - liczba wspólnych zer

% NADAJNIK I
[m11,n11,s11]=solution(Vx11,Vy11,D1,N);
[m21,n21,s21]=solution(Vx21,Vy21,D1,N);
[m31,n31,s31]=solution(Vx31,Vy31,D1,N);

% NADAJNIK II
[m12,n12,s12]=solution(Vx12,Vy12,D2,N);
[m22,n22,s22]=solution(Vx22,Vy22,D2,N);
[m32,n32,s32]=solution(Vx32,Vy32,D2,N);

% Wspólne miejsca zerowe dla nadajnika I
[W1,s1]=zera3(m11,n11,m21,n21,m31,n31);

% Wspólne miejsca zerowe dla nadajnika II
[W2,s2]=zera3(m12,n12,m22,n22,m32,n32);

% Wspólne miejsca zerowe dla obu nadajników
if s1>0&&s2>0
disp('Wspólne zera nadajnika I i II')
[m,n,s]=zera(W1,W2);
if s==1    %Jedno wspólne rozwiązanie
x(k)=n-1;    %Wyznaczona współrzędna celu
y(k)=m-1;    %Wyznaczona współrzędna celu
disp('Koniec poszukiwania położenia początkowego')
break    %Wyjście z procedury początkowej i przejście do śledzenia
else
disp('Brak rozwiązania')
x(k)=0;    %Umowna współrzędna celu
y(k)=0;    %Umowna współrzędna celu

```

```

        disp('Przejdźcie do następnego kroku k')
        continue
    end
end
end

```

%Przypadki szczególne

% 1.Brak wspólnych zer w dla obu nadajników

```

if s1==0&& s2==0
    disp('Brak rozwiązania')
    x(k)=0;           %Umowna współrzędna celu
    y(k)=0;           %Umowna współrzędna celu
    disp('Obliczenia dla następnego kroku k')
    continue
end

```

% 2.Wspólne miejsca zerowe tylko dla jednego nadajnika

```

if s1>0&& s2==0    %Nadajnik I ma wspólne zera
    disp('Wspólne zera nadajnika I');
    if s1==1
        y(k)=W1(1,1)-1; % Wyznaczona współrzędna celu
        x(k)=W1(1,2)-1; % Wyznaczona współrzędna celu
        disp('Koniec poszukiwania położenia początkowego')
        break           % Przejdźcie do procedury śledzenia
    else
        [m,n,s]=skupienie(W1);
        if s==0
            disp('Brak rozwiązania')
            x(k)=0;      % Umowna współrzędna celu
            y(k)=0;      % Umowna współrzędna celu
            disp('Obliczenia dla następnego kroku k')
            continue
        else
            x(k)=n-1;    % Wyznaczona współrzędna celu
            y(k)=m-1;    % Wyznaczona współrzędna celu
            disp('Koniec poszukiwania położenia początkowego')
            break        % Przejdźcie do procedury śledzenia
        end
    end
end
end

```

```

if s2>0&& s1==0    %Nadajnik II ma wspólne zera
    disp('Wspólne zera nadajnika II');
    if s2==1
        y(k)=W2(1,1)-1; % Wyznaczona współrzędna celu
        x(k)=W2(1,2)-1; % Wyznaczona współrzędna celu
        disp('Koniec poszukiwania położenia początkowego')
        break           %Przejdźcie do procedury śledzenia
    else
        [m,n,s]=skupienie(W2);
        if s==0
            disp('Brak rozwiązania')
            x(k)=0;      % Umowna współrzędna celu
            y(k)=0;      % Umowna współrzędna celu
            disp('Obliczenia dla następnego kroku k')
            continue
        else
            x(k)=n-1;    % Wyznaczona współrzędna celu
            y(k)=m-1;    % Wyznaczona współrzędna celu
            disp('Koniec poszukiwania położenia początkowego')
            break        % Przejdźcie do procedury śledzenia
        end
    end
end

```

```

end
end
end
end %KONIEC poszukiwania położenia początkowego

```

```

% Wynikiem poszukiwania są w współrzędne x,y położenia początkowego
% i współrzędne macierzy m,n.

```

```

% Wyznaczanie składowych prędkości w punkcie początkowym

```

```

%Składowe vx w punktach siatki dla nadajnika I i nadajnika II
vx1=[vx121(m,n) vx131(m,n) vx141(m,n) vx231(m,n) vx241(m,n) vx341(m,n)];
vx2=[vx122(m,n) vx132(m,n) vx142(m,n) vx232(m,n) vx242(m,n) vx342(m,n)];
%Składowe vy w punktach siatki dla nadajnika I i nadajnika II
vy1=[vy121(m,n) vy131(m,n) vy141(m,n) vy231(m,n) vy241(m,n) vy341(m,n)];
vy2=[vy122(m,n) vy132(m,n) vy142(m,n) vy232(m,n) vy242(m,n) vy342(m,n)];

vxp=mean([vx1 vx2]); %Średnia wartość składowej vx
vyp=mean([vy1 vy2]); %Średnia wartość składowej vy
v(k)=sqrt(vxp^2+vyp^2); %Średnia prędkość
beta=atan(vyp/vxp); %Średnie nachylenie wektora prędkości
vx(k)=vxp; %Wpis do wyników
vy(k)=vyp; %Wpis do wyników

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 5. ŚLEDZENIE CELU

```

```

%Dane:
% m,n - x,y - współrzędne początkowe
% vx, vy - początkowe składowe wektora prędkości

```

