



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ ELEKTRONIKI,
TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI



Imię i nazwisko autora rozprawy: Wojciech Siwicki
Dyscyplina naukowa: Telekomunikacja

ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim: Badanie i analiza efektywności pracy naziemnego, samoorganizującego się systemu radiolokalizacyjnego.

Tytuł rozprawy w języku angielskim: Study and Analysis of a Ground-based, Selforganising Radiolocation System.

Promotor
<i>podpis</i>
Prof. dr hab. inż. Ryszard J. Katulski, prof. zw. PG

Gdańsk, 2016

Składam serdeczne podziękowania mojemu promotorowi:

Panu prof. dr hab. inż. Ryszardowi Katulskiemu

Za poświęcony czas i pomoc,
oraz olbrzymie pokłady cierpliwości.

Dziękuję również

pracownikom katedry

za niezapomnianą atmosferę pracy
oraz pomoc przy realizacji rozprawy doktorskiej.

Spis treści

SPIS TREŚCI	3
SPIS RYSUNKÓW I TABEL	5
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SYMBOLI I SKRÓTÓW	8
ROZDZIAŁ 1: WPROWADZENIE.....	10
1.1. GENEZA OPRACOWANIA NOWEGO ROZWIĄZANIA SYSTEMU HIPERBOLICZNEGO.....	10
1.2. CEL I TEZA ROZPRAWY	12
1.3. GŁÓWNE CZĘŚCI ROZPRAWY	12
ROZDZIAŁ 2: PODSTAWY DZIAŁANIA HIPERBOLICZNEGO SYSTEMU SYNCHRONICZNEGO.....	14
2.1. OPIS METODY TDOA	14
2.2. WYBRANE ALGORYTMY WYZNACZANIA POZYCJI W SYSTEMIE HIPERBOLICZNYM	18
2.2.1. ALGORYTM CHANA	19
2.2.2. ALGORYTM FOYA.....	20
2.2.3. ALGORYTM FANGA	21
2.2.4. ZNACZENIE UŻYTKOWE OPISANYCH ALGORYTMÓW	23
ROZDZIAŁ 3: KONCEPCJA BUDOWY I DZIAŁANIA HIPERBOLICZNEGO SYSTEMU ASYNCHRONICZNEGO	24
3.1. WYZNACZANIE POZYCJI W SAMOORGANIZUJĄCYM SIĘ SYSTEMIE ASYNCHRONICZNYM	24
3.2. ROZWIĄZANIA PROTOKOLARNO-SYSTEMOWE.....	28
3.3. OPIS LOGICZNY ŁĄCZA RADIOLOKALIZACYJNEGO.....	30
3.3.1. Część nadawcza	31
3.3.2. Część odbiorcza	36
ROZDZIAŁ 4: BADANIA SYMULACYJNE SYSTEMU ASYNCHRONICZNEGO.....	38
4.1. SYMULATOR SYSTEMU DO BADAŃ.....	38
4.1.1. Środowisko programowe i opis interfejsu użytkownika	39
4.1.2. Algorytmiczny opis działania symulatora	40
4.2. ANALIZA OTRZYMANYCH WYNIKÓW BADAŃ SYMULACYJNYCH.....	44
4.2.1. Założona architektura systemu do badań.....	45

4.2.2. Przyjęty plan badań.....	46
4.2.3. Wyniki badań rozkładu błędu bezwzględnego na zadanym obszarze	47
4.2.4. Wyniki badań dystrybuanty błędu bezwzględnego dla zadanych tras	53
4.2.5. Histogramy błędu bezwzględnego wyników badań symulacyjnych	54
4.2.6. Podsumowanie wyników badań symulacyjnych	56
ROZDZIAŁ 5: DEMONSTRATOR TECHNOLOGICZNY DO BADAŃ POMIAROWYCH	58
5.1. WARSTWA SPRZĘTOWA DEMONSTRATORA	58
5.1.1. Stacja referencyjna.....	58
5.1.2. Lokalizator.....	61
5.1.3. Rubidowy wzorzec częstotliwości	62
5.2. WARSTWA PROGRAMOWA DEMONSTRATORA	63
5.2.1. Lokalizator.....	63
5.2.2. Stacja referencyjna.....	72
ROZDZIAŁ 6: BADANIA POMIAROWE SYSTEMU ASYNCHRONICZNEGO	74
6.1. PARAMETRY WARSTWY FIZYCZNEJ DEMONSTRATORA	74
6.2. WYNIKI BADAŃ NA OBSZARZE ZATOKI GDAŃSKIEJ.....	76
6.3. WYNIKI BADAŃ NA OTWARTYM AKWENIE MORSKIM, W STREFIE PRZYBRZEŻNEJ	79
6.4. ANALIZA PORÓWNAWCZA EFEKTYWNOŚCI PRACY ASYNCHRONICZNEGO SYSTEMU HIPERBOLICZNEGO	82
ROZDZIAŁ 7: PODSUMOWANIE – GŁÓWNE OSIĄGNIĘCIA ROZPRAWY	85
LITERATURA	87
ZAŁĄCZNIKI.....	94
ZAŁĄCZNIK A: STRUKTURA DEPEZ LOKALIZACYJNYCH	94
ZAŁĄCZNIK B: OPROGRAMOWANIE LOKALIZATORA.....	95
ZAŁĄCZNIK C: OPROGRAMOWANIE STACJI REFERENCYJNEJ	101
ZAŁĄCZNIK D: OPROGRAMOWANIE DO WIZUALIZACJI WYNIKÓW	102

Spis rysunków i tabel

RYSUNKI:

Rys. 2.1. Sposób wyznaczania hiperbolicznej linii pozycyjnej	15
Rys. 2.2. Sposób wyznaczania położenia terminala TU w synchronicznym systemie hiperbolicznym.....	16
Rys. 2.3. Ilustracja zależności czasowych charakterystyczna dla synchronicznego systemu radiolokalizacyjnego	17
Rys. 3.1. Przykładowa sieć równorzędnych stacji referencyjnych S_1, S_2, S_3 wraz z terminalem użytkownika TU	25
Rys. 3.2. Przykładowy stan czasowy wysyłanych i odbieranych sygnałów oraz mierzone różnice czasowe.....	27
Rys. 3.3. Prawdopodobieństwo wyłączenia nadajnika bliskiej stacji referencyjnej w zależności od czasu akwizycji danych.....	30
Rys. 3.4. Schemat logiczny toru nadawczego stacji referencyjnej	31
Rys. 3.5. Schemat logiczny operacji szyfrowania danych.....	32
Rys. 3.6. Schemat funkcjonalny tworzenia kodu MAC	33
Rys. 3.7. Schemat zastosowanego kodera splotowego (2,1,9) o sprawności $\frac{1}{2}$	34
Rys. 3.8. Struktura logiczna pełnej ramki danych lokalizacyjnych	35
Rys. 3.9. Schemat blokowy generatora ciągów rozpraszających.....	35
Rys. 3.10. Schemat logiczny toru odbiorczego stacji referencyjnej	36
Rys. 3.11. Schemat logiczny operacji deszyfrowania danych	37
Rys. 4.1. Interfejs graficzny symulatora obliczeniowego – okno główne.....	40
Rys. 4.2. Algorytm działania symulatora obliczeniowego	42
Rys. 4.3. Algorytm wyznaczania współrzędnych terminala użytkownika.....	43
Rys. 4.4. Zobrazowanie położenia zestawu trzech stacji referencyjnych.....	45
Rys. 4.5. Zobrazowanie położenia zestawu czterech stacji referencyjnych	46
Rys. 4.6. Rozkład obszarowy błędu bezwzględnego $\delta_d [m]$ dla konfiguracji podstawowej, dla szerokości pasma pracy 1 MHz	48
Rys. 4.7. Rozkład obszarowy błędu bezwzględnego $\delta_d [m]$ dla konfiguracji podstawowej, dla szerokości pasma pracy 2 MHz	48
Rys. 4.8. Rozkład obszarowy błędu bezwzględnego $\delta_d [m]$ dla konfiguracji podstawowej, dla szerokości pasma pracy 4 MHz	49
Rys. 4.9. Rozkład obszarowy błędu bezwzględnego $\delta_d [m]$ dla konfiguracji podstawowej, dla szerokości pasma pracy 8 MHz	49
Rys. 4.10. Rozkład obszarowy błędu bezwzględnego $\delta_d [m]$ dla konfiguracji podstawowej, dla szerokości pasma pracy 10 MHz	50

Rys. 4.11. Rozkład obszarowy błędu bezwzględnego $\delta_d[m]$ dla konfiguracji powiększonej, dla szerokości pasma pracy 1 MHz.....	50
Rys. 4.12. Rozkład obszarowy błędu bezwzględnego $\delta_d[m]$ dla konfiguracji powiększonej, dla szerokości pasma pracy 2 MHz.....	51
Rys. 4.13. Rozkład obszarowy błędu bezwzględnego $\delta_d[m]$ dla konfiguracji powiększonej, dla szerokości pasma pracy 4 MHz.....	51
Rys. 4.14. Rozkład obszarowy błędu bezwzględnego $\delta_d[m]$ dla konfiguracji powiększonej, dla szerokości pasma pracy 8 MHz.....	52
Rys. 4.15. Rozkład obszarowy błędu bezwzględnego $\delta_d[m]$ dla konfiguracji powiększonej, dla szerokości pasma pracy 10 MHz.....	52
Rys. 4.16. Dystrybuanta błędu bezwzględnego $\delta_d[m]$ - 3 stacje referencyjne, dla konfiguracji podstawowej, dla przyjętych szerokości pasma pracy badanego systemu	53
Rys. 4.17. Dystrybuanta błędu bezwzględnego $\delta_d[m]$ - 4 stacje referencyjne, dla konfiguracji powiększonej, dla przyjętych szerokości pasma pracy badanego systemu	54
Rys. 4.18. Histogram błędu bezwzględnego $\delta_d[m]$ - 3 stacje referencyjne, dla konfiguracji podstawowej, dla przyjętych szerokości pasma pracy badanego systemu	55
Rys. 4.19. Histogram błędu bezwzględnego $\delta_d[m]$ - 4 stacje referencyjne, dla konfiguracji powiększonej, dla przyjętych szerokości pasma pracy badanego systemu	55
Rys. 5.1. Schemat blokowy stacji referencyjnej	59
Rys. 5.2. Widok konstrukcji stacji referencyjnej	60
Rys. 5.3. Schemat blokowy lokalizatora	61
Rys. 5.4. Widok konstrukcji lokalizatora	61
Rys. 5.5. Wygląd rubidowego wzorca częstotliwości – model FS725,	62
Rys. 5.6. Wygląd ekranu z oknami aplikacji wizualizacyjnej	64
Rys. 5.7. Algorytm działania oprogramowania radiolokalizacyjnego	65
Rys. 5.8. Algorytm sortowania danych i wyznaczania (pomiaru) różnicy czasu odebrania sygnałów ze stacji referencyjnych θ oraz l	69
Rys. 5.9. Algorytm dekodowania danych zawartych w depeszy lokalizacyjnej	70
Rys. 5.10. Schemat blokowy algorytmu działania zewnętrznego programu wizualizacji	71
Rys. 5.11. Schemat blokowy algorytmu wyznaczania różnic czasowych w stacji referencyjnej.....	73
Rys. 6.1. Widok ekranu analizatora widma w bezpośrednim sąsiedztwie stacji referencyjnej.....	75
Rys. 6.2. Widok ekranu analizatora widma w polu operacyjnym badanego systemu	76

Rys. 6.3. Przykładowa wizualizacja trasy pomiarowej na obszarze Zatoki Gdańskiej.....	77
Rys. 6.4. Pomierzona dystrybuanta błędu bezwzględnego $\delta_d[m]$ dla obu konfiguracji stacji referencyjnych - wariant: Zatoka Gdańska	78
Rys. 6.5. Histogram błędu bezwzględnego $\delta_d[m]$ dla obu konfiguracji stacji referencyjnych – wariant: Zatoka Gdańska	78
Rys. 6.6. Przykładowa wizualizacja trasy pomiarowej od strony otwartego morza.....	80
Rys. 6.7. Pomierzona dystrybuanta błędu bezwzględnego $\delta_d[m]$ – wariant: otwarte morze	80
Rys. 6.8. Histogram błędu bezwzględnego $\delta_d[m]$ – wariant: otwarte morze.....	81
Rys. 6.9. Porównanie wyników badań symulacyjnych i pomiarowych dystrybuanty błędu bezwzględnego $\delta_d[m]$, dla szerokości pasma pracy systemu równej 4 MHz, oraz badań symulacyjnych dla szerokości pasma wynoszącej 10 MHz	83
Rys. 6.10. Histogram porównawczy wyników badań symulacyjnych i pomiarowych błędu bezwzględnego $\delta_d[m]$, dla szerokości pasma pracy systemu równej 4 MHz, oraz badań symulacyjnych dla szerokości pasma wynoszącej 10 MHz	83

TABELE:

Tab. 4.1. Zestawienie porównawcze błędów: ME_δ , MSE_δ i RMS_δ , dla obu konfiguracji stacji referencyjnych, dla przyjętych szerokości pasma pracy badanego systemu	56
Tab. 6.1. Zestawienie błędów ME_δ , MSE_δ i RMS_δ , obliczonych na podstawie wyników badań pomiarowych dla obu konfiguracji stacji referencyjnych – wariant: Zatoka Gdańska.....	79
Tab. 6.2. Zestawienie błędów ME_δ , MSE_δ i RMS_δ , obliczonych na podstawie wyników badań pomiarowych – wariant: otwarte morze	82
Tab. 6.3. Zestawienie błędów ME_δ , MSE_δ i RMS_δ , obliczonych na podstawie badań symulacyjnych i pomiarowych, dla szerokości pasma pracy systemu równej 4 MHz, oraz badań symulacyjnych dla szerokości pasma wynoszącej 10 MHz	84

Wykaz ważniejszych symboli i skrótów

<i>Symbole</i>	<i>Opis</i>
TU	terminal użytkownika
G	stacja główna
P_i	i-ta stacja podległa
S_i	i-ta stacja referencyjna
c	prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej
Δd	różnica odległości między dwoma wybranymi punktami
Δt	różnica czasu między dwoma wybranymi punktami
d_G	odległości terminala użytkownika od stacji głównej G
d_{P_i}	odległości terminala użytkownika od i-tej stacji podległej P
x_G, y_G	współrzędne położenia stacji głównej G ,
x_{P_i}, y_{P_i}	współrzędne położenia i-tej stacji podległej P_i
x_{S_i}, y_{S_i}	współrzędne położenia i-tej stacji referencyjnej S_i
x_{TU}, y_{TU}	współrzędne położenia terminala użytkownika TU
x_{TU}', y_{TU}'	początkowe współrzędne położenia terminala użytkownika TU stosowane w metodzie iteracyjnej
$\Delta x_{TU_i}, \Delta y_{TU_i}$	współrzędne korygujące położenie terminala użytkownika TU , stosowane w metodzie iteracyjnej
$\Delta t_{21(pomS)}, \Delta t_{31(pomS)}$	różnice czasu pomierzone w stacji referencyjnej S_1 pomiędzy czasem odniesienia tej stacji a czasami odebrania sygnału, odpowiednio od stacji S_2 i S_3
$\Delta t_{21(pomTU)}, \Delta t_{31(pomTU)}$	różnice czasu pomierzone w terminalu użytkownika TU pomiędzy czasami odebrania w tym terminalu sygnału od stacji S_1 i odpowiednio od stacji S_2 i S_3
$\Delta t_{21(oblTU)}, \Delta t_{31(oblTU)}$	czasy propagacji sygnałów na drodze od stacji S_1 odpowiednio do stacji S_2 i S_3 , obliczone w terminalu użytkownika TU na podstawie współrzędnych położenia tych stacji

I_{\max}	maksymalna liczba iteracji
$[\Delta]$	macierz delta
$[\varepsilon]$	macierz wektora błędu
$[Q]$	macierz kowariancji
δ_d	błąd bezwzględny między rzeczywistym a obliczonym położeniem TU
B	szerokość pasma
Δd_{\min}	rozdzielczość systemu

<i>Skrót</i>	<i>Rozwinięcie</i>
AES	Advanced Encryption Standard
AES CBC	AES Cipher Block Chaining
DLĐ	Depesza Lokalizacyjna Dodatkowa
DLP	Depesza Lokalizacyjna Podstawowa
DS-CDMA	Direct Sequence Code Division Multiple Access
FFT	Fast Fourier Transform
GLONASS	Globalnaja Nawigacionnaja Sputnikowaja Sistiema
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Global Positioning System
MAC	Message Authentication Code
ME_{δ}	Mean Error of delta
MSE_{δ}	Mean Squared Error of delta
RMS_{δ}	Root Mean Square of delta
TDOA	Time Difference of Arrival

Rozdział 1: Wprowadzenie

Przemieszczanie się ludzi i rzeczy jest jednym z podstawowych czynności, które powszechnie towarzyszą naszej egzystencji i wymuszają potrzebę lokalizowania, tzn. określania miejsca, w którym aktualnie znajduje się człowiek lub przedmiot. Zwłaszcza istotne to było i jest wówczas, gdy ma wpływ na stan bezpieczeństwa, np. okrętu płynącego po bezkresnym oceanie lub karawany przemierzającej obszary pustynne.

Na początku w procesie lokalizowania stosowano proste metody oparte o obserwację układu gwiazd, zwłaszcza w warunkach pustynnych lub na morzu (astronawigacja), oraz linii brzegowej w strefie przybrzeżnej lub punktów charakterystycznych na lądzie [97] (nawigacja terrastryczna).

Natomiast od początku ubiegłego wieku zaczął rozwijać się nowy sposób określania bieżącego położenia oparty na zastosowaniu techniki radiowej. Początkowo, nie wnikając w szczegóły, określano położenie przy użyciu tzw. radionamierników współpracujących z radiolatarniami (np. system Consol [20]). Następną generacją rozwoju w tej dziedzinie są systemy radionawigacji hiperbolicznej. Przykładem takiego systemu były m.in. GEE [32], OMEGA [38, 44], DECCA [47, 84], czy działający do chwili obecnej LORAN-C [19, 63, 80, 86, 99] (lecz z końcem 2015 roku system zostaje stopniowo wyłączany) lub polski system radiolokalizacyjny JEMIOŁUSZKA [36]. Ostatnia generacja (pod względem chronologicznym) to systemy satelitarne. Obecnie działają następujące systemy: amerykański GPS [32, 35, 37, 49, 50, 100] i rosyjski GLONASS [49, 50, 90] oraz w ograniczonym zakresie chiński COMPASS [88] (inna nazwa to BeiDou-2). Europejski system GALILEO [89] oraz indyjski IRNSS [93] znajdują się dopiero w fazie budowy. Globalne działanie osiągnęły wymienione dwa pierwsze systemy.

1.1. Geneza opracowania nowego rozwiązania systemu hiperbolicznego

Jak wiadomo, systemy hiperboliczne posiadają strukturę łańcuchową, przy czym każdy taki łańcuch składa się ze stacji głównej i trzech stacji podległych, które muszą pracować w trybie synchronicznym. Krótkie omówienie pracy takiego łańcucha zostanie przedstawione w kolejnym rozdziale niniejszej rozprawy. Przy czym, użytkownik takiego systemu uzyskuje dostęp do usługi radiolokalizowania poprzez stację terminalową, będącą na jego wyposażeniu.

Hierarchiczna struktura tradycyjnych systemów hiperbolicznych, zwłaszcza zaś wymóg zapewnienia synchronicznej pracy łańcucha czterech stacji stanowi istotne utrudnienie jego pracy. Poza tym uszkodzenie stacji głównej skutkuje wyłączeniem z eksploatacji całości łańcucha i tym samym pozbawia dostępu do usługi radiolokalizacyjnej na obszarze obsługiwanych przez ten łańcuch. Jest to szczególnie kłopotliwe i może mieć trudne do przewidzenia konsekwencje, gdy mamy do czynienia z potrzebą radiolokalizowania osób i rzeczy dla potrzeb zapewnienia wymaganego poziomu bezpieczeństwa lub obronności.

Dodatkowo należy mieć na uwadze fakt, że chętnie używane satelitarne systemy radionawigacyjne GNSS (*Global Navigation Satellite System*) są postrzegane przez terrorystów lub kraje wrogie ich dysponentom, jako cel o wysokiej wartości. Na poparcie można przytoczyć raport Volpe Center [73], w którym zawarto następujące stwierdzenie: *“... wraz z ekspansją systemu GPS (Global Positioning System) w kierunku cywilnej infrastruktury, system ten staje się coraz bardziej kuszącym celem ataku dla jednostek, grup lub krajów wrogim Stanom Zjednoczonym. Cały czas istnieje zagrożenie pozbawienia danego obszaru usługi GPS, poprzez celowe zakłócanie oraz złośliwe przestrajanie odbiorników GPS lub wprowadzanie do kanałów fałszywych danych systemowych, aby dostarczały mylących informacji ...”*. Systemy GNSS mogą również stać się celem ataku dla bardziej pospolitych przestępców – crakerów komputerowych i twórców wirusów, a nawet zmotoryzowanych użytkowników i firm transportowych, jako, że systemy te są coraz częściej używane w aplikacjach związanych z naliczaniem opłat drogowych, czy śledzeniem więźniów. Wymieniony raport wspomina o systemie GPS, jednak jeżeli inne systemy satelitarne również zostaną uruchomione, to zagrożenie będzie dotyczyło również i tych systemów [39-42, 51-53, 58, 61, 64].

Powyższe legło u podstaw podjęcia studiów i badań mających na celu wypracowanie nowego podejścia do sposobu działania hiperbolicznego systemu radiolokalizacyjnego [71], a mianowicie zapewnienie jego poprawnego działania przy użyciu struktury niehierarchicznej, bez potrzeby jej synchronizacji.

Mając to na uwadze, w Katedrze Systemów i Sieci Radiokomunikacyjnych Politechniki Gdańskiej, przy poparciu Biura Hydrograficznego Marynarki Wojennej, w ramach realizacji pozyskanego w NCBiR projektu badawczo-rozwojowego, opracowano nowy sposób działania hiperbolicznego systemu radiolokalizacyjnego i na tej podstawie zaprojektowano i zbudowano demonstrator technologiczny asynchronicznego systemu hiperbolicznego, którego działanie sprawdzono w warunkach eksploatacyjnych na okręcie Marynarki Wojennej. Jednym z głównych wykonawców tego projektu był autor niniejszej rozprawy doktorskiej [2-17, 65].

1.2. Cel i teza rozprawy

Zatem głównym celem niniejszej rozprawy było zbadanie nowego podejścia do sposobu działania hiperbolicznego systemu radiolokalizacyjnego, pracującego w strukturze łańcuchowej, w sposób asynchroniczny.

Podstawą do osiągnięcia tego celu było wykazanie prawdziwości następującej tezy, a mianowicie, że:

Poprzez odpowiednie rozwiązania protokolarno-systemowe możliwe jest zbudowanie efektywnego, naziemnego samoorganizującego się systemu radiolokalizacyjnego pracującego z widmem rozproszonym. Zastosowanie trybu samoorganizacji eliminuje konieczność stosowania struktury łańcuchowej, dzięki czemu wyłączenie dowolnej stacji naziemnej nie zablokuje działania całego systemu.

Można przy tym zauważyć, że zastosowanie transmisji z widmem rozproszonym oraz samoorganizujący się tryb pracy podnoszą walory eksploatacyjne zaproponowanej koncepcji systemu radiolokalizacyjnego, zwłaszcza jego odporności na działania destrukcyjne ze strony potencjalnego przeciwnika.

1.3. Główne części rozprawy

W świetle powyższego, zawartość niniejszej rozprawy składa się z pięciu części, a mianowicie z:

- wstępu o charakterze wprowadzenia do jej przedmiotu, zawierającego:
 - uzasadnienie konieczności nowego podejścia do sposobu działania hiperbolicznego systemu radiolokalizacyjnego,
 - przyjęty cel i tezę rozprawy,
 - opis sposobu działania hiperbolicznego systemu synchronicznego o strukturze łańcuchowej,co zostało zawarte w rozdziałach 1 i 2,
- opisu koncepcji działania asynchronicznego systemu hiperbolicznego, zawierającego:
 - sposób wyznaczania pozycji przy użyciu tego systemu i związane z tym opracowane rozwiązania protokolarno-systemowe,
 - opis funkcjonalny urządzeń w torze nadawczo-odbiorczym,co zostało zawarte w rozdziale 3,

- opisu narzędzi do badań, w postaci symulatora do badań teoretycznych i wykonanego w ramach projektu badawczo-rozwojowego demonstratora technologicznego do badań pomiarowych, co zostało zawarte w rozdziałach 4 i 5,
- omówienia zawierającego:
 - wyniki wykonanych badań teoretycznych i pomiarowych,
 - opracowaną na ich podstawie analizę efektywności pracy zaproponowanego rozwiązania asynchronicznego systemu radiolokalizacyjnego, co z kolei zawarto w rozdziale 6, oraz
- podsumowania całości rozprawy, w którym stwierdzono osiągnięcie założonego celu i udowodnienie przyjętej tezy, wraz z wykazem głównych osiągnięć, co zawarto w końcowej części opracowania.

Rozdział 2: Podstawy działania hiperbolicznego systemu synchronicznego

Jak wiadomo, hiperboliczny system radiolokalizacyjny działa w oparciu o metodę TDOA (Time Difference of Arrival) [57, 67], co oznacza, że położenie terminala użytkownika określa się poprzez pomiar różnic czasów nadejścia sygnałów radiowych od stacji referencyjnych w tym systemie, tzn. od stacji głównej i trzech stacji podległych tworzących strukturę tego samego łańcucha.

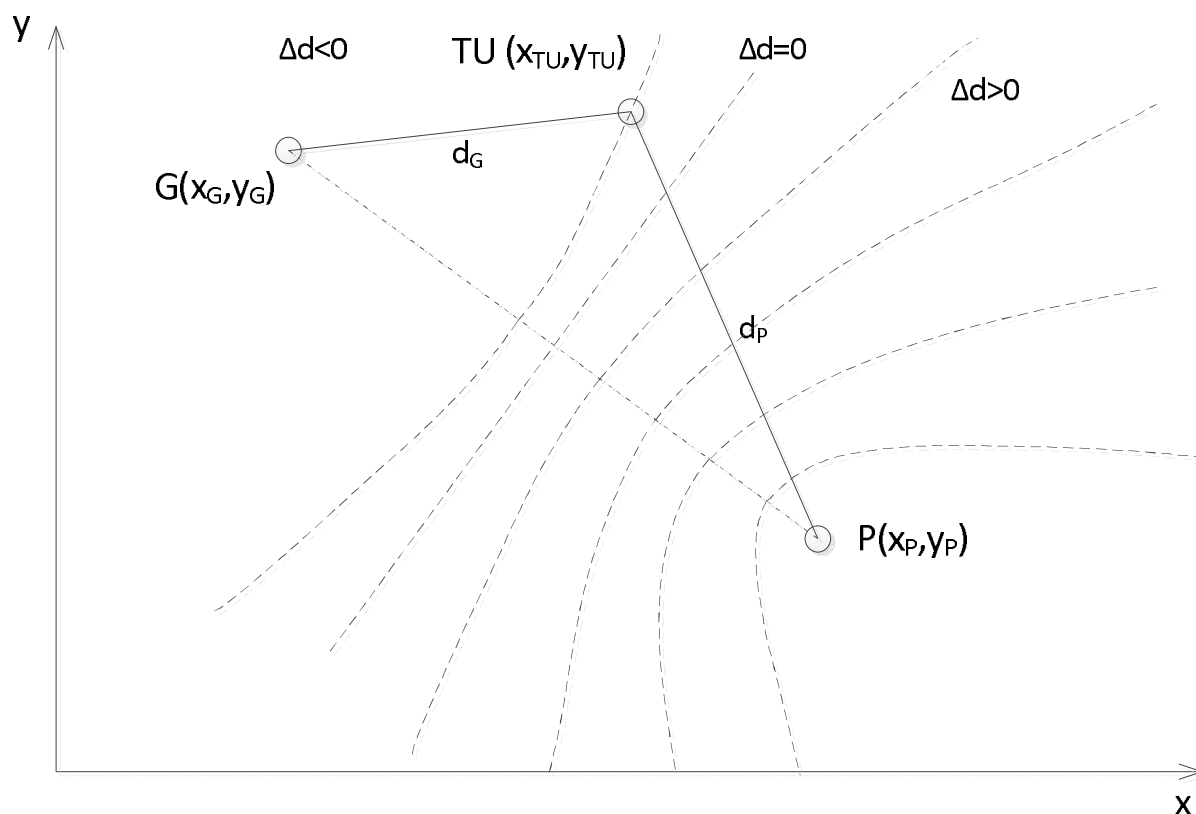
W tym rozdziale zawarto opis metody TDOA, przy użyciu której wyznacza się zestaw linii pozycyjnych w postaci hiperbol odpowiadających pomierzonym różnicom czasowym Δt oraz trzy wybrane, najczęściej stosowane algorytmy służące do rozwiązywania układu trzech równań hiperbolicznych, które to rozwiązanie wyraża położenie terminala użytkownika.

2.1. Opis metody TDOA

Podstawą tej metody jest wyznaczenie linii pozycyjnej w postaci hiperboli będącej zbiorem punktów stałej różnicy odległości Δd od dwóch wybranych punktów będącymi ogniskami tej hiperboli. Zatem, jeżeli położenie jednego z tych ognisk będzie odpowiadało położeniu stacji głównej G , zaś drugiego położeniu wybranej stacji podległej P – co zilustrowano na rys. 2.1, to wówczas na podstawie pomierzonej w terminalu TU użytkownika różnicy Δt czasów nadejścia sygnałów odebranych od tych stacji lub różnic fazowych pomiędzy odebranymi sygnałami możemy określić różnicę dróg Δd odpowiadającą położeniu tego terminala na określonej hiperboli, będącej jak wiadomo zbiorem punktów stałej różnicy odległości, tzn. $\Delta d(\Delta t)$.

Przykładowo, posługując się oznaczeniami występującymi na rys. 2.1, tę stałą różnicę odległości $\Delta d(\Delta t)$, można dla przypadku dwuwymiarowego wyrazić w poniższy dobrze znany sposób, a mianowicie że:

$$\begin{aligned} \Delta d(\Delta t) &= d_P - d_G = c \cdot \Delta t = \\ &= \sqrt{(x_P - x_{TU})^2 + (y_P - y_{TU})^2} - \sqrt{(x_G - x_{TU})^2 + (y_G - y_{TU})^2}, \end{aligned} \quad (2.1)$$



Rys. 2.1. Sposób wyznaczania hiperbolicznej linii pozycyjnej

gdzie:

d_G, d_P - odległości terminala TU użytkownika odpowiednio od stacji głównej G oraz od stacji podległej P ,

x_G, y_G - współrzędne położenia stacji G ,

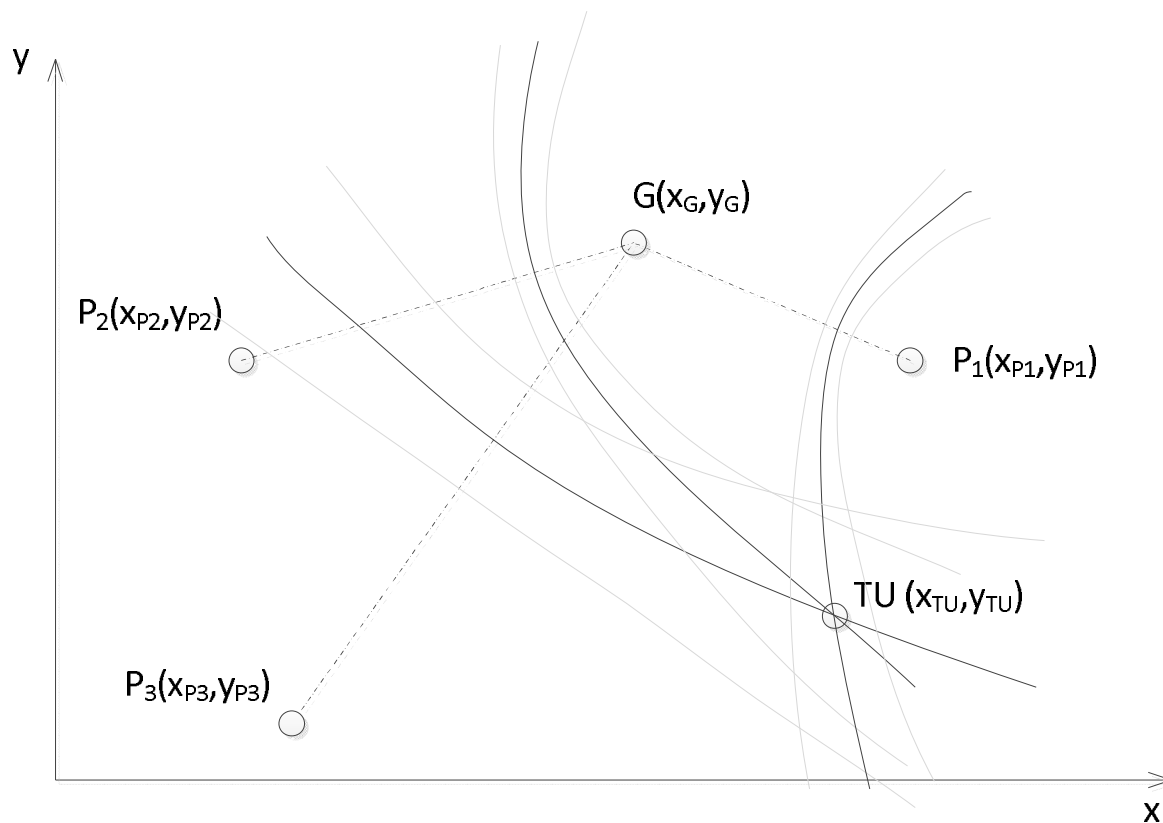
x_P, y_P - współrzędne położenia stacji P ,

x_{TU}, y_{TU} - współrzędne położenia terminala TU użytkownika.

W praktyce metoda TDOA opiera się na wyznaczeniu trzech różnic odległości, tj. $\Delta d_1(\Delta t_1), \Delta d_2(\Delta t_2), \Delta d_3(\Delta t_3)$, określonych na podstawie pomierzonych trzech różnic $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$ czasów nadejścia sygnałów od stacji głównej i trzech stacji podległych $P1, P2, P3$. Otrzymuje się w ten sposób trzy niezależne linie hiperboliczne, na przecięciu których jest położony terminal TU , co z kolei przedstawiono na rys.2.2. [96].

Sytuację przedstawioną na rys. 2.2 można opisać poniższym układem równań, w którym niewiadomymi są współrzędna położenia terminala TU , tzn. wielkości x_{TU}, y_{TU} , które należy obliczyć, rozwiązując ten układ równań w oparciu o znane położenia stacji głównej i stacji

podległych oraz pomierzone wartości różnic czasowych $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$ będące, jak to napisano powyżej, podstawą położenia trzech hiperbolicznych linii pozycyjnych stanowiących zestaw punktów stałych różnic odległości $\Delta d_1(\Delta t_1), \Delta d_2(\Delta t_2), \Delta d_3(\Delta t_3)$, tzn.:



Rys. 2.2. Sposób wyznaczania położenia terminala TU w synchronicznym systemie hiperbolicznym

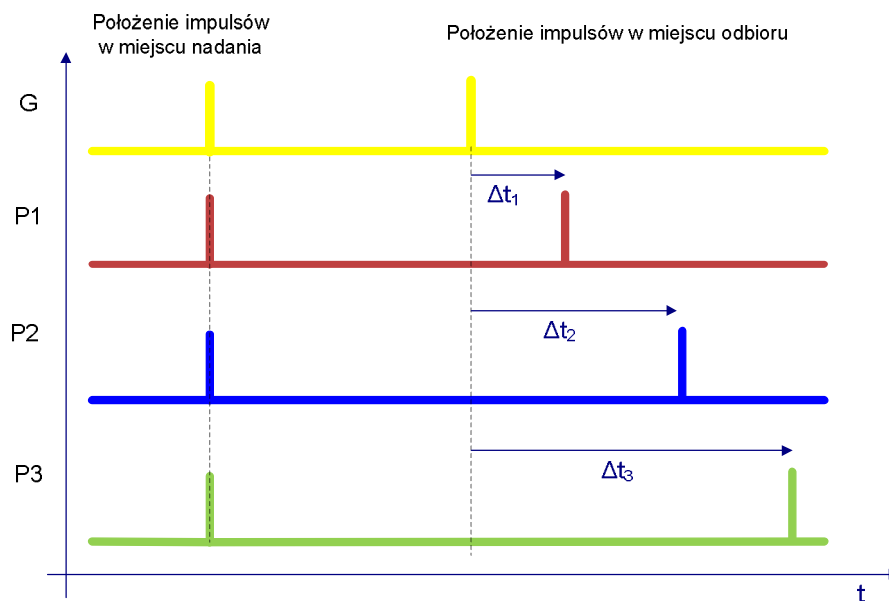
$$\begin{aligned}
 \Delta d_1(\Delta t_1) &= d_{P1} - d_G = c \cdot \Delta t_1 = \\
 &= \sqrt{(x_{P1} - x_{TU})^2 + (y_{P1} - y_{TU})^2} - \sqrt{(x_G - x_{TU})^2 + (y_G - y_{TU})^2}, \\
 \Delta d_2(\Delta t_2) &= d_{P2} - d_G = c \cdot \Delta t_2 = \\
 &= \sqrt{(x_{P2} - x_{TU})^2 + (y_{P2} - y_{TU})^2} - \sqrt{(x_G - x_{TU})^2 + (y_G - y_{TU})^2}, \\
 \Delta d_3(\Delta t_3) &= d_{P3} - d_G = c \cdot \Delta t_3 = \\
 &= \sqrt{(x_{P3} - x_{TU})^2 + (y_{P3} - y_{TU})^2} - \sqrt{(x_G - x_{TU})^2 + (y_G - y_{TU})^2},
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

gdzie $d_G, d_{P1}, d_{P2}, d_{P3}$ oznacza odległości terminala TU użytkownika od odpowiednio stacji głównej $G(x_G, y_G)$ oraz stacji podległych $P1(x_{P1}, y_{P1}), P2(x_{P2}, y_{P2})$ i $P3(x_{P3}, y_{P3})$.

Przy czym, powyższy układ równań (2.2) można zapisać w postaci skróconej, w sposób jak poniżej, tzn.:

$$\begin{aligned} \Delta d_i(\Delta t_i) &= d_{P_i} - d_G = c \cdot \Delta t_i = \\ &= \sqrt{(x_{P_i} - x_{TU})^2 + (y_{P_i} - y_{TU})^2} - \sqrt{(x_G - x_{TU})^2 + (y_G - y_{TU})^2}, \text{ dla } i = 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Ilustrację zależności czasowych charakterystyczną dla synchronicznego systemu radiolokalizacyjnego, odpowiadającą opisowi (2.2) lub (2.3), zilustrowano na rys. 2.3, gdzie pokazano wzajemne położenie na osi czasu zsynchronizowanych impulsów wysyłanych z poszczególnych stacji łańcucha – głównej i podległych, oraz wzajemne położenie tych impulsów w miejscu odbioru, tzn. w miejscu położenia terminala użytkownika



Rys. 2.3. Ilustracja zależności czasowych charakterystyczna dla synchronicznego systemu radiolokalizacyjnego

Na podstawie czasowego położenia impulsów w miejscu ich odbioru w terminalu użytkownika można wprost wyznaczyć różnice czasów Δt_i i na tej podstawie określić wartość różnic odległości Δd_i powiązanych z położeniem hiperbolicznych linii pozycyjnych, których przecięcie stanowi o położeniu tego terminala. Odpowiada temu rozwiązanie układu równań (2.3), ze względu na poszukiwane współrzędne położenia terminala TU , tzn x_{TU}, y_{TU} .

