



Imię i nazwisko autora rozprawy: Agnieszka Czapiewska
Dyscyplina naukowa: Telekomunikacja

ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim: Badanie i analiza efektywności radiolokalizowania obiektów w środowisku wewnątrzbudynkowym

Tytuł rozprawy w języku angielskim: Research and analysis on radio localization in indoor environment

Promotor <i>podpis</i>	Drugi promotor <i>podpis</i>
dr hab. inż. Jacek Stefański	
Promotor pomocniczy <i>podpis</i>	Kopromotor <i>podpis</i>
dr inż. Jarosław Sadowski	





*Składam serdeczne podziękowania
wszystkim, którzy okazali mi
wsparcie podczas pracy nad
niniejszą rozprawą,
w szczególności pracownikom
Katedry Systemów i Sieci
Radiokomunikacyjnych
Politechniki Gdańskiej*



Spis treści

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	3
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW	5
STRESZCZENIE ROZPRAWY W JĘZYKU POLSKIM	7
STRESZCZENIE ROZPRAWY W JĘZYKU ANGIELSKIM	9
ROZDZIAŁ 1. WPROWADZENIE	11
1.1. CHARAKTERYSTYKA PROBLEMU RADIOLOKALIZOWANIA OBIEKTÓW W ŚRODOWISKU WEWNĄTRZBUDYNKOWYM	13
1.2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU BADAWCZEGO	19
1.3. CEL, TEZA I ZAKRES PRACY	20
ROZDZIAŁ 2. METODY OKREŚLANIA POŁOŻENIA	23
2.1. METODA TOA	24
2.2. METODA TDOA	28
2.3. METODA AoA	30
2.4. METODA RSS	34
ROZDZIAŁ 3. ALGORYTMY WYZNACZANIA POŁOŻENIA OBIEKTÓW	37
3.1. ALGORYTMY STOSOWANE OBECNIE	37
3.1.1. ALGORYTM CHANA	37
3.1.2. ALGORYTM FOY'A	44
3.1.3. ALGORYTM FANGA	50
3.2. PROPOZYCJA NOWEGO ALGORYTMU WYZNACZANIA POŁOŻENIA OBIEKTU NA PODSTAWIE POMIARÓW ODLEGŁOŚCI	53
ROZDZIAŁ 4. OPIS DEMONSTRATORA TECHNOLOGICZNEGO UŻYTEGO DO BADAŃ	59
4.1. ZAŁOŻENIA SYSTEMU	60
4.2. BUDOWA SYSTEMU	61

ROZDZIAŁ 5. OPIS SPOSOBU PROWADZENIA BADAŃ ORAZ NARZĘDZI PROGRAMOWYCH	69
5.1. RADIOWE POMIARY ODLEGŁOŚCI	69
5.2. OPROGRAMOWANIE	70
5.2.1. PORÓWNYWANIE ALGORYTMÓW	70
5.2.2. BADANIE ZBIEŻNOŚCI	73
5.2.3. BADANIE WPŁYWU NACHYLENIA PÓŁPROSTYCH TWORZĄCYCH FUNKCJĘ BŁĘDU	74
5.2.4. IMPLEMENTACJA NOWEGO WEWNĄTRZBUDYNKOWEGO ALGORYTMU WYZNACZANIA POŁOŻENIA OBIEKTÓW	76
5.2.5. IMPLEMENTACJA ALGORYTMU CHANA	79
5.2.6. IMPLEMENTACJA ALGORYTMU FOY'A	80
ROZDZIAŁ 6. WYNIKI BADAŃ NA RZECZYWISTYCH POMIARACH ODLEGŁOŚCI	83
6.1. ANALIZOWANIE ZBIEŻNOŚCI ALGORYTMU WAP	83
6.1.1. URZĄDZENIA ROZSTAWIONE W TERENIE OTWARTYM	84
6.1.2. URZĄDZENIA ROZSTAWIONE WEWNĄTRZ BUDYNKU	91
6.1.3. STACJE REFERENCYJNE NA ZEWNĄTRZ BUDYNKU, MIO WEWNĄTRZ BUDYNKU	97
6.1.4. WNIOSKI	108
6.2. ANALIZA WPŁYWU NACHYLENIA PÓŁPROSTYCH TWORZĄCYCH FUNKCJĘ BŁĘDU NA EFEKTYWNOŚĆ PRACY ALGORYTMU WAP	108
6.2.1. WSZYSTKIE URZĄDZENIA WEWNĄTRZ BUDYNKU	109
6.2.2. STACJE REFERENCYJNE NA ZEWNĄTRZ BUDYNKU, MIO WEWNĄTRZ NA PARTERZE	116
6.2.3. STACJE REFERENCYJNE NA ZEWNĄTRZ BUDYNKU, MIO WEWNĄTRZ NA PIĘTRZE	123
6.2.4. WNIOSKI	130
ROZDZIAŁ 7. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH	131
7.1. OCENA EFEKTYWNOŚCI PRACY ALGORYTMU WAP	131
7.2. ALGORYTM WAP DLA PRZYPADKU TRÓJWYMIAROWEGO	138
7.3. NAKŁAD PRZETWARZANIA ALGORYTMU WAP	141
PODSUMOWANIE	145
SPIS LITERATURY	151
ZAŁĄCZNIK A. OPIS RADIOWYCH POMIARÓW ODLEGŁOŚCI ZREALIZOWANYCH W ŚRODOWISKU WEWNĄTRZBUDYNKOWYM	159
SPIS TABEL	177
SPIS RYSUNKÓW	179

Wykaz ważniejszych oznaczeń

A – współczynnik kierunkowy półprostej w funkcji błędu dla $R > r$

α_1 – kąt nadejścia sygnału od pierwszej stacji referencyjnej

α_2 – kąt nadejścia sygnału od drugiej stacji referencyjnej

B – współczynnik kierunkowy półprostej w funkcji błędu dla $R \leq r$

c – prędkość światła

$f(R, r)$ – nieliniowa funkcja błędu w algorytmie WAP

G – łączne wzmocnienie toru nadawczo-odbiorczego

$L(d)$ – tłumienie sygnału w funkcji odległości d

P_{rx} – moc sygnału odbieranego

P_{tx} – moc sygnału nadawanego

R_i – odległość pomiędzy i -tą stacją referencyjną a stacją ruchomą

r_i – estymowana odległość pomiędzy i -tą stacją referencyjną a stacją ruchomą

$R_{i,1}$ – różnica odległości zmierzonej od stacji ruchomej do i -tej oraz do pierwszej stacji referencyjnej

τ_i – czas propagacji sygnału od stacji ruchomej do i -tej stacji referencyjnej

x – współrzędna x stacji ruchomej

X_i – współrzędna x i -tej stacji referencyjnej

x_v – estymowana współrzędna x stacji ruchomej

y – współrzędna y stacji ruchomej

Y_i – współrzędna y i -tej stacji referencyjnej

y_v – estymowana współrzędna y stacji ruchomej

Wykaz ważniejszych skrótów

AEGIR – asynchroniczny system radiolokalizacyjny

AoA – metoda pomiaru kąta nadejścia sygnału (ang. *Angle of Arrival*)

CRLB – dolna granica estymatora nieobciążonego wyznaczona z użyciem twierdzenia Cramera-Rao (ang. *Cramer-Rao Lower Bound*)

Decca – hiperboliczny system radiolokalizacyjny, wyłączony w 2000 roku

DME – radioodległościomierz stosowany m.in. w lotnictwie (ang. *Distance Measuring Equipment*)

DSSS – bezpośrednie rozpraszanie widma sygnałów (ang. *Direct Sequence Spread Spectrum*)

FHSS – hopping częstotliwościowy (ang. *Frequency Hopping Spread Spectrum*)

Gee – brytyjski hiperboliczny system radiolokalizacyjny, wyłączony w 1970 roku

GSN – główna stacja nadzoru systemu SALOn

GPS – satelitarny system pozycjonujący (ang. *Global Positioning System*)

ISM – zakres częstotliwości (ang. *Industrial, Scientific, Medical*)

ITU – Międzynarodowy Związek Telekomunikacyjny (ang. *International Telecommunication Union*)

LORAN – hiperboliczny system radiolokalizacyjny (ang. *LOng RANge Navigation*)

LOS – propagacja przy bezpośredniej widoczności anten po obu stronach łącza radiowego (ang. *Line of Sight*)

LS – metoda najmniejszych kwadratów (ang. *Least Squares*)

MIO – moduł identyfikacji osobistej, stacja ruchoma w systemie SALOn

NLOS – propagacja przy braku bezpośredniej widoczności anten po obu stronach łącza radiowego (ang. *Non Line of Sight*)

PWR – pośredniczący węzeł radiokomunikacyjny, stacja referencyjna w systemie SALOn

- RMSE – pierwiastek błędu średniokwadratowego (ang. *Root Mean Squared Error*)
- RSS – metoda radiolokalizacyjna oparta na pomiarze mocy sygnału odbieranego (ang. *Received Signal Strength*)
- RTT – czas propagacji sygnału radiowego pomiędzy urządzeniami mierzony w dwóch kierunkach (ang. *Round Trip Time*)
- SALOn – system automatycznej lokalizacji osób
- SDS-TWR – metoda radiolokalizacyjna oparta na dwukierunkowym pomiarze czasu propagacji sygnału (ang. *Symmetric Double-Sided Two Way Ranging*)
- TDOA – metoda radiolokalizacyjna oparta na pomiarze różnicy czasu propagacji sygnału (ang. *Time Difference of Arrival*)
- TDMA – wielodostęp z podziałem czasowym (ang. *Time Division Multiple Access*)
- TOA – metoda radiolokalizacyjna oparta na pomiarze czasu nadejścia sygnału (ang. *Time of Arrival*)
- TWR – metoda pomiaru czasu propagacji sygnału (ang. *Two-Way Ranging*)
- UWB – sygnał/system ultraszerokopasmowy (ang. *Ultra-Wide Band*)
- VOR - system radionawigacyjny (radiolatarnie bezkierunkowe) stosowany m.in. w lotnictwie (ang. *VHF Omni-directional Range*)
- WAF – współczynnik tłumienia ścian (ang. *Wall Attenuation Factor model*)
- WAP – nowy wewnętrzny budynekowy algorytm wyznaczania położenia obiektów

Streszczenie rozprawy w języku polskim

W ramach rozprawy doktorskiej przeprowadzono badania i analizę efektywności radiolokalizowania obiektów w środowisku wewnątrzbudynkowym, które cechują szczególne warunki propagacyjne fali elektromagnetycznej. Konsekwencją tych warunków jest częste zawyżanie radiowych pomiarów odległości, służących do wyznaczania położenia obiektów. W rezultacie wartość średnia błędów tych pomiarów jest większa od zera, a ich rozkład jest różny od gaussowskiego. Niestety, błędy danych wejściowych znanych w literaturze algorytmów wyznaczania położenia powinny mieć rozkład Gaussa o zerowej wartości średniej. W związku z powyższym postawiono tezę, która mówi: w systemach radiolokalizacyjnych możliwe jest zwiększenie dokładności wyznaczania położenia obiektów wewnątrz budynków poprzez uwzględnienie wybranych właściwości środowiska propagacji fal radiowych. Celem pracy było opracowanie algorytmu, który pozwolił zwiększyć dokładność estymacji położenia obiektów przy zastosowaniu metod pomiarowych pozwalających określić odległość między urządzeniami w środowisku wewnątrzbudynkowym poprzez uwzględnienie właściwości danego środowiska. W rozprawie scharakteryzowano problemy radiolokalizowania obiektów we wnętrzach budynków. Omówiono także stosowane radiowe metody, jak również algorytmy wyznaczania położenia obiektów: znane z literatury oraz autorski algorytm opracowany w ramach prac prowadzonych nad rozprawą. Opisano narzędzie pomiarowe, które posłużyło do zgromadzenia rzeczywistych pomiarów odległości. Przedstawiono wyniki badań zrealizowanych z użyciem rzeczywistych danych pomiarowych oraz wyniki badań symulacyjnych.

Streszczenie rozprawy w języku angielskim

This dissertation contains a research and analysis on radio localization in indoor environment. In such environment a specific electromagnetic wave propagation conditions occur. Those conditions often result in an overestimation of radio distance measurements which are used for position calculation. In consequence, errors of those measurements have distribution different than Gaussian with mean value greater than zero. Unfortunately, for well-known position calculation algorithms this distribution should be Gaussian with mean value equal to zero. Concerning above a thesis was proposed: in indoor localization systems it is possible to improve accuracy of estimated positions by taking into account selected features of radio wave propagation environment. The aim of this dissertation was to elaborate a positioning algorithm utilizing indoor radio distance measurements that would improve positioning accuracy by taking into account selected features of radio wave propagation environment. In dissertation indoor localization problems are characterized as well as radio localization methods and positioning algorithms. There are described known algorithms and a new author's one developed under this dissertation. In the document is also presented a radio localization system used to gather real distance measurements. The results of research made with utilization of real measurements and computer simulations are shown.

Rozdział 1.

Wprowadzenie

Estymowanie położenia obiektów lub osób jest określane mianem lokalizowania. Proces taki jest realizowany przez system pozycjonujący/lokalizujący. W przypadku gdy do ustalenia położenia obiektu zostaną użyte właściwości fal elektromagnetycznych, mówimy wówczas o radiolokalizowaniu, a system taki nazywamy radiolokalizacyjnym. Za interesowanie takimi systemami wynika z potrzeby pozyskania informacji o położeniu obiektów lub osób. Informacja ta może być użyta do realizacji różnych zadań bądź celów. Jednym z nich jest potrzeba zapewnienia bezpieczeństwa publicznego. Obecnie powstaje coraz więcej centrów handlowych oraz centrów rozrywki, które niejednokrotnie są wielopoziomowymi obiektami, zajmującymi ogromne powierzchnie. Nadzorowanie działań służb mundurowych (np. straży pożarnej lub policji) w tak rozległych obiektach bez wsparcia systemu pozycjonującego (np. systemu GLANSER [26]) może być utrudnione [25]. Ponadto system taki zapewnia dodatkowe poczucie bezpieczeństwa funkcjonariuszom biorącym udział w takich działaniach [64], [87]. Innym przykładem rozwiązania świadczącego usługi w zakresie bezpieczeństwa publicznego jest system Guardly, który do radiolokalizacji używa systemu GPS (ang. *Global Positioning System*), systemów sieci komórkowych oraz sieci WiFi [32].

Radiolokalizacja wewnątrzbudynkowa ma również zastosowanie w sytuacjach niezwiązanych z bezpieczeństwem. Przykładem mogą być muzea, udostępniające turystom audioprzewodniki. Poza nagraniami związanymi z poszczególnymi obiektami są one również wyposażone w urządzenia radiolokalizacyjne. Dzięki nim ustala się położenie turysty i włącza odpowiednie nagranie, gdy wejdzie on do danej strefy lub zbliży się do wybranego eksponatu. Jest to niewątpliwe udogodnienie dla osoby zwiedzającej, uatrakcyjniające daną galerię czy też muzeum. Przykładem takiego systemu wspomagającego turystów może być *Smartmuseum* [33], [35].

System nawigacji wewnątrzbudynkowej może być również pomocą dla osób niepełnosprawnych, głównie niedowidzących i niewidomych. System lokalizacyjny zinte-

growany z informacjami o budynku oraz odpowiednim interfejsem może być przekształcony w asystenta takiej osoby w danym obiekcie. Asystent podpowiada, w którym kierunku należy podążać, żeby dostać się do wybranych miejsc, np. schodów, windy, wybranych pomieszczeń (np. gabinetów lekarskich w przychodni), a także ostrzegać przed zbliżaniem się do miejsc potencjalnie niebezpiecznych, np. schodów, miejsc, gdzie jest wyższy próg itp. Komercyjnym zastosowaniem takiego asystenta byłoby użycie go w sklepach do wysyłania osobom, zatrzymującym się np. przy danej wystawie, informacji o promocjach lub nowych kolekcjach związanych z tą wystawą. Ukłonem w stosunku do klientów dużych supermarketów byłaby integracja systemu lokalizacyjnego z aplikacją do nawigacji po sklepie, której zadaniem byłoby ułatwienie odszukiwania poszczególnych produktów na regałach [40]. Można także na podstawie zachowania danej osoby w centrum handlowym i poza nim ocenić jakiego rodzaju reklamy i oferty będą miały największe oddziaływanie na tę osobę. Można także ocenić, dzięki analizie ruchu klientów, wpływ zagospodarowania przestrzeni sklepowej na przychody danego sklepu. Takie rozwiązania oferują firmy Skyhook [34] oraz Walkbase [37]. W sierpniu 2012 roku firma Nokia, razem z 22 innymi firmami m.in. Samsung, Huawei, Broadcom, założyła konsorcjum In-Location Alliance, którego zadaniem jest opracowanie systemu lokalizacyjnego w środowisku zamkniętym, a także określenie nowych możliwości biznesowych związanych z lokalizacją wewnątrzbudynkową [22], [38]. Świadczy to o dostrzeganym przez duże firmy potencjale naukowym i biznesowym w obszarze radiolokalizacji wewnątrzbudynkowej.

System pozycjonowania wewnątrzbudynkowego może być także wsparciem podczas opieki nad osobami starszymi. Możliwość gromadzenia i analizowania informacji o położeniu oraz parametrach ruchu osób starszych pozwala wykrywać zdarzenia nietypowe, które powinny zaalarmować opiekunów takich osób. Badania nad takim systemem są realizowane m.in. na Politechnice Warszawskiej [4], [6].

Innym możliwym zastosowaniem lokalizowania wewnątrzbudynkowego jest nadzór nad pracą urządzeń w fabrykach przez monitorowanie w czasie rzeczywistym poszczególnych operacji, przepustowości maszyn fabrycznych, zarządzania produktami oraz poszczególnymi narzędziami/urządzeniami. Dzięki monitoringowi można czuwać nad efektywnością pracy wszystkich urządzeń, dbając o wysoką produktywność całej fabryki i terminowość rozsyłania gotowych produktów do nabywców [29]. Systemy loka-

lizacyjne mogą być także używane w magazynach i systemach logistycznych, w celu poprawy jakości świadczonych usług.

Oferowane są także rozwiązania pozwalające na monitorowanie położenia pracowników na terenie zakładu (budynku biura, placu budowy itp.) [36]. Dzięki dostępowi w czasie rzeczywistym do informacji o położeniu danej osoby zwiększa się efektywność pracy całych zespołów. Łącząc system lokalizacyjny z systemem alarmowym skraca się czas reakcji w przypadku wystąpienia zagrożenia (np. pracownik spadł z rusztowania i potrzebuje pomocy lub konieczna jest ewakuacja pracowników).

W przyszłości, lokalizowanie może się także okazać niezbędne do obsługi automatyki domów inteligentnych [8], dzięki czemu obiekty te będą również reagowały na zmianę położenia mieszkańców, regulując temperaturę ogrzewania, naświetlenie, intensywność działania klimatyzacji itp. W ten sposób dom inteligentny stanie się domem ekonomicznym, jak również ekologicznym.

Powyższe przykłady zastosowań systemów radiolokalizacyjnych wewnątrz budynków świadczą o istniejącej potrzebie i możliwym użyciu takich rozwiązań. Ponadto problematyka ta wpisuje się w hasło *ubiquitous positioning* (wszechobecna radiolokalizacja) [67]. Jednakże ze względu na trudne warunki propagacyjne (zjawisko propagacji wielodrogowej, rozpraszanie i ugięcie fal radiowych) radiolokalizacja w tym środowisku nie jest łatwa i wymaga od twórców systemów lokalizowania wewnątrzbudynkowego szczególnych rozwiązań. Są to rozwiązania sprzętowe związane ze zwiększeniem efektywności i dokładności realizowanych pomiarów radiowych, ale także rozwiązania związane z opracowaniem nowych algorytmów wyznaczania położenia, które, uwzględniając właściwości środowiska propagacyjnego, pozwolą zwiększyć dokładność określania tego położenia. Niniejsza praca stanowi istotną wartość dodaną w tym drugim zakresie dotyczącym algorytmów, prezentując nowy sposób wyznaczania położenia obiektów na podstawie radiowych pomiarów odległości realizowanych wewnątrz budynków.

1.1. Charakterystyka problemu radiolokalizowania obiektów w środowisku wewnątrzbudynkowym

Przez lokalizację należy rozumieć określenie położenia danego obiektu w przestrzeni. Jednym ze starszych sposobów określania położenia obiektów (przede

wszystkim statków) jest astronawigacja¹, w której na podstawie położenia niektórych ciał niebieskich (ich wysokości i azymutów nad horyzontem) wyznaczone jest położenie obiektu znajdującego się na powierzchni Ziemi [95]. Sposób ten wymaga widoczności ciał niebieskich i odpowiedniej wiedzy. W dobie globalnych pozycjonujących systemów satelitarnych (np. GPS), sposób ten jest traktowany jako rezerwowy.

Innym, bardzo dokładnym i możliwe, że nawet starszym niż astronawigacja, sposobem określania położenia punktów na powierzchni Ziemi są pomiary geodezyjne [58]. Pomiary te są czasochłonne, wiążą się z zaangażowaniem ludzi (nie są w pełni zautomatyzowane) i najczęściej są kojarzone z tworzeniem wszelkiego rodzaju map (np. miejskich, komunikacyjnych, hydrograficznych, topograficznych itd.). Nie mogą być więc użyte do określania położenia obiektów ruchomych w czasie rzeczywistym.

Kolejnym sposobem określania położenia obiektów jest pozycjonowanie zliczeniowe. Wykonywane są pomiary przyspieszeń kątowych i liniowych obiektu w trzech osiach, pozwalające określić kierunek ruchu oraz prędkość poruszania się obiektu, czyli wektor zmiany położenia względem ostatniego pomiaru. Dodając ten wektor do położenia określonego w poprzedniej chwili można śledzić ruch obiektu [24]. Położenie to jest określane względem punktu początkowego, co jest wadą metody zliczeniowej. Jeśli wyznaczone współrzędne obiektu mają wpisywać się w globalny układ współrzędnych, punkt początkowy i orientacja określanej trasy muszą być wyznaczone w układzie globalnym. W tym celu konieczne jest zastosowanie dodatkowej metody lokalizacji. Inną wadą systemów zliczeniowych jest ich krótki czas pracy². Ponieważ mierzonymi wartościami są najczęściej przyspieszenia kątowe i liniowe, które są następnie podstawą do wyznaczenia wektora przemieszczenia, pojawia się w systemach zliczeniowych problem kumulacji błędów estymaty położenia. Wynika on z dryftu używanych sensorów (którymi najczęściej są układy MEMS – ang. *Microelectromechanical systems*). Dryft ten przekłada się na błędy pomiarów przyspieszeń. Błędy te są następnie dodawane do siebie przy określaniu kolejnych punktów położenia obiektu. W konsekwencji błędy te są kumulowane. Jest to poważny problem, który ogranicza czas pracy takiego systemu. Czas ten zależy zarówno od jakości zastosowanych czujników jak i od wymagań użytkownika

¹ Ten zwyczajowo przyjęty termin sugeruje, że jest to sposób nawigowania obiektem. W rzeczywistości astronawigacja pozwala określić położenie obiektu, które następnie może służyć do pomocy w nawigowaniu tym obiektem.

² Tutaj „czas pracy” jest to czas, w którym zakumulowana wartość błędu estymaty położenia nie przekracza przyjętej wartości progowej. Wartość progowa jest zależna od sposobu i celu użycia informacji o położeniu obiektu.

systemu. Można go wydłużyć poprzez połączenie metod zliczeniowych z innymi sposobami lokalizacji (najczęściej radiowymi) [63], [74], [105].

Położenie obiektów wyposażonych w odpowiednie środki techniczne może także być określone z użyciem fal radiowych. Taki sposób pozycjonowania jest określany mianem radiolokalizacji. Najbardziej znanym i obecnie najbardziej powszechnym systemem wykorzystującym propagację fal radiowych do określania współrzędnych położenia obiektów jest satelitarny system GPS. Do infrastruktury tego systemu należy zbiór satelitów krążących nad powierzchnią Ziemi po orbitach, których przybliżona wysokość nad równikiem wynosi 20 tys. km [47], [88]. Pozycja obiektów jest określana, w uproszczeniu, dzięki pomiarom odległości od satelitów widocznych nad danym punktem Ziemi. Taki pomiar, wiąże się z odbiorem sygnałów transmitowanych przez satelity, których moc na wejściu anteny znajdującej się na powierzchni Ziemi jest bardzo mała (rzędu nawet -160 dBW [88]). W konsekwencji, w praktyce odbiór sygnałów satelitarnych jest możliwy przy zachowaniu widoczności z satelitami. Oznacza to, że we wnętrzach budynków systemy satelitarne nie mogą być stosowane do wyznaczania położenia obiektów. Ponadto, twórcy systemu GPS założyli, że wartość błędu wyznaczania położenia może się mieścić w zakresie od 10 m do 30 m w przypadku użycia standardowej klasy odbiorników [97]. Taka wartość błędu uniemożliwia w większości budynków określenie, w którym pomieszczeniu znajduje się lokalizowany obiekt. Tak więc, systemy satelitarne, z sukcesem stosowane w warunkach zewnętrznych, zwykle nie mogą być użyte do lokalizowania wewnątrz budynków.

Systemy satelitarne nie są jednak jedynymi systemami radiolokalizacyjnymi. Znanymi są rozwiązania naziemne, w których radiowe stacje referencyjne rozmieszczone są na powierzchni Ziemi. Przykładem takiego rozwiązania może być system e-Loran (następca systemów LORAN) lub już wyłączone systemy Gee czy Decca [44], [85]. Nowszym rozwiązaniem jest system AEGIR [2], pozwalający uniezależnić się od działania systemu GPS, który w wersji demonstracyjnej został opracowany i zbudowany w Katedrze Systemów i Sieci Radiokomunikacyjnych Politechniki Gdańskiej. Jak wiadomo, system GPS jest zarządzany przez Siły Powietrzne Stanów Zjednoczonych (*U.S. Air Force* [31]) i dostęp do jego usług może być w każdej chwili utrudniony lub wręcz uniemożliwiony. Ponieważ system AEGIR został zaprojektowany do zastąpienia systemu GPS, nie jest przeznaczony do pracy w środowisku wewnątrzbudynkowym. Ponadto, radiolokalizacja wewnątrzbudynkowa, ze względu na szczególne warunki propagacyjne panujące w środowi-

sku zamkniętym oraz znacznie wyższe wymagania na rozdzielczość i dokładność określania położenia, może być wręcz traktowana jako odrębny dział radiolokalizacji. Problemom propagacyjnym w takim środowisku poświęcony jest niniejszy podrozdział.

W literaturze wymieniane są trzy podstawowe mechanizmy propagacyjne: odbicie, ugięcie oraz rozpraszanie, które wpływają na propagację sygnałów w przestrzeni zamkniętej [75].

O odbiciu mówimy wówczas, gdy fala elektromagnetyczna „zderza się” z obiektem o dużych rozmiarach i gładkich powierzchniach w porównaniu do długości fali. Zależnie od współczynnika załamania materiału tworzącego daną powierzchnię, na którą pada fala elektromagnetyczna oraz współczynnika załamania ośrodka, w którym sygnał był dotychczas propagowany może zajść sytuacja, w której część energii promieniowania wniknie do nowego ośrodka, a część ulegnie odbiciu. Wiąże się to oczywiście z dodatkowymi stratami energii i jest opisane przez prawo Snella [69]. Przykładowo dla częstotliwości 2,4 GHz³ długość fali wynosi 12,5 cm. Oznacza to, że w przypadku pomieszczeń powierzchniami odbijającymi będą ściany, sufit, podłoga, stoły, szafy itp.

Ugięcie fali występuje wtedy, gdy na trasie propagacyjnej fali znajduje się obiekt o ostrych krawędziach. Zgodnie z zasadą Huygensa brzegi takiego obiektu stają się wówczas nowymi punktami początkowymi rozchodzenia się fali kulistej [84]. W konsekwencji za przeszkodę dociera część energii promieniowania elektromagnetycznego, nawet przy braku bezpośredniej widoczności z nadajnikiem. Sposób uginania się fali jest zależny od jej częstotliwości, fazy, amplitudy i polaryzacji w punkcie ugięcia, jak również od kształtu obiektu. Intuicyjnie można zauważyć, że w przestrzeni zamkniętej wypełnionej sprzętami użytkowymi, gdzie pomieszczenia są połączone otworami drzwiowymi, a także zewnętrznymi oknami, punktów, w którym fala może ulec ugięciu jest bardzo dużo. Każdy punkt dyfrakcji wiąże się z rozproszeniem energii promieniowanej. Ponadto, nowo powstałe fale kuliste interferują ze sobą, w efekcie obserwowane są zaniki.

Rozpraszanie fali zachodzi, gdy przeszkody znajdujące się w ośrodku propagacyjnym mają małe rozmiary w porównaniu z długością fali i ich liczba jest duża na jednostkę powierzchni. Najczęściej mówi się o rozpraszaniu przez chropowate powierzchnie. Mechanizm rozpraszania jest zbliżony do mechanizmu odbicia fali, jednakże z powodu chropowatości powierzchni kąt padania i tym samym kąt odbicia jest trudny do przewi-

³ Zakres częstotliwości, w którym wykonywane są radiowe pomiary odległości w systemie SALOn opisanym w rozdziale 4

dzenia. Istnieją jednak próby matematycznego opisu takich powierzchni np. teoria Kirchhoffa lub teoria perturbacji [69]. Mogą one być następnie użyte do modelowania propagacji w danej przestrzeni. Zjawisko rozpraszania ma znaczący wpływ na zaniki oraz straty propagacyjne.

Z uwagi na ograniczoną przestrzeń wewnątrz budynków, w której znajdują się liczne przeszkody oraz powierzchnie odbijające, uginające oraz rozpraszające fale elektromagnetyczne, wyżej wymienione zjawiska mają istotny wpływ na propagację wewnątrzbudynkową. Istnieją sposoby modelowania tej propagacji. Są one jednak głównie przeznaczone do planowania systemów łączności radiowej, a nie systemów radiolokalizacyjnych wewnątrz budynków i uwzględniają przede wszystkim straty propagacyjne. Źródłem informacji na temat propagacji wewnątrzbudynkowej jest m.in. rekomendacja Międzynarodowego Związku Telekomunikacyjnego ITU (ang. *International Telecommunication Union*) [76]. W zaleceniu tym wymienione są czynniki pogarszające warunki propagacyjne we wnętrzach budynków. Są to:

- odbicia od i ugięcia wokół obiektów znajdujących się wewnątrz pomieszczeń (również ścian i podłóg),
- straty propagacyjne przy transmisji przez ściany, podłogi i inne obiekty,
- tunelowanie energii, zwłaszcza w korytarzach przy wysokich częstotliwościach,
- ruch osób i obiektów wewnątrz pomieszczeń.

Czynniki te powodują:

- dodatkowe straty propagacyjne (podstawowe straty wynikają ze strat w wolnej przestrzeni),
- czasowe i przestrzenne fluktuacje tłumienia propagacyjnego,
- efekty wielodrogowości.

W zaleceniu wyróżniono też różne rodzaje budynków:

- mieszkalne,
- biurowe,
- komercyjne (część badań przeprowadzono m.in. na dworcu kolejowym oraz terminalu lotniska),
- fabryczne,
- korytarze.

Wśród budynków mieszkalnych rozróżniano apartamentowce (czyli jedno, dwupiętrowe budynki zamieszkałe przez kilka gospodarstw domowych, których ściany są lite) oraz domy (jednorodzinne, jedno lub dwupiętrowe, w których ściany pomiędzy pokojami są w większości drewniane). W przypadku biurowców podawana była liczba pięter (1 - 3). Konieczność przyjęcia takiej klasyfikacji budynków świadczy o różnorodności warunków propagacyjnych panujących w tych środowiskach. Objawia się ona m.in. różnymi wartościami parametrów używanych we wzorach do wyznaczania np. tłumienia propagacyjnego.

We wskazanym zaleceniu zamieszczono również informację o rozrzucie opóźnień. Wykonano badania w różnych rodzajach budynków, dla kilku różnych częstotliwości, przy zastosowaniu anten dookólnych jak również wybranych anten kierunkowych i wyznaczono wartości średniokwadratowe rozrzutu opóźnienia. Wyniki tych badań są kolejnym dowodem na różnorodność środowisk wewnątrzbudynkowych.

Wymienione są także w zaleceniu deterministyczne sposoby modelowania warunków propagacyjnych: *finite difference time domain* (FDTD) oraz techniki optyki geometrycznej (*geometrical optics*). Techniki optyki geometrycznej są bardziej efektywne obliczeniowo niż techniki FDTD. Wyróżniono dwa podstawowe podejścia do modelowania w optyce geometrycznej: obrazowe (*image*) oraz śledzące promienie (*ray-launching, ray-tracing* [60]). W pierwszym podejściu analizowane są powierzchnie odbijające znajdujące się wokół odbiornika. Następnie śledzone są promienie w kierunku od odbiornika do tych odbijających powierzchni. W drugim podejściu promienie są śledzone w przeciwnym kierunku, czyli od różnych punktów w przestrzeni wokół odbiornika do tego odbiornika. Każdy promień jest śledzony do momentu, gdy dotrze do odbiornika lub gdy jego amplituda zmaleje poniżej przyjętej wartości. Takie podejście jest bardziej elastyczne ze względu na możliwość uwzględnienia dodatkowo, oprócz odbicia, mechanizmów rozpraszania oraz ugięcia. Sposób obrazowy stosowany jest głównie przy analizie propagacji punkt-punkt, natomiast drugi sposób jest częściej używany do estymacji odpowiedzi impulsowej dla całej rozpatrywanej przestrzeni. W rekomendacji podano także wzór pozwalający oszacować odpowiedź impulsową kanału. Niezbędna do zastosowania tego wzoru jest znajomość współczynników odbicia oraz przenikalności ścian. Wzór ten nie uwzględnia jednak mechanizmów ugięcia oraz rozpraszania.

Autorzy wspomnianej rekomendacji w jej wstępie zaznaczyli, że została ona przygotowana na podstawie ograniczonej liczby badań przeprowadzonych w wybranych

budynkach, jedynie dla niektórych częstotliwości. We wstępie wyrażono również nadzieję, że wraz ze zwiększeniem liczby danych pomiarowych, rekomendacja ta zostanie poszerzona, a modele w niej prezentowane będzie można doprecyzować tak, aby były dokładniejsze. Dano tym samym do zrozumienia, że problem modelowania propagacji wewnątrzbudynkowej na potrzeby planowania systemów łączności w zamkniętej przestrzeni nadal wymaga prac badawczych. Takie prace są prowadzone o czym świadczą ciągle pojawiające się nowe publikacje naukowe, np.: [51], [66], [96].

1.2. Sformułowanie problemu badawczego

Zagadnienia propagacyjne, zwłaszcza w trudnym środowisku wewnątrzbudynkowym, mają duże znaczenie dla radiowych systemów lokalizacyjnych. W celu określenia położenia obiektu konieczna jest znajomość:

- odległości do znanych punktów (najczęściej stacji referencyjnych), i/lub
- tzw. kąta kierunku, z którego dociera sygnał radiowy do odbiornika ze znanego punktu (stacji referencyjnej), i/lub
- mocy odbieranego sygnału od stacji referencyjnej o znanym położeniu.

Metody pomiarowe zostały dokładnie opisane w rozdziale 2. Pomiarów odległości oraz kąta padania powinny być realizowane z użyciem linii bezpośredniej widoczności (LOS - ang. *Line of Sight*). Wówczas czas propagacji fali elektromagnetycznej będzie proporcjonalny do odległości pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem. Podobnie, określony kąt padania będzie korespondował z rzeczywistym wzajemnym położeniem części nadawczej i odbiorczej. Jednakże w środowisku wewnątrzbudynkowym najczęściej nie ma linii bezpośredniej widoczności (NLOS - ang. *Non Line of Sight*), a sygnał jest odbierany dzięki mechanizmom odbicia, ugięcia oraz rozpraszania. W konsekwencji pomiary odległości są najczęściej zawyżone (propagacja fali radiowej nie odbywa się w linii prostej pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem), a określone kąty padania błędne. Także pomiary mocy sygnałów odbieranych nie są jednoznaczne w środowisku wewnątrzbudynkowym. Przy wyznaczaniu położenia za ich pomocą należy uwzględnić dużą zmienność tłumienia propagacyjnego w czasie i przestrzeni. Stosowane w radiolokalizacji metody pomiarowe nie są odporne na zjawiska odbicia, ugięcia i rozpraszania fali elektromagnetycznej. Oczywiście wpływ tych zjawisk może być mniejszy np. przy stosowaniu techniki UWB (ang. *Ultra-Wide Band*) [16], [57], nie jest on jednak całkowicie niwelowany. Do powiązania mierzonych parametrów (czasu propagacji, mocy sygnału, kąta nadejścia sygnału)

ze współrzędnymi położenia obiektu służą metody wyznaczania położenia. W niniejszej pracy uwaga jest poświęcona przede wszystkim algorytmom wyznaczania położenia stosowanym w metodach pomiarowych pozwalających określić odległość pomiędzy obiektem lokalizowanym a stacjami referencyjnymi (TOA, RTT). Znane algorytmy wyznaczania położenia obiektów (np. Chana, Foy'a, Fanga) są najbardziej efektywne, gdy rozkłady błędów danych wejściowych dla tych algorytmów są gaussowskie o zerowej wartości średniej [9], [18], [20]. W przypadku radiowych pomiarów odległości realizowanych wewnątrz budynków, warunki te często nie są spełnione. Dlatego też konieczne jest opracowanie nowszych algorytmów, które uwzględniając panujące warunki propagacyjne w danym obiekcie, będą pozwalały zwiększyć dokładność estymowanego położenia w porównaniu z dokładnością uzyskiwaną przy użyciu znanych algorytmów.

1.3. Cel, teza i zakres pracy

W latach 2010-2012 w Katedrze Systemów i Sieci Radiokomunikacyjnych na Wydziale Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej w ramach projektu rozwojowego o nr O R00 0150 11 prowadzono prace badawczo-rozwojowe, których celem było skonstruowanie systemu automatycznej lokalizacji osób SALOn [83] (system ten został omówiony w rozdziale 4). Z badań przeprowadzonych podczas tych prac wynika, iż zjawiska odbicia, ugięcia i rozpraszania fali elektromagnetycznej w zamkniętej przestrzeni powodują, że wyniki radiowych pomiarów odległości realizowanych w środowisku zamkniętym metodą RTT (ang. *Round Trip Time*) są najczęściej większe niż rzeczywista odległość między urządzeniami wykonującymi pomiary. W rezultacie rozkład błędów pomiarów odległości od stacji referencyjnych do danego lokalizowanego obiektu nie jest gaussowski a wartość średnia tych błędów jest większa od zera. Jest to najważniejsza właściwość środowiska wewnątrzbudynkowego z punktu widzenia radiolokalizacji bazującej na pomiarach czasu propagacji fali elektromagnetycznej. **Dlatego za cel pracy obrano opracowanie algorytmu, który pozwoli zwiększyć dokładność estymacji położenia obiektów przy zastosowaniu metod pomiarowych pozwalających określić odległość między urządzeniami w środowisku wewnątrzbudynkowym poprzez uwzględnienie tej właściwości danego środowiska.** Ocena efektywności nowego algorytmu została zrealizowana z użyciem rzeczywistych pomiarów odległości, uzyskanych w różnych środowiskach wewnątrzbudynkowych, zgromadzonych za pomocą systemu SALOn.

Wyniki prac zrealizowanych w ramach przewodu doktorskiego mają na celu wykazanie następującej tezy: **w systemach radiolokalizacyjnych możliwe jest zwiększenie dokładności wyznaczania położenia obiektów wewnątrz budynków poprzez uwzględnienie wybranych właściwości środowiska propagacji fal radiowych.**

Układ niniejszej rozprawy, wykazującej powyższą tezę jest następujący. W rozdziale 2 przybliżono metody pomiarowe stosowane w radiolokalizacji oraz problemy związane z ich stosowaniem w środowisku zamkniętym. Rozdział 3 został poświęcony algorytmom wyznaczania położenia. Omówione w nim zostały trzy dobrze znane w literaturze algorytmy oraz zaprezentowano nowy autorski algorytm wyznaczania położenia nazwany nowym wewnątrzbudynkowym algorytmem wyznaczania położenia (WAP). Rozdział 4 stanowi opis użytego narzędzia pomiarowego – systemu SALOn, które pozwoliło zgromadzić radiowe pomiary odległości użyte następnie do badań efektywności wybranych algorytmów wyznaczania położenia. Opisy procedur związanych z realizacją radiowych pomiarów odległości oraz implementacji oprogramowania użytego podczas badań są zawarte w rozdziale 5. W rozdziale 6 zamieszczono wyniki badań, które wykazują zasadność postawionej tezy, pokazując, że estymaty położenia obiektów wyznaczone zaproponowanym algorytmem WAP, który uwzględnia właściwości środowiska wewnątrzbudynkowego, cechuje większa dokładność i precyzja w porównaniu z estymatami uzyskanymi za pomocą wybranych, znanych algorytmów wyznaczania położenia obiektów. W rozdziale 7 zamieszczono wyniki dodatkowych badań symulacyjnych, które przeprowadzono w celu porównania dokładności wyznaczania położenia obiektów zaproponowanym nowym algorytmem WAP z teoretyczną granicą określoną na podstawie twierdzenia Cramera-Rao. W rozdziale tym przedstawiono także wyniki analizy wpływu liczby stacji referencyjnych na działanie algorytmu WAP oraz wyniki badań symulacyjnych nad dokładnością określania estymat położenia obiektu przez proponowany algorytm w przestrzeni trójwymiarowej. Przedstawiono także wyniki analizy nakładu przetwarzania proponowanego algorytmu na tle nakładu przetwarzania znanych z literatury algorytmów.

Rozdział 2.

Metody określania położenia

Świadczenie usługi określania położenia obiektów na zadanym obszarze wymaga utworzenia stosownej infrastruktury. W radiowych systemach pozycjonujących składają się na nią węzły referencyjne, które są najczęściej nieruchome o znanych współrzędnych położenia, oraz węzły ruchome, których położenie chcemy określić. Systemy lokalizacyjne mogą się także składać z dodatkowych urządzeń np. ze stacji kontrolnych, monitorujących pracę systemu (np. w systemie GPS [47]), czy też serwerów bazodanowych. Jednakże użycie tych dodatkowych elementów zależy od przyjętego rozwiązania systemowego i nie wpływa na samą ideę radiolokalizowania. Określanie położenia obiektów⁴ jest realizowane na podstawie wykorzystania powiązania pomiędzy parametrami pozycyjnymi (odległość, różnica odległości itd.) a cechami fali elektromagnetycznej, które mogą być pomierzone przez terminal ruchomy, stację referencyjną lub przez obie strony łącza radiowego. Dlatego też, w systemach radiolokalizacyjnych pomiędzy stacjami referencyjnymi i ruchomymi są wykonywane pomiary parametrów, właściwe dla zastosowanej metody. Znane są cztery podstawowe metody wyznaczania położenia w systemach radiolokalizacyjnych. W każdej z nich współrzędne stacji ruchomej określone są na podstawie innego typu pomiarów [15]:

- w metodzie TOA (ang. *Time of Arrival*) – wykonywany jest pomiar czasu propagacji fali elektromagnetycznej pomiędzy węzłami ruchomym oraz referencyjnymi, które zazwyczaj pracują synchronicznie,
- w metodzie TDOA (ang. *Time Difference of Arrival*) – realizowany jest pomiar różnicy czasu propagacji fali elektromagnetycznej pomiędzy parami zsynchronizowanych węzłów referencyjnymi a stacją ruchomą,
- w metodzie AoA (ang. *Angle of Arrival*) – przeprowadzany jest pomiar kątów nadejścia sygnałów radiowych od stacji referencyjnych do ruchomej lub odwrotnie,

⁴ W rozprawie zamiennie będą stosowane określenia „węzeł/stacja ruchoma”, „terminal ruchomy”, „lokalizowany obiekt”

- w metodzie RSS (ang. *Received Signal Strength*) – stacja ruchoma wykonuje pomiary poziomów mocy sygnałów odbieranych od poszczególnych stacji referencyjnych.

W każdej z wymienionych metod zakłada się, że stacje referencyjne są nieruchome w czasie trwania pomiaru, a ich współrzędne są znane.

Inną ciekawą metodą wyznaczania położenia jest metoda SDF (ang. *Signal Doppler Frequency*) opracowana w Wojskowej Akademii Technicznej, służąca do lokalizacji źródeł fal radiowych, której podstawę stanowi wykorzystanie efektu Dopplera [54]. Nie będzie ona jednak szerzej omawiana, ponieważ jej stosowanie jest możliwe tylko w przypadku obiektów poruszających się z dużą prędkością (np. samolot, samochód) w środowisku zewnątrzbudynkowym.

2.1. Metoda TOA

W metodzie TOA mierzony jest czas propagacji sygnału radiowego między dwoma węzłami. Przyjmując, że sygnał propagowany jest z prędkością światła c , można wyznaczyć odległość R_i pomiędzy stacją ruchomą a i -tą stacją referencyjną, przy założeniu, że są one we wzajemnej bezpośredniej widoczności [92]

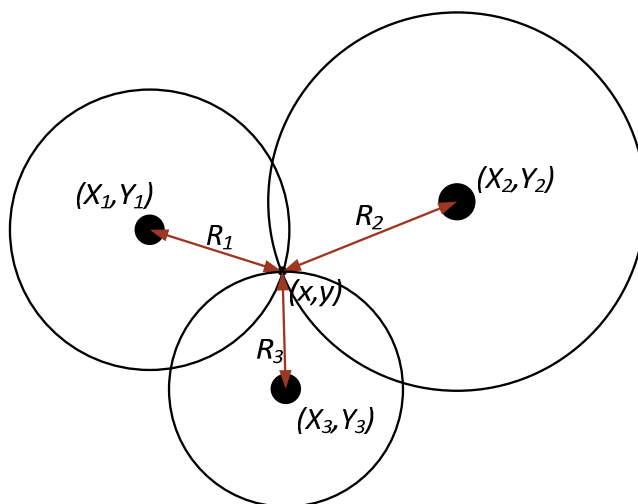
$$R_i = c \cdot \tau_i, \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad (2.1)$$

gdzie τ_i jest zmierzonym czasem propagacji, a M określa liczbę stacji referencyjnych. Jeśli współrzędne i -tej stacji referencyjnej zostaną oznaczone symbolami X_i , Y_i , a współrzędne stacji ruchomej symbolami x , y , wówczas dla przypadku dwuwymiarowego można zapisać następujące równanie dla i -tej stacji referencyjnej

$$R_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2}. \quad (2.2)$$

Równanie to jest równaniem okręgu o środku o współrzędnych stacji referencyjnej. Aby jednoznacznie wyznaczyć współrzędne lokalizowanego obiektu (x, y) należy zapisać równanie (2.2) dla przynajmniej trzech stacji referencyjnych. Sytuacja taka została zaprezentowana na rys. 2.1. W przypadku, gdy mają być wyznaczone współrzędne położenia obiektu w trzech wymiarach (x, y, z) , wówczas konieczna jest znajomość odległości do przynajmniej czterech stacji referencyjnych ($M = 4$), a równanie (2.2) zapisane dla przypadku trójwymiarowego nie będzie już równaniem okręgu, lecz równaniem sfery. Do rozwiązania wspomnianego układu równań można zastosować bezpośrednio algorytm Foy'a [20] lub po zastosowaniu drobnych modyfikacji algorytmu Chana [9] i Fanga [18].

Ważny jest jednak sposób rozmieszczenia stacji referencyjnych. Nie mogą one znajdować się na jednej prostej (przypadek dwuwymiarowy) lub na jednej płaszczyźnie (przypadek trójwymiarowy).



Rys. 2.1. Określenie położenia obiektu w metodzie TOA

Do pomiaru czasu propagacji mogą być zastosowane różne techniki transmisyjne. W ostatnich latach coraz częściej wymieniana jest w zastosowaniach radiolokalizacyjnych technika UWB, zwłaszcza w środowiskach zamkniętych (np. [46], [55]). Dokładność pomiaru odległości pomiędzy węzłami w metodzie TOA zależy od szerokości pasma stosowanego sygnału radiowego. W publikacji [53] zasugerowano szerokość pasma rzędu 100 MHz. Takie szerokości pasma są dostępne jedynie w zakresach częstotliwości ISM (ang. *Industrial, Scientific, Medical*) 2,4 GHz lub 5,8 GHz oraz paśmie UWB w zakresie od 6 GHz do 8,5 GHz [81]. W tych zakresach mogą być używane - ze względu na wymagania dotyczące techniki UWB - jedynie techniki rozpraszania widma sygnałów [101]: FHSS (ang. *Frequency Hopping Spread Spectrum*) – hopping częstotliwościowy, DSSS (ang. *Direct Sequence Spread Spectrum*) – bezpośrednie rozpraszanie widma lub IR UWB (ang. *Impulse Radio Ultra-Wideband*) – ultraszerokopasmowa transmisja impulsowa, a także tzw. sygnały świergotowe (ang. *chirp*). W systemach radiolokalizacyjnych częściej stosowana jest technika DSSS niż FHSS. W technice tej ciąg informacyjny wyznaczany jest przez pseudolosowy ciąg kodowy o czasie trwania pojedynczego chipu wielokrotnie krótszym, niż czas trwania symbolu informacyjnego. Właściwości ciągu rozpraszającego są zbliżone do właściwości szumu białego, dzięki czemu charakteryzuje się on bardzo dobrymi właściwościami korelacyjnymi [28]. Właściwości korelacyjne tego ciągu są wykorzystywane w odbiorniku do określania czasu trwania propagacji sygnału, który

jest proporcjonalny do odległości pomiędzy węzłami wykonującymi pomiar. Dodatkową zaletą techniki DSSS jest możliwość utajnienia przesyłanych informacji nawigacyjnych (przez nieudostępnianie informacji o postaci ciągu rozpraszającego) oraz zwiększona odporność na zakłócenia wąskopasmowe, które są rozpraszane w części odbiorczej [41].