```

br=0; %Licznik braku rozwiązań
Ks=K-ks-kp;
p=0;
for p=1:Ks
disp('ŚLEDZENIE CELU')
ks=ks+1; %Liczba kroków śledzenia
k=kp+ks;
disp('Krok bieżący');
disp(k)
%Współrzędne środka siatki
xs=round(10*(x(k-1)+vx(k-1)*T))/10;
ys=round(10*(y(k-1)+vy(k-1)*T))/10;

```

```

%Odchyłki dopplerowskie
f11=f1(k,1);f21=f1(k,2);f31=f1(k,3);f41=f1(k,4);
f12=f2(k,1);f22=f2(k,2);f32=f2(k,3);f42=f2(k,4);

```

```

%Obliczenia dla nowej siatki
geometria_s;
%Program wyznacza macierze różnic prędkości w punktach siatki
N=31;
velocity;

```

```

%Wektory wspólnych miejsc zerowych różnic prędkości
D=zeros(N,N); %Fałszywe rozwiązania nie są usuwane

```

```

%NADAJNIK I
[m11,n11,s11]=solution(Vx11,Vy11,D,N);

```

```
[m21,n21,s21]=solution(Vx21,Vy21,D,N);
[m31,n31,s31]=solution(Vx31,Vy31,D,N);
```

```
%NADAJNIK II
```

```
[m12,n12,s12]=solution(Vx12,Vy12,D,N);
[m22,n22,s22]=solution(Vx22,Vy22,D,N);
[m32,n32,s33]=solution(Vx32,Vy32,D,N);
```

```
%Macierz W1 wspólnych miejsc zerowych dla nadajnika I
```

```
[W1,s1]=zera3(m11,n11,m21,n21,m31,n31);
```

```
%Macierzy W2 wspólnych miejsc zerowych dla nadajnika II
```

```
[W2,s2]=zera3(m12,n12,m22,n22,m32,n32);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%Wspólne miejsca zerowe dla obu nadajników; współrzędne m,n
```

```
if s1>0&& s2>0
```

```
disp('Wspólne zera nadajnika I i II')
```

```
q=3;
```

```
[m,n,ss]=zera(W1,W2);
```

```
if ss==1 %Jedno rozwiązanie
```

```
predykcja
```

```
continue
```

```
elseif ss>1 %Więcej rozwiązań
```

```
[m,n,ss]=decyzja(m,n);
```

```
predykcja
```

```
continue
```

```
elseif ss==0
```

```
br=br+1; %Licznik braku rozwiązań
```

```
[xp,yp,vxp,vyp]=brak(x,y,vx,vy,k,T);
```

```
x(k)=xp;
```

```
y(k)=yp;
```

```
vx(k)=vxp;
```

```
vy(k)=vyp;
```

```
v(k)=sqrt(vxp^2+vyp^2);
```

```
p=p+1;
```

```
if p==1
```

```
continue
```

```
elseif p==2
```

```
p=0;
```

```
break
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
%Wspólne zera tylko dla nadajnika I
```

```
if s1>0&& s2==0
```

```
disp('Wspólne zera tylko dla nadajnika I')
```

```
q=1;
```

```
if s1==1
```

```
n=W1(1,2);
```

```
m=W1(1,1);
```

```
predykcja
```

```
continue
```

```
elseif s1>1
```

```
[m,n,ss]=skupienie(W1);
```

```
if ss==1
```

```
predykcja
```

```
continue
```

```
elseif ss==0
```

```

        br=br+1;    %Licznik braku rozwiązań
        [xp,yp,vxp,vyp]=brak(x,y,vx,vy,k,T);
        x(k)=xp;
        y(k)=yp;
        vx(k)=vxp;
        vy(k)=vyp;
        v(k)=sqrt(vxp^2+vyp^2);
        continue
    end
end
end

```

```

if s2>0&& s1==0
disp('Wspólne zera dla nadajnika II')
q=2;
if s2==1
    n=W2(1,2);
    m=W2(1,1);
    predykcja
    continue
elseif s2>1
    [m,n,ss]=skupienie(W2);
    if ss==1
        predykcja
        continue
    elseif ss==0
        br=br+1;    %Licznik braku rozwiązań
        [xp,yp,vxp,vyp]=brak(x,y,vx,vy,k,T);
        x(k)=xp;
        y(k)=yp;
        vx(k)=vxp;
        vy(k)=vyp;
        v(k)=sqrt(vxp^2+vyp^2);
        continue
    end
end
end
end

```

```

if s1==0&& s2==0
    br=br+1;    %Licznik braku rozwiązań
    [xp,yp,vxp,vyp]=brak(x,y,vx,vy,k,T);
    x(k)=xp;
    y(k)=yp;
    vx(k)=vxp;
    vy(k)=vyp;
    v(k)=sqrt(vxp^2+vyp^2);
    continue
end
disp('Obliczenia dla następnego kroku p')

end                %Koniec pętli sledzenia
continue
end                %Koniec wyznaczania trasy celu
disp('KONIEC')

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Rysunek konfiguracji systemu
plot(X1,Y1,'ko',X2,Y2,'ko',X3,Y3,'ko',X4,Y4,'ko',XN1,YN1,'kd',XN2,YN2,'kd');
axis square

```

```

axis([-20 120 -20 120])
set(gcf,'color','white')
set(gca,'fontsize',12)
xlabel('x [m]')
ylabel('y [m]')
title('Proste między nadajnikami i hydrofonami')
line(0:100,zeros(1,101));
line(100*ones(1,101),0:100);
line(0:100,100*ones(1,101));
line(zeros(1,101),0:100);
hold on
plot(x1,y11)
plot(x1,y14)
plot(x1,y23)
plot(x1,y24)

```