Z oczywistych względów rozwiązanie układu równań nieliniowych (2.3) względem poszukiwanych współrzędnych x_{TU}, y_{TU} jest zadaniem trudnym. Jednym ze sposobów jest linearyzacja tego układu, np. przy użyciu rozwinięcia w szereg Taylora [59] i następnie

zastosowanie podejścia iteracyjnego. Innym sposobem może być podejście polegające na przekształceniu tych równań do postaci zapisanej w poniższy sposób [57]:

$$d_{P_i}^2 = (\Delta d_i + d_G)^2, \text{ dla } i = 1, 2, 3, \quad (2.4)$$

przy czym, powyższą zależność można przekształcić kolejno od (2.4.1) do (2.4.6) w następujący sposób:

$$\Delta d_i^2 + 2\Delta d_i d_G + d_G^2 = d_{P_i}^2 \quad (2.4.1)$$

$$\Delta d_i^2 + 2\Delta d_i d_G + d_G^2 = (x_{P_i} - x_{TU})^2 + (y_{P_i} - y_{TU})^2 \quad (2.4.2)$$

$$\Delta d_i^2 + 2\Delta d_i d_G + d_G^2 = x_{P_i}^2 - 2x_{P_i}x_{TU} + x_{TU}^2 + y_{P_i}^2 - 2y_{P_i}y_{TU} + y_{TU}^2 \quad (2.4.3)$$

$$\Delta d_i^2 + 2\Delta d_i d_G = x_{P_i}^2 + y_{P_i}^2 - 2x_{P_i}x_{TU} - 2y_{P_i}y_{TU} + y_{TU}^2 + x_{TU}^2 - d_G^2 \quad (2.4.4)$$

$$\begin{aligned} \Delta d_i^2 + 2\Delta d_i d_G &= \\ &= x_{P_i}^2 + y_{P_i}^2 - 2x_{P_i}x_{TU} - 2y_{P_i}y_{TU} + y_{TU}^2 + x_{TU}^2 - \left((x_G - x_{TU})^2 + (y_G - y_{TU})^2 \right) \end{aligned} \quad (2.4.5)$$

$$\begin{aligned} \Delta d_i^2 + 2\Delta d_i d_G &= x_{P_i}^2 + y_{P_i}^2 - 2x_{P_i}x_{TU} - 2y_{P_i}y_{TU} + y_{TU}^2 + x_{TU}^2 - \\ &+ (x_G^2 - 2x_Gx_{TU} + x_{TU}^2 + y_G^2 - 2y_Gy_{TU} + y_{TU}^2) \end{aligned} \quad (2.4.6)$$

otrzymując równanie o postaci:

$$\begin{aligned} \Delta d_i^2 + 2\Delta d_i \cdot d_G &= \\ &= x_{P_i}^2 + y_{P_i}^2 - 2(x_{P_i} - x_G)x_{TU} - 2(y_{P_i} - y_G)y_{TU} - x_G^2 - y_G^2, \text{ dla } i = 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (2.5)$$

które jest liniowe względem poszukiwanych współrzędnych x_{TU}, y_{TU} , określających położenie terminala użytkownika. Jedynym problemem jest wyznaczenie odległości d_G , do czego należy zastosować odpowiedni algorytm wyznaczania pozycji, o czym jest mowa poniżej.

2.2. Wybrane algorytmy wyznaczania pozycji w systemie hiperbolicznym

Poniżej scharakteryzowane zostaną trzy algorytmy, którymi można się posłużyć do rozwiązania układu równań opisanego zależnościami (2.3 lub 2.5). Algorytmy te noszą nazwy pochodzące od nazwisk ich autorów, którymi są: Y.T. Chan [26], W.H. Foy [33] i B.T. Fang [31]. Z uwagi na ograniczenie algorytmu Fanga tylko dla trzech stacji referencyjnych, opisy tych algorytmów odnoszą się do tego przypadku, tzn. uwzględniają łańcuch składający się ze stacji głównej i dwóch stacji podległych, co nie ogranicza ogólności wniosków wypływających z tego opisu.

2.2.1. Algorytm Chana

Algorytm ten jest jedną z metod nieiteracyjnych o istotnym znaczeniu użytkowym, który zapewnia zadawalające wyniki, niezależnie od odległości terminala użytkownika od stacji referencyjnej. Podstawą działania tego algorytmu jest zależność na poszukiwane współrzędne x_{TU}, y_{TU} tego terminala, wyrażona w poniższej postaci macierzowej [26]:

$$\begin{bmatrix} x_{TU} \\ y_{TU} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} (x_G - x_{P1}) & (y_G - y_{P1}) \\ (x_G - x_{P2}) & (y_G - y_{P2}) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} \Delta d_1 \\ \Delta d_2 \end{bmatrix} \cdot d_G + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \Delta d_1^2 + K_{P1} - K_G \\ \Delta d_2^2 + K_{P2} - K_G \end{bmatrix} \right\}, \quad (2.6)$$

w której: $K_G = x_G^2 + y_G^2$, $K_{P1} = x_{P1}^2 + y_{P1}^2$ oraz $K_{P2} = x_{P2}^2 + y_{P2}^2$.

Powyższe równanie można zapisać w prostszej postaci, w sposób jak poniżej, tzn.:

$$\begin{bmatrix} x_{TU} \\ y_{TU} \end{bmatrix} = [W] \cdot d_G - [Z], \quad (2.7)$$

w którym na podstawie (2.6):

$$[W] = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} (x_G - x_{P1}) & (y_G - y_{P1}) \\ (x_G - x_{P2}) & (y_G - y_{P2}) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta d_1 \\ \Delta d_2 \end{bmatrix}, \quad (2.7.1)$$

oraz

$$[Z] = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (x_G - x_{P1}) & (y_G - y_{P1}) \\ (x_G - x_{P2}) & (y_G - y_{P2}) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta d_1^2 + K_{P1} - K_G \\ \Delta d_2^2 + K_{P2} - K_G \end{bmatrix}. \quad (2.7.2)$$

W rezultacie, aby obliczyć nieznaną odległość d_G należy rozwiązać poniższe klasyczne równanie kwadratowe:

$$ad_G^2 + bd_G + c = 0, \quad (2.8)$$

w którym wartości współczynników a, b, c wynikają z poniższych zależności:

$$a = w_1^2 + w_2^2 - 1, \quad (2.8.1)$$

$$b = -2(x_G w_1 + y_G w_2 + z_1 w_1 + z_2 w_2), \quad (2.8.2)$$

$$c = x_G^2 + y_G^2 + 2x_G z_1 + 2y_G z_2 + z_1^2 + z_2^2. \quad (2.8.3)$$

Jak wiadomo, rozwiązaniem równania (2.8) są dwie wartości, których znaczenie praktyczne na podstawie wykonanych badań wstępnych zależy od charakteru obszaru na którym znajduje się terminal użytkownika, tzn. pierwiastek określony zależnością:

$$d_{G1} = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4a \cdot c}}{2a}, \quad (2.9.1)$$

powinien być stosowany w sytuacjach, gdy terminal użytkownika znajduje się wewnątrz obszaru objętego zasięgiem działania stacji referencyjnych – np. na obszarze Zatoki Gdańskiej, natomiast pierwiastek określony zależnością:

$$d_{G2} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4a \cdot c}}{2a}, \quad (2.9.2)$$

powinien być stosowany w sytuacjach, gdy terminal użytkownika znajduje się na zewnątrz tego obszaru – np. w strefie przybrzeżnej od strony otwartego morza, kiedy stacje referencyjne ulokowane są na lądzie. Otrzymaną w ten sposób wartość d_G należy wstawić do zależności (2.6) i następnie obliczyć poszukiwane współrzędne x_{TU}, y_{TU} położenia terminala użytkownika [26, 27].

2.2.2. Algorytm Foya

Natomiast algorytm Foya opiera się na linearyzacji układu równań wyrażonego zależnością (2.3), poprzez ich rozwinięcie w szereg Taylora, co następnie pozwala zastosować podejście iteracyjne dające w wyniku przybliżone rozwiązanie, przy czym wielkość tego przybliżenia wynika z przyjętej liczby kroków iteracyjnych.

W pierwszej kolejności należy przyjąć wartości początkowe współrzędnych x_{TU}', y_{TU}' , czyli zgrubne położenie terminala użytkownika. Następnie, w każdym kolejnym kroku wyznaczany jest wektor korygujący $[\Delta x_{TU_i}, \Delta y_{TU_i}]^T$ dodawany do estymaty położenia tego terminala wyznaczonej w kroku poprzednim [33], co można zapisać następująco:

$$\begin{bmatrix} x_{TU} \\ y_{TU} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{TU}' \\ y_{TU}' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x_{TU_i} \\ \Delta y_{TU_i} \end{bmatrix} + \dots, \quad \text{dla } i = 1, 2, \dots, I_{\max}. \quad (2.10)$$

Postępowanie takie się kończy, gdy wartości $\Delta x_{TU_i}, \Delta y_{TU_i}$ wektora korygującego staną się mniejsze od przyjętych wartości progowych lub kiedy liczba wykonanych kroków iteracji osiągnie przyjętą wartość maksymalną I_{\max} . Przy czym, niewłaściwy wybór punktu początkowego może skutkować brakiem zbieżności rozwiązania, czego wyrazem będzie błędnie wyznaczona pozycja tego terminala. Mając to na uwadze, najlepiej jest przyjąć początkowe położenie określone wartościami początkowymi x_{TU}', y_{TU}' , będącymi średnimi

arytmetycznymi współrzędnymi stacji referencyjnych biorącymi udział w procesie radiolokalizowania terminala.

Powyżej nakreśloną procedurę iteracyjną wykonuje się stosując poniższą zależność na wektor korygujący [33]:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_{TU} \\ \Delta y_{TU} \end{bmatrix} = \left([\Delta]^T \cdot [\Delta] \right)^{-1} [\Delta]^T \cdot [\varepsilon], \quad (2.11)$$

w którym:

$$[\Delta] = \begin{bmatrix} \left(\frac{\Delta x_G}{d_G} - \frac{\Delta x_{P1}}{d_{P1}} \right) & \left(\frac{\Delta y_G}{d_G} - \frac{\Delta y_{P1}}{d_{P1}} \right) \\ \left(\frac{\Delta x_G}{d_G} - \frac{\Delta x_{P2}}{d_{P2}} \right) & \left(\frac{\Delta y_G}{d_G} - \frac{\Delta y_{P2}}{d_{P2}} \right) \end{bmatrix}, \quad (2.11.1)$$

oraz

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta d_{1(p)} - \Delta d_{1(e)} \\ \Delta d_{2(p)} - \Delta d_{2(e)} \end{bmatrix}, \quad (2.11.2)$$

przy czym: $\Delta x_G = x_G - x_{TU}$, $\Delta x_{P1} = x_{P1} - x_{TU}$, $\Delta x_{P2} = x_{P2} - x_{TU}$, $\Delta y_G = y_G - y_{TU}$, $\Delta y_{P1} = y_{P1} - y_{TU}$, $\Delta y_{P2} = y_{P2} - y_{TU}$, natomiast $\Delta d_{i(p)}$ i $\Delta d_{i(e)}$ oznaczają odpowiednio wartości określone na podstawie pomierzonych różnic czasowych $\Delta d(\Delta t)$ oraz wartości estymowane w kolejnych krokach procesu iteracji.

Zatem, w pierwszym kroku procesu iteracji, w której dąży się do zminimalizowania składowych wektora błędu $[\varepsilon]$, co można wyrazić w poniższy sposób:

$$\varepsilon_1 = \Delta d_{1(p)} - \Delta d_{1(e)} \Rightarrow 0 \quad \varepsilon_2 = \Delta d_{2(p)} - \Delta d_{2(e)} \Rightarrow 0, \quad (2.11.3)$$

do wyznaczenia odległości d_G i d_{pi} stosuje się początkowe wartości x_{TU}' , y_{TU}' współrzędnych położenia terminala użytkownika, zaś w następnych krokach ich wartości skorygowane o wektor korygujący (2.11). Praktyka pokazuje, że zadawalającą dokładność rozwiązania uzyskuje się po około pięciu krokach iteracji [33].

2.2.3. Algorytm Fanga

Z kolei algorytm Fanga, podobnie jak algorytm Chana, opiera się na podejściu nieiteracyjnym. Jak to zaznaczono wcześniej, metodę tę stosuje się dla trzech stacji referencyjnych, przy czym każdą z nich umieszcza się w ściśle określonych punktach lokalnego układu prostokątnego. Tzn., współrzędne tych stacji, w omawianym przypadku głównej G

i dwóch podległych $P1, P2$, w tym układzie są następujące: $x_G \cap y_G = 0$, $x_{P1} \neq 0 \cap y_{P1} = 0$, oraz $x_{P2} \neq 0 \cap y_{P2} \neq 0$. Przy takich założeniach można wykazać, że słuszne jest równanie liniowe o klasycznej postaci [31]:

$$y_{TU} = ax_{TU} + b, \quad (2.12)$$

w której:

$$a = \frac{\left(\frac{\Delta d_{P2}}{\Delta d_{P1}} \cdot x_{P1} - x_{P2} \right)}{y_{P2}}, \quad (2.12.1)$$

natomiast

$$b = \frac{x_{P2}^2 + y_{P2}^2 - \Delta d_{P1} \cdot \Delta d_{P2} \cdot \left(1 - \left(\frac{x_{P1}}{\Delta d_{P1}} \right)^2 \right)}{2y_{P2}}. \quad (2.12.2)$$

Rozwiązując następnie równanie kwadratowe o postaci, w którym niewiadomą jest poszukiwana współrzędna x_{TU} [31]:

$$a_x x_{TU}^2 + b_x x_{TU} + c_x = 0, \quad (2.13)$$

w którym:

$$a_x = - \left(1 - \left(\frac{x_{P1}}{\Delta d_{P1}} \right)^2 + g^2 \right), \quad (2.13.1)$$

$$b_x = x_{P1} \cdot \left(1 - \left(\frac{x_{P1}}{\Delta d_{P1}} \right)^2 \right) - 2gh, \quad (2.13.2)$$

$$c_x = \left(\frac{\Delta d_{P1}^2}{4} \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{x_{P1}}{\Delta d_{P1}} \right)^2 \right)^2 - h^2, \quad (2.13.3)$$

oraz

$$g = \frac{\Delta d_{P2} \cdot \left(\frac{x_{P1}}{\Delta d_{P1}} - x_{P2} \right)}{y_{P2}}, \quad (2.13.4)$$

$$h = \frac{x_{p_2}^2 + y_{p_2}^2 - \Delta d_{p_2}^2 + \Delta d_{p_2} \cdot \Delta d_{p_1} \cdot \left(1 - \left(\frac{x_{p_1}}{\Delta d_{p_1}}\right)^2\right)}{2y_{p_2}}, \quad (2.13.5)$$

można obliczyć dwa pierwiastki tego równania, których znaczenie praktyczne jest takie samo, jak w przypadku algorytmu Chana – patrz komentarz do wzorów (2.9). Podstawiając następnie otrzymany wynik do (2.12) otrzymuje się wartość drugiej współrzędnej położenia terminala użytkownika.

2.2.4. Znaczenie użytkowe opisanych algorytmów

Opisane powyżej algorytmy mają różne znaczenie użytkowe, a mianowicie:

- pierwszy z nich, algorytm Chana można stosować do dowolnej liczby stacji referencyjnych, co jest jego zaletą, mając zwłaszcza na uwadze przedmiot niniejszej rozprawy,
- kolejny, algorytm Foya można także stosować do dowolnej liczby stacji referencyjnych, jednakże jest to podejście iteracyjne wymagające przynajmniej kilku kroków iteracji, co wymaga określonego nakładu czasu na wykonanie obliczeń, zaś w przypadku niewłaściwego wyboru punktu początkowego można nie uzyskać zbieżności rozwiązania,
- natomiast ostatni z nich, algorytm Fanga stanowi uproszczoną wersję algorytmu Chana, którą można stosować do nie więcej aniżeli trzech stacji referencyjnych, co wyraźnie ogranicza jego przydatność użytkową.

Podsumowując, na podstawie powyższego i wykonanych wstępnych badań, w tym zakresie można stwierdzić, że najbardziej przydatny użytkowo jest algorytm Chana. Ponadto, mając na uwadze strukturę systemu radiolokalizacyjnego będącego przedmiotem niniejszej rozprawy, którą docelowo będzie stanowić sieć więcej niż trzech stacji referencyjnych pracujących w trybie ad-hoc, stanowi to jedyne akceptowalne rozwiązanie algorytmiczne.

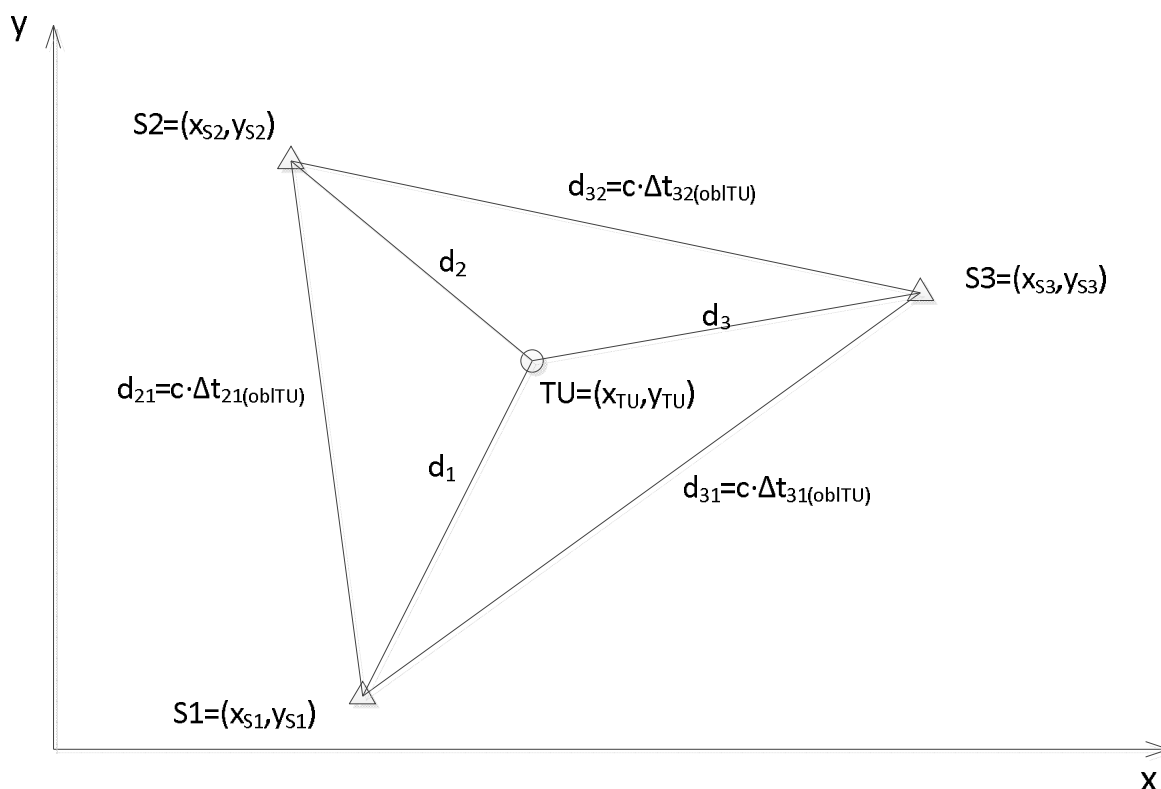
Rozdział 3: Koncepcja budowy i działania hiperbolicznego systemu asynchronicznego

Jak to napisano na wstępie, asynchroniczny system radiolokalizacyjny stanowi formę rozwiązania atrakcyjną ze względu na jego walory użytkowe, szczególnie przydatne w zastosowaniach specjalnych związanych z szeroko pojętym bezpieczeństwem. Takie rozwiązanie, w porównaniu do dotychczasowego sposobu działania systemów hiperbolicznych, nie wymaga tworzenia łańcucha wzajemnie zsynchronizowanych stacji referencyjnych i z tego powodu jest mniej podatne na destrukcję, zwłaszcza zewnętrzną. Oznacza to, że wyłączenie z eksploatacji jakiegokolwiek stacji referencyjnej, tworzących sieć równorzędnych stacji, nie skutkuje brakiem dostępu do usługi radiolokalizacyjnej, pod warunkiem, że aktywna będzie ich minimalna liczba, konieczna do działania systemu hiperbolicznego.

W rozdziale tym przedstawiono sposób działania takiego rozwiązania, w którym wyznaczanie pozycji jest oparte na współpracy terminala użytkownika z każdą ze stacji referencyjnych będących w zasięgu jego działania. Dla potrzeb tego wszystkie stacje referencyjne tworzące sieć są wyposażone w radiowe urządzenia nadawczo-odbiorcze, zapewniające każdej stacji wysyłanie sygnałów radiowych do pozostałych stacji oraz umożliwiające odbieranie sygnałów wysyłanych z pozostałych stacji, będących w zasięgu jej działania. Takie podejście ma charakter oryginalny i pozwala na rezygnację z synchronicznej pracy stacji referencyjnych, wymaga jednak zastosowania odpowiedniej formy warstwy protokołowo-systemowej oraz właściwej temu funkcjonalności torów nadawczo-odbiorczych spełniających požądane funkcje użytkowe, co zostało opisane poniżej [2, 5-17].

3.1. Wyznaczanie pozycji w samoorganizującym się systemie asynchronicznym

Sposób wyznaczania pozycji w takim systemie zostanie przedstawiony na przykładzie sieci składającej się z trzech równorzędnych stacji referencyjnych $S_1(x_{S1}, y_{S1})$, $S_2(x_{S2}, y_{S2})$ i $S_3(x_{S3}, y_{S3})$, których położenie jest znane, oraz terminala użytkownika TU , przy użyciu którego realizowany jest dostęp do usługi radiolokalizowania tego terminala, co przedstawiono na rys. 3.1.



Rys. 3.1. Przykładowa sieć równorzędnych stacji referencyjnych S_1, S_2, S_3 wraz z terminalem użytkownika TU

Podstawą asynchronicznego sposobu radiolokalizowania jest także metoda TDOA, polegająca jak wiadomo na wyznaczaniu linii pozycyjnych w postaci hiperbol będących zbiorem punktów stałej różnicy Δd dwóch odległości od określonej, w ogólności dowolnej, pary stacji referencyjnych do miejsca położenia terminala TU , przy czym w tym przypadku stacje te nie są ze sobą zsynchronizowane. Jak to już podkreślono, każda stacja referencyjna jest wyposażona w radiowy układ nadawczo-odbiorczy z anteną o dookólnych właściwościach kierunkowych, co pozwala na wysyłanie sygnałów do pozostałych stacji referencyjnych i terminala użytkownika, niezależnie od ich kierunkowego położenia, oraz odbiór sygnałów z pozostałych stacji referencyjnych, pod warunkiem, że stacje te wraz z terminalem znajdują się w zasięgu jej działania. Ponadto, każda stacja referencyjna jest także wyposażona w układ do pomiaru różnic czasowych Δt pomiędzy jej czasem odniesienia a czasami odebrania sygnałów z pozostałych stacji referencyjnych, które to różnice czasowe Δt zawierają aktualne rozsynchronizowanie stacji referencyjnych między sobą. Informacje o pomierzonych różnicach Δt oraz o współrzędnych położenia x_S, y_S danej stacji referencyjnej są następnie umieszczane w sygnałach wysyłanych dookólnie (rozsiewczo) z tej stacji.

W tym miejscu należy podkreślić, co także jest ważne z punktu widzenia sposobu działania proponowanego systemu, że w tym systemie dostęp do widma elektromagnetycznego jest realizowany przy użyciu techniki widma rozproszonego DS-CDMA [60] (Direct Sequence Code Division Multiple Access), zaś pomiar różnic czasowych Δt odbywa się w oparciu o położenia na osi czasu maksimów funkcji autokorelacji ciągów pilotowych umieszczonych w wysyłanych sygnałach.

Poniżej, na rys. 3.2, przedstawiono przykładowy stan czasowy wysyłanych i odbieranych sygnałów, na którym zaznaczono mierzone różnice czasowe. W oparciu o te dane, w terminalu użytkownika obliczana jest jego pozycja x_{TU}, y_{TU} , przy zastosowaniu poniższej zależności, którą opracowano przy zastosowaniu algorytmu Chana [26] – porównaj z zależnością (2.6), tj.:

$$\begin{bmatrix} x_{TU} \\ y_{TU} \\ d_1 \end{bmatrix} = \left([\Delta]^T \cdot [Q]^{-1} \cdot [\Delta] \right)^{-1} \cdot [\Delta]^T \cdot [Q]^{-1} \cdot [\Delta_{prim}] \quad (3.1)$$

gdzie:

d_1 - odległość terminala użytkownika od stacji referencyjnej, przyjętej jako pierwsza,

oraz

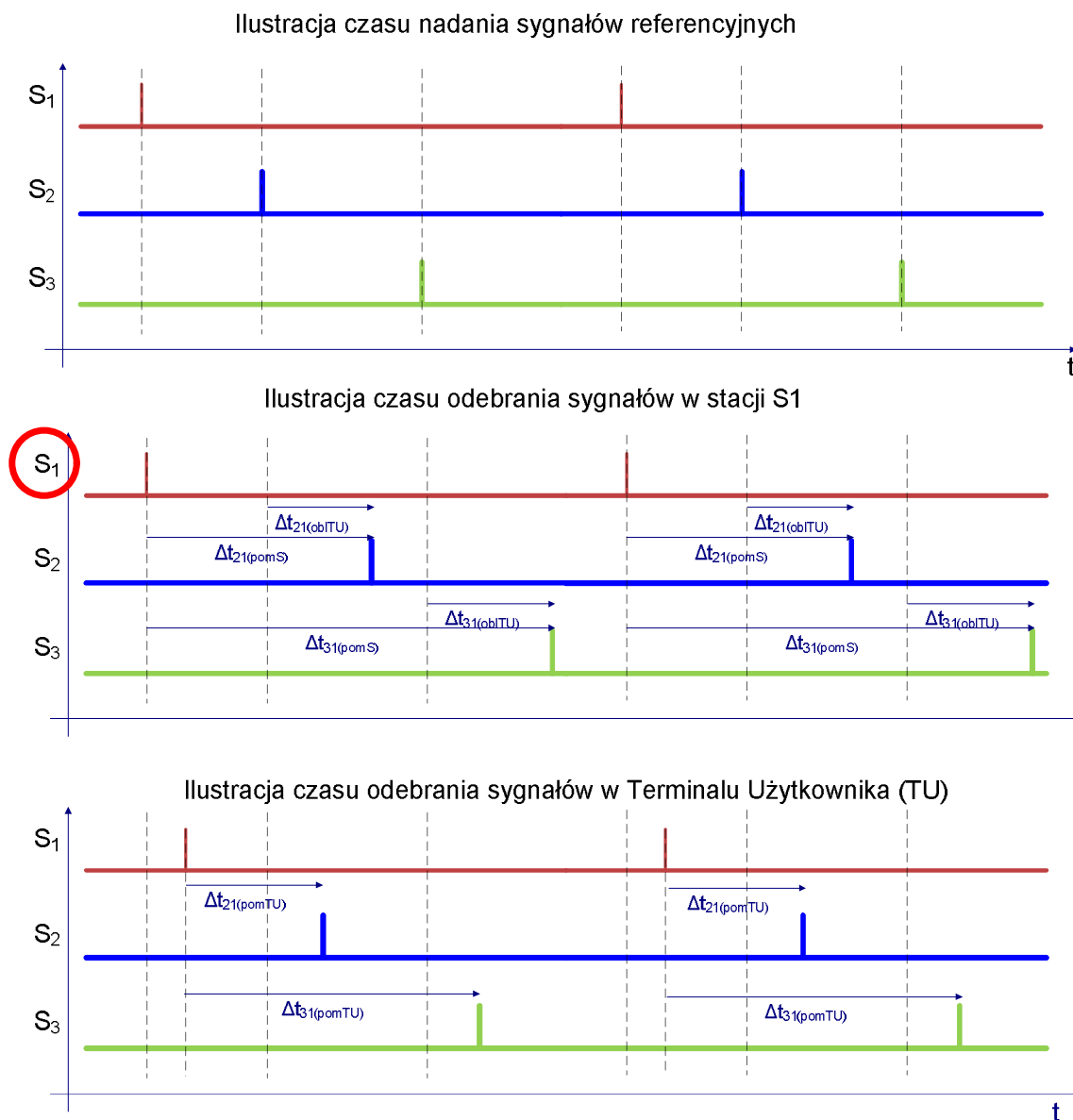
$$[\Delta] = - \begin{bmatrix} \Delta x_{21} & \Delta y_{21} & (c \cdot \Delta t_{21}) \\ \Delta x_{31} & \Delta y_{31} & (c \cdot \Delta t_{31}) \end{bmatrix}, \quad (3.1.1)$$

$$[Q] = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.1.2)$$

$$[\Delta_{prim}] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (c \cdot \Delta t_{21})^2 - (x_{S2}^2 + y_{S2}^2) + (x_{S1}^2 + y_{S1}^2) \\ (c \cdot \Delta t_{31})^2 - (x_{S3}^2 + y_{S3}^2) + (x_{S1}^2 + y_{S1}^2) \end{bmatrix}, \quad (3.1.3)$$

zaś

$$\begin{aligned} \Delta x_{21} &= (x_{S2} - x_{S1}), \\ \Delta y_{21} &= (y_{S2} - y_{S1}), \\ \Delta x_{31} &= (x_{S3} - x_{S1}), \\ \Delta y_{31} &= (y_{S3} - y_{S1}). \end{aligned} \quad (3.1.4)$$



Rys. 3.2. Przykładowy stan czasowy wysyłanych i odbieranych sygnałów oraz mierzone różnice czasowe

Natomiast różnice czasowe Δt_{21} oraz Δt_{31} , objaśnione na rys. 3.2., wynikają z poniższych zależności:

$$\begin{aligned}\Delta t_{21} &= \Delta t_{21(pomS)} - \Delta t_{21(pomTU)} - t_{21(obITU)}, \\ \Delta t_{31} &= \Delta t_{31(pomS)} - \Delta t_{31(pomTU)} - t_{31(obITU)},\end{aligned}\tag{3.2}$$

w których:

$\Delta t_{21}, \Delta t_{31}$ - różnice czasu odpowiadające różnicom odległości, odpowiednio $\Delta d_{21} = d_2 - d_1$ i $\Delta d_{31} = d_3 - d_1$ (patrz rys. 3.1),

$\Delta t_{21(pomS)}, \Delta t_{31(pomS)}$ - różnice czasu pomierzone w stacji referencyjnej S_1 pomiędzy czasem odniesienia tej stacji a czasami odebrania sygnału, odpowiednio od stacji S_2 i S_3 (patrz rys. 3.2),

$\Delta t_{21(pomTU)}, \Delta t_{31(pomTU)}$ - różnice czasu pomierzone w terminalu użytkownika TU pomiędzy czasami odebrania w tym terminalu sygnału od stacji S_1 i odpowiednio od stacji S_2 i S_3 (patrz rys. 3.2),

$\Delta t_{21(oblTU)}, \Delta t_{31(oblTU)}$ - czasy propagacji sygnałów na drodze od stacji S_1 odpowiednio do stacji S_2 i S_3 , obliczone w terminalu użytkownika TU na podstawie współrzędnych położenia tych stacji (patrz rys. 3.1).

Rozwiązując następnie równanie (3.1) ze względu na odległość d_1 , tzn. stosując algorytm Chana, otrzymuje się poszukiwane wartości współrzędnych x_{TU}, y_{TU} położenia terminala użytkownika, wynikające z poniższej zależności – patrz zależność (2.6):

$$\begin{bmatrix} x_{TU} \\ y_{TU} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \Delta x_{21} & \Delta y_{21} \\ \Delta x_{31} & \Delta y_{31} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} c \cdot \Delta t_{21} \\ c \cdot \Delta t_{31} \end{bmatrix} \cdot d_1 + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (c \cdot \Delta t_{21})^2 + K_1 - K_2 \\ (c \cdot \Delta t_{31})^2 + K_1 - K_3 \end{bmatrix} \right\}, \quad (3.3)$$

w której: $K_1 = (x_{S1}^2 + y_{S1}^2)$, $K_2 = (x_{S2}^2 + y_{S2}^2)$, $K_3 = (x_{S3}^2 + y_{S3}^2)$.

3.2. Rozwiązania protokolarno-systemowe

Mając na uwadze przedstawione działanie zaproponowanego rozwiązania asynchronicznego systemu radiolokalizacyjnego, w trakcie wstępnych badań, opracowano stosowną do tego warstwę protokolarno-systemową zapewniającą efektywne działanie takiego systemu. Punktem wyjścia do tego jest przyjęta organizacja pracy stacji referencyjnych, wysyłających w sposób rozsiewczy sygnały zawierające tzw. *depesze lokalizacyjne*, w których umieszczane są dwa rodzaje *danych lokalizacyjnych*, służących do wykonania opisanych obliczeń lokalizacyjnych, a mianowicie:

- dane podstawowe (Depesza Lokalizacyjna Podstawowa DLP), zawierające unikatowy numer własny i współrzędne położenia danej stacji referencyjnej, oraz

- dane dodatkowe (Depesza Lokalizacyjna Dodatkowa DLD), zawierające unikatowe numery własne innych stacji referencyjnych, od których zostały odebrane sygnały radiowe,

oraz pomierzone różnice czasowe pomiędzy własnym odniesieniem czasowym tej danej stacji a sygnałami odebranymi od innych stacji – patrz Załącznik A.

Dzięki takiemu zaprojektowaniu depeasz nawigacyjnych można uzyskać samoorganizujący się system. Terminal odbiorczy odbierając komplet danych od dowolnych trzech stacji referencyjnych (zarówno dane z DLP i DLD) będzie w stanie wyznaczyć swoją pozycję.

Poza tym, opracowując organizację pracy stacji referencyjnych przyjęto, że nadajniki tych stacji pracują z taką samą mocą i na jednej częstotliwości nośnej. Wymusza to ich cykliczny charakter pracy wynikający z konieczności ograniczenia wpływu niekorzystnego zjawiska *near-far*, które to zjawisko polega na tzw. *przysłanianiu pracy nadajników* stacji referencyjnych znacznie odległych od odbiornika stacji referencyjnej – zwłaszcza odbiornika terminala użytkownika, w pobliżu których to odbiorników znajduje się aktualnie pracujący nadajnik innej stacji referencyjnej. Ma to miejsce w systemach z bezpośrednim rozpraszaniem widma i wynika z różnicy poziomów energetycznych tych sygnałów w miejscu ich odbioru. Z tego powodu nadajniki stacji referencyjnych pracują w sposób przerywany, zaś losowe zawieszanie ich pracy zostało oparte na rozkładzie Poissona, przy czym jako zmienną losową X przyjęto czas trwania nadawania depeasy nawigacyjnej, co można wyrazić w poniższy dobrze znany sposób [76]:

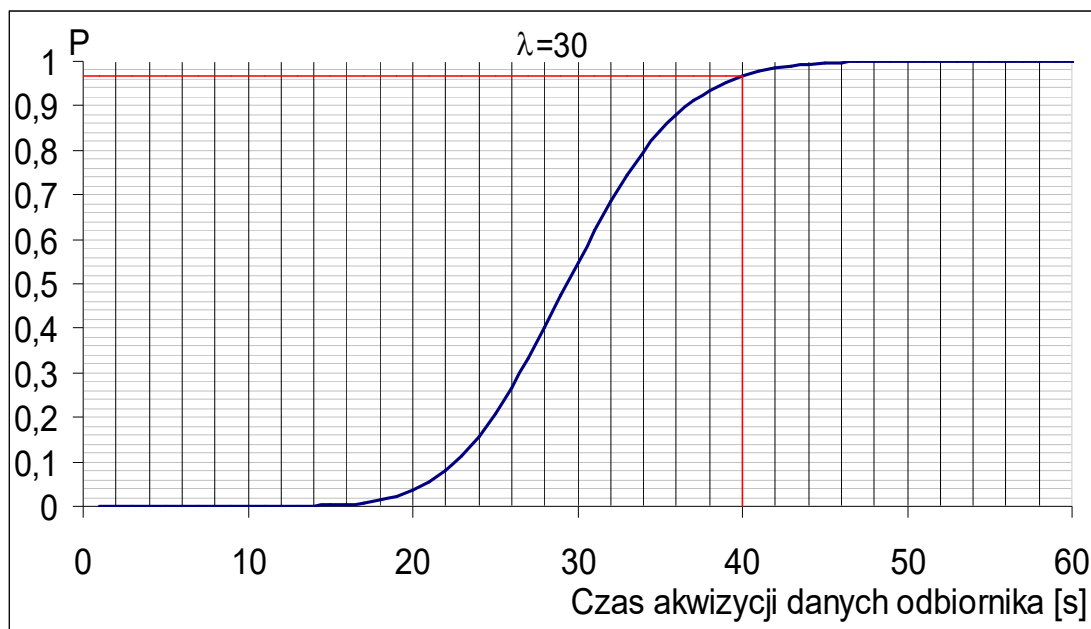
$$p(X = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}, \quad \text{dla } k = 0, 1, 2, \dots \quad (3.4)$$

w którym λ oznacza średni czas nadawania depeasy nawigacyjnej, przy czym, dla potrzeb tej pracy, generator liczb pseudolosowych o takim rozkładzie został wykonany przy użyciu algorytmu opracowanego przez Donalda E. Knutha [45].

Mając natomiast na uwadze parametry eksploatacyjne – patrz punkt 6.1. oraz to, że długość pełnej struktury ramki (rys. 3.8) zawierającej dane w depeasy nawigacyjnej wynosi 2×1560 bitów, z czego wynika całkowity czas transmisji takiej ramki równy 3,12 s. Zatem, aby zapewnić odbiór pełnej wiadomości lokalizacyjnej od odległej stacji referencyjnej, należy przyjąć długość czasu wyłączenia każdego nadajnika równy przynajmniej $2 \times 3,12$ s, tj. 6,24 s. Uwzględniając dodatkowo czas na ustabilizowanie warunków pracy toru nadawczego w momencie wyłączenia i ponownego włączenia tego nadajnika, w wyniku przeprowadzonych badań wystarczająco równy 1,76 s, przyjęto ostatecznie całkowity czas wyłączenia każdego z nadajników równy 8 s.

Na podstawie wykonanych badań przyjęto także, że średni czas nadawania depeasy nawigacyjnej powinien wynosić 30 s. Następnie dla tak przyjętej wartości tego czasu określono

czas akwizycji danych zawartych w odbieranych sygnałach, zwłaszcza pochodzących z nadajników odległych stacji referencyjnych, w którym to czasie powinno mieć miejsce duże prawdopodobieństwo zawieszenia pracy nadajnika blisko położonej stacji referencyjnej. Pomocna w tym była dystrybuanta rozkładu Poissona dla wartości oczekiwanej czasu nadawania równego $\lambda = 30s.$, co przedstawiono na rys. 3.3.



Rys. 3.3. Prawdopodobieństwo wyłączenia nadajnika bliskiej stacji referencyjnej w zależności od czasu akwizycji danych

W oparciu o powyższy wykres przyjęto czas akwizycji danych w odbiorniku równy 40s, dla którego ma miejsce duże prawdopodobieństwo wyłączenia nadajnika bliskiej stacji bazowej równe 0,968, co okazało się wartością zadawalającą dla omawianego systemu radiolokalizacyjnego.