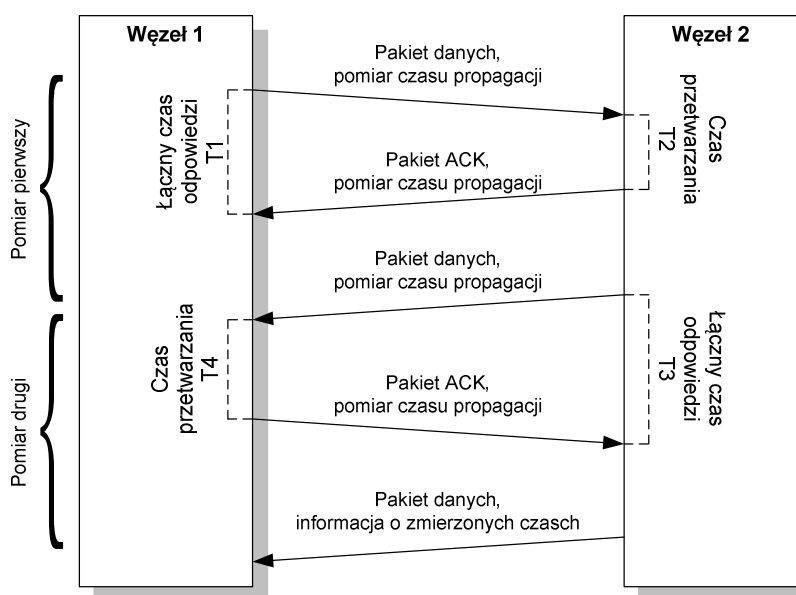
W systemach TOA pojawia się problem synchronizacji pomiędzy stacjami referencyjnymi oraz ruchomymi. Podstawowym rozwiązaniem tego problemu jest stosowanie wysokostabilnych zegarów w stacjach i nieustanne monitorowanie stanu synchronizacji pomiędzy węzłami. Jednakże w literaturze można spotkać także inne propozycje rozwiązań. Najczęściej spotykaną propozycją jest metoda RTT, w której pomiar odległości pomiędzy urządzeniami jest realizowany poprzez pomiar czasu propagacji sygnału radiowego przy dwukierunkowej transmisji pakietów radiowych pomiędzy danymi stacjami [3], [90]. Wówczas stacja wysyłająca pakiet inicjujący pomiar ma dostęp do informacji o czasie nadania oraz o czasie odebrania pakietu odpowiedzi. Różnica tych czasów oraz opóźnienia wynikającego z odbioru pakietu zapytania i wysłania pakietu odpowiedzi w drugim węźle, pomnożona przez prędkość propagacji fali elektromagnetycznej, stanowi dwukrotną odległość pomiędzy węzłami wykonującymi pomiar. Ta metoda pomiarowa jest też w literaturze określana jako TWR (ang. *Two-Way Ranging*) [62]. Stosowana jest także metoda SDS-TWR (ang. *Symmetric Double-Sided Two Way Ranging*), w której opisany pomiar TWR realizowany jest dwukrotnie dzięki czemu zmniejszany jest wpływ dryftu zegarów stacji pomiarowych na wartość pomiaru odległości [43], [56]. Na rys. 2.2 zilustrowano metodę SDS-TWR. Wartość pomiaru odległości w tym przykładzie będzie wyznaczana z zależności

$$R = c \cdot \frac{T_1 - T_2 + T_3 - T_4}{4}, \quad (2.3)$$

gdzie c jest prędkością propagacji fali elektromagnetycznej, natomiast pozostałe oznaczenia są zgodne z oznaczeniami z rys. 2.2. Radiowe pomiary odległości do poszczególnych stacji referencyjnych w metodzie RTT nie są, jak w klasycznej metodzie TOA, realizowane w jednej chwili. Dlatego metoda RTT jest stosowana do pozycjonowania obiektów poruszających się wolno.

Drugim spotykanym rozwiązaniem problemu synchronizacji pomiędzy węzłami wykonującymi pomiary odległości jest stosowanie dwóch rodzajów sygnałów do określenia czasu propagacji. Przykładowo stacja referencyjna nadaje sygnał radiowy (RF) i jednocześnie sygnał ultradźwiękowy [45]. Ponieważ prędkość rozchodzenia się fali radiowej

jest równa $3 \cdot 10^8$ m/s, a fali ultradźwiękowej w powietrzu wynosi ok. 344 m/s, różnica pomiędzy czasem dotarcia obu sygnałów do węzła mobilnego będzie znacząca. Można wręcz pominąć czas propagacji sygnału RF, ponieważ jest on około miliona razy krótszy od czasu propagacji sygnału ultradźwiękowego. Można więc moment nadejścia sygnału RF potraktować jako czas rozpoczęcia transmisji sygnału dźwiękowego. Tym samym znany jest dokładny czas propagacji sygnału dźwiękowego, na podstawie którego można wyznaczyć odległości między daną stacją referencyjną i ruchomą.



Rys. 2.2. Ilustracja metody SDS-TWR

W opisywanych rozwiązaniach założono, że zrealizowany pomiar czasu propagacji jest proporcjonalny do odległości pomiędzy urządzeniami wykonującymi pomiar. Oznacza to, iż sygnał propagowany jest najkrótszą drogą pomiędzy tymi urządzeniami, wyznaczoną przez linię prostą. Zatem urządzenia te muszą być w bezpośredniej widoczności LOS. Jednakże w środowisku wewnątrzbudynkowym bezpośrednia widoczność pomiędzy urządzeniami jest najczęściej niemożliwa do uzyskania – w pomieszczeniach znajdują się liczne przeszkody (meble, sprzęty, ludzie). Ponadto stacje wykonujące pomiar mogą być rozdzielone ścianami i stropami wykonanymi z różnych materiałów, niejednokrotnie zbrojonymi. Wszystkie te elementy sprawiają, że sygnał radiowy nie jest propagowany w linii prostej – ulega licznym odbiciom, ugięciom oraz dyfrakcji. Mamy więc do czynienia w środowisku wewnątrzbudynkowym ze zjawiskiem propagacji wielodrogowej, które sprawia, że mierzone wartości odległości pomiędzy stacjami są najczęściej zawyżone w stosunku do odległości rzeczywistych.

Istnieją sposoby redukcji wpływu propagacji wielodrogowej na wyniki pomiarów. W literaturze znane są metody stosowania wag wobec uzyskiwanych pomiarów odległości. Wiąże się to z wykrywaniem pomiarów przeprowadzonych w warunkach LOS i NLOS [71]. Wówczas największy wpływ na estymowaną pozycję mają te pomiary, które zostały wykonane z zachowaniem warunków LOS. Innymi metodami redukcji wpływu propagacji wielodrogowej na uzyskiwane wyniki są różnego rodzaju filtry, w tym filtr Kalmana [23], jak również metody optymalizacyjne. Im lepsza jest znajomość środowiska, w którym przeprowadzany jest proces lokalizowania, tym lepiej można dobrać parametry poszczególnych algorytmów, zwiększając tym samym dokładność uzyskiwanych współrzędnych położenia obiektów. Wskazane więc jest kalibrowanie systemów pozycjonowania wewnątrzbudynkowego w obiektach, w których dany system jest uruchamiany.

2.2. Metoda TDOA

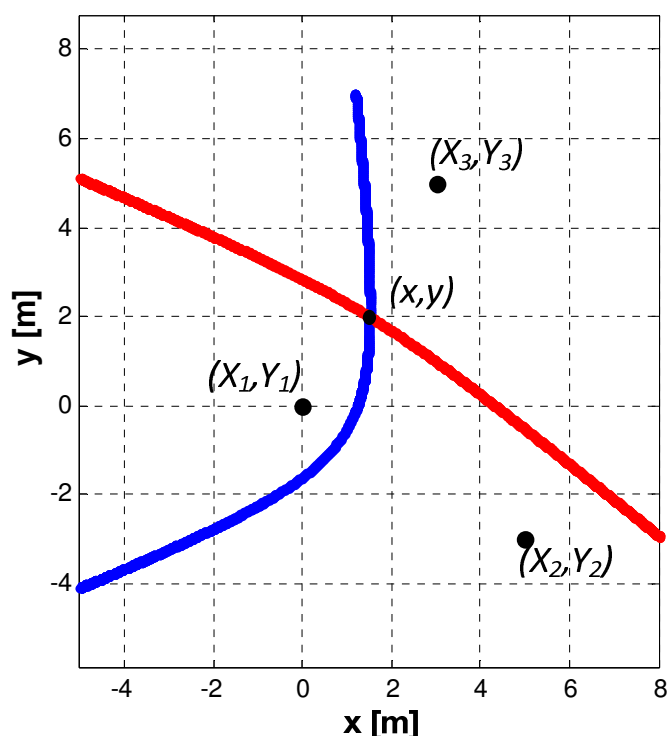
W przypadku, gdy wszystkie stacje referencyjne są ze sobą zsynchronizowane, nadają tzw. wiadomości nawigacyjne w znanych momentach czasu. Jednakże stacja ruchoma, której położenie ma być określone, nie musi być zsynchronizowana ze stacjami referencyjnymi. Wówczas korzysta się z metody TDOA, w której jest mierzony nie czas propagacji pomiędzy stacją mobilną i daną stacją referencyjną, lecz różnica czasu pomiędzy czasem propagacji od pierwszej stacji (odniesienia) i od pozostałych stacji. Wówczas uzyskiwana jest informacja o różnicy odległości do pierwszej i kolejnych stacji referencyjnych $R_{i,1}$, co można opisać wzorem [92]

$$R_{i,1} = c \cdot (\tau_i - \tau_1) = R_i - R_1, \quad i = 2, 3, \dots, M. \quad (2.4)$$

Powyższe równanie wyznacza hiperbolę. Stąd, aby wyznaczyć współrzędne stacji ruchomej, należy rozwiązać układ równań kilku hiperbol. W przypadku dwuwymiarowym, aby uzyskać rozwiązanie, należy utworzyć równania dla dwóch hiperbol, czyli niezbędne są trzy stacje referencyjne (rys. 2.3). Jeśli hiperbole w obszarze zainteresowania przecinają się w dwóch punktach, do określenia położenia obiektu można wyznaczyć dodatkowo trzecią hiperbolę. Współrzędne położenia obiektu w metodzie TDOA można wyznaczyć za pomocą algorytmów Foy'a [20], Chana [9] lub Fanga [18].

Metoda TDOA jest często stosowana w radionawigacji, ponieważ w części odbiorczej nie jest konieczna znajomość dokładnego czasu wysłania wiadomości nawigacyjnej. Dzięki temu nie ma konieczności wyposażania urządzeń ruchomych w takich sys-

temach w wysokostabilne zegary. Zamiast drogich układów zegarowych można zastosować niedrogie generatory kwarcowe. Dodatkową zaletą metody TDOA jest możliwość użycia całkowicie pasywnych stacji ruchomych, to znaczy niemających części nadawczej. Wykorzystanie urządzeń pasywnych ma ogromne znaczenie, zwłaszcza w zastosowaniach militarnych, gdzie ważne jest ukrycie swojej obecności na danym terenie. Ponadto wspomniana cecha sprawia, że z systemu może korzystać nieograniczona liczba użytkowników.



Rys. 2.3. Określanie położenia obiektu w metodzie TDOA

W metodzie TDOA nie są określane odległości do poszczególnych stacji referencyjnych, lecz różnice tych odległości. Najczęściej jedna ze stacji referencyjnych jest traktowana jako stacja odniesienia dla pozostałych. Względem tej stacji są wówczas wyznaczone w systemie różnice odległości do pozostałych stacji. W przypadku gdy parametry tej stacji, np. stabilność zegara, będą obciążone dodatkowymi błędami, błędy te będą się propagowały na pozostałe mierzone wartości. Zatem podczas obliczania współrzędnych położenia stacji ruchomej będą wykorzystywane błędne dane, czyli błąd określania położenia będzie zdecydowanie większy, niż gdyby skorzystać z innej stacji referencyjnej jako stacji odniesienia.

Opisany problem jest szczególnie istotny w środowisku wewnątrzbudynkowym, gdzie sygnały docierają do stacji ruchomej wieloma drogami, niejednokrotnie bez zachowania warunków LOS. Aby zminimalizować błąd określania położenia, należy jako stację odniesienia wybrać tę stację referencyjną, dla której błędy pomiaru odległości byłyby najmniejsze. Nie jest to jednak zadanie łatwe w metodzie TDOA i ma kilka rozwiązań. Pierwszym i najprostszym w realizacji sposobem jest badanie mocy sygnałów odbieranych. Stacja referencyjna, której sygnały są odbierane przez stację ruchomą z największą mocą, najprawdopodobniej znajduje się najbliżej tej stacji. Zazwyczaj im mniejsza jest odległość między urządzeniami, tym mniej znajduje się między nimi obiektów stanowiących przeszkodę dla transmitowanych sygnałów lokalizacyjnych. Ponadto, im większa jest moc sygnału odbieranego, tym większe jest prawdopodobieństwo, że sygnał ten dotarł do odbiornika drogą bezpośredniej widoczności. Innym sposobem określenia najbliższej położonej stacji referencyjnej względem ruchomej jest użycie poprzednio określonego położenia. Wówczas, znając współrzędne stacji referencyjnych, można określić tę, która w poprzednim pomiarze znajdowała się najbliżej i ją potraktować podczas bieżących pomiarów jako stację odniesienia. W przypadku, gdy nie ma dostępu do informacji o poprzedniej pozycji, należy wykonać pomiary i obliczenia dwukrotnie. Pierwsze z losowo wybraną stacją odniesienia, drugie po ustaleniu, która ze stacji referencyjnych znajduje się najbliżej stacji ruchomej. Są również inne metody określania, czy dany pomiar był realizowany z zachowaniem LOS czy też nie, opisywane np. w publikacjach [21], [98], [103].

2.3. Metoda AoA

W metodzie AoA mierzony jest kąt nadejścia sygnału z/do poszczególnych stacji referencyjnych. Dysponując dwiema stacjami referencyjnymi o znanych współrzędnych (X_i, Y_i) ($i = 1, 2$) i znanej orientacji anten można określić współrzędne (x, y) stacji ruchomej w płaszczyźnie dwuwymiarowej [92]. Sytuacja taka została pokazana na rys. 2.4. W celu wyznaczenia współrzędnych stacji ruchomej należy rozwiązać układ równań [61]

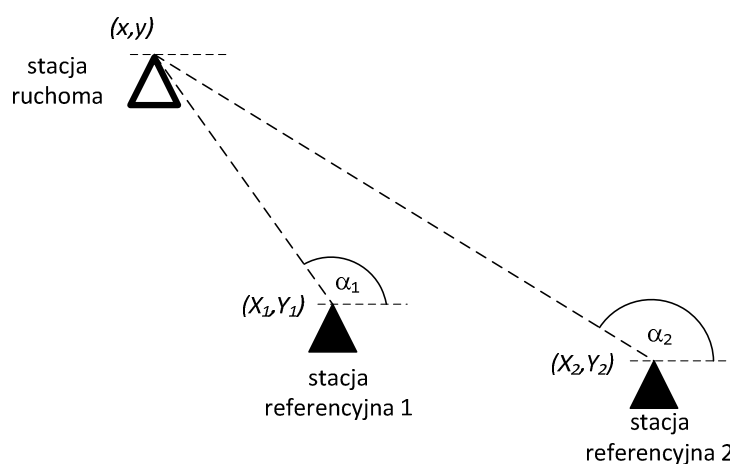
$$\begin{cases} (x - X_1) \cdot \operatorname{tg}(\alpha_1) = y - Y_1, \\ (x - X_2) \cdot \operatorname{tg}(\alpha_2) = y - Y_2. \end{cases} \quad (2.5)$$

Wówczas otrzymuje się:

$$x = \frac{X_2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha_2) - X_1 \cdot \operatorname{tg}(\alpha_1) + Y_1 - Y_2}{\operatorname{tg}(\alpha_2) - \operatorname{tg}(\alpha_1)},$$

$$y = \frac{\operatorname{tg}(\alpha_1) \cdot (X_2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha_2) - Y_2) - \operatorname{tg}(\alpha_2) \cdot (X_1 \cdot \operatorname{tg}(\alpha_1) - Y_1)}{\operatorname{tg}(\alpha_2) - \operatorname{tg}(\alpha_1)}.$$
(2.6)

Aby uzyskać jednoznaczne rozwiązanie, wymagane jest użycie przynajmniej dwóch stacji referencyjnych, które nie będą znajdowały się na jednej linii ze stacją ruchomą. Dodatkowo w sytuacji, gdy stacje referencyjne odbierają sygnał nawigacyjny zamiast go nadawać, wskazane jest aby ich anteny miały tę samą orientację przestrzenną. Ocena orientacji może być realizowana np. przez dodatkowy moduł kompasu. Aby rozszerzyć omówiony przypadek do przestrzeni trójwymiarowej 3D wymagany jest pomiar kąta azymutu i elewacji przez każdą ze stacji.



Rys. 2.4. Określanie położenia obiektu w metodzie AoA

Należy zwrócić uwagę, że gdyby stacja wykonująca pomiar kąta nadejścia sygnału mogła również określić odległość do stacji emitującej sygnał nawigacyjny, wówczas do jednoznacznego określenia współrzędnych stacji ruchomej wystarczyłoby jedynie pomiar z jedną stacją referencyjną. Przykładem takiego rozwiązania jest połączenie radiolaterni VOR (ang. *VHF Omni-directional Range*) i radioodległościomierza DME (ang. *Distance Measuring Equipment*) stosowane w lotnictwie [19], [72].

W celu określenia przez stacje odbiorcze (ruchome lub referencyjne) kąta nadejścia sygnału lokalizacyjnego, muszą być one wyposażone w szyk antenowy [104] lub anteny kierunkowe. Instalowanie zespołu anten na urządzeniach mobilnych bywa problematyczne, ze względu na rozmiary takiego szyku antenowego. Z tego powodu, w zestawy te są najczęściej wyposażane stacje referencyjne, a sygnał lokalizacyjny jest emitowany przez stację ruchomą.

Podobnie jak w omawianych wcześniej metodach wyznaczania położenia obiektu, również w metodzie AoA zakłada się, że sygnały docierają do odbiorników drogą bezpośrednią, czyli w warunkach LOS. Jednakże w środowisku wewnątrzbudynkowym, w obecności propagacji wielodrogowej, należy się spodziewać, że sygnał docierający do części odbiorczej może być sygnałem odbitym. W związku z tym, określony kierunek nadejścia sygnału nie będzie przystawał do rzeczywistego kierunku, w jakim znajdować się będzie stacja nadawcza.

Znane są jednak w literaturze przykłady rozwiązań pozwalających estymować położenie obiektu z wykorzystaniem informacji o propagacji wielodrogowej w metodzie AoA. Jeden z takich przykładów został opisany w [68]. Wyobraźmy sobie sytuację, w której zarówno stacja referencyjna o znanych współrzędnych (X_i, Y_i) jak i stacja ruchoma o nieznanymi współrzędnych (x, y) wyposażone są w antenę kierunkową/szyk antenowy. Wówczas oba moduły mogą zmierzyć kąt nadejścia/emisowania sygnału nawigacyjnego. Na rys. 2.5 pokazano przypadek, w którym sygnał nawigacyjny jest odbity od przeszkody o nieznanym położeniu (x_p, y_p) . Jeśli założyć, że można zmierzyć długość drogi d , jaką przebył sygnał na drodze nadajnik-przeszkoda-odbiornik, wówczas można zapisać następujący układ równań

$$\begin{cases} x_p = X_i + r \cdot \sin(\beta) \\ y_p = Y_i + r \cdot \cos(\beta) \\ x = x_p - (d - r) \cdot \sin(\alpha) \\ y = y_p - (d - r) \cdot \cos(\alpha) \end{cases}, \quad (2.7)$$

gdzie $r \in \langle 0, d \rangle$. Po podstawieniach i przekształceniach, uzyska się równanie

$$y = k \cdot x + b, \quad (2.8)$$

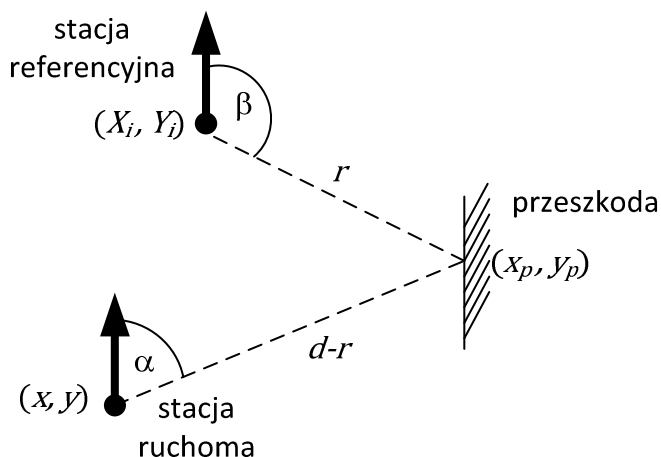
gdzie:

$$k = \frac{\cos\alpha + \cos\beta}{\sin\alpha + \sin\beta},$$

$$b = -k(X_i - d \cdot \sin(\alpha)) + Y_i - d \cdot \cos(\alpha).$$

W celu uzyskania jednoznacznej informacji o współrzędnych stacji ruchomej, konieczne jest utworzenie układu przynajmniej dwóch różnych równań o postaci (2.8). Należy zatem skorzystać przynajmniej z dwóch przeszkód i jednej stacji referencyjnej lub dwóch stacji referencyjnych i jednej przeszkody. Dzięki temu sygnał będzie propagowany dwiema niezależnymi ścieżkami, w wyniku czego będzie można zapisać układ dwóch

równań liniowych. Gdy istnieje więcej wyników pomiarów niż dwa, do uzyskania współrzędnych pozycji można użyć np. metody najmniejszych kwadratów LS (ang. *Least Squares*).



Rys. 2.5. Określanie położenia obiektu w metodzie AoA w obecności przeszkód

Inną propozycją zmniejszenia wpływu wielodrogowości na wynik estymacji położenia stacji ruchomej jest wykorzystanie informacji o położeniu przeszkód. W publikacji [73] autorzy zalecają wykonywać pomiar kąta nadejścia sygnału oraz czasu propagacji poszczególnej ścieżki. Wówczas, znając rozmieszczenie obiektów w pomieszczeniu, można ocenić czy dana ścieżka spełnia warunek LOS, czy też nie. Do tego celu autorzy zalecają wcześniejsze stabelaryzowanie pewnej funkcji (ang. *sentinel function*) $f(\alpha_i)$, będącej odległością euklidesową pomiędzy stacją referencyjną a najbliższą przeszkodą leżącą na danym azymucie. Do oceny, czy dana ścieżka spełnia warunek LOS, używane są funkcja $f(\alpha_i)$ oraz kąt α_i (zmierzony kąt AoA). Jeśli zmierzona odległość $d_i < f(\alpha_i)$ oznacza to, że warunek LOS został spełniony dla danej ścieżki i można bezpośrednio wyznaczyć położenie stacji ruchomej. W przeciwnym razie odległość stacji ruchomej do poszczególnych przeszkód może być estymowana następująco

$$d_i = c\tau_i - f(\alpha_i), \quad (2.9)$$

gdzie τ_i jest mierzonym czasem propagacji dla i -tej ścieżki.

Do wyznaczenia współrzędnych stacji ruchomej konieczne jest zapisanie tzw. funkcji kosztu

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^L \left[d_i - \sqrt{(x - x_{pi})^2 + (y - y_{pi})^2} \right]^2, \quad (2.10)$$

gdzie (x_{pi}, y_{pi}) są współrzędnymi przeszkód, (x, y) współrzędnymi stacji ruchomej, a L liczbą ścieżek NLOS.

Ostatecznie położenie stacji ruchomej (\hat{x}, \hat{y}) jest wyznaczone z zależności

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \arg \min_{x,y} F(x, y). \quad (2.11)$$

Opisany sposób wyznaczania współrzędnych stacji ruchomej może być zastosowany tylko w środowiskach mikrokomórkowych, gdzie można określić położenie przeszkód podczas kalibracji systemu. Wadą tego sposobu jest niemożność określenia położenia wszystkich przeszkód, jak i wrażliwość na zmiany rozmieszczenia tych przeszkód w trakcie pracy systemu. W rzeczywistości, w procesie kalibracji można ustalić położenie jedynie największych i najważniejszych przeszkód dla systemu lokalizacyjnego.

2.4. Metoda RSS

W metodach RSS stacja ruchoma wykonuje pomiary poziomów mocy sygnałów odbieranych od kilku stacji referencyjnych i na ich podstawie określa swoje położenie. Są znane również propozycje systemów, w których stacje ruchome emitują sygnały, a stacje bazowe oceniają moc sygnałów odbieranych. W tej metodzie można wyróżnić dwa główne sposoby określania współrzędnych stacji ruchomej. W pierwszym z nich informacja o poziomie mocy sygnału odbieranego służy do oszacowania odległości od danej stacji referencyjnej. Wówczas współrzędne stacji ruchomej mogą być określane za pomocą algorytmów np. Chana, Foy'a lub Fanga. Innym sposobem określania położenia obiektów jest metoda korelacyjna, w literaturze anglojęzycznej nazywana *fingerprinting*, w której dany wynik pomiarów mocy sygnału jest porównywany z bazą pomiarów referencyjnych zgromadzonych podczas kalibracji całego systemu.

Metoda, w której na podstawie pomiarów mocy sygnałów odbieranych oceniane są odległości do poszczególnych stacji referencyjnych, jest uważana za metodę o małej dokładności, jednak bardzo prostą w implementacji. Łatwiejsza implementacja systemu radiolokalizacyjnego wiąże się głównie z prostszą, mniej czasochłonną jego kalibracją⁵ oraz z możliwością wykorzystania już istniejącej w danym obiekcie infrastruktury, np. nadajników sieci Wi-Fi. Znając moc sygnału nadawanego P_{tx} oraz moc sygnału odbieranego P_{rx} można wyznaczyć tłumienie tego sygnału podczas propagacji, które jest funkcją odległości [50]

⁵ Nie jest konieczne tworzenie bazy pomiarów mocy w obiekcie docelowym jak w metodzie *fingerprinting*

$$L(d)[dB] = P_{tx} - P_{rx} + G_{tx} + G_{rx}, \quad (2.12)$$

gdzie:

- G_{tx} : zysk anteny nadawczej,
- G_{rx} : zysk anteny odbiorczej.

Z zależności (2.12) wynika, że w metodzie tej ważne jest dobranie odpowiedniego modelu propagacyjnego, za pomocą którego będzie wyznaczana odległość stacji referencyjnej od obiektu ruchomego na podstawie zmierzonego tłumienia (spadku mocy sygnału podczas propagacji w kanale radiokomunikacyjnym). Niestety, każdy rodzaj środowiska propagacyjnego w inny sposób wpływa na poziom sygnału odbieranego, skutkiem czego: inny model stosowany jest dla wolnej przestrzeni, inny dla środowisk lądowych, inny dla morskich, inny dla środowisk zurbanizowanych oraz inny dla wiejskich [77]. W przypadku środowiska wewnątrzbudynkowego zostało opracowanych kilka różnych modeli propagacyjnych. Przykładem takiego modelu jest model uwzględniający współczynnik tłumienia ścian WAF (ang. *Wall Attenuation Factor model*) opisany w publikacji [5]. W modelu tym autorzy podali zależność mierzonej mocy sygnału odbieranego w funkcji odległości od stacji nadawczej oraz od liczby przeszkód (ścian) znajdujących się pomiędzy stacją referencyjną i ruchomą. Niestety, aby móc użyć zaproponowaną w [5] formułę modelu WAF, konieczne są badania empiryczne w celu dobrania parametrów modelu dla danego budynku. Innym przykładem modelu propagacyjnego jest model podany w [75] i nazywany *log-loss*. W nim również konieczny jest uprzedni dobór współczynników modelu, wiążący się z dokonaniem wcześniejszych pomiarów tłumienia sygnałów radiowych w budynku, w którym będzie instalowany system radiolokalizacyjny. Stąd wniosek, że zwiększenie dokładności metody określania położenia przez wyznaczanie odległości od stacji referencyjnych na podstawie mierzonego tłumienia w środowisku wewnątrzbudynkowym także wymaga kalibracji systemu w drodze uprzedniego przeprowadzenia kampanii pomiarowej, która umożliwi dobranie właściwego dla danego budynku modelu propagacyjnego oraz jego parametrów.

Drugi sposób wyznaczania położenia obiektów w metodzie RSS, zwany *fingerprinting*, również wiąże się z kalibracją systemu i uprzednim wykonaniem pomiarów mocy sygnałów odbieranych we wcześniej wybranych punktach w danym obiekcie. Pomiaru wykonuje się w uprzednio ustalonych niewielkich podobszarach, zwanych w literaturze angielskiej *cluster*, na które podzielony jest budynek. W tej metodzie, w odróżnieniu od

wcześniejszej opisywanego sposobu opartego na pomiarze tłumienia, tworzy się bazę pomiarów, z którą podczas pracy systemu będą porównywane bieżące pomiary mocy sygnałów odbieranych przez stację ruchomą. W wyniku tego porównania będzie określone położenie stacji ruchomej. Metoda ta jest stosowana przede wszystkim wówczas, gdy określenie modelu propagacyjnego jest niemożliwe - żaden z istniejących modeli nie przystaje w wystarczającym stopniu do zgromadzonych danych pomiarowych. Wyznaczenie położenia stacji ruchomej z użyciem wcześniej zgromadzonych danych kalibracyjnych może się odbywać za pomocą różnych algorytmów. Jednym z nich jest wyznaczanie odległości euklidesowej pomiędzy zgromadzonymi pomiarami w bazie oraz bieżącymi i wybranie tego położenia, dla którego ta odległość jest najmniejsza. To podejście zostało użyte w systemie RADAR opisanym w [5]. W literaturze można spotkać także inne algorytmy estymowania położenia stacji ruchomej na podstawie wcześniej zgromadzonych pomiarów kalibracyjnych, np. przez użycie funkcji kernela [100] lub zastosowanie metody nazywanej histogramową (obie zostały opisane w [80]). Znane są przykłady integracji danych z różnych systemów bezprzewodowych (ZigBee [39], Wi-Fi [42], Bluetooth [65]) celem zwiększenia dokładności metody *fingerprinting* [79].

Niezależnie jednak od stosowanego sposobu lokalizowania stacji ruchomej w metodzie RSS, należy mieć na uwadze problemy związane z propagacją wielodrogową w środowisku wewnątrzbudynkowym, tj.: z zanikami, fluktuacją poziomu mocy sygnałów odbieranych nawet na niewielkich przestrzeniach oraz zależnością pomiaru mocy od orientacji stacji ruchomej względem stacji referencyjnych. W większości publikacji autorzy zalecają uśrednianie wyników pomiarów bieżących (co jednakże nie zapewnia uzyskania pozytywnego rezultatu w przypadku obiektów znajdujących się w spoczynku) oraz wielu losowych pomiarów w obrębie zadanego podobszaru (*clustra*) podczas kalibracji systemu [86].

Rozdział 3.

Algorytmy wyznaczania położenia obiektów

Istnieje wiele algorytmów wyznaczania położenia stacji ruchomych w systemach radiolokalizacyjnych. Dla każdej z opisywanych w poprzednim rozdziale metod pomiarowych jest ich odpowiednio inny zbiór. Ponieważ w niniejszej rozprawie badania nad proponowanym algorytmem były realizowane z użyciem pomiarów odległości zrealizowanych metodą RTT (metoda pomiarowa stosowana w systemie SALOn opisanym szerzej w rozdziale 4), niniejszy rozdział został poświęcony tylko wybranym algorytmom wyznaczającym położenie obiektów na podstawie informacji o odległościach pomiędzy lokalizowaną stacją a stacjami referencyjnymi. Algorytmy te zostały przedstawione dla przypadku dwuwymiarowego, ponieważ jest to podejście wystarczające do zapewnienia usługi lokalizacyjnej⁶ w systemie SALOn.

3.1. Algorytmy stosowane obecnie

Niniejszy podrozdział został poświęcony znanym z literatury wybranym algorytmom wyznaczania położenia. Jako pierwszy został opisany algorytm Chana, następnie algorytm Foy'a i na końcu algorytm Fanga.

3.1.1. Algorytm Chana

Algorytm Chana został zaproponowany w artykule [9] do wyznaczania położenia obiektów w systemach hiperbolicznych. Algorytm ten jest nieiteracyjny, będący przybliżoną realizacją metody największej wiarygodności (ang. *maximum likelihood*).

W referacie [9] autor prezentuje sposoby wyznaczania pozycji dla dwóch przypadków: gdy sieć składa się z trzech stacji referencyjnych oraz gdy stacji referencyjnych jest więcej niż trzy. W podrozdziale 3.1.1.1 zostanie omówiony sposób wyznaczania pło-

⁶ W niniejszej pracy mianem usługi lokalizacyjnej określa się dostarczanie do użytkownika informacji o położeniu obiektów lub osób wyposażonych w urządzenia lokalizacyjne i znajdujących się na obszarze działania systemu lokalizacyjnego.

żenia obiektów w pierwszym z wymienionych przypadków, natomiast w podrozdziale 3.1.1.2 w drugim. Prezentowane w obu podrozdziałach wzory dotyczą dwuwymiarowego układu współrzędnych kartezjańskich, gdzie odległość R_i pomiędzy i -tą stacją referencyjną a stacją ruchomą może być zapisana wzorem

$$R_i^2 = (X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2, \quad (3.1)$$

gdzie:

- x, y są współrzędnymi stacji ruchomej,
- X_i, Y_i są współrzędnymi i -tej stacji referencyjnej.

W systemie hiperbolicznym należy rozważać różnicę odległości do poszczególnych stacji, wobec tego można następująco zapisać różnicę odległości do i -tej stacji oraz odległości do pierwszej stacji referencyjnej

$$R_{i,1} = R_i - R_1. \quad (3.2)$$

Równanie (3.2) można przekształcić do postaci

$$R_i^2 = (R_{i,1} + R_1)^2. \quad (3.3)$$

Uwzględniając zależność (3.1) można zapisać

$$R_{i,1}^2 + 2R_{i,1}R_1 + R_1^2 = K_i - 2X_i x - 2Y_i y + x^2 + y^2, \quad (3.4)$$

gdzie $K_i = X_i^2 + Y_i^2$. Odejmując obustronnie R_1^2 od równania (3.4) uzyskamy

$$R_{i,1}^2 + 2R_{i,1}R_1 = K_i - K_1 - 2X_{i,1}x - 2Y_{i,1}y, \quad (3.5)$$

przy czym $X_{i,1} = X_i - X_1$ oraz $Y_{i,1} = Y_i - Y_1$. Zależność (3.5) można zapisać w postaci

$$2X_{i,1}x + 2Y_{i,1}y = K_i - K_1 - R_{i,1}^2 - 2R_{i,1}R_1, \quad (3.6)$$

która stanowi podstawę dalszych rozważań.

3.1.1.1. Trzy stacje referencyjne

W przypadku, gdy dostępne są tylko trzy stacje referencyjne wzór (3.6) utworzy układ dwóch równań dla $i = 2$ oraz $i = 3$

$$2 \begin{bmatrix} X_{2,1} & Y_{2,1} \\ X_{3,1} & Y_{3,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_2 - K_1 - R_{2,1}^2 - 2R_{2,1}R_1 \\ K_3 - K_1 - R_{3,1}^2 - 2R_{3,1}R_1 \end{bmatrix}. \quad (3.7)$$

W powyższym równaniu nieznaną są współrzędne stacji ruchomej (x, y) oraz odległość R_1 . W referacie [91] autor sugeruje podstawienie równania (3.7) do wzoru (3.1). Wówczas uzyska się równanie kwadratowe ze względu na niewiadomą R_1 o ogólnej postaci

$$aR_1^2 + bR_1 + c = 0, \quad (3.8)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} - a &= \frac{(Y_{2,1} \cdot R_{3,1} - Y_{3,1} \cdot R_{2,1})^2}{(X_{2,1} \cdot Y_{3,1} - Y_{2,1} \cdot X_{3,1})^2} + \frac{(X_{3,1} \cdot R_{2,1} - X_{2,1} \cdot R_{3,1})^2}{(X_{2,1} \cdot Y_{3,1} - Y_{2,1} \cdot X_{3,1})^2} - 1, \\ - b &= \\ & 2 \left[\frac{(Y_{2,1} \cdot R_{3,1} - Y_{3,1} \cdot R_{2,1}) \left(X_1 - \frac{0,5 \cdot Y_{3,1} (R_{2,1}^2 - K_2 + K_1) - 0,5 \cdot Y_{2,1} (R_{3,1}^2 - K_3 + K_1)}{X_{2,1} \cdot Y_{3,1} - Y_{2,1} \cdot X_{3,1}} \right)}{X_{2,1} \cdot Y_{3,1} - Y_{2,1} \cdot X_{3,1}} \right] + \\ & 2 \left[\frac{(X_{3,1} \cdot R_{2,1} - X_{2,1} \cdot R_{3,1}) \left(Y_1 + \frac{0,5 \cdot X_{3,1} (R_{2,1}^2 - K_2 + K_1) - 0,5 \cdot X_{2,1} (R_{3,1}^2 - K_3 + K_1)}{X_{2,1} \cdot Y_{3,1} - Y_{2,1} \cdot X_{3,1}} \right)}{X_{2,1} \cdot Y_{3,1} - Y_{2,1} \cdot X_{3,1}} \right], \\ - c &= \\ & \left(X_1 - \frac{0,5 \cdot Y_{3,1} (R_{2,1}^2 - K_2 + K_1) - 0,5 \cdot Y_{2,1} (R_{3,1}^2 - K_3 + K_1)}{X_{2,1} \cdot Y_{3,1} - Y_{2,1} \cdot X_{3,1}} \right)^2 + \\ & \left(Y_1 + \frac{0,5 \cdot X_{3,1} (R_{2,1}^2 - K_2 + K_1) - 0,5 \cdot X_{2,1} (R_{3,1}^2 - K_3 + K_1)}{X_{2,1} \cdot Y_{3,1} - Y_{2,1} \cdot X_{3,1}} \right)^2, \end{aligned}$$

którego właściwym rozwiązaniem powinien być pierwiastek

$$R_1 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \quad (3.9)$$

W przypadku użytego podczas badań systemu SALOn opisanego w rozdziale 4, w wyniku radiowych pomiarów uzyskuje się odległości do poszczególnych stacji referencyjnych, a nie ich różnicę jak w systemach hiperbolicznych. Dlatego też podczas stosowania powyższych wzorów, pominięto wyznaczanie wartości R_1 (została ona zmierzona wprost w rozpatrywanym systemie) i od razu skorzystano z zależności

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} X_{2,1} & Y_{2,1} \\ X_{3,1} & Y_{3,1} \end{bmatrix}^{-1} \times \left\{ \begin{bmatrix} R_{2,1} \\ R_{3,1} \end{bmatrix} R_1 + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} R_{2,1}^2 - K_2 + K_1 \\ R_{3,1}^2 - K_3 + K_1 \end{bmatrix} \right\}. \quad (3.10)$$

3.1.1.2. Więcej niż trzy stacje referencyjne

W sytuacji, gdy stacji referencyjnych jest więcej niż 3 dysponujemy informacjami nadmiarowymi w postaci większej liczby pomiarów odległości niż minimalna. Wówczas można utworzyć nadokreślony układ równań. Niestety, na skutek ograniczonej dokładności

ści pomiarów, zwłaszcza w obecności szumu, utworzony układ równań w ogólności nie będzie miał rozwiązania. W takim przypadku rozwiązaniem problemu określenia położenia będą współrzędne (x, y) minimalizujące błąd estymowanego położenia

$$\boldsymbol{\psi} = \mathbf{h} - \mathbf{G}_a \mathbf{z}_a^0, \quad (3.11)$$

gdzie:

– $\boldsymbol{\psi}$ – wektor błędu,

$$\mathbf{h} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} R_{2,1}^2 - K_2 + K_1 \\ R_{3,1}^2 - K_3 + K_1 \\ \dots \\ R_{M,1}^2 - K_n + K_1 \end{bmatrix},$$

– M – liczba stacji referencyjnych,

$$\mathbf{G}_a = - \begin{bmatrix} X_{2,1} & Y_{2,1} & R_{2,1} \\ X_{3,1} & Y_{3,1} & R_{3,1} \\ \dots & \dots & \dots \\ X_{M,1} & Y_{M,1} & R_{M,1} \end{bmatrix},$$

– \mathbf{z}_a^0 symbolizuje wektor $\mathbf{z}_a = \begin{bmatrix} z_p \\ R_1 \end{bmatrix}$ nieobarczony błędem, natomiast $\mathbf{z}_p = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$.

Można także zapisać

$$\boldsymbol{\psi} = c\mathbf{B}\mathbf{n} + 0,5 \cdot c^2\mathbf{n} \odot \mathbf{n}, \quad (3.12)$$

gdzie:

– $\mathbf{B} = \text{diag}\{R_2^0, R_3^0, \dots, R_M^0\}$,

– $\mathbf{n} = [n_{2,1}, n_{3,1}, \dots, n_{M,1}]^T$ jest wektorem szumu,

– \odot oznacza operator Schura,

– c – prędkość propagacji sygnału,

– $R_2^0, R_3^0, \dots, R_M^0$ - rzeczywiste odległości (nieobarczone szumem) od stacji ruchomej do stacji referencyjnych 2, 3, ..., M .

W praktyce warunek $cn_{i,1} \ll R_i^0$ jest spełniony, dlatego też drugi człon we wzorze (3.12) może zostać pominięty. Wówczas macierz kowariancji wektora $\boldsymbol{\psi}$ jest następująca

$$\boldsymbol{\Psi} = c^2\mathbf{B}\mathbf{Q}\mathbf{B}, \quad (3.13)$$

gdzie \mathbf{Q} oznacza macierz kowariancji wektora \mathbf{n} .

Elementy wektora \mathbf{z}_a są powiązane wzorem (3.4). W związku z tym, wzór (3.11) jest zbiorem nieliniowych zależności dwóch niewiadomych x i y . Aby rozwiązać ten

układ, należy w pierwszym kroku przyjąć, że x , y oraz R_1 są niezależne. Wówczas układ tych równań może zostać rozwiązany metodą najmniejszych kwadratów. Ostateczny wynik uzyskuje się poprzez uwzględnienie zależności (3.4). Aproksymowana jest w ten sposób estymata ML (ang. *Maximum Likelihood*) poszukiwanej pozycji

$$\mathbf{z}_a = (\mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\Psi}^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1} \mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\Psi}^{-1} \mathbf{h}. \quad (3.14)$$

W praktyce, wektor $\boldsymbol{\Psi}$ jest niezny, ponieważ \mathbf{B} zawiera wartości prawdziwe. Dlatego też konieczna jest dalsza aproksymacja. W przypadku, gdy stacja ruchoma znajduje się daleko od stacji referencyjnych można przyjąć, że każda z wartości R_i^0 jest zbliżona do R^0 , tak więc $\mathbf{B} \approx R^0 \mathbf{I}$, gdzie R^0 określa zakres odległości, a \mathbf{I} jest macierzą jednostkową o rozmiarze $M-1$. Ponieważ skalując $\boldsymbol{\Psi}$ nie zmieniamy wyniku, można zapisać

$$\mathbf{z}_a \approx (\mathbf{G}_a^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1} \mathbf{G}_a^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{h}. \quad (3.15)$$

Jeśli stacja ruchoma znajduje się blisko stacji referencyjnych, wówczas wzór (3.15) może zostać użyty do uzyskania pierwszego wyniku, za pomocą którego można estymować macierz \mathbf{B} . Ostateczny wynik jest jednak uzyskiwany na podstawie wzoru (3.14). Korzystając z tego wzoru w sposób iteracyjny można poprawić dokładność uzyskiwanych wyników. Autor artykułu [9] pisze jednak, że w drodze symulacji stwierdził, że jednokrotne wyznaczenie wektora \mathbf{z}_a jest wystarczające.

W obecności szumu ($R_{i,1} = R_{i,1}^0 + cn_{i,1}$) macierze \mathbf{G}_a i \mathbf{h} mogą być wyrażone jako: $\mathbf{G}_a = \mathbf{G}_a^0 + \Delta \mathbf{G}_a$ oraz $\mathbf{h} = \mathbf{h}^0 + \Delta \mathbf{h}$. Indeksy górne „0” w wymienionych wyrażeniach oznaczają, że poszczególne macierze zostały wypełnione wartościami dokładnymi, nie obciążonymi błędami pomiarowymi. Ponieważ $\mathbf{G}_a^0 \mathbf{z}_a^0 = \mathbf{h}^0$, więc

$$\boldsymbol{\psi} = \Delta \mathbf{h} - \Delta \mathbf{G}_a \mathbf{z}_a^0. \quad (3.16)$$

Niech $\mathbf{z}_a = \mathbf{z}_a^0 + \Delta \mathbf{z}_a$. Wówczas korzystając z wzorów (3.12), (3.14) i (3.16), otrzymujemy wektor $\Delta \mathbf{z}_a$ oraz jego macierz kowariancji:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{z}_a &= c \left((\mathbf{G}_a^0)^T \boldsymbol{\Psi}^{-1} \mathbf{G}_a^0 \right)^{-1} (\mathbf{G}_a^0)^T \boldsymbol{\Psi}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{n}, \\ \text{cov}(\mathbf{z}_a) &= \left((\mathbf{G}_a^0)^T \boldsymbol{\Psi}^{-1} \mathbf{G}_a^0 \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Wektor \mathbf{z}_a składa się z następujących elementów:

$$z_{a,1} = x^0 + e_1, \quad z_{a,2} = y^0 + e_2, \quad z_{a,3} = R_1^0 + e_3, \quad (3.18)$$

gdzie e_1, e_2, e_3 są błędami estymacji poszczególnych elementów wektora \mathbf{z}_a , a współrzędne z indeksami górnymi „0” określają prawdziwe/dokładne położenie obiektu. Odejmując od pierwszych dwóch elementów wektora \mathbf{z}_a współrzędne X_1 i Y_1 oraz następnie podnosząc elementy tego wektora do kwadratu uzyskuje się równanie

$$\boldsymbol{\psi}' = \mathbf{h}' - \mathbf{G}_a' \mathbf{z}'_a, \quad (3.19)$$

gdzie:

$$\mathbf{h}' = \begin{bmatrix} (z_{a,1} - X_1)^2 \\ (z_{a,2} - Y_1)^2 \\ z_{a,3}^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_a' = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{z}'_a = \begin{bmatrix} (x - X_1)^2 \\ (y - Y_1)^2 \end{bmatrix},$$

a wektor $\boldsymbol{\psi}'$ określa błąd wyznaczenia \mathbf{z}_a . Przy założeniu, że e_1, e_2, e_3 są małe, macierz kowariancji $\boldsymbol{\Psi}'$ wynosi

$$\boldsymbol{\Psi}' = 4\mathbf{B}' \text{cov}(\mathbf{z}_a) \mathbf{B}', \quad (3.20)$$

przy czym $\mathbf{B}' = \text{diag}\{x^0 - X_1, y^0 - Y_1, R_1^0\}$. Zakładając, że elementy wektorów $\boldsymbol{\psi}$ i $\boldsymbol{\psi}'$ mają rozkład gaussowski [27], można wyznaczyć estymatę wektora \mathbf{z}'_a w następujący sposób

$$\mathbf{z}'_a = (\mathbf{G}_a'{}^T \boldsymbol{\Psi}'^{-1} \mathbf{G}_a')^{-1} \mathbf{G}_a'{}^T \boldsymbol{\Psi}'^{-1} \mathbf{h}'. \quad (3.21)$$

W praktyce macierz $\boldsymbol{\Psi}'$ nie jest znana, ponieważ zawiera prawdziwe wartości. Niemniej jednak, macierz \mathbf{B}' można aproksymować używając wektorów \mathbf{z}_a , \mathbf{G}_a^0 (przybliżonego przez \mathbf{G}_a) z zależności (3.17) oraz \mathbf{B} wyznaczonego z użyciem zależności (3.15). Ostatecznie pozycja jest estymowana następująco

$$\mathbf{z}_p = \sqrt{\mathbf{z}_a'} + \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

lub

$$\mathbf{z}_p = -\sqrt{\mathbf{z}_a'} + \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{bmatrix}. \quad (3.23)$$

Właściwym rozwiązaniem jest to, które leży w obszarze zainteresowania. Podczas badań zauważono, że elementy wektora \mathbf{z}_p należy wyznaczać za pomocą zależności (3.23), gdy odpowiadające im elementy wcześniej wyznaczonego wektora \mathbf{z}_a są mniejsze od zera. W przeciwnym przypadku należy korzystać z zależności (3.22).

Z powyższych rozważań wynika, że w algorytmie Chana zależności (3.14), (3.21) oraz (3.22) lub (3.23) stanowią kolejne estymaty położenia stacji ruchomej.

3.1.1.3. Realizacja algorytmu Chana

W algorytmie podanym przez Chana w artykule [9], macierz \mathbf{B} musi być estymowana, ponieważ nieznane są wartości odległości do poszczególnych stacji referencyjnych (algorytm Chana został opracowany dla metody TDOA, gdzie mierzone są różnice odległości do poszczególnych stacji referencyjnych). Jednakże wiadomo, że użyty do badań system radiolokalizacyjny realizuje pomiary odległości do poszczególnych stacji referencyjnych. Stąd algorytm Chana może być zaimplementowany na dwa sposoby ze względu na sposób uzupełniania macierzy \mathbf{B} :

- elementy macierzy \mathbf{B} są estymowane zgodnie ze sposobem opisanym w artykule [9],
- elementy macierzy \mathbf{B} są uzupełniane wprost odpowiednimi wartościami pomiarów odległości.

W obu implementacjach przyjęto zgodnie z sugestią w artykule [9], że na macierz \mathbf{Q} składają się elementy diagonalne o wartości 1, a pozostałe elementy są równe 0,5.

Efektywność obu implementacji oceniono na zbiorze pomiarów wykonanych w jeszcze niezamieszkanym domu jednorodzinnym (załącznik A, serie 13 i 14). Efektywność ta była oceniana za pomocą błędu określania położenia obiektu zdefiniowanego następująco

$$\Delta R_D = \sqrt{\frac{1}{N \cdot K} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N ((x_{ki} - x_k^0)^2 + (y_{ki} - y_k^0)^2)}, \quad (3.24)$$

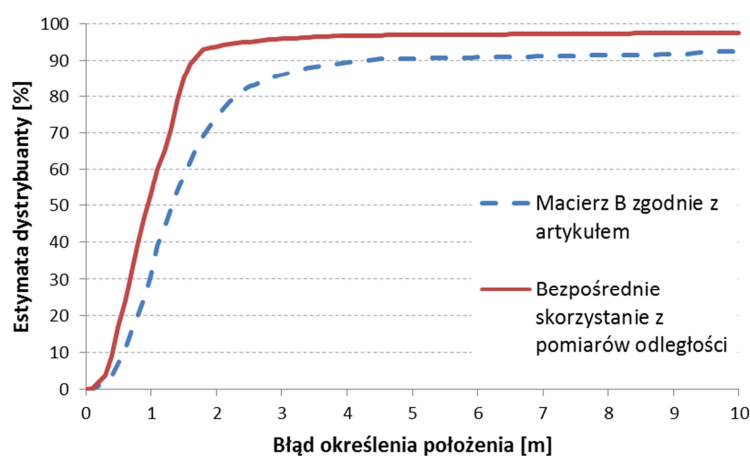
gdzie:

- N – liczba estymat współrzędnych położenia obiektu w danym punkcie (chwila pomiarowych),
- K – liczba punktów pomiarowych,
- x_{ki}, y_{ki} – współrzędne i -tej estymaty położenia obiektu w k -tym punkcie,
- x_k^0, y_k^0 – rzeczywiste współrzędne położenia obiektu w k -tym punkcie.