```

disp('WYNIKI')
disp('x [m]')
disp(x)
disp('y [m]')
disp(y)
disp('v [m/s]')
disp(v)
disp('Liczba kroków położenia początkowego')
disp(kp)
disp('Liczba kroków śledzenia')
disp(ks)

```

```

figure
plot(x,y,'*')
axis square
set(gcf,'color','white')
set(gca,'fontsize',14)
title('Tor celu')
xlabel('x [m]')
ylabel('y [m]')
axis([0 100 0 100])
hold on
plot(Xo,Yo,'ro')
plot(x1,y11)
plot(x1,y14)
plot(x1,y23)
plot(x1,y24)

```

```

figure
plot(v,'k')
set(gcf,'color','white')
set(gca,'fontsize',14)
title('Prędkość celu')
xlabel('k')
ylabel('v [m/s]')
hold on
plot(vx,'r')
plot(vy,'b')
axis([0 K -0.5 3])
hold off

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%'geometria'

```



```
% Program wyznacza stałe związane z konstrukcją systemu
% wykonywane jednokrotnie po uruchomieniu systemu
% Są to macierze 2x2 i ich wyznaczniki dla wszystkich kombinacji
```

```
%Rezerwacje dla stałych elementów systemu
```

```
RM=zeros(101,101);
a11=RM;a21=RM;a31=RM;a41=RM;b11=RM;b21=RM;b31=RM;b41=RM;
d121=RM;d131=RM;d141=RM;d231=RM;d241=RM;d341=RM;
```

```
a12=RM;a22=RM;a32=RM;a42=RM;b12=RM;b22=RM;b32=RM;b42=RM;
d122=RM;d132=RM;d142=RM;d232=RM;d242=RM;d342=RM;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
for n=1:N
```

```
    xx=n-1; %Współrzędne x siatki
```

```
for m=1:N
```

```
    yy=m-1; %Współrzędne y siatki
```

```
%Obliczenia wspólne dla obu nadajników
```

```
%Odległości punktów siatki od hydrofonów
```

```
r1=sqrt((xx-X1).^2+(yy-Y1).^2);
```

```
r2=sqrt((xx-X2).^2+(yy-Y2).^2);
```

```
r3=sqrt((xx-X3).^2+(yy-Y3).^2);
```

```
r4=sqrt((xx-X4).^2+(yy-Y4).^2);
```

```
%Parametry równań dla siatki
```

```
a1=(X1-xx)/r1;
```

```
a2=(X2-xx)/r2;
```

```
a3=(X3-xx)/r3;
```

```
a4=(X4-xx)/r4;
```

```
b1=(Y1-yy)/r1;
```

```
b2=(Y2-yy)/r2;
```

```
b3=(Y3-yy)/r3;
```

```
b4=(Y4-yy)/r4;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%NADAJNIK 1
```

```
%Elementy macierzy
```

```
m1=sqrt((xx-XN1).^2+(yy-YN1).^2);
```

```
an1=(XN1-xx)/m1;
```

```
bn1=(YN1-yy)/m1;
```

```
a11(m,n)=a1+an1;
```

```
a21(m,n)=a2+an1;
```

```
a31(m,n)=a3+an1;
```

```
a41(m,n)=a4+an1;
```

```
b11(m,n)=b1+bn1;
```

```
b21(m,n)=b2+bn1;
```

```
b31(m,n)=b3+bn1;
```

```
b41(m,n)=b4+bn1;
```

```
%Macierze dla nadajnika 1
```

```
W121=[a11(m,n) b11(m,n);a21(m,n) b21(m,n)];
```

```
W131=[a11(m,n) b11(m,n);a31(m,n) b31(m,n)];
```

```
W141=[a11(m,n) b11(m,n);a41(m,n) b41(m,n)];
```

```
W231=[a21(m,n) b21(m,n);a31(m,n) b31(m,n)];
```

```
W241=[a21(m,n) b21(m,n);a41(m,n) b41(m,n)];
```

```
W341=[a31(m,n) b31(m,n);a41(m,n) b41(m,n)];
```

```
%Wyznaczniki dla nadajnika 1
```

```
d121(m,n)=det(W121);  
d131(m,n)=det(W131);  
d141(m,n)=det(W141);  
d231(m,n)=det(W231);  
d241(m,n)=det(W241);  
d341(m,n)=det(W341);
```

```
%NADAJNIK 2
```

```
%Elementy macierzy
```

```
rn2=sqrt((xx-XN2).^2+(yy-YN2).^2);  
an2=(XN2-xx)/rn2;  
bn2=(YN2-yy)/rn2;
```

```
a12(m,n)=a1+an2;  
a22(m,n)=a2+an2;  
a32(m,n)=a3+an2;  
a42(m,n)=a4+an2;  
b12(m,n)=b1+bn2;  
b22(m,n)=b2+bn2;  
b32(m,n)=b3+bn2;  
b42(m,n)=b4+bn2;
```

```
%Macierze dla nadajnika 2
```

```
W122=[a12(m,n) b12(m,n);a22(m,n) b22(m,n)];  
W132=[a12(m,n) b12(m,n);a32(m,n) b32(m,n)];  
W142=[a12(m,n) b12(m,n);a42(m,n) b42(m,n)];  
W232=[a22(m,n) b22(m,n);a32(m,n) b32(m,n)];  
W242=[a22(m,n) b22(m,n);a42(m,n) b42(m,n)];  
W342=[a32(m,n) b32(m,n);a42(m,n) b42(m,n)];
```