3.3. Opis logiczny łącza radiolokalizacyjnego

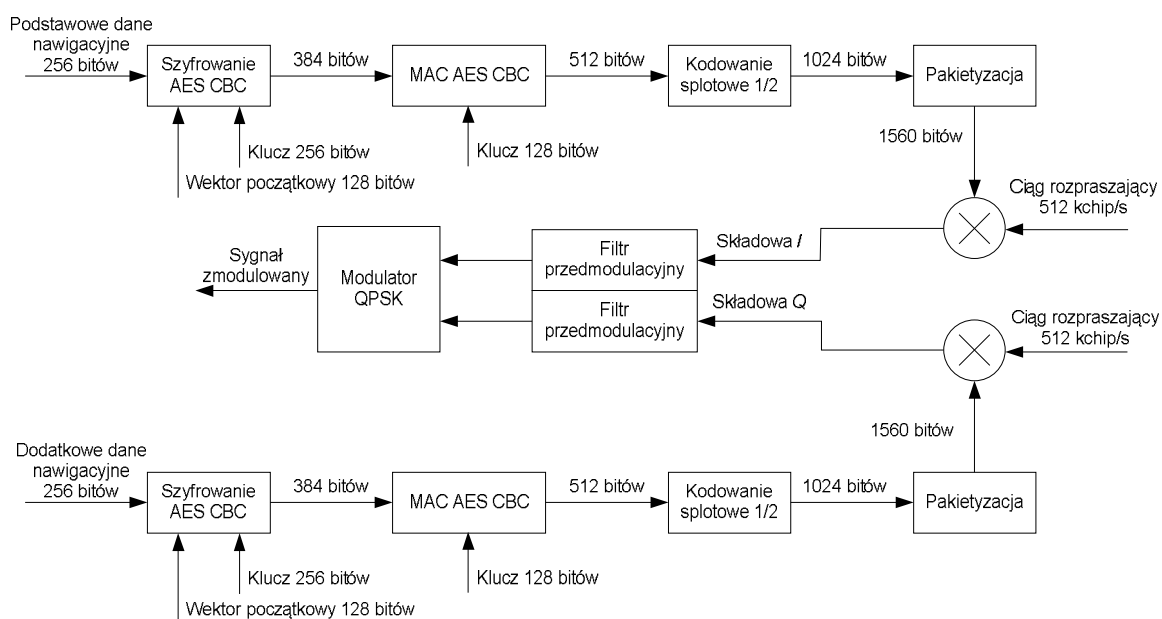
W tym miejscu został przedstawiony opis logiczny części nadawczej i odbiorczej łącza radiolokalizacyjnego z punktu widzenia kształtowania sygnału z depeszą lokalizacyjną w postaci strumienia danych, co wynika z zaproponowanej koncepcji działania hiperbolicznego systemu asynchronicznego, którego działanie w części radiowej jest oparte o technikę dostępu z bezpośrednim rozpraszaniem widma DS-CDMA.

3.3.1. Część nadawcza

Z tego punktu widzenia do istotnych bloków funkcjonalnych, które zostały uwzględnione w części nadawczej łącza radiolokalizacyjnego, należą:

- szyfrowanie, z uwagi na przeznaczenie opisywanego systemu,
- uwierzytelnianie,
- kodowanie splotowe,
- pakietyzacja,
- generacja ciągów rozpraszających,

co zostało przedstawione w postaci schematu blokowego na rys. 3.4. oraz opisane poniżej.

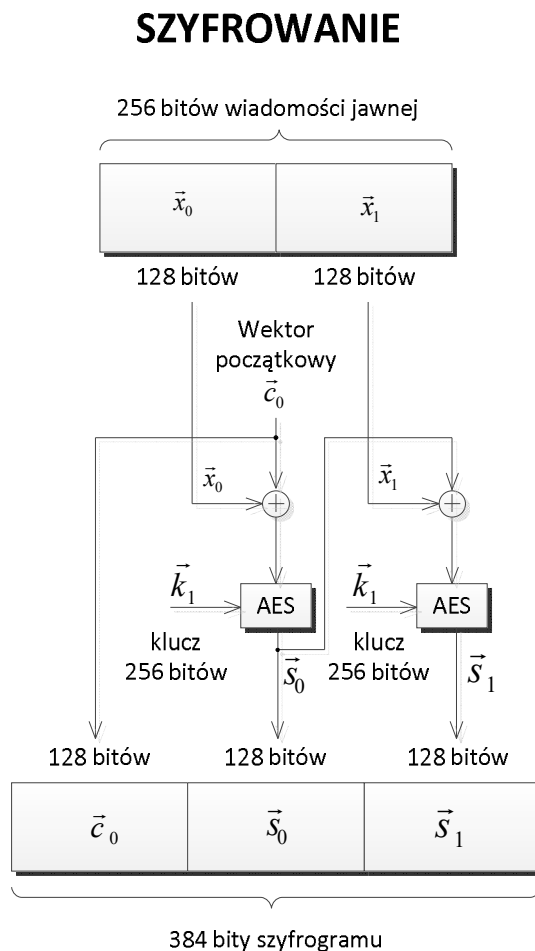


Rys. 3.4. Schemat logiczny toru nadawczego stacji referencyjnej

Szyfrowanie AES CBC

Działanie części nadawczej rozpoczyna się od wprowadzenia danych podstawowych i dodatkowych do niezależnych bloków szyfrujących pracujących z użyciem algorytmu AES (Advanced Encryption Standard) [23, 29, 62, 87], w trybie CBC (Cipher Block Chaining) [23, 29, 34, 62] z kluczem o długości 256 bitów. Zastosowanie takiego trybu pracy umożliwia transmisję danych o dowolnych długościach. W przypadku, gdy liczba bitów tworzących te dane nie jest całkowitą wielokrotnością 128 bitów, konieczne jest zastosowanie bitów dodatkowych w taki sposób, aby wyrównać liczbę bitów do całkowitej wielokrotności 128 bitów.

Sposób przeprowadzeni takiego szyfrowania przedstawiono schematycznie na rys. 3.5, gdzie pokazano jego dwuetapowy przebieg.



Rys. 3.5. Schemat logiczny operacji szyfrowania danych

Jak widać, w pierwszym kroku szyfrowania dane wejściowe zawierają:

- 128-bitowy blok wiadomości jawnej x_0 ,
- 256-bitowy klucz k_1 , oraz
- 128-bitowy wektor początkowy c_0 .

W następnym i kolejnych krokach otrzymany w pierwszym kroku szyfrogram stanowi wektor początkowy, który wraz z kolejnym blokiem wiadomości jawnej służy do otrzymania kolejnego szyfrogramu.

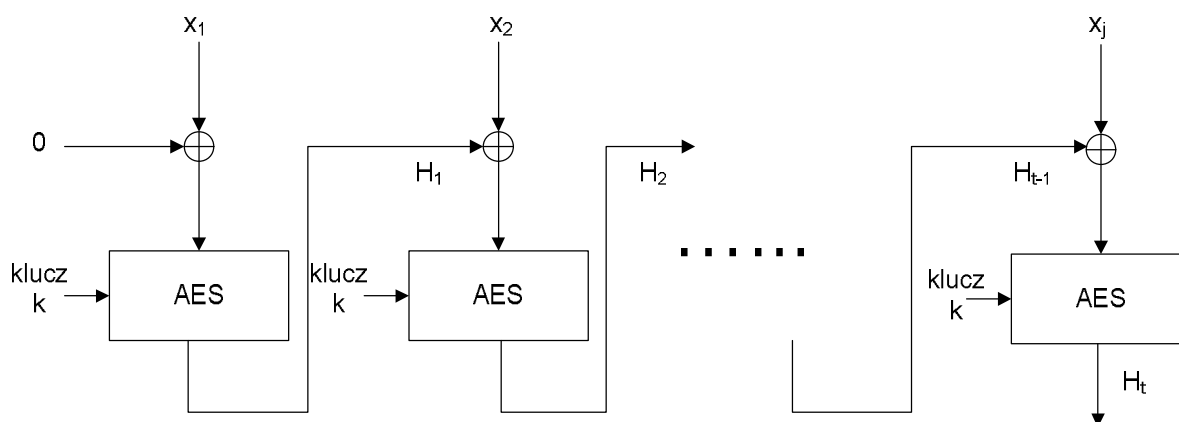
Zaletą stosowania algorytmu AES jest fakt, że dotychczas znane metody kryptoanalizy w tym przypadku są nieprzydatne. Nie istnieją też słabe klucze oraz także nie są znane skuteczne metody ataku na ten algorytm. W zależności od długości klucza, konieczne jest wykonanie od 10 do 14 rund w procesie kryptoanalizy tego algorytmu [75].

Po wykonaniu takiej szyfracji następuje proces wiązania w trybie CBC zaszyfrowanych bloków. Tryb ten wybrano z uwagi na następujące właściwości [62]:

- charakterystyczne fragmenty tekstu, np. nagłówki lub zakończenia wiadomości, są ukrywane poprzez sumowanie *mod 2* z poprzednimi blokami szyfrogramu,
- ciąg wejściowy szyfru blokowego ma charakter losowy także poprzez sumowanie *mod 2* z poprzednimi blokami szyfrogramu,
- więcej niż jedna wiadomość może być szyfrowana przy użyciu tego samego klucza,
- szyfrogram jest dłuższy od tekstu jawnego o wielkość bloku IV (Initialization Vector) i ewentualne dopelnienia,
- jest to tryb samoodtwarzający, tzn. błąd w szyfrogramie wpływa na jeden cały blok tekstu jawnego i odpowiadający mu bit w następnym bloku, zaś kolejne bloki nie zawierają zmian spowodowanych przez ten błąd,
- błąd synchronizacji bitowej nie jest odtwarzalny, tzn. konieczne jest zapewnienie synchronizacji np. przez zastosowanie ramek.

Uwierzytelnianie przy użyciu funkcji skrótu MAC

Następnie, po zaszyfrowaniu, dane te są podawane do bloku MAC AES CBS (Message Authentication Code AES CBS), który to kod będący funkcją skrótu służy dalej do uwierzytelniania i sprawdzania w trakcie transmisji, czy dane nie uległy zaburzeniu (zmianie) w jej trakcie lub na skutek celowej ingerencji zewnętrznej. Dzięki temu nie ma potrzeby stosowania kodowania detekcyjnego. Do wygenerowania kodu MAC zastosowano algorytm AES z kluczem o długości 128 bitów. Schemat funkcjonalny tworzenia kodu MAC przedstawiono na rys. 3.6.



Rys. 3.6. Schemat funkcjonalny tworzenia kodu MAC

W tym miejscu warto zauważyć, że kody MAC mają takie same właściwości jak jednokierunkowe funkcje skrótu, przy czym posiadają dodatkowy klucz, którego znajomość jest konieczna do zweryfikowania skrótu. Kody te mogą służyć do uwierzytelnienia i sprawdzenia oraz są użyteczne w zapewnieniu autentyczności bez wprowadzania utajnienia.

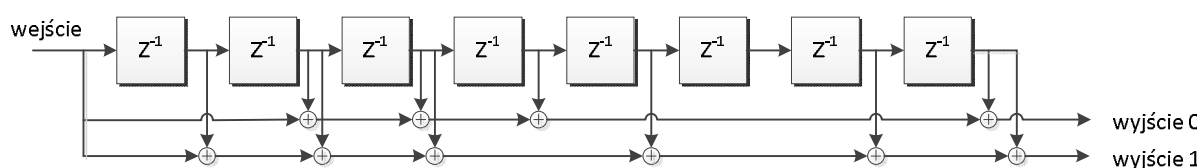
Kodowanie kanałowe przy użyciu splotu

Dalej, w celu korekcji błędów mogących się także zdarzać w trakcie transmisji w kanale radiowym, należy zastosować kodowanie splotowe o sprawności 1/2 lub 1/3, przy czym oba kody są 256 stanowe i charakteryzują się dobrymi zdolnościami korekcyjnymi. W przypadku kodu pierwszego z nich, tzn. o sprawności 1/2, odległość swobodna wynosi 12, zaś dla kodu drugiego wynosi 18 [48, 74]. Zazwyczaj w praktyce zaleca się stosowanie kodu o mniejszej sprawności. Jednakże w przypadku zapotrzebowania na większą szybkość transmisji, konieczne może być stosowanie kodu o wyższej sprawności.

W opisywanym przypadku zastosowano kodowanie splotowe (2,1,9). Jest to ważna klasa kodów korekcyjnych charakteryzująca się prostą budową, dużymi zyskami kodowania i efektywną metodą dekodowania. Zaproponowany koder splotowy ma sprawność 1/2, posiada odległość swobodną równą 12 i jest opisany poniższymi kodami generacyjnymi [78, 54-55]:

$$\begin{aligned} g_0(u) &= 1 + u^2 + u^3 + u^4 + u^8, \\ g_1(u) &= 1 + u + u^2 + u^3 + u^5 + u^7 + u^8, \end{aligned} \quad (3.5)$$

przy czym schemat blokowy takiego kodera splotowego przedstawiono na rys. 3.7, na którym z^{-1} wyraża opóźnienie czasowe równe długości trwania jednego bitu.



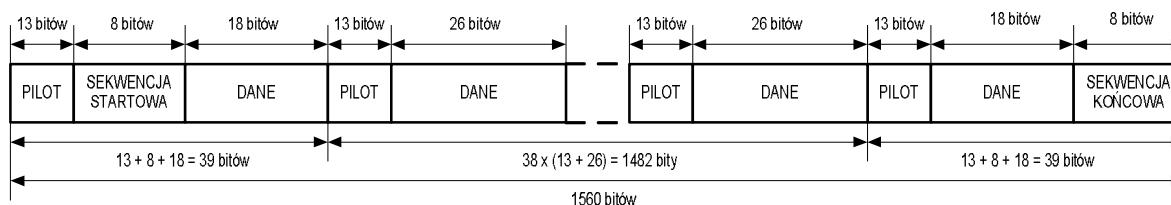
Rys. 3.7. Schemat zastosowanego kodera splotowego (2,1,9) o sprawności 1/2

Istnieje kilka metod dekodowania kodów splotowych. Najpowszechniej stosowanym jest algorytm Viterbiego [72], który został użyty również w tym przypadku.

Pakietyzacja

W kolejnym bloku części nadawczej realizowany jest proces pakietyzacji, który polega na rozdzieleniu zaszyfrowanych danych nawigacyjnych, przy użyciu ciągów pilotowych, oraz

dodaniu na początku i na końcu utworzonej ramki sekwencji początkowej i końcowej, jako znaczników początku i końca transmisji. Strukturę logiczną takiej ramki przedstawiono na rys. 3.8.



Rys. 3.8. Struktura logiczna pełnej ramki danych lokalizacyjnych

Przy czym, w roli ciągów pilotowych zastosowano 13-elementowy ciąg Barkera [18] ($B_{13}=1111100110101$), natomiast sekwencję startową i końcową stanowią ciągi bitowe w postaci odpowiednio (11111110) oraz (00000001).

Generacja ciągów rozpraszających

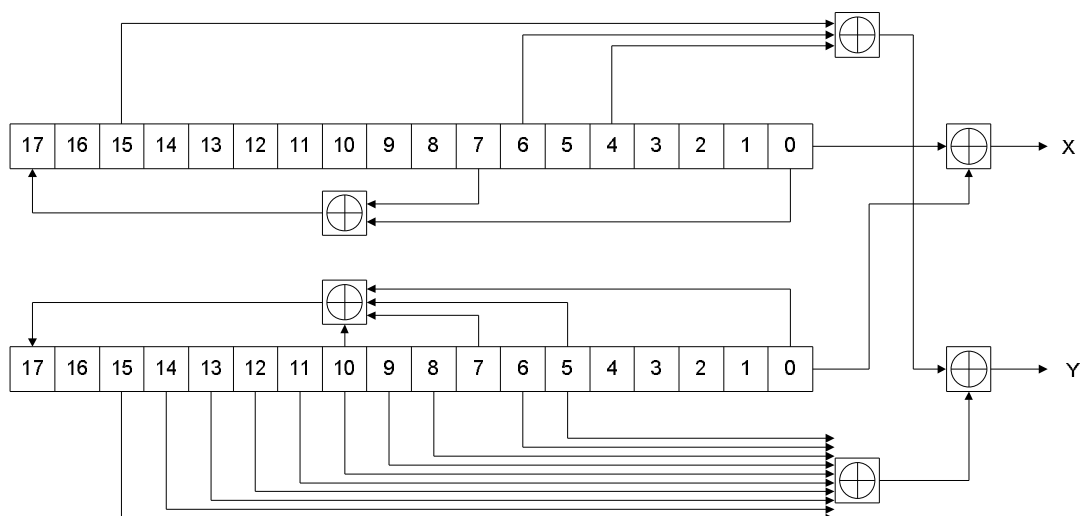
Sekwencja ciągów rozpraszających jest generowana przy użyciu dwóch 18- stanowych rejestrów przesuwanych przedstawionych na rys. 3.9, przy czym wielomiany charakterystyczne dla tych rejestrów opisane są poniższymi zależnościami [77]:

$$X = 1 + x^7 + x^{17}, \quad (3.6)$$

$$Y = 1 + x^5 + x^7 + x^{10} + x^{17},$$

zaś stany początkowe tych rejestrów ustalono w następującej postaci, tzn. dla:

$$X = \{1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0\} \text{ oraz dla } Y = \{1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1\}.$$



Rys. 3.9. Schemat blokowy generatora ciągów rozpraszających

Sposób generowania tych ciągów jest następujący [77]:

- wytwarzanie sekwencji Z według poniższej zależności:

$$Z_n(i) = X((1+n) \text{ modulo } 262143) \oplus Y(i), \quad (3.7.1)$$

gdzie n jest identyfikatorem stacji referencyjnej,

- sumowanie otrzymanego ciągu z postacią własną przesuniętą o 131 072 bity,

- wygenerowanie ostatecznej postaci ciągu rozpraszającego według zależności:

$$S_n(i) = Z_n(i) \oplus Z_n((i+131072) \text{ modulo } 262142), \quad (3.7.2)$$

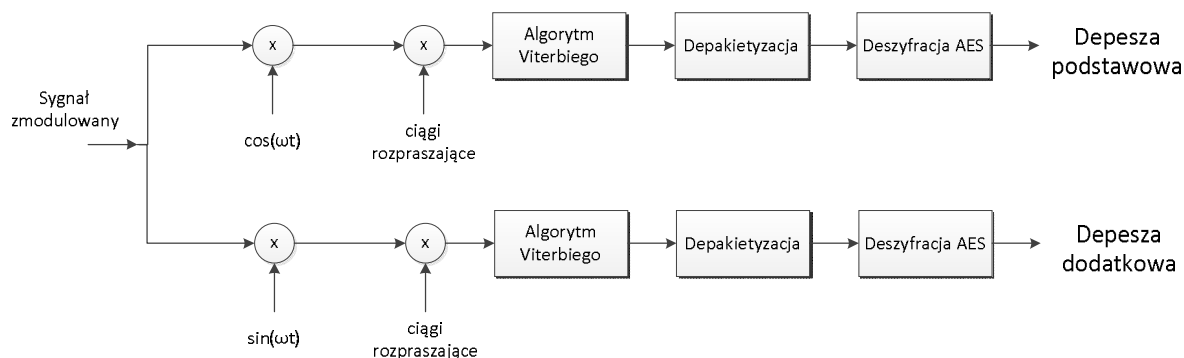
w której operacja \oplus oznacza sumę modulo.

3.3.2. Część odbiorcza

Układ logiczny części odbiorczej wynika ze schematu logicznego części nadawczej przedstawionego na rys. 3.4. Zatem, z punktu widzenia wydobycia ze strumienia odebranych danych dwóch ich zestawów zawartych w depeszy podstawowej (dane podstawowe) i depeszy dodatkowej (dane dodatkowe), do głównych funkcjonalności realizowanych w części odbiorczej należą:

- dekodowanie kodów splotowych,
- depakietyzacja, oraz
- deszyfrowanie,

co z kolei przedstawiono na rys. 3.10.

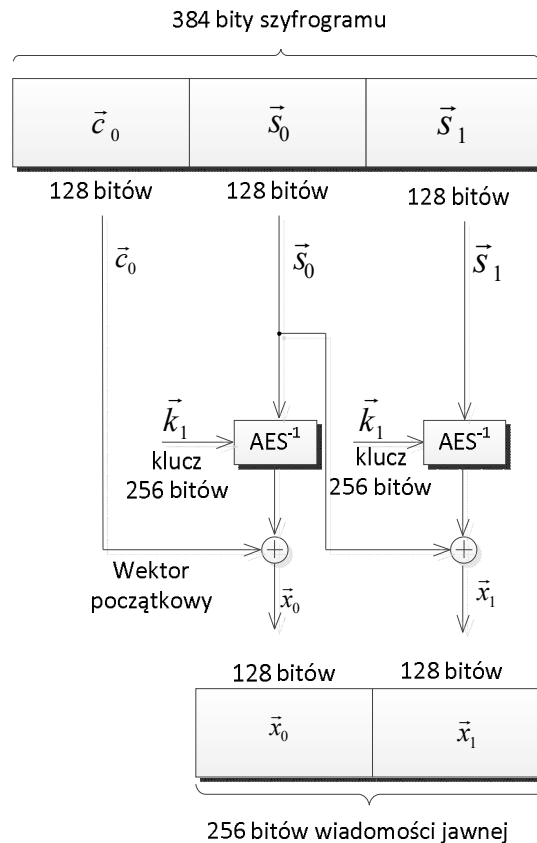


Rys. 3.10. Schemat logiczny toru odbiorczego stacji referencyjnej

Deszyfrowanie

Z wymienionych powyżej głównych funkcjonalności ujętych w układzie logicznym części odbiorczej, w tym miejscu zostanie opisany sposób deszyfracji danych lokalizacyjnych, który wynika ze sposobu ich zaszyfrowania – patrz rys. 3.5. Deszyfracja ta odbywa się w sposób dwuetapowy pokazany na rys. 3.11.

DESZYFROWANIE



Rys. 3.11. Schemat logiczny operacji deszyfrowania danych

Jak widać, pierwszy krok deszyfrowania przeprowadza się w oparciu o dane wejściowe zawierające:

- 128-bitowy blok wiadomości zaszyfrowanej s_0 ,
- 256-bitowy klucz k_1 , oraz
- 128-bitowy wektor początkowy c_0 .

Natomiast w drugim kroku deszyfrowania udział bierze:

- 128-bitowy blok wiadomości zaszyfrowanej s_0 , pełniący rolę wektora początkowego,
- 256-bitowy klucz k_1 , oraz
- 128-bitowy blok wiadomości zaszyfrowanej s_1 .

W rezultacie otrzymuje się dwa 128-bitowe bloki wiadomości jawnej.

Rozdział 4: Badania symulacyjne systemu asynchronicznego

Jak to przyjęto na wstępie, badania wykonane w trakcie realizacji niniejszej rozprawy doktorskiej wykonano w sposób dwuetapowy. Tzn. w pierwszym etapie o charakterze badań symulacyjnych sprawdzono poprawność przyjętych założeń systemowych przy użyciu opracowanego symulatora obliczeniowego. Zaś następnie, w etapie drugim, wykonano badania pomiarowe właściwości zrealizowanego demonstratora technologicznego w rzeczywistym środowisku eksploatacyjnym.

W rozdziale tym przedstawiono pierwszy etap wykonanych badań, a więc opisano:

- budowę przedmiotowego symulatora, tzn. scharakteryzowano jego środowisko programistyczne oraz opracowany algorytm jego działania,
- analizę otrzymanych wyników tych badań, których przedmiotem była efektywność działania asynchronicznego systemu radiolokalizacyjnego, w którym wyznaczanie pozycji wyliczane jest w terminalu użytkownika, na podstawie danych lokalizacyjnych zawartych w sygnałach odbieranych ze stacji referencyjnych, zgodnie z opisem działania takiego systemu przedstawionym w rozdziale 3.

4.1. Symulator systemu do badań

Budowa opisanego w tym miejscu symulatora obliczeniowego wynika z jego przeznaczenia do badań efektywności działania przedmiotowego systemu radiolokalizacyjnego, czego podstawową miarą jest błąd bezwzględny δ_d pomiędzy rzeczywistym (zadaniem) położeniem terminala użytkownika określonym przez współrzędne x_{TU}, y_{TU} , a jego położeniem wyznaczonym przy użyciu obliczeń symulacyjnych określonym przez współrzędne x_{obl}, y_{obl} , co wyraża poniższa dobrze znana zależność [22]:

$$\delta_d = \sqrt{(x_{TU} - x_{obl})^2 + (y_{TU} - y_{obl})^2}. \quad (4.1)$$

Ponadto, badania te przeprowadzono dla dwóch różnych sposobów doboru miejsc lokalizacji terminala użytkownika, tzn. w trybie dla:

- *zadanego obszaru*, co oznacza, że na wybranym obszarze objętym prostokątną siatką, w węzłach której z określoną rozdzielczością przyjęto kolejne położenia tego terminala,

- *zadanej trasy*, tzn., że położenie terminala znajdowało się w dobranych z odpowiednią rozdzielczością kolejnych punktach tej trasy.

Poza tym, dla wybranych zbiorów wyników obliczeń symulacyjnych, dla oceny efektywności działania badanego systemu, zastosowano także powszechnie używane miary w postaci [1, 46, 70]:

- *średniej wartości błędu bezwzględnego* ME_{δ} , gdzie

$$ME_{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_{di}}{N-1}, \quad (4.2.1)$$

- *błędu średniokwadratowego* MSE_{δ} , gdzie

$$MSE_{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_{di}^2}{N-1}, \quad (4.2.2)$$

- *pierwiastka z błędu średniokwadratowego* RMS_{δ} , gdzie

$$RMS_{\delta} = \sqrt{MSE_{\delta}}, \quad (4.2.3)$$

przy czym N oznacza liczebność badanego zbioru.

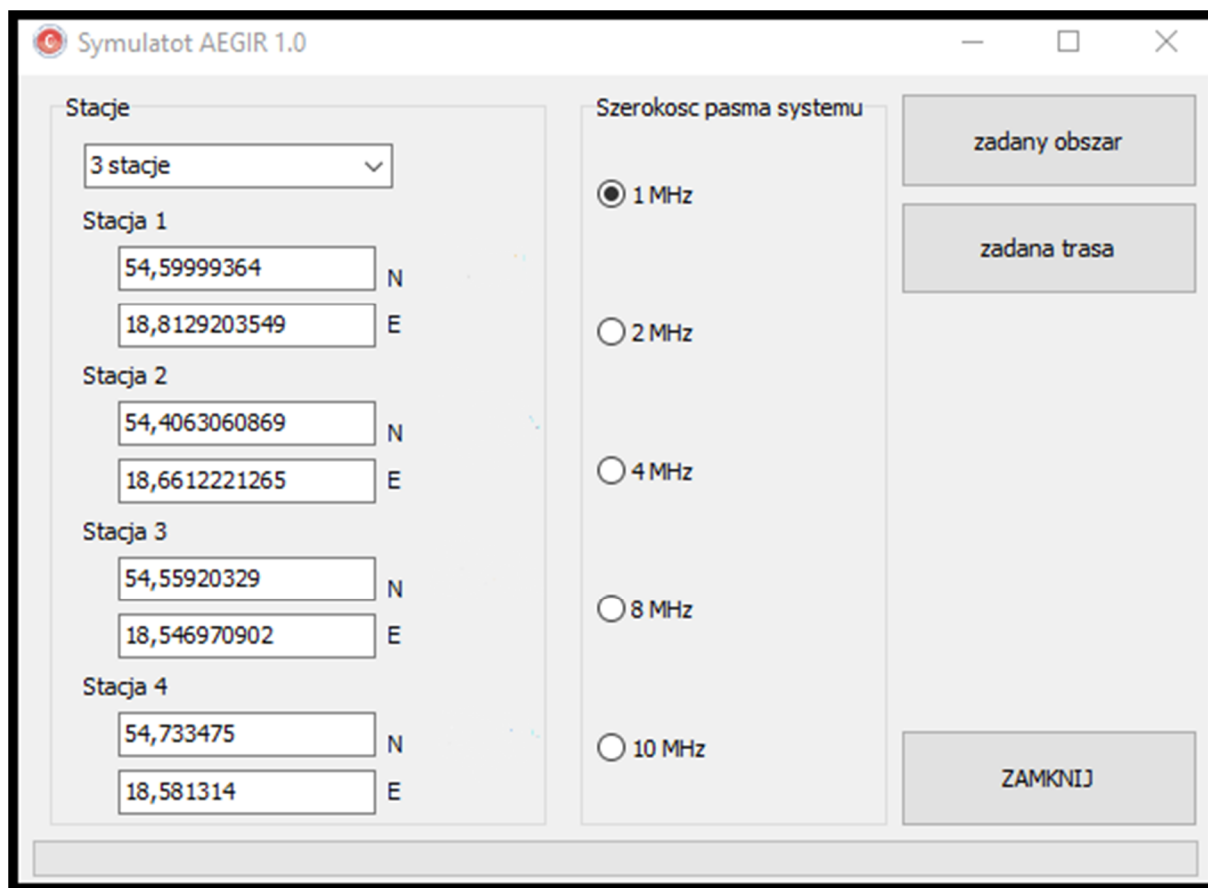
Mając na uwadze powyższe ustalenia, zaprojektowano właściwe do tego środowisko programowe wraz odpowiednią postacią graficzną interfejsu użytkownika oraz algorytm działania tego symulatora.

4.1.1. Środowisko programowe i opis interfejsu użytkownika

Przedmiotowe oprogramowanie zostało napisane przy użyciu języka C++, do czego zastosowano środowisko Builder XE firmy Embarcadero [98]. Program ten się uruchamia na komputerze klasy PC z procesorem Intel i7 (980XT), dysponującym 6GB pamięcią RAM.

Przy użyciu powyżej scharakteryzowanego oprogramowania przeznaczonego do wykonania badań symulacyjnych zrealizowano przedmiotowe obliczenia, przy czym interfejs graficzny umożliwiający obsługę tego symulatora przedstawiono na rys. 4.1.

Jak widać, aby zainicjować obliczenia użytkownik powinien na wstępie w oknie głównym wybrać tryb symulacji określony przez nazwy: *zadany obszar* lub *zadana trasa*. Następnie należy wprowadzić podstawowe dane wejściowe, tzn. współrzędne geograficzne położenia stacji referencyjnych oraz szerokość pasma pracy badanego systemu radiolokalizacyjnego.



Rys. 4.1. Interfejs graficzny symulatora obliczeniowego – okno główne

Przy czym, w przypadku wyboru trybu *zadana trasa* pojawi się podokno do wczytania pliku tekstowego ze współrzędnymi kolejnych lokalizacji terminala użytkownika na tej trasie, co szerzej przedstawiono poniżej, w punkcie: *Algorytmiczny opis działania symulatora*.

4.1.2. Algorytmiczny opis działania symulatora

Działanie tego symulatora, a więc sposób i przebieg wykonywanych obliczeń przedstawiono w postaci algorytmicznej na rys. 4.2.

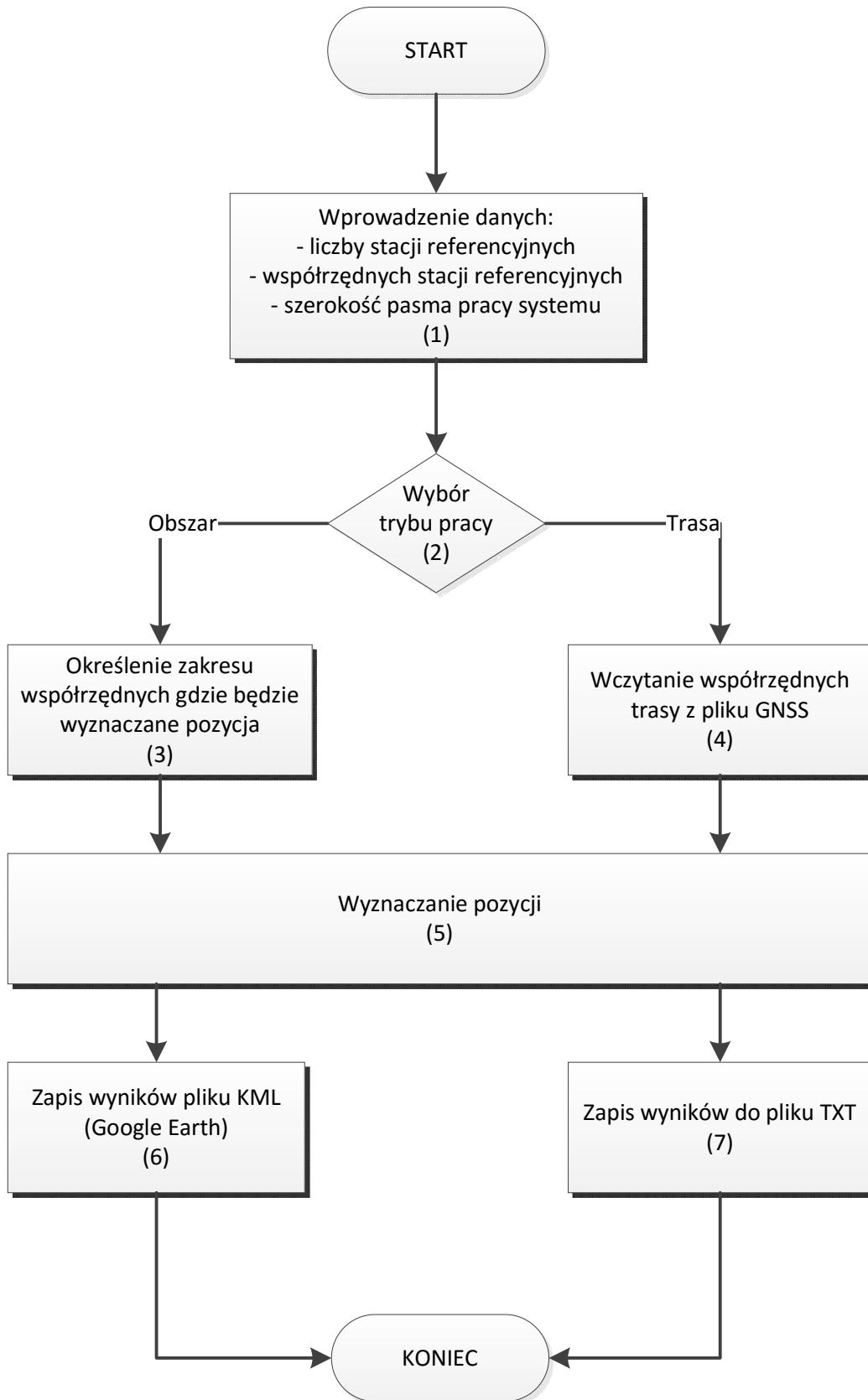
Jak widać, algorytm działania tego symulatora składa się kolejnych bloków funkcjonalnych, na schemacie algorytmicznym ponumerowane poprzez kolejne liczby ujęte w nawiasach, co przedstawia się następująco:

- (1) – wpisanie danych głównych, tzn. współrzędnych geograficznych położenia stacji referencyjnych w układzie WGS-84 [79, 85] oraz szerokości częstotliwościowego pasma pracy systemu,
- (2) – wybór jednego z dwóch trybów pracy symulatora następuje poprzez naciśnięcie jednego z dwóch przycisków (rys. 4.1) w interfejsie graficznym symulatora,

- (3) –w przypadku wyboru trybu *obszar* wyznaczany jest ten obszar na podstawie skrajnych – maksymalnych i minimalnych - wartości wpisanych współrzędnych stacji referencyjnych, co wraz z obliczoną rozdzielczością – patrz zależność (4.3) - określa położenia węzłów prostokątnej siatki, stanowiących miejsca położenia terminala użytkownika przy badaniach obszarowych,
- (4) - natomiast w przypadku wyboru trybu *trasa*, jak to napisano powyżej, wczytywany jest plik tekstowy, ze współrzędnymi kolejnych lokalizacji terminala na zadanej trasie, przy czym dane te mają następującą przykładową postać:
- ```
10:12:48 GPS+GLONASS 54.550125 18.682095
10:12:49 GPS+GLONASS 54.550134 18.682145
```
- (5) - wykonanie obliczeń zmierzających do wyznaczenia współrzędnych położenia terminala użytkownika dla kolejnych punktów jego lokalizacji, w jednym z wybranych trybów symulacji, przy użyciu zależności opisanych w rozdziale trzecim, co zobrazowano w sposób algorytmiczny na rys. 4.3.
- (6) – następnie, dla trybu *obszar* obliczone wyniki są zapisywane do plików z rozszerzeniem KML [92], zgodnie ze specyfikacją Google Earth [91], dla potrzeb dalszych analiz z użyciem zobrazowań na mapie,
- (7) – natomiast dla trybu *trasa* obliczone wyniki są zapisywane do pliku z rozszerzeniem txt, dla potrzeb dalszych analiz z użyciem arkusza kalkulacyjnego.

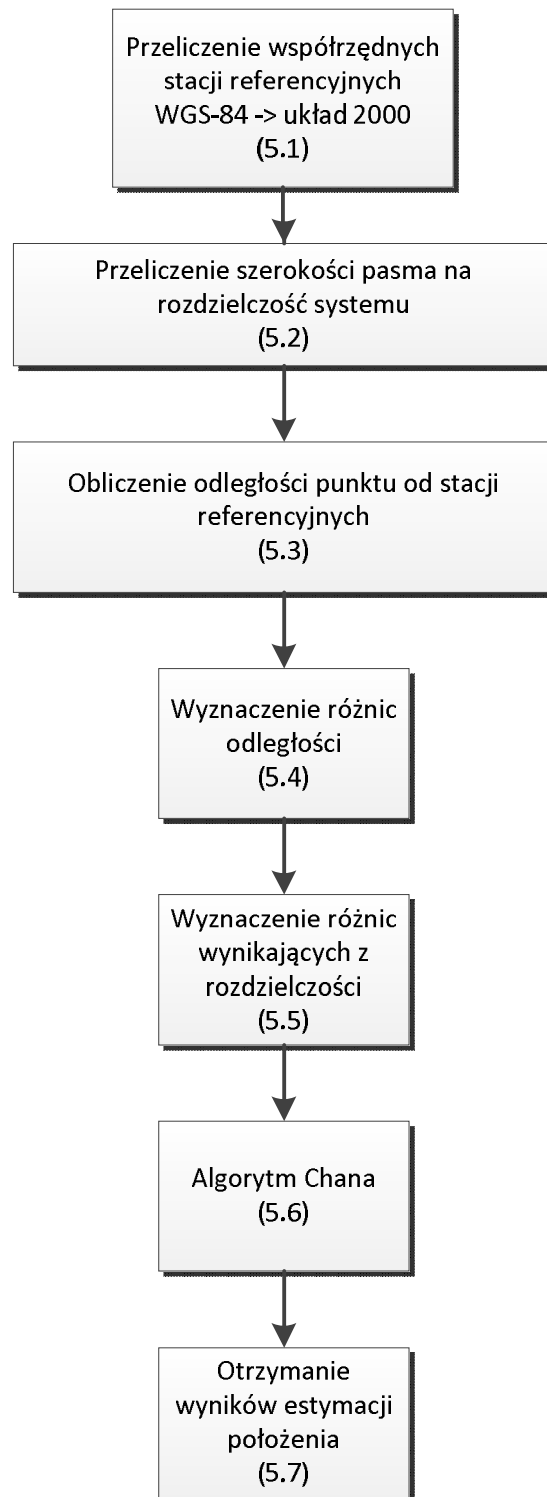
Algorytm przedstawiony na rys. 4.3 opisano w podobny sposób jak na rys. 4.2, przy czym jego działanie składa się z następujących głównych kroków, a mianowicie:

- (5.1) przeliczenie wpisanych współrzędnych geograficznych z układu WGS-84 do układu 2000, przy użyciu odwzorowania Gaussa-Kruggera ,



Rys. 4.2. Algorytm działania symulatora obliczeniowego





Rys. 4.3. Algorytm wyznaczania współrzędnych terminala użytkownika

(5.2) wyliczenie rozdzielczości  $\Delta d_{\min}[m]$  obliczeń na podstawie wpisanej szerokości  $B[MHz]$  pasma pracy, wg zależności:

$$\Delta d_{\min} = \frac{c}{4 \cdot B}, \quad (4.3)$$

w której  $c$  oznacza prędkość rozchodzenia się fali radiowej w środowisku propagacyjnym,

- (5.3) obliczenie rzeczywistej wartości odległości  $d_1$  pomiędzy między położeniem wybranej stacji referencyjnej a położeniem terminala użytkownika,
- (5.4) wyliczenie różnic odległości między parami stacji referencyjnych a zadaną lokalizacją,
- (5.5) przeliczenie różnic odległości wynikające z rozdzielczości  $\Delta d_{\min}$ ,
- (5.6) obliczanie położenia terminala użytkownika przy użyciu zależności (3.3),
- (5.7) zapis wyników w postaci tablicowej w pamięci komputera.