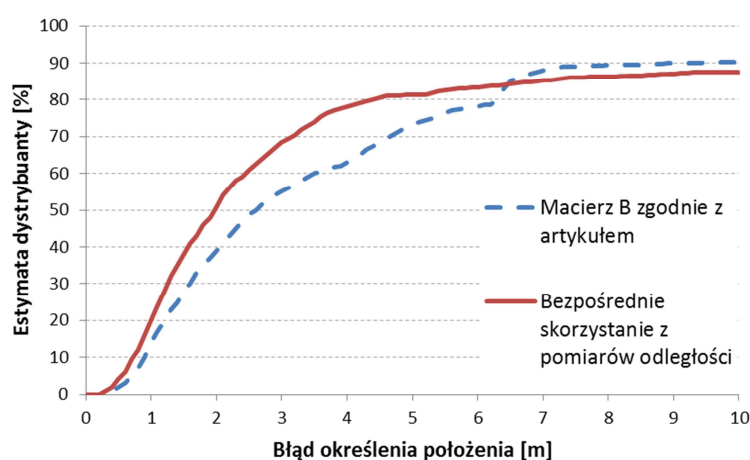
Uzyskane wyniki przedstawiono na wykresach dystrybucji błędów określenia położenia obiektów pokazanych na rys. 3.1 i 3.2.

Przedstawione wyniki dowodzą, że korzystniej jest zmodyfikować algorytm zaproponowany przez Chana poprzez pominięcie kroku estymacji macierzy \mathbf{B} . W ostatecznej implementacji algorytmu Chana, użytej podczas badań, zamiast estymo-

wać elementy macierzy B , są one uzupełniane dostępnymi wynikami pomiarów odległości.



Rys. 3.1. Estymaty dystrybuanty błędów określania położenia dla pomiarów odległości wykonanych, gdy stacje referencyjne były rozstawione na zewnątrz budynku a stacje, których położenie określano, wewnątrz na parterze. Seria 13 z załącznika A



Rys. 3.2. Estymaty dystrybuanty błędów określania położenia dla pomiarów odległości wykonanych, gdy stacje referencyjne były rozstawione na zewnątrz budynku a stacje, których pozycje określano, wewnątrz na piętrze (wys. 3,04 m). Seria 14 z załącznika A

3.1.2. Algorytm Foy'a

Algorytm Foy'a został zaproponowany przez Wade'a Foy'a w artykule [20]. Służy on do wyznaczania współrzędnych położenia obiektów na podstawie pomiarów odległości. Algorytm ten jest iteracyjny i wykorzystuje przybliżenie równań nieliniowych przez pierwsze dwa składniki rozwinięcia tych równań w szereg Taylora. Niech:

- x^0, y^0 oznaczają współrzędne rzeczywistej pozycji stacji ruchomej na płaszczyźnie,
- X_i, Y_i oznaczają współrzędne rzeczywistej znanej pozycji i -tej stacji referencyjnej.

Wówczas można zapisać następującą zależność:

$$f_k(x^0, y^0, X_i, Y_i) = m_{ik} - e_k, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (3.25)$$

gdzie:

- $f_k(x^0, y^0, X_i, Y_i)$ - rzeczywista wartość mierzonej wielkości (w rozpatrywanym przypadku odległości),
- m_{ik} - wartość zmierzonej wielkości (w naszym przypadku odległości),
- e_k - błąd m_{ik} pomiaru,
- n - liczba zrealizowanych pomiarów pomiędzy daną stacją lokalizowaną i daną stacją referencyjną.

Problemem matematycznym jest tutaj znalezienie wartości x^0, y^0 , jeśli danych jest n wyników pomiarów m_{ik} oraz postać funkcji f_k . Podczas obliczeń przyjmuje się, że wartość oczekiwana błędów $E[e_k] = 0$. Natomiast element kj macierzy kowariancji błędów pomiarów $R = [r_{kj}]$ można zapisać jako $r_{kj} = E[e_k e_j]$.

Jeśli współrzędne estymowanej pozycji oznaczymy jako x_v i y_v to współrzędne rzeczywistej pozycji można zapisać:

$$\begin{aligned} x^0 &= x_v + \delta_x, \\ y^0 &= y_v + \delta_y, \end{aligned} \quad (3.26)$$

gdzie δ_x i δ_y symbolizują błędy wyznaczenia poszczególnych współrzędnych.

Rozwinięcie funkcji f_k w szereg Taylora drugiego rzędu jest następujące

$$f_{kv} + a_{k1}\delta_x + a_{k2}\delta_y \cong m_{ik} - e_k, \quad (3.27)$$

gdzie:

- $f_{kv} = f_k(x_v, y_v, X_i, Y_i)$,
- $a_{k1} = \left. \frac{\partial f_k}{\partial x} \right|_{x=x_v, y=y_v}, \quad a_{k2} = \left. \frac{\partial f_k}{\partial y} \right|_{x=x_v, y=y_v}$.

Dla potrzeb powyższego równania można zdefiniować następujące macierze i wektory:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\delta} = \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{bmatrix}, \quad \mathbf{z} = \begin{bmatrix} m_{i1} - f_{1v} \\ m_{i2} - f_{2v} \\ \vdots \\ m_{in} - f_{nv} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{e} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix}. \quad (3.28)$$

Zatem wyrażenie (3.27) może być zapisane następująco

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\delta} \cong \mathbf{z} - \mathbf{e}. \quad (3.29)$$

W każdym kroku iteracji należy znaleźć takie $\boldsymbol{\delta}$, które minimalizuje sumę kwadratów błędów

$$\boldsymbol{\delta} = [\mathbf{A}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{A}]^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{z}. \quad (3.30)$$

Wtedy współrzędne estymowane x_v oraz y_v należy zastąpić nowymi wartościami odpowiednio $x_v + \delta_x$ oraz $y_v + \delta_y$. Wartości te mogą posłużyć w następnym kroku iteracji lub być wynikiem działania algorytmu, gdy δ_x i δ_y zbiegają do zera. Macierz kowariancji błędów tak estymowanej pozycji można zapisać wzorem

$$\mathbf{Q}_0 = [\mathbf{A}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{A}]^{-1}. \quad (3.31)$$

Gdy elementy wektora błędów \mathbf{e} są wzajemnie niezależne o jednakowej wariancji σ^2 , zamiast wzoru (3.30) można użyć wzoru (3.32) do wyznaczenia wektora $\boldsymbol{\delta}$

$$\boldsymbol{\delta} = [\mathbf{A}^T \mathbf{A}]^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{z}. \quad (3.32)$$

W tej sytuacji macierz kowariancji błędów estymowanej pozycji będzie następująca

$$\mathbf{Q}_0 = [\mathbf{A}^T \mathbf{A}]^{-1} \sigma^2. \quad (3.33)$$

Powyżej przedstawione zależności stanowią ogólny zapis algorytmu zaprezentowanego przez Foy'a. Algorytm ten może być zastosowany dla różnych metod pomiarowych. Ważna jest przyjęta postać funkcji f_k . W niniejszej rozprawie został opisany przypadek zastosowania algorytmu Foy'a w metodzie TDOA oraz metodzie realizującej pomiary odległości. Wzory dla obu metod zostały omówione w oddzielnych podrozdziałach.

3.1.2.1. Algorytm Foy'a w metodzie TDOA

Metoda TDOA opiera się na lateralności hiperbolicznej i wykorzystuje pomiary różnic odległości do poszczególnych stacji referencyjnych, które następnie są użyte do wyznaczenia współrzędnych stacji ruchomej (metoda ta została dokładniej opisana w podrozdziale 2.2). Wówczas położenie tej stacji opisane jest wzorem

$$R_{i,1}^0 = R_i^0 - R_1^0 = \sqrt{(X_i - x^0)^2 + (Y_i - y^0)^2} - \sqrt{(X_1 - x^0)^2 + (Y_1 - y^0)^2}, \quad (3.34)$$

- $R_{i,1}^0$ - różnica odległości pomiędzy pierwszą a i -tą stacją referencyjną nieobarczona błędami pomiarowymi,
- R_i^0 - odległość od stacji ruchomej do i -tej stacji referencyjnej nieobarczona błędami pomiarowymi,
- R_1^0 - odległość od stacji ruchomej do pierwszej stacji referencyjnej nieobarczona błędami pomiarowymi,
- X_i, Y_i - współrzędne i -tej stacji referencyjnej,
- X_1, Y_1 - współrzędne pierwszej stacji referencyjnej.

Po rozwinięciu funkcji (3.34) w szereg Taylora drugiego rzędu uzyskujemy

$$R_{i,1} \cong r_i - r_1 + \left(\frac{X_1 - x_v}{R_1} - \frac{X_i - x_v}{R_i} \right) \delta_x + \left(\frac{Y_1 - y_v}{R_1} - \frac{Y_i - y_v}{R_i} \right) \delta_y, \quad (3.35)$$

gdzie:

- $R_{i,1}$ – zmierzona różnica odległości pomiędzy pierwszą a i -tą stacją referencyjną,
- r_i – estymowana odległość do i -tej stacji referencyjnej,
- r_1 – estymowana odległości do pierwszej stacji referencyjnej.

Wzór (3.35) można przekształcić do postaci

$$R_{i,1} - (r_i - r_1) = \left(\frac{X_1 - x_v}{R_1} - \frac{X_i - x_v}{R_i} \right) \delta_x + \left(\frac{Y_1 - y_v}{R_1} - \frac{Y_i - y_v}{R_i} \right) \delta_y. \quad (3.36)$$

Można wówczas następująco zdefiniować macierze:

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} R_{2,1} - (r_2 - r_1) \\ R_{3,1} - (r_3 - r_1) \\ \vdots \\ R_{M,1} - (r_M - r_1) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{X_1 - x_v}{R_1} - \frac{X_2 - x_v}{R_2} & \frac{Y_1 - y_v}{R_1} - \frac{Y_2 - y_v}{R_2} \\ \frac{X_1 - x_v}{R_1} - \frac{X_3 - x_v}{R_3} & \frac{Y_1 - y_v}{R_1} - \frac{Y_3 - y_v}{R_3} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{X_1 - x_v}{R_1} - \frac{X_M - x_v}{R_M} & \frac{Y_1 - y_v}{R_1} - \frac{Y_M - y_v}{R_M} \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

i zapisać $\mathbf{h} = \mathbf{G} \cdot \boldsymbol{\delta}$.

Ponieważ w użytym do badań systemie radiolokalizacyjnym wariancje błędów poszczególnych pomiarów odległości są nieznane, do wyznaczenia korekt współrzędnych pozycji w pojedynczym kroku iteracji skorzystano z zależności

$$\boldsymbol{\delta} = [\mathbf{G}^T \mathbf{G}]^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{h}. \quad (3.38)$$

Chcąc uwzględnić macierz kowariancji błędów pomiaru można skorzystać z zależności

$$\boldsymbol{\delta} = [\mathbf{G}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{G}]^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{h}. \quad (3.39)$$

3.1.2.2. Algorytm Foy'a dla pomiarów odległości

Odległość pomiędzy stacją lokalizowaną a poszczególnymi stacjami referencyjnymi, przy braku uwzględnienia błędów pomiarowych, opisana jest wzorem

$$R_i^0 = \sqrt{(X_i - x^0)^2 + (Y_i - y^0)^2}. \quad (3.40)$$

Po rozwinięciu powyższego równania w szereg Taylora i uwzględnieniu rzeczywistych pomiarów odległości otrzymujemy

$$R_i \cong r_i + \frac{X_i - x_v}{r_i} \delta_x + \frac{Y_i - y_v}{r_i} \delta_y, \quad (3.41)$$

gdzie R_i reprezentuje rzeczywisty pomiar odległości do i -tej stacji referencyjnej. Powyższe równanie można przekształcić do postaci

$$R_i - r_i = \frac{X_i - x_v}{r_i} \delta_x + \frac{Y_i - y_v}{r_i} \delta_y. \quad (3.42)$$

Wówczas, do wyznaczenia korekt współrzędnych położenia obiektu można skorzystać ze wzoru (3.38), gdy nie można lub nie trzeba uwzględniać macierzy kowariancji albo ze wzoru (3.39) z uwzględnieniem macierzy kowariancji. Inaczej jednak będzie zdefiniowany wektor \mathbf{h} i macierz \mathbf{G} :

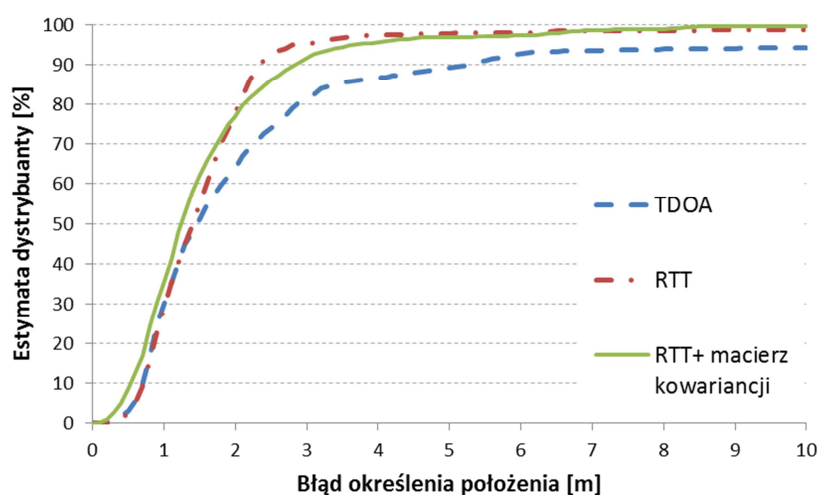
$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} R_1 - r_1 \\ R_2 - r_2 \\ \dots \\ R_M - r_M \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} -\frac{X_1 - x_v}{r_1} & -\frac{Y_1 - y_v}{r_1} \\ -\frac{X_2 - x_v}{r_2} & -\frac{Y_2 - y_v}{r_2} \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{X_M - x_v}{r_M} & -\frac{Y_M - y_v}{r_M} \end{bmatrix}. \quad (3.43)$$

3.1.2.3. Realizacja algorytmu Foy'a

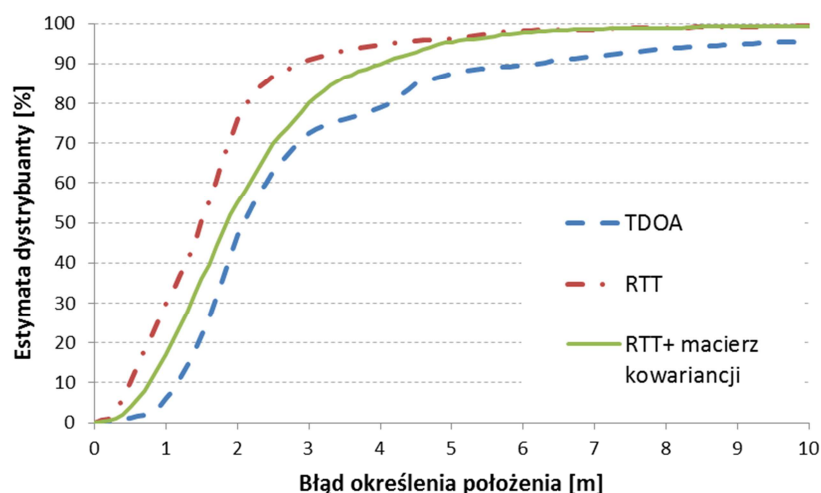
Jak wynika z poprzednich podpunktów, implementacja algorytmu Foy'a zależy od metody pomiarowej. W systemie użytym do pomiarów stosowana jest technika RTT, w wyniku której uzyskiwane są pomiary odległości do poszczególnych stacji referencyjnych. W związku z tym, bardziej odpowiednią implementacją algorytmu Foy'a będzie ta opisana w podrozdziale 3.1.2.2. Niemniej jednak, korzystając z tych samych wyników pomiarów zrealizowanych techniką RTT, można także wyznaczyć położenie obiektu stosując wzory z podrozdziału 3.1.2.1. W celu porównania obu realizacji algorytmu Foy'a zaimplementowano wzory z obu wymienionych podrozdziałów. Uzyskane dystrybuanty

błędów wyznaczonych współrzędnych na podstawie rzeczywistych pomiarów zaprezentowano na rys. 3.3 i rys. 3.4. Do wykreślenia dystrybuant opisanych jako „TDOA” i oznaczonych linią niebieską zostały użyte wzory z podrozdziału 3.1.2.1 i wzór (3.38). Dystrybuanty opisane jako „RTT” i oznaczone linią czerwoną zostały wykreślone z użyciem wzorów z podrozdziału 3.1.2.2 i wzoru (3.38). Wyznaczono także dystrybuantę dla metody RTT z uwzględnieniem macierzy kowariancji zgodnie ze wzorem (3.39). Przyjęta macierz kowariancji jest macierzą diagonalną, której elementy są wariancjami pomiarów odległości określonych dla każdej pary urządzeń z ostatnich 15 pomiarów. Ostatnie z opisanych dystrybuant zostały oznaczone kolorem zielonym i opisane jako „RTT+macierz kowariancji”.

Wspomniane dystrybuanty wykreślono dla dwóch różnych serii pomiarowych. Obie serie były zrealizowane w niezamieszkanym jeszcze domu jednorodzinym. W obu seriach pomiarowych stacje referencyjne były rozstawione wokół budynku. Natomiast stacje, których położenie było określane w jednej serii były ustawione na parterze (seria 13 z załącznika A), a w drugiej na piętrze (seria 14 z załącznika A).



Rys. 3.3. Estymaty dystrybuanty błędów określania położenia dla pomiarów wykonanych, gdy stacje referencyjne były rozstawione na zewnątrz budynku a stacje, których położenie określano, wewnątrz na parterze. Seria 13 z załącznika A



Rys.3.4. Estymaty dystrybuanty błędów określania położenia dla pomiarów wykonanych, gdy stacje referencyjne były rozstawione na zewnątrz budynku a stacje, których położenie określano, wewnątrz na piętrze (wys. 3,04 m). Seria 14 z załącznika A

Na powyższych wykresach widać, że korzystniej jest stosować wzory z podrozdziału 3.1.2.2 niż podrozdziału 3.1.2.1 do wyznaczania położenia obiektów na podstawie zrealizowanych pomiarów odległości. Ponadto widać, że stosowanie macierzy kowariancji nie zmniejsza błędów estymowanych współrzędnych. Dlatego też podczas dalszych badań stosowano implementację algorytmu Foy'a dla metody RTT, bez dodatkowego wyznaczania macierzy kowariancji.

3.1.3. Algorytm Fanga

Autorem kolejnego znanego algorytmu wyznaczania położenia obiektów na podstawie pomiarów różnicy odległości do poszczególnych stacji referencyjnych jest Bertrand Fang. Algorytm swój przedstawił w artykule [18]. Ponieważ w algorytmie tym do wyznaczania położenia obiektów są używane jedynie pomiary do trzech stacji referencyjnych rozstawionych na jednej płaszczyźnie, efektywność tego algorytmu nie została porównana z efektywnością nowego proponowanego algorytmu. Niemniej jednak, ze względu na łatwą implementację algorytmu Fanga w układach takich jak FPGA, zasługuje on na uwagę i dlatego został tutaj przybliżony.

Jak wspomniano wcześniej, w procesie wyznaczania położenia obiektu mogą brać udział tylko trzy stacje referencyjne o następujących współrzędnych:

- stacja A (0,0),

- stacja B $(b,0)$,
- stacja C (c_x, c_y) .

Jeśli różnicę odległości do stacji A, B oznaczmy jako R_{ab} , estymowane współrzędne stacji ruchomej (x, y) , a różnicę odległości do stacji A i C oznaczmy jako R_{ac} , to można zapisać:

$$\begin{aligned}\sqrt{x^2 + y^2} - \sqrt{(x - b)^2 + y^2} &= R_{ab} \\ \sqrt{x^2 + y^2} - \sqrt{(x - c_x)^2 + (y - c_y)^2} &= R_{ac}.\end{aligned}\quad (3.44)$$

Powyższe zależności można przekształcić do postaci:

$$\begin{aligned}-\sqrt{(x - b)^2 + y^2} &= R_{ab} - \sqrt{x^2 + y^2} \\ -\sqrt{(x - c_x)^2 + (y - c_y)^2} &= R_{ac} - \sqrt{x^2 + y^2}.\end{aligned}\quad (3.45)$$

Podnosząc obustronnie równania (3.45) do kwadratu uzyskujemy:

$$R_{ab}^2 + 2bx - b^2 = 2R_{ab}\sqrt{x^2 + y^2}, \quad (3.46)$$

$$R_{ac}^2 - c_c^2 + 2c_x x + 2c_y y = 2R_{ac}\sqrt{x^2 + y^2}, \quad (3.47)$$

przy czym $c_c = \sqrt{c_x^2 + c_y^2}$. Dzieląc oba równania stronami i stosując odpowiednie uproszczenia uzyskuje się równanie

$$y = gx + h, \quad (3.48)$$

gdzie $g = \frac{R_{ac} \frac{b}{R_{ab}} - c_x}{c_y}$, natomiast $h = \frac{c_c^2 - R_{ac}^2 + R_{ab} \cdot R_{ac} \cdot \left(1 - \left(\frac{b}{R_{ab}}\right)^2\right)}{2c_y}$. Podstawiając wzór (3.48)

do wzoru (3.46) otrzymujemy

$$d \cdot x^2 + e \cdot x + f = 0, \quad (3.49)$$

przy czym:

- $d = -\left(1 + g^2 - \left(\frac{b}{R_{ab}}\right)^2\right)$,
- $e = b\left(1 - \left(\frac{b}{R_{ab}}\right)^2\right) - 2gh$,
- $f = \frac{R_{ab}^2}{4}\left(1 - \left(\frac{b}{R_{ab}}\right)^2\right)^2 - h^2$.

Równanie (3.49) jest równaniem kwadratowym, którego rozwiązaniem są dwa pierwiastki:

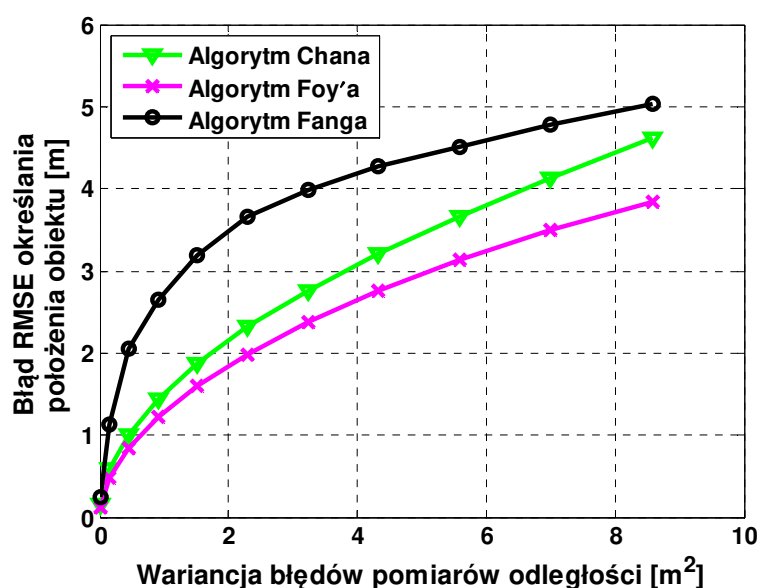
$$x_1 = \frac{-e - \sqrt{e^2 - 4df}}{2d}, \quad (3.50)$$

$$x_2 = \frac{-e + \sqrt{e^2 - 4df}}{2d}. \quad (3.51)$$

Po wyznaczeniu wartości x można ją podstawić do wzoru (3.48) i znaleźć drugą współrzędną.

Z badań symulacyjnych wynika, że dla obu uzyskanych estymat położenia obiektu należy wyznaczyć sumę odległości do poszczególnych stacji referencyjnych. Jeśli suma ta dla pierwiastka (3.50) będzie mniejsza niż dla pierwiastka (3.51) wówczas pierwiastek (3.50) będzie stanowił rozwiązanie równania nawigacyjnego. W przeciwnym razie to pierwiastek (3.51) będzie właściwym rozwiązaniem.

Porównano pierwiastek błędu średniokwadratowego (3.24) estymat położenia w funkcji wariancji błędów realizowanych pomiarów odległości przy użyciu algorytmów: Chana, Foy'a i Fanga. Badanie to zostało wykonane w drodze symulacji komputerowej. Przyjęto, że rozkład błędów pomiarów odległości jest gaussowski, a wartość średnia tych błędów wynosi zero. Do wyznaczania położenia użyto trzech stacji referencyjnych o współrzędnych: (0 m, 0 m), (0 m, 10 m) i (5 m, $5\sqrt{3}$ m). Węzły lokalizowane rozmieszczono na obszarze ograniczonym dla współrzędnych x (-1 m, 11 m) i współrzędnych y (-1 m, $6\sqrt{3}$ m) z krokiem co 0,25 m. Wyniki przedstawiono na rys. 3.5.



Rys.3.5. Błąd określania położenia obiektu w funkcji wariancji błędów pomiarów odległości o rozkładzie Gaussa i wartości średniej 0 dla algorytmów: Chana, Foy'a i Fanga

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że algorytm Fanga jest najbardziej podatny na błędy pomiarów odległości spośród analizowanych algorytmów, dlatego też nie został on użyty w dalszych badaniach.

3.2. Propozycja nowego algorytmu wyznaczania położenia obiektu na podstawie pomiarów odległości

Omówione w poprzednich podrozdziale algorytmy wyznaczania położenia obiektów na podstawie pomiarów odległości są przeznaczone do stosowania dla danych wejściowych, których błędy mają rozkład gaussowski, a ich wartość oczekiwana jest zerowa. Ponadto, ze względu na operacje na macierzach, zwłaszcza odwracanie macierzy, przy niekorzystnym układzie stacji referencyjnych lub wyjątkowych przypadkach błędów pomiarowych, algorytmy te mogą nie dać rozwiązania.

Środowisko wewnątrzbudynkowe charakteryzuje się niegaussowskim rozkładem błędów pomiarów odległości [11]. Wynika to z częstego braku bezpośredniej widoczności pomiędzy urządzeniami nadawczym i odbiorczym, a także ze zjawiska wielodrożności. Rezultatem braku bezpośredniej widoczności pomiędzy urządzeniami wykonującymi pomiary odległości będą zawyżone wartości tych pomiarów. Wiąże się to z niezerową i większą od zera wartością oczekiwaną błędów pomiarów odległości. Oznacza to, że warunki postawione przez twórców opisanych w poprzednich podrozdziałach algorytmów dla danych wejściowych w środowisku wewnątrzbudynkowym nie są spełnione, co skutkuje pogorszeniem efektywności tych algorytmów w takim środowisku. Jako miarę efektywności przyjęto w niniejszej pracy wartości trzech parametrów omówionych dokładniej w rozdziale 6: dokładności RMSE zdefiniowanej wzorem (6.1), precyzji RMSE zdefiniowanej wzorem (6.2) oraz prawdopodobieństwa straty czyli prawdopodobieństwa z jakim dany algorytm może nie zwrócić estymaty położenia obiektu dla danego zbioru pomiarów odległości. Ponadto, przeprowadzone badania dowiodły, że omówione algorytmy nie dla każdego zestawu pomiarów odległości, realizowanych w środowisku zamkniętym, zwracają wartościowy wynik (taki, który znajduje się w obszarze zainteresowania) w postaci współrzędnych położenia obiektu.

W celu rozwiązania powyższych problemów podjęto się opracowania algorytmu, w którym zostaną uwzględnione właściwości wewnątrzbudynkowego środowiska propagacyjnego (niegaussowski rozkład błędów i niezerowa wartość oczekiwana tych błędów) oraz zostanie zwiększone prawdopodobieństwo wyznaczenia współrzędnych położenia

obiektu m.in. przez wyeliminowanie operacji odwracania macierzy. Rezultatem tych prac jest iteracyjny algorytm nazywany dalej **nowym wewnątrzbudynkowym algorytmem wyznaczania położenia obiektów (WAP)**. Algorytm ten charakteryzuje się pewnymi cechami wspólnymi z algorytmami gradientowymi [10], [12], [13], [14]. W ogólności algorytmy gradientowe polegają na poszukiwaniu kierunku najszybszego spadku poprzez wyznaczanie gradientu funkcji, dla której chcemy znaleźć minimum [89]. W zaproponowanym algorytmie w każdej iteracji wyznaczane są korekty estymowanych współrzędnych położenia stacji ruchomej i dodawane do współrzędnych położenia określonych w poprzednim kroku. W klasycznym algorytmie gradientowym korekty te mogą być wyznaczane jako gradient minimalizowanej funkcji. Funkcja ta powinna opisywać np. wartość błędu określenia współrzędnych dla danego zestawu pomiarów odległości. W zaproponowanym algorytmie jako miarę gradientu uznaje się wartość proporcjonalną do odpowiednio normowanej nieliniowej funkcji, nazywanej dalej **nieliniową funkcją błędu**. Wartość tej funkcji jest normowana różnicą pomiędzy odpowiednimi estymatami współrzędnych stacji ruchomej a znanymi współrzędnymi stacji referencyjnych podzieloną przez estymatę odległości. Nieliniowa funkcja błędu jest kluczowym elementem algorytmu WAP, ponieważ pozwala uwzględnić właściwości środowiska propagacyjnego, co jest opisane dokładniej w dalszej części niniejszego podrozdziału.

Estymowanie współrzędnych położenia obiektu z użyciem algorytmu WAP odbywa się iteracyjnie. W każdej iteracji realizowane są opisane dalej operacje.

Dla i -tej stacji referencyjnej, biorącej udział w pomiarach odległości należy wyznaczyć estymowaną odległość

$$r_i = \sqrt{(X_i - x_v)^2 + (Y_i - y_v)^2}, \quad (3.52)$$

gdzie:

- X_i, Y_i - współrzędne i -tej stacji referencyjnej,
- x_v, y_v - współrzędne estymowanego położenia.

Następnie należy określić korekty współrzędnych estymowanego położenia dla wszystkich pomiarów w danej chwili

$$\begin{aligned} \Delta X_i &= \alpha \cdot f(R_i, r_i) \cdot \frac{x_v - X_i}{r_i}, \\ \Delta Y_i &= \alpha \cdot f(R_i, r_i) \cdot \frac{y_v - Y_i}{r_i}, \end{aligned} \quad (3.53)$$

gdzie:

- α – stała, która wpływa na zbieżność oraz stabilność algorytmu, parametr analogiczny do współczynnika kroku stosowanego w algorytmach gradientowych,
- R_i – zmierzona odległość do i -tej stacji referencyjnej,
- $f(R_i, r_i)$ – nieliniowa funkcja błędu zdefiniowana zależnością (3.56).

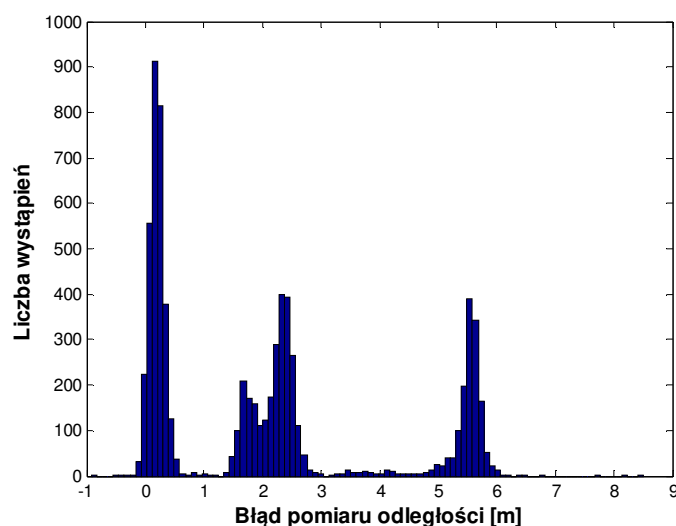
Wynikiem iteracji są nowe współrzędne położenia wyliczane ze wzorów:

$$x_{vN} = x_v + \Delta X_c, \quad y_{vN} = y_v + \Delta Y_c, \quad (3.54)$$

gdzie:

$$\Delta X_c = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \Delta X_i, \quad \Delta Y_c = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \Delta Y_i. \quad (3.55)$$

Najważniejszym elementem proponowanego algorytmu jest postać nieliniowej funkcji błędów [11], [93], [94]. Funkcja ta uwzględnia rozkład prawdopodobieństwa błędów pomiarów odległości. W środowisku wewnątrzbudynkowym wyniki pomiarów odległości są zwykle zawyżone ze względu na propagację wielodrogową. Na rys. 3.6 pokazany został przykładowy rozkład błędów pomiarów odległości zrealizowanych za pomocą systemu SALOn w budynku jednorodzinym dla pojedynczego urządzenia lokalizowanego (MIO 5 – patrz podrozdział 4.1, seria 14 z załącznika A). Rozkład ten wykreślono na podstawie 7269 pomiarów odległości. Przez błąd pomiaru odległości należy rozumieć różnicę pomiędzy zmierzoną wartością odległości a rzeczywistą (wyznaczoną na



Rys. 3.6. Przykładowy rozkład błędów rzeczywistych pomiarów odległości w środowisku wewnątrzbudynkowym

podstawie znajomości współrzędnych stacji lokalizowanej oraz węzła referencyjnego). Widać, że rozkład ten różni się od gaussowskiego i jest charakterystyczny dla środowiska, w którym zachodzi zjawisko wielodrogowości. Wartość średnia błędów pomiarów odległości dla prezentowanego rozkładu wynosi 2,27 m.

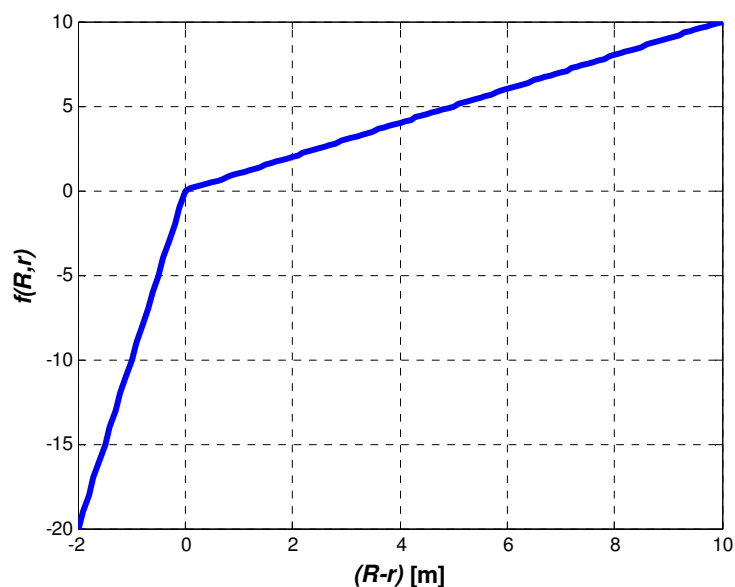
W środowisku wewnątrzbudynkowym sygnał zazwyczaj dociera do odbiornika z większym opóźnieniem niż to wynikałoby z odległości pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem liczonej w linii prostej. Spodziewamy się więc, że poszukiwana, estymowana odległość będzie mniejsza od rzeczywiście zmierzonej. Dlatego też, w sytuacji gdy odległość estymowana w danym kroku jest mniejsza od odległości zmierzonej, korekta współrzędnych powinna być niewielka. Natomiast, gdy odległość estymowana jest większa od zmierzonej, zależy nam by korekta współrzędnych była znacząca, gdyż taki wynik jest z dużym prawdopodobieństwem obarczony znacznym błędem. Przedstawione rozważania pozwoliły w sposób heurystyczny określić postać nieliniowej funkcji błędu. Postać ta ulegała zmianie podczas badań zrealizowanych w ciągu ostatnich 4 lat [12], [13], [93]. Nieliniowa funkcja błędów prezentowana w niniejszej rozprawie została wybrana, ponieważ zapewnia zbieżność algorytmu oraz pozwala uzyskać najmniejsze wartości błędów określania położenia obiektów spośród różnych rozpatrywanych postaci tej funkcji. Ostatecznie, postać nieliniowej funkcji błędów jest następująca

$$f(R, r) = \begin{cases} A \cdot (R - r), & R > r \\ B \cdot (R - r), & R \leq r \end{cases} \quad (3.56)$$

gdzie A, B są współczynnikami kierunkowymi półprostych.

Postać nieliniowej funkcji błędu wyznaczonej dla $A = 1$ i $B = 10$ została pokazana na rys. 3.7.

Proponowany algorytm wymaga dostosowania do warunków propagacyjnych poprzez zrealizowanie badań kalibracyjnych w budynku, w którym ma być on stosowany. Badanie takie polega na zrealizowaniu radiowych pomiarów odległości w wybranych, znanych punktach w tym budynku. Punkty te powinny być rozmieszczone w różnych podobszarach tego budynku, tak by móc oszacować warunki propagacyjne w całej przestrzeni zainteresowania. Następnie, konieczne jest dobranie współczynników kierunkowych półprostych tworzących funkcję błędu tak, aby zminimalizować pierwiastek błędu średniokwadratowego dokładności otrzymywanych estymat położenia obiektu dla zgromadzonego zbioru pomiarów odległości. Sposób doboru tych parametrów jest opisany



Rys. 3.7. Przykładowy wykres nieliniowej funkcji błędów

w podrozdziale 6.2. Kalibracja może być także zrealizowana drogą symulacji komputerowej. Konieczna jest wówczas znajomość modelu propagacyjnego właściwego dla danego obiektu, tak by określić rozkład prawdopodobieństwa błędów pomiarów odległości. Rozkład ten może być następnie użyty do wygenerowania zestawów pomiarów odległości, dla których będą dobierane wartości parametrów algorytmu WAP. Kalibracja systemu radiolokalizacji wewnątrzbudynkowej jest powszechnie stosowaną procedurą, co zostało podkreślone w rozdziale 2 podczas omawiania metod pomiarowych stosowanych w systemach radiolokalizacyjnych.

Rozdział 4.

Opis demonstratora technologicznego użytego do badań

W celu udowodnienia tezy rozprawy wykonano w rzeczywistych warunkach pomiary odległości metodą radiową, które następnie zostały użyte do zbadania efektywności⁷ proponowanego wewnątrzbudynkowego algorytmu wyznaczania położenia (WAP) i porównania jej z efektywnością innych znanych algorytmów wyznaczania położenia obiektów na podstawie pomiarów odległości. Okolicznością sprzyjającą wykonaniu badań pomiarowych było uczestnictwo autorki niniejszej rozprawy w charakterze głównego wykonawcy w projekcie badawczo-rozwojowym nr O R00 0150 11. W ramach tego projektu, prowadzonego w Katedrze Systemów i Sieci Radiokomunikacyjnych na Wydziale Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej, został wykonany demonstrator technologiczny systemu automatycznej lokalizacji osób i mienia SALOn [48]. System ten został użyty do wykonania rzeczywistych pomiarów odległości między węzłami sieci sensorowej, które posłużyły do zrealizowania badań nad algorytmami wyznaczania położenia. W docelowym zastosowaniu system ten jest dedykowany do zastosowań specjalnych, projektowany z myślą o wsparciu i zabezpieczeniu działań operacyjnych różnych służb (np. straży pożarnej, policji) w nieznanach obiektach. System SALOn powstał, ponieważ usługi lokalizacji w środowisku zamkniętym nie można zrealizować za pomocą znanych i powszechnie stosowanych satelitarnych systemów lokalizacyjnych (np. GPS), przeznaczonych do użytku w środowisku otwartym. Jest ona niedostępna we wnętrzach budynków lub jej dokładność jest niewielka, zwłaszcza gdy system taki miałby stanowić o życiu lub zdrowiu ludzi.

⁷ Efektywność w rozprawie określana jest trzema parametrami: pierwiastkiem błędu średniokwadratowego dokładności (6.1), pierwiastkiem błędu średniokwadratowego precyzji (6.2) oraz prawdopodobieństwem straty (niewyznaczenia estymaty położenia obiektu przez algorytm)

4.1. Założenia systemu

System automatycznej lokalizacji osób SALOn miał być wsparciem dla służb mundurowych podczas działań operacyjnych wewnątrz budynków, których rozkład pomieszczeń nie musi być znany. System ten w czasie rzeczywistym umożliwia śledzenie położenia osób (w założeniu funkcjonariuszy). Określanie tego położenia umożliwiają stacje referencyjne, nazywane dalej **pośredniczącymi węzłami radiokomunikacyjnymi (PWR)**, rozstawione wokół budynku zainteresowania (np. na dachach pojazdów, którymi funkcjonariusze przyjechali na miejsce akcji). Określane jest położenie tylko tych osób, które posiadają **moduły identyfikacji osobistej (MIO)**. Informacje o ich położeniu są rejestrowane na serwerze w **głównej stacji nadzoru (GSN)** instalowanej przy wybranym węźle pośredniczącym PWR. Osoba nadzorująca interwencję może na bieżąco śledzić położenie tych osób w formie dwu- lub trójwymiarowej (informacja o wysokości modułów MIO pochodzi z dodatkowych czujników ciśnienia atmosferycznego) wizualizacji na ekranie komputera lub tablecie.

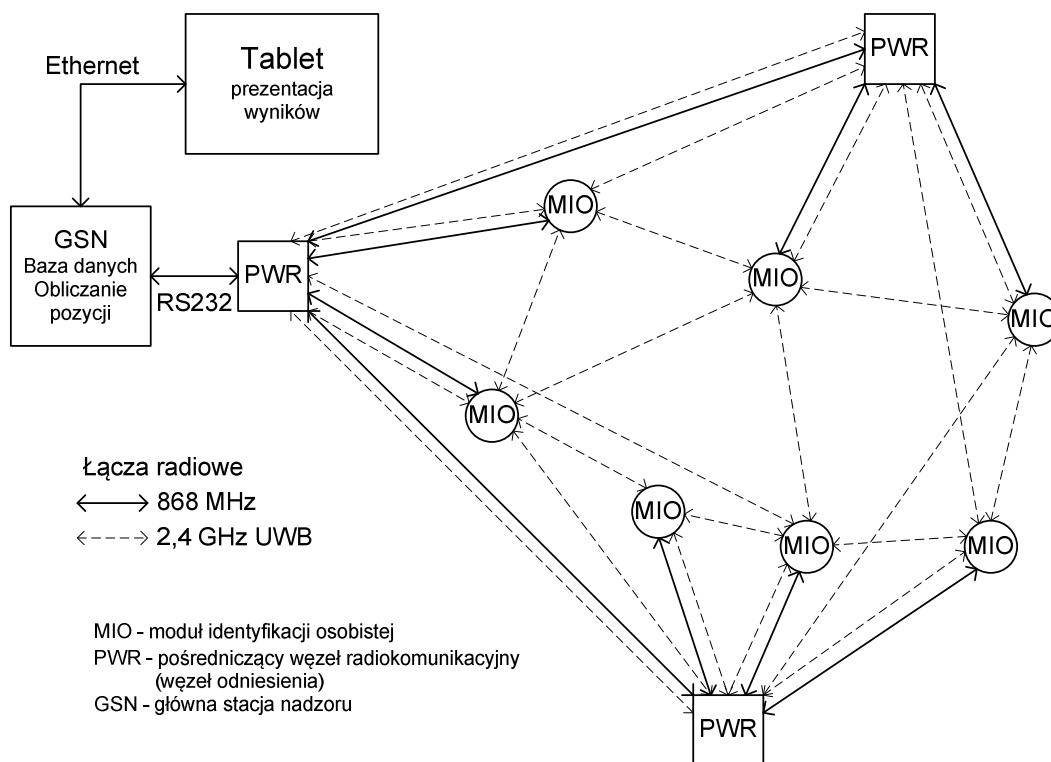
Ponadto system SALOn umożliwia rozsyłanie informacji alarmowych. Ponieważ system był dedykowany głównie dla służb ratunkowych zaimplementowano następujące typy alarmów:

- wezwanie pomocy wyzwalane ręcznie, przez wciśnięcie przycisku w module osobistym,
- wezwanie pomocy wyzwalane automatycznie po wykryciu przez MIO upadku i bezruchu danej osoby,
- nakaz ewakuacji całego budynku przy zauważeniu przez funkcjonariusza niebezpieczeństwa mogącego zagrażać zdrowiu lub życiu innych funkcjonariuszy, wyzwalany ręcznie przyciskiem w module osobistym.

Informacje alarmowe są rozsyłane do wszystkich modułów osobistych, a także, podobnie jak informacje o położeniu, są rejestrowane w stacji GSN. W przypadku „wołania pomocy”, modułom osobistym odbierającym to wołanie jest udostępniana informacja o odległości do modułu osoby wzywającej pomocy. Użytkownikowi wyposażonemu w MIO ta informacja jest przekazywana w postaci sygnałów dźwiękowych i świetlnych.

4.2. Budowa systemu

Ogólna struktura systemu automatycznej lokalizacji osób została przedstawiona na rys. 4.1. Urządzenia sieci SALOn wykorzystują dwa łącza radiowe: wąskopasmowe łącze w paśmie 868 MHz oraz ultraszerokopasmowe łącze w paśmie 2,4 GHz.



Rys. 4.1. Ogólna struktura sieci SALOn

Zakres częstotliwości 868 MHz przeznaczony jest do tworzenia i utrzymywania funkcjonowania sieci oraz do dwukierunkowej transmisji danych: MIO przesyłają do GSN za pośrednictwem PWRów wyniki pomiarów odległości, zaś GSN przesyła do PWRów i do MIO informacje sterujące, konfiguracyjne oraz alarmowe. Łącza radiowe 868 MHz służy także do wyszukiwania w sieci nowych MIO i/lub PWRów oraz zdalnej aktualizacji oprogramowania węzłów. Transmisja w tym paśmie realizowana jest z użyciem modemu 868 MHz ATZB900-B0 [30].

Podstawą określania położenia nadzorowanych osób są wyniki pomiarów odległości pomiędzy modułami identyfikacji osobistej MIO a węzłami odniesienia PWR realizowanymi z użyciem układu NA5TR1 [70]. Pomiar odległości wykonywany jest poprzez pomiar czasu propagacji sygnału radiowego przy dwukierunkowej transmisji pakietów radiowych pomiędzy MIO i PWR (metoda RTT, SDS-TWR [70]). W celu zwiększenia

zasięgu i dokładności działania sieci, realizowane są także pomiary odległości pomiędzy modułami MIO.

Do pomiarów odległości zastosowano modemy firmy Nanotron, które emitują sygnały z liniowym przemieszczeniem częstotliwości (*chirp*) o szerokości pasma około 80 MHz w zakresie częstotliwości ISM 2,4 GHz, co w świetle [82] stanowi transmisję ultraszerokopasmową (UWB). Całość transmisji w paśmie 2,4 GHz jest nadzorowana przez węzeł PWR podłączony do stacji GSN. Otrzymuje on z serwera listę węzłów aktywnych w systemie SALOn. W zależności od funkcji, węzły sieci mają przydzielane szczeliny czasowe (wielodostęp z podziałem czasowym TDMA [59], [102]) o odpowiedniej szerokości, większej dla modułów MIO, gdyż wykonują one więcej pomiarów odległości niż węzły PWR. Lista przydziału szczelin czasowych jest umieszczana przez węzeł PWR podłączony do stacji GSN w depeszy rozsyłanej rozgłoszeniowo w paśmie 2,4 GHz do wszystkich pozostałych elementów sieci. Depesza ta jest także retransmitowana przez pozostałe stacje PWR w sieci, więc nawet jeśli urządzenie MIO znajduje się poza zasięgiem komunikacji bezpośredniej z węzłem PWR podłączonym do stacji GSN, otrzyma tę depeszę.

Pomiary odległości są inicjowane przez moduły MIO i wykonywane w postaci serii pomiarów do urządzeń będących w zasięgu tych modułów. Pomiary mogą być wykonywane tylko w czasie trwania przydzielonej szczeliny czasowej. W związku z tym, każdy moduł identyfikacji osobistej przechowuje informacje o urządzeniach z nim sąsiadujących oraz rejestruje w pamięci, czy pomiary realizowane do danego urządzenia kończyły się od razu sukcesem, czy wymagały powtórzeń. Wówczas pomiary odległości przebiegają w następującej kolejności: najpierw do stacji PWR bez problemów komunikacyjnych, następnie do stacji PWR, z którymi pomiary musiały być powtarzane, dalej do modułów MIO bez problemów komunikacyjnych i na końcu do modułów MIO, z którymi pomiary musiały być powtarzane lub nie udały się. W ten prosty sposób zwiększa się prawdopodobieństwo pomyślnego przeprowadzenia pomiarów odległości, co zwiększa liczbę uzyskiwanych wyników pomiarów zrealizowanych w ramach pojedynczej szczeliny czasowej.

Istotna jest, z punktu widzenia dokładności określania położenia modułów identyfikacji osobistej, dokładna znajomość współrzędnych stacji referencyjnych. Ponieważ zakłada się, że urządzenia te będą rozstawione wokół budynku na dachach pojazdów, przyjęto, że możliwe będzie określenie współrzędnych tych stacji za pomocą satelitarne-

go systemu pozycjonującego GPS. Przewidziano także możliwość ręcznego wpisania do urządzeń PWR współrzędnych ich położenia za pomocą klawiatury lokalnej lub też zdalnego wpisania tych współrzędnych za pośrednictwem stacji GSN. Współrzędne stacji referencyjnych mogą być podane w układach globalnych (WGS84 – ang. *World Geodetic System*, PUWG 1992, PUWG 2000 – Państwowy Układ Współrzędnych Geodezjnych) lub lokalnym (w odniesieniu do danego budynku, terenu). Funkcja ręcznego wpisywania współrzędnych lokalnych została użyta podczas prowadzenia kampanii pomiarowych w ramach prowadzonych badań nad nowym wewnątrzbudynkowym algorytmem wyznaczania położenia obiektów.

Założono, że w systemie SALOn stacje referencyjne PWR będą rozstawione wokół nadzorowanego obszaru np. na samochodach. W takim scenariuszu pracy systemu stacje referencyjne będą rozstawione na jednakowej lub bardzo zbliżonej wysokości. Jest to bardzo niekorzystna konfiguracja, zwłaszcza gdy osoby nadzorowane będą poruszały się po różnych kondygnacjach budynku. Wówczas określenie trzeciego wymiaru - wysokości na podstawie wyników radiowych pomiarów odległości będzie praktycznie niemożliwe. Problem ten został rozwiązany przez zamontowanie we wszystkich elementach sieci SALOn precyzyjnych czujników ciśnienia atmosferycznego BMP085 [7]. Czujniki te w węzłach referencyjnych służą do określania wartości ciśnienia odniesienia na znanej wysokości zainstalowania węzłów PWR, zaś ciśnienie powietrza zmierzone przez czujniki w modułach MIO pozwala na oszacowanie wysokości. Uzyskiwany błąd średniokwadratowy pomiaru wysokości tą metodą jest rzędu 0,5 m, przy czym dokładność ta jest całkowicie wystarczająca do oszacowania kondygnacji, na której znajduje się monitorowana osoba wyposażona w MIO.