```
%Wyznaczniki dla nadajnika 2
```

```
d122(m,n)=det(W122);  
d132(m,n)=det(W132);  
d142(m,n)=det(W142);  
d232(m,n)=det(W232);  
d242(m,n)=det(W242);  
d342(m,n)=det(W342);
```

```
end
```

```
end
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
function [f1,f2]=deflections(XN,YN,X,Y,xo,yo,vx,vy)
```

```
%Program wyznacza znormalizowane odchyłki dopplerowskie z dokładnością MATLABA
```

```
%Rzeczywiste odchyłki to F11*h1, F12*h2,....
```

```
XN1=XN(1);XN2=XN(2);YN1=YN(1);YN2=YN(2);  
X1=X(1);X2=X(2);X3=X(3);X4=X(4);  
Y1=Y(1);Y2=Y(2);Y3=Y(3);Y4=Y(4);
```

```
RN1=sqrt((xo-XN1).^2+(yo-YN1).^2); %Nadajnik 1  
RN2=sqrt((xo-XN2).^2+(yo-YN2).^2); %Nadajnik 2
```

```
R1=sqrt((xo-X1).^2+(yo-Y1).^2);  
R2=sqrt((xo-X2).^2+(yo-Y2).^2);  
R3=sqrt((xo-X3).^2+(yo-Y3).^2);  
R4=sqrt((xo-X4).^2+(yo-Y4).^2);
```

% Odchyłki dopplerowskie [Hz] wyznaczone analitycznie

FN1=(vx*(XN1-xo)+vy*(YN1-yo))/RN1;

FN2=(vx*(XN2-xo)+vy*(YN2-yo))/RN2;

%Odchyłki dopplerowskie od nadajnika 1

F11=(vx*(X1-xo)+vy*(Y1-yo))/R1+FN1;

F21=(vx*(X2-xo)+vy*(Y2-yo))/R2+FN1;

F31=(vx*(X3-xo)+vy*(Y3-yo))/R3+FN1;

F41=(vx*(X4-xo)+vy*(Y4-yo))/R4+FN1;

%Odchyłki dopplerowskie od nadajnika 2

F12=(vx*(X1-xo)+vy*(Y1-yo))/R1+FN2;

F22=(vx*(X2-xo)+vy*(Y2-yo))/R2+FN2;

F32=(vx*(X3-xo)+vy*(Y3-yo))/R3+FN2;

F42=(vx*(X4-xo)+vy*(Y4-yo))/R4+FN2;

%Znormalizowane odchyłki dopplerowskie

%od nadajnika I

f1=[F11 F21 F31 F41];

%od nadajnika II

f2=[F12 F22 F32 F42];

%%%

%'velocity'

% Program wyznacza składowe prędkości vx i vy w punktach siatki

% i różnice prędkości z poszczególnych równań

%Rezerwacje dla obliczeń bieżących

O=zeros(N,N);

vx121=O;vx131=O;vx141=O;vx231=O;vx241=O;vx341=O;

vy121=O;vy131=O;vy141=O;vy231=O;vy241=O;vy341=O;

vx122=O;vx132=O;vx142=O;vx232=O;vx242=O;vx342=O;

vy122=O;vy132=O;vy142=O;vy232=O;vy242=O;vy342=O;

%%%

%NADAJNIK 1

for m=1:N

for n=1:N

%Macierze odwrotne dla nadajnika 1

O121=[b21(m,n) -b11(m,n);-a21(m,n) a11(m,n)]/d121(m,n);

O131=[b31(m,n) -b11(m,n);-a31(m,n) a11(m,n)]/d131(m,n);

O141=[b41(m,n) -b11(m,n);-a41(m,n) a11(m,n)]/d141(m,n);

O231=[b31(m,n) -b21(m,n);-a31(m,n) a21(m,n)]/d231(m,n);

O241=[b41(m,n) -b21(m,n);-a41(m,n) a21(m,n)]/d241(m,n);

O341=[b41(m,n) -b31(m,n);-a41(m,n) a31(m,n)]/d341(m,n);

%Wyznaczanie składowych prędkości vx i vy

%Rozwiązanie równań dla nadajnika 1

v121=O121*[f11;f21];

v131=O131*[f11;f31];

v141=O141*[f11;f41];

v231=O231*[f21;f31];

v241=O241*[f21;f41];

v341=O341*[f31;f41];

%Składowe vx w punktach siatki dla nadajnika 1

vx121(m,n)=v121(1);

```

vx131(m,n)=v131(1);
vx141(m,n)=v141(1);
vx231(m,n)=v231(1);
vx241(m,n)=v241(1);
vx341(m,n)=v341(1);

```

%Składowe vy w punktach siatki dla nadajnika 1

```

vy121(m,n)=v121(2);
vy131(m,n)=v131(2);
vy141(m,n)=v141(2);
vy231(m,n)=v231(2);
vy241(m,n)=v241(2);
vy341(m,n)=v341(2);

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%NADAJNIK 2

```

%Macierze odwrotne dla nadajnika 2

```

O122=[b22(m,n) -b12(m,n);-a22(m,n) a12(m,n)]/d122(m,n);
O132=[b32(m,n) -b12(m,n);-a32(m,n) a12(m,n)]/d132(m,n);
O142=[b42(m,n) -b12(m,n);-a42(m,n) a12(m,n)]/d142(m,n);
O232=[b32(m,n) -b22(m,n);-a32(m,n) a22(m,n)]/d232(m,n);
O242=[b42(m,n) -b22(m,n);-a42(m,n) a22(m,n)]/d242(m,n);
O342=[b42(m,n) -b32(m,n);-a42(m,n) a32(m,n)]/d342(m,n);

```

%Rozwiązywanie równań dla nadajnika 2