## 4.2. Analiza otrzymanych wyników badań symulacyjnych

Scenariusze wykonanych badań symulacyjnych zostały dostosowane do planowanych w następnej kolejności badań pomiarowych opisanych w rozdziale szóstym niniejszej rozprawy, możliwych do wykonania w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych, mając przy tym na uwadze względy techniczne i organizacyjne, przy czym ważnym czynnikiem także były koszty takich badań.

Powyższe założenie zostało przyjęte z uwagi na zamiar porównania wyników uzyskanych na podstawie obliczeń z wynikami pomiarów wykonanych w warunkach rzeczywistych, co w rezultacie niniejszej rozprawy pozwoliło w sposób przekonujący potwierdzić przyjętą na wstępie tezę i zaplanowane do osiągnięcia cele.

Zatem, na wstępie przyjęto architekturę badanego systemu, tj. określono liczbę i lokalizację stacji referencyjnych tworzących ten system oraz przyjęto plan badań. Następnie przedstawiono istotne zagadnienia związane z efektywnym działaniem badanego systemu radiolokalizacyjnego wraz z podsumowaniem wykonanych badań symulacyjnych, tzn. opisano:

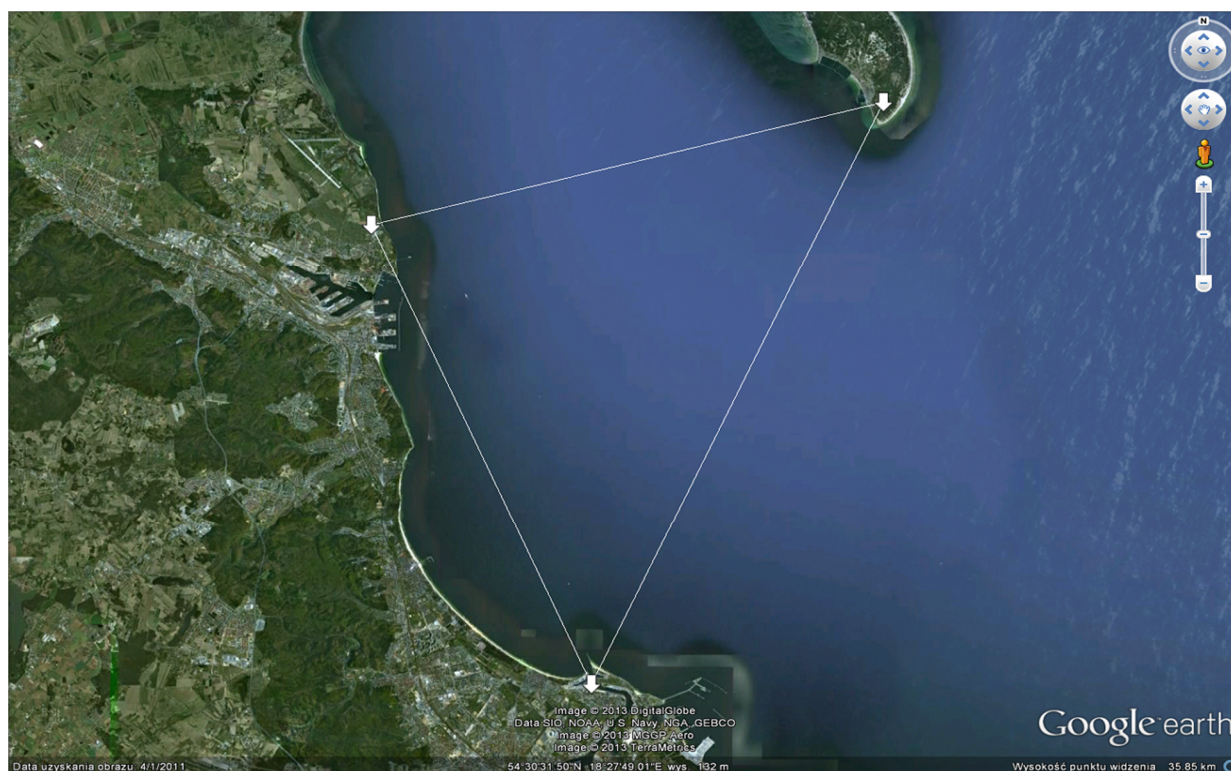
- wyniki badań rozkładu błędu bezwzględnego na *zadanym obszarze*,
- wyniki badań dystrybuanty błędu bezwzględnego dla *zadanych tras*,
- opracowane histogramy błędu bezwzględnego wyników badań symulacyjnych, oraz
- porównawcze podsumowanie wyników wykonanych badań symulacyjnych.

#### 4.2.1. Założona architektura systemu do badań

Ważnym czynnikiem była możliwa do przyjęcia w praktyce liczebność i lokalizacje stacji referencyjnych. Uwzględniając wymienione na wstępie tego podrozdziału uwarunkowania praktyczne, przyjęto dwie możliwe liczebności i konfiguracje położenia tych stacji, tzn.:

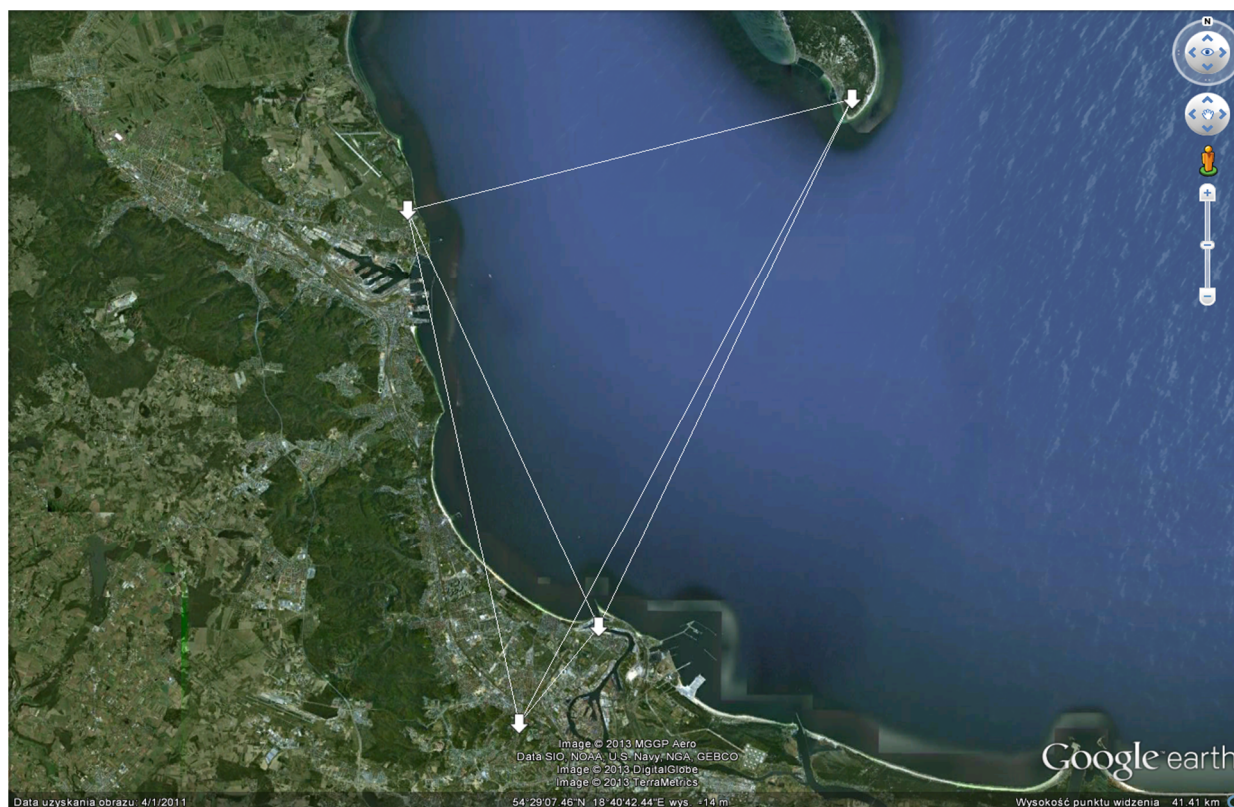
- trzy stacje w konfiguracji podstawowej obejmującej Zatokę Gdańską – stacje te zostały zlokalizowane w budynku OBR CTM w Gdyni, na wieży latarni morskiej na Helu oraz na wieży latarni morskiej w Gdańsku Nowym Porcie, zaś zobrazowanie na mapie ich położenia przedstawiono na rys. 4.4, oraz

- cztery stacje w konfiguracji powiększonej, tzn. z czwartą stacją dodaną do konfiguracji podstawowej, którą umieszczono na dachu Wydziału ETI Politechniki Gdańskiej, co z kolei zobrazowano na rys. 4.5.



Rys. 4.4. Zobrazowanie położenia zestawu trzech stacji referencyjnych

Jak to widać na rys. 4.5, położenie czwartej stacji względem pozostałych stanowiących konfigurację podstawową odbiega od zasady równomiernego rozmieszczenia tych stacji na obszarze objętym zasięgiem działania systemu radiolokalizacyjnego, co może mieć niekorzystny wpływ na działanie tego systemu [21].



Rys. 4.5. Zobrazowanie położenia zestawu czterech stacji referencyjnych

#### 4.2.2. Przyjęty plan badań

Na podstawie tego co zasygnalizowano powyżej, w ramach wykonanych badań symulacyjnych zbadano wpływ szerokości częstotliwościowego pasma pracy oraz liczebności stacji referencyjnych na efektywność pracy asynchronicznego systemu radiolokalizacyjnego, uwzględniając przy tym opisane dwa tryby działania symulatora obliczeniowego, tzn. wykonano badania:

- w trybie *zadany obszar*, pozwalające ocenić możliwości operacyjne tego systemu na zadanym obszarze, oraz
- w trybie *zadana trasa*, pozwalające ocenić działanie systemu dla konkretnej trajektorii poruszania się terminala użytkownika.

Zatem program tych badań obejmował następujące etapy:

- badania rozkładu błędu bezwzględnego  $\delta_a [m]$  - zależność (4.1), na obszarze objętym zasięgiem działania stacji referencyjnych w *konfiguracji podstawowej* (rys. 4.4), przy użyciu w symulatorze trybu *zadany obszar*, dla przyjętych szerokości pasma pracy badanego systemu,

- badania rozkładu błędu bezwzględnego  $\delta_a[m]$ , na obszarze objętym zasięgiem działania stacji referencyjnych w *konfiguracji powiększonej* (rys. 4.5), przy użyciu w symulatorze trybu *zadany obszar*, dla przyjętych szerokości pasma pracy badanego systemu,
- badania dystrybuanty błędu bezwzględnego dla *zadanych tras* przemieszczania się terminala użytkownika na obszarze objętym zasięgiem działania stacji referencyjnych w *konfiguracji podstawowej* (rys. 4.4), przy użyciu w symulatorze trybu *zadana trasa*, dla przyjętych szerokości pasma pracy badanego systemu,
- badania dystrybuanty błędu bezwzględnego dla *zadanych tras* przemieszczania się terminala użytkownika na obszarze objętym zasięgiem działania stacji referencyjnych w *konfiguracji powiększonej* (rys. 4.5), przy użyciu w symulatorze trybu *zadana trasa*, dla przyjętych szerokości pasma pracy badanego systemu,
- opracowanie histogramów błędu bezwzględnego wyników badań symulacyjnych, dla obu konfiguracji stacji referencyjnych oraz dla wybranych szerokości pasma pracy systemu,
- opracowanie stabelaryzowanego porównania efektywności pracy badanego systemu dla wybranych szerokości pasma pracy, z uwzględnieniem obu konfiguracji stacji referencyjnych, przy użyciu miar w postaci średniej wartości błędu bezwzględnego  $ME$ , błędu średniokwadratowego  $MSE$  oraz pierwiastka z błędu średniokwadratowego  $RMS$ .

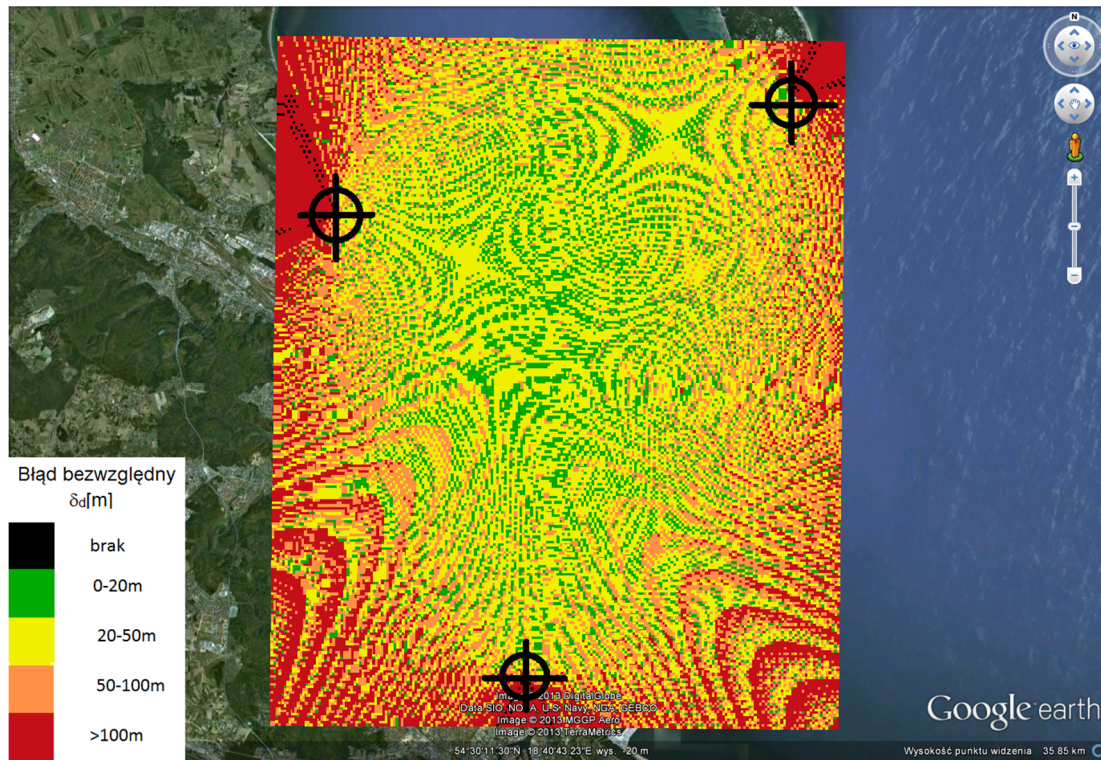
#### 4.2.3. Wyniki badań rozkładu błędu bezwzględnego na *zadanych obszarze*

W tym miejscu przedstawiono wybrane reprezentatywne wyniki takich badań wykonanych dla obu konfiguracji stacji referencyjnych, w postaci graficznej na mapie podkładowej obszaru objętego zasięgiem działania tych stacji, dla przyjętych szerokości pasma pracy takiego systemu wynoszących: 1, 2, 4, 8, i 10 MHz. Na mapach tych zaznaczono przy użyciu znaku  $\oplus$  położenie stacji referencyjnych.

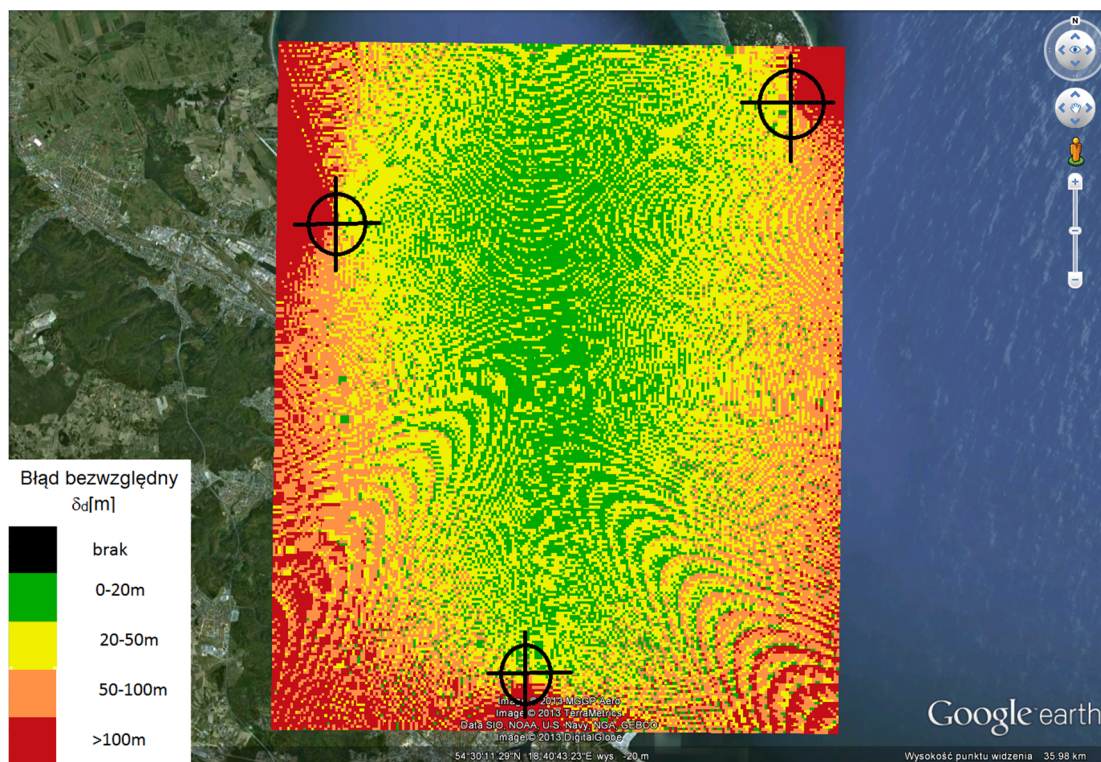
Pierwszy zestaw tych wyników dla *konfiguracji podstawowej* stacji referencyjnych przedstawiono na kolejnych rys. od 4.6 do 4.10.

Natomiast drugi zestaw tych wyników dla *konfiguracji powiększonej* stacji referencyjnych przedstawiono na kolejnych rys. od 4.11 do 4.15.



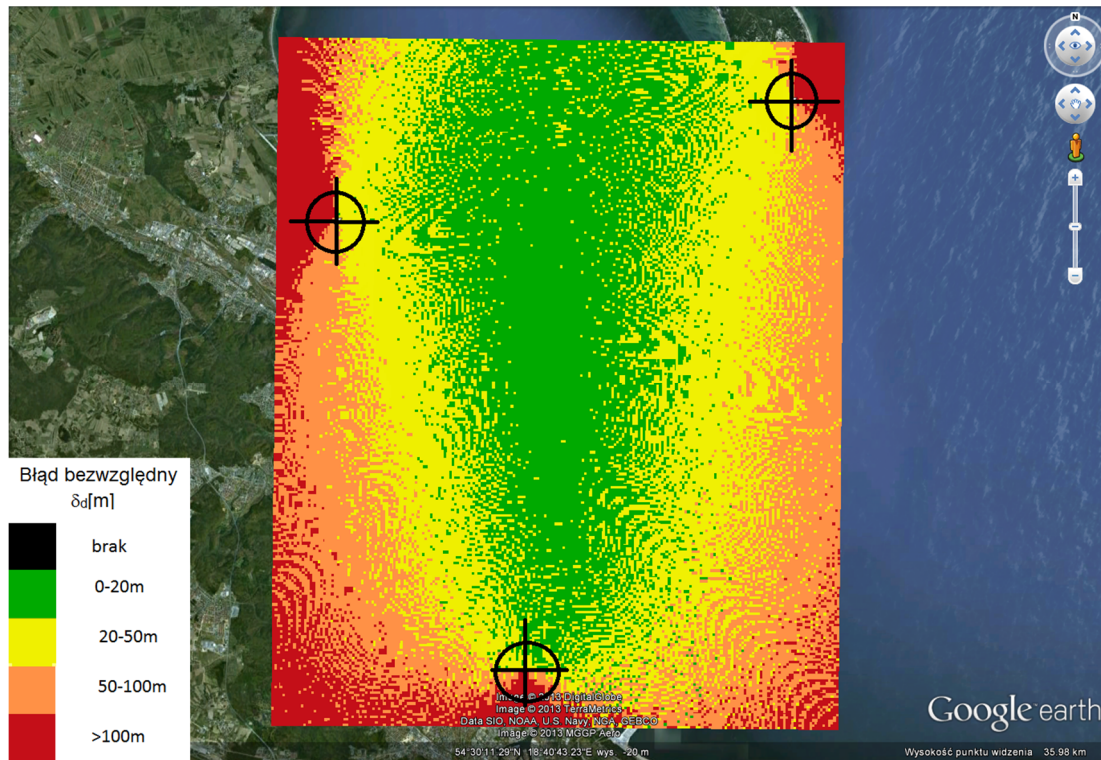


Rys. 4.6. Rozkład obszarowy błędu bezwzględnego  $\delta_d$ [m] dla konfiguracji podstawowej, dla szerokości pasma pracy 1 MHz

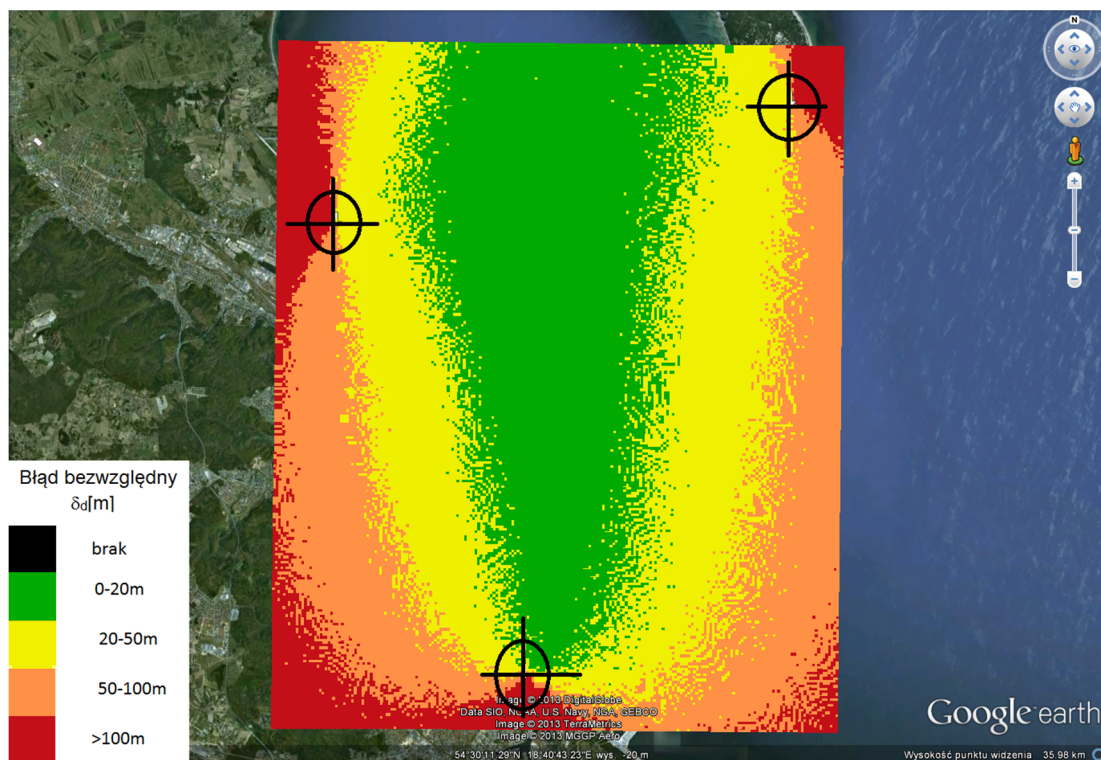


Rys. 4.7. Rozkład obszarowy błędu bezwzględnego  $\delta_d$ [m] dla konfiguracji podstawowej, dla szerokości pasma pracy 2 MHz

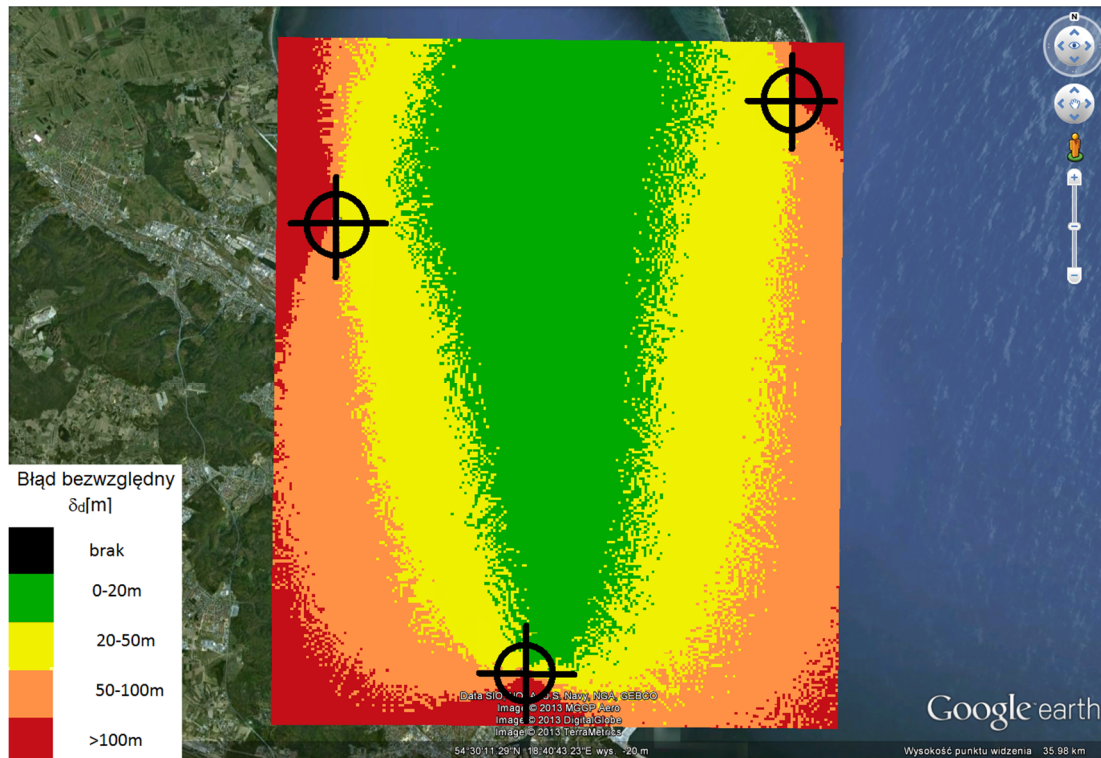




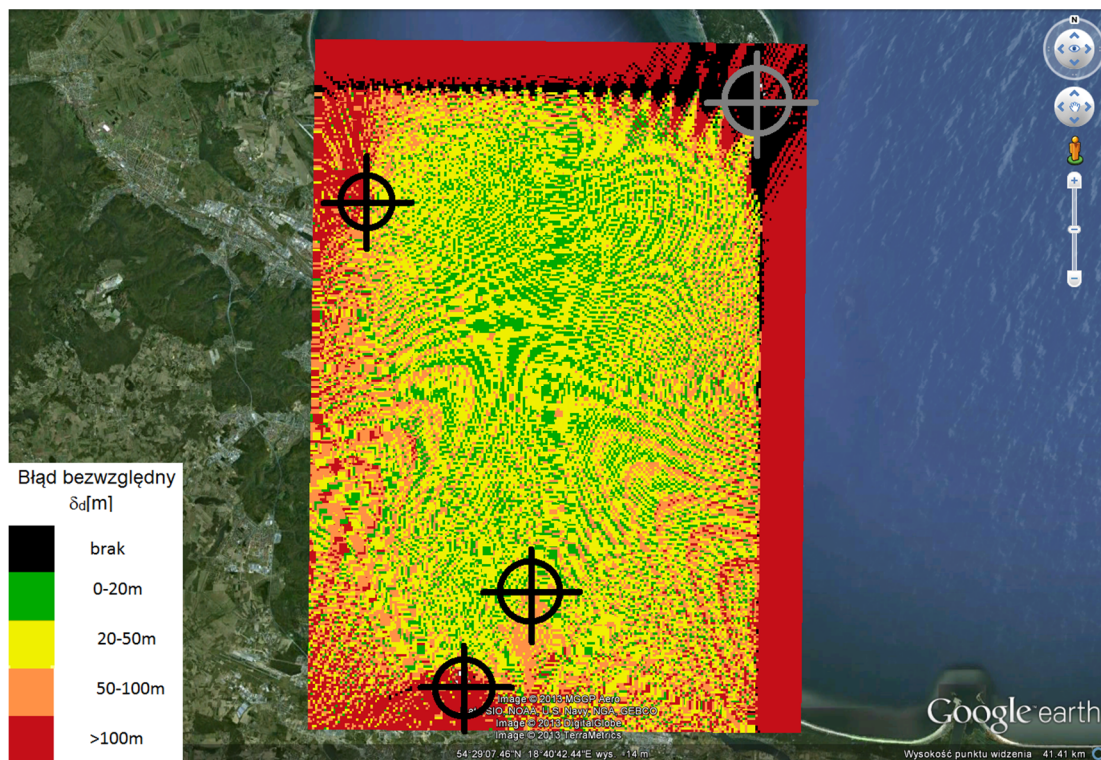
Rys. 4.8. Rozkład obszarowy błędu bezwzględnego  $\delta_d$ [m] dla konfiguracji podstawowej, dla szerokości pasma pracy 4 MHz



Rys. 4.9. Rozkład obszarowy błędu bezwzględnego  $\delta_d$ [m] dla konfiguracji podstawowej, dla szerokości pasma pracy 8 MHz

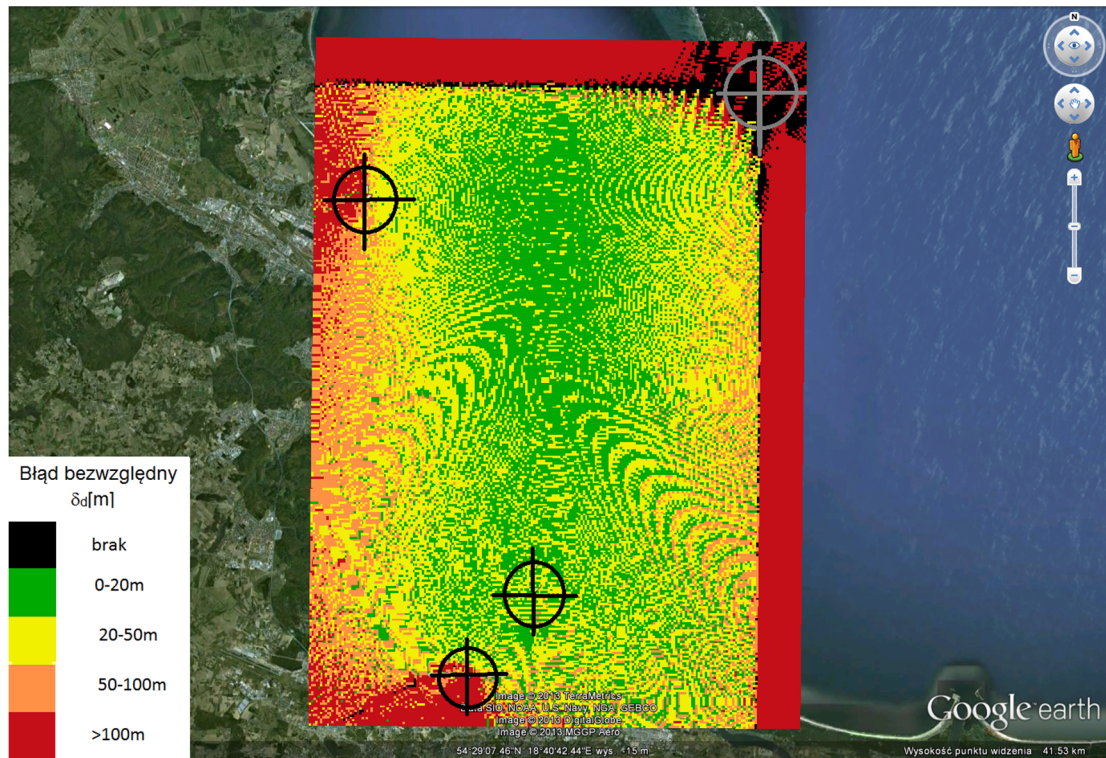


Rys. 4.10. Rozkład obszarowy błędu bezwzględnego  $\delta_d$  [m] dla konfiguracji podstawowej, dla szerokości pasma pracy 10 MHz

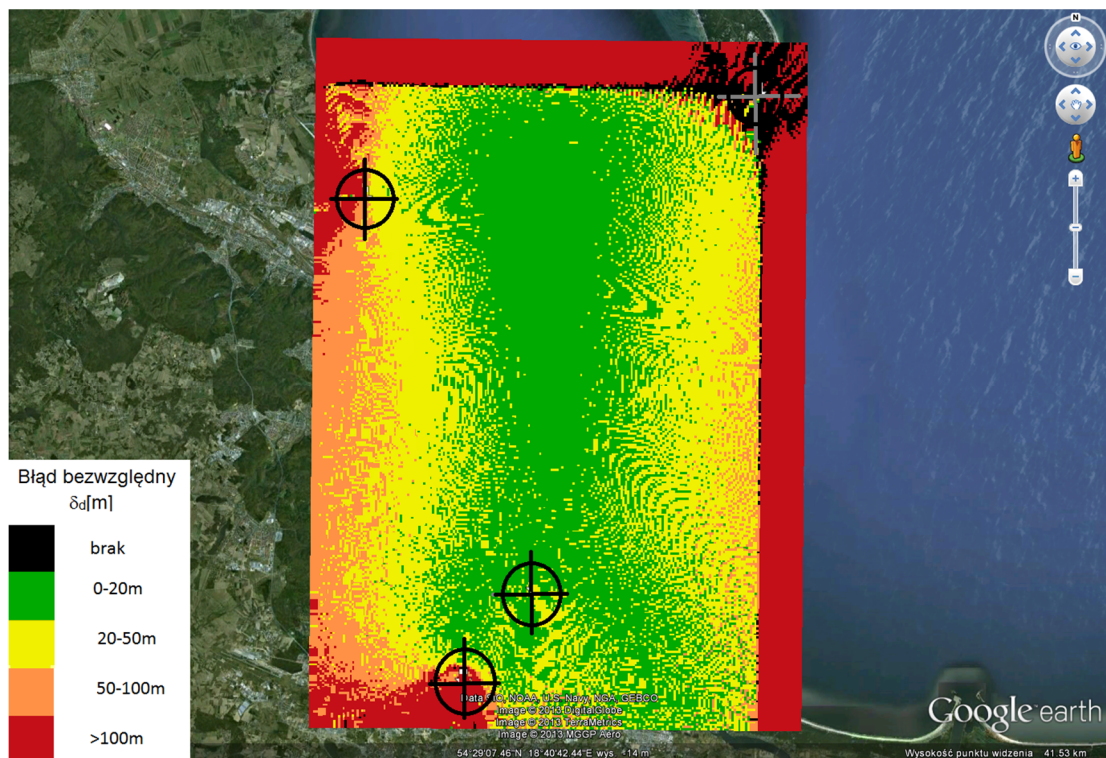


Rys. 4.11. Rozkład obszarowy błędu bezwzględnego  $\delta_d$  [m] dla konfiguracji powiększonej, dla szerokości pasma pracy 1 MHz





Rys. 4.12. Rozkład obszarowy błędu bezwzględnego  $\delta_d$ [m] dla konfiguracji powiększonej, dla szerokości pasma pracy 2 MHz

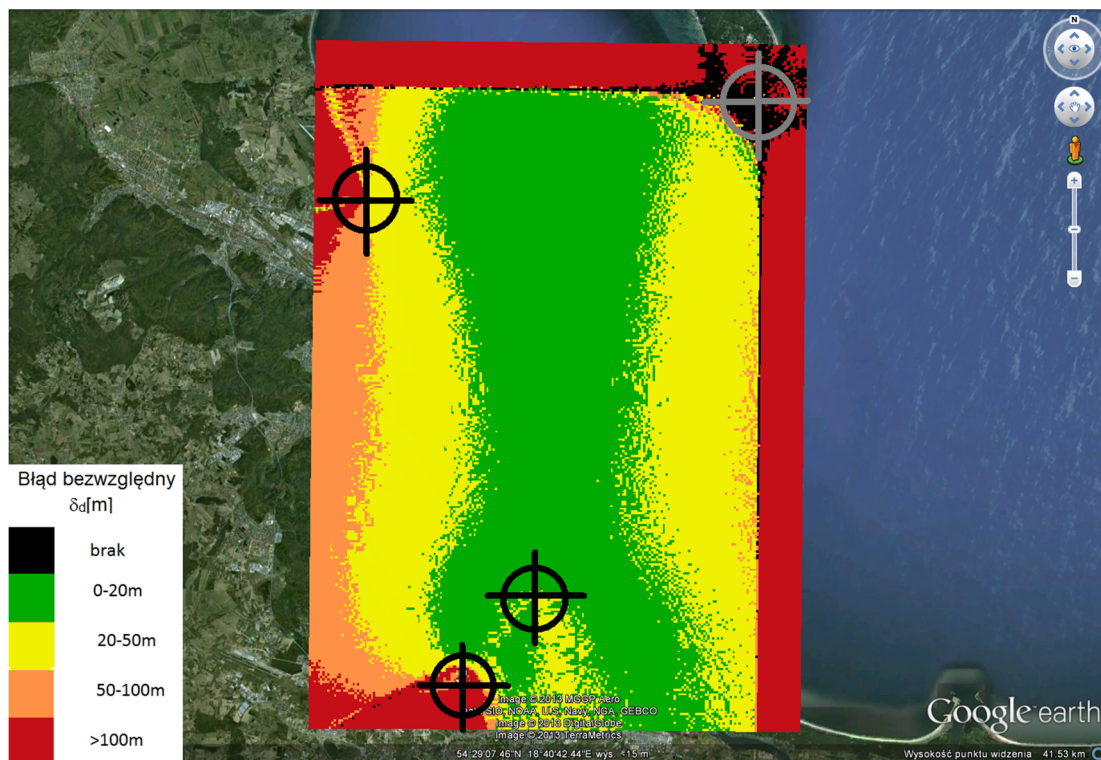


Rys. 4.13. Rozkład obszarowy błędu bezwzględnego  $\delta_d$ [m] dla konfiguracji powiększonej, dla szerokości pasma pracy 4 MHz





Rys. 4.14. Rozkład obszarowy błędu bezwzględnego  $\delta_d$ [m] dla konfiguracji powiększonej, dla szerokości pasma pracy 8 MHz



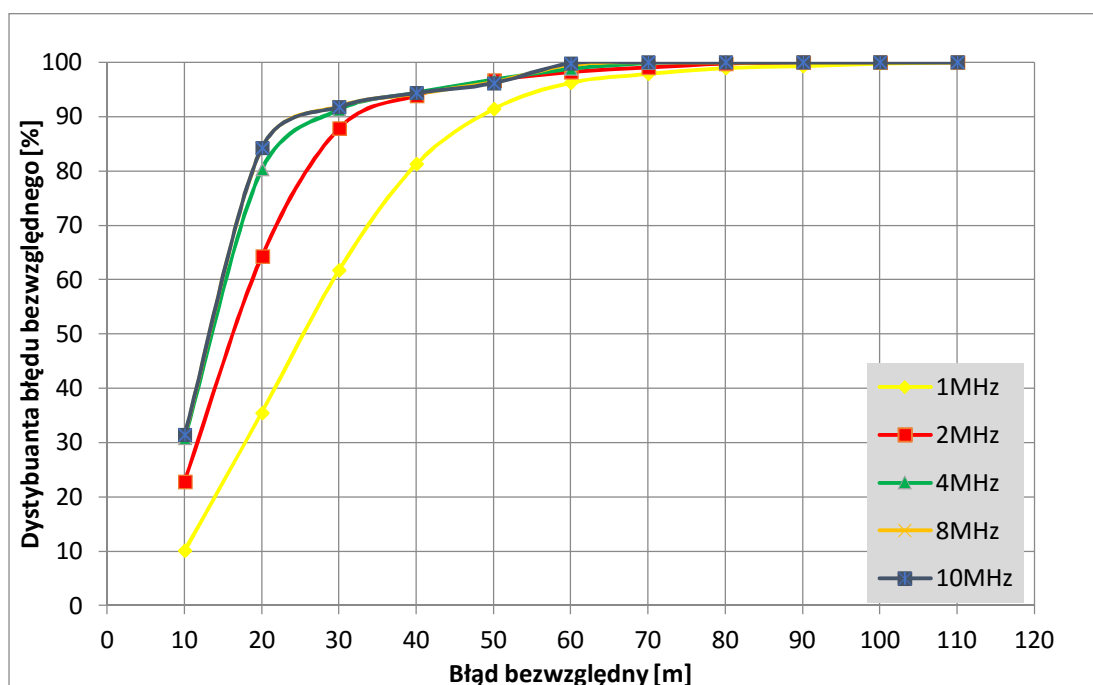
Rys. 4.15. Rozkład obszarowy błędu bezwzględnego  $\delta_d$ [m] dla konfiguracji powiększonej, dla szerokości pasma pracy 10 MHz

Analizując wyniki badań przedstawione na powyższych rysunkach można stwierdzić, że system ten zapewnia dostęp do usługi radiolokalizacyjnej na całym wewnętrznym obszarze objętym lokalizacjami stacji referencyjnych, jednakże z różną dokładnością - błąd bezwzględny jest tym mniejszy im bardziej centralne jest położenie terminala użytkownika względem położenia stacji referencyjnych. Dodanie kolejnej stacji referencyjnej, nawet tak niekorzystnie usytuowanej jak to przyjęto w zestawie powiększonym, powiększa obszar występowania mniejszej wartości błędu bezwzględnego.