Oprócz wspomnianych wyżej elementów jak modem 868 MHz ATZB900-B0 do transmisji danych i zarządzania siecią, układ NA5TR1 firmy Nanotron do pomiarów odległości oraz ciśnieniomierz BMP085 do wspomaganie określania wysokości, w modułach identyfikacji osobistej MIO zamontowane są następujące podzespoły:

- trójosiowy akcelerometr ADXL345 [1] do automatycznego wykrywania upadku (z rozróżnianiem na upadki z dużej i małej wysokości) oraz bezruchu,
- uproszczony interfejs użytkownika we wszystkich modułach MIO: dwa przyciski do wyzwalania alarmów, diody LED do sygnalizacji odległości od MIO wzywających pomocy i sygnalizator akustyczny,

- rozszerzony interfejs użytkownika w wybranych modułach MIO: graficzny wyświetlacz LCD (monochromatyczny) do przekazywania dokładniejszych informacji o alarmach oraz dodatkowe przyciski.

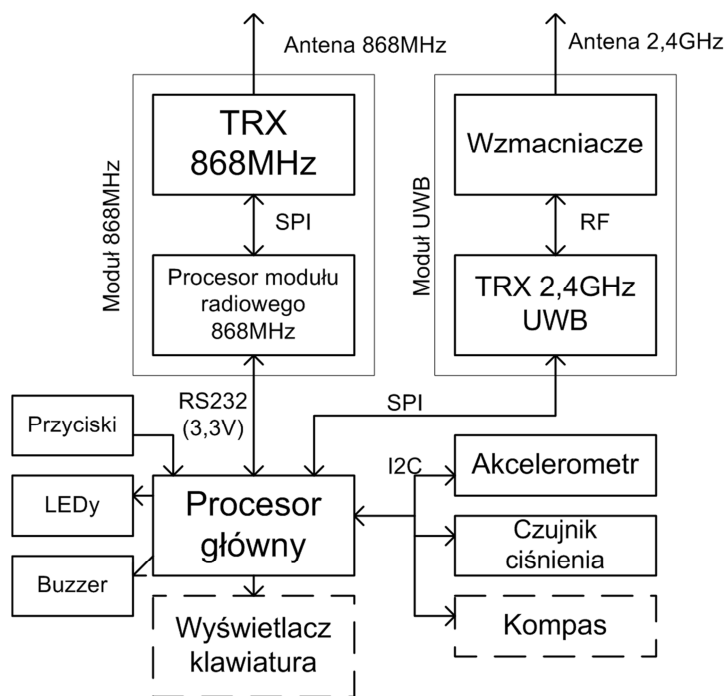
Schemat blokowy budowy modułu MIO został pokazany na rys. 4.2, natomiast na rys. 4.3 pokazano wersję prototypową urządzenia, używaną podczas pomiarów.

Pośredniczące węzły radiokomunikacyjne PWR są wyposażone w następujące podzespoły:

- akcelerometr ADXL345 do wykrywania ruchu PWR: pomiary odległości wykonywane do poruszającego się PWRa nie są uwzględniane podczas wyznaczania położenia,
- odbiornik GPS do ustalania pozycji PWR poza budynkami,
- zegar czasu rzeczywistego DS1337 [17] z podtrzymaniem baterijnym do rejestracji momentu czasu wykonywanych pomiarów (znacznik czasu z odbiornika GPS lub zegara czasu rzeczywistego jest umieszczany w depeczy nawigacyjnej synchronizującej wszystkie MIO w sieci),
- interfejs szeregowy RS232 do podłączenia stacji GSN,
- klawiatura i wyświetlacz LCD do kontroli stanu pracy PWR oraz ewentualnego ręcznego wpisywania współrzędnych,
- sygnalizator dźwiękowy i diody LED do wskazywania stanu pracy PWR i informacji alarmowych.

Schemat blokowy budowy stacji PWR został pokazany na rys. 4.4, a prototypowa wersja urządzenia na rys. 4.5.

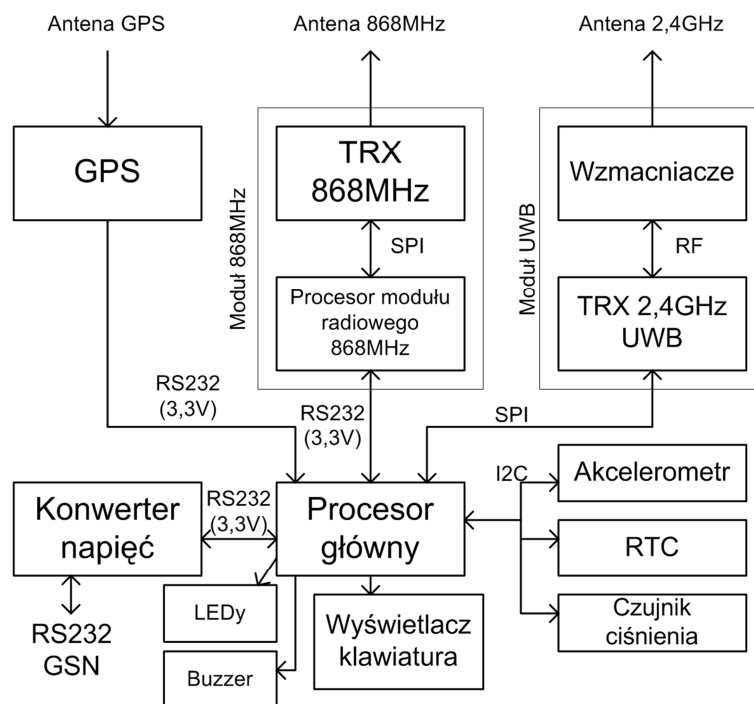
Główna stacja nadzoru GSN, czyli serwer systemu, został zbudowany na bazie komputera przemysłowego typu ARK-3202. Serwer pracuje pod kontrolą systemu operacyjnego Linux w dystrybucji Ubuntu 10.04.2 LTS w wersji serwerowej. Oprogramowanie sterujące pracą sieci SALOn i rejestracją danych zostało napisane w języku C++ i pracuje w konsoli tekstowej (nie wymaga interfejsu graficznego). Zdjęcie prototypowego serwera zostało pokazane na rys. 4.6. Najważniejsze komunikaty oprogramowania serwera są wyświetlane na wyświetlaczu LCD podłączonego do niego PWRa, zaś sam serwer pracuje całkowicie autonomicznie. Dane z sieci SALOn są przechowywane w lokalnej bazie danych MySQL i udostępniane dopiero po podłączeniu zewnętrznego komputera (np.



Rys. 4.2. Schemat blokowy budowy modułu identyfikacji osobistej MIO



Rys. 4.3. Prototypowa wersja modułu identyfikacji osobistej MIO



Rys. 4.4. Schemat blokowy budowy pośredniczącego węzła radiokomunikacyjnego PWR



Rys. 4.5. Prototypowa wersja pośredniczącego węzła radiokomunikacyjnego PWR

typu tablet) z oprogramowaniem do wizualizacji położenia użytkowników (rys. 4.7). W bazie danych przechowywane są m.in. wyniki radiowych pomiarów odległości. Ponieważ użytkownik systemu oczekuje informacji o współrzędnych poszczególnych MIO, serwer każdorazowo, podczas udostępniania danych do wizualizacji, wyznacza te współrzędne na podstawie zgromadzonych wyników radiowych pomiarów odległości. Dzięki takiemu podejściu możliwe było wielokrotne przetwarzanie tych samych pomiarów odległości zarejestrowanych w środowiskach testowych, co znacząco ułatwiło prowadzenie



Rys. 4.6. Prototypowa wersja głównej stacji nadzoru GSN z podłączonym węzłem PWR



Rys. 4.7. Tablet przemysłowy jako komputer do wizualizacji położenia obiektów

badań nad algorytmami wyznaczania położenia obiektów. Autorka niniejszej rozprawy wykonała m.in. oprogramowanie serwera GSN realizujące wyznaczanie położenia obiektów, a także przygotowała bazę danych MySQL przechowującą dane pomiarowe oraz systemowe sieci SALOn.

Rozdział 5.

Opis sposobu prowadzenia badań oraz narzędzi programowych

Przeprowadzone badania zrealizowano w dwóch etapach. Pierwszym etapem było wykonanie radiowych pomiarów odległości w wybranych środowiskach, które w drugim etapie zostały użyte do opracowania i zbadania algorytmu wyznaczania położenia obiektów wewnątrz budynków. Badania w drugim etapie zostały wykonane z użyciem autorskiego oprogramowania opisanego w drugiej części niniejszego rozdziału.

5.1. Radiowe pomiary odległości

Radiowe pomiary odległości zostały zrealizowane z użyciem systemu SALOn opisanego w rozdziale 4. Przygotowanie tego systemu do pracy wymagało odpowiedniego rozmieszczenia węzłów referencyjnych PWR. Współrzędne położenia węzłów były określane w kartezjańskim układzie współrzędnych, będącym lokalnym układem dla danego obiektu. Wyznaczanie współrzędnych odbywało się z użyciem dalmierza laserowego Leica Disto D8 lub, gdy użycie dalmierza było niemożliwe (duże nasłonecznienie, zbyt duże odległości), korzystano z przymiaru wstęgowego. W celu przeprowadzenia pomiarów rozstawiano także moduły identyfikacji osobistej MIO. Współrzędne tych urządzeń były określane analogicznie jak węzłów PWR.

Pomiary przeprowadzono:

- w nowym gmachu Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej,
- w starym gmachu Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej,
- w niezamieszkanym jednopiętrowym domu jednorodzinnym,
- w zamieszkanym jednopiętrowym domu jednorodzinnym,
- oraz dla celów porównawczych w terenie otwartym.

W każdym z wymienionych miejsc zrealizowano od kilku do kilkunastu serii pomiarowych. W każdej z nich konfiguracja systemu SALOn (czyli rozstawienie urządzeń w przestrzeni) była inna. Dokładne opisy serii pomiarowych (przestrzeni, w której były one realizowane oraz współrzędne urządzeń MIO i PWR) znajdują się w rozdziale 6 przy okazji omawiania badań, do których pomiary z danej serii zostały użyte oraz w załączniku A. Omawiając wyniki badań rozróżniono dwa pojęcia:

- zbiór pomiarów odległości – pojęcie używane do określenia wszystkich pomiarów odległości zrealizowanych dla wszystkich chwil czasu w danej serii;
- zestaw pomiarów odległości – pojęcie używane do określenia pomiarów odległości, zrealizowanych w przybliżeniu w tym samym czasie pomiędzy konkretnym (jednym) MIO i dostępnymi węzłami PWR. Pomiary te pozwalają wyznaczyć położenie danego MIO w danej chwili.

5.2. Oprogramowanie

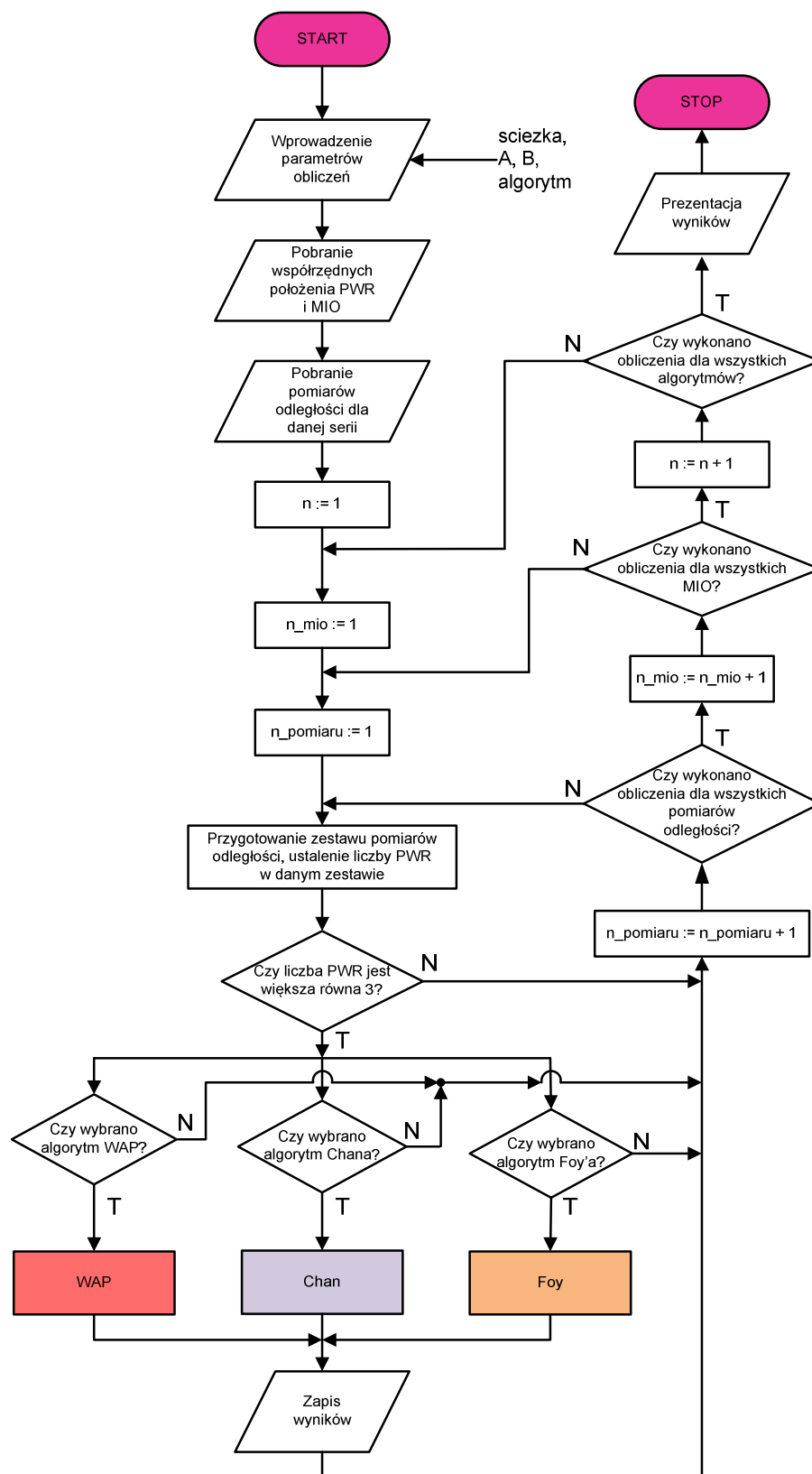
Programy użyte do badań i analiz efektywności radiolokalizowania obiektów wewnątrz budynków zostały opracowane w uniwersalnym środowisku obliczeń matematycznych Matlab. Zostało ono wybrane ze względu na szybkość tworzenia kodu, prostotę tworzenia graficznej prezentacji wyników oraz bogate zasoby funkcji służące do takiej prezentacji.

W toku prowadzonych prac powstało wiele programów pomocniczych do obróbki danych. W kolejnych podrozdziałach zostały omówione trzy programy, które zostały bezpośrednio użyte do przygotowania niniejszej rozprawy. Programy te są prezentowane w postaci schematów blokowych.

5.2.1. Porównywanie algorytmów

Opisywany w tym podrozdziale program służy do realizacji obliczeń, które następnie pozwolą porównać efektywność wybranych algorytmów. Schemat blokowy tego programu pokazano na rys. 5.1. Przed uruchomieniem programu należy podać dane wejściowe. Są to:

- `sciezka` – czyli ścieżka do folderu, w którym znajdują się pliki z pomiarami,
- `A`, `B` – współczynniki kierunkowe półprostych tworzących funkcję błędu,



Rys. 5.1. Schemat blokowy programu służącego do wyznaczania estymat położenia obiektów trzema algorytmami: WAP, Chana oraz Foy'a

- `algorytm` – tablica z numerami symbolizującymi algorytmy, które mają zostać użyte do wyznaczania położenia obiektów.

Gdy powyższe dane są dostępne, możliwe jest odczytanie współrzędnych węzłów PWR oraz modułów MIO, a także wszystkich zgromadzonych dla danej serii radiowych pomiarów odległości wraz z wartościami wysokości urządzeń w każdej chwili pomiarowej. Następnie inicjowane są liczniki, potrzebne do ustalenia czy zrealizowane są wszystkie obliczenia:

- `n` – określa indeks tablicy `algorytm`, w którym zapisany jest numer określający algorytm wyznaczania położenia obiektu,
- `n_mio` – określa numer porządkowy modułu MIO,
- `n_pomiaru` – określa numer porządkowy danej chwili pomiarowej.

Dalej następuje przygotowanie zestawu radiowych pomiarów odległości oraz współrzędnych węzłów biorących udział w tych pomiarach do przekazania ich do funkcji realizujących algorytmy wyznaczania położenia obiektów. Zależnie od wartości wpisanej w danej pozycji tablicy `algorytm` wywoływana jest odpowiednia funkcja. Ponieważ implementacja tych funkcji jest bardzo ważna dla prowadzonych badań, dlatego też zostały one omówione w dalszej części tego rozdziału. W przypadku gdy liczba węzłów referencyjnych biorących udział w radiowych pomiarach odległości dla danego zestawu jest mniejsza niż 3, pomijany jest etap wyznaczania położenia obiektów.

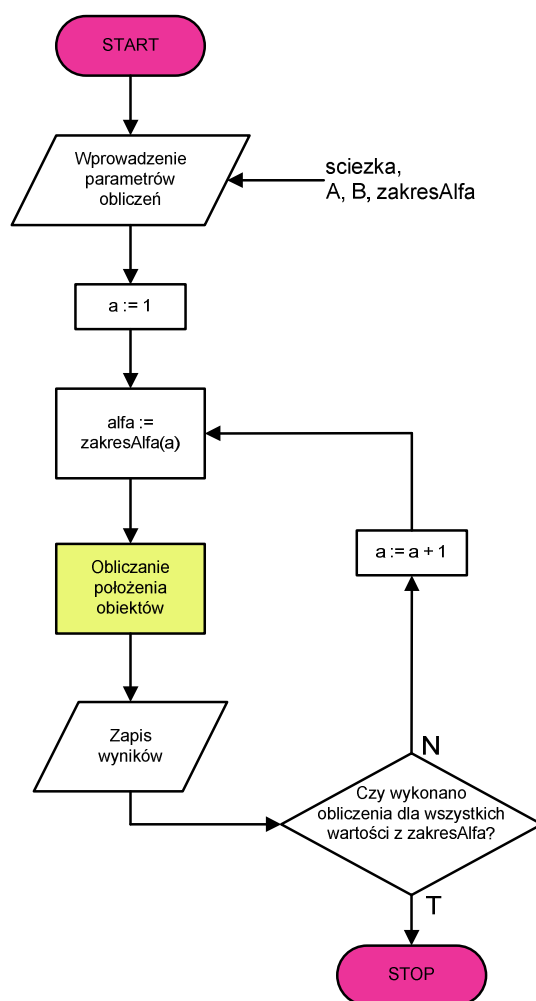
Po zrealizowaniu wyznaczania współrzędnych położenia obiektów uzyskane rezultaty zapisywane są do odpowiednich zmiennych oraz do plików tekstowych. Następnie zwiększany jest licznik `n_pomiaru` i następuje sprawdzenie, czy obliczenia wykonano dla wszystkich chwil czasu. Jeśli nie, kontynuowane są obliczenia. Jeśli tak, zwiększany jest licznik `n_mio` i następuje sprawdzenie, czy obliczenia przeprowadzono dla wszystkich MIO biorących udział w pomiarach w danej serii. Jeśli nie, kontynuowane są obliczenia po uprzednim ponownym zainicjowaniu licznika `n_pomiaru`. Jeśli tak, zwiększany jest licznik `n` i realizowane jest sprawdzenie, czy każdy ze zdefiniowanych przez użytkownika algorytmów został uruchomiony dla danej serii. Jeśli nie, kontynuowana jest praca programu po uprzedniej inicjalizacji liczników `n_mio` i `n_pomiaru`. Jeśli tak, następuje prezentacja wyników i zakończenie pracy programu.

5.2.2. Badanie zbieżności

Celem przeprowadzenia badania zbieżności nowego wewnątrzbudynkowego algorytmu wyznaczania położenia obiektów WAP przygotowano oprogramowanie, którego schemat blokowy pokazano na rys. 5.2.

Przed uruchomieniem programu użytkownik powinien podać:

- *sciezka* – ścieżkę do folderu, w którym znajdują się zgromadzone radiowe pomiary odległości dla danej serii,
- *zakresAlfa* – tablica ze zbiorem wartości α , dla których mają być zrealizowane obliczenia,
- *A* – wartość współczynnika kierunkowego *A*,
- *B* – wartość współczynnika kierunkowego *B*.



Rys. 5.2. Schemat blokowy programu służącego do badania zbieżności algorytmu WAP

Dalej inicjalizowany jest licznik a , za pomocą którego ocenia się, czy program zrealizował obliczenia dla wszystkich wartości α z danego zakresu. Ponadto parametr ten wskazuje numer indeksu w tablicy `zakresAlfa`, definiując tym samym wartość współczynnika α dla bieżących obliczeń. Gdy wartość `alfa` jest ustalona, wykonywane są obliczenia położenia obiektów. Są one realizowane według schematu z rys. 5.1, przy czym wyznaczanie położenia obiektów jest przeprowadzane z użyciem tylko algorytmu WAP. Rezultaty wyznaczania współrzędnych położenia są zapisywane w odpowiednich zmiennych oraz w plikach tekstowych. Dodatkowo zmieniona jest funkcja implementująca algorytm WAP, tak by po każdej iteracji zapisywane były wyznaczone korekty współrzędnych oraz nowo określone współrzędne położenia obiektu. Ponadto, nie ma w tej implementacji sprawdzania warunku końca działania algorytmu. Dzięki temu możliwa jest ocena wpływu liczby iteracji na efektywność pracy proponowanego algorytmu.

W kolejnym kroku sprawdzane jest, czy obliczenia wykonano dla wszystkich wartości z tablicy `zakresAlfa`. Jeśli nie, zwiększany jest licznik a i kontynuowana jest praca programu. W przeciwnym razie następuje koniec obliczeń.

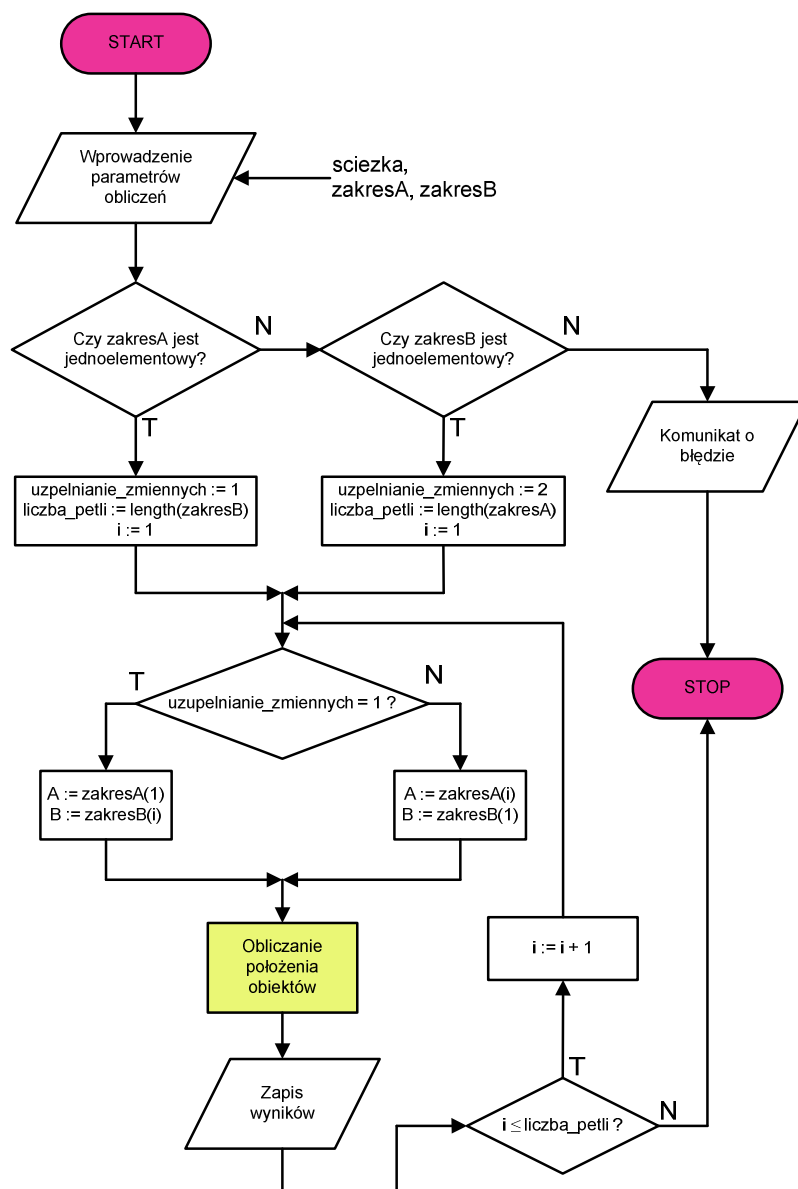
5.2.3. *Badanie wpływu nachylenia półprostych tworzących funkcję błędu*

Do badania wpływu wartości współczynników kierunkowych półprostych tworzących funkcję błędu na efektywność nowego wewnątrzbudynkowego algorytmu wyznaczania położenia obiektów służy program, którego schemat działania został pokazany na rys. 5.3.

Na początku, przed wywołaniem programu, należy uzupełnić wartości parametrów wejściowych:

- `sciezka` – określa ścieżkę folderu, w którym znajdują się wyniki radiowych pomiarów odległości,
- `zakresA` - tablica ze zbiorem wartości współczynnika A , dla których mają być zrealizowane obliczenia,
- `zakresB` - tablica ze zbiorem wartości współczynnika B , dla których mają być zrealizowane obliczenia.

Badanie wpływu nachylenia półprostych tworzących funkcję błędu na efektywność proponowanego algorytmu przeprowadzono zmieniając wartość jednego współ-



Rys. 5.3. Schemat blokowy programu służącego do badania wpływu nachylenia półprostych tworzących funkcję błędu na efektywność algorytmu WAP

czynnika kierunkowego, natomiast wartość drugiego pozostawała bez zmian. Dlatego też, program został tak przygotowany, by jedna z tablic `zakresA` lub `zakresB` była jednoelementowa. Po uruchomieniu programu sprawdzane jest poprawne uzupełnienie parametrów wejściowych. Jeśli dane wejściowe zostały uzupełnione poprawnie (przynajmniej jedna z tablic jest jednoelementowa) określany jest sposób uzupełniania wartości zmiennych `A` i `B` przekazywanych do funkcji z zaimplementowanym algorytmem WAP oraz inicjalizowany jest licznik `i`. Gdy tablica `zakresA` jest jednoelementowa wówczas zmienna `i`, będzie wskazywała kolejne pozycje w tablicy `zakresB`. W przeciwnym razie będzie wskazywała na pozycje w tablicy `zakresA`. Po uzupełnieniu zmiennych `A` i `B` wy-

konywane są obliczenia położenia obiektów zgodnie ze schematem z rys. 5.1. Wybrany algorytm do wyznaczania współrzędnych położenia obiektów jest algorytm WAP. Uzyskane rezultaty zapisywane są do odpowiednich zmiennych oraz do plików tekstowych. Następuje sprawdzenie, czy obliczenia wykonano dla wszystkich wartości współczynników kierunkowych z wieloelementowej tablicy. Jeśli nie, obliczenia są kontynuowane po ponownym uzupełnieniu zmiennych A i B. Jeśli tak, następuje zakończenie pracy programu.

5.2.4. Implementacja nowego wewnątrzbudynkowego algorytmu wyznaczania położenia obiektów

Najważniejszym elementem przygotowanych programów jest implementacja wewnątrzbudynkowego algorytmu wyznaczania położenia obiektów WAP. Schemat blokowy funkcji realizującej ten algorytm pokazano na rys. 5.4. Argumentami wejściowymi funkcji są:

- *poz_ref* – tablica zawierająca w każdym wierszu współrzędne stacji referencyjnych (x, y, z) oraz zmierzoną odległość pomiędzy danym MIO i tą stacją referencyjną,
- *poz_poczatkowa* – tablica zawierająca współrzędne używane w pierwszym kroku iteracji,
- *wysokosc* – bezwzględna wysokość MIO, wyznaczona poprzez pomiar ciśnienia atmosferycznego.

W przygotowanych programach współrzędne pozycji początkowej są wyznaczone jako średnie odpowiednich współrzędnych węzłów PWR biorących udział w pomiarach odległości. Wysokość modułów MIO oraz współrzędne z stacji referencyjnych muszą być znane, aby rzutować radiowe pomiary odległości na płaszczyznę. Rzutowanie jest realizowane z użyciem zależności geometrycznej

$$R_{2Di} = \sqrt{R_{3Di}^2 - (\text{wysokosc} - z_i)^2}, \quad (5.1)$$

gdzie:

- R_{2Di} - wartość odległości do i -tej stacji referencyjnej po rzutowaniu na płaszczyznę,
- R_{3Di} – zmierzona wartość odległości do i -tej stacji referencyjnej,

- *wysokosc* – wysokość danego modułu MIO,
- z_i – współrzędna z i -tej stacji referencyjnej.

Rzutowanie to jest niezbędne, ponieważ przygotowana funkcja realizuje obliczenia w trybie dwuwymiarowym. Takie rozwiązanie zostało przyjęte ze względu na sposób rozstawiania węzłów PWR systemu SALOn – węzły te mogą znajdować się na jednako-
wej wysokości. Nowe wartości odległości są, wraz ze współrzędnymi węzłów PWR, przepisywane do tablicy `poz_ref_new`. Następuje sprawdzenie, czy liczba stacji referen-
cyjnych wynosi przynajmniej 3. Sprawdzenie to wewnątrz funkcji jest konieczne ponie-
waż, przy dużych błędach pomiarów odległości rzutowanie ich na płaszczyznę może oka-
zać się niemożliwe. Jeśli liczba stacji referencyjnych jest mniejsza niż 3 do zmiennej wyj-
ściowej `sukces` jest podawane 0 i następuje wyjście z funkcji. W przeciwnym wypadku
kontynuowane są obliczenia. Parametry iteracji są określone przez wartości następują-
cych zmiennych:

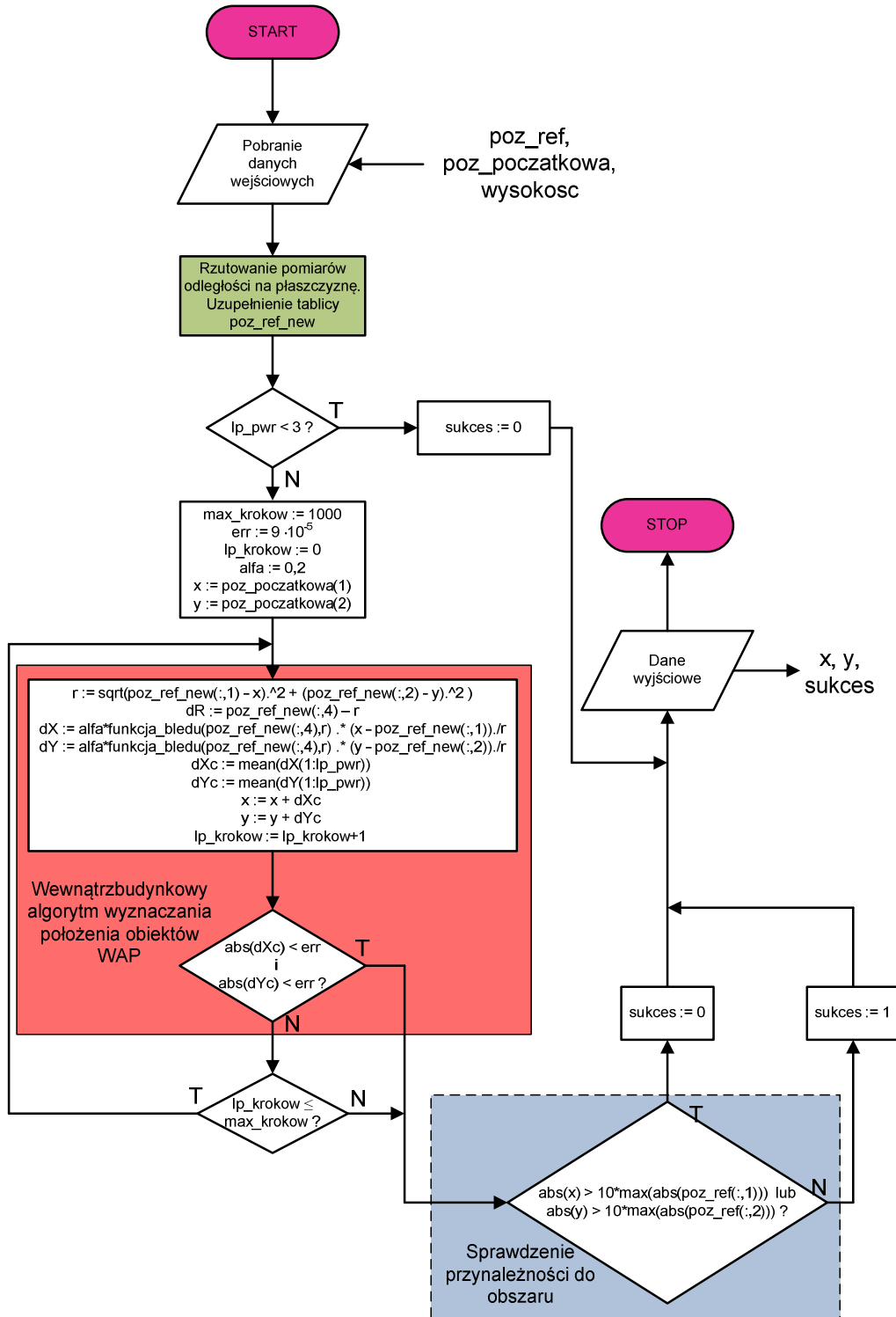
- `max_krokov` – maksymalna liczba kroków iteracji. Zostanie ona wykonana, gdy
nie będzie można osiągnąć warunku końca,
- `err` – w tej zmiennej zapisana jest wartość progowa, określająca warunek końca
działania algorytmu WAP. Warunek końca jest spełniony gdy korekty obu współ-
rzędnych są mniejsze od wartości zapisanej w `err`,
- `lp_krokov` – licznik zrealizowanych iteracji, na początku przyjmuje wartość 0,
- `alfa` – zmienna, w której zapisana jest wartość α ,
- `A`, `B` – zmienne, w których zapisane są wartości współczynników kierunkowych
półprostych tworzących funkcję błędu,
- `x`, `y` – estymowane współrzędne. W pierwszej iteracji przyjmują wartości po-
czątkowe z tablicy `poz_poczatkowa`.

Dalej realizowane są obliczenia opisane w podrozdziale 3.2, a na rys. 5.4 ozna-
czone kolorem czerwonym. Funkcja błędu jest zdefiniowana w następujący sposób:

```
function y = funkcja_bledu(m,r)
% m - tablica pomiarów odległości
% r - tablica estymat odległości
global A B
y(1:length(m),1) = 0;
for n = 1:length(m)
    if( m(n) - r(n) > 0)
```

```

y(n) = A*(m(n) - r(n));
else
y(n) = B*(m(n) - r(n));
end
end
end
    
```



Rys. 5.4. Schemat blokowy funkcji implementującej nowy wewnętrzny algorytm wyznaczania położenia obiektów WAP

Po każdej iteracji sprawdzane jest, czy obie wartości bezwzględne wyznaczonych korekt współrzędnych są mniejsze niż zadana wartość progowa ϵ_{err} . Jeśli nie, tak zdefiniowany warunek końca nie jest spełniony i obliczenia są kontynuowane. W przeciwnym przypadku, obliczenia są kończone i realizowane jest sprawdzenie przynależności współrzędnych wynikowych do określonego obszaru. Obszar jest zdefiniowany na podstawie współrzędnych stacji referencyjnych. Zakłada się, że pomiary nie mogą być realizowane w większej odległości od stacji referencyjnych niż dziesięciokrotna wartość ich współrzędnych (patrz warunek w niebieskim polu na rys. 5.4). Takie założenia można było poczynić, ponieważ wszystkie współrzędne są w funkcji normalizowane względem pierwszej stacji referencyjnej. Dzięki temu wartości współrzędnych używane podczas obliczeń są niewielkie i wynikają z odległości pomiędzy stacjami. W rozdziale 6 tak zdefiniowany obszar jest określany mianem „obszaru zainteresowania”. Gdy wyznaczone estymaty mieszczą się w tym obszarze wówczas do zmiennej $sukces$ wpisywana jest wartość 1. W przeciwnym razie uzupełniana jest ona wartością 0.

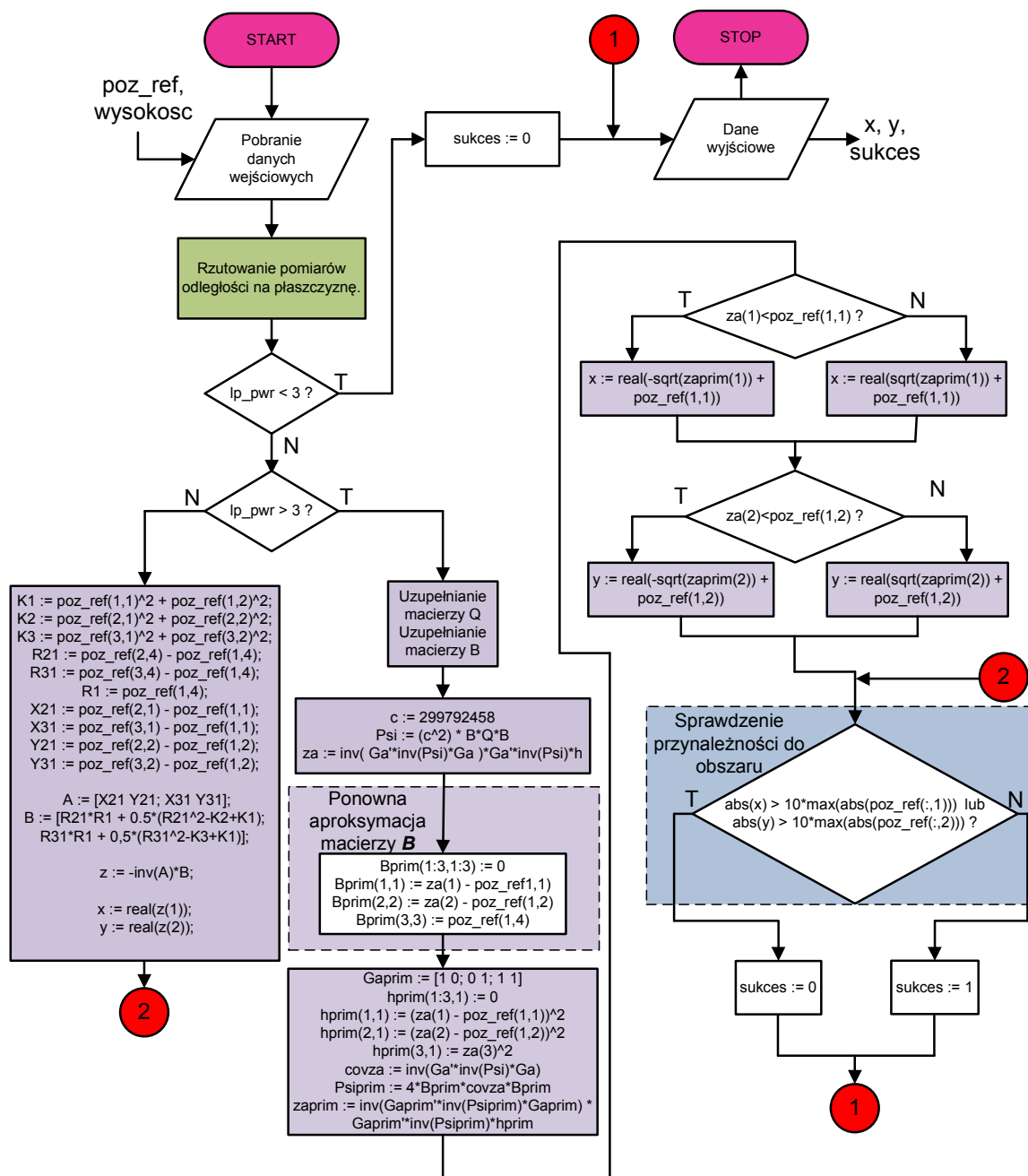
5.2.5. Implementacja algorytmu Chana

Algorytm Chana został zaimplementowany w postaci funkcji o schemacie blokowym pokazanym na rys. 5.5. Argumentami wejściowymi są:

- poz_ref - tablica zawierająca w każdym wierszu współrzędne stacji referencyjnych (x, y, z) oraz zmierzoną odległość pomiędzy danym MIO i tą stacją referencyjną,
- $wysokosc$ – bezwzględna wysokość MIO wyznaczona poprzez pomiar ciśnienia atmosferycznego.

Po pobraniu argumentów wejściowych realizowane jest rzutowanie pomiarów na płaszczyznę, analogicznie jak w algorytmie WAP. Następnie sprawdzana jest liczba stacji referencyjnych, biorących udział w pomiarach odległości. Jeśli jest mniejsza niż 3, kończone jest działanie funkcji z parametrem wyjściowym $sukces = 0$. W przeciwnym razie wykonywane są działania opisane w podrozdziale 3.1.1, na schemacie oznaczone kolorem fioletowym. Dla trzech stacji referencyjnych stosowane są zależności z podrozdziału 3.1.1.1, dla większej liczby tych stacji zależności z podrozdziału 3.1.1.2. Współrzędne wynikowe są określane zależnie od wzajemnej relacji odpowiednich elementów wektora z_a i tablicy poz_ref . Zależność ta została omówiona w podrozdziale 3.1.1.2. Dalej na-

stępuje sprawdzenie przynależności wyników do obszaru, w sposób opisany w podrozdziale 5.2.4. Jeśli estymowane współrzędne znajdują się w obszarze zainteresowania funkcja zwraca parametr sukces = 1. W przeciwnym przypadku sukces jest równy zero.

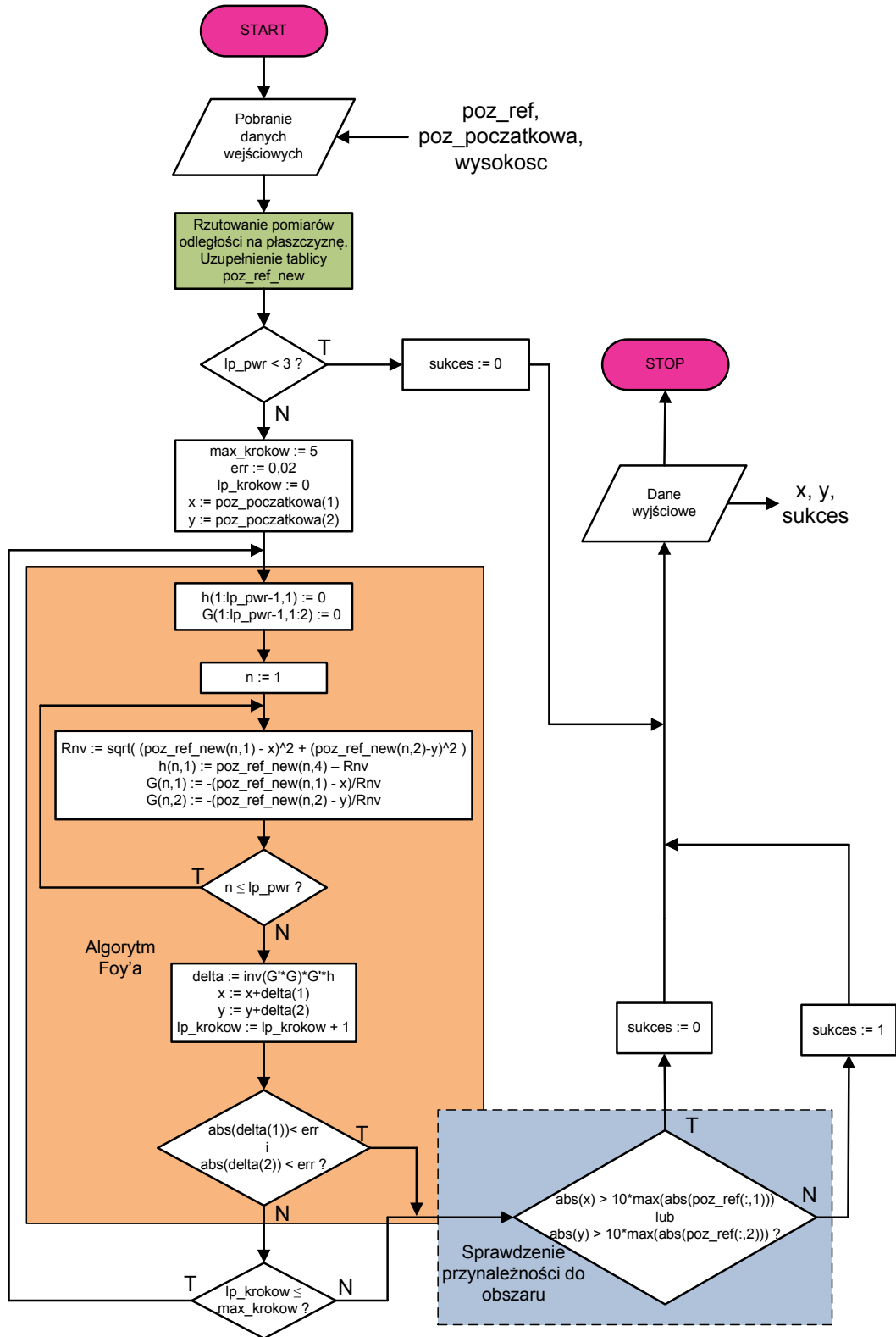


Rys. 5.5. Schemat blokowy funkcji implementującej algorytm Chana

5.2.6. Implementacja algorytmu Foy'a

Algorytm Foy'a został zaimplementowany w funkcji, której schemat blokowy pokazano na rys. 5.6. Argumentami wejściowymi tej funkcji są:

- `poz_ref` – tablica zawierająca w każdym wierszu współrzędne stacji referencyjnych (x, y, z) oraz zmierzoną odległość pomiędzy danym MIO i tą stacją referencyjną,



Rys. 5.6. Schemat blokowy funkcji implementującej algorytm Foy'a

- `poz_początkowa` – tablica zawierająca współrzędne używane w pierwszym kroku iteracji,
- `wysokosc` – bezwzględna wysokość MIO, wyznaczona poprzez pomiar ciśnienia atmosferycznego.

Analogicznie jak w przypadku algorytmu WAP również dla algorytmu Foy'a współrzędne pozycji początkowej są wyznaczone jako wartości średnie odpowiednich współrzędnych stacji PWR biorących udział w pomiarach odległości.

Po pobraniu argumentów wejściowych przeprowadzane jest rzutowanie pomiarów odległości na płaszczyznę. Dalej sprawdzana jest liczba stacji referencyjnych biorących udział w pomiarze. Jeśli jest mniejsza niż 3, kończony jest działaniem funkcji, a parametr `sukces` przyjmuje wartość 0. W przeciwnym przypadku kontynuowane są obliczenia. Parametry iteracji określają wartości zmiennych:

- `max_krokov` – maksymalna liczba kroków iteracji. Zostanie ona wykonana, gdy nie będzie można osiągnąć warunku końca,
- `err` – w tej zmiennej zapisana jest wartość progowa, określająca warunek końca działania algorytmu,
- `lp_krokov` – licznik zrealizowanych iteracji, na początku musi przyjąć wartość 0,
- `x`, `y` – estymowane współrzędne. Muszą mieć w pierwszej iteracji przypisane wartości początkowe z tablicy `poz_początkowa`.

Następnie, iteracyjnie realizowane są operacje opisane w rozdziale 3.1.2.2, a na rys. 5.6 oznaczone kolorem pomarańczowym. Po spełnieniu warunku końca, zdefiniowanego analogicznie jak dla algorytmu WAP, obliczenia są przerywane i następuje sprawdzenie, czy wyznaczona estymata położenia znajduje się w obszarze zainteresowania. Gdy warunek końca nie jest spełniony, zwiększany jest licznik `lp_krokov` aż do osiągnięcia przez niego wartości `max_krokov` lub spełnienia warunku końca. Wówczas również obliczenia są kończone i sprawdzana jest przynależność wyznaczonej estymaty do obszaru zainteresowania. Gdy wyznaczony punkt zawiera się w tym obszarze, w zmiennej `sukces` wpisywana jest wartość 1, w przeciwnym przypadku wartość 0.

Rozdział 6.

Wyniki badań na rzeczywistych pomiarach odległości

Zaproponowany w podrozdziale 3.2 algorytm stanowi propozycję rozwiązania problemu zwiększenia dokładności estymacji położenia obiektów wewnątrz budynków, poprzez uwzględnienie wybranych właściwości środowiska propagacji fal radiowych. Radiowe pomiary odległości realizowane w środowisku wewnątrzbudynkowym są zazwyczaj zawyżone – właśnie ta właściwość tego środowiska została uwzględniona przy projektowaniu wewnątrzbudynkowego algorytmu wyznaczania położenia WAP. W algorytmie tym, przez zmianę wartości współczynników kierunkowych półprostych tworzących funkcję błędu (A i B), dostosowuje się go do warunków danego środowiska. Problem sposobu dobrania wartości tych parametrów został rozpatrzony i opisany w podrozdziale 6.2. Zanim jednak można było przeprowadzić badanie wpływu tych współczynników kierunkowych na efektywność algorytmu WAP, należało sprawdzić czy algorytm ten jest zbieżny. W tym celu wykonano badania omówione w podrozdziale 6.1, podczas których analizowano wpływ parametru α na efektywność działania algorytmu WAP.

6.1. Analizowanie zbieżności algorytmu WAP

Opisany w podrozdziale 3.2 proponowany algorytm jest iteracyjny. Oznacza to, że z każdą iteracją wyznaczana estymata położenia obiektu będzie bliższa położeniu, które zminimalizuje wartość średnią błędów $R - r$ dla zestawu pomiarów odległości. Przedstawione w niniejszym podrozdziale badania mają dowiedzieć, że proponowany algorytm WAP jest zbieżny, czyli uzyskiwane jest rozwiązanie, które nie ulega zmianie mimo zwiększania liczby iteracji. W tym celu zmieniano wartość parametru α i obserwowano jego wpływ na zbieżność algorytmu. Analizę zbieżności przeprowadzono dla kilku wybranych przypadków charakterystycznych dla różnych środowisk:

- węzły MIO oraz PWR rozstawione na trawniku w terenie otwartym, tak by uniknąć wpływu zjawiska wielodrogowości na realizowane radiowe pomiary odległości (dalej ten przypadek będzie określany jako pomiar w terenie otwartym),
- węzły MIO oraz PWR rozstawione wewnątrz budynku,
- węzły PWR znajdują się na zewnątrz budynku, w którym rozmieszczono moduły MIO.