```

v122=O122*[f12;f22];
v132=O132*[f12;f32];
v142=O142*[f12;f42];
v232=O232*[f22;f32];
v242=O242*[f22;f42];
v342=O342*[f32;f42];

```

%Składowe vx w punktach siatki dla nadajnika 2

```

vx122(m,n)=v122(1);
vx132(m,n)=v132(1);
vx142(m,n)=v142(1);
vx232(m,n)=v232(1);
vx242(m,n)=v242(1);
vx342(m,n)=v342(1);

```

%Składowe vy w punktach siatki dla nadajnika 2

```

vy122(m,n)=v122(2);
vy132(m,n)=v132(2);
vy142(m,n)=v142(2);
vy232(m,n)=v232(2);
vy242(m,n)=v242(2);
vy342(m,n)=v342(2);

```

```

end
end

```

%Różnice składowych prędkości dla nadajnika I w punktach siatki (macierze) dla nadajnika 1

```

Vx11=(vx121-vx341);
Vx21=(vx131-vx241);
Vx31=(vx141-vx231);

```

```

Vy11=(vy121-vy341);
Vy21=(vy131-vy241);
Vy31=(vy141-vy231);

```

```
%Różnice składowych prędkości dla nadajnika 2
```

```
Vx12=(vx122-vx342);
```

```
Vx22=(vx132-vx242);
```

```
Vx32=(vx142-vx232);
```

```
Vy12=(vy122-vy342);
```

```
Vy22=(vy132-vy242);
```

```
Vy32=(vy142-vy232);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
function [A,B]=solution_k(dVx,dVy,xo,yo,D)
```

```
% Funkcja wyznacza współrzędne przejść przez zero różnic prędkości dVx,dVy
```

```
% Funkcja jest używana jednorazowo przy kalibracji systemu
```

```
% Współrzędne dla dVx znajdują się w macierzy A, a dVy w macierzy B
```

```
% n - współrzędna x
```

```
% m - współrzędna y
```

```
%Rezerwacje
```

```
A1=zeros(101,101); B1=A1; A2=A1; B2=A1;
```

```
%Miejsca zerowe liczone w wierszach
```

```
for m=1:101
```

```
    a=(dVx(m,:))>=0;
```

```
    b=(dVy(m,:))>=0;
```

```
    da=abs(diff(a));
```

```
    db=abs(diff(b));
```

```
    [z,nx]=find(da);
```

```
    [h,ny]=find(db);
```

```
    A1(m,nx)=1;
```

```
    B1(m,ny)=1;
```

```
end
```

```
%Miejsca zerowe liczone w kolumnach
```

```
for n=1:101
```

```
    a=(dVx(:,n))>=0;
```

```
    b=(dVy(:,n))>=0;
```

```
    da=abs(diff(a));
```

```
    db=abs(diff(b));
```

```
    [mx,z]=find(da);
```

```
    [my,nz]=find(db);
```

```
    A2(mx,n)=1;
```

```
    B2(my,n)=1;
```

```
end
```

```
%Suma miejsc zerowych liczonych względem wierszy i kolumn
```

```
A=(A1+A2)>=1;
```

```
B=(B1+B2)>=1;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
function [Xo,Yo,Vx,Vy,K]=track(typ,varargin)
```

```
% Funkcja wyznacza współrzędne i składowe prędkości torów celu
```

```

if strcmp(typ,'pr')||strcmp(typ,'jp')
xp=varargin{1}; %Położenie początkowe
yp=varargin{2}; %Położenie początkowe
vp=varargin{3}; %Prędkość początkowa
vk=varargin{4}; %Prędkość końcowa
b=varargin{5}; %Nachylenie
to=varargin{6}; %Czas obserwacji

K=to; %Liczba kroków dla ruchu jednostajnego i jednostajnie przyspieszonego
disp('Liczba kroków K')
disp(K);

Xo=zeros(1,K); Yo=zeros(1,K); Vx=zeros(1,K); Vy=zeros(1,K);
end

%TRASA CELU
T=1; %Okres pomiarów
if strcmp(typ,'pr')

%RUCH JEDNOSTAJNY PO LINII PROSTEJ

%Składowe wektora prędkości
vx=vp*cos(b*pi/180);
vy=vp*sin(b*pi/180);

%Kolejne położenia
for k=1:K
Xo(k)=xp+vx*(k-1)*T; %Wektor współrzędnej x celu
Yo(k)=yp+vy*(k-1)*T; %Wektor współrzędnej y celu
end
Vx(1:K)=vx;
Vy(1:K)=vy;

%%%%%%%%%%%%%%
elseif strcmp(typ,'jp')
disp('Liczba kroków K')

%RUCH JEDNOSTAJNIE PRZYSPIESZONY PO LINII PROSTEJ

%Parametry początkowe ruchu obiektu
ao=(vk-vp)/(K*T); %Przyspieszenie [m/s2]

%Kolejne prędkości i położenia celu
for k=1:K
v=vp+ao*(k-1)*T;
Vx(k)=v*cos(b*pi/180); %Składowa wektora prędkości
Vy(k)=v*sin(b*pi/180); %Składowa wektora prędkości
s=vp*(k-1)*T+0.5*ao*((k-1)*T)^2;
Xo(k)=xp+s*cos(b*pi/180); %Wektor współrzędnej x celu
Yo(k)=yp+s*sin(b*pi/180); %Wektor współrzędnej y celu
end
else
%%%%%%%%%%%%%%
%RUCH JEDNOSTAJNY PO TORZE SINUSOIDALNYM ZE STAŁĄ PRĘDKOŚCIĄ LINIOWĄ