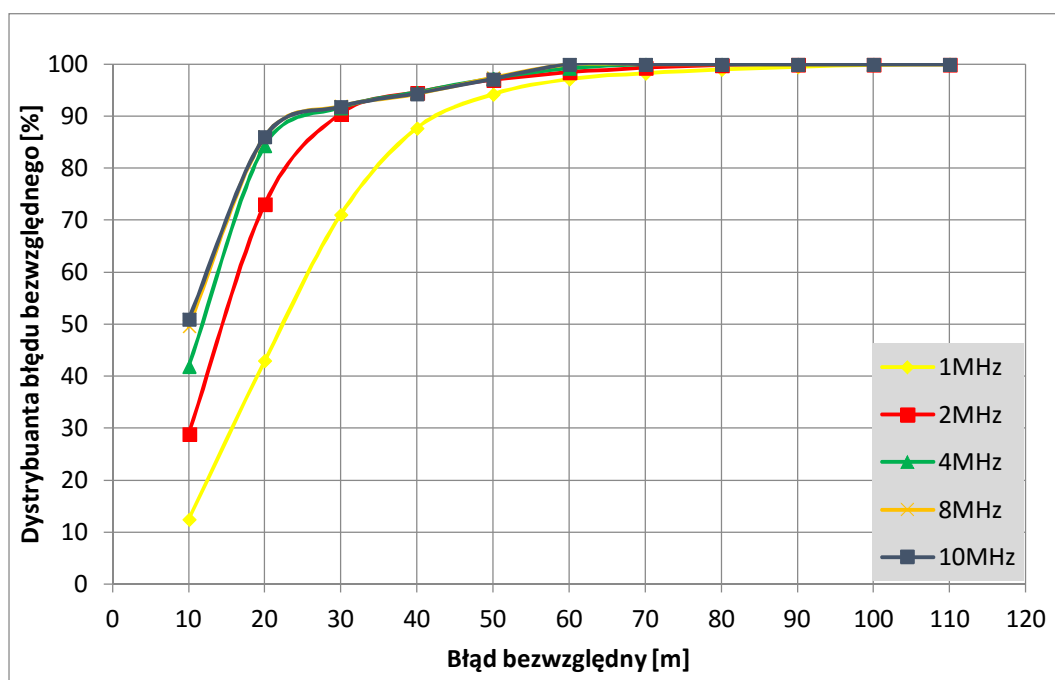
Poza tym można stwierdzić, że istotnym czynnikiem zwiększającym efektywność działania przedmiotowego systemu na danym obszarze jest szerokość jego częstotliwościowego pasma pracy, która jest tym lepsza im większe jest to pasmo.

#### 4.2.4. Wyniki badań dystrybuanty błędu bezwzględnego dla *zadanych tras*

Natomiast w tym podpunkcie przedstawiono wybrane reprezentatywne wyniki takich badań wykonanych dla obu konfiguracji stacji referencyjnych, w postaci wykresów, dla przyjętych jak poprzednio szerokości pasma pracy takiego systemu wynoszących: 1, 2, 4, 8, i 10 MHz. Otrzymane wyniki dla *konfiguracji podstawowej* stacji referencyjnych przedstawiono na rys. 4.16, zaś dla *konfiguracji powiększonej* stacji referencyjnych na rys. 4.17.



Rys. 4.16. Dystrybuanta błędów bezwzględnych  $\delta_d [m]$  - 3 stacje referencyjne, dla *konfiguracji podstawowej*, dla przyjętych szerokości pasma pracy badanego systemu

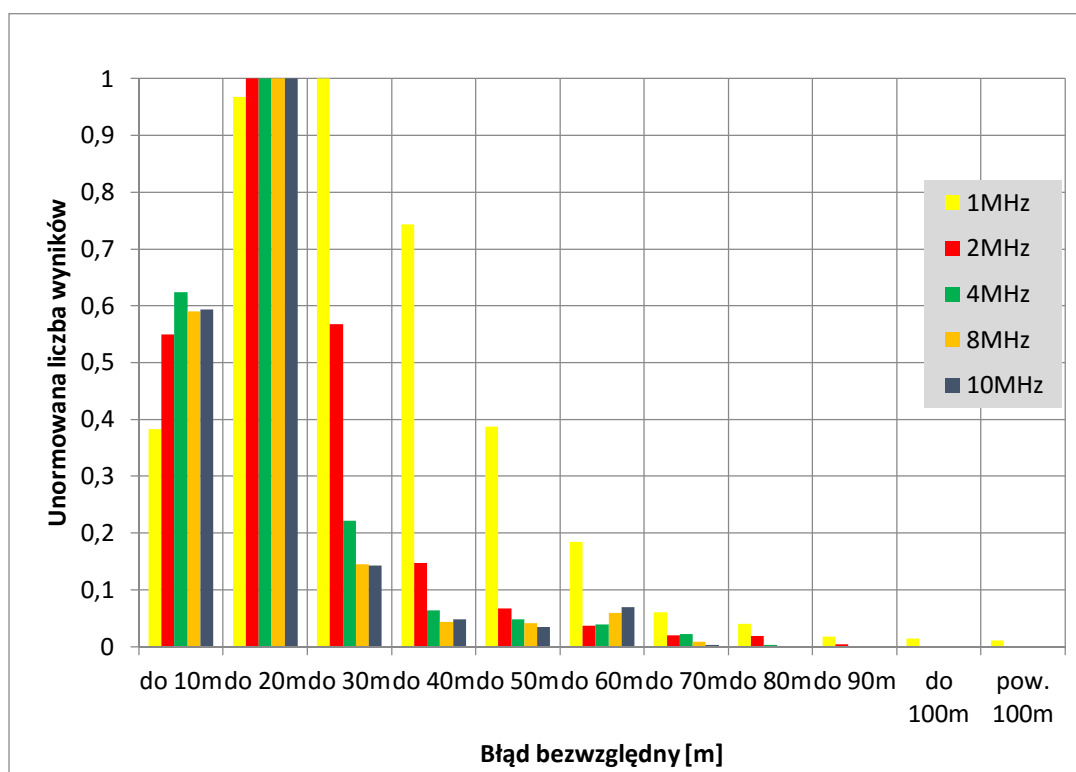


Rys. 4.17. Dystrybuanta błędów bezwzględnych  $\delta_d$  [m] - 4 stacje referencyjne, dla konfiguracji powiększonej, dla przyjętych szerokości pasma pracy badanego systemu

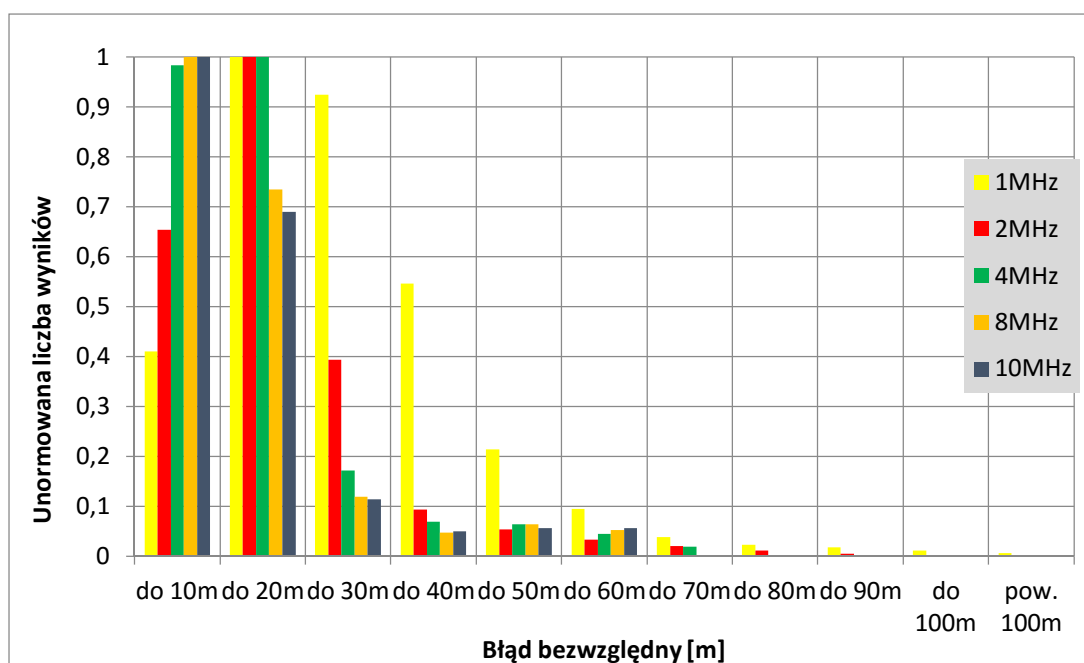
Wyniki badań przedstawione na powyższych rysunkach potwierdzają wnioski opisane w poprzednim podpunkcie, zwłaszcza istotny wpływ szerokości częstotliwościowego pasma pracy na efektywność działania asynchronicznego systemu radiolokalizacyjnego z widmem rozproszonym. Ponadto, także w tych badaniach potwierdza się spostrzeżenie, że dodanie kolejnej stacji referencyjnej poprawia tę efektywność.

#### 4.2.5. Histogramy błędów bezwzględnych wyników badań symulacyjnych

Dla poglądowo lepszego przedstawienia uwarunkowań efektywności pracy badanego systemu, na podstawie wykonanych badań symulacyjnych opracowano unormowane histogramy błędów bezwzględnych wyników tych badań symulacyjnych, dla obu konfiguracji stacji referencyjnych oraz dla wybranych szerokości pasma pracy systemu, co zostało przedstawione na rys. 4.18 i 4.19. Unormowanie, które pozwala na porównanie zestawów wyników o różnej liczebności, zostało wykonane do maksymalnej liczby wyników danego przypadku pomiarowego.



Rys. 4.18. Histogram błędu bezwzględnego  $\delta_d [m]$  - 3 stacje referencyjne, dla konfiguracji podstawowej, dla przyjętych szerokości pasma pracy badanego systemu



Rys. 4.19. Histogram błędu bezwzględnego  $\delta_d [m]$  - 4 stacje referencyjne, dla konfiguracji powiększonej, dla przyjętych szerokości pasma pracy badanego systemu

Wyniki badań przedstawione na powyższych rysunkach również potwierdzają wnioski opisane w poprzednich podpunktach, a więc wpływ szerokości częstotliwościowego pasma pracy na efektywność działania asynchronicznego systemu radiolokalizacyjnego z widmem

rozproszonym. Ponadto, także w tych badaniach potwierdza się spostrzeżenie, że dodanie kolejnej stacji referencyjnej ma wpływ na efektywność pracy przedmiotowego systemu radiolokalizacyjnego.

#### 4.2.6. Podsumowanie wyników badań symulacyjnych

Podsumowując wszystkie otrzymane wyniki wykonanych badań symulacyjnych opracowano tabelaryzowane porównanie efektywności pracy badanego systemu dla wybranych szerokości pasma pracy, z uwzględnieniem obu konfiguracji stacji referencyjnych, przy użyciu miar w postaci średniej wartości błędu bezwzględnego  $ME_{\delta}$ , błędu średniokwadratowego  $MSE_{\delta}$  oraz pierwiastka z błędu średniokwadratowego  $RMS_{\delta}$ , co przedstawiono w poniższej tab. 4.1.

Tab. 4.1. Zestawienie porównawcze błędów:  $ME_{\delta}$ ,  $MSE_{\delta}$  i  $RMS_{\delta}$ , dla obu konfiguracji stacji referencyjnych, dla przyjętych szerokości pasma pracy badanego systemu

|                | 1MHz     |          | 2MHz     |          | 4MHz     |          | 8MHz     |          | 10MHz    |          |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                | 3 stacje | 4 stacje | 3 stacje | 4 stacje | 3 stacje | 4 stacje | 3 stacje | 4 stacje | 3 stacje | 4 stacje |
| $ME_{\delta}$  | 27,86    | 24,79    | 18,78    | 16,86    | 15,75    | 14,14    | 15,14    | 13,53    | 15,09    | 13,47    |
| $MSE_{\delta}$ | 1035,39  | 838,79   | 510,20   | 430,15   | 378,02   | 324,92   | 345,61   | 298,92   | 342,95   | 296,34   |
| $RMS_{\delta}$ | 32,18    | 28,96    | 22,59    | 20,74    | 19,44    | 18,03    | 18,59    | 17,29    | 18,52    | 17,21    |

Na podstawie tego zestawienia można sformułować wnioski końcowe wpływające z analizy wyników wykonanych badań symulacyjnych, mając na uwadze czynniki istotnie wpływające na efektywność pracy asynchronicznego systemu radiolokalizacyjnego z widmem rozproszonym, a mianowicie dokonać oceny wpływu:

- szerokości częstotliwościowego pasma pracy systemu, oraz
- wpływu liczby stacji referencyjnych,

na tę efektywność, której miarą mogą być błędy przytoczone w tab. 4.1.

Zatem, jak to wynika ze wszystkich danych zebranych w tab. 4.1, najmniejsze wartości wszystkich rodzajów błędów otrzymano dla scenariusza badawczego, który dotyczył *powiększonej konfiguracji* stacji referencyjnych, tj. o liczebności czterech stacji, pracujących z największą z przyjętych wartości szerokości częstotliwościowego pasma pracy badanego systemu, tj. równej 10 MHz. Pod tym względem najgorszą efektywnością charakteryzuje się system o *podstawowej konfiguracji*, tj. o liczebności trzech stacji, pracujących z najmniejszą

z przyjętych wartości szerokości jego częstotliwościowego pasma pracy, tj. równej 1 MHz. Powyższe właściwości, w mniejszym lub większym stopniu, zaobserwowano w trakcie wykonywania wszystkich etapów badań symulacyjnych.

## Rozdział 5: Demonstrator technologiczny do badań pomiarowych

Zgodnie z przyjętym planem badawczym, opisane w poprzednim rozdziale badania symulacyjne zostały zweryfikowane w oparciu o badania pomiarowe wykonane w rzeczywistym środowisku eksploatacyjnym. Wymagało to przygotowania stanowiska badawczo-pomiarowego. Okolicznością sprzyjającą wykonaniu tego zadania była realizacja projektu badawczo-rozwojowego, którego celem było zaprojektowanie i wykonanie demonstratora technologicznego asynchronicznego systemu radiolokalizacyjnego pracującego z zastosowaniem sygnałów radiowych z widmem rozproszonym, o czym zasygnalizowano na wstępie tej rozprawy.

W tym rozdziale przedstawiono budowę i możliwości badawcze tego demonstratora, zgodnie z przyjętą koncepcją systemu radiolokalizacyjnego opisaną w rozdziale trzecim niniejszej rozprawy. A mianowicie, przedstawiono budowę stacji referencyjnej i stacji terminalowej – tj. terminala użytkownika, w warstwie sprzętowej i programowej. Mając zaś na uwadze konieczną, odpowiednio dużą dokładność pomiarów czasu, ważną częścią tego demonstratora jest także, stosowany w badaniach, rubidowy wzorzec częstotliwości [83].

### 5.1. Warstwa sprzętowa demonstratora

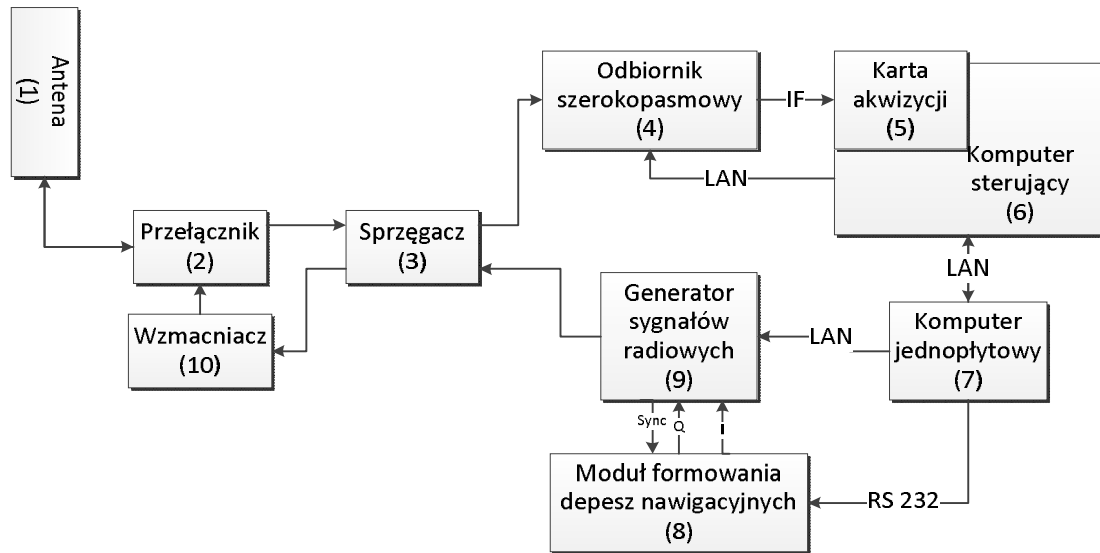
W tym miejscu opisano budowę stacji referencyjnej i stacji terminalowej, dla której, z uwagi na realizowane w niej główne obliczenia radiolokalizacyjne, przyjęto nazwę *lokaliizator*. Należy podkreślić, że oba rodzaje wymienionych stacji nie zostały zbudowane w sposób *dedykowany*, lecz przy użyciu niektórych elementów składowych w postaci gotowych urządzeń, np. generatorów, odbiorników, wzmacniaczy, komputerów i kart akwizycji danych.

#### 5.1.1. Stacja referencyjna

Schemat blokowy tej stacji, stanowiący dopełnienie opisu logicznego zawartego w podrozdziale 3.3, przedstawiono na rys. 5.1, natomiast jej widok na zdjęciu zamieszczonym na rys. 5.2.



Jak to widać na schemacie blokowym, część nadawczo-odbiorcza stacji referencyjnej jest podłączona do anteny dookolnej (1) poprzez przełącznik N/O (Nadawanie/Odbiór) (2) oraz sprzęgacz kierunkowy (3), który to przełącznik cyklicznie wymusza 8 sekundowy przedział czasu odłączenia nadajnika - w tym czasie do anteny podłączony jest odbiornik szerokopasmowy (4), co jest zgodne z założeniami opisanymi w podrozdziale 3.2.



Rys. 5.1. Schemat blokowy stacji referencyjnej

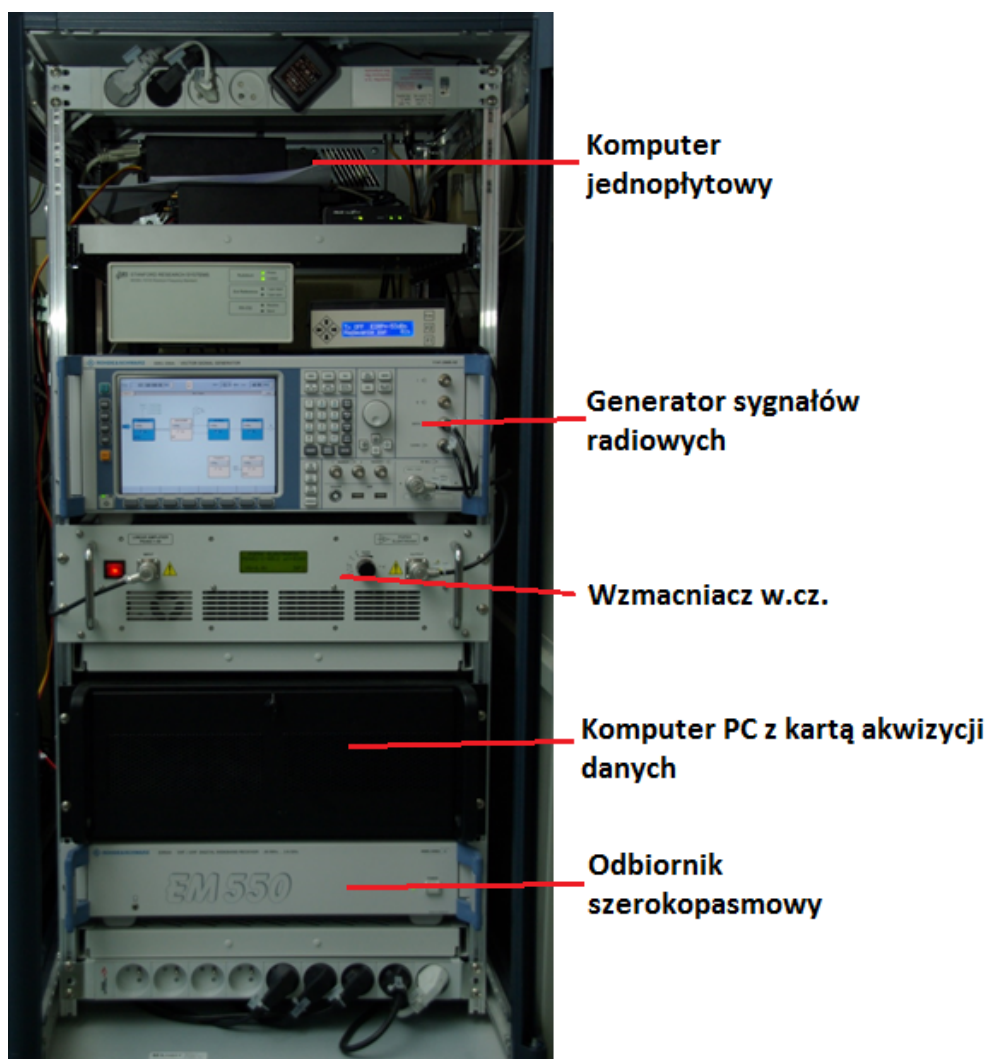
Odebrany sygnał radiowy w.cz. podlega wzmocnieniu i konwersji do pasma pośredniej częstotliwości (IF), skąd zostaje podany na wejście karty akwizycji danych (5) znajdującej się komputerze sterującym (6) pracą stacji referencyjnej oraz realizującym pomiary różnic czasowych występujących w zależnościach (3.2).

Jak to widać na schemacie blokowym, część nadawczo-odbiorcza stacji referencyjnej jest podłączona do anteny dookolnej (1) poprzez przełącznik N/O (Nadawanie/Odbiór) (2) oraz sprzęgacz kierunkowy (3), który to przełącznik cyklicznie wymusza 8 sekundowy przedział czasu odłączenia nadajnika - w tym czasie do anteny podłączony jest odbiornik szerokopasmowy (4), co jest zgodne z założeniami opisanymi w podrozdziale 3.2.

Odebrany sygnał radiowy w.cz. podlega wzmocnieniu i konwersji do pasma pośredniej częstotliwości (IF), skąd zostaje podany na wejście karty akwizycji danych (5) znajdującej się komputerze sterującym (6) pracą stacji referencyjnej oraz realizującym pomiary różnic czasowych występujących w zależnościach (3.2).

Kolejnym zadaniem realizowanym w stacji referencyjnej jest wytworzenie depesz lokalizacyjnych DLP i DLD – patrz podrozdział 3.2., co jest wykonywane w module formowania depesz (8) pod nadzorem komputera jednopłytkowego (7). Depesze te są umieszczane w sygnale radiowym, którego źródłem jest generator (9) tego sygnału.

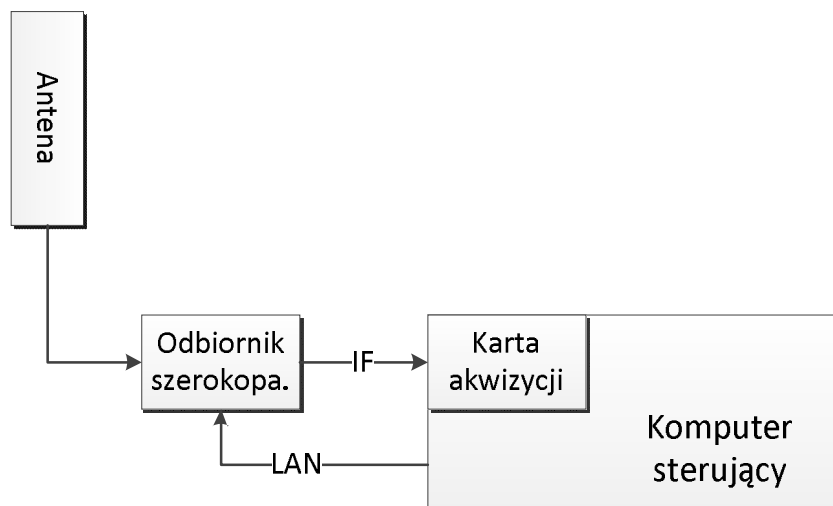
Następnie sygnał radiowy w.cz. z zawartymi w nim depeszami lokalizacyjnymi jest poprzez sprzęgacz kierunkowy podawany do wzmacniacza mocy (10), w którym podlega wzmocnieniu do poziomu zapewniającemu wymagany zasięg działania stacji referencyjnej. Sygnał ten w czasie odblokowania nadajnika przechodzi poprzez przełącznik N/O do anteny, skąd zostaje wypromieniowany do środowiska propagacyjnego.



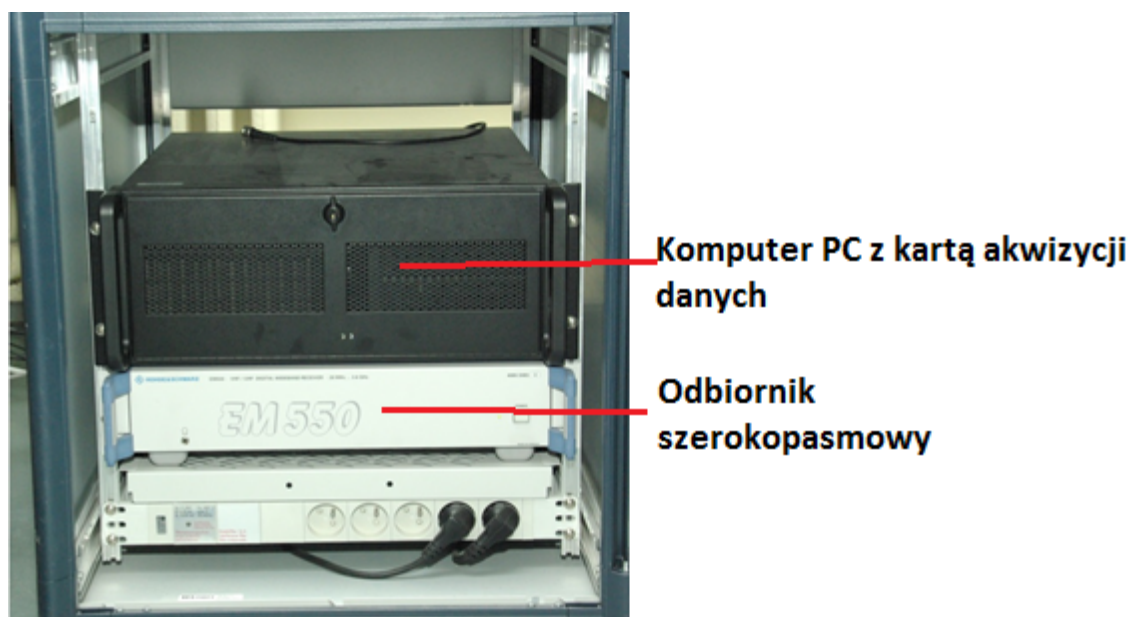
Rys. 5.2. Widok konstrukcji stacji referencyjnej

### 5.1.2. Lokalizator

Budowa lokalizatora, którą przedstawiono na rys. 5.3, stanowi dopełnienie opisu logicznego części odbiorczej zawartego w podrozdziale 3.3.2. Natomiast widok jego konstrukcji pokazano na zdjęciu zamieszczonym na rys. 5.4.



Rys. 5.3. Schemat blokowy lokalizatora



Rys. 5.4. Widok konstrukcji lokalizatora

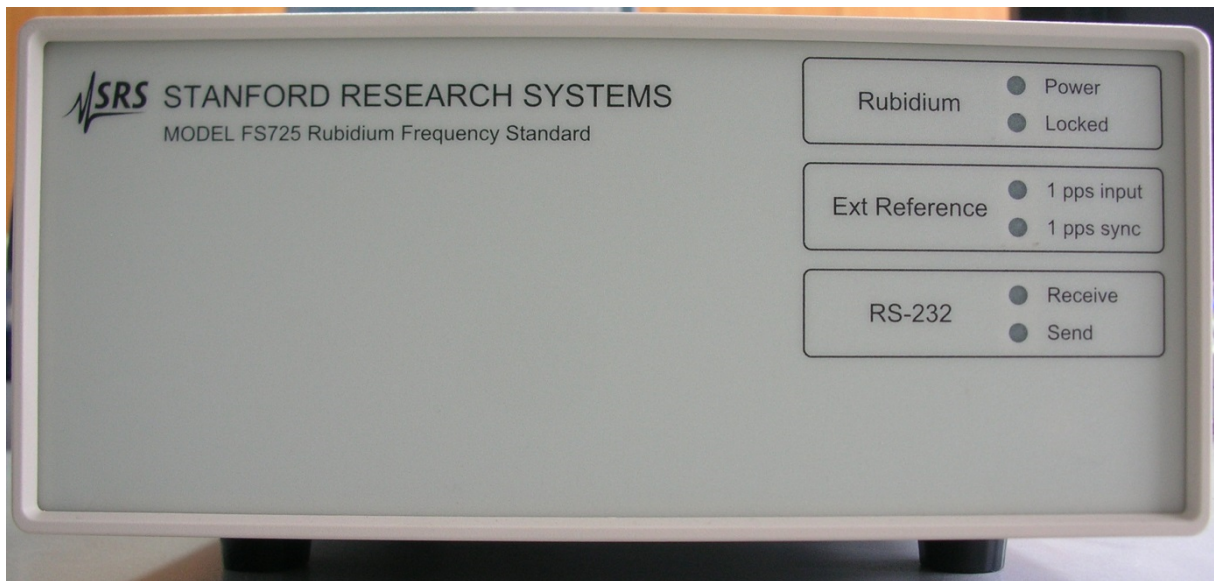
Jak to widać na schemacie blokowym, lokalizator spełnia rolę odbiornika sygnałów radiolokalizacyjnych, które poprzez antenę dookólną podawane są na wejście odbiornika szerokopasmowego, z którego po wzmocnieniu i konwersji do pasma pośredniej częstotliwości (IF), są podawane na wejście karty akwizycji danych w komputerze obliczeniowo-sterującym. Komputer ten steruje pracą lokalizatora oraz oblicza jego współrzędne położenia przy

zastosowaniu techniki radia programowalnego [24, 25, 30, 43, 56], co zostało opisane w podrozdziale 5.2, dotyczącym warstwy programowej.

### 5.1.3. Rubidowy wzorzec częstotliwości

W stacjach referencyjnych opisywanego demonstratora technologicznego zastosowano zewnętrzne wzorce częstotliwości, oparte na urządzeniu wyprodukowanym przez firmę *Stanford Research Systems* [83], którego wygląd pokazano na rys. 5.5.

a)



b)



Rys. 5.5. Wygląd rubidowego wzorca częstotliwości – model FS725,

a) widok z przodu, b) widok od tyłu

W opisywanych badaniach wzorzec ten posłużył do poprawy stabilności wyznaczania różnic czasowych w częściach odbiorczych stacji referencyjnych. W tym celu oparto się na wzorcu częstotliwości 10 MHz, którego stabilność generowanej częstotliwości była rzędu  $10^{-11}$ . Dla porównania, powszechnie stosowane wewnętrzne wzorce częstotliwości charakteryzują się stabilnością rzędu  $10^{-7}$ .

## 5.2. Warstwa programowa demonstratora

W tym miejscu opisano autorskie dedykowane oprogramowanie opracowane do realizacji obliczeń związanych z działaniem lokalizatora w zakresie wyznaczania współrzędnych jego pozycji przy użyciu techniki radia programowalnego [24, 25, 30, 43, 56], oraz obliczeń związanych z działaniem stacji referencyjnych w zakresie pomiarów różnic czasowych oraz tworzeniem depesz lokalizacyjnych.

### 5.2.1. Lokalizator

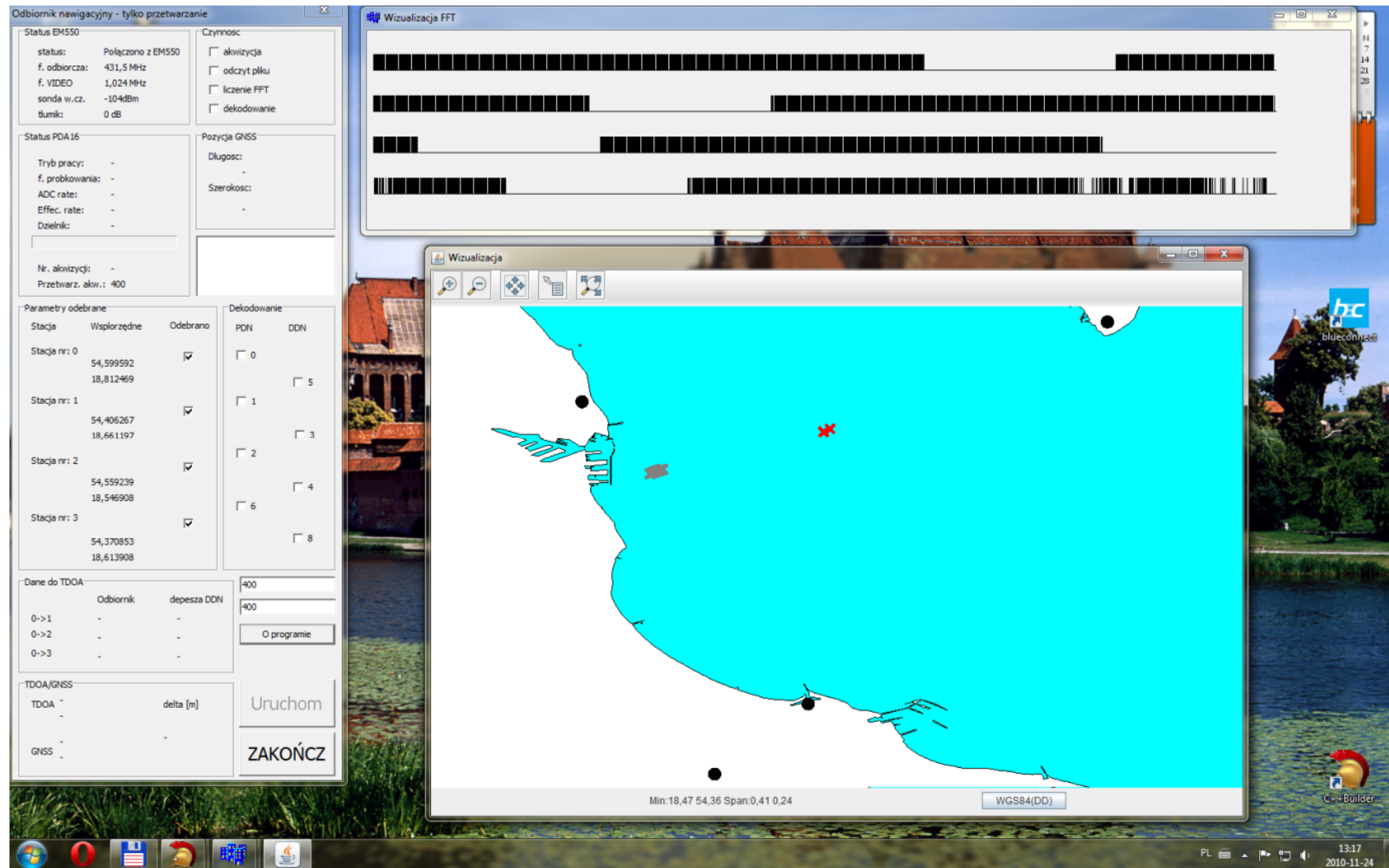
Warstwa programowa lokalizatora w jej głównej części dotyczącej obliczeń radiolokalizacyjnych została napisana w języku C++ przy użyciu aplikacji Borland Builder – patrz załącznik B. Natomiast do wizualizacji wyników tych obliczeń przygotowano aplikację napisaną w środowisku Java – patrz załącznik D.