Każdy z tych przypadków został omówiony w osobnym podrozdziale. Dla każdego przypadku przyjęto, że współczynniki kierunkowe półprostych w funkcji błędu wynoszą $A = 1$, $B = 10$, chyba że w tekście napisano inaczej. Dobór wartości tych współczynników został opisany w podrozdziale 6.2.

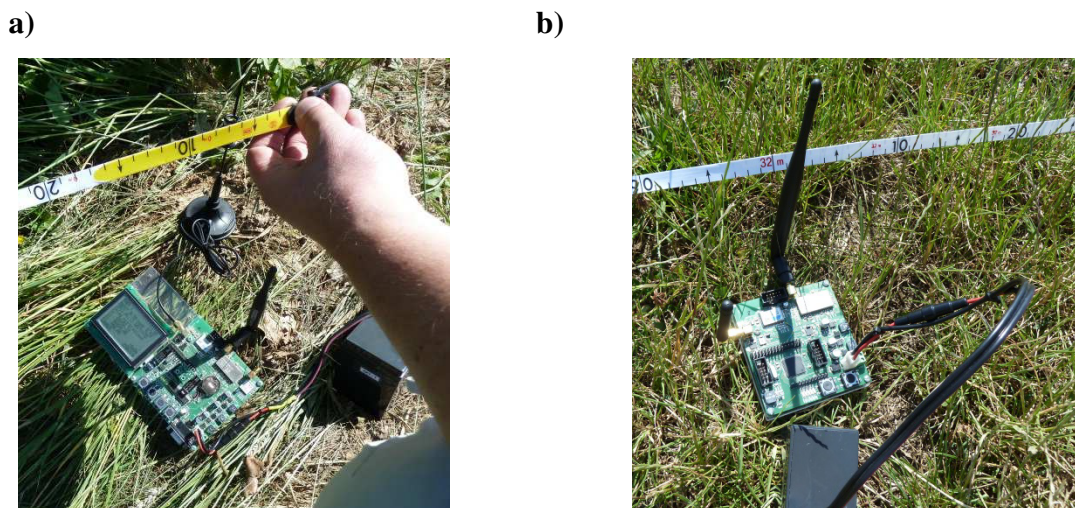
6.1.1. Urządzenia rozstawione w terenie otwartym

Pomiary odległości użyte w niniejszej analizie zrealizowano na łące (rys. 6.1). Trawa była skoszona, więc nie mogła stanowić istotnej przeszkody propagacyjnej. Wszystkie urządzenia leżały bezpośrednio na trawie (rys. 6.2) i można przyjąć, że na tej samej wysokości (w jednej płaszczyźnie). Współrzędne węzłów referencyjnych podano w tab. 6.1. Współrzędne rozpatrywanego modułu MIO 4 wynosiły (5,73 m; 12,17 m). Na rys. 6.3 zamieszczono histogram błędów pomiarów odległości dla wybranego MIO



Rys. 6.1. Obszar rozstawienia systemu SALOn

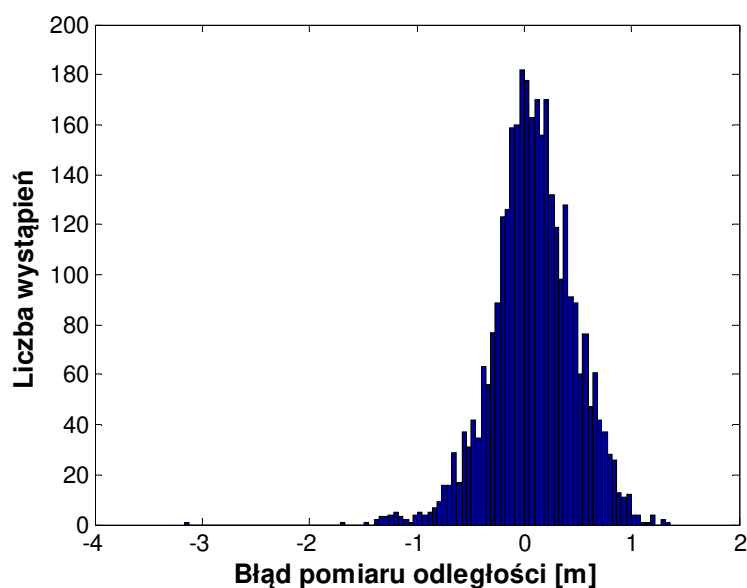
narysowany na podstawie 3242 pomiarów. Rozkład ten można przybliżyć rozkładem gaussowskim o wartości średniej 0,08 m i odchyleniu standardowym 0,38 m. Wartość średnia bliska zero wskazuje na brak propagacji wielodrogowej w tym przypadku.



Rys. 6.2. Zdjęcia wybranych urządzeń rozstawionych na łące: a) węzeł PWR, b) moduł MIO

Tab. 6.1. Współrzędne stacji referencyjnych PWR w terenie otwartym

Numer PWR	Współrzędna x [m]	Współrzędna y [m]
65	50,30	0,00
66	0,00	0,00
69	30,53	50,25



Rys. 6.3. Rozkład błędów rzeczywistych pomiarów odległości dla MIO 4 na łące

W celu zbadania zbieżności wewnątrzbudynkowego algorytmu wyznaczania położenia obiektów dla każdego zestawu pomiarów odległości współrzędne położenia obiektu estymowano w 1000 krokach. Do późniejszej analizy dla każdej iteracji zapisywano wartości ΔX_c i ΔY_c (korekty współrzędnych, dokładnie opisane w podrozdziale 3.2) oraz bieżące estymaty współrzędnych położenia obiektu. Obliczenia wykonano dla kilku różnych wartości parametru α . W tab. 6.2 zamieszczono wyniki analiz. Dokładność RMSE wyznaczano ze wzoru (6.1), a precyzję RMSE ze wzoru (6.2):

$$\Delta R_D = \sqrt{\frac{1}{N \cdot K} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N ((x_{ki} - X_{MIOk})^2 + (y_{ki} - Y_{MIOk})^2)}, \quad (6.1)$$

$$\Delta R_P = \sqrt{\frac{1}{N \cdot K} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N ((x_{ki} - \bar{x}_k)^2 + (y_{ki} - \bar{y}_k)^2)}, \quad (6.2)$$

gdzie:

- N – liczba estymat współrzędnych położenia obiektu w danym punkcie (chwil pomiarowych),
- K – liczba punktów pomiarowych,
- x_{ki}, y_{ki} – współrzędne i -tej estymaty położenia obiektu w k -tym punkcie,
- X_{MIOk}, Y_{MIOk} – rzeczywiste współrzędne położenia obiektu w k -tym punkcie,
- \bar{x}_k, \bar{y}_k – średnie wartości estymat odpowiednio współrzędnej x i y w k -tym punkcie.

Błędy dokładności oraz precyzji zamieszczone w tabeli zostały wyznaczone dla danych po 1000 iteracji.

Tab. 6.2. Analiza zbieżności algorytmu WAP w terenie otwartym

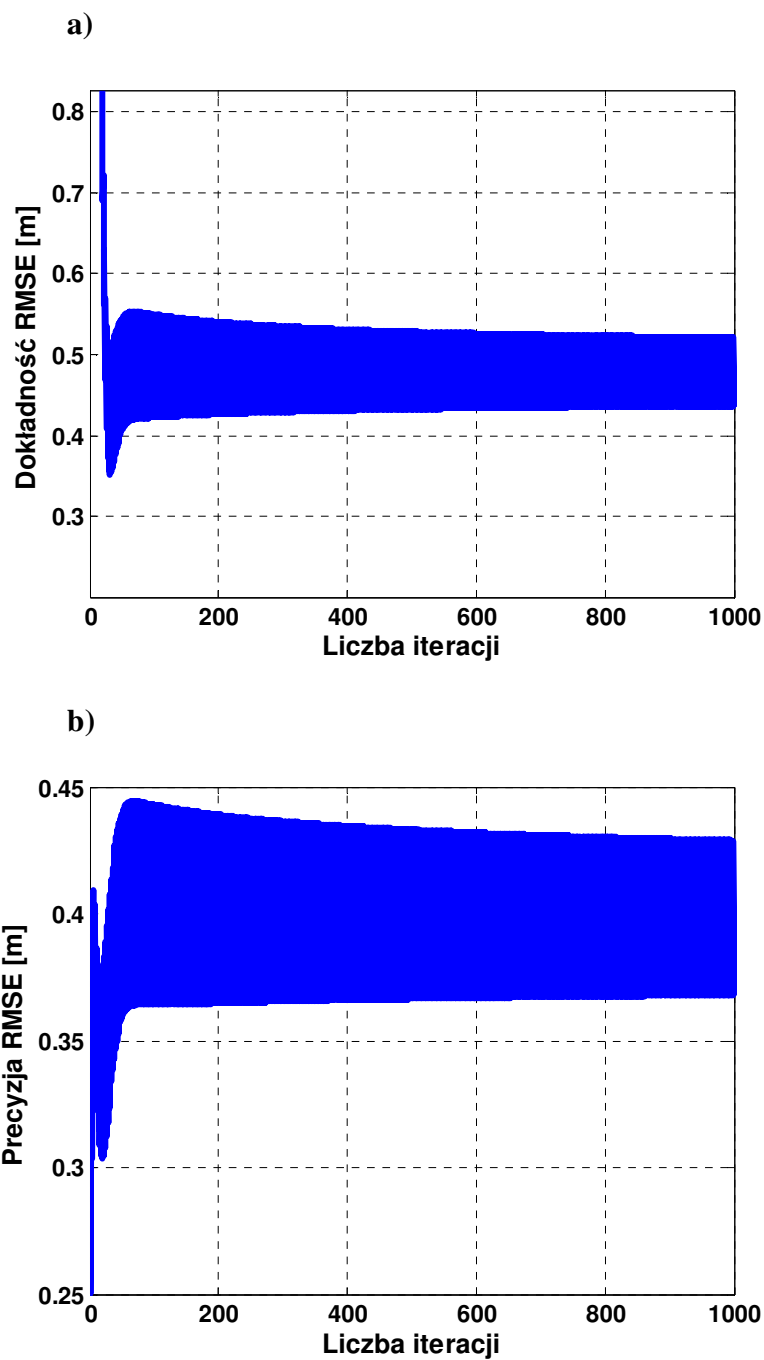
α	Dokładność RMSE [m]	Precyzja RMSE [m]	Odsetek przypadków braku zbieżności [%]	Średnia liczba iteracji
0,30	0,43	0,37	36,4	457
0,25	0,46	0,38	0,0	89
0,20	0,46	0,38	0,0	111
0,10	0,46	0,38	0,0	210

Szereg analiz uzyskiwanych wyników pozwolił przyjąć, że jeśli korekty współrzędnych estymowanego położenia obiektu (ΔX_i i ΔY_i) przyjmą wartość mniejszą niż $9 \cdot 10^{-5}$ (wartość zmiennej err w podrozdziale 5.2.4), oznacza to, że zostało znalezione rozwiązanie. Stosując ten sam warunek sprawdzano w ilu przypadkach wartości wspo-

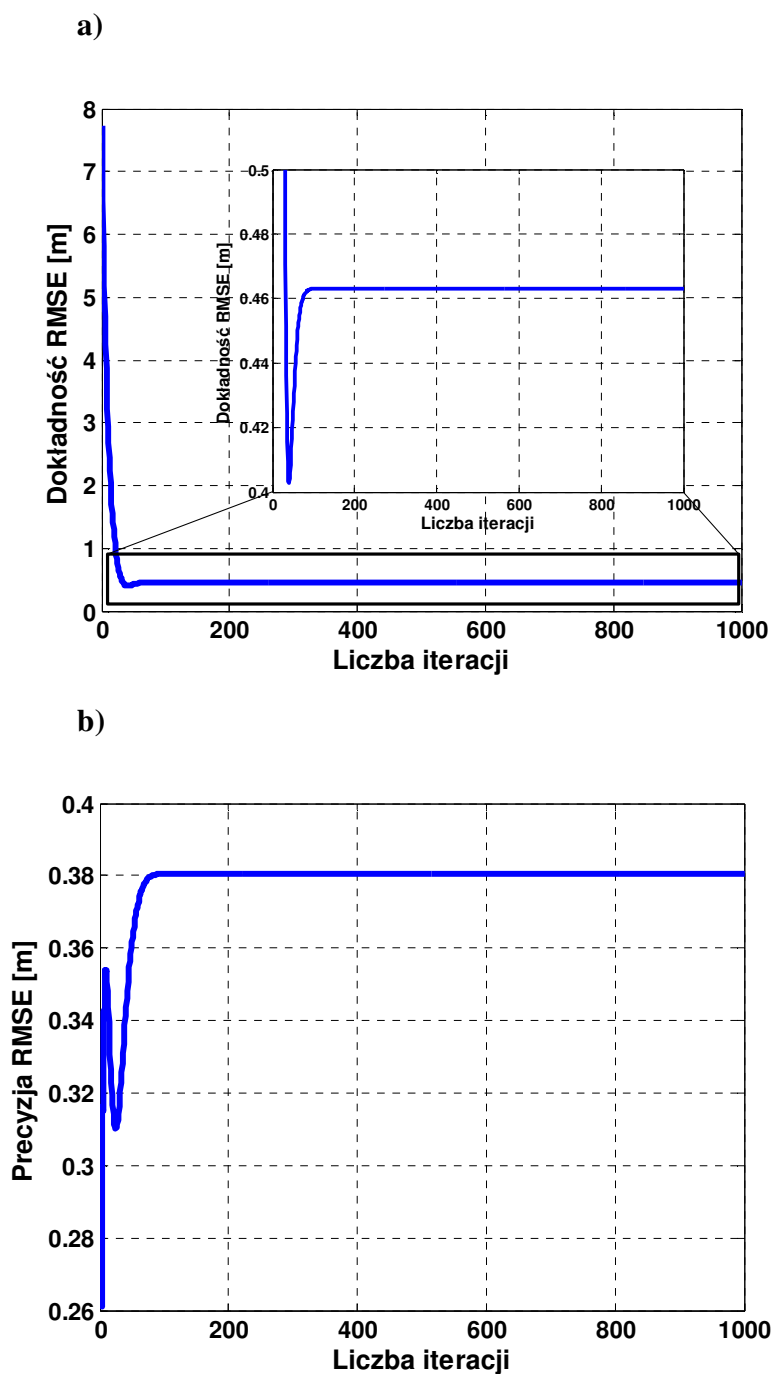
mnianych korekt nie osiągnęły tego progu, mimo wykonania 1000 iteracji. Przypadki takie zostały policzone i zamieszczone w tab. 6.2 w kolumnie „Odsetek przypadków braku zbieżności”. Interesujące jest także, ile iteracji algorytm musi zrealizować, aby osiągnąć warunek końca (znaleźć rozwiązanie). W tym celu szukano liczby iteracji, dla której warunek końca był spełniony dla danego zestawu pomiarów odległości, a następnie wyznaczono wartość średnią tych liczb dla wszystkich zestawów (wyniki zamieszczone w ostatniej kolumnie tab. 6.2). Na rys. 6.4 i 6.5 pokazano wartości dokładności i precyzji względem liczby zrealizowanych iteracji dla zbiorów wyników uzyskanych gdy parametr α wynosił odpowiednio 0,3 i 0,25.

Gdy wartość α jest zbyt duża (rys. 6.4, α w tym przypadku wynosi 0,3) algorytm jest niestabilny, czego objawem jest brak zbieżności (dla niektórych zestawów pomiarów odległości) nawet przy 1000 iteracji. Jednakże nawet dla $\alpha = 0,3$ widoczne jest, że wraz ze wzrostem liczby iteracji zmniejsza się zakres zmian dokładności oraz precyzji – dążą do wartości granicznej. Warto także zauważyć, że zakresy tych zmian dla $\alpha = 0,3$, gdy liczba iteracji jest większa od 50 są nieduże (w granicach 10 cm). Przy zmniejszeniu wartości parametru α o 0,05 algorytm jest w pełni stabilny. Gdy liczba iteracji jest większa niż 89 dla $\alpha = 0,25$ wartości dokładności oraz precyzji już się nie zmieniają wraz ze wzrostem liczby iteracji. Należy przy tym zauważyć, że średnie wartości dokładności oraz precyzji dla parametrów α 0,25 i 0,3 różnią się nieznacznie, jedynie odpowiednio o 3 cm i 1 cm.

Zauważyć także należy, że wartość parametru α nie wpływa jedynie na stabilność algorytmu, ale także na jego zbieżność rozumianą jako czas (który można wyrazić liczbą iteracji przy założeniu, że każda iteracja jest realizowana w jednakowym czasie), w którym zostanie znalezione rozwiązanie (tutaj rozumiane jako osiągnięcie warunku końca działania algorytmu). Wraz ze zmniejszaniem wartości tego parametru zbieżność algorytmu zajdzie z większym prawdopodobieństwem, kosztem zwiększenia liczby niezbędnych iteracji.



Rys. 6.4. Zależność a) dokładności i b) precyzji od liczby iteracji, gdy parametr $\alpha = 0,3$, a stacje PWR i moduły MIO rozstawiono w terenie otwartym



Rys. 6.5. Zależność a) dokładności i b) precyzji od liczby iteracji, gdy parametr $\alpha = 0,25$, a stacje PWR i moduły MIO rozstawiono w terenie otwartym

Porównano także efektywność algorytmów: WAP, Chana oraz Foy'a. W tab. 6.3 zamieszczono wartości dokładności oraz precyzji dla każdego z algorytmów. Ponadto, w ostatniej kolumnie znajduje się prawdopodobieństwo straty. Określa ono z jakim prawdopodobieństwem algorytm nie zwróci wyniku. Algorytm może nie zwrócić wyniku gdy:

- błędy pomiarów odległości są na tyle duże, że nie można zrzutować ich na płaszczyznę 2D (w przypadku prezentowanych pomiarów sytuacja ta nie może mieć

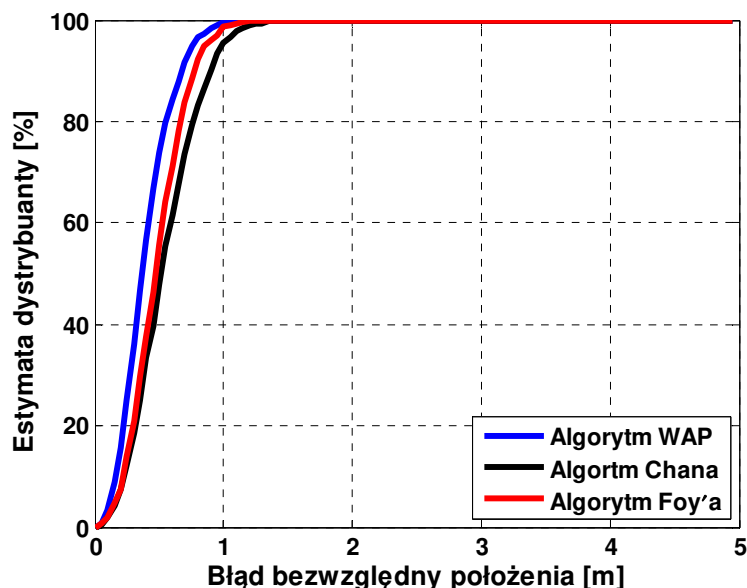
miejsca, ponieważ wszystkie urządzenia były rozmieszczone na jednej płaszczyźnie i rzutowanie nie było realizowane),

- wynikiem działania algorytmu jest liczba urojona,
- wynik obszaru działania algorytmu znajduje się poza obszarem zainteresowania (zdefiniowanym względem współrzędnych stacji referencyjnych).

Tab. 6.3. Porównanie efektywności algorytmów: WAP ($\alpha = 0,2$), Chana oraz Foy'a w terenie otwartym

Algorytm	Dokładność RMSE [m]	Precyzja RMSE [m]	Prawdopodobieństwo straty
WAP	0,46	0,38	0
Chana	0,60	0,36	0
Foy'a	0,54	0,36	0

Na rys. 6.6 zaprezentowano estymaty dystrybuant błędów wyznaczania położenia dla każdego z algorytmów. W przypadku algorytmu WAP zastosowano parametr $\alpha = 0,2$. „Błąd bezwzględny położenia” oznacza odległość pomiędzy rzeczywistym położeniem obiektu, a estymowanym położeniem (podrozdział 3.1.13, zależność (3.24)).



Rys. 6.6. Estymaty dystrybuanty błędów wyznaczania położenia dla algorytmów: WAP ($\alpha = 0,2$), Chana i Foy'a w terenie otwartym

Przedstawione wyniki dowodzą, że w warunkach odpowiadających propagacji w wolnej przestrzeni wartość błędu dokładności dla algorytmu WAP jest mniejsza o 8 cm

względem algorytmu Foy'a i 14 cm względem algorytmu Chana, przy pogorszeniu precyzji o 2 cm względem obu algorytmów.

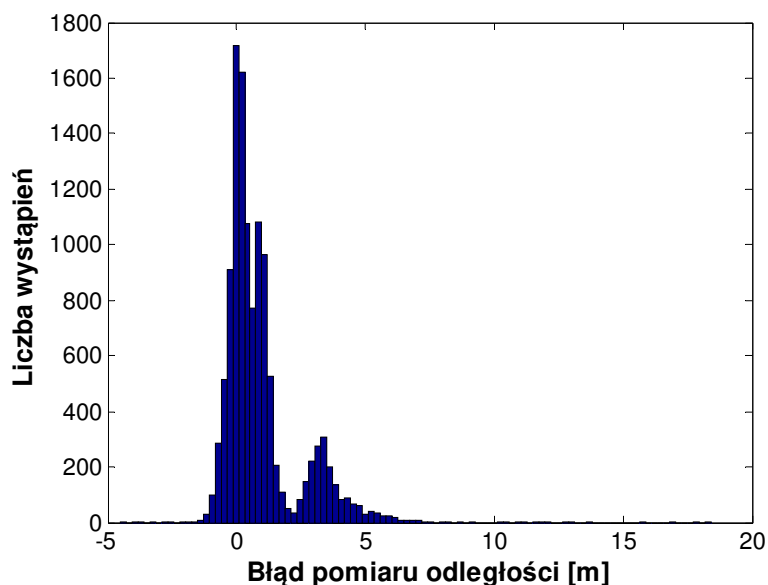
6.1.2. Urządzenia rozstawione wewnątrz budynku

Pomiary użyte do niniejszej analizy zostały wykonane w południowym korytarzu na drugim piętrze nowego gmachu Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej. Wszystkie urządzenia były rozmieszczone wewnątrz tego korytarza. Seria ta w załączniku A jest oznaczona numerem 4. Przestrzeń, w której zrealizowano pomiary została pokazana na zdjęciu z rys. 6.7. Na rys. 6.8 zaprezentowano histogram błędów rzeczywistych radiowych pomiarów odległości narysowany na podstawie 11921 pomiarów. Rozkład ten zdecydowanie odbiega od rozkładu gaussowskiego. Widoczny jest wpływ zjawiska wielodrogowości. Wartość średnia błędów pomiarów odległości dla prezentowanej serii pomiarowej wynosi 0,91 m, natomiast wartości tych błędów mieszczą się w zakresie od -5 m do 19 m – większość tych błędów jest zawyżona względem rzeczywistych odległości pomiędzy urządzeniami.

Współrzędne stacji referencyjnych zostały zamieszczone w tab. 6.4, a współrzędne modułów MIO podczas pomiarów w tab. 6.5.



Rys. 6.7. Przestrzeń, w której rozstawiono system SALOn podczas pomiarów w nowym gmachu Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej



Rys. 6.8. Rozkład błędów rzeczywistych pomiarów odległości zrealizowanych w południowym korytarzu na drugim piętrze nowego gmachu Wydziału ETI

Podobnie jak w poprzednim podrozdziale, w celu zbadania zbieżności algorytmu WAP dla każdego zestawu radiowych pomiarów odległości współrzędne położenia obiektów estymowano w 1000 krokach. Do późniejszej analizy przy każdej iteracji zapisywano wartości ΔX_c i ΔY_c oraz bieżące estymaty współrzędnych położenia obiektu. Obliczenia wykonano dla różnych wartości parametru α . W tab. 6.6 zamieszczono wyniki analiz. Porządek tabeli został przyjęty taki jak w tab. 6.2.

Tab. 6.4. Współrzędne stacji referencyjnych PWR, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku

Numer PWR	Współrzędna x [m]	Współrzędna y [m]
66	4	7
67	8	8
68	16	0
69	0	0
70	12	7

Tab. 6.5. Współrzędne modułów MIO, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku

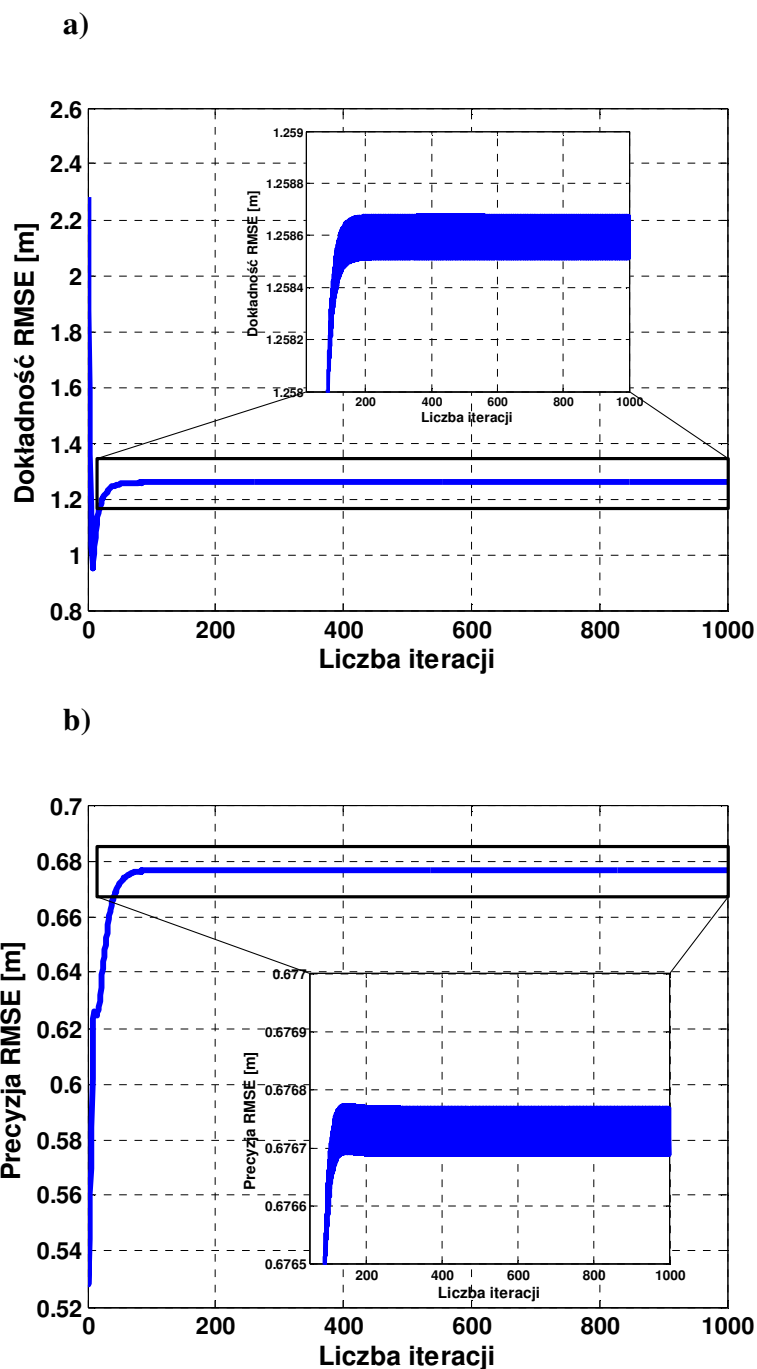
Numer MIO	Współrzędna x [m]	Współrzędna y [m]
2	10	6
3	10	3
5	13	2
6	6	1
8	7	5
11	4	5
12	3	2

Tab. 6.6. Analiza zbieżności algorytmu WAP, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku

α	Dokładność RMSE [m]	Precyzja RMSE [m]	Odsetek przypadków braku zbieżności [%]	Średnia liczba iteracji
0,30	1,26	0,68	3,5	69
0,25	1,26	0,68	0,1	42
0,20	1,26	0,68	0,0	52
0,15	1,26	0,68	0,0	68

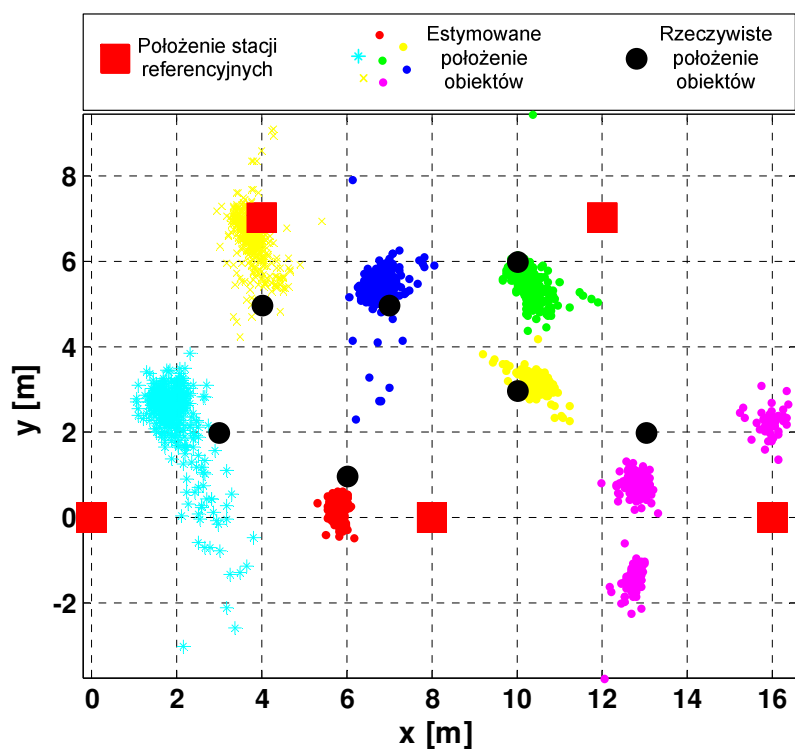
Wykresy zależności dokładności oraz precyzji od liczby iteracji, gdy parametr $\alpha = 0,3$ dla scenariusza pomiarowego, w którym wszystkie urządzenia (stacje referencyjne oraz moduły MIO) znajdowały się wewnątrz budynku, zostały pokazane na rys. 6.9.

Podobnie jak w przypadkach pomiarów zrealizowanych w terenie otwartym, również dla pomiarów wykonanych przez urządzenia rozstawione wewnątrz budynku, algorytm WAP dla parametru $\alpha = 0,3$ nie zawsze w 1000 krokach osiąga warunek końca (na 1486 zestawów zmierzonych odległości dla 52 zestawów warunek końca nie został osiągnięty). Niemniej jednak, gdy liczba iteracji jest większa od 200 wartości dokładności oraz precyzji oscylują wokół wartości granicznej, a zakres zmian tych oscylacji nie przekracza 1 mm. Gdy wartość parametru α jest mniejsza niż 0,25 i większa równa 0,15, wówczas dla każdego zestawu pomiarów spełniony jest warunek końca wcześniej niż dla 200 iteracji. Nie obserwowano też dla tych α oscylacji wartości dokładności oraz precyzji. Zmniejszając wartość parametru α zwiększa się jedynie średnia liczba iteracji potrzebna do spełnienia warunku końca działania algorytmu.

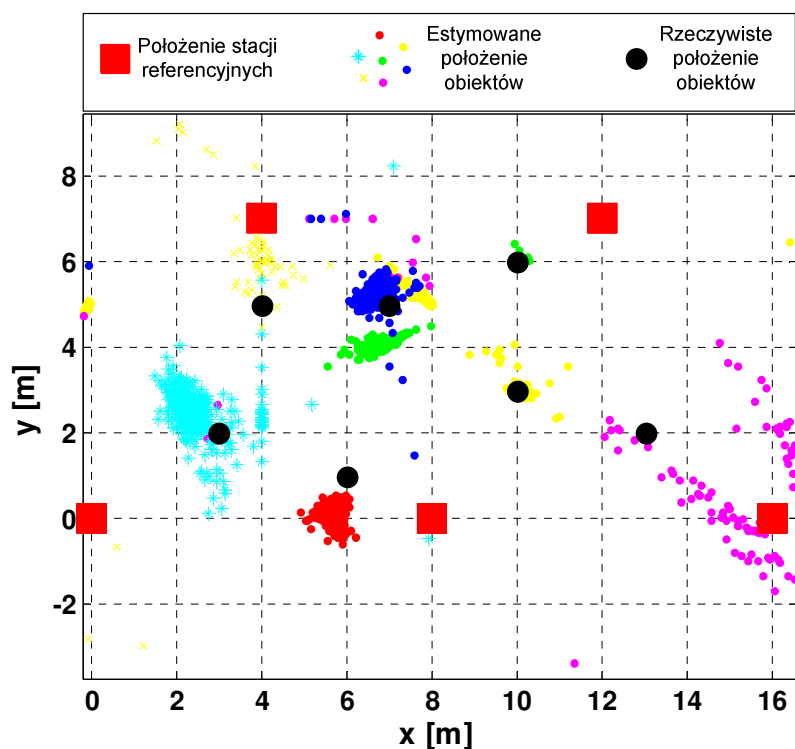


Rys. 6.9. Zależność a) dokładności i b) precyzji od liczby iteracji, gdy parametr $\alpha = 0,3$, a węzły PWR i moduły MIO rozstawiono wewnątrz budynku

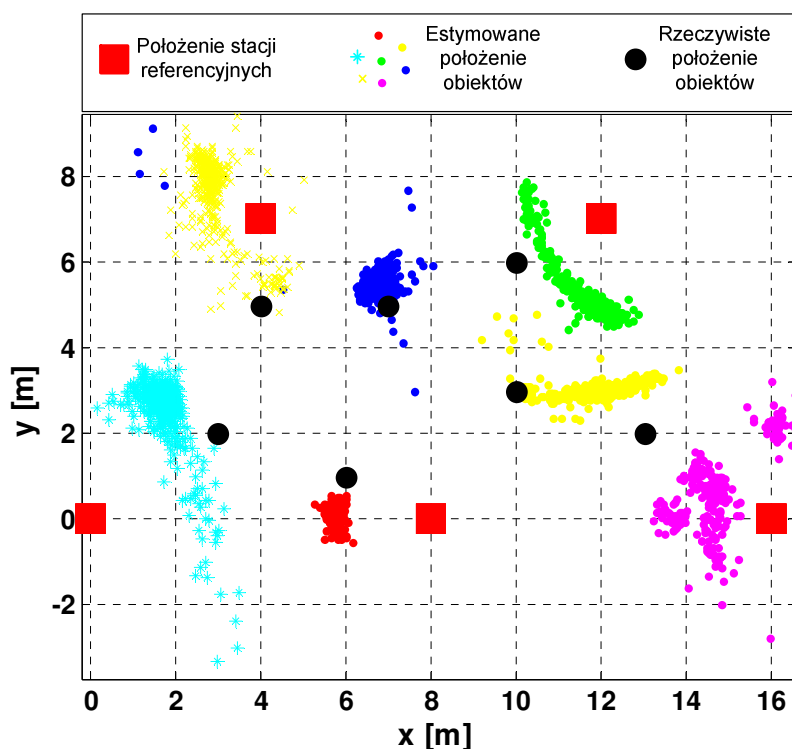
Porównano także efektywność algorytmów: WAP ($\alpha = 0,2$), Chana oraz Foy'a dla analizowanych pomiarów. Na rys. 6.10 – 6.12 pokazano położenie stacji referencyjnych (czerwone kwadraty), rzeczywiste położenie modułów MIO (czarne punkty) oraz estymowane położenie MIO (kolorowe znaczniki) każdym z wymienionych algorytmów. Zakres prezentowanego obszaru jest jednakowy na każdym z rysunków. Został on dobra-



Rys. 6.10. Estymaty polozenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomoca algorytmu WAP, gdy wszystkie urzadzzenia znajdowaly sie wewnatrz budynku

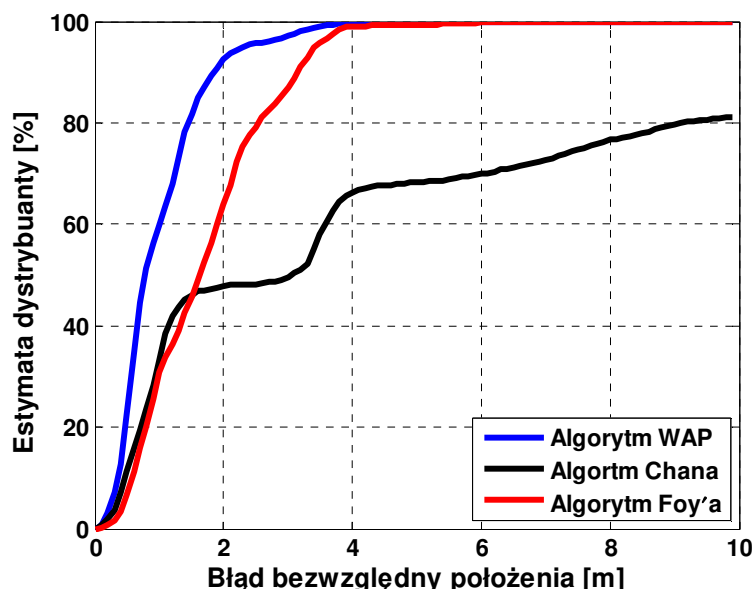


Rys. 6.11. Estymaty polozenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomoca algorytmu Chana, gdy wszystkie urzadzzenia znajdowaly sie wewnatrz budynku



Rys. 6.12. Estymaty położenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomocą algorytmu Foy'a, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku

ny na podstawie estymat uzyskanych za pomocą algorytmu WAP, tak by wszystkie estymaty położenia obiektów (dla tego algorytmu) były widoczne na wykresie. Niestety, w przypadku algorytmów Chana oraz Foy'a, niektóre estymaty położenia obiektów nie mieszczą się w tak ograniczonym obszarze prezentacji. Niemniej, zdecydowano się na takie ograniczenie, aby zachować czytelność prezentowanych wyników i ułatwić graficzne porównywanie wykresów. Niejednokrotnie estymaty uzyskiwane za pomocą algorytmów Chana i Foy'a znajdują się daleko poza obszarem zainteresowania. Uwzględnienie takich elementów na rysunkach znacząco utrudniłoby analizę sytuacji w obszarze rozstawienia urządzeń. Na rys. 6.13 wykreślono estymaty dystrybuant błędów wyznaczania położenia każdym z algorytmów, a w tab. 6.7 zestawiono wyniki analizy porównawczej. Porządek prezentacji danych w wymienionej tabeli jest taki jak w tab. 6.3.



Rys. 6.13. Estymaty dystrybuanty błędów wyznaczania położenia dla algorytmów: WAP, Chana oraz Foy'a, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku

Tab. 6.7. Porównanie efektywności algorytmów, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku

Algorytm	Dokładność RMSE [m]	Precyzja RMSE [m]	Prawdopodobieństwo straty
WAP	1,26	0,68	0
Chana	7,91	6,38	$2 \cdot 10^{-3}$
Foy'a	1,99	0,85	0

Stosując algorytm WAP uzyskano najmniejsze wartości pierwiastków błędów średniokwadratowych rozpatrując zarówno dokładność jak i precyzję. Wartość pierwiastka błędu średniokwadratowego estymat położenia obiektów wyznaczonych proponowanym w rozprawie algorytmem względem położenia rzeczywistego jest mniejsza o ponad 35 % względem błędu uzyskanego dla algorytmu Foy'a i o 84 % względem algorytmu Chana.

6.1.3. Stacje referencyjne na zewnątrz budynku, MIO wewnątrz budynku

Ostatnim przypadkiem, w którym sprawdzono zbieżność proponowanego algorytmu WAP, jest scenariusz, w którym stacje referencyjne PWR rozstawiono wokół budynku, a moduły MIO wewnątrz niego na parterze. Pomiary zrealizowano w domu jednorodzinnym. Budynek ten jest dwupoziomowy (parter i piętro). Podczas przeprowadzania pomiarów był jeszcze w budowie, lecz już w stanie zamkniętym. Wewnątrz znajdowały

się sprzęty budowlane. Na rys. 6.14 widać zdjęcia: węzła PWR oraz modułu MIO. Rys. 6.15 przedstawia histogram błędów pomiarów odległości zrealizowanych w tym obiekcie. Histogram ten został wyznaczony na podstawie 60726 pomiarów. Jak można zauważyć, prezentowany rozkład nie może być opisany rozkładem Gaussa. Zakres błędów pomiarów odległości mieści się w przedziale od -5 m do 41 m. Ponadto, wartość średnia błędów wynosi 1,35 m. W tab. 6.8 i tab. 6.9 podane są współrzędne odpowiednio węzłów PWR i modułów MIO podczas realizowanych pomiarów. Wysokość wszystkich urządzeń wynosiła 0 m. Seria ta w załączniku A jest opatrzona numerem 13.

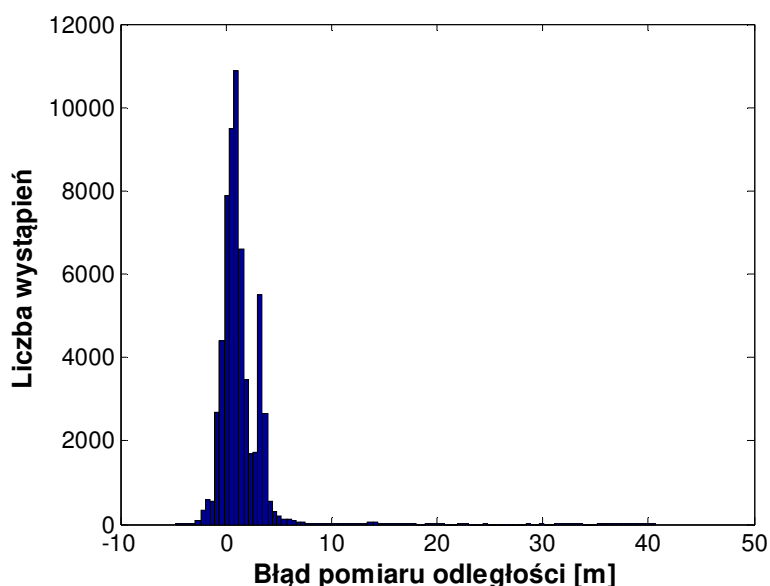
a)



b)



Rys. 6.14. a) Węzeł PWR, b) moduł MIO podczas pomiarów zrealizowanych w niezamieszkanym domu jednorodzinnym



Rys. 6.15. Rozkład błędów rzeczywistych pomiarów odległości, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz niezamieszkanego domu jednorodzinnego, a moduły MIO wewnątrz tego budynku na parterze

Tab. 6.8. Współrzędne stacji referencyjnych PWR, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz budynku, a moduły MIO wewnątrz tego budynku

Numer PWR	Współrzędna x [m]	Współrzędna y [m]
65	13	0
66	5	-3
67	14	6
68	5	13
69	-6	12
70	-6	-2

Tab. 6.9. Współrzędne modułów MIO, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz budynku, a moduły MIO wewnątrz tego budynku

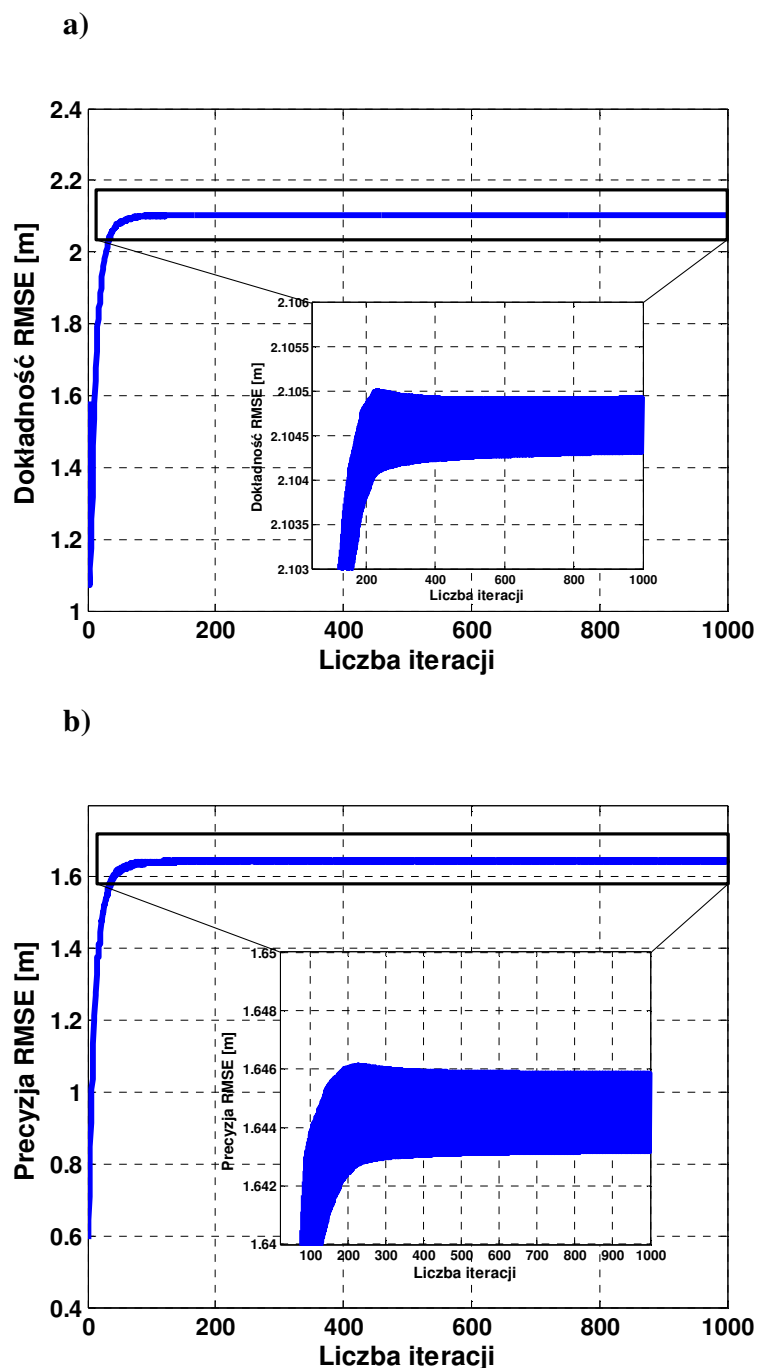
Numer MIO	Współrzędna x [m]	Współrzędna y [m]
2	-3	5
3	1	4
4	5	1
5	8	7
6	5	7
7	2	7
9	8	5

Badanie zbieżności dla omówionych pomiarów przeprowadzono podobnie jak w poprzednich podrozdziałach. W tab. 6.10 znajdują się wyniki analiz. Organizacja prezentacji danych w tej tabeli jest taka jak w poprzednich podrozdziałach. Podobnie jak we wcześniej rozpatrywanych przypadkach, wartość parametru α wpływa na szybkość zbieżności proponowanego algorytmu. Im ten parametr jest większy tym mniej jest

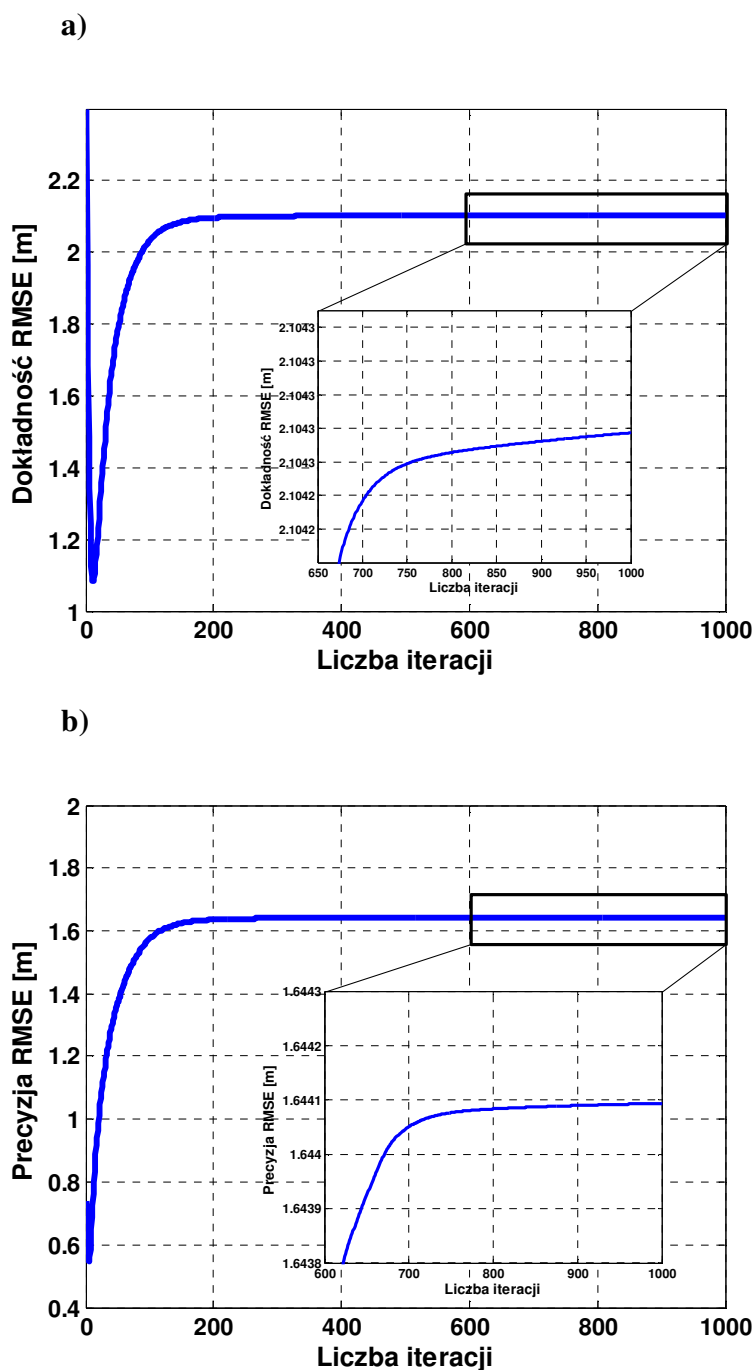
Tab. 6.10. Analiza zbieżności algorytmu WAP, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz budynku, a moduły MIO wewnątrz

α	Dokładność RMSE [m]	Precyzja RMSE [m]	Odsetek przypadków braku zbieżności [%]	Średnia liczba iteracji
0,30	2,10	1,65	0,4	55
0,20	2,10	1,64	0,0	66
0,15	2,10	1,64	0,0	86
0,10	2,10	1,64	0,0	124

wymaganych iteracji, aby osiągnąć warunek końca. Jednak, przy przekroczeniu pewnej wartości ($\alpha = 0,3$ dla omawianego zbioru pomiarów odległości), mimo zrealizowania 1000 iteracji warunek końca nie jest osiągnięty dla wszystkich zestawów pomiarów. Na rys. 6.16 i rys. 6.17 zamieszczono wykresy zależności dokładności i precyzji względem liczby iteracji dla parametru α równego odpowiednio 0,3 i 0,1.