%Parametry ruchu obiektu
T=50; %Czas pomiaru
t=0.1; %Okres pomiarów
v=2; %Prędkość liniowa

```

```

ds=v*t;      %Przyrost drogi
ys=T*v;      %Okres sinusoidy
K=T/t;       %Liczba punktów sinusoidy
xp=70;       %Współrzędna początkowa
yp=2;        %Współrzędna początkowa
xo=10;       %Odchylenie od toru prostoliniowego
disp('Liczba kroków K')
%Rezerwacje
X=zeros(1,K); Y=zeros(1,K); vx=zeros(1,K); vy=zeros(1,K); Y(1)=0; X(1)=0;

%Tor obiektu
for k=1:K
    z(k)=2*pi*xo*cos(2*pi*Y(k)/ys)/ys;
    X(k+1)=ds*z(k)/sqrt(1+z(k)^2)+X(k);
    Y(k+1)=ds/sqrt(1+z(k)^2)+Y(k);
    vx(k)=v*z(k)/sqrt(1+z(k)^2);
    vy(k)=v/sqrt(1+z(k)^2);
end
%Pomiar
P=K/10;
p=1:P;
Xo=X((p-1)*10+1)+xp;
Yo=Y((p-1)*10+1)+yp;
Vx=vx((p-1)*10+1);
Vy=vy((p-1)*10+1);
K=P;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [m,n,s]=solution(dVx,dVy,D,N)

%Funkcja wyznacza współrzędne przejść przez zero różnic prędkości dVx,dVy
%Następnie funkcja wyznacza wspólne miejsca zerowe różnic prędkości

%Wyznaczanie minimum różnic prędkości dla dV1(m,n)

%Rezerwacje
A1=zeros(N,N); B1=A1; A2=A1; B2=A1;

%Miejsca zerowe liczone w wierszach
for m=1:N
    a=(dVx(m,:))>=0;
    b=(dVy(m,:))>=0;
    da=abs(diff(a));
    db=abs(diff(b));

    [z,nx]=find(da);
    [h,ny]=find(db);

    A1(m,nx)=1;
    B1(m,ny)=1;
end

%Miejsca zerowe liczone w kolumnach
for n=1:N
    a=(dVx(:,n))>=0;
    b=(dVy(:,n))>=0;
    da=abs(diff(a));
    db=abs(diff(b));

    [mx,z]=find(da);

```

```

[my,nz]=find(db);

A2(mx,n)=1;
B2(my,n)=1;
end

%Suma miejsc zerowych liczonych względem wierszy i kolumn
A=(A1+A2)>=1;
B=(B1+B2)>=1;

%Eliminacja rozwiązań leżących na prostych łączących nadajnik z hydrofonami
A=A-D;
B=B-D;
%Współrzędne wspólnych rozwiązań
AB=(B*A);
[m,n]=find(AB);
s=size(m,1);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function[W,s]=zera3(m1,n1,m2,n2,m3,n3)

%Funkcja znajduje wspólne miejsca zerowe trzech macierzy (m,n).
%Zwraca współrzędne tych wspólnych miejsc zerowych w macierzy W
%Zwraca także liczbę wspólnych rozwiązań oznaczoną jako s

%Forma macierzowa
MN1=[m1 n1]; MN2=[m2 n2]; MN3=[m3 n3];

%Długość wektorów
s1=length(m1); s2=length(m2); s3=length(m3);
W=[];

%Wspólne zera trzech macierzy
%Wspólne zera MN1, MN2 i MN3
W12=[];
if s1~=0&& s2~=0
    for k=1:s1
        for l=1:s2
            if MN1(k,:)==MN2(l,:)
                W12=[W12;MN1(k,:)];
            end
        end
    end
end
s12=size(W12,1);

if s12~=0&& s3~=0
    for k=1:s12
        for l=1:s3
            if W12(k,:)==MN3(l,:)
                W=[W;W12(k,:)]; %Wynik
            end
        end
    end
end
s=size(W,1);

%Brak wspólnych zer trzech macierzy
if s==0
    %Wspólne zera MN1 i MN2

```



```

W12=[];
if s1~=0&& s2~=0
    for k=1:s1
        for l=1:s2
            if MN1(k,)==MN2(l,);
                W12=[W12;MN1(k,)];
            end
        end
    end
end
s12=size(W12,1);
if s12>0
    s=s12;
    W=W12;
end

```

%Wspólne zera MN1 i MN3

```

W13=[];
if s1~=0&& s3~=0
    for k=1:s1
        for l=1:s3
            if MN1(k,)==MN3(l,);
                W13=[W13;MN1(k,)];
            end
        end
    end
end

```

```

s13=size(W13,1);
if s13>0
    s=s13;
    W=W13;
end

```

%Wspólne zera MN2 i MN3

```

W23=[];
if s2~=0&& s3~=0
    for k=1:s2
        for l=1:s3
            if MN2(k,)==MN3(l,);
                W23=[W23;MN2(k,)];
            end
        end
    end
end

```

```

s23=size(W23,1);
if s23>0
    s=s23;
    W=W23;
end
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [m,n,s]=zera(W1,W2)

```

*%Funkcja znajduje wspólne miejsca zerowe dla dwóch nadajników.
 %Zwraca współrzędne jednego wspólnego miejsca zerowego obu macierzy
 W=[];*

%Długość wektorów