Aplikacja ta składa się z trzech okien, pokazanych na na rys. 5.6 w postaci wyglądu ekranu monitora, tzn. składa się z:

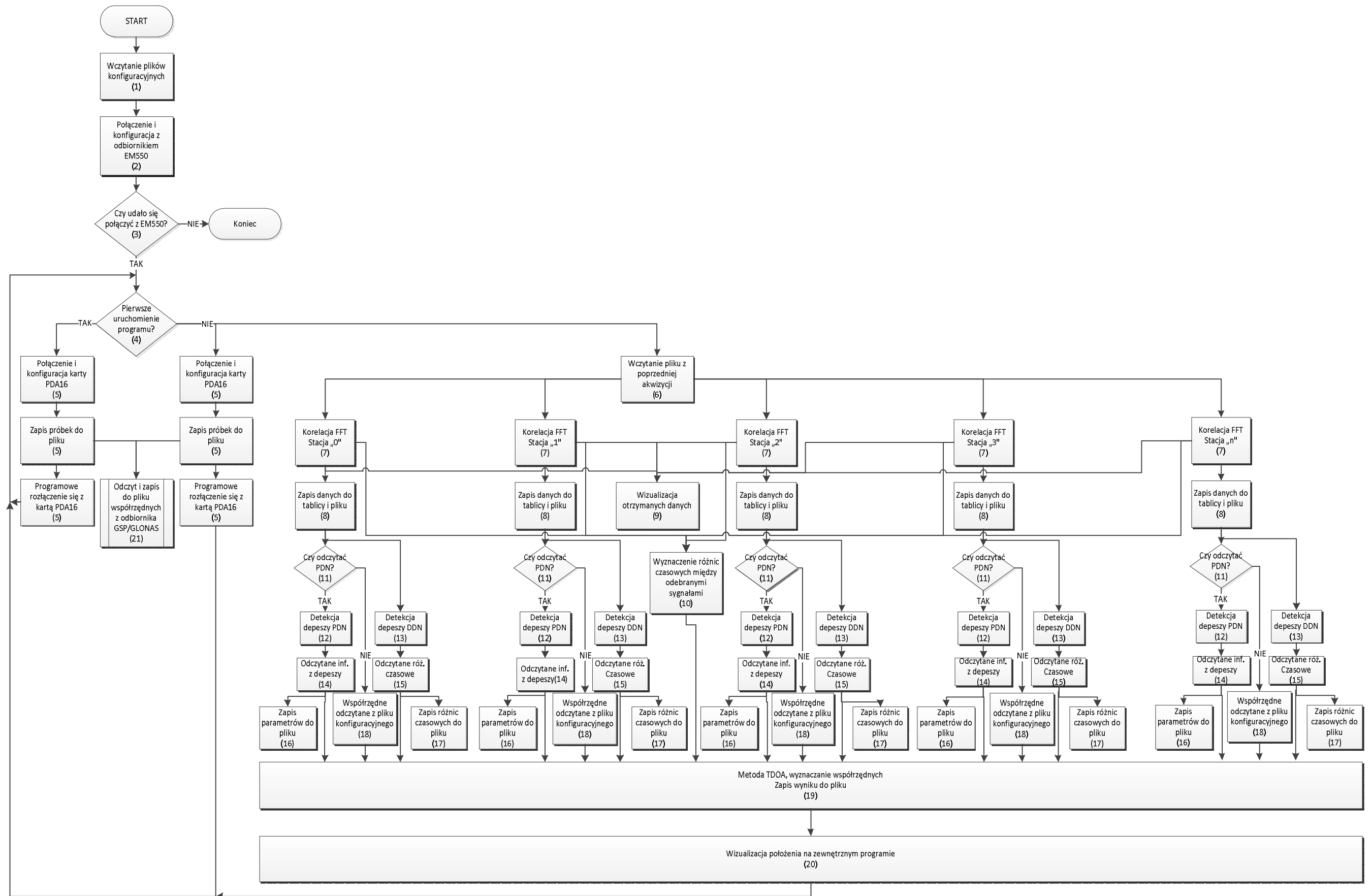
- umieszczonego po lewej stronie tego ekranu *okna głównego*, na którym eksponowane są wyniki obliczeń,
- *okna wizualizacyjnego* umieszczonego w centralnej części ekranu, gdzie pokazano położenie stacji referencyjnych oraz wyliczane położenie lokalizatora, obliczone w lokalizatorze oraz dla porównania pomierzone przez pomocniczy odbiornik GNSS GPS/GLONASS,
- umieszczonego w górnej części ekranu *okna pomocniczego* pokazującego bieżący stan pracy odbiornika lokalizatora, tzn. przykładowo pokazano tam cztery równoległe przerywane paski obrazujące odbiór sygnałów z czterech stacji referencyjnych, gdzie każda przerwa odpowiada 8 sekundowym przerwom w pracy każdego z nadajników tych stacji.

Natomiast opis algorytmiczny zasadniczej części oprogramowania służącego do wykonywania obliczeń radiolokalizacyjnych przedstawiono w postaci schematu blokowego na rys. 5.7, który opisano poniżej.





Rys. 5.6. Wygląd ekranu z oknami aplikacji wizualizacyjnej



Rys. 5.7. Algorytm działania oprogramowania radiolokacyjnego

Przedstawiony powyżej algorytm oprogramowania radiolokalizacyjnego został opracowany zgodnie z zawartym w rozdziale trzecim opisem działania hiperbolicznego systemu asynchronicznego, przy czym działanie poszczególnych bloków oznaczonych liczbami w nawiasach, przedstawia się następująco:

(1) – wczytanie następujących tekstowych plików konfiguracyjnych o poniżej wymienionych nazwach:

1.1) *liczba stacji.txt*,

1.2) *cr.txt*,

1.3) *stacje.txt*,

1.4) *ref\_EM550.txt*,

1.5) *ref\_PDA16.txt*,

oraz wszystkie pliki zawierające ciągi rozpraszające *rozpxx.txt*;

ad. 1.1) plik *liczba stacji.txt* zawiera liczbę stacji referencyjnych w systemie radiolokalizacyjnym, które omawiane oprogramowanie powinno rozpoznawać, przy czym wartość tej liczby ustala liczbę linii tekstu z pliku *cr.txt*, o czym jest mowa poniżej;

ad. 1.2) plik *cr.txt* zawiera numery ciągów rozpraszających właściwe dla poszczególnych stacji referencyjnych, które są stosowane dla identyfikacji odbieranych sygnałów w procesie skupiania ich widma po stronie odbiorczej, przykładowa struktura tego pliku jest następująca:

0 0 5

1 1 3

2 2 4

3 6 8

4 -1 -1

5 -1 -1

przy czym liczby zapisane w kolejnych kolumnach powyższego zestawu liczb wyrażają: w pierwszej kolumnie nr stacji referencyjnej, w drugiej kolumnie numer ciągu rozpraszającego przypisanego dla depeszy podstawowej DLP wysyłanej z tej stacji, zaś w kolumnie trzeciej nr ciągu rozpraszającego przypisanego dla depeszy dodatkowej DLD wysyłanego także z tej stacji, tzn. w pierwszej linii zapisano, że w stacji referencyjnej o numerze 0 użyto do rozproszenia sygnału z depeszą DLP ciągu o numerze 0, zaś do rozproszenia sygnału z depeszą DLD ciągu o numerze 5, przy czym liczba -1 oznacza brak przypisania danych;



ad. 1.3) plik *stacje.txt* zawiera współrzędne stacji referencyjnych, z chwilą uruchomienia działania lokalizatora w pliku tym są zapisane wartości zerowe, które są aktualizowane po odebraniu pierwszej depechy DLP od każdej ze stacji referencyjnych;

ad. 1.4) z kolei w pliku *ref\_EM550.txt* zawarte jest informacja wyrażona poprzez liczbę 0 lub 1, co oznacza sposób stabilizacji częstotliwości w odbiorniku szerokopasmowym, w tym przypadku w odbiorniku EM550, tzn. 0 oznacza stabilizację w oparciu o źródło wewnętrzne, zaś 1 w oparciu o wzorzec zewnętrzny;

ad. 1.5) natomiast w pliku *ref\_DP16.txt* zawarta jest informacja o sposobie stabilizacji częstotliwości karty akwizycji danych, według opisu jak powyżej;

(2) – połączenie z odbiornikiem radiolokalizacyjnym przy użyciu protokołu TCP/IP oraz konfiguracja tego odbiornika w zakresie częstotliwości nośnej i pośredniej oraz jego pasma pracy;

(3) – sprawdzenie połączenia z odbiornikiem i w przypadku jego braku zatrzymanie działania programu;

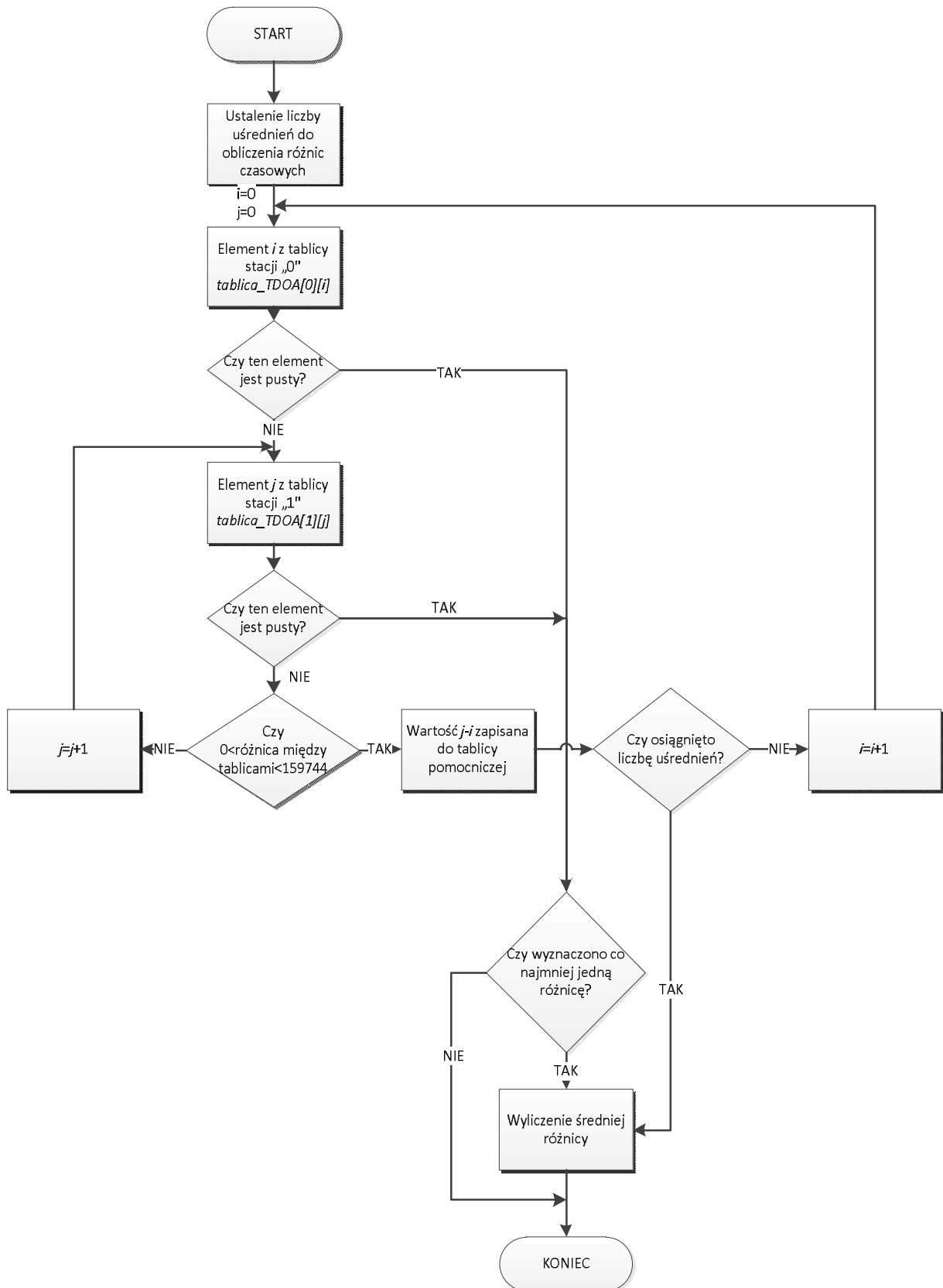
(4) – sprawdzenie, czy jest to pierwsze uruchomienie programu, jeśli tak to program uruchamia pierwszą pojedynczą akwizycję danych (5) polegającą na zarejestrowaniu w pamięci komputera pliku zawierającego dane z pojedynczego cyklu odbioru sygnału radiolokalizacyjnego trwającego 40 s – patrz rys. 3.3; natomiast w przypadku kolejnych cykli akwizycji danych, program podejmuje pracę wielowątkową, tzn. uruchamia kolejną akwizycję (5) oraz równoległe uruchamia procedury obróbki danych z poprzedniej akwizycji (6);

(5) – obsługa karty akwizycji danych, tzn. aktywacja tej karty oraz jej konfiguracja i następnie wykonanie trwającej 40 s procedury akwizycji danych w postaci próbek odebranego sygnału na wyjściu p.cz. odbiornika;

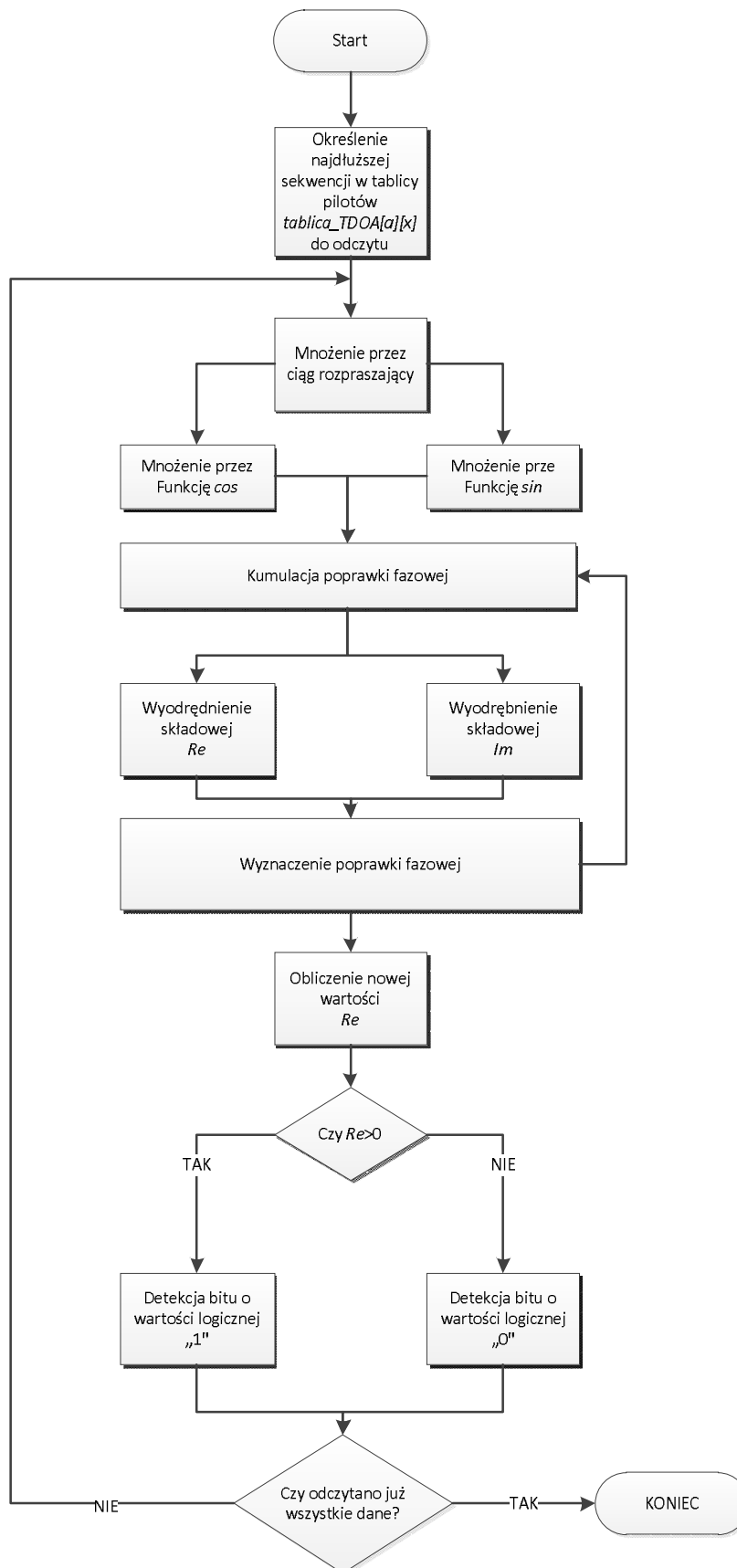
(6) – odczytanie pliku danych z poprzedniej akwizycji, ustalenie wielkości tego pliku i na tej podstawie utworzenie dynamicznej tablicy i zapisanie w niej tych danych;

(7) – równoległe obliczanie stopnia skorelowania odebranych danych (sekwencji zarejestrowanego sygnału) z ciągami bitów sekwencji pilota charakterystycznych dla wszystkich stacji referencyjnych i w ten sposób określenie z jakiej stacji pochodzi zarejestrowany sygnał – patrz rys. 3.8;

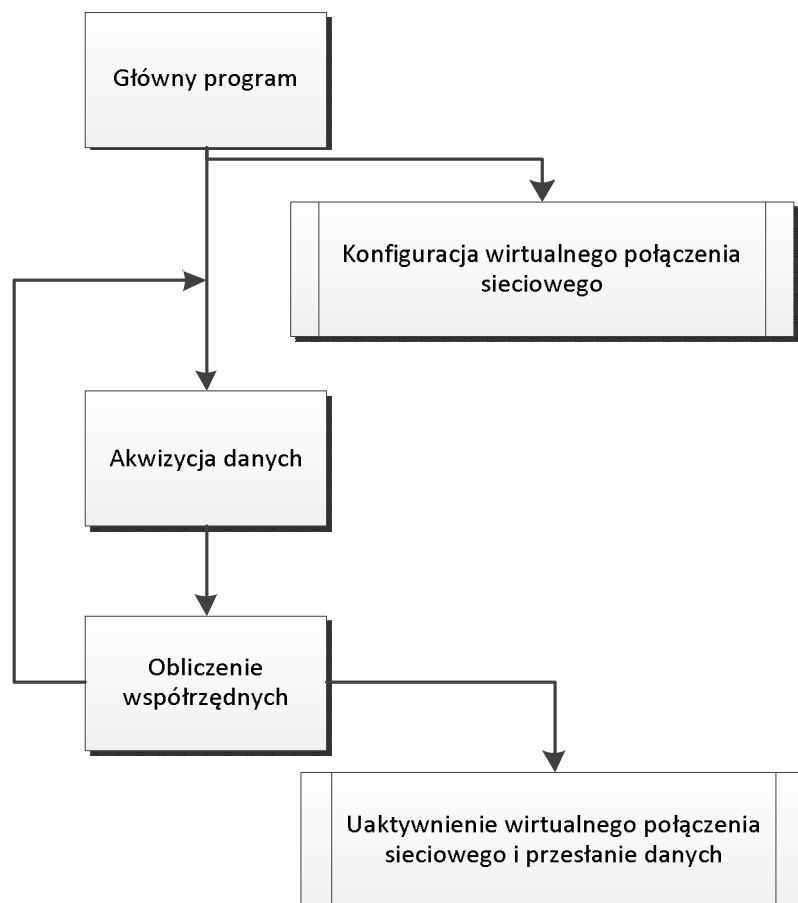
- (8) – zapisanie w/w odebranych danych, tj. numerów próbek określających miejsce położenia pierwszego bitu ciągu pilotowego w depeszy lokalizacyjnej DL, DLP lub DLD, do dwuwymiarowej tablicy o nazwie *TDOA*, w której kolejnych kolumnach zapisywane są kolejne sekwencje danych odebranych od kolejnych stacji referencyjnych, tzn. w kolumnie pierwszej od stacji pierwszej, w drugiej od stacji drugiej, itd.;
- (9) – wizualizacja w oknie pomocniczym danych otrzymanych w poprzednim kroku, dla zobrazowania bieżącego stanu pracy odbiornika lokalizatora – patrz rys. 5.8;
- (10) – pomiar różnic czasowych pomiędzy odebranymi sygnałami – patrz drugi składnik w zależnościach (3.2), na podstawie zapisów wykonanych w kroku (8), przy czym algorytm sortowania danych oraz wyznaczania (pomiaru) różnicy czasu pomiędzy sygnałami odebranymi przykładowo ze stacji referencyjnych o numerach  $0$  oraz  $1$  przedstawiono na rys. 5.8;
- (11) – podjęcie decyzji co do konieczności odczytywania depeszy DLP (podstawowej) od określonej stacji referencyjnej, tzn. jeśli to nastąpiło wcześniej, to w kolejnych cyklach odbioru sygnału od tej stacji odczytywana jest tylko depesza DLD (dodatkowa);
- (12) – odczytywanie depeszy DLP, tzn. dekodowania zawartych w niej danych, w wyniku czego otrzymuje się ciąg o długości 1560 bitów – patrz rozdz. 3.3.2 i rys. 3.8, co zostało przedstawione algorytmicznie na rys. 5.9;
- (13) – odczytywanie depeszy DLD, w sposób jak w kroku (12);
- (14) – odczyt danych zawartych w depeszy DLP poprzez usunięcie bitów pilotowych z zapisanego w kroku (12) ciągu bitów tej depeszy i jej następnie deszyfracja przy użyciu algorytmu AES CBC – patrz rozdz. 3.3.1 i rys. 3.5, w rezultacie otrzymuje się dane jawne opisujące stację referencyjną, tzn. jej współrzędne geograficzne, wysokość zawieszenia anteny, wysokość wzniesienia terenu, itp.;
- (15) – odczyt danych zawartych w depeszy DLD, w sposób jak w kroku (14);
- (16) – wpisanie współrzędnych stacji referencyjnej (14) do pliku *stacje.txt* – patrz krok (1);
- (17) – wpisanie różnic czasowych zawartych w depeszy DLD (15) do pliku *poprawki\_TDOA.txt* – patrz pierwszy składnik w zależnościach (3.2);



Rys. 5.8. Algorytm sortowania danych i wyznaczania (pomiaru) różnicy czasu odebrania sygnałów ze stacji referencyjnych 0 oraz 1



Rys. 5.9. Algorytm dekodowania danych zawartych w depeszy lokalizacyjnej



Rys. 5.10. Schemat blokowy algorytmu działania zewnętrznego programu wizualizacji

(18) – odczytanie współrzędnych stacji referencyjnej z pliku *stacje.txt*, co jest realizowane w przypadku ponownego uruchomienia programu;

(19) – obliczanie poszukiwanych współrzędnych położenia lokalizatora (terminala użytkownika), przy użyciu zależności (3.3);

(20) – wysyłanie wyników obliczeń otrzymanych w kroku (19) do zewnętrznego programu aktualizującego zawartość *okna wizualizacji* – patrz rys. 5.6, którego algorytm obliczeń przedstawiono na rys. 5.10;

(21) – odczyt i zapis współrzędnych położenia lokalizatora, jako wartości odniesienia, pomierzonych przy użyciu odbiornika GPS/GLONASS firmy JAVAD [94], model ALPHA [95], dla przeprowadzenia obliczeń jakości działania badanego systemu radiolokalizacyjnego – patrz wprowadzenie do rozdz. 4.1.

### 5.2.2. Stacja referencyjna

Oprogramowanie komputera stacji referencyjnej, podobnie jak przypadku lokalizatora, zostało napisane w języku C++ przy użyciu aplikacji Borland Builder –patrz załącznik C

Zadaniem tego oprogramowania jest obsługa tej stacji, głównie realizacja procedury pomiaru różnic czasowych – patrz pierwszy składnik w zależnościach (3.2), oraz sterowanie i konfigurowanie odbiornika oraz karty akwizycji danych – patrz schemat blokowy stacji referencyjnej na rys. 5.1.

Algorytmiczny schemat działania tego oprogramowania w zakresie wyznaczania różnic czasowych przedstawiono na rys. 5.11, zaś jego działanie opisano poniżej.

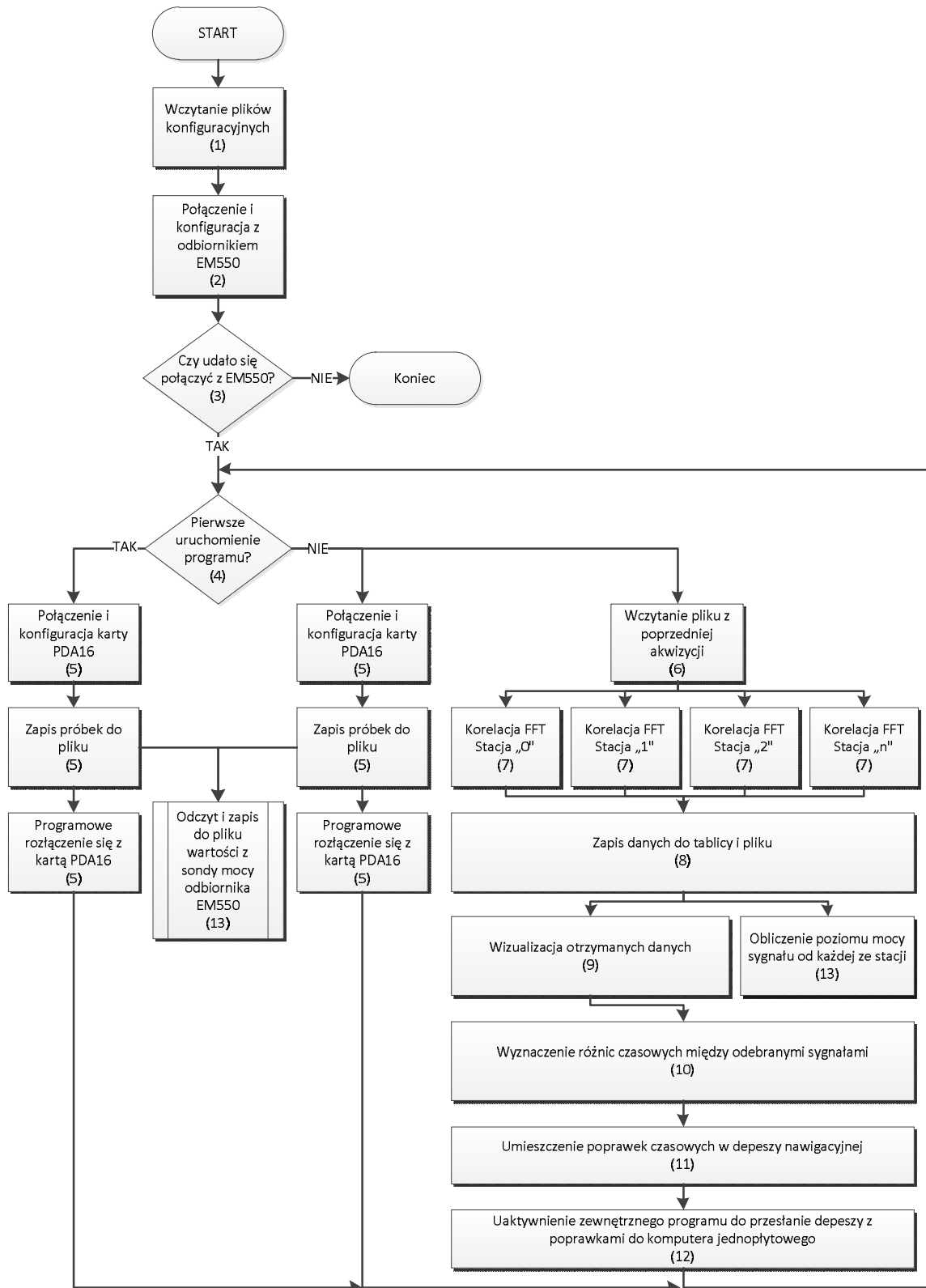
Przedstawiony powyżej algorytm wyznaczania różnic czasowych został opracowany w oparciu o pomiar stanu czasowego wysyłanych i odbieranych sygnałów oraz sposób wyznaczania na tej podstawie różnic czasowych, zilustrowany na rys. 3.2, przy czym działanie poszczególnych bloków oznaczonych liczbami w nawiasach, przedstawia się następująco:

(1 – 9) – funkcjonalność taka sama jak w opisie algorytmu działania oprogramowania lokalizatora – patrz punkt 5.2.1;

(10) - wyznaczenie (pomiar) różnic czasowych pomiędzy sygnałami odebrany z innych stacji referencyjnych – patrz pierwszy składnik w zależnościach (3.2);

(11) – umieszczenie wyznaczonych różnic czasowych w depeszy lokalizacyjnej DLD;

(12) – przesłanie depeszy DLD do komputera jednopłytkowego, gdzie następuje jej sformatowanie i przesłanie do generatora radiowych sygnałów nośnych.



Rys. 5.11. Schemat blokowy algorytmu wyznaczania różnic czasowych w stacji referencyjnej

## Rozdział 6: Badania pomiarowe systemu asynchronicznego

W tym rozdziale przedstawiono i omówiono wyniki analizy badań pomiarowych wykonane w drugim etapie przyjętego programu badawczego – patrz wprowadzenie do rozdziału czwartego. Badania te zostały wykonane w rzeczywistym środowisku eksploatacyjnym, tzn. w pierwszym wariancie na obszarze Zatoki Gdańskiej oraz w drugim na otwartym akwenu morskim, w jego strefie przybrzeżnej, przy użyciu demonstratora technologicznego zrealizowanego w ramach projektu badawczo-rozwojowego, o czym napisano na wstępie tej rozprawy, w rozdz. 1.1 [2].

W pierwszym wariancie badań demonstrator ten został umieszczony na okręcie Marynarki Wojennej RP, który dla potrzeb realizacji tych badań pływał na obszarze Zatoki Gdańskiej, zaś w drugim wariancie na pływającym laboratorium badawczym OBR Centrum Techniki Morskiej w Gdyni, które to laboratorium pływało na akwenu przybrzeżnym od strony otwartego morza, pomiędzy latarniami morskimi w Czołpinie, Stilo i Rozewiu [28], gdzie zostały umieszczone stacje referencyjne badanego systemu. Natomiast w pierwszym wariancie badań stacje referencyjne były zainstalowane w miejscach jak to przyjęto w badaniach symulacyjnych, co opisano w rozdz. 4.2.1.

Podstawą wykonania analizy są badania pomiarowe przeprowadzone w październiku 2010 r. na terenie Zatoki Gdańskiej oraz w czerwcu 2011 r. na ww. akwenu przybrzeżnym. W ich trakcie zgromadzono łącznie ponad 7 tyś. pomierzonych przypadków lokalizacyjnych.

Poniżej opisano parametry warstwy fizycznej demonstratora technologicznego oraz wyniki wykonanych badań wraz z ich analizą porównawczą z wynikami uzyskanymi na drodze badań symulacyjnych.

### 6.1. Parametry warstwy fizycznej demonstratora

Warstwę fizyczną przedmiotowego demonstratora technologicznego można scharakteryzować poprzez jego główne parametry eksploatacyjnych, które są następujące:

- częstotliwość środkowa pasma pracy wynosi 431,5 MHz,
- szerokość pasma pracy 1 MHz, z możliwością poszerzenia tego pasma do wartości 4MHz,

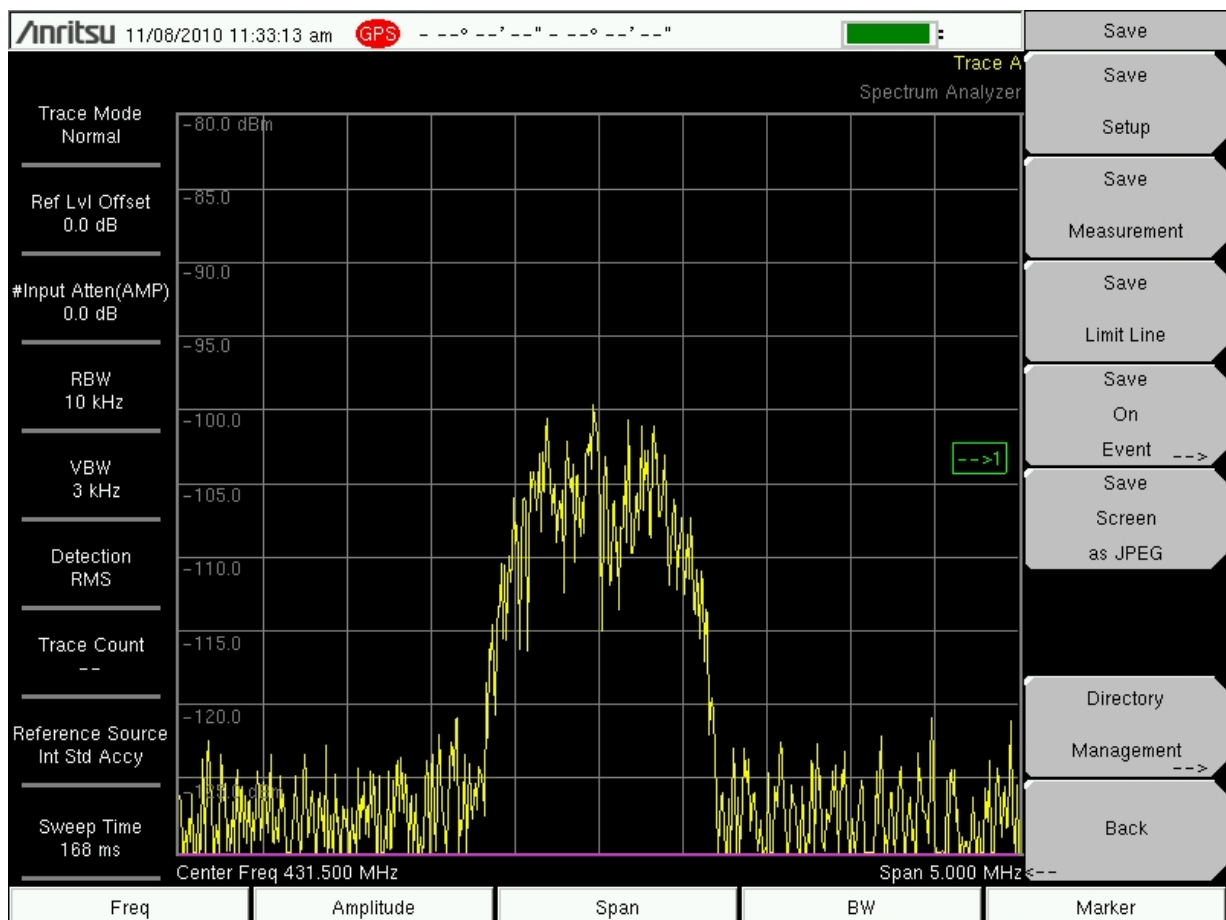


- moc sygnału nadawanego 30 W,

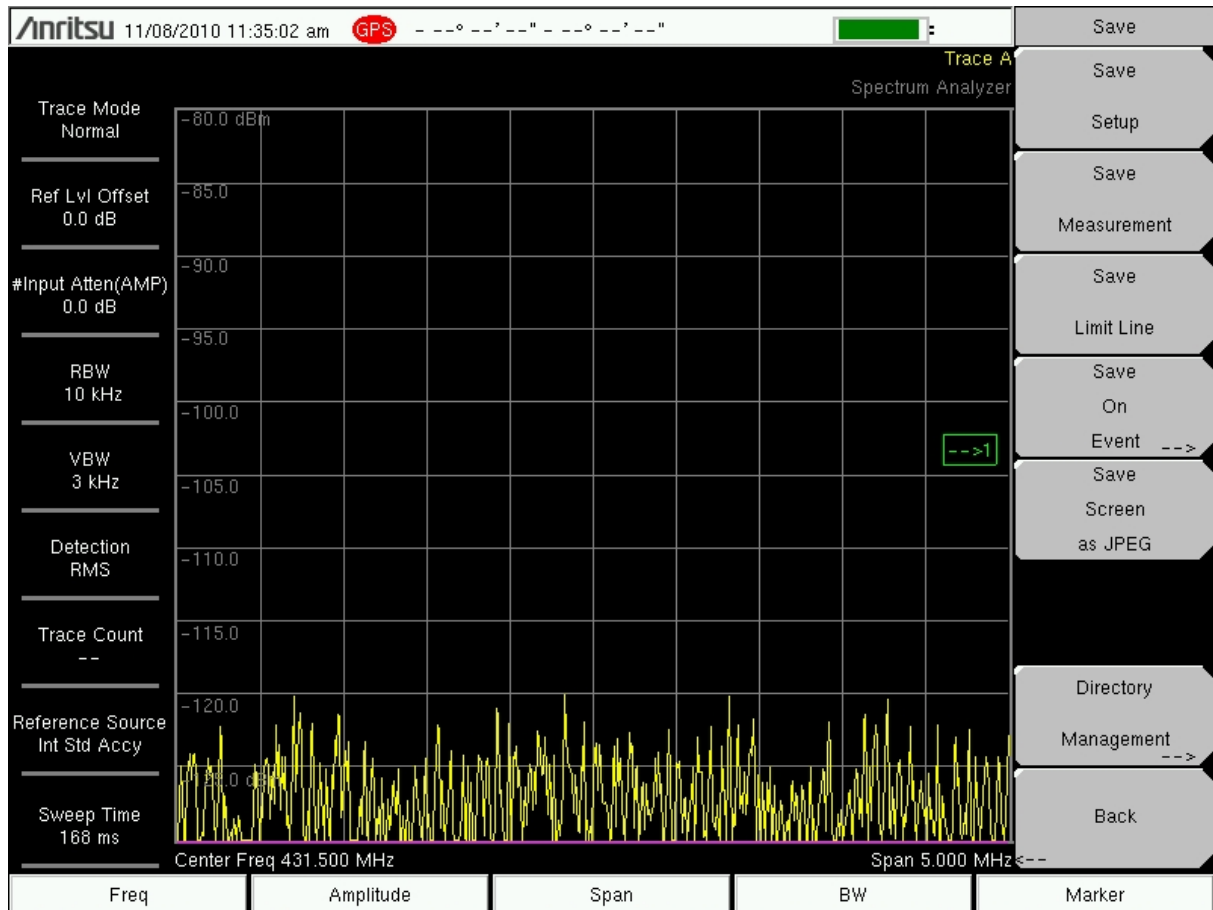
co było bezwzględnie uwarunkowane zapisem tych wartości w otrzymanej zgodzie Urzędu Komunikacji Elektronicznej na przeprowadzenie opisywanych badań [82].

Należy w tym miejscu podkreślić, że powyższe wartości parametrów demonstratora, zwłaszcza szerokość jego pasma pracy w świetle wniosków wpływających z badań symulacyjnych nie jest optymalna.

Poza tym, dla przypomnienia, w demonstratorze tym zastosowano dostęp do kanału radiowego przy użyciu techniki z bezpośrednim rozpraszaniem widma, tj. DS-CDMA [60, 66, 68, 69]. Pozwoliło to sygnały radiolokalizacyjne ukryć poniżej poziomu szumów, co ma znaczenie w przypadku zastosowań specjalnych badanego systemu radiolokalizacyjnego. Dla zobrazowania tego zagadnienia, na rys. 6.1 i 6.2 przedstawiono widok ekranu analizatora widma umieszczonego w bezpośrednim sąsiedztwie stacji referencyjnej oraz w polu operacyjnym tego systemu.