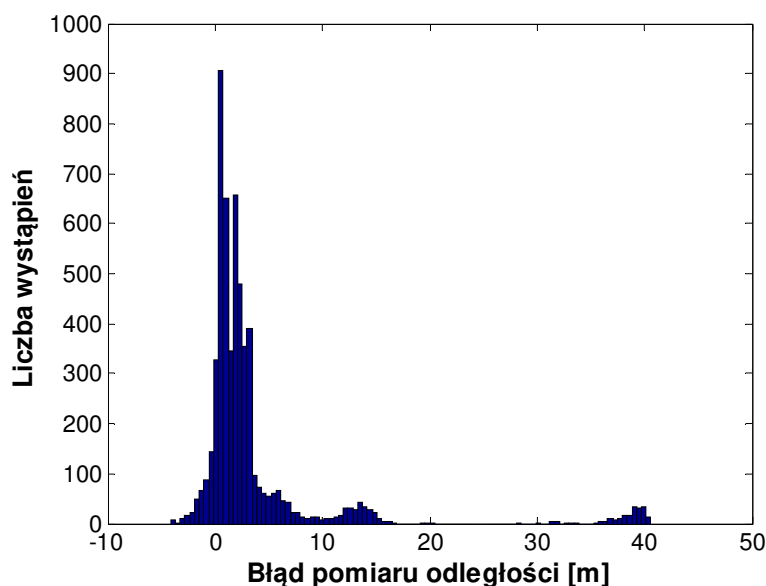
Rys. 6.16. Zależność a) dokładności i b) precyzji od liczby iteracji, gdy parametr $\alpha = 0,3$, węzły PWR rozstawione wewnątrz budynku, a MIO na zewnątrz tego budynku



Rys. 6.17. Zależność a) dokładności i b) precyzji od liczby iteracji, gdy parametr $\alpha = 0,1$, węzły PWR rozstawione wewnątrz budynku, a MIO na zewnątrz tego budynku

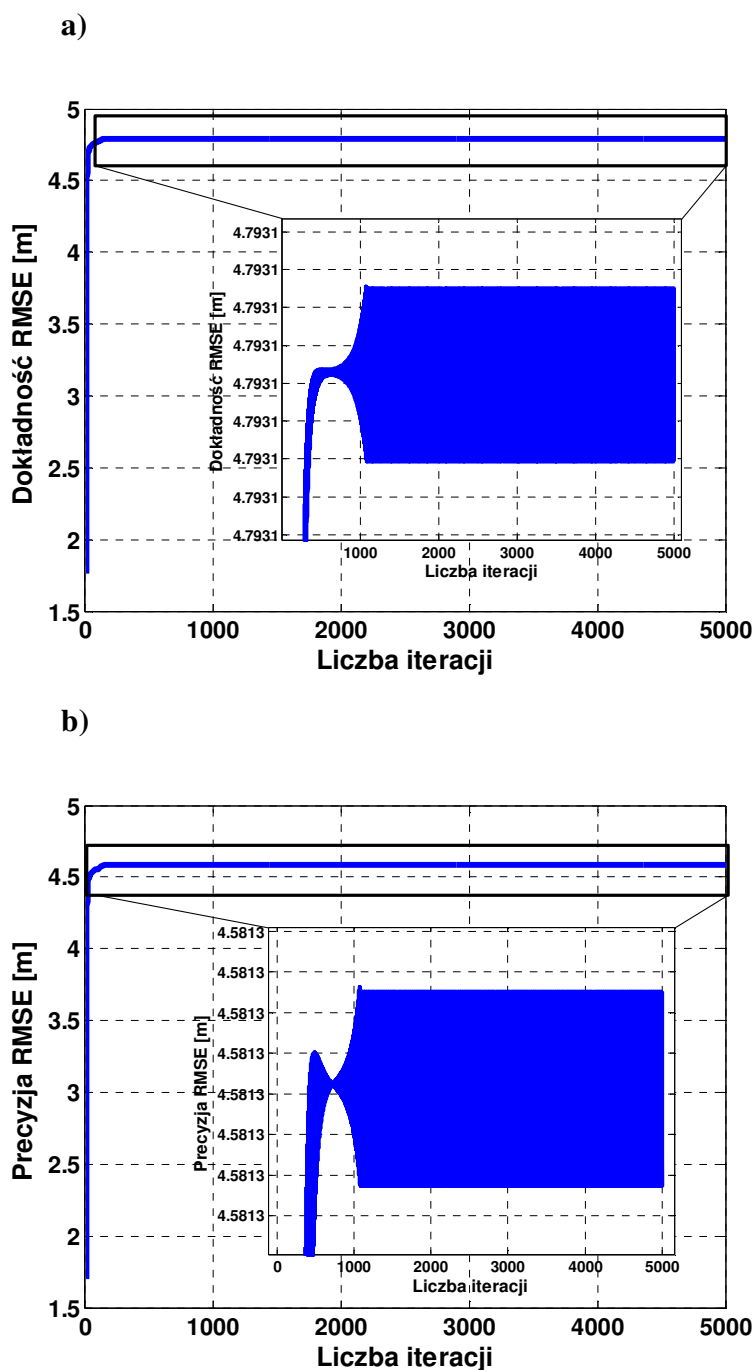
W rozpatrywanych przypadkach parametr α nie ma większego wpływu na wartość dokładności oraz precyzji i praktycznie ich wartości są niezmiennie. Podobnie jak poprzednio, ma natomiast wpływ na liczbę niezbędnych iteracji potrzebnych do osiągnięcia warunku końca. Im ten parametr jest większy tym mniej iteracji jest koniecznych. Jednakże, gdy wartość tego parametru jest zbyt duża ($\alpha = 0,3$), wówczas dla niektórych zestawów pomiarów odległości nie jest osiągany warunek końca nawet dla 1000 iteracji. Na

rys. 6.16 widać, że wartość dokładności oraz precyzji oscyluje wokół rozwiązania (wartości granicznej). Niemniej, wartości tych zmian są pomijalnie małe – ich zakres nie przekracza 1 mm. Niepokojące mogą się wydawać wykresy na rys. 6.17. Mimo iż, dla każdego zestawu pomiarów odległości został osiągnięty warunek końca, wartości dokładności oraz precyzji rosną wraz ze wzrostem liczby iteracji. Ten problem dotyczy tylko MIO 2. W przypadku pozostałych MIO wartości dokładności oraz precyzji po osiągnięciu warunku końca nie zmieniają się (z dokładnością do 7 miejsca po przecinku – oczywiście taka dokładność prezentacji błędów w docelowych warunkach pracy algorytmu jest niepotrzebna). Na rys. 6.18 pokazano histogram błędów pomiarów odległości dla MIO 2 wykonany na podstawie 5583 pomiarów. Wartości tych błędów mieszczą się w przedziale



Rys. 6.18. Rozkład błędów rzeczywistych pomiarów odległości dla MIO 2 znajdującego się wewnątrz budynku, gdy węzły PWR znajdowały na zewnątrz tego budynku

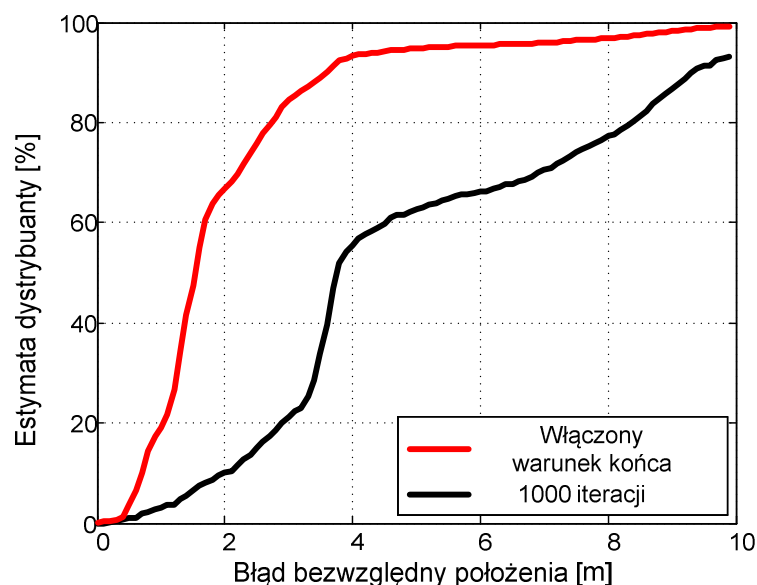
od -5 m do 40 m, a ich wartość średnia wynosi 3,57 m. Dla pozostałych MIO wartość średnia błędów pomiarów odległości nie przekracza 2 m. Warunki propagacyjne dla MIO 2 w tej serii pomiarowej były znacząco gorsze w porównaniu z pozostałymi MIO. Zwiększono liczbę dopuszczalnych iteracji dla tego MIO oraz zmieniono wartości współczynników kierunkowych półprostych tworzących funkcję błędu na $A = 4$ i $B = 12$ (dobór tych współczynników wyjaśniono w podrozdziale 6.2) i powtórzono badanie zbieżności. Wyniki pokazano na rys. 6.19. Widać, że gdy liczba iteracji jest większa niż 1072



Rys. 6.19. Zależność a) dokładności i b) precyzji od liczby iteracji dla MIO 2 znajdującego się wewnątrz budynku, gdy parametr $\alpha = 0,2$, a węzły PWR rozstawiono na zewnątrz budynku

algorytm jest stabilny. Wartości dokładności oraz precyzji oscylują wokół rozwiązania (wartości granicznej), przy czym zmiany tych wartości są obserwowane dopiero na 6. miejscu po przecinku. Można więc przyjąć, że po zwiększeniu liczby iteracji dla MIO 2 oraz dobraniu wartości współczynników kierunkowych półprostych tworzących funkcję błędu, również uzyskano jednoznaczne rozwiązanie.

Poddano dokładniejszej analizie wyniki zwracane przez algorytm Foy'a dla MIO 2. W tym celu wyłączono warunek końca w algorytmie Foy'a, a maksymalną liczbę iteracji ustawiono na 1000. Okazało się, że dla 8 spośród 811 zestawów pomiarów odległości algorytm Foy'a był niezbieżny: elementy wektora błędów rosły do wartości przekraczającej możliwości reprezentacji liczb po kilkudziesięciu iteracjach. Estymaty dystrybuanty błędów wyznaczania położenia obiektów dla algorytmu Foy'a pokazano na rys. 6.20. Krzywa oznaczona kolorem czerwonym i opisana „włączony warunek końca” jest estymatą dystrybuanty błędów położenia obiektu, gdy w algorytmie był włączony warunek końca, a maksymalna liczba iteracji była ustawiona na 5. Krzywa czarna jest wykresem estymaty dystrybuanty błędów położenia obiektu, gdy w algorytmie zawsze realizowanych było 1000 iteracji. W tab. 6.11 zamieszczono wartości błędów wyznaczania położenia obiektu dla dwóch wariantów pracy algorytmu Foy'a.



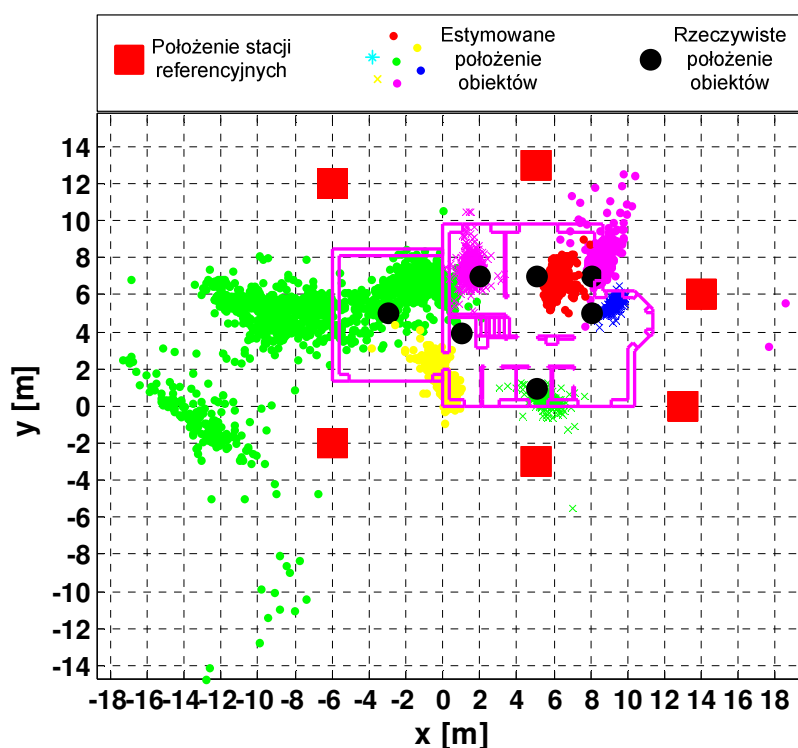
Rys. 6.20. Estymaty dystrybuanty błędów wyznaczania położenia algorytmem Foy'a przy włączonym i wyłączonym warunku końca, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz budynku, a moduł MIO 2 wewnątrz

Tab. 6.11. Błędy wyznaczania położenia obiektów algorytmem Foy'a przy włączonym i wyłączonym warunku końca, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz budynku, a moduł MIO 2 wewnątrz

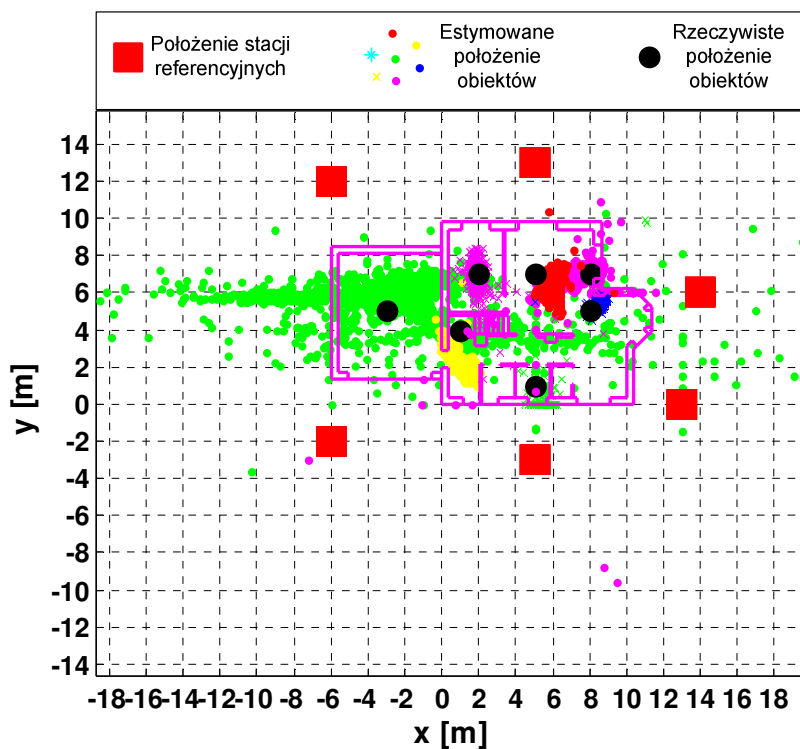
Wariant	Dokładność RMSE [m]	Precyzja RMSE [m]	Prawdopodobieństwo straty
Włączony warunek końca	3,10	2,57	$7 \cdot 10^{-4}$
Wyłączony warunek końca	6,22	5,90	$1 \cdot 10^{-2}$

Pogorszenie efektywności działania algorytmu Foy'a przy 1000 iteracji jest wyraźne dla MIO 2. Dwukrotnie wzrosły wartości błędów w stosunku do wyników przy włączonym warunku końca. Zwiększyło się także prawdopodobieństwo straty. Oznacza to, że algorytm ten nie jest zbieżny dla rozpatrywanego zbioru pomiarów odległości.

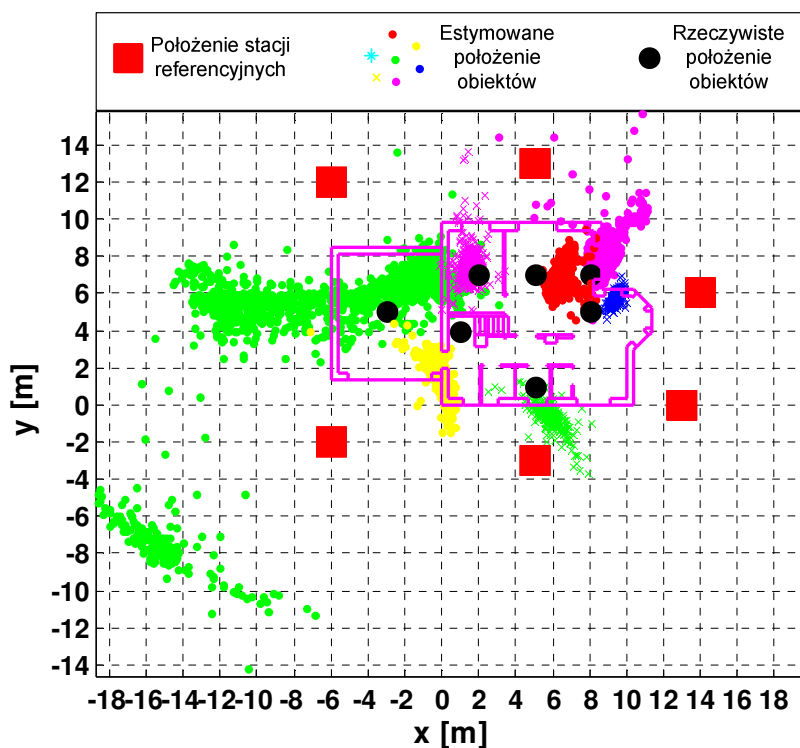
Rys. 6.21 – 6.23 prezentują estymaty położenia obiektów wyznaczone przez algorytmy: WAP, Chana oraz Foy'a. W przypadku pierwszego algorytmu przyjęto $\alpha = 0,2$, $A = 4$ i $B = 12$, a w przypadku algorytmu Foy'a włączono warunek końca i ograniczono liczbę iteracji do 5. Podobnie jak w poprzednim podrozdziale ograniczono zakres prezentowanego obszaru. W tab. 6.12 zestawiono wartości błędów wyznaczania położenia obiektów przez te algorytmy, a na rys. 6.24 pokazano estymaty dystrybuant błędów wyznaczania położenia dla każdego z tych algorytmów. Estymaty położenia MIO 2 na rysunkach od rys. 6.21 do rys. 6.23 są oznaczone zielonymi kropkami. W przypadku każdego algorytmu estymaty położenia dla tego modułu są najmniej skupione w porównaniu z estymatami położenia pozostałych MIO.



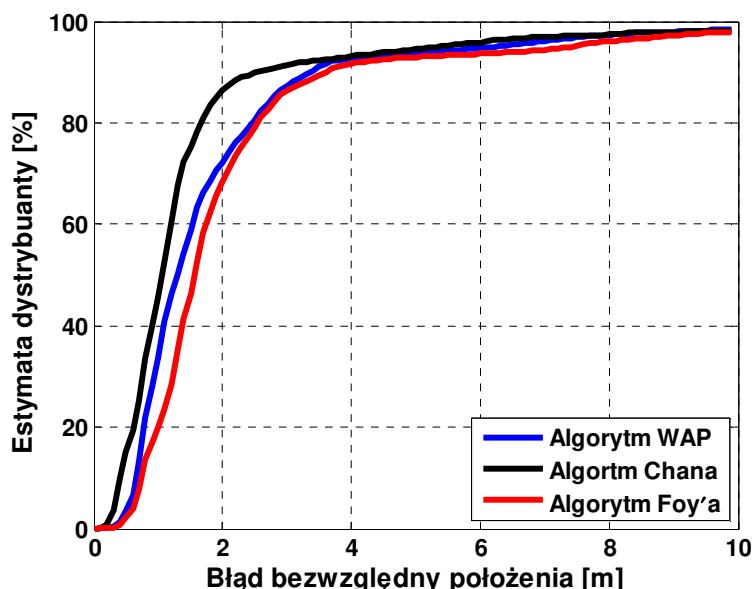
Rys. 6.21. Estymaty położenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomocą algorytmu WAP, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz budynku, a moduły MIO wewnątrz



Rys. 6.22. Estymaty położenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomocą algorytmu Chana, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz budynku, a moduły MIO wewnątrz



Rys. 6.23. Estymaty położenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomocą algorytmu Foy'a, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz budynku, a moduły MIO wewnątrz



Rys. 6.24. Estymaty dystrybuanty błędów wyznaczania położenia dla algorytmów: WAP, Chana oraz Foy'a, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz budynku, a moduły MIO wewnątrz

Tab. 6.12. Porównanie efektywności algorytmów, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz budynku, a moduły MIO wewnątrz

Algorytm	Dokładność RMSE [m]	Precyzja RMSE [m]	Prawdopodobieństwo straty
WAP	2,74	2,12	0
Chana	3,54	3,42	$2 \cdot 10^{-3}$
Foy'a	3,54	2,91	$7 \cdot 10^{-4}$

Przedstawione wyniki dowodzą, że proponowany wewnątrzbudynkowy algorytm wyznaczania położenia obiektów WAP jest bardziej efektywny niż algorytmy Chana oraz Foy'a. Dla każdego zestawu pomiarów odległości uzyskano estymaty położenia obiektu wyznaczone proponowanym algorytmem w przeciwieństwie do pozostałych dwóch algorytmów (niezerowe prawdopodobieństwo straty dla algorytmów Chana i Foy'a). Ponadto, błędy RMSE dokładności i precyzji wyznaczania położenia obiektów są mniejsze dla algorytmu WAP o ponad 20 % w porównaniu z rozważanymi algorytmami. Jest to jednak jedyna seria pomiarowa spośród zgromadzonych, w której algorytm Chana dla 90 % przypadków cechuje większa dokładność w porównaniu z pozostałymi dwoma algorytmami: o ok. 40 cm względem algorytmu WAP i o ok. 60 cm względem algorytmu Foy'a.

6.1.4. Wnioski

Przedstawione wyżej wyniki analiz świadczą o zbieżności proponowanego algorytmu WAP. Należy jednak pamiętać, że algorytm ten został zaprojektowany do wyznaczenia położenia obiektów na podstawie radiowych pomiarów odległości realizowanych w trudnych warunkach propagacyjnych jakim charakteryzują się wnętrza budynków. Dlatego też, w wolnej przestrzeni średnia liczba iteracji okazała się większa niż wewnątrz budynku. Ponadto, dzięki przeprowadzonym analizom, ustalono, że parametr α powinien być mniejszy niż 0,25. Wówczas algorytm WAP jest zbieżny i stabilny. Przeprowadzone badania pozwoliły także stwierdzić, że wartość współczynnika α nie ma istotnego wpływu na dokładność oraz precyzję uzyskiwanych przez algorytm WAP współrzędnych położenia obiektów. W dalszych badaniach wartość parametru α ustalono na 0,2.

Należy jednak zwrócić uwagę, że parametr α został dobrany na podstawie analizy radiowych pomiarów odległości zrealizowanych za pomocą modemów NA5TR1 firmy Nanotron. Użycie innych modemów, wykonujących pomiary z inną dokładnością oraz rozdzielczością może wymagać ponownego doboru parametru α .

6.2. Analiza wpływu nachylenia półprostych tworzących funkcję błędu na efektywność pracy algorytmu WAP

Wyniki radiowych pomiarów odległości realizowane we wnętrzach budynków są często zawyżone. Wynika to głównie ze zjawiska propagacji wielodrogowej oraz częstego braku bezpośredniej widoczności pomiędzy węzłami biorącymi udział w pomiarze. Oznacza to, że poszukując współrzędnych położenia obiektu należy oczekiwać, iż znalezione rozwiązanie będzie spełniało warunek $r < R$, czyli że estymowana odległość pomiędzy stacją referencyjną i obiektem będzie mniejsza od zmierzonej radiowo odległości. W związku z tym, gdy estymowana odległość okaże się większa od zmierzonej, wówczas powinny być wprowadzone korekty współrzędnych o znacznych wartościach. Natomiast gdy estymowana odległość jest mniejsza od zmierzonej wprowadzane korekty współrzędnych powinny być niewielkie. Stąd półproste w funkcji błędu algorytmu WAP muszą mieć różne nachylenie. Ponieważ zależy nam żeby korekty współrzędnych były niewielkie gdy $r < R$, więc współczynnik kierunkowy A półprostej o wartościach dodatnich powinien być niewielki. Należy się spodziewać, że wraz ze zmniejszaniem wartości tego parametru, będzie rosła średnia liczba niezbędnych (do osiągnięcia warunku końca działania algorytmu) iteracji. Natomiast gdy $r > R$, wówczas współczynnik kierunkowy B

półprostej o ujemnych wartościach powinien być większy niż A . Wtedy korekty współrzędnych będą przyjmowały większe wartości. Należy się spodziewać, że im B będzie większe tym mniejsza liczba iteracji będzie wymagana. Przy przekroczeniu pewnej wartości B algorytm może okazać się niestabilny – przy zbyt dużym kroku (zbyt dużych wartościach korekt współrzędnych) nie będzie można „zbliżyć się” do zerowych wartości funkcji błędu. W niniejszym podrozdziale przeprowadzono analizę wpływu nachylenia półprostych w funkcji błędu na efektywność pracy algorytmu WAP. Analizę przeprowadzono dla trzech przypadków:

- gdy wszystkie urządzenia (węzły PWR i moduły MIO) znajdowały się wewnątrz budynku,
- gdy węzły referencyjne PWR znajdowały się na zewnątrz budynku, a MIO wewnątrz na parterze,
- gdy węzły referencyjne PWR znajdowały się na zewnątrz budynku, a MIO wewnątrz na piętrze.

W pierwszym przypadku warunki propagacyjne były najbardziej, a w ostatnim najmniej korzystne z punktu widzenia realizacji radiowych pomiarów odległości. Pomiędzy analizę w terenie otwartym, ponieważ proponowany algorytm, a w szczególności nieliniowa funkcja błędu, były projektowane z uwzględnieniem właściwości środowiska wewnątrzbudynkowego. Podczas badań przyjęto $\alpha = 0,2$ (patrz podrozdział 6.1). Dobór parametrów A i B przeprowadzono na podstawie połowy dostępnych zestawów pomiarów odległości dla danej serii pomiarowej, traktując ten zbiór jako zestaw pomiarów do kalibracji algorytmu. Natomiast, porównanie efektywności algorytmów wykonano dla wszystkich dostępnych zestawów pomiarów odległości.

6.2.1. Wszystkie urządzenia wewnątrz budynku

Badania zrealizowano w zamieszkanym domu jednorodzinnym. Stacje referencyjne oraz moduły identyfikacji osobistej były rozstawione wewnątrz budynku w różnych pomieszczeniach. W tab. 6.13 i 6.14 znajdują się współrzędne odpowiednio węzłów PWR i modułów MIO. Na rys. A.15 w załączniku A pokazano rozmieszczenie urządzeń wewnątrz tego obiektu. Czerwone kwadraty oznaczają położenie stacji referencyjnych, czarne punkty położenie modułów MIO, a liniami fioletowymi przedstawiono obrys budynku w rzucie z góry. Na rys. 6.25 pokazano zdjęcia wybranych urządzeń wewnątrz budynku.

Tab. 6.13. Współrzędne stacji referencyjnych PWR, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku

Numer PWR	Współrzędna x [m]	Współrzędna y [m]
65	9	1
66	17	2
67	7	5
68	11	11
69	17	10
70	19	7

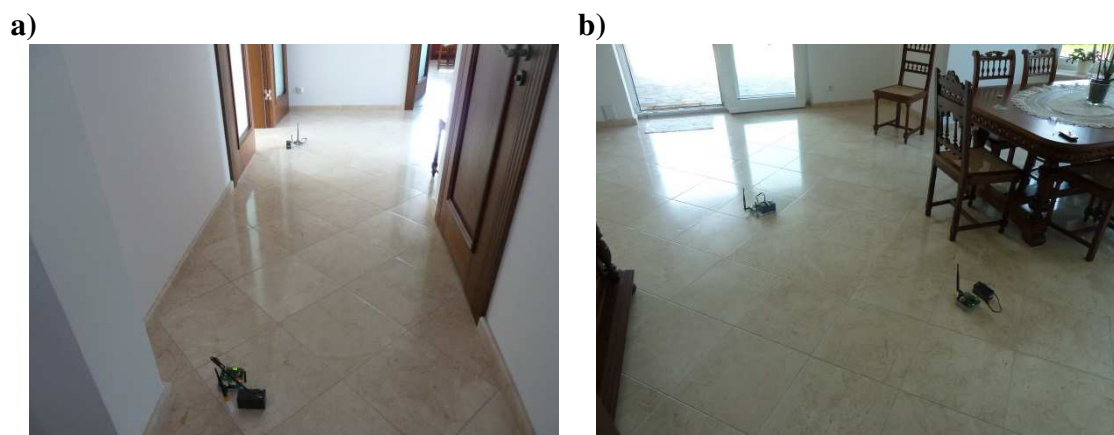
Tab. 6.14. Współrzędne modułów MIO, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku

Numer MIO	Współrzędna x [m]	Współrzędna y [m]
2	11	2
3	12	5
4	16	6
5	13	9
6	11	7
7	17	5
8	9	5
12	14	3

W celu określenia optymalnych⁸ wartości współczynników kierunkowych półprostych tworzących funkcję błędu estymowano współrzędne położenia obiektów algorytmem WAP zmieniając odpowiednio współczynniki A i B . Obserwowano wartości błędów dokładności oraz precyzji, a także wymaganej średniej liczby iteracji i liczby przypadków kiedy nie został osiągnięty warunek końca działania algorytmu. Najpierw zmieniano wartość współczynnika A przy $B = 10$. Wyniki tych badań zostały pokazane w tab. 6.15 i na rys. 6.26. Prezentacja danych w tabeli jest analogiczna jak w podrozdziale 6.1.

Wraz ze wzrostem wartości A maleje średnia liczba iteracji, maleje tym samym czas obliczeń. Także wraz ze wzrostem współczynnika A zmniejsza się liczba przypadków braku spełnienia warunku końca w 1000 iteracji. Jednakże wartość parametru A

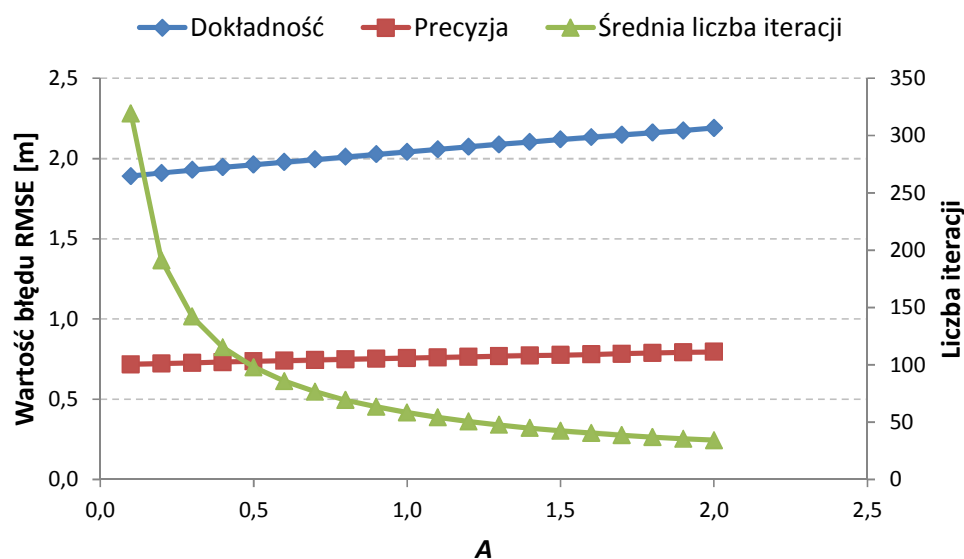
⁸ Przez wartości optymalne parametrów A i B należy w niniejszym podrozdziale rozumieć takie wartości, dla których błędy dokładności oraz precyzji estymat położenia uzyskanych algorytmem WAP, a także wymagana liczba iteracji będą możliwie małe przy zachowaniu zbieżności algorytmu.



Rys. 6.25. Zdjęcia wybranych urządzeń podczas pomiarów w zamieszkanym domu jednorodzinnym

Tab. 6.15. Analiza wpływu współczynnika kierunkowego A na efektywność algorytmu WAP, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się w budynku, dla $B = 10$

A	Dokładność RMSE [m]	Precyzja RMSE [m]	Odsetek przypadków braku zbieżności [%]	Średnia liczba iteracji
0,1	1,89	0,72	2,25	319
0,2	1,91	0,72	0,08	191
0,3	1,93	0,73	0,08	142
0,4	1,95	0,73	0,04	115
0,5	1,96	0,74	0,00	98
0,6	1,98	0,74	0,00	86
0,7	1,99	0,74	0,00	77
0,8	2,01	0,75	0,00	69
0,9	2,03	0,75	0,00	63
1,0	2,04	0,76	0,00	58
1,1	2,06	0,76	0,00	54
1,2	2,07	0,76	0,00	51
1,3	2,09	0,77	0,00	48
1,4	2,10	0,77	0,00	45
1,5	2,12	0,78	0,00	43
1,6	2,13	0,78	0,02	41
1,7	2,15	0,78	0,00	39
1,8	2,16	0,79	0,00	37
1,9	2,18	0,79	0,00	36
2,0	2,19	0,79	0,00	34



Rys. 6.26. Zależność dokładności, precyzji oraz średniej liczby iteracji od współczynnika kierunkowego A , gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku, dla $B = 10$

powinna być możliwie mała ponieważ wraz ze wzrostem tego parametru zwiększają się błędy dokładności oraz precyzji. Najmniejsza wartość błędu dokładności oraz precyzji przy zerowej liczbie przypadków niespełnienia warunku końca została wyznaczona dla $A = 0,5$. Jednakże wówczas średnia liczba iteracji wynosi prawie 100. Godząc się na zwiększenie błędu dokładności o 10 cm zmniejszamy średnią liczbę iteracji prawie o połowę. Przypadek ten ma miejsce, gdy $A = 1,1$. W związku z tym, poszukiwanie optymalnej wartości współczynnika B realizowano dla $A = 1,1$. Wyniki przeprowadzonych badań zamieszczono w tab. 6.16, a na rys. 6.27 zaprezentowano zależność błędów dokładności, precyzji oraz średniej liczby iteracji od wartości współczynnika B .

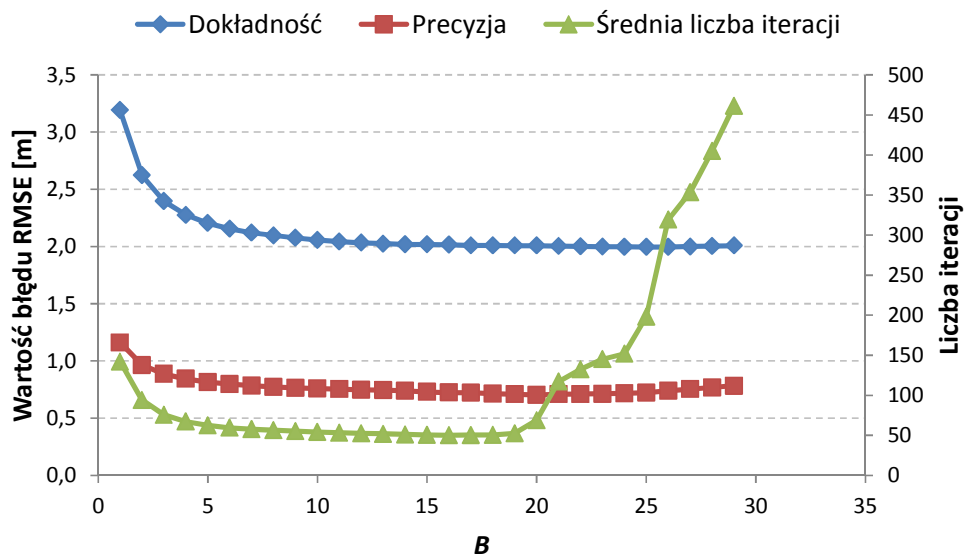
Wraz ze wzrostem wartości współczynnika kierunkowego B maleje wartość błędów dokładności oraz precyzji. Maleje także średnia liczba iteracji. Jednak, jak wcześniej przewidywano, gdy wartość parametru B przekroczy pewną wartość (w tym przypadku 16) średnia liczba iteracji zaczyna wzrastać. Gdy $B > 20$, zaczyna wzrastać błąd precyzji, a gdy $B > 28$ zaczyna wzrastać błąd dokładności. Co więcej, dla maksymalnej liczby iteracji wynoszącej 1000, warunek końca jest osiągnięty jedynie dla ograniczonego zakresu wartości B . Dla tej serii pomiarów zakres ten wynosi od 8 do 14. W związku z tym, najkorzystniej jest przyjąć dla danej serii pomiarów (zrealizowanej w danym budynku z użyciem wybranych modemów NA5TR1) następujące wartości współczynników

Tab. 6.16. Analiza wpływu współczynnika kierunkowego B na efektywność algorytmu WAP, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się w budynku, dla $A = 1,1$

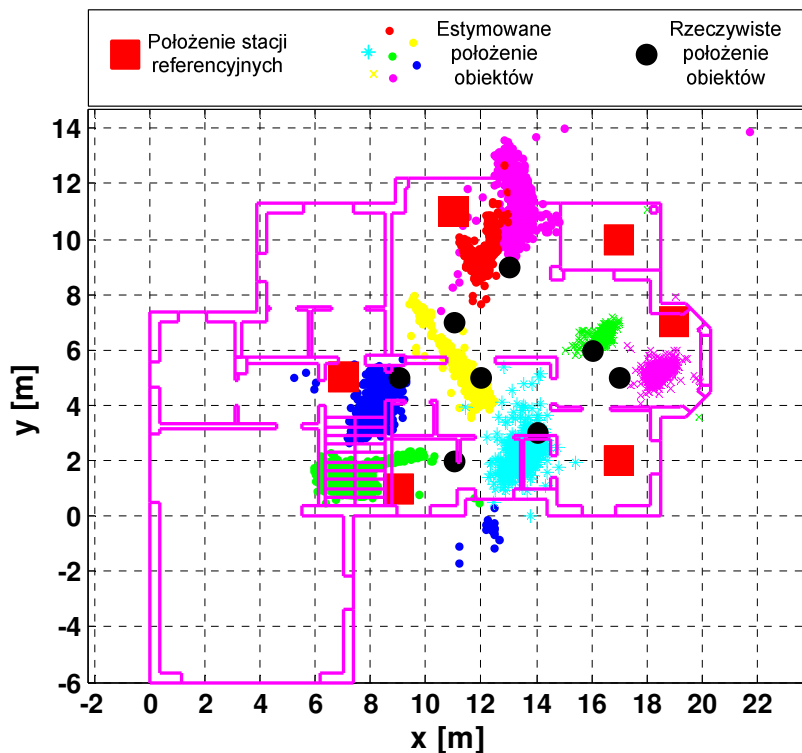
B	Dokładność RMSE [m]	Precyzja RMSE [m]	Odsetek przypadków braku zbieżności [%]	Średnia liczba iteracji
1	3,19	1,16	0,26	142
2	2,62	0,97	0,06	94
3	2,40	0,89	0,02	76
4	2,28	0,84	0,02	67
5	2,20	0,82	0,00	63
6	2,16	0,80	0,00	60
7	2,12	0,78	0,02	58
8	2,10	0,77	0,00	56
9	2,08	0,77	0,00	55
10	2,06	0,76	0,00	54
11	2,04	0,75	0,00	53
12	2,03	0,75	0,00	53
13	2,03	0,74	0,00	52
14	2,02	0,74	0,00	51
15	2,02	0,73	0,02	51
16	2,02	0,72	0,04	50
17	2,01	0,72	0,12	50
18	2,01	0,72	0,14	51
19	2,01	0,71	0,14	52
20	2,01	0,70	0,67	69
21	2,00	0,71	6,98	117
22	2,00	0,71	8,17	133
23	2,00	0,71	9,79	145
24	2,00	0,72	9,97	152
25	2,00	0,72	12,16	198
26	2,00	0,74	27,07	319
27	2,00	0,76	30,37	353
28	2,00	0,77	36,06	405
29	2,01	0,78	42,47	461

kierunkowych: $A = 1,1$ i $B = 14$. Ponieważ sprawdzono, że dla tych wartości algorytm jest stabilny, nie ma potrzeby ponownej analizy wpływu wartości parametru α na efektywność działania algorytmu WAP. Dla tak dobranych parametrów porównano efektywność algorytmów: WAP, Chana oraz Foy'a. Na rysunkach od rys. 6.28 do rys. 6.30 zostały przedstawione estymaty położenia obiektów, które wyznaczono za pomocą wymienionych algorytmów. Z kolei na rys. 6.31 zaprezentowano estymaty dystrybuant błędów wyznaczania położenia przez każdy z algorytmów. W tab. 6.17 zestawiono błędy dokładno-

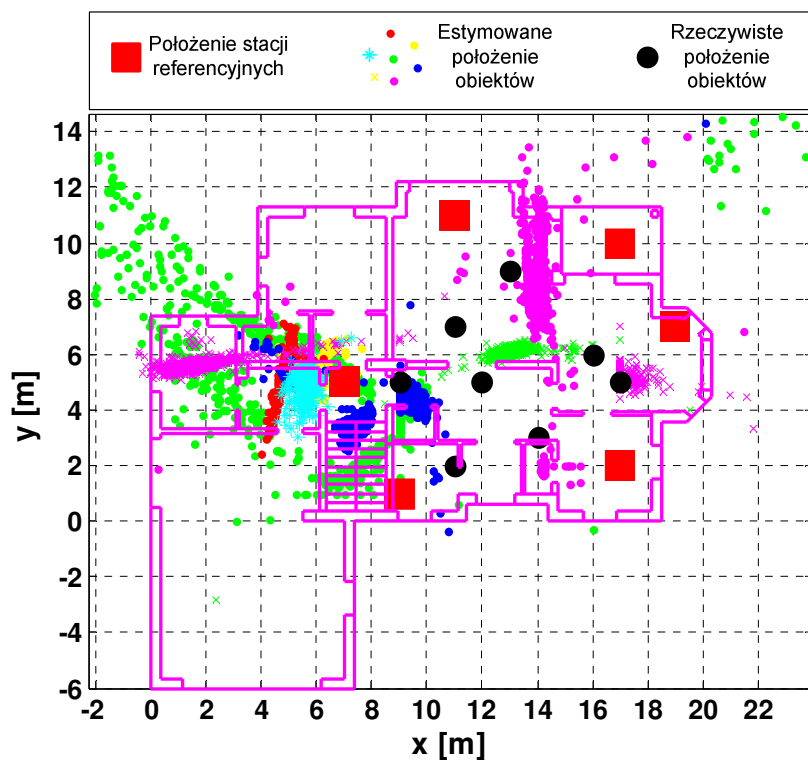
ści, precyzji oraz prawdopodobieństwo niewyznaczenia położenia dla danego zestawu pomiarów odległości. Porównanie to wykonano na podstawie 10228 zestawów pomiarów odległości.



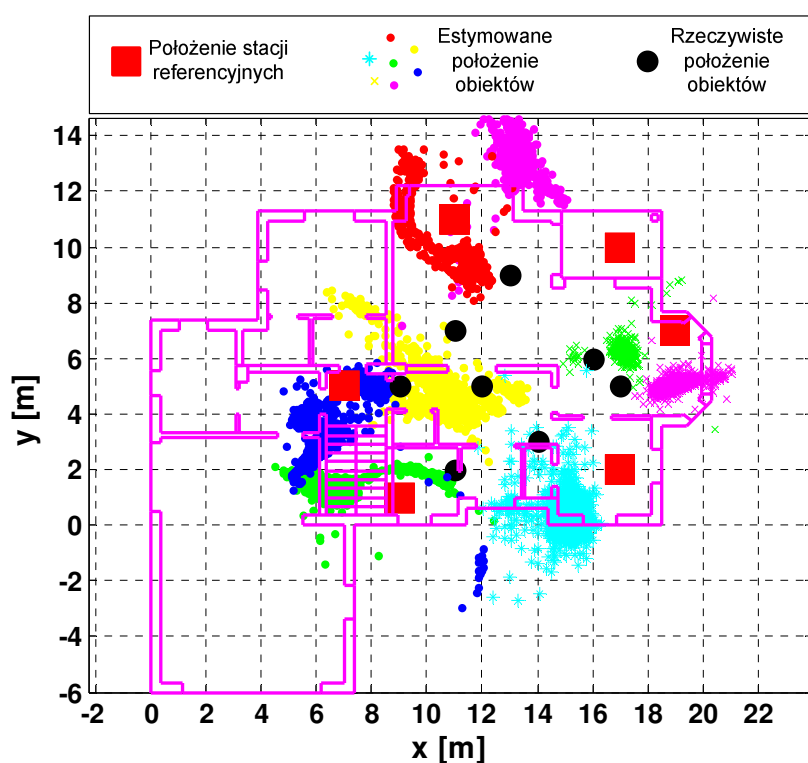
Rys. 6.27. Zależność dokładności, precyzji oraz średniej liczby iteracji od współczynnika kierunkowego B , gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku, dla $A = 1,1$



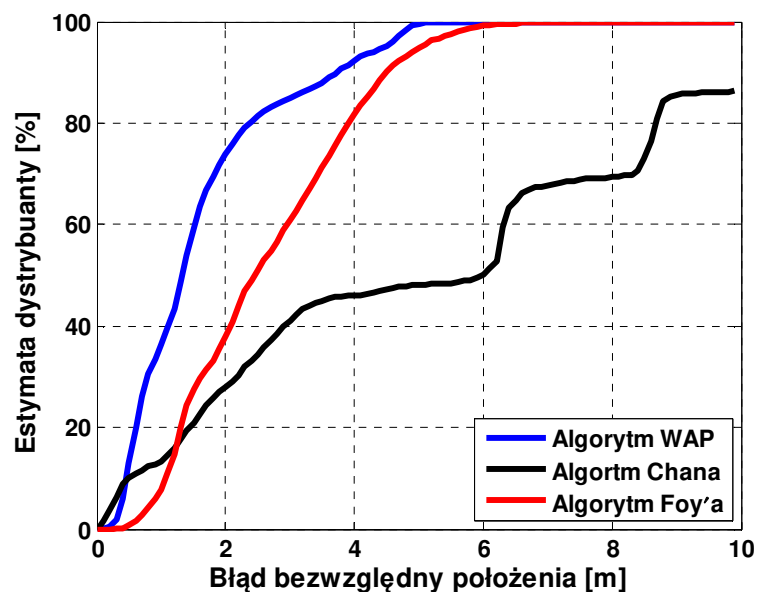
Rys. 6.28. Estymaty położenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomocą algorytmu WAP, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku



Rys. 6.29. Estymaty położenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomocą algorytmu Chana, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku



Rys. 6.30. Estymaty położenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomocą algorytmu Foy'a, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku



Rys. 6.31. Estymaty dystrybuanty błędów wyznaczania położenia dla algorytmów: WAP, Chana oraz Foy'a, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku

Tab. 6.17. Porównanie efektywności algorytmów, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku

Algorytm	Dokładność RMSE [m]	Precyzja RMSE [m]	Prawdopodobieństwo straty
WAP	2,04	0,78	0
Chana	8,92	6,35	$5,9 \cdot 10^{-4}$
Foy'a	2,97	1,18	0

Estymaty położenia obiektu wyznaczone proponowanym algorytmem WAP cechują najmniejsze wartości błędów dokładności oraz precyzji. Względem algorytmu Chana poprawa dokładności jest ponad 4-krotna, natomiast precyzji aż 6-krotna. Względem algorytmu Foy'a błąd dokładności zmniejszył się o 31 %, a precyzji o 36 %. Ponadto, dla danego zbioru radiowych pomiarów odległości, algorytm Chana może nie zwrócić estymaty położenia obiektu z prawdopodobieństwem $5,9 \cdot 10^{-4}$, podczas gdy proponowany algorytm WAP zwrócił wynik dla wszystkich zestawów pomiarów odległości.

6.2.2. Stacje referencyjne na zewnątrz budynku, MIO wewnątrz na parterze

Badania przeprowadzono w tym samym obiekcie, w którym wykonano pomiary opisane w podrozdziale 6.2.1. Pomiary te różniły się sposobem rozstawienia węzłów refe-

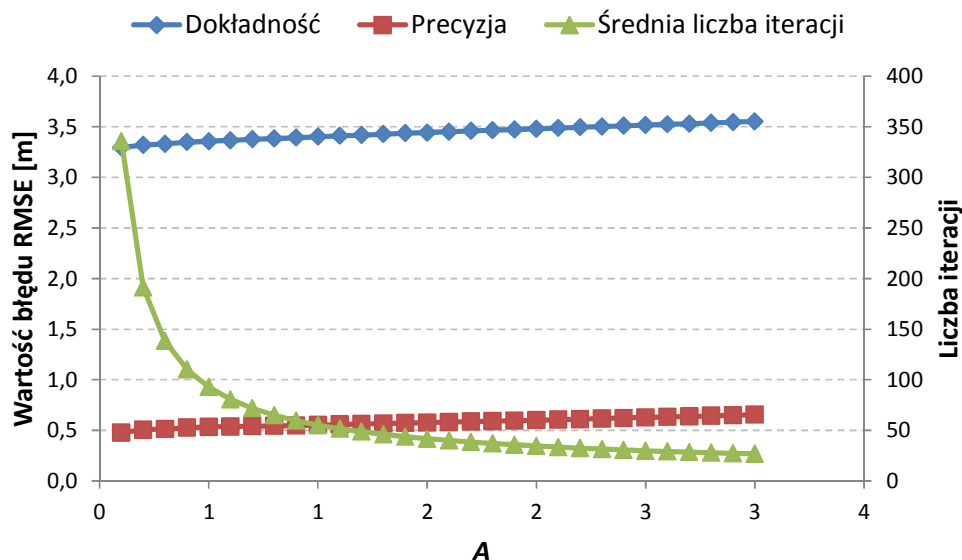
rencyjnych. Podczas badania użytego w niniejszym podrozdziale stacje referencyjne PWR znajdowały się na zewnątrz budynku (ich współrzędne zamieszczono w tab. 6.18), a moduły MIO rozstawiono zgodnie z tab. 6.14. Na rys. A.17 w załączniku A przedstawiono rozmieszczenie stacji referencyjnych (czerwone kwadraty) oraz modułów MIO (czarne punkty) względem obrysu budynku.