```
s1=size(W1,1); s2=size(W2,1);
```

```
%Wspólne zera W1 i W2
```

```
for k=1:s1
    for l=1:s2
        if W1(k,:)==W2(l,:);
            W=[W;W1(k,:)]; %Macierz wspólnych rozwiązań
        end
    end
end
disp(W);
s=size(W,1); %Liczba wspólnych rozwiązań
```

```
%PRZYPADKI
```

```
%1. Jedno wspólne miejsce zerowe
```

```
if s==1
    m=W(:,1); %Wynik
    n=W(:,2); %Wynik
```

```
elseif s>1
```

```
%2. Liczba rozwiązań większa od 1
[m,n,s]=skupienie(W); %Wynik
```

```
%3. Brak wspólnych rozwiązań.
```

```
%Poszukiwanie rozwiązań odległych o jeden węzeł siatki
```

```
elseif s==0
    Wb=[];
    for k=1:s1
        for l=1:s2
            a=abs(W1(k,1)-W2(l,1));
            b=abs(W1(k,2)-W2(l,2));
            if a<=2&& b<=2
                Wb=[Wb;W1(k,:)]; %Macierz "bliskich" rozwiązań
            end
        end
    end
    disp('Macierz bliskich rozwiązań')
```

```
s=size(Wb,1);
if s==0
    m=0; %Wynik
    n=0; %Wynik
end
if s==1
    m=Wb(:,1); %Wynik
    n=Wb(:,2); %Wynik
elseif s>1
    [m,n,s]=skupienie(Wb);
else
    m=0;
    n=0;
end
end
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
function [ms,ns,ss]=decyzja(m,n)
```

```
disp('decyzja')
```

```

% Program wyznacza położenie celu w węzle siatki dla większej liczby rozwiązań
sm=std(m);
sn=std(n);
if sm<=5&&sn<=5
    ms=round(mean(m));
    ns=round(mean(n));
    ss=1;
else
    ss=0;
    ms=[];
    ns=[];
end

```

%%%

```
function[m,n,ss]=skupienie(W)
```

%Funkcja wyznacza współrzędne położenia celu jako wartości średnie ze zbioru W

```

disp('Skupienie')
a=W(:,1);
b=W(:,2);
as=std(a);
bs=std(b);
if as<4&&bs<4
    am=mean(a);
    bm=mean(b);
    m=round(am);
    n=round(bm);
    ss=1;
else
    m=0;
    n=0;
    ss=0;
end

```

%%%

%'geometria_s'

% Program wyznacza stałe związane z obszarem śledzenia celu.
 % Obszar ma wymiary 6x6 m, a bok siatki = 0.2 m i przesuwa się wraz z ruchem celu.
 % Są to macierze a i b i ich wyznaczniki dla wszystkich kombinacji.

%Rezerwacje dla stałych elementów systemu

```

RM=zeros(31,31);
a11=RM;a21=RM;a31=RM;a41=RM;b11=RM;b21=RM;b31=RM;b41=RM;
d121=RM;d131=RM;d141=RM;d231=RM;d241=RM;d341=RM;

```

```

a12=RM;a22=RM;a32=RM;a42=RM;b12=RM;b22=RM;b32=RM;b42=RM;
d122=RM;d132=RM;d142=RM;d232=RM;d242=RM;d342=RM;

```

%Domniemane przybliżone położenie celu - środek siatki śledzenia

```

for n=1:31
    xg=xs-3+(n-1)*0.2; %Współrzędne x siatki
for m=1:31
    yg=ys-3+(m-1)*0.2; %Współrzędne y siatki

```

%Obliczenia wspólne dla obu nadajników

%Odległości punktów siatki od hydrofonów

```
r1=sqrt((xg-X1).^2+(yg-Y1).^2);
```

```
r2=sqrt((xg-X2).^2+(yg-Y2).^2);
r3=sqrt((xg-X3).^2+(yg-Y3).^2);
r4=sqrt((xg-X4).^2+(yg-Y4).^2);
```

```
%Parametry równań dla siatki
```

```
a1=(X1-xg)/r1;
a2=(X2-xg)/r2;
a3=(X3-xg)/r3;
a4=(X4-xg)/r4;
```

```
b1=(Y1-yg)/r1;
b2=(Y2-yg)/r2;
b3=(Y3-yg)/r3;
b4=(Y4-yg)/r4;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%NADAJNIK 1
```

```
%Elementy macierzy
```

```
rn1=sqrt((xg-XN1).^2+(yg-YN1).^2);
an1=(XN1-xg)/rn1;
bn1=(YN1-yg)/rn1;
```

```
a11(m,n)=a1+an1;
a21(m,n)=a2+an1;
a31(m,n)=a3+an1;
a41(m,n)=a4+an1;
b11(m,n)=b1+bn1;
b21(m,n)=b2+bn1;
b31(m,n)=b3+bn1;
b41(m,n)=b4+bn1;
```

```
%Macierze dla nadajnika 1
```

```
W121=[a11(m,n) b11(m,n);a21(m,n) b21(m,n)];
W131=[a11(m,n) b11(m,n);a31(m,n) b31(m,n)];
W141=[a11(m,n) b11(m,n);a41(m,n) b41(m,n)];
W231=[a21(m,n) b21(m,n);a31(m,n) b31(m,n)];
W241=[a21(m,n) b21(m,n);a41(m,n) b41(m,n)];
W341=[a31(m,n) b31(m,n);a41(m,n) b41(m,n)];
```