Rys. 6.1. Widok ekranu analizatora widma w bezpośrednim sąsiedztwie stacji referencyjnej



Rys. 6.2. Widok ekranu analizatora widma w polu operacyjnym badanego systemu

Porównując oba te rysunki, na pierwszym z nich wyraźnie widać widmo sygnału stacji referencyjnej na tle szumów występujących w środowisku propagacyjnym, natomiast na drugim rysunku sygnały stacji referencyjnych są zanurzone w szumie i tym samym są niewidoczne dla potencjalnego obserwatora.

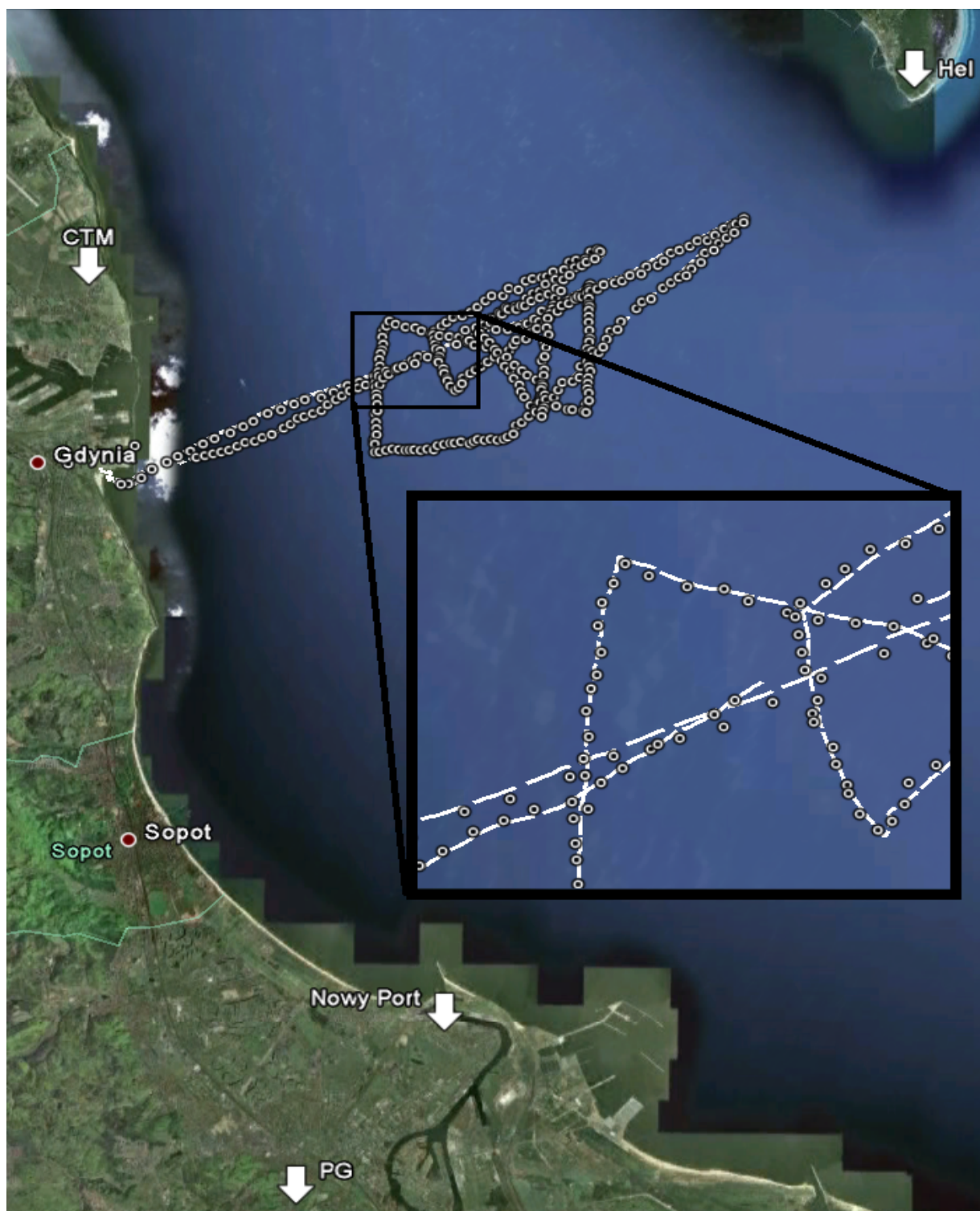
Poza tym należy zaznaczyć, że ze względów organizacyjnych i kosztowych, plan badań pomiarowych był mniej obszerny, aniżeli to miało miejsce w przypadku badań symulacyjnych.

## 6.2. Wyniki badań na obszarze Zatoki Gdańskiej

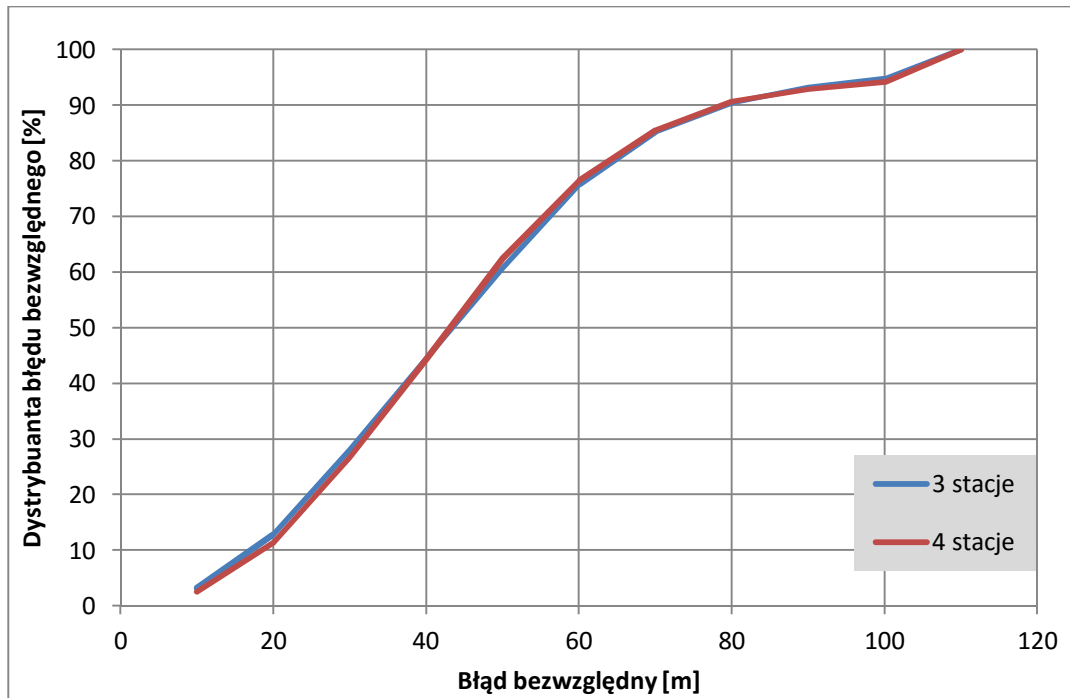
Przykładową wizualizację trasy pomiarowej na obszarze Zatoki Gdańskiej zobrazowano na rys. 6.3, na którym wzdłuż tej trasy (linia przerywana) zaznaczono punkty pomiarowe, zaś dodatkowo wybrany fragment trasy pomiarowej, zaznaczony prostokątem, pokazano w powiększeniu.

Natomiast na kolejnych rysunkach 6.4 i 6.5 przedstawiono otrzymane wyniki badań w postaci, odpowiednio:

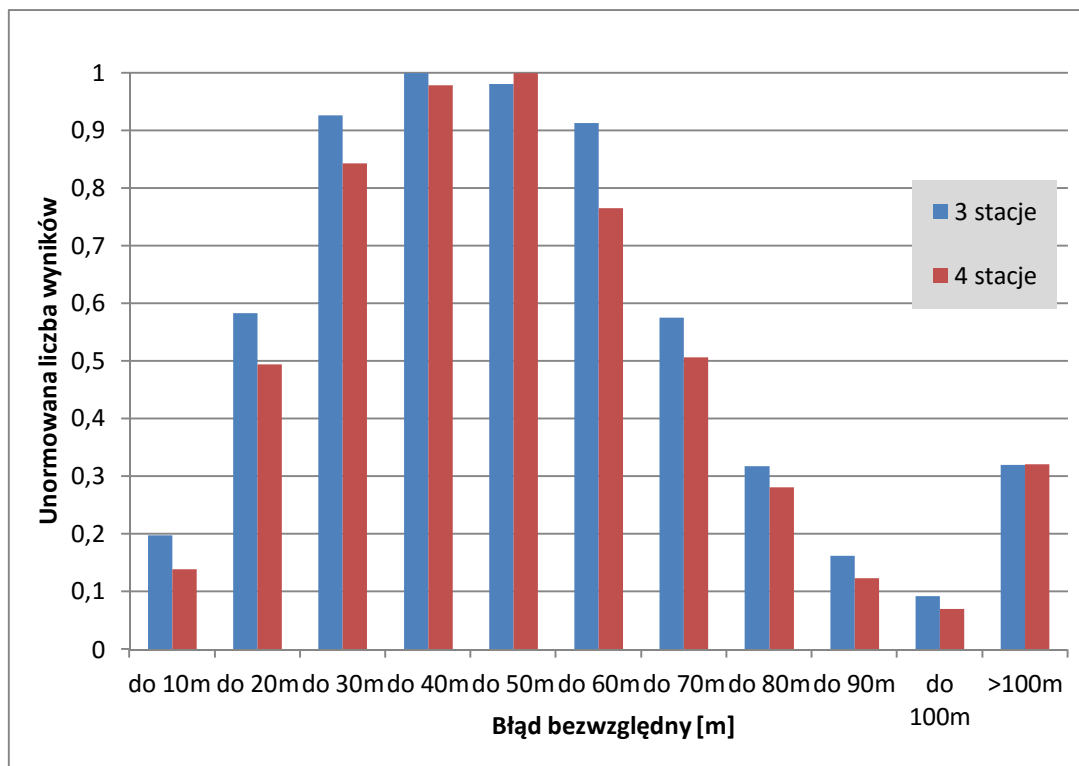
- dystrybuanty błędu bezwzględnego - zależność (4.1), dla obu konfiguracji stacji referencyjnych: podstawowej i powiększonej – patrz rozdz. 4.2.1, oraz
- unormowanego histogramu błędu bezwzględnego, także dla obu w/w konfiguracji.



Rys. 6.3. Przykładowa wizualizacja trasy pomiarowej na obszarze Zatoki Gdańskiej



Rys. 6.4. Pomierzona dystrybuanta błędu bezwzględnego  $\delta_d [m]$  dla obu konfiguracji stacji referencyjnych - wariant: Zatoka Gdańska



Rys. 6.5. Histogram błędu bezwzględnego  $\delta_d [m]$  dla obu konfiguracji stacji referencyjnych – wariant: Zatoka Gdańska

Jak widać na obu rysunkach (6.4 i 6.5), dodanie czwartej stacji referencyjnej nie wpływa na poprawę jakości pracy systemu radiolokalizacyjnego, a to ze względu na jej niekorzystnie skrajną lokalizację w systemie trzech równomiernie położonych stacji referencyjnych – patrz p. 4.2.1.

Poza tym, w oparciu o dane pomiarowe otrzymane przy użyciu demonstratora oraz dane odniesienia pomierzone przy użyciu zestawu pomiarowego JAVAD/ALPHA [94, 95], obliczono błędy:

- średni błąd bezwzględny  $ME_{\delta}$ ,
- błąd średniokwadratowy  $MSE_{\delta}$ ,
- pierwiastek z błędu średniokwadratowego  $RMS_{\delta}$ ,

dla obu konfiguracji stacji referencyjnych, których wartości zebrano w tabeli 6.1.

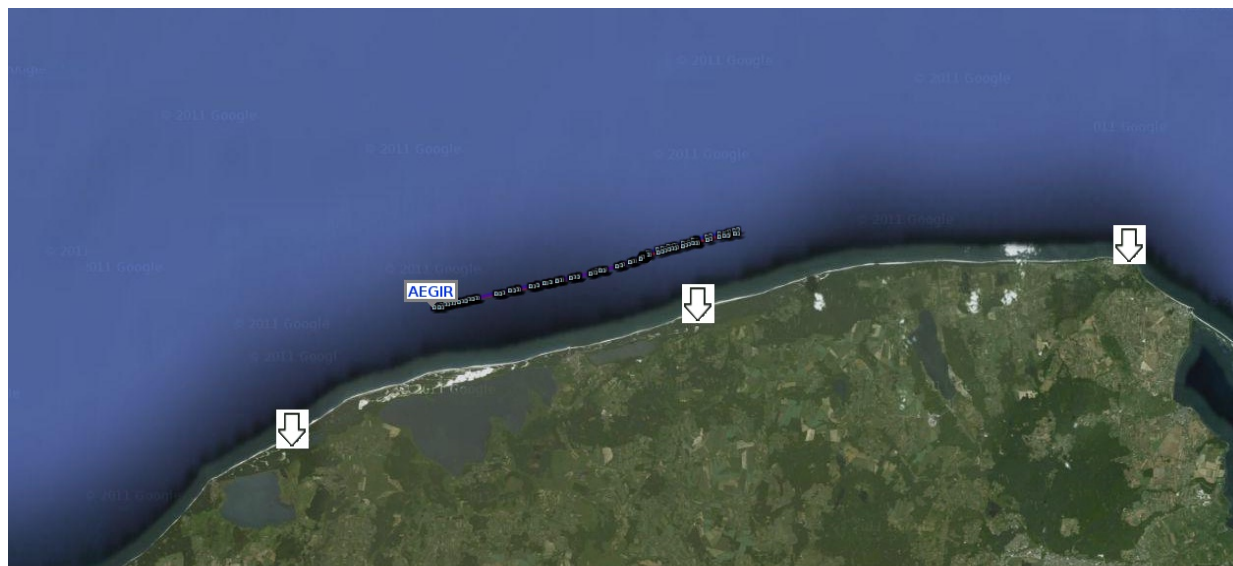
Tab. 6.1. Zestawienie błędów  $ME_{\delta}$ ,  $MSE_{\delta}$  i  $RMS_{\delta}$ , obliczonych na podstawie wyników badań pomiarowych dla obu konfiguracji stacji referencyjnych – wariant: Zatoka Gdańska

|          | $ME_{\delta}$ [m] | $MSE_{\delta}$ [m <sup>2</sup> ] | $RMS_{\delta}$ [m] |
|----------|-------------------|----------------------------------|--------------------|
| 3 stacje | 46,5              | 50671                            | 225,3              |
| 4 stacje | 31,1              | 23231                            | 152,4              |

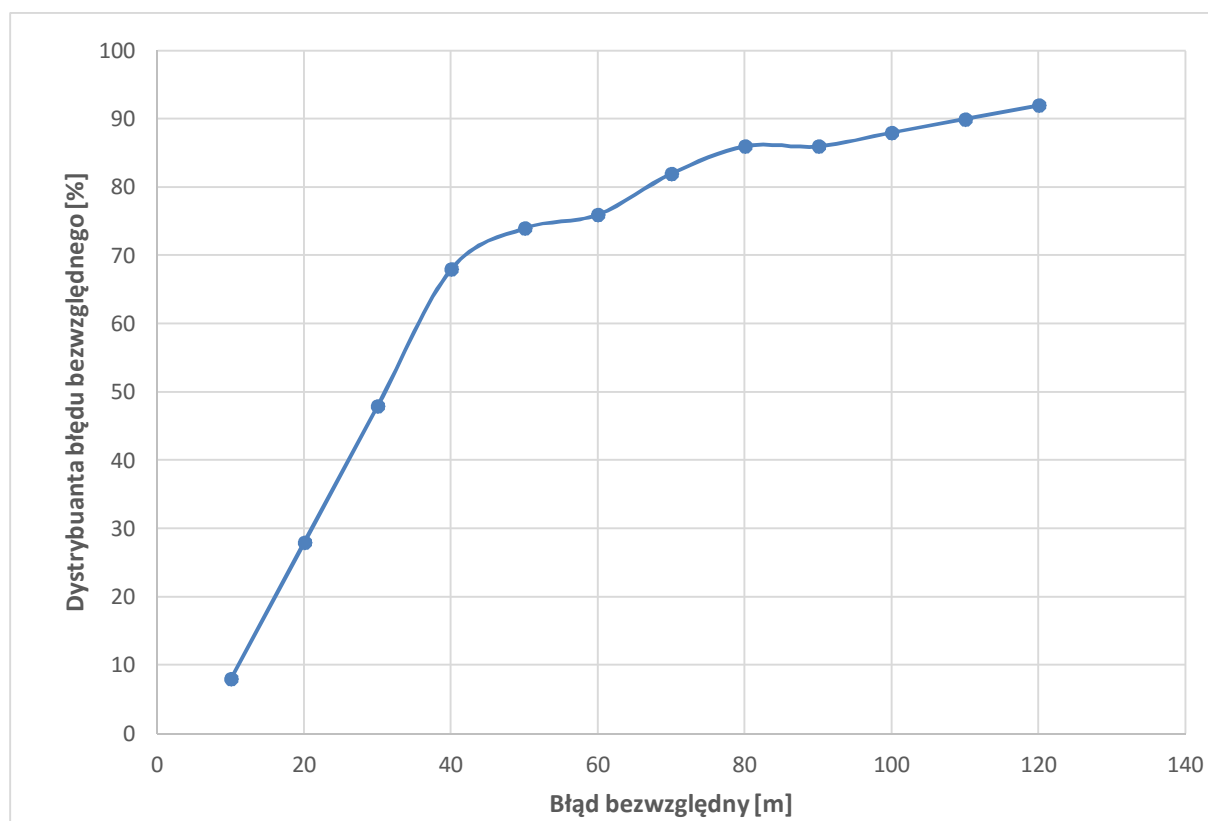
Z kolei zestaw błędów zebranych powyżej w tabeli 6.1 w sposób wyraźny pokazuje poprawę jakości działania badanego systemu przy zastosowaniu kolejnej, w tym przypadku czwartej, stacji referencyjnej, mimo jej niekorzystnej lokalizacji w systemie trzech równomiernie położonych stacji referencyjnych.

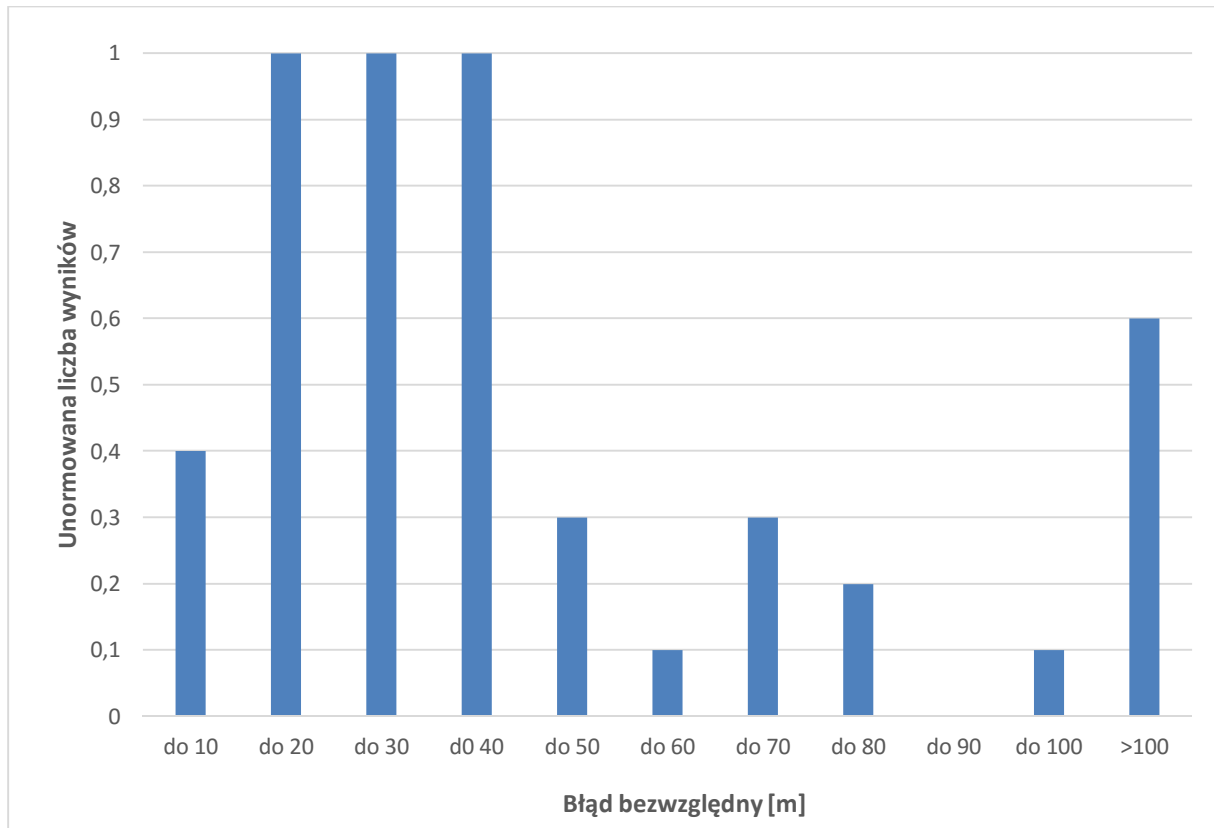
### 6.3. Wyniki badań na otwartym akwenu morskim, w strefie przybrzeżnej

Natomiast przykładową wizualizację trasy pomiarowej w strefie przybrzeżnej od strony otwartego morza zobrazowano na rys. 6.6, na którym wzdłuż tej trasy (linia przerywana) zaznaczono położenie punktów pomiarowych, natomiast symbolem  $\Downarrow$  zaznaczono lokalizacje trzech stacji referencyjnych.



Rys. 6.6. Przykładowa wizualizacja trasy pomiarowej od strony otwartego morza

Rys. 6.7. Pomierzona dystrybuanta błędu bezwzględnego  $\delta_d [m]$  – wariant: otwarte morze



Rys. 6.8. Histogram błędu bezwzględnego  $\delta_d [m]$  – wariant: otwarte morze

Z kolei na rysunkach 6.7 i 6.8 przedstawiono otrzymane wyniki badań w postaci, także odpowiednio:

- dystrybuanty błędu bezwzględnego, oraz
- unormowanego histogramu błędu bezwzględnego.

Jak widać na powyższych rysunkach (6.7 i 6.8), w tym wariancie efektywność pracy systemu jest gorsza, w porównaniu do tego co zaobserwowano na obszarze Zatoki Gdańskiej. Wynika to z niekorzystnego sposobu rozmieszczenia stacji referencyjnych, tzn. wzdłuż linii brzegowej.

Poza tym, w oparciu o dane pomiarowe otrzymane przy użyciu demonstratora oraz dane odniesienia pomierzone przy użyciu zestawu pomiarowego JAVAD/ALPHA/GPS, obliczono błędy:

- średni błąd bezwzględny  $ME_\delta$ ,
- błąd średniokwadratowy  $MSE_\delta$ ,
- pierwiastek z błędu średniokwadratowego  $RMS_\delta$ ,

których wartości zebrano w tabeli 6.2.

Tab. 6.2. Zestawienie błędów  $ME_{\delta}$ ,  $MSE_{\delta}$  i  $RMS_{\delta}$ , obliczonych na podstawie wyników badań pomiarowych – wariant: otwarte morze

| $ME_{\delta}$ [m] | $MSE_{\delta}$ [m <sup>2</sup> ] | $RMS_{\delta}$ [m] |
|-------------------|----------------------------------|--------------------|
| 46,5              | 4132                             | 64,3               |

Zestaw błędów zebranych powyżej w tabeli 6.2 w sposób wyraźny pokazuje poprawę jakości działania badanego systemu przy zastosowaniu szerszego pasma zarezerwowanego dla systemu, mimo niekorzystnej lokalizacji trzech stacji referencyjnych [21].

#### 6.4. Analiza porównawcza efektywności pracy asynchronicznego systemu hiperbolicznego

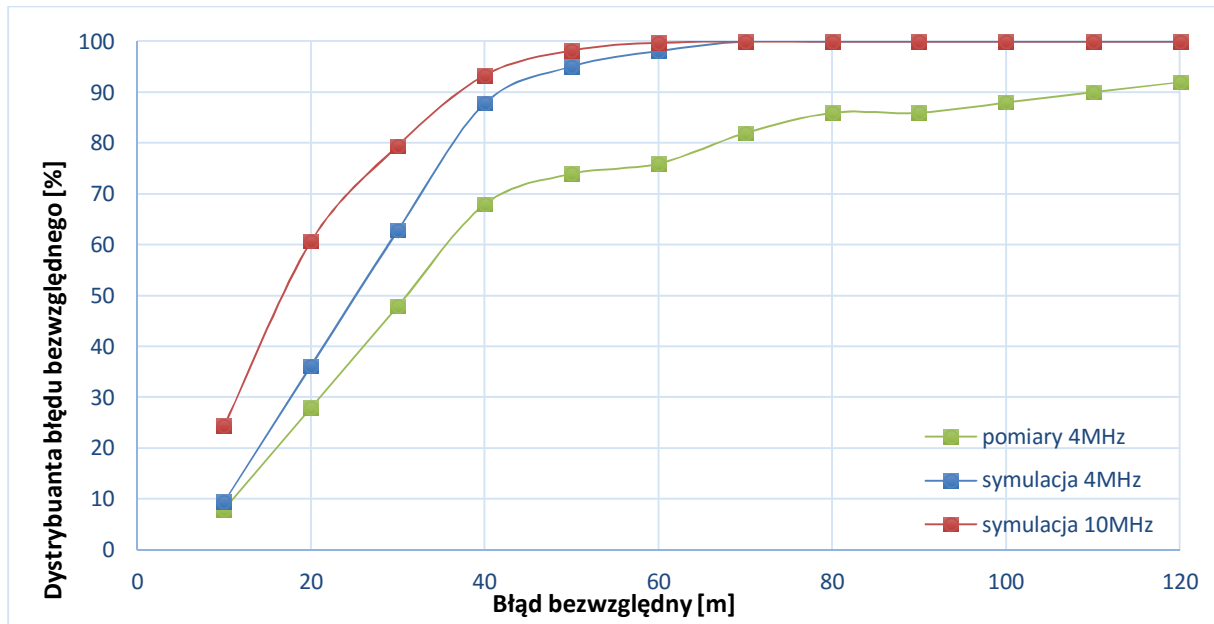
Dla potrzeb tej analizy opracowano graficznie następujące porównania wyników badań symulacyjnych i pomiarowych dla takiej samej szerokości pasma pracy badanego systemu wynoszącej 4 MHz, tzn:

- wyniki badań dystrybuanty błędu bezwzględnego,
- unormowany porównawczy histogram błędu bezwzględnego,

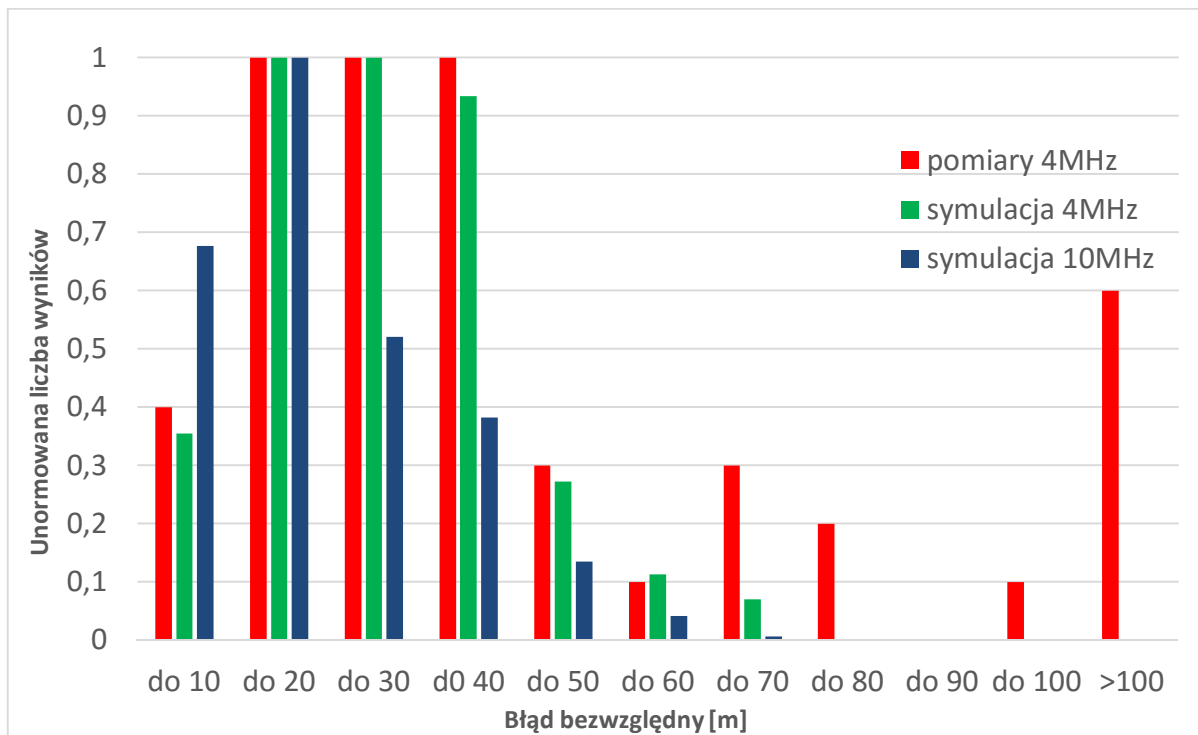
co przedstawiono na rysunkach, odpowiednio 6.9 i 6.10, na których dodano przedmiotowe wyniki badań symulacyjnych otrzymane dla częstotliwości 10 MHz – dla porównania patrz rysunki 4.16 i 4.17, oraz rysunki 4.18 i 4.19.

Poza tym, w oparciu o wyniki badań symulacyjnych i pomiarowych w tab. 6.3 zebrano obliczone błędy: wartości średniej błędu bezwzględnego  $ME_{\delta}$ , błąd średniokwadratowy  $MSE_{\delta}$  oraz pierwiastek z błędu średniokwadratowego  $RMS_{\delta}$ , dla szerokości pasma pracy systemu równej 4 MHz, oraz dodatkowo błędy obliczone w oparciu o wyniki badań symulacyjnych dla szerokości pasma pracy wynoszącej 10 MHz – patrz tab. 4.1.





Rys. 6.9. Porównanie wyników badań symulacyjnych i pomiarowych dystrybuanty błędu bezwzględnego  $\delta_d [m]$ , dla szerokości pasma pracy systemu równej 4 MHz, oraz badań symulacyjnych dla szerokości pasma wynoszącej 10 MHz



Rys. 6.10. Histogram porównawczy wyników badań symulacyjnych i pomiarowych błędu bezwzględnego  $\delta_d [m]$ , dla szerokości pasma pracy systemu równej 4 MHz, oraz badań symulacyjnych dla szerokości pasma wynoszącej 10 MHz

*Tab. 6.3. Zestawienie błędów  $ME_{\delta}$ ,  $MSE_{\delta}$  i  $RMS_{\delta}$ , obliczonych na podstawie badań symulacyjnych i pomiarowych, dla szerokości pasma pracy systemu równej 4 MHz, oraz badań symulacyjnych dla szerokości pasma wynoszącej 10 MHz*

|                 | $ME_{\delta}$ [m] | $MSE_{\delta}$ [m <sup>2</sup> ] | $RMS_{\delta}$ [m] |
|-----------------|-------------------|----------------------------------|--------------------|
| Pomiary 4MHz    | 46,5              | 4132                             | 64,3               |
| Symulacja 4MHz  | 22,2              | 429,0                            | 25,4               |
| Symulacja 10MHz | 18,9              | 397,9                            | 21,3               |

Porównując wyniki badań symulacyjnych oraz pomiarowych przedstawionych na rys. 6.9 i 6.10 oraz analizując wartości błędów zebrane w powyższej tabeli 6.3 można zauważyć tendencję podobną jak to miało miejsce w przypadku badań symulacyjnych. A mianowicie, wzrost szerokości pasma pracy systemu istotnie wpływa na poprawę jego efektywności pracy.

## Rozdział 7: Podsumowanie – główne osiągnięcia rozprawy

Jak to napisano na wstępie, głównym celem niniejszej rozprawy było zbadanie nowego podejścia do sposobu działania hiperbolicznego systemu radiolokalizacyjnego pracującego w strukturze niełańcuchowej w sposób asynchroniczny. Zaś mając na uwadze postawioną w rozprawie tezę, że – skrótowo rzecz ujmując - *odpowiednie rozwiązania protokolarno-systemowe umożliwiają zrealizowanie takiego systemu*, badania te miały potwierdzić poprawność koncepcji działania tego systemu, a tym samym wykazać sformułowaną tezę.

Badania te wykonano w dwojaki sposób, a mianowicie, przy użyciu opracowanego autorskiego symulatora obliczeniowego do badań teoretycznych takiego systemu radiolokalizacyjnego oraz w sposób pomiarowy przy użyciu zbudowanego demonstratora technologicznego wykonanego w ramach realizacji projektu badawczo-rozwojowego. Należy przy tym podkreślić, że właściwości tego symulatora uwzględniały rzeczywiste warunki eksploatacyjne wynikające z przeznaczenia badanego systemu dla potrzeb Marynarki Wojennej (MW) RP, zaś badania pomiarowe zostały wykonane w warunkach morskich na wodach Zatoki Gdańskiej oraz na akwenu przybrzeżnym od strony otwartego morza, przy użyciu okrętu MW RP oraz laboratorium pływającego Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Centrum Techniki Morskiej w Gdyni.

Warto w tym miejscu powtórzyć, że w trakcie tych badań, zwłaszcza badań pomiarowych, zebrano znaczący i tym samym reprezentatywny materiał badawczy w postaci pięciu tysięcy przypadków pomiarowych zarejestrowanych na wodach Zatoki Gdańskiej oraz siedem tysięcy przypadków zarejestrowanych na otwartym morzu. Otrzymane wyniki zostały porównane ze wskazaniami komercyjnych terminali systemów GPS i GLONASS, co stanowiło punkt wyjścia do opracowania analizy błędów i oceny efektywności działania demonstratora technologicznego asynchronicznego systemu radiolokalizacyjnego.

Otrzymane wyniki badań symulacyjnych oraz weryfikacja pomiarowa tych wyników przeprowadzona w rzeczywistym środowisku eksploatacyjnym oraz analiza tych wyników zostały opisane i przeanalizowane w niniejszej rozprawie, głównie w rozdziale czwartym i szóstym.

Wyniki tej analizy wykazują wpływ kilku czynników systemowych na efektywność działania zbadanego systemu, jak np. liczba i rozmieszczenie stacji referencyjnych, jednakże kluczowym czynnikiem jest parametr systemowy w postaci szerokości częstotliwościowego pasma pracy urządzeń tego systemu.

Podsumowując wyniki tych badań, szczegółowo opisane w raporcie dokumentującym realizację przywołanego projektu badawczo-rozwojowego oraz z konieczności w sposób reprezentatywny zawarte i przeanalizowane w niniejszej rozprawie, zarówno badań teoretycznych jak i pomiarowych, można stwierdzić, że potwierdzają one koncepcję budowy i działania asynchronicznego systemu radiolokalizacyjnego oraz wykazują poprawność przyjętej na wstępie tezy tej rozprawy.

Do głównych oryginalnych osiągnięć niniejszej rozprawy należą:

- opracowanie założeń protokolaro-systemowych koncepcji asynchronicznej pracy hiperbolicznego systemu radiolokalizacyjnego,
- opracowanie algorytmicznej warstwy symulatora takiego systemu oraz jej implementacja programowa,
- wykonanie obszernych badań symulacyjnych oraz ich analiza,
- wykonanie badań pomiarowych w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych na morzu i zebranie oryginalnego materiału doświadczalnego,
- analiza efektywności pracy zbadanego systemu na podstawie zebranego materiału,
- opracowanie uwarunkowań efektywnej pracy asynchronicznego systemu hiperbolicznego, które stanowią podstawę do opracowania jego dedykowanej wersji wdrożeniowej.

## Literatura

Książki, artykuły i referaty konferencyjne, zgłoszenia patentowe:

- [1] Aatique M., „*Evaluation of TDOA Techniques for Position Location in CDMA Systems*“, Ph.D. dissertation, Virginia Polytechnic Inst. State Univ., Blacksburg, VA, USA, 1997.
- [2] Ambroziak S., Katulski R., Sadowski J., **Siwicki W.** i Stefański J., „*Raport z realizacji projektu badawczego rozwojowego NCBiR nr O R 00 0049 06 pn. Demonstrator technologiczny szerokopasmowego łącza bezprzewodowego z widmem rozproszonym dla potrzeb sieci ad-hoc*“, Raport wewnętrzny, Politechnika Gdańska 2010.
- [3] Ambroziak S., Katulski R., Sadowski J., **Siwicki W.** i Stefański J., „*Asynchroniczny system i sposób wyznaczania własnej pozycji osób i/lub obiektów*“. Zgłoszenie patentowe nr P393181, 08 12 2010.
- [4] Ambroziak S., Katulski R., Sadowski J., **Siwicki W.** i Stefański J., „*Asynchronous system and method for estimating position of persons and/or objects*“. Zgłoszenie patentowe nr EP11460023, maj 2011.
- [5] Ambroziak S., Katulski R., Sadowski J., **Siwicki W.** i Stefański J., „*Asynchroniczny, naziemny i samoorganizujący się system radiolokacyjny*“, Naval Armament & Technology Conference, Gdynia, 2010.
- [6] Ambroziak S., Katulski R., Sadowski J., **Siwicki W.** i Stefański J., „*Asynchroniczny, naziemny i samoorganizujący się system radiolokacyjny - AEGIR*“, Krajowa Konferencja Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji, Poznań, 2011.
- [7] Ambroziak S., Katulski R., Sadowski J., **Siwicki W.** i Stefański J., „*Ground-based, Hyperbolic Radiolocation System with Spread Spectrum Signal - AEGIR*“, 9th International Navigational Symposium on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation TRANS-NAV, Gdynia, 2011.
- [8] Ambroziak S., Katulski R., Sadowski J., **Siwicki W.** i Stefański J., „*Ground-based, Hyperbolic Radiolocation System with Spread Spectrum Signal – AEGIR*“, w książce Navigational Systems and Simulators, Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, CRC Press/Balkema, London 2011.
- [9] Ambroziak S., Katulski R., Sadowski J., **Siwicki W.** i Stefański J., „*Asynchroniczny, naziemny i samoorganizujący się system radiolokacyjny – AEGIR*“, Przegląd Telekomunikacyjny. Wiadomości Telekomunikacyjne, pp. 389-392, czerwiec 2011.
- [10] Ambroziak S., Katulski R., Sadowski J., **Siwicki W.** i Stefański J., „*Ground-based, Hyperbolic and Selforganising Radiolocation System with Spread Spectrum Signal*“, Maritime System and Technology, Global Maritime Cooperation, Marsylia, Francja, 2011.