Tab. 6.18. Współrzędne stacji referencyjnych PWR, gdy znajdowały się na zewnątrz budynku, a moduły MIO wewnątrz na parterze

Numer PWR	Współrzędna x [m]	Współrzędna y [m]
65	25	3
66	12	-1
67	4	13
68	13	16
69	21	10
70	19	-2

Podobnie jak w poprzednim podrozdziale, w celu określenia optymalnych wartości współczynników kierunkowych półprostych tworzących funkcję błędu estymowano współrzędne położenia obiektów algorytmem WAP zmieniając te współczynniki. Analizę wyników przeprowadzono analogicznie jak w poprzednim podrozdziale. W pierwszej kolejności zmieniano wartość A przy stałym $B = 10$. Wykres zależności błędów dokładności i precyzji oraz średniej liczby iteracji znajduje się na rys. 6.32. Uzyskane wyniki zamieszczono w tab. 6.19.

Tak jak w poprzednio rozpatrywanym przypadku, wraz ze wzrostem wartości współczynnika A rosną błędy dokładności oraz precyzji i maleje średnia liczba iteracji. Zmniejsza się także liczba przypadków, gdy nie został spełniony warunek końca w 1000 iteracji. W przypadku rozpatrywanej serii pomiarów, warunek końca jest spełniony dla wszystkich zestawów radiowych pomiarów odległości dopiero dla $A = 2,3$. Ponieważ średnia liczba iteracji dla tej wartości współczynnika kierunkowego jest nieduża, dlatego też, dla tak dobranego współczynnika kierunkowego przeprowadzono badanie wpływu wartości parametru B na efektywność algorytmu WAP. Wyniki zaprezentowano w tab. 6.20 i na rys. 6.33.



Rys. 6.32. Zależność dokładności, precyzji oraz średniej liczby iteracji od współczynnika kierunkowego A , gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na parterze, dla $B = 10$

Wraz ze wzrostem parametru B maleją wartości błędów dokładności oraz precyzji. Ponadto, maleje średnia liczba iteracji (dopóki parametr B nie przekroczy wartości 14). Przy czym warunek końca jest spełniony jedynie dla zakresu parametru B od 3 do 10. Dlatego też dla rozpatrywanej serii radiowych pomiarów odległości należy przyjąć $A = 2,3$ i $B = 10$. Dla tak dobranych współczynników kierunkowych porównano efektywność pracy algorytmów: WAP, Chana oraz Foy'a. Współrzędne estymat położenia obiektów wyznaczone każdym z algorytmów zostały pokazane na rysunkach od rys. 6.34 do rys. 6.36. Estymaty dystrybuant błędów wyznaczania położenia każdym z algorytmów pokazano na rys. 6.37. W tab. 6.21 zestawiono wyniki analizy porównawczej analogicznie jak w poprzednim podrozdziale. Analizę przeprowadzono dla 5125 zestawów pomiarów odległości.

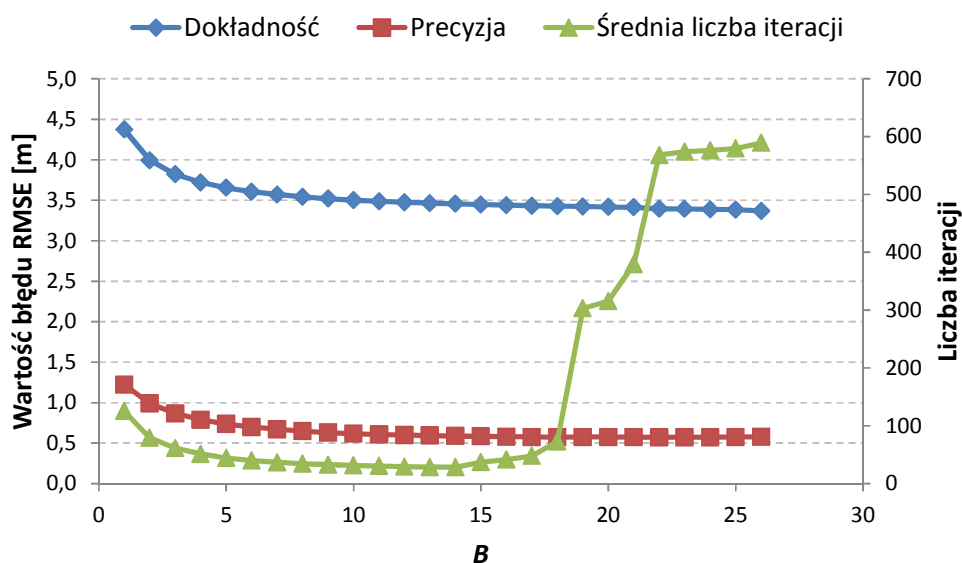
Z analizy rys. 6.37 wynika, że dla prawie 60 % przypadków algorytm Chana daje dokładniejsze wyniki niż pozostałe dwa algorytmy. Jednakże błędy RMSE, zarówno dokładności jak i precyzji są odpowiednio o 55 % i 80 % większe niż w przypadku algorytmu WAP. Wynika to z faktu, że pozostałe 40 % estymat położenia obiektów wyznaczonych algorytmem Chana są bardzo odległe od rzeczywistego położenia. Ponadto, algorytm Chana cechuje niezerowe prawdopodobieństwo straty, gdy dla algorytmu WAP wynosi ono zero. Dlatego też można stwierdzić, że także w tych warunkach efektywność algorytmu WAP jest większa niż algorytmu Chana.

Tab. 6.19. Analiza wpływu współczynnika kierunkowego A na efektywność algorytmu WAP, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na parterze, dla $B = 10$

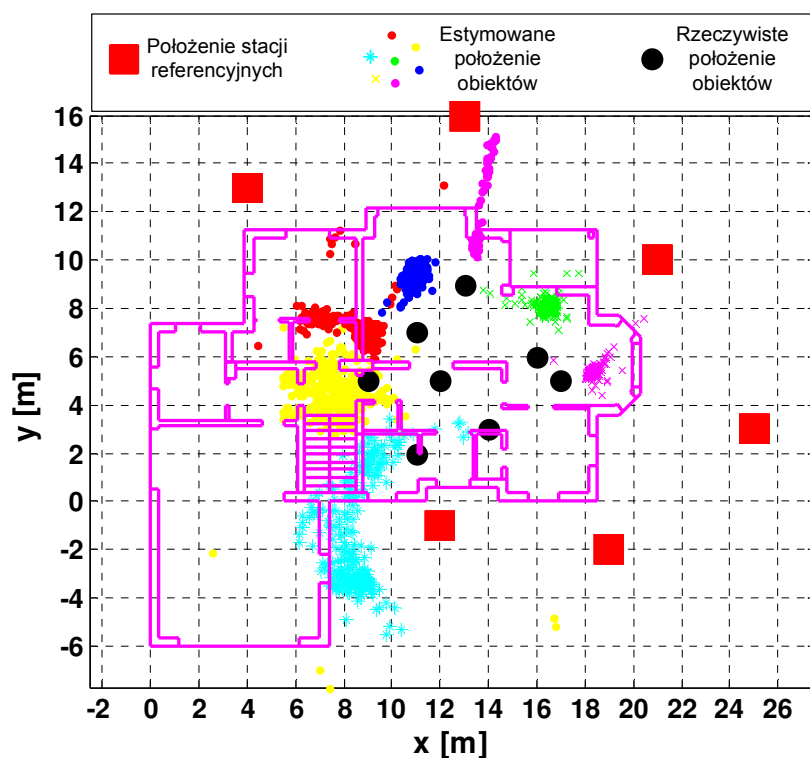
A	Dokładność RMSE [m]	Precyzja RMSE [m]	Odsetek przypadków braku zbieżności [%]	Średnia liczba iteracji
0,1	3,30	0,48	1,45	336
0,2	3,32	0,51	0,75	191
0,3	3,33	0,51	0,51	138
0,4	3,35	0,53	0,39	110
0,5	3,36	0,53	0,20	93
0,6	3,37	0,54	0,12	81
0,7	3,38	0,54	0,12	72
0,8	3,38	0,54	0,12	65
0,9	3,39	0,55	0,12	60
1,0	3,40	0,55	0,12	55
1,1	3,41	0,56	0,12	52
1,2	3,42	0,56	0,08	49
1,3	3,43	0,57	0,08	46
1,4	3,44	0,57	0,08	44
1,5	3,44	0,58	0,04	42
1,6	3,45	0,58	0,04	40
1,7	3,46	0,59	0,04	38
1,8	3,47	0,59	0,04	37
1,9	3,47	0,60	0,04	36
2,0	3,48	0,60	0,04	35
2,1	3,49	0,61	0,04	33
2,2	3,50	0,61	0,04	33
2,3	3,50	0,62	0,00	32
2,4	3,51	0,62	0,00	31
2,5	3,52	0,63	0,00	30
2,6	3,52	0,63	0,00	29
2,7	3,53	0,64	0,00	29
2,8	3,54	0,64	0,00	28
2,9	3,55	0,65	0,00	27
3,0	3,55	0,66	0,00	27

Tab. 6.20. Analiza wpływu współczynnika kierunkowego B na efektywność algorytmu WAP, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na parterze, dla $A = 2,3$

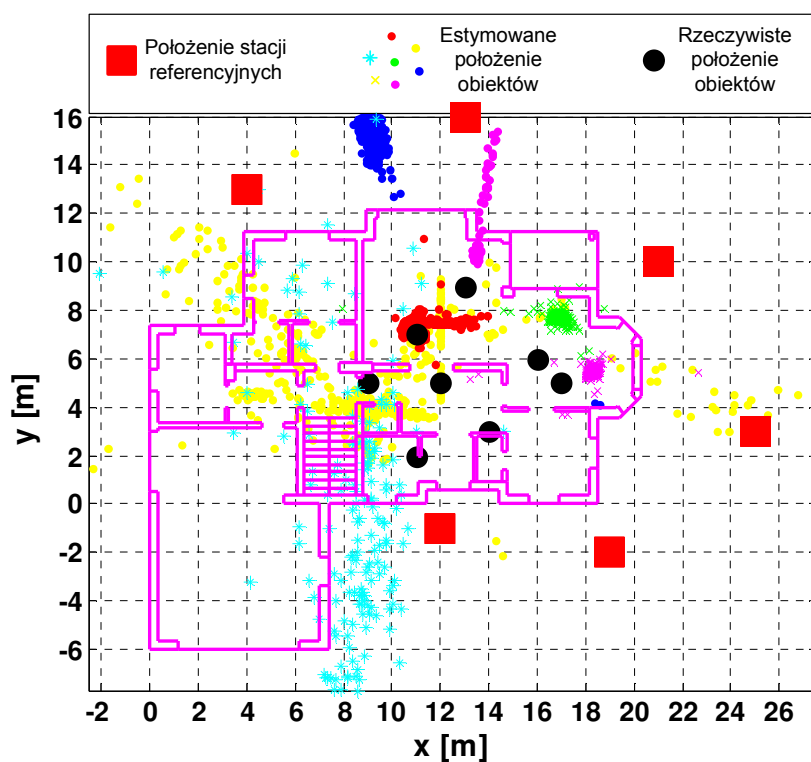
A	Dokładność RMSE [m]	Precyzja RMSE [m]	Odsetek przypadków braku zbieżności [%]	Średnia liczba iteracji
1	4,37	1,22	0,08	126
2	4,00	0,99	0,04	79
3	3,82	0,87	0,00	61
4	3,72	0,79	0,00	51
5	3,65	0,74	0,00	44
6	3,61	0,70	0,00	40
7	3,57	0,67	0,00	37
8	3,54	0,65	0,00	34
9	3,52	0,63	0,00	33
10	3,50	0,62	0,00	32
11	3,49	0,61	0,04	31
12	3,48	0,60	0,04	30
13	3,47	0,59	0,04	29
14	3,46	0,59	0,00	28
15	3,45	0,58	0,86	37
16	3,44	0,58	1,10	41
17	3,43	0,58	1,30	48
18	3,43	0,57	1,41	73
19	3,42	0,58	27,57	303
20	3,42	0,57	28,20	316
21	3,41	0,57	30,20	380
22	3,40	0,57	54,83	568
23	3,39	0,57	55,66	574
24	3,39	0,57	55,93	576
25	3,38	0,58	56,21	580
26	3,37	0,58	57,38	589



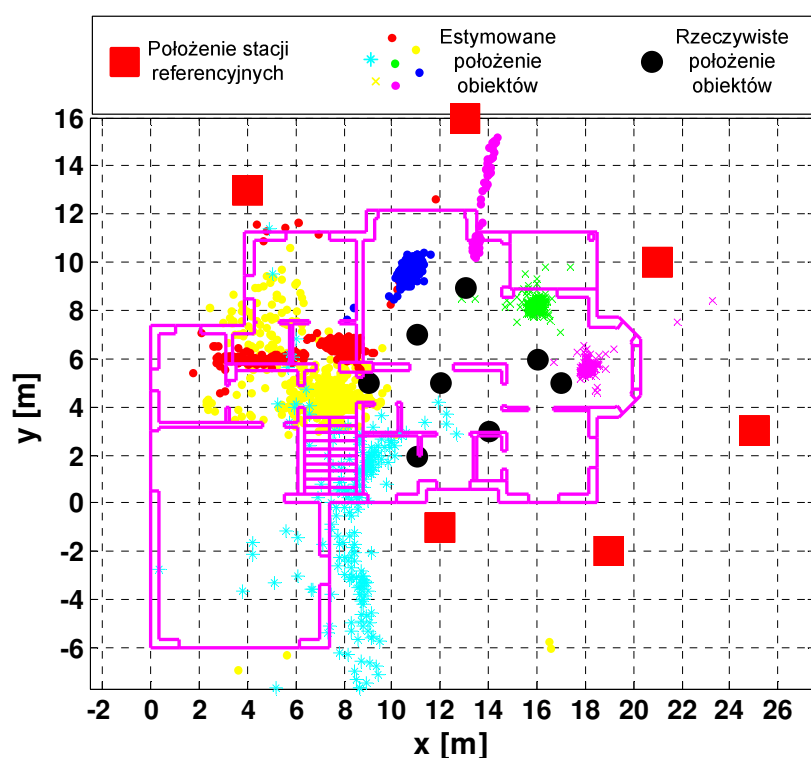
Rys. 6.33. Zależność dokładności, precyzji oraz średniej liczby iteracji od współczynnika kierunkowego B , gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na parterze, dla $A = 2,3$



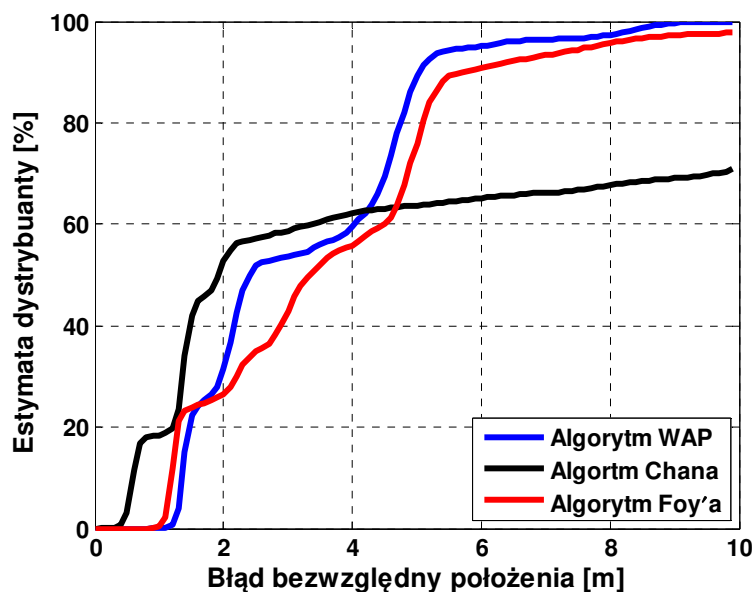
Rys. 6.34. Estymaty położenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomocą algorytmu WAP, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na parterze



Rys. 6.35. Estymaty położenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomocą algorytmu Chana, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na parterze



Rys. 6.36. Estymaty położenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomocą algorytmu Foy'a, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na parterze



Rys. 6.37. Estymaty dystrybuanty błędów wyznaczania położenia dla algorytmów: WAP, Chana oraz Foy'a, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na parterze

Tab. 6.21. Porównanie efektywności algorytmów, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na parterze

Algorytm	Dokładność RMSE [m]	Precyzja RMSE [m]	Prawdopodobieństwo straty
WAP	3,68	0,93	0
Chana	8,33	5,40	$5,5 \cdot 10^{-3}$
Foy'a	5,33	3,23	$7,8 \cdot 10^{-4}$

Wykres estymat dystrybuant błędów wyznaczania położenia wskazuje także na większą efektywność proponowanego algorytmu względem algorytmu Foy'a. Potwierdzają to także wartości błędów dokładności oraz precyzji, które dla algorytmu WAP są mniejsze odpowiednio o ok. 40 % i 70 % w porównaniu z algorytmem Foy'a.

6.2.3. Stacje referencyjne na zewnątrz budynku, MIO wewnątrz na piętrze

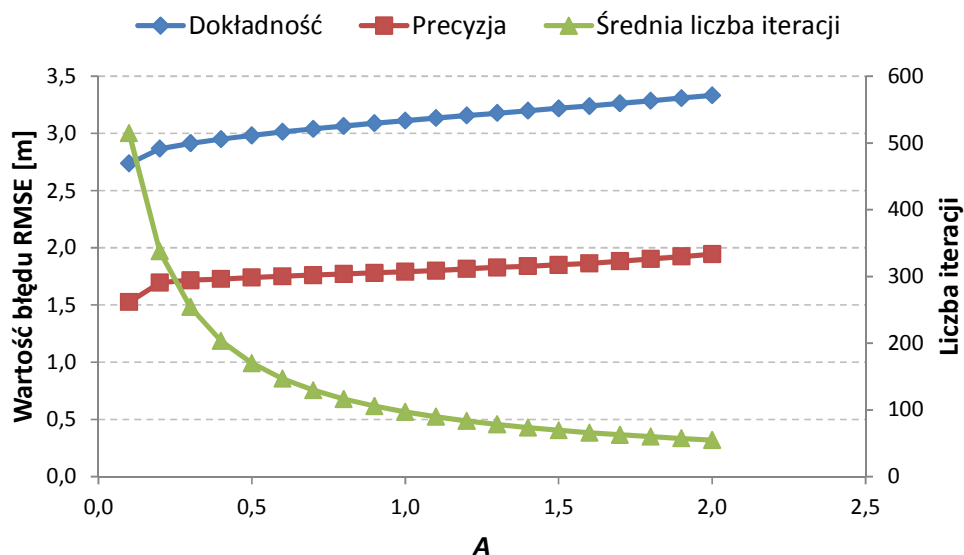
Radiowe pomiary odległości użyte do niniejszej analizy wykonano w nieukończonym jeszcze domu jednorodzinnym. Był to ten sam obiekt, w którym zrealizowano pomiary użyte do analizy w podrozdziale 6.1.3. W tej serii pomiarowej moduły identyfikacji osobistej MIO były rozmieszczone wewnątrz budynku na piętrze, a węzły referencyjne PWR na zewnątrz. Współrzędne węzłów PWR i MIO zostały podane odpowiednio

w tab. 6.8 i tab. 6.22. Wysokość stacji referencyjnych wynosiła 0 m. Rozmieszczenie urządzeń na planie budynku pokazano na rys. A.13 w załączniku A.

Tab. 6.22. Współrzędne modułów MIO rozstawionych wewnątrz budynku na piętrze

Numer MIO	Współrzędna x [m]	Współrzędna y [m]	Współrzędna z [m]
2	8	7	3,04
3	8	5	3,04
4	2	7	3,04
5	5	7	3,04
6	4	4	3,04
7	1	1	3,04
9	-3	5	3,04

Analizę wpływu nachylenia półprostych tworzących funkcję błędu przeprowadzono analogicznie jak w poprzednich podrozdziałach. Na rys. 6.38 i w tab. 6.23 zamieszczono wyniki badań wpływu wartości współczynnika kierunkowego A na efektywność algorytmu WAP, gdy $B = 10$.



Rys. 6.38. Zależność dokładności, precyzji oraz średniej liczby iteracji od współczynnika kierunkowego A , gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na piętrze, dla $B = 10$

Tab. 6.23. Analiza wpływu współczynnika kierunkowego A na efektywność algorytmu WAP, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na piętrze, dla $B = 10$

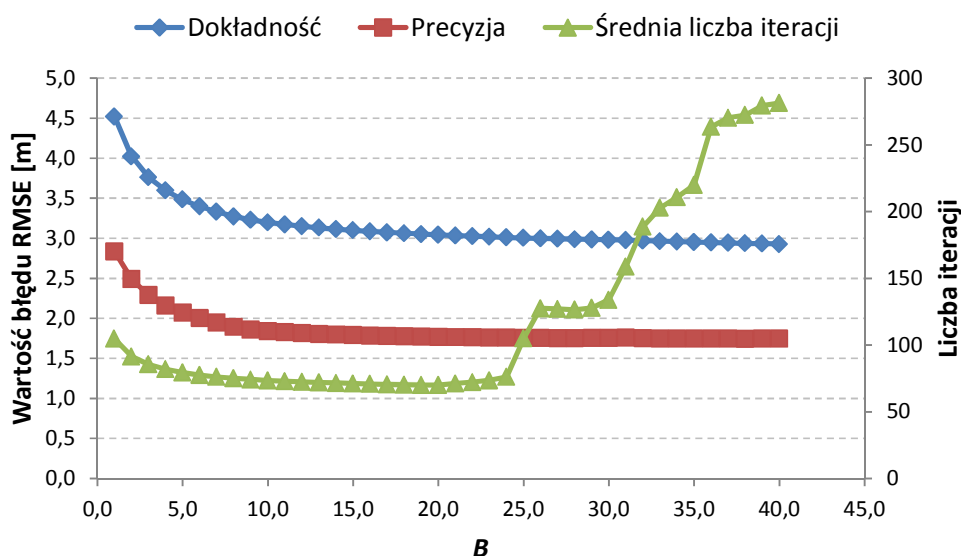
A	Dokładność RMSE [m]	Precyzja RMSE [m]	Odsetek przypadków braku zbieżności [%]	Średnia liczba iteracji
0,1	2,74	1,53	14,22	515
0,2	2,87	1,70	6,01	338
0,3	2,91	1,72	1,57	254
0,4	2,95	1,73	0,27	203
0,5	2,98	1,74	0,18	170
0,6	3,01	1,75	0,12	147
0,7	3,04	1,76	0,08	130
0,8	3,07	1,77	0,08	116
0,9	3,09	1,78	0,06	106
1,0	3,11	1,79	0,06	97
1,1	3,13	1,80	0,06	90
1,2	3,16	1,82	0,04	83
1,3	3,18	1,83	0,02	78
1,4	3,20	1,84	0,00	73
1,5	3,22	1,85	0,00	69
1,6	3,24	1,86	0,00	66
1,7	3,26	1,88	0,00	63
1,8	3,29	1,90	0,00	60
1,9	3,31	1,92	0,00	57
2,0	3,33	1,95	0,00	55

Tak jak w poprzednio omawianych przypadkach, wraz ze wzrostem wartości współczynnika A wzrastają wartości błędów dokładności oraz precyzji, a średnia liczba iteracji i prawdopodobieństwo niespełnienia warunku końca w 1000 krokach iteracji maleją. Z analizy tab. 6.23 wynika, że dla omawianej serii pomiarowej najkorzystniej będzie przyjąć $A = 1,4$. Dla tej wartości współczynnika A , zbadano wpływ parametru B na efektywność pracy proponowanego algorytmu. Wyniki zamieszczono w tab. 6.24 i na rys. 6.39.

W analizowanym zakresie wartości współczynnika B , wraz z jego wzrostem błąd dokładności maleje. W przypadku błędu precyzji maleje on, gdy B wzrasta do wartości 38, następnie wartość tego błędu zaczyna wzrastać. Średnia liczba iteracji zmniejsza się gdy wartości B wzrasta do 20. Przy dalszym zwiększaniu B , średnia liczba iteracji zaczyna się zwiększać. Zakres wartości współczynnika kierunkowego B , dla którego zawsze

Tab. 6.24. Analiza wpływu współczynnika kierunkowego B na efektywność algorytmu WAP, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na piętrze, dla $A = 1,4$

B	Dokładność RMSE [m]	Precyzja RMSE [m]	Odsetek przypadków braku zbieżności [%]	Średnia liczba iteracji
1	4,52	2,84	0,04	105
2	4,02	2,49	0,02	91
3	3,76	2,29	0,00	86
4	3,60	2,16	0,00	82
5	3,48	2,07	0,00	79
6	3,40	2,00	0,00	78
7	3,33	1,95	0,00	76
8	3,27	1,89	0,00	75
9	3,23	1,86	0,00	74
10	3,20	1,84	0,00	73
11	3,17	1,83	0,00	73
12	3,15	1,81	0,00	72
13	3,13	1,80	0,00	72
14	3,11	1,80	0,00	72
15	3,10	1,79	0,00	71
16	3,09	1,78	0,00	71
17	3,07	1,78	0,00	71
18	3,06	1,78	0,00	70
19	3,05	1,77	0,00	70
20	3,04	1,77	0,00	70
21	3,03	1,76	0,14	71
22	3,03	1,76	0,24	72
23	3,02	1,76	0,35	74
24	3,01	1,76	0,43	76
25	3,01	1,75	3,06	105
26	3,00	1,75	6,03	127
27	2,99	1,75	6,01	127
28	2,99	1,75	5,89	127
29	2,98	1,75	5,99	128
30	2,98	1,75	6,13	134
31	2,98	1,76	8,57	159
32	2,97	1,75	11,85	189
33	2,96	1,75	13,58	203
34	2,96	1,75	14,22	211
35	2,95	1,75	14,91	220
36	2,95	1,75	19,59	264
37	2,94	1,75	20,55	270
38	2,94	1,74	20,78	272
39	2,93	1,75	21,50	279
40	2,93	1,75	21,66	281

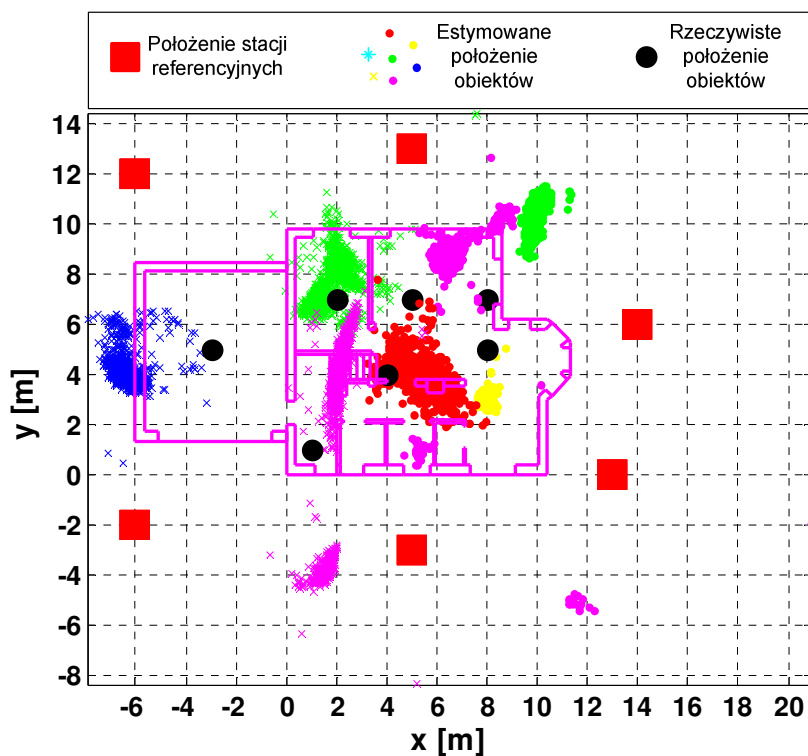


Rys. 6.39. Zależność dokładności, precyzji oraz średniej liczby iteracji od współczynnika kierunkowego B , gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na piętrze, dla $A = 1,4$

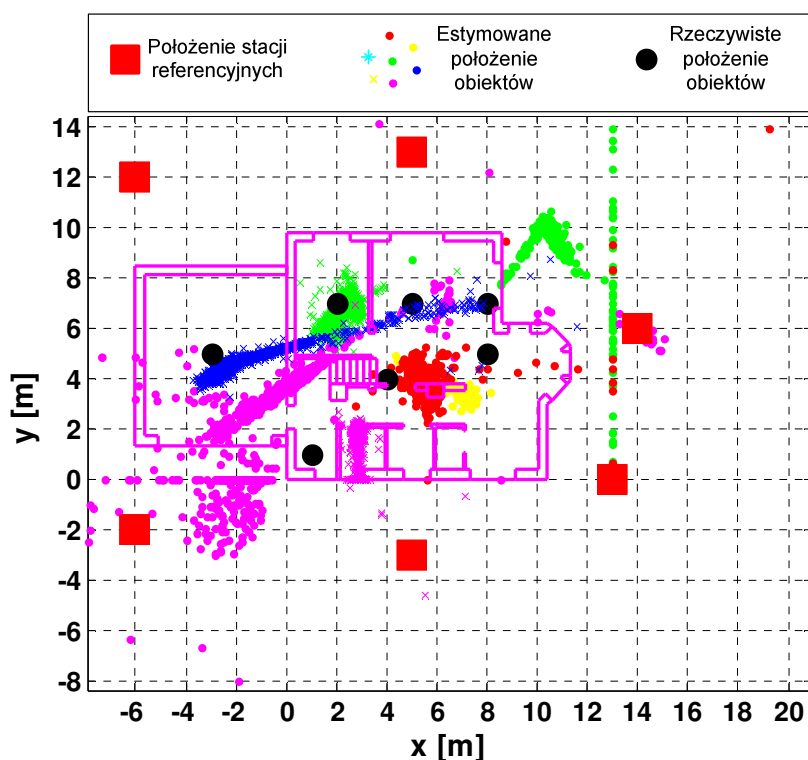
spełniany jest warunek końca w 1000 krokach iteracji, wynosi od 3 do 20. W związku z powyższym, najkorzystniej jest przyjąć dla danej serii pomiarowej $B = 20$.

Dla współczynników kierunkowych $A = 1,4$ i $B = 20$ porównano efektywność pracy algorytmów: WAP, Chana oraz Foy'a. Estymaty położenia obiektów wyznaczone przez każdy z algorytmów pokazano na rysunkach od rys. 6.40 do rys. 6.42. Estymaty dystrybuant błędów wyznaczania położenia dla trzech wymienionych algorytmów zamieszczono na rys. 6.43. W tab. 6.25 znajdują się pierwiastki błędów średniokwadratowych dokładności i precyzji oraz prawdopodobieństwo niewyznaczenia estymaty położenia dla danego zbioru radiowych pomiarów odległości uzyskane dla każdego z tych algorytmów. Analizę wykonano na podstawie 10351 zestawów radiowych pomiarów odległości.

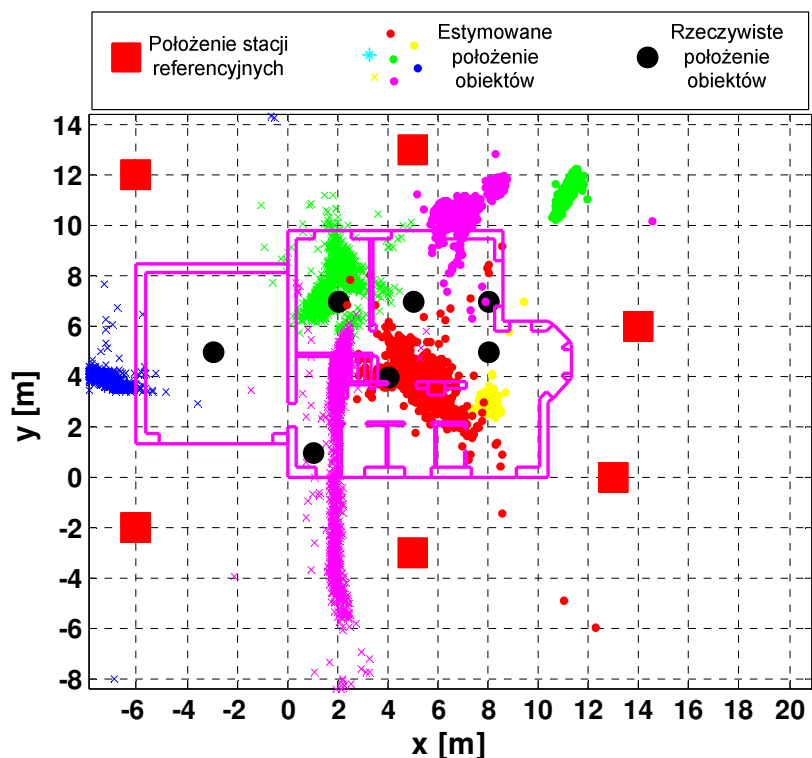
W przypadku danej serii radiowych pomiarów odległości efektywność algorytmu WAP jest największa spośród rozpatrywanych algorytmów. Wartości pierwiastków błędów średniokwadratowych dokładności oraz precyzji są najmniejsze. Względem algorytmu Chana zaobserwowano poprawę dokładności o prawie 70 %, a precyzji o ponad 70 %. Względem algorytmu Foy'a zarówno dokładność jak i precyzja wzrosły o ok. 25 %. Z analizy rys. 6.43 wynika, że dla 68 % zestawów pomiarów odległości uzyskiwane estymaty położenia obiektów algorytmem Chana są dokładniejsze od estymat



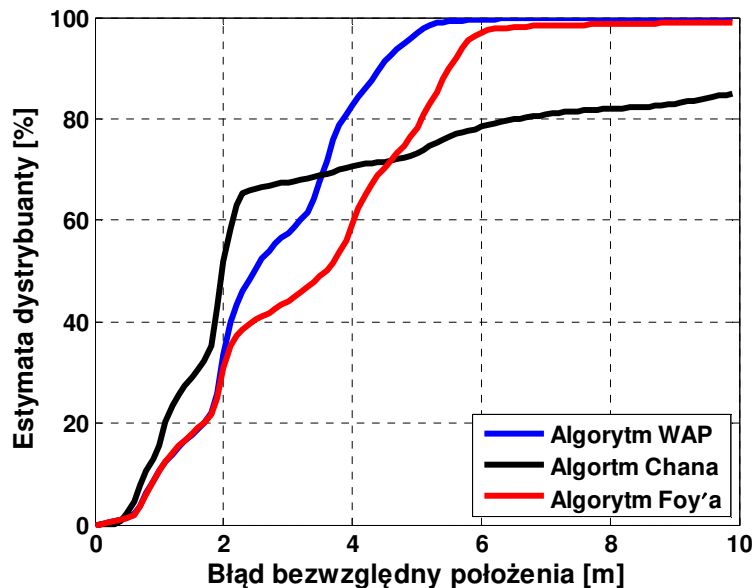
Rys. 6.40. Estymaty położenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomocą algorytmu WAP, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na piętrze



Rys. 6.41. Estymaty położenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomocą algorytmu Chana, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na piętrze



Rys. 6.42. Estymaty położenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomocą algorytmu Foy'a, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na piętrze



Rys. 6.43. Estymaty dystrybucyjności błędów wyznaczania położenia dla algorytmów: WAP, Chana oraz Foy'a, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na piętrze

Tab. 6.25. Porównanie efektywności algorytmów, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na piętrze

Algorytm	Dokładność RMSE [m]	Precyzja RMSE [m]	Prawdopodobieństwo straty
WAP	3,04	1,80	0
Chana	9,70	6,25	$1,8 \cdot 10^{-3}$
Foy'a	4,05	2,41	0

uzyskiwanych algorytmami Foy'a oraz WAP. Jednakże błędy wyznaczenia położenia przez algorytm Chana dla pozostałych 32 % zestawów pomiarów odległości są znacznie większe w porównaniu z pozostałymi dwoma algorytmami. Porównując uzyskane dystrybuanty z rys. 6.43 dla proponowanego algorytmu i algorytmu Foy'a widać, że ten pierwszy dla żadnego z zakresów błędów wyznaczania położenia nie charakteryzuje się większą wartością błędu dokładności od drugiego algorytmu. Stąd wniosek, że efektywność (oceniana na podstawie wartości błędów dokładności, precyzji oraz prawdopodobieństwa straty) proponowanego wewnątrzbudynkowy algorytm wyznaczania położenia obiektów WAP przewyższa efektywność pozostałych dwóch algorytmów.

6.2.4. Wnioski

Badania wpływu wartości współczynników kierunkowych półprostych tworzących funkcję błędu dowodzą, że mają one wpływ na efektywność algorytmu WAP. Wpływają na dokładność i precyzję wyznaczanych estymat położenia obiektów, a także na średnią liczbę iteracji oraz zbieżność proponowanego algorytmu. Dlatego też, konieczna jest kalibracja wewnątrzbudynkowego algorytmu wyznaczania położenia WAP, tak aby odpowiednio dobrać jego parametry do danego środowiska propagacyjnego, w którym ma być realizowane wyznaczanie położenia obiektów.

Rozdział 7.

Wyniki badań symulacyjnych

W rozdziale 6 wykazano, że zaproponowany algorytm WAP jest zbieżny oraz przedstawiono sposób doboru wartości współczynników kierunkowych półprostych tworzących funkcję błędu. Dla rozpatrywanych serii pomiarowych przeprowadzono także analizę porównawczą algorytmów: WAP, Chana oraz Foy'a. W każdej z analizowanych serii rzeczywistych pomiarów odległości estymaty położenia obiektu uzyskiwane z użyciem proponowanego nowego algorytmu cechowały najmniejsze wartości średnie błędów dokładności oraz precyzji w porównaniu z estymatami położenia wyznaczonymi z użyciem pozostałych dwóch algorytmów. W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki dodatkowych badań zrealizowanych na bazie symulacji komputerowych. W pierwszym badaniu porównano efektywność każdego z algorytmów (oceniając tutaj tylko na podstawie wartości pierwiastka błędu średniokwadratowego dokładności (6.1)) z granicą wyznaczoną z użyciem twierdzenia Cramera-Rao CRLB (ang. *Cramer-Rao Lower Bound*) [52]. W drugim badaniu pokazano działanie algorytmu WAP dla przypadku trójwymiarowego. Celem trzeciego badania była analiza złożoności obliczeniowej proponowanego algorytmu w stosunku do algorytmów Chana oraz Foy'a.

7.1. Ocena efektywności pracy algorytmu WAP

Granica Cramera-Rao stanowi możliwy minimalny średniokwadratowy błąd estymatora będącego rozwiązaniem danego równania/układu równań. W przypadku niniejszej pracy będzie to minimalny średniokwadratowy błąd określenia położenia obiektu będącego rozwiązaniem równania nawigacyjnego

$$\begin{cases} R_1 = \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2} \\ \vdots \\ R_M = \sqrt{(X_M - x)^2 + (Y_M - y)^2}. \end{cases} \quad (7.1)$$

Aby wyznaczyć granicę CRLB dla powyższego układu równań konieczne jest określenie funkcji gęstości prawdopodobieństwa, która dla tego układu, przy założeniu gaussowskiego rozkładu błędów pomiarów odległości, wynosi

$$p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{(M+1)/2}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{n=1}^M (R_n - \sqrt{(X_n - x)^2 + (Y_n - y)^2})^2 \right], \quad (7.2)$$

gdzie:

- \mathbf{R} jest wektorem, którego elementy reprezentują odległości do poszczególnych stacji referencyjnych,
- $\boldsymbol{\theta}$ jest wektorem estymowanych współrzędnych (x, y) ,
- σ jest odchyleniem standardowym realizowanych pomiarów odległości.

Następnie należy wypełnić tzw. macierz informacyjną Fishera [52]

$$\mathbf{I}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} -E \left[\frac{\partial^2 \ln(p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}))}{\partial x^2} \right] & -E \left[\frac{\partial^2 \ln(p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}))}{\partial x \partial y} \right] \\ -E \left[\frac{\partial^2 \ln(p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}))}{\partial y \partial x} \right] & -E \left[\frac{\partial^2 \ln(p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}))}{\partial y^2} \right] \end{bmatrix}. \quad (7.3)$$

W tym celu konieczne jest wyznaczenie pierwszych pochodnych z logarytmu naturalnego przedstawionej funkcji gęstości prawdopodobieństwa:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \ln(p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}))}{\partial x} &= -\frac{1}{\sigma^2} \sum_{n=1}^M \left[(R_n - \sqrt{(X_n - x)^2 + (Y_n - y)^2}) \cdot \frac{X_n - x}{\sqrt{(X_n - x)^2 + (Y_n - y)^2}} \right], \\ \frac{\partial \ln(p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}))}{\partial y} &= -\frac{1}{\sigma^2} \sum_{n=1}^M \left[(R_n - \sqrt{(X_n - x)^2 + (Y_n - y)^2}) \cdot \frac{Y_n - y}{\sqrt{(X_n - x)^2 + (Y_n - y)^2}} \right], \end{aligned} \quad (7.4)$$

co następnie pozwoli wyznaczyć drugie pochodne stanowiące odpowiednie elementy macierzy informacyjnej Fishera:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \ln(p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}))}{\partial x^2} &= -\frac{1}{\sigma^2} \sum_{n=1}^M \left[\frac{(X_n - x)^2}{(X_n - x)^2 + (Y_n - y)^2} \right], \\ \frac{\partial^2 \ln(p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}))}{\partial x \partial y} &= -\frac{1}{\sigma^2} \sum_{n=1}^M \left[\frac{(X_n - x) \cdot (Y_n - y)}{(X_n - x)^2 + (Y_n - y)^2} \right], \end{aligned} \quad (7.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \ln(p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}))}{\partial y^2} &= -\frac{1}{\sigma^2} \sum_{n=1}^M \left[\frac{(Y_n - y)^2}{(X_n - x)^2 + (Y_n - y)^2} \right], \\ \frac{\partial^2 \ln(p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}))}{\partial y \partial x} &= -\frac{1}{\sigma^2} \sum_{n=1}^M \left[\frac{(X_n - x) \cdot (Y_n - y)}{(X_n - x)^2 + (Y_n - y)^2} \right]. \end{aligned} \quad (7.6)$$

Następnie obliczana jest odwrotność macierzy informacyjnej Fishera

$$\mathbf{CRLB} = \mathbf{I}(\boldsymbol{\theta})^{-1}. \quad (7.7)$$

Wówczas pierwiastki błędów średniokwadratowych stanowią główne przekątne wyżej wymienionej macierzy i określane są następująco:

$$\begin{aligned} RMSE_x &= \sqrt{\mathbf{CRLB}(1,1)}, \\ RMSE_y &= \sqrt{\mathbf{CRLB}(2,2)}, \\ RMSE &= \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2}, \end{aligned} \quad (7.8)$$

gdzie:

- $RMSE_x$ – pierwiastek błędu średniokwadratowego dla współrzędnej x ,
- $RMSE_y$ – pierwiastek błędu średniokwadratowego dla współrzędnej y ,
- $RMSE$ – pierwiastek łącznego błędu średniokwadratowego będący graniczną wartością dokładności estymowanego położenia obiektu.

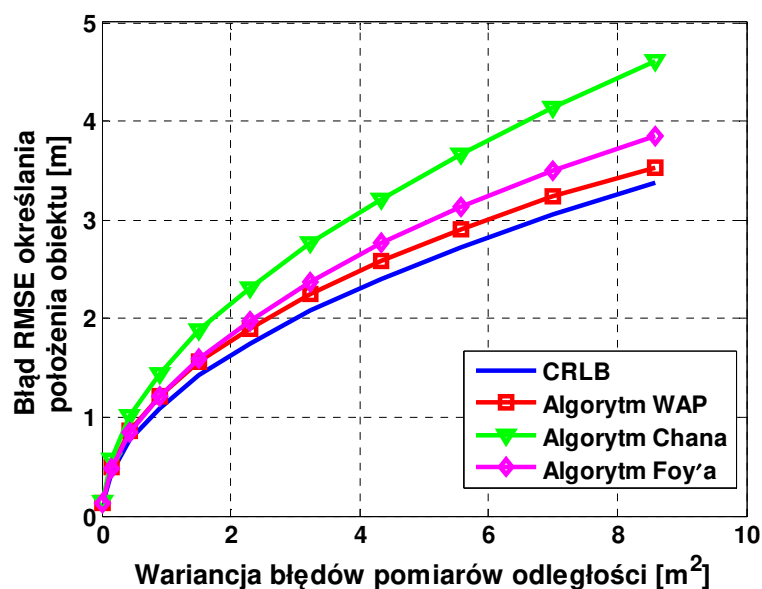
Z powyższych wzorów wynika, że aby określić wartości średnie wypełniające elementy macierzy informacyjnej Fishera, konieczne jest wyznaczenie pochodnych (7.5) i (7.6) we wszystkich punktach wypełniających przestrzeń zainteresowania. Przestrzeń ta, do wyznaczania granicy CRLB, została ograniczona do obszaru otoczonego przez stacje referencyjne powiększonego w każdym z kierunków o 3 m. Zatem zakres współrzędnych x był ograniczony od dołu najmniejszą z wartości współrzędnych x stacji referencyjnych pomniejszoną o 3 m, a od góry przez największą z tych wartości powiększoną o 3 m. Analogicznie został dobrany zakres współrzędnych y : od dołu ograniczony przez najmniejszą z wartości współrzędnych y stacji referencyjnych pomniejszoną o 3 m, a od góry przez największą powiększoną o 3 m. Macierz informacyjna Fishera była obliczana w punktach przesuwanych z krokiem 0,25 m w każdej z osi układu współrzędnych.

W celu oceny wpływu liczby stacji referencyjnych na dokładność uzyskiwanych estymat położenia obiektu, badania wykonano dla różnej liczby tych stacji: od 3 do 7. W każdym punkcie, w którym wyznaczane były pochodne niezbędne do wyznaczenia granicy CRLB, zasymulowano radiowe pomiary odległości w obecności szumu (nie uwzględniano propagacji wielodrogowej) o zadanej wariancji błędów pomiarowych i wartości średniej tych błędów równej zero. Następnie dla 100 zestawów pomiarów odległości w danym punkcie wyznaczono estymaty położenia obiektu trzema algorytmami: WAP, Chana oraz Foy'a. W przypadku algorytmu WAP przyjęto wartości współczynników kierunkowych półprostych tworzących funkcję błędu $A = 1$ i $B = 10$ oraz parametr $\alpha = 0,2$. Na podstawie wszystkich uzyskanych estymat położenia obiektu w całym rozważanym obszarze zainteresowania wyznaczano wartości błędów dokładności ze wzoru (6.1) dla każdego algorytmu dla danej wartości wariancji błędów pomiarów odległości. W ten sposób uzyskano zależności błędu dokładności RMSE wyznaczania położenia obiektu od wariancji błędów pomiarów odległości dla każdego z algorytmów, które pokazano na rysunkach od rys. 7.1 do rys. 7.5 dla wybranych liczb stacji referencyjnych.

Ponieważ rozważane algorytmy są przeznaczone do określania położenia obiektów na płaszczyźnie, pierwszym rozważanym przypadkiem było rozstawienie stacji referencyjnych w wierzchołkach trójkąta równobocznego. Współrzędne stacji referencyjnych dla tego przypadku zamieszczono w tab. 7.1. Wyniki symulacji pokazano na rys. 7.1. Kolorem niebieskim oznaczono granicę CRLB, czerwonym błąd RMSE dokładności określania położenia obiektu dla proponowanego algorytmu WAP, kolorem zielonym dla algorytmu Chana, a fioletowym dla algorytmu Foy'a.

Tab. 7.1. Współrzędne stacji referencyjnych rozstawionych w wierzchołkach trójkąta

Współrzędna x [m]	Współrzędna y [m]
0,0	0,0
10,0	0,0
5,0	8,66



Rys. 7.1. Zależność pierwiastka błędu średniokwadratowego określania położenia obiektu od wariancji pomiarów odległości w obecności szumu, gdy liczba stacji referencyjnych wynosiła 3

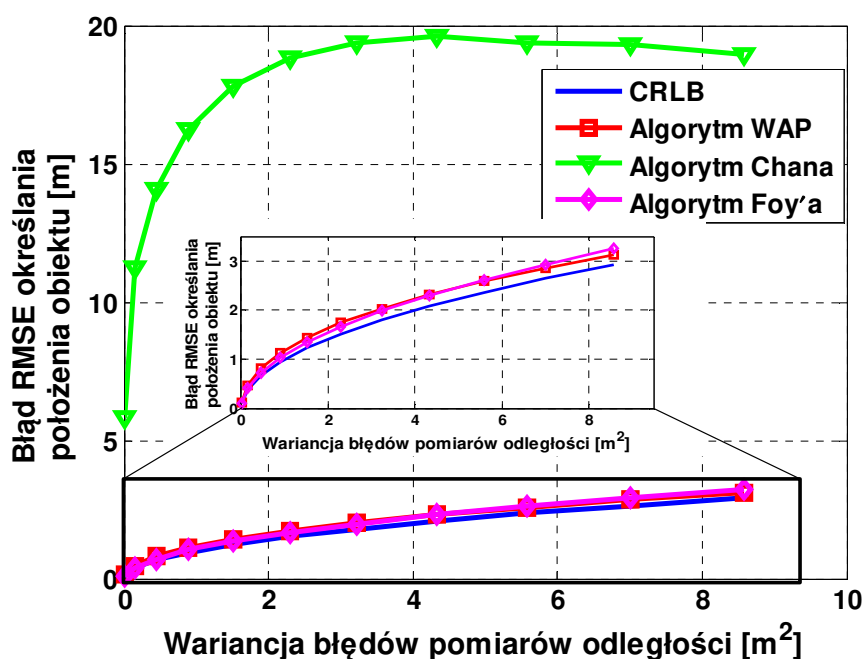
Z przedstawionych rezultatów symulacji, gdy liczba stacji referencyjnych wynosiła 3, wynika, że proponowany wewnętrzny algorytm wyznaczania położenia obiektów cechują najmniejsze wartości błędów uzyskiwanych estymat położenia w porównaniu z rozpatrywanymi algorytmami.