```
%Wyznaczniki dla nadajnika 1
```

```
d121(m,n)=det(W121);
d131(m,n)=det(W131);
d141(m,n)=det(W141);
d231(m,n)=det(W231);
d241(m,n)=det(W241);
d341(m,n)=det(W341);
```

```
%NADAJNIK 2
```

```
%Elementy macierzy
```

```
rn2=sqrt((xg-XN2).^2+(yg-YN2).^2);
an2=(XN2-xg)/rn2;
bn2=(YN2-yg)/rn2;
```

```
a12(m,n)=a1+an2;
a22(m,n)=a2+an2;
a32(m,n)=a3+an2;
a42(m,n)=a4+an2;
b12(m,n)=b1+bn2;
```

```
b22(m,n)=b2+bn2;
b32(m,n)=b3+bn2;
b42(m,n)=b4+bn2;
```

%Macierze dla nadajnika 2

```
W122=[a12(m,n) b12(m,n);a22(m,n) b22(m,n)];
W132=[a12(m,n) b12(m,n);a32(m,n) b32(m,n)];
W142=[a12(m,n) b12(m,n);a42(m,n) b42(m,n)];
W232=[a22(m,n) b22(m,n);a32(m,n) b32(m,n)];
W242=[a22(m,n) b22(m,n);a42(m,n) b42(m,n)];
W342=[a32(m,n) b32(m,n);a42(m,n) b42(m,n)];
```

%Wyznaczniki dla nadajnika 2

```
d122(m,n)=det(W122);
d132(m,n)=det(W132);
d142(m,n)=det(W142);
d232(m,n)=det(W232);
d242(m,n)=det(W242);
d342(m,n)=det(W342);
```

```
end
end
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [m,n,s]=solution_s(dVx,dVy)
```

%Funkcja wyznacza współrzędne przejść przez zero różnic prędkości dVx,dVy metodą opisaną w opracowaniu
%Następnie funkcja wyznacza wspólne miejsca zerowe różnic prędkości

%Wyznaczanie minimum różnic prędkości dla dV1(m,n)

%Rezerwacje

```
A1=zeros(31,31); B1=A1; A2=A1; B2=A1;
```

%Miejsca zerowe liczone w wierszach

```
for m=1:31
    a=(dVx(m,:))>=0;
    b=(dVy(m,:))>=0;
    da=abs(diff(a));
    db=abs(diff(b));
```

```
[z,nx]=find(da);
[h,ny]=find(db);
```

```
A1(m,nx)=1;
B1(m,ny)=1;
```

```
end
```

%Miejsca zerowe liczone w kolumnach

```
for n=1:31
    a=(dVx(:,n))>=0;
    b=(dVy(:,n))>=0;
    da=abs(diff(a));
    db=abs(diff(b));
```

```
[mx,z]=find(da);
[my,nz]=find(db);
```

```
A2(mx,n)=1;
```

```

B2(my,n)=1;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Suma miejsc zerowych liczonych względem wierszy i kolumn
A=(A1+A2)>=1;
B=(B1+B2)>=1;

%Eliminacja rozwiązań leżących na prostych łączących nadajnik z hydrofonami
%Współrzędne wspólnych rozwiązań
AB=B.*A;
[m,n]=find(AB);
s=size(m,1);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
disp('Predykcja')

%Program wyznacza bieżące położenie celu x(k), y(k) oraz składowe
%wektora jego prędkości vx(k),vy(k)i moduł prędkości v(k)

%Składowe vx,i vy w punktach siatki dla nadajnika I
if q==1||q==3
vx1=[vx121(m,n) vx131(m,n) vx141(m,n) vx231(m,n) vx241(m,n) vx341(m,n)];
vy1=[vy121(m,n) vy131(m,n) vy141(m,n) vy231(m,n) vy241(m,n) vy341(m,n)];
end
%Składowe vx,i vy w punktach siatki dla nadajnika II
if q==2||q==3
vx2=[vx122(m,n) vx132(m,n) vx142(m,n) vx232(m,n) vx242(m,n) vx342(m,n)];
vy2=[vy122(m,n) vy132(m,n) vy142(m,n) vy232(m,n) vy242(m,n) vy342(m,n)];
end
%Składowe wektora prędkości
if q==1
vxp=mean(vx1);
vyp=mean(vy1);
end
if q==2
vxp=mean(vx2);
vyp=mean(vy2);
end
if q==3
vxp=mean([vx1 vx2]);
vyp=mean([vy1 vy2]);
end

vp=sqrt(vxp^2+vyp^2);

%Położenie bieżące i prędkość celu
if abs(vp-v(k-1))> 2
v(k)=v(k-1);
vx(k)=vx(k-1);
vy(k)=vy(k-1);
x(k)=xs;
y(k)=ys;
else
x(k)=xs-3+(n-1)*0.2;
y(k)=ys-3+(m-1)*0.2;
vx(k)=vxp;
vy(k)=vyp;
v(k)=sqrt(vxp^2+vyp^2);

```

end

```
function [xp,yp,vxp,vyp]=brak(x,y,vx,vy,k,T)
```

```
% Funkcja dokonuje predykcji położenia i prędkości przy braku rozwiązania
```

```
disp('Brak rozwiązania')
```

```
vxp=vx(k-1);  
vyp=vy(k-1);  
xpp=x(k-1);  
ypp=y(k-1);  
xp=xpp+vxp*T;  
yp=ypp+vyp*T;
```