- [11] Ambroziak S., Katulski R., Sadowski J., **Siwicki W.** i Stefański J., „*Asynchronous and Self-organizing Radiolocation System – AEGIR*”, IEEE International Conference: Technologies for Homeland Security, Boston, USA, 2011.
- [12] Ambroziak S., Katulski R., Sadowski J., **Siwicki W.** i Stefański J., „*Autonomous, Ground Based, Self-Organizing Radiolocation Systems - AEGIR*”, Military Communications and Information Technology: A Comprehensive Approach Enabler, Warszawa, Wojskowa Akademia Techniczna, 2011.
- [13] Ambroziak S., Katulski R., Sadowski J., **Siwicki W.** i Stefański J., „*Asynchronous Radio-location System with Spread Spectrum Signals*”, 8-th Global Conference & Exposition mastAmericas 2011 Maritime Systems and Technology, Waszyngton, USA, 2011.
- [14] Ambroziak S., Katulski R., Sadowski J., **Siwicki W.** i Stefański J., „*Ground-based Radiolocation System – AEGIR*”, The 8-th International Symposium on Mechatronics and its Applications, Sharjah, Zjednoczone Emiraty Arabskie, 2012.
- [15] Ambroziak S., Katulski R., Sadowski J., **Siwicki W.** i Stefański J., „*AEGIR - Asynchronous and Ground-based Radiolocation System*”, The European Navigation Conference on Navigation for People Proceedings, Gdańsk, 2012.
- [16] Ambroziak S., Katulski R., Sadowski J., **Siwicki W.** i Stefański J., „*AEGIR - Asynchronous Radiolocation System*”, The Eighth International Conference on Wireless and Mobile Communications, Wenecja, Włochy, 2012.
- [17] Ambroziak S., Katulski R., Sadowski J., **Siwicki W.** i Stefański J., „*AEGIR - asynchroniczny system lokalizacji naziemnej*”, V Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna: "Technologie morskie dla obronności i bezpieczeństwa", Gdańsk, 2012.
- [18] Barker R. H., „*Group Synchronizing of Binary Digital Sequences. Communication Theory*”, Communication Theory, pp. 273-287, London, 1953.
- [19] Basker S.: „*The Case for eLORAN*”, Research and Radionavigation General Lighthouse Authorities of the United Kingdom and Ireland, 2006
- [20] Blanchard W., „*Hyperbolic Airborne Radio Navigation Aids — A Navigator's View of their History and Development*”, The Journal of Navigation, tom 44, nr 3, pp. 285-315, 1991.
- [21] Bronk K., Stefański J.: „*Analiza wpływu konfiguracji stacji pomiarowych na dokładność pozycjonowania w metodzie TDOA*”, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej. Radiokomunikacja, Radiofonia i Telewizja, Gdańsk, nr 1, 2007
- [22] Bronk K., Stefański J.: „*Bad Geometry Influence on Positioning Accuracy in Wireless Networks*”, EUROCON 2007, IEEE the International Conference on „Computer as a tool”, Warsaw, 2007
- [23] Buchmann J. A., „*Wprowadzenie do kryptografii*”, Warszawa: PWN, 2006.
- [24] Buracchini E., „*The Software Radio Concept*”, IEEE Communications Magazine, pp. 138-143, 2000.

- [25] Chamberlain, M.W.; „*A Software Defined HF Radio*”, Military Communications Conference MILCOM 2005. IEEE, 17-20.X.2005, vol. 4, pp. 2448 – 2453, 2005.
- [26] Chan Y. T., Ho K. C., „*A Simple and Efficient Estimator for Hyperbolic Location*”, IEEE Transactions on Signal Processing, tom 42, nr 8, pp. 1905-1915, 1994.
- [27] Czapiewska A., „*Nowy algorytm wyznaczania położenia obiektów na podstawie pomiarów odległości w środowisku wewnątrzbudynkowym*”, Przegląd Telekomunikacyjny. Wiadomości Telekomunikacyjne nr. 6 (2014), s.260-263
- [28] Czerner M., „*Latarnie morskie polskiego wybrzeża*”, Poznań: Wydawnictwo Poznańskie, 1986.
- [29] Daemen J., Rijmen V., „*The Design of Rijndael: AES – the Advanced Encryption Standard*”, Springer 2002.
- [30] Duan L.; „*The Key Issues to Design Software Radio*”, Radio Science Conference, 2004. Proceedings. pp. 119 – 122, Asia-Pacific, 24-27.VIII.2004.
- [31] Fang B., „*Simple Solutions for Hyperbolic and Related Position Fixes*”, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1990, vol 26, no 5, pp. 748-753.
- [32] Forssell B., „*Radionavigation systems*”, Artech House, 2008.
- [33] Foy W. H., „*Position-Location Solutions by Tylor-Series Estimation*” IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-12, iss. 2, pp 187-194, 1976.
- [34] Huang K-T, Chiu J-H., Shen S-S., „*A Novel Structure with Dynamic Operation Mode for Symmetric-Key Block Ciphers*”. International Journal of Network Security & Its Applications (IJNSA), January 2013
- [35] Januszewski J., „*Systemy radionawigacyjne i satelitarne*”, wydanie drugie red., J. Szczerkowska, Red., Studium Doskonalenia Kadr S.C. Wyższej Szkoły Morskiej, Gdynia 1993.
- [36] Kamiński R., Banachowicz A., „*Analysis Accuracy Integrated Position of Hyperbolic System JEMIOLUSZKA and Satellite Navigation System GPS*”, 12th International Conference on Geoinformatics “Geospatial Information Research: Bridging the Pacific and Atlantic”, Gavle, Sweden, 2004
- [37] Kaplan E.D., Hegarty C.J.: „*Understanding GPS: Principles and Applications*”, Artech House, 2006
- [38] Kasper J. F., Hutchinson C. E.: „*The OMEGA Navigation System an Overview*”, IEEE Communications Society Magazine, May, 1978
- [39] Katulski R, Magiera J, Stefański J., Czapiewska A., „*Badania odporności na zakłócenia wybranych systemów GNSS*”, Przegląd Telekomunikacyjny. Wiadomości Telekomunikacyjne, nr. nr 6 (2011), s.385-389
- [40] Katulski R., Magiera J., Czapiewska A., „*Device for Spoofing in Global Positioning System*”, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, nr. 4(191) (2012), s.63-70

- [41] Katulski R., Magiera J., Stefański J., Czapiewska A., „*Badania odbioru sygnałów systemu GPS w obecności sygnałów zakłócających*”, NATCon'2010 / Naval Armament & Technology Conference - IV Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna: Technika i Uzbrojenie Morskie, Gdynia 20-21 października 2010r.
- [42] Katulski R., Magiera J., Stefański J., Czapiewska A., „*Badania odbioru sygnałów systemu GPS w obecności sygnałów zakłócających*”, IV Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna: Technika i uzbrojenie morskie, NATCon'2010, Gdynia, 20-21 października 2010
- [43] Katulski R., Marczak A., Stefański J.; „*Technika radia programowalnego*”, Przegląd Telekomunikacyjny nr 10, pp. 402-406, 2004r,
- [44] Kayton M., „*Navigation: Ships to Space*”, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, tom 24, nr 5, pp. 474-519, 1988.
- [45] Knuth D. E., „*The Art of Computer Programming, Seminumerical Algorithms*”, Addison Wesley., 1969.
- [46] Küpper A.: „*Location Based Services – Fundamentals and Operation*”, John Wiley & Sons, 2005
- [47] Last J. D., Linsdall D. K.: „*Reception of DECCA Navigator Multipulse and Zone Identification Transmissions by Single-Channel Receivers*”, IEE Proceedings, vol. 133, no. 5, August 1986
- [48] Lin S. i Costello J., „*Error Control Coding: Fundamentals and Applications*”, Prentice Hall, 1983.
- [49] Magiera J., „*Analiza porównawcza systemów nawigacji satelitarnej GPS i GLONASS*”, Przegląd Telekomunikacyjny. Wiadomości telekomunikacyjne, nr 2-3, pp. 72-76, 2010.
- [50] Magiera J., Czapiewska A., „*Research on GNSS Satellite Navigation Systems*”, Zeszyty Naukowe Wydziału ETI Politechniki Gdańskiej. Technologie Informacyjne- Tom 1, nr 9 (2011), pp.375-380, 2011.
- [51] Magiera J., Katulski R., „*Analiza i badania systemu antyspoofingowego GPS*”, X JUBILEUSZOWA Konferencja Naukowo-Techniczna: Systemy Rozpoznania i Walki Elektronicznej pp.1-10, 2014.
- [52] Magiera J., Katulski R., „*Metody ochrony przed spoofingiem w systemach nawigacji satelitarnej GNSS*”, Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, nr. 1, s.5-10, 2015.
- [53] Magiera J., Katulski R., „*Technika ochrony odbiorników GPS przed atakami typu spoofing*”, Przegląd Komunikacyjny, nr. 11, pp.19-21, 2014.
- [54] Marczak A., „*Kodowanie kanałowe w cyfrowych systemach komórkowych*”, Przegląd telekomunikacyjny. Wiadomości Telekomunikacyjne. nr.2-3, pp. 76-79, 2010
- [55] Menezes A.J., Oorschot P.C., Vanstone S.A., „*Kryptografia stosowana*”, WNT, Warszawa 2005.
- [56] Mitola III J., „*Software Radio Architecture*”, John Wiley & Sons, Inc., 2000.



- [57] Mizusawa G., „*Performance of Hyperbolic Position Location Techniques for Code Division Multiple Access*“, Blacksburg 1996.
- [58] Papadimitratos P., Jovanovic A., „*GNSS-based Positioning: Attacks and Countermeasures*“, Military Communications Conference, MILCON 2008
- [59] Rudin W., „*Podstawy analizy matematycznej*“, PWN, Warszawa 2000.
- [60] Rutkowski D., „*Systemy radiokomunikacyjne z rozpraszaniem widma sygnałów z wykorzystaniem podziału kodowo-czasowego.*“, Przegląd Telekomunikacyjny. Nr 1, pp 12-21, 1997.
- [61] Sathyamoorthy D., „*Global Navigation Sattelite System (GNSS) Spoofing: A Review of Growing Risks and Mitigation Steps*“, Defence S&T Technical Bulletin, nr 6(1), pp. 42-61, 2013.
- [62] Schneier B., „*Kryptografia dla praktyków: protokoły, algorytmy i programy źródłowe w języku C*“, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
- [63] Shapiro L. D.: „*Loran-C Sky-Wave Delay Measurements*“, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 17, issue 4, 1968.
- [64] Shepard D.P., Bhatti J.A., Humphreys T.E., „*Drone Hack: Spoofing Attack Demonstartion on a Civilian Unmanned Aerial Vehicle*“, GPS World, nr 23(8), pp. 30-33, 2012.
- [65] **Siwicki W.**, „*Badanie i analiza wybranych parametrów użytkowych naziemnego systemu radiolokalizacyjnego AEGIR*“, Przegląd Telekomunikacyjny. Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 6, pp. 448-451, 2013.
- [66] **Siwicki W.**, Stefański J., „*DS-CDMA Receiver in Software Defined Radio technology. Admission to the Implementation of a RAKE Receiver*“, The Fourth International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems and Technologies UBICOMM, Florencja, Włochy, 25-30.X.2010.
- [67] Stefański J., „*Analiza efektywności metod estymacji położenia terminala ruchomego w środowisku propagacji wielodrogowej*“, KKRRiT, Warszawa 2009.
- [68] Stefański J., „*Analiza i badania pomiarowe dokładności lokalizowania terminali ruchomych w sieciach komórkowych*“, Przegląd Telekomunikacyjny. Wiadomości Telekomunikacyjne, pp. 229-235, czerwiec 2010.
- [69] Stefański J., „*Badanie metod i projektowanie usług lokalizacyjnych w sieciach radiokomunikacyjnych*“, Monografia. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2012.
- [70] Stefański J., „*Źródła błędów oraz miary jakości estymacji położenia obiektów w systemach radionawigacyjnych*“, Przegląd Telekomunikacyjny. Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 2-3, pp. 68-71, 2010.
- [71] Stefański J., Sadowski J., „*Trendy rozwojowe techniki i technologii radiolokalizowania*“, Przegląd Telekomunikacyjny. Wiadomości Telekomunikacyjne, pp. 107-115, kwiecień 2012.
- [72] Viterbi A., „*Error Bounds for Convolutional Codes and an Asymptotically Optimum Decoding Algorithm*“, IEEE Transactions on Information Theory, Tomy 1 IT-13, pp. 260-269, 1967.

- [73] Volpe J. A., „*Vulnerability Assessment of the U.S. Transportation Infrastructure that Relies on GPS*”, National Transportations Systems Center, USA, 2001.
- [74] Wesołowski K., „*Podstawy cyfrowych systemów telekomunikacyjnych*”, WKŁ, Warszawa 2006.
- [75] Wobst R., „*Kryptologia Budowa i łamanie zabezpieczeń*”, Wydawnictwo RM, Warszawa 2002.
- [76] Woźniak M., Red., „*Statystyka opisowa*”, Wydawnictwo AE, Kraków 2002.

#### Dokumenty standaryzacyjne, raporty, instrukcja:

- [77] 3rd Generation Partnership Project, „*3GPP TS 25.213 V5.2.0; Technical Specification Group Radio Access Network, Spreading and modulation (FDD) (release 5)*” 2002-09.
- [78] 3rd Generation Partnership Project, „*Technical Specification 05.03 v.8.9.0, GSM/EDGE Radio Access Network; Channel coding*”, Release 1999, 01-2005
- [79] Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej, Rozporządzenie Rady Ministrów w sprawie państwowego systemu odniesień przestrzennych, Warszawa, 2012.X.15.
- [80] Internationale LORAN Association, „*Enhanced Loran (eLoran) – Definition Document*”, Report Version 1.0, October 2007
- [81] ITU, „*Radio Regulation*” ITU, Genewa, 2012.
- [82] Prezes Urzędu Komunikacji Elektronicznej. Pozwolenie radiowe nr RRL/A/A/0049/2010 z dnia 29 marca 2010.
- [83] Stanford Research Systems, „*Operation and Service Manual, FS725 Rubidium Frequency Standard*”, 2005.
- [84] The DECCA Navigator Company Limited, „*The DECCA Navigator Principles and Performance of the System*”, 1979.
- [85] United States of America, Department of Defence, „*World Geodetic System 1984 - Technical Report*”, 2000.01.03.
- [86] United States of America, Department of Transportation and United States of America Coast Guard, „*Specification of the Transmitted LORAN-C Signal*”, May 1994
- [87] United States of America, National Institute of Standards and Technology (NIST). „*Announcing the ADVANCED ENCRYPTION STANDARD (AES)*” Federal Information Processing Standards Publication 197. November 26, 2001.

#### Strony WWW:

- [88] BeiDou Navigation Satellite System,  
<http://en.beidou.gov.cn/> [Data uzyskania dostępu: 2016-08-22].

- [89] European Space Agency,  
[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/Galileo/What\\_is\\_Galileo](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/What_is_Galileo)  
[Data uzyskania dostępu: 2016-08-22].
- [90] Federal Space Agency, „*GLONASS Information-Analytical Center*”,  
<http://glonass-iac.ru/en/>.  
[Data uzyskania dostępu: 2016-08-22].
- [91] Google, „*Google Earth*”  
<http://www.google.pl/intl/pl/earth/>.  
[Data uzyskania dostępu: 2016-08-22].
- [92] Google, „*KML Documentation Introduction*”  
<https://developers.google.com/kml/documentation/>  
[Data uzyskania dostępu: 2016-08-22].
- [93] Indian Space Research Organisation,  
<http://www.isro.org/satellites/irnss-1a.aspx>  
[Data uzyskania dostępu: 2016-08-22].
- [94] Javad,  
<http://www.javad.com/>  
[Data uzyskania dostępu: 2016-08-22].
- [95] Javad, „*Javad ALPHA Datasheet*”  
[http://www.javad.com/downloads/javadgnss/sheets/ALPHA\\_Datasheet.pdf](http://www.javad.com/downloads/javadgnss/sheets/ALPHA_Datasheet.pdf)  
[Data uzyskania dostępu: 2016-08-22].
- [96] Kopacz P.  
[http://www.deltami.edu.pl/temat/matematyka/geometria/planimetria/2013/02/28/Gdy\\_krzywa\\_niejedno\\_ma\\_imie/](http://www.deltami.edu.pl/temat/matematyka/geometria/planimetria/2013/02/28/Gdy_krzywa_niejedno_ma_imie/)  
[Data uzyskania dostępu: 2016-08-22].
- [97] Navipedia, „Nawigacja Morska”  
<http://www.navipedia.pl/navi.html>  
[Data uzyskania dostępu: 2016-08-22].
- [98] Embarcadero - strona producenta oprogramowania,  
<https://www.embarcadero.com>  
[Data uzyskania dostępu: 2016-08-22].
- [99] U.S. Coast Guard, „*LORAN-C General Information*” [Online]. Available:  
<http://www.navcen.uscg.gov/?pageName=loranMain>  
[Data uzyskania dostępu: 2016-08-22].
- [100] U.S. Coast Guard, „*Navstar GPS User Equipment Introduction - Public Release*”,  
09 1996.  
<http://www.navcen.uscg.gov/pubs/gps/gpsuser/gpsuser.pdf>  
[Data uzyskania dostępu: 2016-08-22].

## Załączniki

**Załącznik A: Struktura depezb lokalizacyjnych**

Oprogramowanie sterujące wszystkimi elementami systemu napisane zostało w środowisku C/C++, zatem definicja typów zmiennych użytych do opisu poszczególnych pól danych została zaczerpnięta właśnie z tego środowiska. Szczegółowy opis poszczególnych pól podstawowych i dodatkowych danych lokalizacyjnych został przedstawiony w poniższych tabelach.

*Depesza Lokalizacyjna Podstawowa DLP*

| Nazwa pola                                                      | Typ zmiennej *) | Liczba zajmowanych bajtów |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------|
| Identyfikator informacji                                        | short int       | 1                         |
| Identyfikator pomocniczy                                        | short int       | 1                         |
| Numer stacji bazowej (referencyjnej)                            | short int       | 1                         |
| Długość geograficzna stacji bazowej (referencyjnej) **)         | float           | 4                         |
| Szerokość geograficzna stacji bazowej (referencyjnej) **)       | float           | 4                         |
| EIRP [dBm]                                                      | int             | 2                         |
| Wysokość wzniesienia anteny nadawczej [m n.p.t]                 | int             | 2                         |
| Wysokość wzniesienia terenu [m n.p.m]                           | int             | 2                         |
| Odległość stacji bazowej (referencyjnej) od linii brzegowej [m] | float           | 4                         |
| Rezerwa                                                         | -               | 11                        |
| <b>Suma:</b>                                                    |                 | <b>32 (256 bitów)</b>     |

*Depesza Lokalizacyjna Dodatkowa DLD.*

| Nazwa pola                                      | Typ zmiennej *) | Liczba zajmowanych bajtów |
|-------------------------------------------------|-----------------|---------------------------|
| Identyfikator informacji                        | short int       | 1                         |
| Identyfikator pomocniczy                        | short int       | 1                         |
| Numer sąsiedniej stacji bazowej (referencyjnej) | short int       | 1                         |
| RTD ( <i>Relative Time Difference</i> ) [ns]    | long int        | 4                         |
| Numer sąsiedniej stacji bazowej (referencyjnej) | short int       | 1                         |
| RTD ( <i>Relative Time Difference</i> ) [ns]    | long int        | 4                         |
| Numer sąsiedniej stacji bazowej (referencyjnej) | short int       | 1                         |
| RTD ( <i>Relative Time Difference</i> ) [ns]    | long int        | 4                         |
| Rezerwa                                         | -               | 15                        |
| <b>Suma:</b>                                    |                 | <b>32 (256 bitów)</b>     |

\*) Typy zmiennych są zaczerpnięte z języka ANSI C. Dla różnych dystrybucji języka C/C++ nazwy zmiennych mogą się różnić między sobą. Istotnym jest, aby zastosowana zmienna mieściła się w przyjętym rozmiarze (ostatnia kolumna tab. 3.1 i tab. 3.2). Typ *short int* - liczba całkowita między 0 a 255; typ *int* - liczba całkowita między -32 768 a 32 767; typ *float* - liczba między  $3,4e-38$  a  $3,4e+38$ .

\*\*\*) Typ zmiennej *float* umożliwia zapis liczby ze znakiem. W związku z tym, w przypadku długości geograficznej, znak „+” oznacza długość geograficzną wschodnią (E), natomiast w przypadku szerokości geograficznej znak „+” oznacza szerokość geograficzną północną (N).

## Załącznik B: Oprogramowanie lokalizatora

Poniżej przedstawiono w postaci pseudokodu najważniejsze fragmenty oprogramowania zawartego w lokalizatorze.

### Inicjalizacja odbiornika EM550:

```
void polacz_z_EM550()
{
 Form1->TcpClient1->Open();
 if (Form1->TcpClient1->Connected)
 {
 Form1->TcpClient1->SendBuf ("*RST\n", 5, 0); Sleep(300); //resetowanie odbornika EM550
 Form1->TcpClient1->SendBuf ("*WAI\n", 5, 0); Sleep(300);
 Form1->TcpClient1->SendBuf ("FREQ 431.5 MHz\n", 15, 0); Sleep(30);
 Form1->TcpClient1->SendBuf ("*TST?\n", 6, 0); Sleep(30);
 Form1->TcpClient1->ReceiveBuf (rec, 3, 0); Sleep(30);

 if (rec[0]=='0')
 {
 Form1->Label2->Caption="Połączono z EM550";
 Form1->TcpClient1->SendBuf ("FREQ?\n", 6, 0); Sleep(100); //odpytanie o częstotliwość
 ile=Form1->TcpClient1->ReceiveBuf (rec, sizeof (rec)-1, 0);
 rec[ile-2]=0;
 freq_out=StrToInt ((String) rec);
 Form1->Label4->Caption=FloatToStr ((float) freq_out/1000000)+" MHz";
 Form1->TcpClient1->SendBuf ("input:attenuation:auto on\n", 26, 0); Sleep(30);
 Form1->TcpClient1->SendBuf ("input:attenuation:mode norm\n", 28, 0); Sleep(30);
 //konfiguracja portu VIDEO
 Form1->TcpClient1->SendBuf ("OUTPut:VIDeo:MODE IF\n", 21); Sleep(100);
 Form1->TcpClient1->SendBuf ("OUTPut:VIDeo:FREQuency 1.024 MHz\n", 33); Sleep(100);
 Form1->TcpClient1->SendBuf ("BANDwidth 1 MHz\n", 16); Sleep(100); //szerokość filtru
 }
 else
 {
 Form1->Label2->Caption="Odbiornik uszkodzony";
 }
 }
}
```

### Inicjalizacja karty akwizycji danych:

```
//połączenie z PDA 16
res = ConnectToDeviceD16 (&hBrd, MY_PDA16_BRD_NUM);
if (SIG_SUCCESS == res)
 Form1->Label12->Caption="Połączono";

SetAdcClockReferenceD16 (&hBrd, D16CLKREF_INT_10MHZ);

//częstotliwość próbkowania w MHz (45-160)
dAcqRate=65.536;

SetActiveChannelsD16 (hBrd, D16CHANNEL_ONE);
SetInternalClockRateD16 (hBrd, dAcqRate);

SetPostAdcClockDividerD16 (hBrd, D16POSTADCCCLKDIV_16);

SetVoltRangeCh1D16 (hBrd, napiecie_akwizycji);
IssueSoftwareTriggerD16 (hBrd);

res = AllocateDmaBufferD16 (hBrd, DMA_BUFFER_SAMPLES, &dma_bufp);
```

### Główna pętla akwizycji danych:

```
while (!bDone)
{
 if (loop_counter & 1)
 cur_chunkp = dma_bufp + DMA_XFER_SAMPLES;
```

```

else
 cur_chunkp = dma_bufp;

res = GetPciAcquisitionDataD16(hBrd, DMA_XFER_SAMPLES, cur_chunkp, TRUE);
if (SIG_SUCCESS != res)
{
 Form1->Label12->Caption="Failed to obtain PCI acquisition data";
 FreeMemoryD16(NULL);
 break;
}

if (prev_chunkp)
{
 if (INVALID_HANDLE_VALUE != hFile)
 {
 DWORD dwBytesWrote;
 if (!WriteFile(hFile, prev_chunkp, DMA_XFER_SAMPLES *
sizeof(pda16_sample_t), &dwBytesWrote, NULL))
 {
 FreeMemoryD16(NULL);
 break;
 }
 }
}

res = WaitForTransferCompletedD16(hBrd);
if (SIG_SUCCESS != res)
{
 if (SIG_CANCELLED == res)
 Form1->Label12->Caption="Akwizycja przerwana";
 else
 {
 Form1->Label12->Caption="An error occurred waiting for transfer to complete";
 FreeMemoryD16(NULL);
 }
 break;
}

} //Koniec pętli akwizycji WHILE

EndBufferedPciAcquisitionD16(hBrd);

AllDone:

// -- Cleanup
if (INVALID_HANDLE_VALUE != hFile)
 CloseHandle(hFile);
if (dma_bufp)
 FreeDmaBufferD16(hBrd, dma_bufp);
//rozłączenie z PDA16
DisconnectFromDeviceD16(hBrd);

```

### Uaktywnienie połączenia z zewnętrznym odbiornikiem JAVAD:

```

//Otwarcie portu szeregowego dla odczytu z JAVAD
try
{
 this->ComPort1->Open();
}

//Wybor trybu pracy odbiornika JAVAD
if(this->ComPort1->Connected)
{
 switch(JAVAD)
 {
 case 0:
 {

```



```

plan = fftwf_plan_dft_1d(N, in, out, FFTW_FORWARD, FFTW_ESTIMATE);
plan2 = fftwf_plan_dft_1d(N, in, out, FFTW_BACKWARD, FFTW_ESTIMATE);

for(i=0;i<N;i++)
{
 in[i][0]=0;
 in[i][1]=0;
}

for(i=0;i<dl2/4;i++)
{
 in[4*i][0]=Sn[sekwencjaRe][i];
 in[4*i+1][0]=Sn[sekwencjaRe][i];
 in[4*i+2][0]=Sn[sekwencjaRe][i];
 in[4*i+3][0]=Sn[sekwencjaRe][i];

 in[4*i][1]=Sn[sekwencjaIm][i];
 in[4*i+1][1]=Sn[sekwencjaIm][i];
 in[4*i+2][1]=Sn[sekwencjaIm][i];
 in[4*i+3][1]=Sn[sekwencjaIm][i];
}

k=0;
ktora=0;

for(i=0;i<dl2;i++)
{
 if(in[i][0]<0.9) in[i][0]=-1;
 if(in[i][1]<0.9) in[i][1]=-1;
 if(i && i%4096==0) k++;
 in[i][0]*=start[k];
 in[i][1]*=start[k];
}

fftwf_execute(plan);

for(i=0;i<N;i++)
{
 tmp2[i]=out[i][0];
 tmp3[i]=out[i][1];
}

do
{
 for(k=0;k<N;k++)
 test[k]=(double)dane[k+m*del];
 mean=Mean(test,N-1);
 skal=MaxValue(test,N-1);
 skal-=mean;
 for(i=0;i<N;i++)
 {
 in[i][0]=(((float)dane[i+m*del]-mean)/skal)*cos((float)i*M_PI/2.0);
 in[i][1]=(((float)dane[i+m*del]-mean)/skal)*sin((float)i*M_PI/2.0);
 }

 fftwf_execute(plan);
 for(k=0; k<N; k++)
 {
 if(k>0.2*N && k<0.8*N)
 {
 in[k][0]=0;
 in[k][1]=0;
 }
 else
 {
 in[k][0]=(out[k][0]*tmp2[k]+out[k][1]*tmp3[k])/(float)N;
 in[k][1]=(out[k][1]*tmp2[k]-out[k][0]*tmp3[k])/(float)N;
 }
 }

 fftwf_execute(plan2);

 for(k=0; k<N; k++)
 tmp1[k]=sqrt(out[k][0]*out[k][0]+out[k][1]*out[k][1]);

 i=N-dl2;
}

```



```

for(k=0; k<i; k++)
{
 if(tmp1[k]>kor)
 {
 max=-1000000;
 for(j=0;j<=100;j++)
 {
 if(tmp1[k+j]>max)
 {
 tablica_TDOA[stacja][ktora]=m*del+k+j;
 max=tmp1[k+j];
 }
 }

 k+=150000;
 ktora++;
 if(ktora>1080) break;
 }
}
if(ktora>1080) break;
m++;
}
while(m<liczbaFFT);
delete [] tmp1;
delete [] tmp2;
delete [] tmp3;

delete [] test;

fftwf_free(in);
fftwf_free(out);

fftwf_destroy_plan(plan);
fftwf_destroy_plan(plan2);

```

### Obliczanie różnicy czasu w sygnałach odebranych od stacji nr 0 i 1:

```

//generowanie poprawek do estymacji TDOA
for (i = 0; i < max_usred; i++)
 tmp1[i]=0;

tablica_poprawek[0][0]=-1;
p=0;
for (i=0; i<1080; i++)
{
 if(tablica_TDOA[0][i]!=-1)
 {
 j=0;
 k=0;
 l=0;
 while (j<1080 && p<max_usred)
 {
 if(tablica_TDOA[1][j]!=-1)
 {
 dell=tablica_TDOA[1][j]-tablica_TDOA[0][i];

 if(dell<probek-1 && dell>0)
 {
 tmp1[p]=dell;
 p++;
 }
 }
 j++;
 }
 }
}

dell10=0;

for (i=0; i<p; i++)
 dell10+=tmp1[i];

if (p!=0)
{
 tablica_poprawek[0][0]=floor(((float)dell10/(float)p)+0.5);
}

```

```

 poprawka_do_nadania[0]=tablica_poprawek[0][0];
 }

 if (p==0 && tablica_TDOA[1][0]==-1)
 poprawka_do_nadania[0]=-1;

```

### Algorytm wyznaczania pozycji wg algorytmu TDOA (metoda Chana):

```

void oblicz_pozycje_TDOA()
{
 //przeliczenie wspolrzednych z WGS na XY
 for (int i = 0; i < LICZBA_STACJI; i++)
 WGStoXY(wspolrzedne_stacji[i][1],wspolrzedne_stacji[i][0],
 wspolrzedna_stacji_XY[i][0], wspolrzedna_stacji_XY[i][1]);

 //zamiana na wspolrzedne pomocnicze, zeby nie uzyac dlugich nazw tablic
 X1=wspolrzedna_stacji_XY[0][0];
 Y1=wspolrzedna_stacji_XY[0][1];
 X2=wspolrzedna_stacji_XY[1][0];
 Y2=wspolrzedna_stacji_XY[1][1];
 X3=wspolrzedna_stacji_XY[2][0];
 Y3=wspolrzedna_stacji_XY[2][1];

 //obliczenie odleglosci miedzy stacjami referencyjnymi
 R10=odleglosc(wspolrzedne_stacji[1][1], wspolrzedne_stacji[1][0],
 wspolrzedne_stacji[0][1], wspolrzedne_stacji[0][0]);
 R20=odleglosc(wspolrzedne_stacji[2][1], wspolrzedne_stacji[2][0],
 wspolrzedne_stacji[0][1], wspolrzedne_stacji[0][0]);
 R30=odleglosc(wspolrzedne_stacji[3][1], wspolrzedne_stacji[3][0],
 wspolrzedne_stacji[0][1], wspolrzedne_stacji[0][0]);

 //poprawki ze stacji nadrzecznej
 RDT10=DDN_RTD1[0][0];
 RDT20=DDN_RTD2[0][0];

 //przesunięcie zarejestrowane w odbiorniku
 poprawka10=tablica_poprawek[0][0];
 poprawka20=tablica_poprawek[1][0];

 //czas propagacji miedzy stacjami
 Tp1=floor(R10/(300000000/4096000));
 Tp2=floor(R20/(300000000/4096000));

 //*****
 // GŁÓWNY ALGORYTM
 //*****

 //tworzenie macierzy X
 macierz_X[0][0]=(double)X2-X1;
 macierz_X[0][1]=(double)X3-X1;
 macierz_X[1][0]=(double)Y2-Y1;
 macierz_X[1][1]=(double)Y3-Y1;

 //tworzenie macierzy R
 macierz_R[0]=(RDT10-poprawka10-Tp1-1)*(300000000.0/4096000);
 macierz_R[1]=(RDT20-poprawka20-Tp2-1)*(300000000.0/4096000);

 //tworzenie macierzy K
 macierz_K[0]=macierz_R[0]*macierz_R[0]-(X2*X2+Y2*Y2)+(X1*X1+Y1*Y1);
 macierz_K[1]=macierz_R[1]*macierz_R[1]-(X3*X3+Y3*Y3)+(X1*X1+Y1*Y1);

 //tworzenie macierzy odwrotnej X
 macierz_X_odwrotna[0][0]= 1.0*(Y3-Y1)/((X2-X1)*(Y3-Y1)-(X3-X1)*(Y2-Y1));
 macierz_X_odwrotna[0][1]=-1.0*(X3-X1)/((X2-X1)*(Y3-Y1)-(X3-X1)*(Y2-Y1));
 macierz_X_odwrotna[1][0]=-1.0*(Y2-Y1)/((X2-X1)*(Y3-Y1)-(X3-X1)*(Y2-Y1));
 macierz_X_odwrotna[1][1]= 1.0*(X2-X1)/((X2-X1)*(Y3-Y1)-(X3-X1)*(Y2-Y1));

 //tworzenie macierzy W
 macierz_W[0]=-
 (macierz_X_odwrotna[0][0]*macierz_R[0]+macierz_X_odwrotna[1][0]*macierz_R[1]);
 macierz_W[1]=-
 (macierz_X_odwrotna[0][1]*macierz_R[0]+macierz_X_odwrotna[1][1]*macierz_R[1]);

 //tworzenie macierzy Z
 macierz_Z[0]=0.5*(macierz_X_odwrotna[0][0]*macierz_K[0]+macierz_X_odwrotna[1][0]*macierz_K[1]);
 macierz_Z[1];

```

```

macierz_Z[1]=0.5*(macierz_X_odwrotna[0][1]*macierz_K[0]+macierz_X_odwrotna[1][1]*macierz_K[1]);

//zmienne pomocnicze
a = macierz_W[0]*macierz_W[0]+macierz_W[1]*macierz_W[1]-1;
b =
2*(X1*macierz_W[0]+Y1*macierz_W[1]+macierz_W[0]*macierz_Z[0]+macierz_W[1]*macierz_Z[1])
;
c =
X1*X1+Y1*Y1+2*X1*macierz_Z[0]+2*Y1*macierz_Z[1]+macierz_Z[0]*macierz_Z[0]+macierz_Z[1]*macierz_Z[1];

//wyniki
xx1=macierz_W[0]*((-b+sqrt(b*b-4*a*c))/(2*a))-macierz_Z[0];
yy1=macierz_W[1]*((-b+sqrt(b*b-4*a*c))/(2*a))-macierz_Z[1];

xx2=macierz_W[0]*((-b-sqrt(b*b-4*a*c))/(2*a))-macierz_Z[0];
yy2=macierz_W[1]*((-b-sqrt(b*b-4*a*c))/(2*a))-macierz_Z[1];

//przeliczenie z XY na WGS
XYtoWGS(xx1, yy1, tablica_wspolrzedne[0][0], tablica_wspolrzedne[0][1]);
XYtoWGS(xx2, yy2, tablica_wspolrzedne[0][2], tablica_wspolrzedne[0][3]);
}

```

## Załącznik C: Oprogramowanie stacji referencyjnej

Poniżej przedstawiono w postaci pseudokodu najważniejsze fragmenty oprogramowania zawartego w stacji referencyjnej.

Obsługa odbiornika EM550, karty akwizycji danych oraz algorytm wyznaczania różnic czasowych zarówno w części lokalizatora jak i w stacji referencyjnej są identyczne.

### Generowanie depeszy z poprawkami DLD:

```

//generowanie poprawek i ich zapis do pliku
deltaT2_T1=poprawka_do_nadania[0];
deltaT3_T1=poprawka_do_nadania[1];
deltaT4_T1=poprawka_do_nadania[2];

uchar_to_bin(Id_inf,DLD_Id_inf_bin);
uchar_to_bin(Id_pom,DLD_Id_pom_bin);
uchar_to_bin(Nr_1,DLD_Nr_1_bin);
uchar_to_bin(Nr_2,DLD_Nr_2_bin);
uchar_to_bin(Nr_3,DLD_Nr_3_bin);
int_to_bin(deltaT2_T1,DLD_RDT_21_bin);
int_to_bin(deltaT3_T1,DLD_RDT_31_bin);
int_to_bin(deltaT4_T1,DLD_RDT_32_bin);

for(j = 0; j < 8; j++) temp[j]=DLD_Id_inf_bin[j]; //Identyfikator informacji
for(j = 8; j < 16; j++) temp[j]=DLD_Id_pom_bin[j-8]; //Identyfikator pomocniczy
for(j = 16; j < 24; j++) temp[j]=DLD_Nr_1_bin[j-16]; //Numer sąsiedniej stacji
for(j = 24; j < 56; j++) temp[j]=DLD_RDT_21_bin[j-24]; //poprawka czasowa
for(j = 56; j < 64; j++) temp[j]=DLD_Nr_2_bin[j-56]; //Numer sąsiedniej stacji
for(j = 64; j < 96; j++) temp[j]=DLD_RDT_31_bin[j-64]; //poprawka czasowa
for(j = 96; j < 104; j++) temp[j]=DLD_Nr_3_bin[j-96]; //Numer sąsiedniej stacji
for(j = 104; j < 136; j++) temp[j]=DLD_RDT_32_bin[j-104]; //czasowa
for(j = 136; j < 256; j++) temp[j]='0'; //rezerwa
temp[256]=0;

```

```
FILE *plik_DLD;
plik_DDN=fopen("D:_DLD\\input_DLD","w");
 fprintf(plik_DLD,"%s",temp);
fclose (plik_DLD);
```

## Załącznik D: Oprogramowanie do wizualizacji wyników

Poniżej przedstawiono w postaci pseudokodu najważniejsze fragmenty oprogramowania odpowiedzialnego za wizualizację wyników na ekranie komputera.

```
public class Wizualizacja implements PropertyChangeListener{

 static boolean nasluch = true;
 static int histOd;
 static int histDo;

 static JMapFrame okno;
 static Markery me;
 static Odczyt odczyt;

 public static JFormattedTextField pole;

 /* konstruktor */
 Wizualizacja (Boolean historia, int historiaOd, int historiaDo){
 if (historia){
 nasluch = false;
 histOd = historiaOd;
 histDo = historiaDo;
 }

 pole = new JFormattedTextField();
 pole.setValue(new Integer(0));
 pole.addPropertyChangeListener("value", this);
 }

 public void obsluga() throws Exception {
 /*
 File shapeFile = JFileDataStoreChooser.showOpenFile("shp", null);
 if (shapeFile == null) return;
 */

 odczyt = new Odczyt();
 odczyt.wczytaj();

 File shapeFile = new File(odczyt.sciezki[0]+"\\obrys_zg.shp");
 FileDataStore store = FileDataStoreFinder.getDataStore(shapeFile);
 FeatureSource featureSource = store.getFeatureSource();

 MapContext map = new DefaultMapContext();
 map.setCoordinateReferenceSystem(DefaultGeographicCRS.WGS84);
 Style style = SLD.createPolygonStyle(Color.BLACK, Color.CYAN, 1.0F);
 map.addLayer(featureSource, style);
 map.setTitle("Wizualizacja");

 me = new Markery (DefaultGeographicCRS.WGS84);
 odczyt.wczytaj_stacje();

 MapLayer layer2 = new DefaultMapLayer(me.featureColl, me.style);
 map.addLayer(layer2);

 okno=new JMapFrame(map);
 okno.enableToolBar(true);
 okno.enableStatusBar(true);
 okno.setSize(1000, 700);
 okno.setDefaultCloseOperation(JFrame.EXIT_ON_CLOSE);
 okno.setLocationRelativeTo(null);
 okno.setVisible(true);

 if(nasluch){
 Nasluch nasluch = new Nasluch();
```

---

```
 nasluch.start();
 }
 else {
 odczyt.wczytaj_GNSS(histOd, histDo);
 odczyt.wczytaj_TDOA(histOd, histDo);
 }
}
```