W tab. 7.2 zamieszczono współrzędne stacji referencyjnych, gdy liczba stacji uczestniczących w radiowych pomiarach odległości była większa niż 3. Podczas symulacji pracy systemu dla 4 stacji referencyjnych użyto stacji o numerach od 1 do 4. Podczas

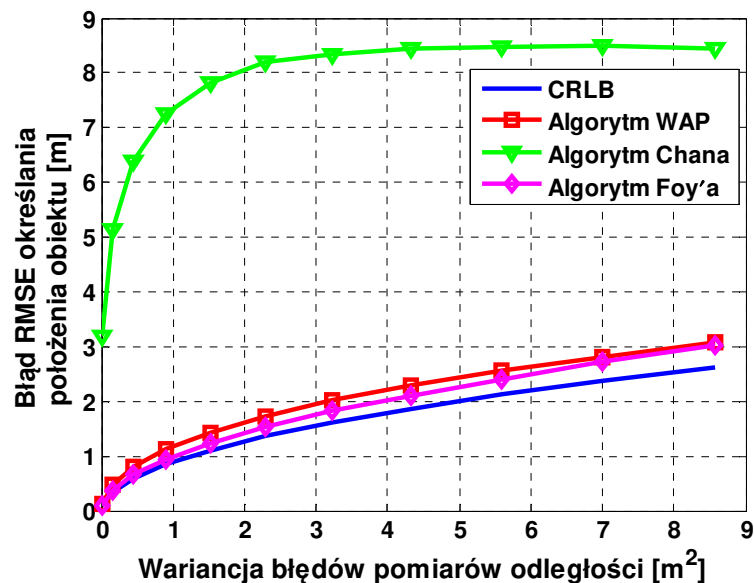
symulacji dla 5 stacji użyto tych o numerach od 1 do 5, dla 6 użyto tych o numerach od 1 do 6, dla 7 od 1 do 7. Wyniki badań pokazano na rysunkach od rys. 7.2 do rys. 7.5. Prezentacja wyników jest analogiczna jak na rys. 7.1.

Tab. 7.2. Współrzędne stacji referencyjnych podczas symulacji dla liczby stacji referencyjnych większej niż 3

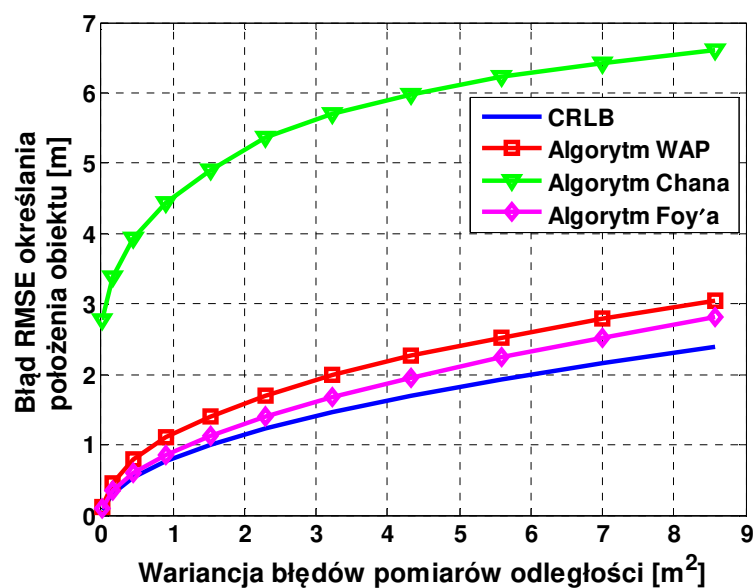
Numer stacji referencyjnej	Współrzędna x [m]	Współrzędna y [m]
1	0	0
2	0	10
3	10	0
4	10	10
5	5	-1
6	11	5
7	5	11



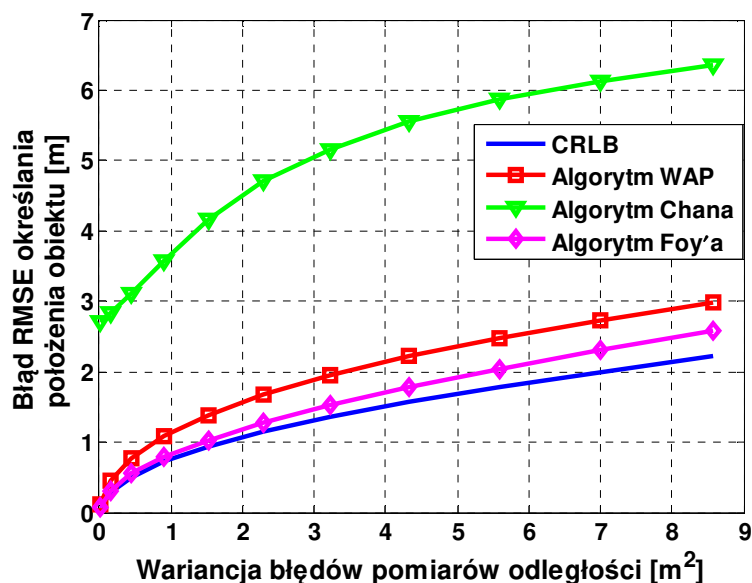
Rys. 7.2. Zależność pierwiastka błędu średniokwadratowego określania położenia obiektu od wariancji pomiarów odległości w obecności szumu, gdy liczba stacji referencyjnych wynosiła 4



Rys. 7.3. Zależność pierwiastka błędu średniokwadratowego określania położenia obiektu od wariancji pomiarów odległości w obecności szumu, gdy liczba stacji referencyjnych wynosiła 5



Rys. 7.4. Zależność pierwiastka błędu średniokwadratowego określania położenia obiektu od wariancji pomiarów odległości w obecności szumu, gdy liczba stacji referencyjnych wynosiła 6



Rys. 7.5. Zależność pierwiastka błędu średniokwadratowego określania położenia obiektu od wariancji pomiarów odległości w obecności szumu, gdy liczba stacji referencyjnych wynosiła 7

Przedstawione wyniki symulacji dowodzą, że wartości błędów dokładności wyznaczania położenia obiektów przez proponowany algorytm WAP są zbliżone do wartości tych błędów uzyskiwane przez algorytm Foy'a gdy rozkład błędów danych wejściowych jest gaussowski. Widoczne jest, że wraz ze zwiększeniem liczby stacji referencyjnych przewaga algorytmu Foy'a (z punktu widzenia uzyskiwanych wartości błędów dokładności) nad algorytmem WAP zwiększa się. Dla wariancji 8,5 m² i siedmiu stacji referencyjnych wartość błędu dokładności dla algorytmu Foy'a jest o 40 cm mniejsza niż dla algorytmu WAP. Największe wartości błędów dokładności estymowanych współrzędnych położenia obiektu w każdej symulacji obserwowano dla algorytmu Chana.

Przeprowadzono analizę uzyskiwanych wartości błędów określania położenia dla każdego z algorytmów w zależności od liczby stacji referencyjnych. W tab. 7.3 zamieszczono wartości tych błędów dla wariancji błędów pomiarów odległości 8,6 m². Można zauważyć, że wraz ze wzrostem liczby stacji referencyjnych błędy estymat położenia dla każdego z algorytmów maleją, co jest zgodne z przewidywaniami. Wyjątek stanowi wartość błędu dokładności estymat położenia uzyskanych dla algorytmu Chana dla 3 stacji referencyjnych. Jest ona mniejsza nawet dla tej uzyskanej dla siedmiu stacji referencyjnych. Wynika to z faktu, że procedury wyznaczania położenia w algorytmie Chana są zupełnie inne (dla płaszczyzny 2D) dla przypadku 3 stacji referencyjnych i dla przypadku większej liczby tych stacji od 3.

Tab. 7.3. Błąd RMSE określania położenia obiektu [m] w zależności od liczby stacji referencyjnych dla wariancji błędów pomiarów odległości 8,6 m²

Liczba stacji referencyjnych	Granica CRLB	Algorytm WAP	Algorytm Chana	Algorytm Foy'a
3	3,38	3,52	4,61	3,85
4	2,93	3,25	8,58	3,12
5	2,62	3,06	8,45	3,01
6	2,39	3,03	6,61	2,81
7	2,22	2,98	6,36	2,58

Błąd dokładności uzyskiwanych estymat położenia obiektów proponowanym wewnątrzbudynkowym algorytmem wyznaczania położenia obiektów WAP, dla błędów danych wejściowych o rozkładzie Gaussa i wartości średniej równej zero, jest nieznacznie większy od granicznej wartości określonej za pomocą twierdzenia CRLB. Dla mniejszej liczby stacji ta różnica jest mniejsza (wynosi 14 cm dla wariancji błędów pomiarów odległości 8,6 m²), dla większej liczby stacji jest większa (wynosi 76 cm dla siedmiu stacji referencyjnych). Dowiedzono także, że wraz ze zwiększeniem liczby stacji referencyjnych wartości błędów określania położenia algorytmem WAP zmniejszają się.

7.2. Algorytm WAP dla przypadku trójwymiarowego

Wszystkie prowadzone wyżej rozważania dotyczyły przypadku dwuwymiarowego, gdzie położenie obiektu było wyznaczane na płaszczyźnie. Proponowany wewnątrzbudynkowy algorytm wyznaczania położenia obiektów WAP może być również stosowany w przestrzeni trójwymiarowej. Wówczas należy we wzorach zaprezentowanych w podrozdziale 3.2 uwzględnić trzecią składową z. Wzór (3.52) należy więc zapisać następująco

$$r_i = \sqrt{(X_i - x_v)^2 + (Y_i - y_v)^2 + (Z_i - z_v)^2}, \quad (7.9)$$

gdzie Z_i oznacza wysokość i -tej stacji referencyjnej, a z_v estymowaną wysokość stacji ruchomej. Dodatkowo w każdej iteracji należy wyznaczyć korekty dla trzeciej współrzędnej

$$\Delta Z_i = \alpha \cdot f(R_i, r_i) \cdot \frac{z_v - Z_i}{r_i}, \quad (7.10)$$

a nową współrzędną z_{vN} obliczyć z zależności

$$z_{vN} = z_v + \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \Delta Z_i, \quad (7.11)$$

gdzie M to liczba stacji referencyjnych. Nieliniowa funkcja błędu dla współrzędnej z jest taka jak dla pozostałych współrzędnych i opisana zależnością (3.56).

W celu udowodnienia, że wyznaczanie położenia obiektów algorytmem WAP w przestrzeni 3D jest możliwe, wykonano symulacje w podobny sposób jak w podrozdziale 7.1, uwzględniając dodatkowo współrzędną z ($\alpha = 0,2$, $A = 1$, $B = 10$). W każdej z trzech osi kolejne punkty, w których symulowano radiowe pomiary odległości, były wyznaczane z krokiem 1 m. Przyjęto, że rozkład błędów pomiarów odległości jest gaussowski o zerowej wartości średniej. Współrzędne stacji referencyjnych zamieszczono w tab. 7.4. Dla każdej z rozpatrywanych wariacji błędów pomiarów odległości wyznaczano także granicę CRLB. Granica ta była liczona dla równania nawigacyjnego o postaci

$$\begin{cases} R_1 = \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2 + (Z_1 - z)^2} \\ \vdots \\ R_M = \sqrt{(X_M - x)^2 + (Y_M - y)^2 + (Z_M - z)^2}. \end{cases} \quad (7.12)$$

Wówczas funkcja gęstości prawdopodobieństwa dla tego układu równań jest następująca

$$p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{(M+1)/2}} \cdot e^{\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{n=1}^M (R_n - \sqrt{(X_n - x)^2 + (Y_n - y)^2 + (Z_n - z)^2})^2\right]}, \quad (7.13)$$

a macierz informacyjna Fishera powinna być wypełniona wg wzoru

$$\mathbf{I}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} -E \left[\frac{\partial^2 \ln(p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}))}{\partial x^2} \right] & -E \left[\frac{\partial^2 \ln(p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}))}{\partial x \partial y} \right] & -E \left[\frac{\partial^2 \ln(p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}))}{\partial x \partial z} \right] \\ -E \left[\frac{\partial^2 \ln(p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}))}{\partial y \partial x} \right] & -E \left[\frac{\partial^2 \ln(p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}))}{\partial y^2} \right] & -E \left[\frac{\partial^2 \ln(p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}))}{\partial y \partial z} \right] \\ -E \left[\frac{\partial^2 \ln(p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}))}{\partial z \partial x} \right] & -E \left[\frac{\partial^2 \ln(p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}))}{\partial z \partial y} \right] & -E \left[\frac{\partial^2 \ln(p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}))}{\partial z^2} \right] \end{bmatrix}, \quad (7.14)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \ln(p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}))}{\partial x^2} &= -\frac{1}{\sigma^2} \sum_{n=1}^M \left[\frac{(X_n - x)^2}{(X_n - x)^2 + (Y_n - y)^2 + (Z_n - z)^2} \right], \\ \frac{\partial^2 \ln(p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}))}{\partial x \partial y} &= -\frac{1}{\sigma^2} \sum_{n=1}^M \left[\frac{(X_n - x) \cdot (Y_n - y)}{(X_n - x)^2 + (Y_n - y)^2 + (Z_n - z)^2} \right], \\ \frac{\partial^2 \ln(p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}))}{\partial x \partial z} &= -\frac{1}{\sigma^2} \sum_{n=1}^M \left[\frac{(X_n - x) \cdot (Z_n - z)}{(X_n - x)^2 + (Y_n - y)^2 + (Z_n - z)^2} \right], \end{aligned} \quad (7.15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \ln(p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}))}{\partial y^2} &= -\frac{1}{\sigma^2} \sum_{n=1}^M \left[\frac{(Y_n - y)^2}{(X_n - x)^2 + (Y_n - y)^2 + (Z_n - z)^2} \right], \\ \frac{\partial^2 \ln(p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}))}{\partial y \partial x} &= -\frac{1}{\sigma^2} \sum_{n=1}^M \left[\frac{(X_n - x) \cdot (Y_n - y)}{(X_n - x)^2 + (Y_n - y)^2 + (Z_n - z)^2} \right], \\ \frac{\partial^2 \ln(p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}))}{\partial y \partial z} &= -\frac{1}{\sigma^2} \sum_{n=1}^M \left[\frac{(X_n - x) \cdot (Z_n - z)}{(X_n - x)^2 + (Y_n - y)^2 + (Z_n - z)^2} \right], \end{aligned} \quad (7.16)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 \ln(p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}))}{\partial z^2} &= -\frac{1}{\sigma^2} \sum_{n=1}^M \left[\frac{(Z_n - z)^2}{(X_n - x)^2 + (Y_n - y)^2 + (Z_n - z)^2} \right], \\
\frac{\partial^2 \ln(p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}))}{\partial z \partial x} &= -\frac{1}{\sigma^2} \sum_{n=1}^M \left[\frac{(X_n - x) \cdot (Z_n - z)}{(X_n - x)^2 + (Y_n - y)^2 + (Z_n - z)^2} \right], \\
\frac{\partial^2 \ln(p(\mathbf{R}, \boldsymbol{\theta}))}{\partial z \partial y} &= -\frac{1}{\sigma^2} \sum_{n=1}^M \left[\frac{(Y_n - y) \cdot (Z_n - z)}{(X_n - x)^2 + (Y_n - y)^2 + (Z_n - z)^2} \right].
\end{aligned} \tag{7.17}$$

Analogicznie jak dla przypadku dwuwymiarowego wyznaczana jest odwrotność macierzy informacyjnej Fishera

$$\mathbf{CRLB} = \mathbf{I}(\boldsymbol{\theta})^{-1} \tag{7.18}$$

i obliczane są pierwiastki błędów średniokwadratowych:

$$\begin{aligned}
RMSE_x &= \sqrt{\mathbf{CRLB}(1,1)}, \\
RMSE_y &= \sqrt{\mathbf{CRLB}(2,2)}, \\
RMSE_z &= \sqrt{\mathbf{CRLB}(3,3)}, \\
RMSE &= \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2 + RMSE_z^2},
\end{aligned} \tag{7.19}$$

gdzie:

- $RMSE_x$ – pierwiastek błędu średniokwadratowego dla współrzędnej x ,
- $RMSE_y$ – pierwiastek błędu średniokwadratowego dla współrzędnej y ,
- $RMSE_z$ – pierwiastek błędu średniokwadratowego dla współrzędnej z ,
- $RMSE$ – pierwiastek łącznego błędu średniokwadratowego będący graniczną wartością dokładności estymowanego położenia obiektu.

Tab. 7.4. Współrzędne stacji referencyjnych podczas symulacji w przestrzeni 3D

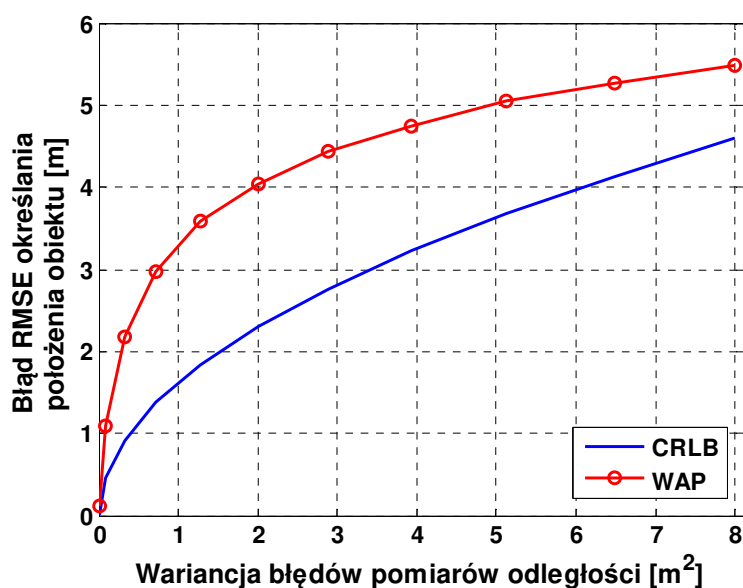
Współrzędna x [m]	Współrzędna y [m]	Współrzędna z [m]
0	0	0
0	10	5
10	0	0
10	10	10

Wyniki symulacji oraz obliczeń zamieszczono na rys. 7.6 w postaci zależności błędu określania położenia obiektu od wariancji błędów pomiarów odległości. Błąd określania położenia obiektu obliczano następująco

$$\Delta R_{3D} = \sqrt{\frac{1}{N \cdot K} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N ((x_{ki} - X_{MIOk})^2 + (y_{ki} - Y_{MIOk})^2 + (z_{ki} - Z_{MIOk})^2)}, \tag{7.20}$$

gdzie:

- N – liczba estymat współrzędnych położenia obiektu w danym punkcie (podczas symulacji przyjęto $N = 100$),
- K – liczba punktów w obszarze (podczas symulacji obszar był ograniczony dla każdej współrzędnej w zakresie od -1 m do 11 m),
- x_{ki}, y_{ki}, z_{ki} – współrzędne i -tej estymaty położenia obiektu w k -tym punkcie, $i = 1, 2, \dots, N$,
- $X_{MIOk}, Y_{MIOk}, Z_{MIOk}$ – współrzędne położenia k -tego punktu, $k = 1, 2, \dots, K$.



Rys. 7.6. Zależność pierwiastka błędu średniokwadratowego określania położenia obiektu od wariancji pomiarów odległości dla przypadku trójwymiarowego

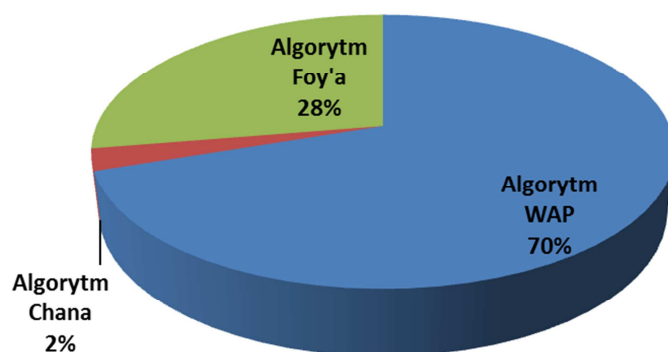
Przedstawiony wykres dowodzi, że wyznaczanie położenia algorytmem WAP jest możliwe w przestrzeni trójwymiarowej. Uzyskiwane wartości błędów wyznaczania położenia dla algorytmu WAP, gdy rozkład błędów pomiarów odległości jest gaussowski o zerowej wartości średniej, są większe od granicznej wartości błędów określania położenia uzyskanej na podstawie twierdzenia CRLB średnio o 1,24 m.

7.3. Nakład przetwarzania algorytmu WAP

W systemach czasu rzeczywistego istotnym zagadnieniem jest czas realizacji obliczeń. Czas ten wynika ze złożoności obliczeniowej procedur składających się na dany algorytm. Jednak przeprowadzenie oceny złożoności obliczeniowej algorytmu zaimplementowanego w postaci oprogramowania jest zagadnieniem trudnym. Dlatego też, zde-

cydowano się przeprowadzić analizę nakładu przetwarzania, zdefiniowanego jako średni czas pracy procesora, wykorzystany przez procesy użytego narzędzia programowego (Matlab) do implementacji poszczególnych algorytmów estymacji położenia obiektów. Analizę nakładu przetwarzania algorytmów przeprowadzono dla czterech stacji referencyjnych o współrzędnych takich jak stacje o numerach od 1 do 4 w tab. 7.2. W zadanym obszarze, ograniczonym w zakresie współrzędnych x i y od -3 m do 13 m, z krokiem co 0,25 m wyznaczano punkty, w których były realizowane symulowane pomiary odległości do wszystkich czterech stacji referencyjnych. W każdym punkcie wygenerowano 100 zestawów pomiarów odległości. Dla każdego z tych zestawów wyznaczano estymaty położenia obiektu algorytmami: WAP, Chana oraz Foy'a. Dla każdego z wymienionych algorytmów mierzono czas potrzebny na wykonanie funkcji z zaimplementowanym algorytmem. Zmierzone czasy zostały uśrednione przez liczbę uzyskanych zestawów pomiarów odległości w każdym z punktów. W przypadku iteracyjnych algorytmów WAP oraz Foy'a ustalono, że podczas tych analiz liczba wykonanych iteracji zawsze wynosiła 100. Symulację wykonano na komputerze klasy PC z zainstalowanym 64-bitowym systemem operacyjnym Windows 7, procesorem Intel(R) Core(TM) i5 CPU 480 M 2,67 GHz oraz pamięcią RAM o pojemności 8 GB. Procentowy udział czasu przetwarzania poszczególnych algorytmów przedstawiono na rys. 7.7. Sumaryczny czas wyznaczania położenia obiektu trzema algorytmami dla jednego zestawu pomiarów odległości wyniósł średnio 22,776 ms. Na czas ten składa się:

- średni czas realizacji procedur algorytmu WAP (100 iteracji): 15,898 ms,
- średni czas realizacji procedur algorytmu Chana: 0,589 ms,
- średni czas realizacji procedur algorytmu Foy'a (100 iteracji): 6,289 ms.



Rys. 7.7. Procentowy udział czasu wykonywania algorytmów wyznaczania położenia obiektów

Czas wykonywania algorytmu WAP jest ponad dwa razy dłuższy niż czas wykonywania algorytmu Foy'a. Ponieważ algorytm Chana nie jest iteracyjny, czas wykonywania tego algorytmu okazał się najmniejszy. Wszystkie uzyskane wartości czasów przetwarzania pojedynczego zestawu pomiarów odległości są akceptowalne w systemach działających w czasie rzeczywistym.

Podsumowanie

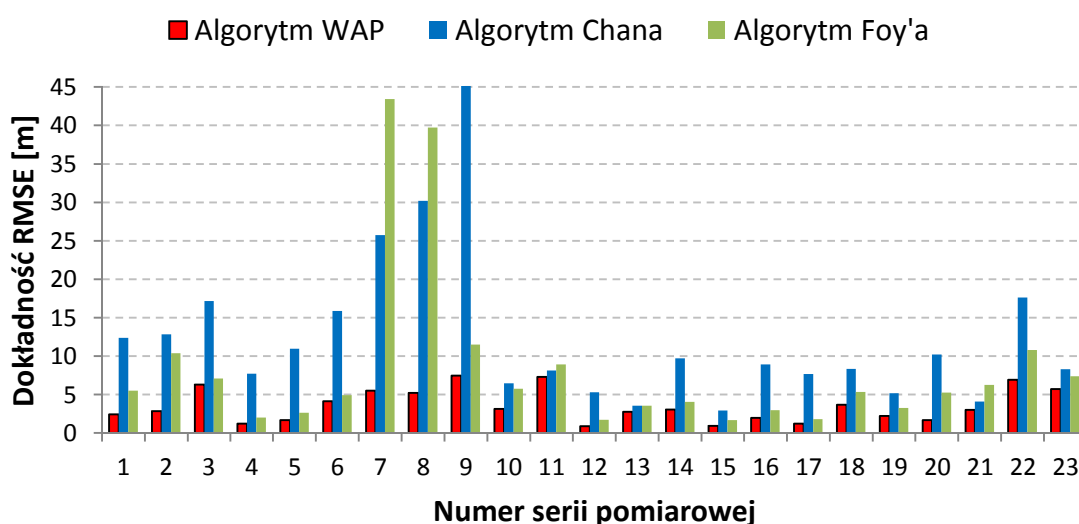
Obecnie dąży się do zrealizowania hasła *ubiquitous positioning*, które można tłumaczyć jako wszechobecną radiolokalizację [78], [99]. Możliwość określania położenia osób i obiektów znajduje wiele zastosowań w różnych dziedzinach życia i przemysłu, a mianowicie pozwala:

- zwiększyć bezpieczeństwo (systemy wspierające strażaków, lokalizujące dzieci w centrach rozrywki, wykrywające zdarzenia niebezpieczne i skracające czas reakcji na nie np. na placach budowy),
- zwiększyć efektywność pracy zespołów ludzkich oraz pracy fabryk m.in. przez monitoring procesów,
- wspierać osoby niedowidzące i niewidome przez połączenie systemu radiolokalizacyjnego z odpowiednim systemem nawigacji wewnątrzbudynkowej,
- udoskonalić system opieki nad osobami starszymi,
- poprawić jakość usług świadczonych przez muzea, galerie, a także centra handlowe przez dostarczanie do klientów informacji wybranych w kontekście ich położenia,
- zwiększyć efektywność podejmowanych decyzji biznesowych na podstawie analizy zachowań klientów.

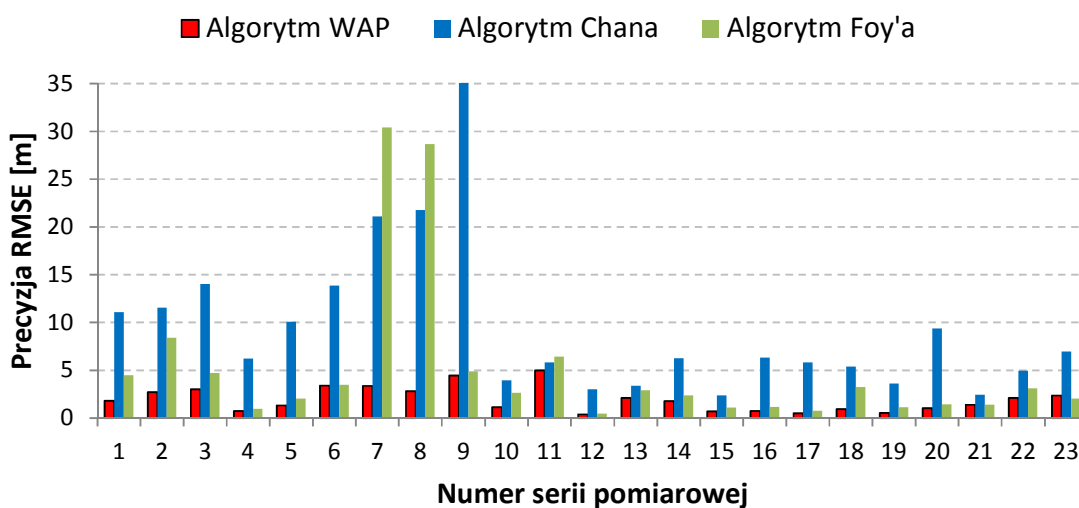
Wymienione wyżej możliwe zastosowania informacji o położeniu osób i obiektów dotyczą przede wszystkim sytuacji mających miejsce wewnątrz budynków. W takim środowisku dobrze znany i powszechny system GPS, a także pozostałe satelitarne systemy radionawigacyjne, nie świadczą usług lokalizacyjnych z wymaganą jakością. Konieczne staje się opracowanie rozwiązań przeznaczonych do pracy w budynkach. Jak się okazuje, ze względu na szczególne warunki propagacyjne wewnątrz budynków, projektowanie systemu radiolokalizacyjnego w takim środowisku nie jest łatwe. Należy uwzględnić zjawiska odbicia, ugięcia oraz rozpraszania fali elektromagnetycznej, które mają duży wpływ na propagację fali radiowej w zamkniętej przestrzeni. Wyzwaniem pierwszym podczas projektowania takiego systemu jest odpowiednie rozmieszczenie stacji referen-

cyjnych, czyli takie, które zapewni zasięgowe pokrycie całego wnętrza budynku, przy użyciu możliwie małej liczby stacji oraz przy zapewnieniu odpowiedniej geometrii rozstawienia urządzeń (stacji referencyjnych względem stacji lokalizowanych) podczas realizowanych pomiarów. Drugim wyzwaniem jest zastosowanie odpowiedniego algorytmu wyznaczania położenia obiektów na podstawie realizowanych pomiarów radiowych. Ten drugi z wymienionych problemów był przedmiotem niniejszej rozprawy, której celem było opracowanie algorytmu wyznaczania położenia obiektów na podstawie radiowych pomiarów odległości, który uwzględniając właściwości środowiska propagacji fal radiowych, pozwoli zwiększyć dokładność realizowanej usługi lokalizacyjnej wewnątrz budynków w stosunku do rozwiązań znanych z literatury. Pomysł opracowania takiego algorytmu zaistniał podczas udziału autorki niniejszej rozprawy w projekcie badawczo-rozwojowym pt. „**Demonstrator technologiczny systemu automatycznej lokalizacji osób (SALOn) do zastosowań specjalnych**” o nr O R00 0150 11 realizowanym w latach 2010-2012 i finansowanym przez NCBiR [83]. Jej zadaniem w tym projekcie było m.in. **opracowanie oprogramowania węzła GSN** odpowiedzialnego za wyznaczenie położenia obiektów na podstawie radiowych pomiarów odległości, a także **przygotowanie bazy danych MySQL** całego systemu SALOn do przechowywania informacji systemowych oraz wspomnianych wyników radiowych pomiarów odległości. Wówczas zaimplementowano znane algorytmy wyznaczania położenia: Chana oraz Foy’a. Twórcy tych algorytmów zaznaczyli, że rozkład błędów danych wejściowych do obliczeń musi być gaussowski o wartości średniej błędów równej zero. W przypadku radiowych pomiarów odległości realizowanych we wnętrzach budynków z powodu zjawiska wielodrogości oraz częstego braku bezpośredniej widoczności pomiędzy urządzeniami nadawczym i odbiorczym rozkład błędów tych pomiarów różni się od gaussowskiego, a wartość średnia tych błędów jest zazwyczaj większa od zera. Proponowany w rozprawie nowy wewnątrzbudynkowy algorytm wyznaczania położenia obiektów WAP uwzględniając tę właściwość radiowych pomiarów odległości realizowanych w środowisku wewnątrzbudynkowym pozwala zwiększyć dokładność uzyskiwanych estymat położenia obiektów względem estymat uzyskiwanych za pomocą wymienionych znanych algorytmów. **Poprawa dokładności w warunkach wewnątrzbudynkowych wynosiła od kilkunastu (względem algorytmu Foy’a) do kilkudziesięciu procent (względem algorytmu Chana).** Nie zaobserwowano przypadku, w którym wartość średnia błędów dokładności określania położenia w warunkach wewnątrzbudynkowych byłaby większa dla proponowanego algorytmu WAP w porównaniu z pozostałymi dwoma algorytmami, czego potwier-

dzeniem jest zestawienie na rys. 8.1 i rys. 8.2. Czerwonymi słupkami zaznaczono wartości błędów odpowiednio dokładności i precyzji określania położenia obiektu przy użyciu algorytmu WAP, niebieskimi przy użyciu algorytmu Chana, a zielonymi algorytmu Foy'a. Na osi rzędnych zaznaczono numer serii pomiarowej, dla której wyznaczono estymaty położenia obiektu. Opis tych serii pomiarowych zamieszczono w załączniku A.



Rys. 8.1. Zestawienie pierwiastków błędów średniokwadratowych dokładności dla algorytmów: WAP, Chana oraz Foy'a dla różnych serii pomiarowych przeprowadzonych w warunkach wewnątrzbudynkowych



Rys. 8.2. Zestawienie pierwiastków błędów średniokwadratowych precyzji dla algorytmów: WAP, Chana oraz Foy'a dla różnych serii pomiarowych przeprowadzonych w warunkach wewnątrzbudynkowych

Zauważono także, że ze względu na używane operacje matematyczne w algorytmach Chana oraz Foy'a (odwracanie macierzy) algorytmy te, mogą nie zwrócić estymaty położenia obiektu. **W proponowanym algorytmie zrezygnowano z operacji macierzowych dzięki czemu współrzędne położenia obiektu są zawsze uzyskiwane.**

W związku z powyższym, **dowodzono tezę rozprawy**, która mówi, że możliwe jest zwiększenie dokładności wyznaczania położenia obiektów wewnątrz budynków poprzez uwzględnienie wybranych właściwości środowiska propagacji fal radiowych.

Główne osiągnięcia rozprawy:

- zebrano obszerny materiał badawczy: 35 różnych serii pomiarowych (w każdej uzyskano przynajmniej 1000 zestawów pomiarów odległości), z czego 23 serie zrealizowano we wnętrzach budynków (w nowym i starym gmachu Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej, w niezamieszkanym domu jednorodzinnym, w zamieszkanym domu jednorodzinnym),
- opracowano oryginalny algorytm wyznaczania położenia obiektów na podstawie radiowych pomiarów odległości realizowanych we wnętrzach budynków - **wewnątrzbudynkowy algorytm wyznaczania położenia obiektów WAP**,
- zaimplementowano algorytm WAP w środowisku Matlab,
- zaimplementowano algorytm Chana w środowisku Matlab oraz na potrzeby systemu SALOn w języku C++,
- zaimplementowano algorytm Foy'a w środowisku Matlab oraz na potrzeby systemu SALOn w języku C++,
- przygotowano oprogramowanie w środowisku Matlab do przeprowadzenia badań w trzech wersjach:
 - do porównania efektywności zaimplementowanych algorytmów,
 - do zbadania zbieżności algorytmu WAP,
 - do zbadania wpływu wybranych parametrów algorytmu WAP na jego efektywność,
- zbadano zbieżność nowo opracowanego algorytmu WAP,
- zbadano wpływ wybranych parametrów algorytmu WAP na jego efektywność,
- przeprowadzono analizę porównawczą efektywności pracy zaimplementowanych algorytmów dla różnych środowisk wewnątrzbudynkowych,

- przeprowadzono analizę porównawczą efektywności zaimplementowanych algorytmów względem teoretycznie określonej granicy dokładności określania położenia obiektów na podstawie twierdzenia Cramera-Rao,
- opublikowano 10 artykułów lub referatów w tematyce radiolokalizacji wewnątrzbudynkowej na różnych konferencjach w kraju i za granicą [10], [11], [12], [13], [14], [15], [48], [49], [93], [94] przy czym:
 - referat [11] został zaprezentowany na międzynarodowej konferencji **VTC2014-Spring** w Korei Południowej,
 - artykuł [13] został wyróżniony **II nagrodą** w Konkursie Młodych Autorów na Krajowej Konferencji Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji 2014,
 - referat [14] został **wyróżniony** jako najlepszy wygłoszony referat w konkursie dla młodych pracowników nauki, na XV Konferencji Automatyzacji i Eksploatacji Systemów Sterowania i Łączności ASMOR 2015,
 - artykuł [93] został **wyróżniony** w Konkursie Młodych Autorów na Krajowej Konferencji Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji 2013.

W rozprawie wykazano, że efektywność (wyrażana przez dokładność i precyzję estymacji położenia oraz prawdopodobieństwo straty) zaproponowanego wewnątrzbudynkowego algorytmu wyznaczania położenia obiektów WAP jest większa od efektywności znanych algorytmów wyznaczania położenia obiektów. Algorytm ten może być używany w systemach, gdzie realizowane są pomiary odległości. Możliwość adaptacji algorytmu do warunków panujących w danym środowisku propagacyjnym sprawia, że jest on elastyczny i może być z powodzeniem stosowany w różnych obiektach. Ponadto, nie wymaga wprowadzenia zmian w systemie realizującym pomiary – nie trzeba modyfikować sprzętu ani sposobu realizacji pomiarów. Należy jedynie zastosować proponowany algorytm wyznaczania położenia obiektów.

Spis literatury

- [1] ADXL345 Digital Accelerometer, Data sheet, stan na 10.2010 r.
- [2] Ambroziak S. J., Katulski R. J., Sadowski J., Siwicki W., Stefański J.: *Ground-based Radiolocation System – AEGIR*, 8th International Symposium on Mechatronics and its Applications, 2012
- [3] Arrue N., Losada M., Zamora-Cadencas L., Jimenez-Irastorza A., Velez I.: *Design of an IR-UWB Indoor Localization System Based on a Novel RTT Ranging Estimator*, 2010 First International Conference on Sensor Device Technologies and Applications (SENSORDEVICES), ISBN 978-1-4244-7474-5
- [4] Badawik A., Kołakowski J.: *Zmodyfikowana metoda lokalizacji nadajnika z wykorzystaniem techniki RSS*, Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne nr 4, 2015, ISSN: 1230-3496
- [5] Bahl P., Padmanabhan V.: *RADAR: an In-Building RF-Based User Location and Tracking System*, Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM), 2000
- [6] Berezowska M., Kołakowski J.: *Ultraszerokopasmowy system monitorowania ruchu osób starszych*, Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne nr 4, 2015, ISSN: 1230-3496
- [7] BMP085 Digital pressure sensor, Data sheet, stan na 10.2010 r.
- [8] Boreiko O., Teslyuk V., Beregovska C., Mykhailiuk A.: *Model of Telecommunication Networks for Intelligent Building*, 13th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), 2015
- [9] Chan Y. T., Ho K. C.: *A Simple and Efficient Estimator for Hiperbolic Location*, IEEE Trans. on Signal Proc., vol. 42, no. 8, 1994
- [10] **Czapiewska A.**, Sadowski J.: *Analiza porównawcza zmodyfikowanego algorytmu gradientowego oraz algorytmu Chana do wyznaczania położenia obiektów w systemach radionawigacyjnych*, Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne nr 4, 2015, ISSN: 1230-3496
- [11] **Czapiewska A.**, Sadowski J.: *Analysis of Accuracy of Modified Gradient Method in Indoor Radiolocalisation System*, VTC2014-Spring Proceedings, Seoul, Korea Południowa, 2014, ISBN: 978-1-4799-4482-8

- [12] **Czapiewska A.**, Sadowski J.: *Comparison of New Position Estimation Algorithm for Indoor Environment*, VI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna: NATCon 2014 "Technologie morskie dla obronności i bezpieczeństwa", Gdańsk, 2014
- [13] **Czapiewska A.**: *Nowy algorytm wyznaczania położenia obiektów na podstawie pomiarów odległości w środowisku wewnątrzbudynkowym*, Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne nr 6, 2014, ISSN: 1230-3496
- [14] **Czapiewska A.**: *Performance Comparison of New Modified Gradient Algorithm and Foy Algorithm for Iterative Position Calculation*, Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne nr 10, 2015, ISSN: 1230-3496
- [15] **Czapiewska A.**: *Radiolokalizacja w środowisku wewnątrzbudynkowym*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne nr 12, 2014, ISSN: 1230-3496
- [16] Djaja-Joško V., Kołakowski J.: *Metoda bezprzewodowej synchronizacji węzłów i korekcji wyników pomiarów TDOA w ultraszerokopasmowym systemie lokalizacyjnym*, Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne nr 6, 2016, ISSN: 1230-3496
- [17] DS1337 Serial Real-Time Clock, Data sheet, stan na 10.2010 r.
- [18] Fang B. T.: *Simple Solution for Hyperbolic and Related Position Fixes*, IEEE Trans. on Aero. and Elec. Systems, vol. 26, no. 5, 1990
- [19] Federal Radionavigation Plan 2008, http://www.navcen.uscg.gov/pdf/2008_Federal_Radionavigation_Plan.pdf
- [20] Foy W.: *Position-Location Solutions by Taylor-Series Estimation*, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-12, no. 2, 1976
- [21] Gezici S., Kobayashi H., Poor H. V.: *Non-Parametric Non-Line-of-Sight Identification*, Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Fall. 2003 IEEE 58th (Volume:4)
- [22] Gislki P., Katulski R., Sadowski J., Stefański J.: *Przegląd technologii lokalizowania osób/obiektów w środowisku zamkniętym*, VI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Technologie morskie dla obronności i bezpieczeństwa, NatCon, 2014
- [23] Grewal M. S., Andrews A. P.: *Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB*, John Wiley & Sons, 2008, ISBN: 978-0-470-17366-4
- [24] Grewal M. S., Weill L. R., Andrews A. P.: *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*, John Wiley & Sons, 2007, ISBN: 10 0-470-4190-0
- [25] Harris M.: *The Way Through the Flames*, IEEE Spectrum, vol. 50, issue 9, 2013

- [26] Hawkinson W., Samanant P., McCroskey R., Ingvalson R., Kulkarni A., Haas L., English B.: *GLANSER: Geospatial Location, Accountability, and Navigation System for Emergency Responders – System Concept and Performance Assessment*, Position Location and Navigation Symposium (PLANS), IEEE/ION, 2012
- [27] Haykin S.: *Systemy telekomunikacyjne 1*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności Warszawa, 1998, ISBN 83-206-1272-1
- [28] Haykin S.: *Systemy telekomunikacyjne 2*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności Warszawa, 1998, ISBN 83-206-1272-4
- [29] <http://ubisense.net/en/products/smart-factory>, dostęp: 11.2016
- [30] <http://www.atmel.com/Images/doc8227.pdf>, dostęp: 11.2016
- [31] <http://www.gps.gov/>, dostęp: 12.2016
- [32] <http://www.guardly.com/technology/indoor-positioning-system.html>, dostęp: 11.2016
- [33] http://www.iaria.org/conferences2009/filesSEMAPRO09/Nima_Doohaki_SMARTMUSEUM2SEMAPRO.pdf, dostęp: 10.2016
- [34] <http://www.skyhookwireless.com/products/context-accelerator>, dostęp: 10.2016
- [35] <http://www.smartmuseum.eu>, dostęp: 10.2016
- [36] <http://www.teldio.com/products/rtls>, dostęp: 10.2016
- [37] <http://www.walkbase.com/>, dostęp: 11.2016
- [38] <http://www.windowcentral.com/nokia-seeking-advance-progress-indoor-positioning>, dostęp: 10.2016
- [39] <http://www.zigbee.org/zigbeealliance/developing-standards/>, dostęp: 01.2017
- [40] <https://blogs.windows.com/devices/2012/08/23/new-alliance-helps-you-find-needle-in-a-haystack/#6O6geTbgomsA593P.97>, dostęp: 11.2016
- [41] Ibnkahla M.: *Signal Processing for Mobile Communications Handbook*, CRC Press, 2005, ISBN: 0-8493-1657-X
- [42] IEEE Computer Society: *IEEE Std 802.11 – 2012, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, 2012
- [43] IEEE Computer Society: *IEEE Std 802.15.4a – 2007, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, 2007
- [44] Jagodziński Z., *Systemy Radionawigacyjne*, Wydawnictwo Ministra Obrony Narodowej, 1961

- [45] Jing Y., Xuegang W., Liang D., Ning L., Fu W., Yalou H., Fengchi S., Yuan W.: *ISILON-An Intelligent System for Indoor Localization and Navigation Based on RFID and Ultrasonic Techniques*, 2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), ISBN 978-1-4244-6712-9
- [46] Kaikai L., Jingjing R., Hao X., Weidong C.: *A Practical UWB TOA Estimator in the Presence of Interference and NLOS*, IEEE 10th International Conference on Signal Processing (ICSP), 2010
- [47] Kaplan E.D., Hegarty C.J.: *Understanding GPS: Principles and Applications*, Artech House, 2005, ISBN: 1580538940
- [48] Katulski R., Magiera J., Sadowski J., Siwicki W., Stefański J., **Studańska A.**: *System automatycznej lokalizacji osób do zastosowań specjalnych*, Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 8-9, 2012, ISSN: 1230-3496
- [49] Katulski R., Magiera J., Sadowski J., Siwicki W., Stefański J., **Studańska A.**: *System automatycznej lokalizacji osób do zastosowań specjalnych*, V Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna : "Technologie morskie dla obronności i bezpieczeństwa" NATCon 2012
- [50] Katulski R.: *Propagacja fal radiowych w telekomunikacji bezprzewodowej*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności Warszawa, 2009, ISBN 978-83-206-1749-8
- [51] Kavanagh I., Brennan C.: *Preliminary Comparison of 3D Integral Equation Based Indoor Propagation Model and Ray Tracing*, International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC), 2015
- [52] Kay Steven M.: *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*, Prentice Hall PTR, 1993, ISBN: 0-13-345711-7
- [53] Kegen Yu, Ian Sharp, Jay Guo Y.: *Ground-Based Wireless Positioning*, John Wiley & Sons, 2009, ISBN 978-0-470-74704-9(H/B)
- [54] Kelner J. M., Gajewski P., Ziółkowski C.: *Spatial Localisation of Radio Wave Emission Source Using Signal Doppler Frequency (SDF) Technology*, Military Communications and Information Systems Conference, 2012, ISBN: 978-83-920120-9-2
- [55] Kietlinski-Zaleski J., Yamazato T., Katayama M.: *TOA UWB Position Estimation with Two Receivers and a Set of Known Reflectors*, IEEE International Conference on Ultra-Wideband, 2009
- [56] Kim H.: *Double-Sided Two-Way Ranging Algorithm to Reduce Ranging Time*, IEEE Communications Letters, Volume 13, Issue 7, 2009
- [57] Kołakowski M., Michnowski R.: *Źródło sygnału w ultra-szerokopasmowym systemie lokalizacyjnym*, Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne nr 4, 2015, ISSN: 1230-3496

- [58] Kosiński W.: *Geodezja*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2010, ISBN: 978-83-01-16342-6
- [59] Krouk E., Semenov S.: *Modulation and Coding Techniques in Wireless Communications*, John Wiley & Sons, 2011, ISBN: 9780470745052 [HB]
- [60] Kułakowski P., Ludwin W.: *Performance Analysis of Multiple-Input Multiple-Output System for Wireless Network in an Office Room*, AEU-International Journal of Electronics and Communications, vol. 60, issue 3, 2006
- [61] Kułakowski P., Vales-Alonso J., Egea-Lopez E., Ludwin W., Garcia-Haro J.: *Angle-of-Arrival Localization Based on Antenna Arrays for Wireless Sensor Networks*, Computers & Electrical Engineering, vol. 36, no. 6, 2010
- [62] Kwak M., Chong J.: *A New Double Two-Way Ranging Algorithm for Ranging System*, 2nd IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content, 2010
- [63] Li Y., Chen J., Shi Y., Cheng Y., Wang L.: *WiFi-Assisted Multi-floor Indoor Localization with Inertial Sensors*, 8th International Conference on Wireless Communications & Signal Processing, 2016, ISSN: 2472-7628
- [64] Liu H., Li J., Xie Z., Lin S., Whitehouse K., Stankovic J. A., Siu D.: *Automatic and Robust Breadcrumb System Deployment for Indoor Firefighter Applications*, 2010, ISBN: 978-1-60558-985-5
- [65] Ludwin W. (red.): *Bluetooth nowoczesny system łączności bezprzewodowej*, Wydawnictwo AGH, Kraków 2003, ISBN 83-89388-70-7
- [66] Lyu P., Xu X., Yan S., Ren Z.: *60 GHz Indoor Propagation With Time-Domain Geometric-Optics*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 52, issue 3, 2016
- [67] Mannings R.: *Ubiquitous Positioning*, Artech House, 2008, ISBN: 978-1-59693-103-9
- [68] Miao H., Yu K., Juntti M.: *Positioning for NLOS Propagation: Algorithm Derivations and Cramer-Rao Bounds*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 56(5)
- [69] Molisch A. F.: *Wireless Communications*, John Wiley & Sons, 2011
- [70] Nanotron: *NanoLoc TRX Transceiver (NA5TR1) Data Sheet*, stan na 10.2010 r.
- [71] Pi-Chun C.: *A Non-Line-of-Sight Error Mitigation Algorithm in Location Estimation*, Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 1999
- [72] Polska Agencja Żeglugi Powietrznej: *Trasowe pomoce radionawigacyjne*, ENR 4.1, 2016, http://www.ais.pata.pl/aip/aippliki/EP_ENR_4_1_en.pdf
- [73] Porretta M., Nepa P., Manara G., Giannetti F., Dohler M., Allen B., Aghvami A. H.: *User Positioning Technique for Microcellular Wireless Networks*, Electronics Letters, 2003

- [74] Rajchowski P.: *Zwiększenie dokładności estymacji położenia obiektów w systemie nawigacji inercyjnej poprzez wykorzystanie radiowych pomiarów odległości*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 4, 2015, ISSN: 1230-3496
- [75] Rappaport T. S.: *Wireless Communications - Principles and Practice*, Prentice Hall, 2001, ISBN: 0130422320
- [76] *Recommendation ITU-R P.1238-8, Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz*, 2015
- [77] *Recommendation ITU-R P.1546-5, Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz*, 2013
- [78] Retscher G., Kealy A.: *Ubiquitous Positioning Technology for Intelligent Navigation Systems*, Proceedings of the 2nd Workshop on Positioning, Navigation and Communication & 1st Ultra-Wideband Expert Talk, 2005
- [79] Rodrigues M. L., Vieira L. F. M., Campos M. F. M.: *Fingerprinting-Based Radio Localization in Indoor Environments Using Multiple Wireless Technologies*, IEEE 22nd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2011
- [80] Roos T., Myllymaki P., Tirri H., Misikangas P., Sievanen J.: *A Probabilistic Approach to WLAN User Location Estimation*, International Journal of Wireless Information Networks, 2002
- [81] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 30.12.2009r. „*Zmieniające rozporządzenie w sprawie urządzeń radiowych nadawczych lub nadawczo-odbiorczych, które mogą być używane bez pozwolenia radiowego*”, Dz. U. nr 2 poz. 8, 2010
- [82] Rozporządzenie Ministra Transportu z dnia 3.07.2007r. „*W sprawie urządzeń radiowych nadawczych lub nadawczo-odbiorczych, które mogą być używane bez pozwolenia radiowego*”, Dz. U. nr 138 poz. 972 z późniejszymi zmianami, 2007
- [83] Sadowski J., Ambroziak S., Białowas A., Bronk K., Katulski R., Kowalewski K., Magiera J., Popławski C., Rauhut-Sobczak B., Siwicki W., Stefański J., **Studańska A.**, Szwoch M.: *Demonstrator technologiczny systemu automatycznej lokalizacji osób (SALOn) do zastosowań specjalnych*, raport z projektu o Nr O R00 0150 11, Politechnika Gdańska, 2012
- [84] Saunders S. R., Zavala A. A.: *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*, John Wiley & Sons, 2007, ISBN: 978-0-470-84879-1
- [85] Scholes D. H. C.: *The Use of Radio in the Navigation and Operation of Civil Aircraft*, Journal of the British Institution of Radio Engineers, Volume 12, Issue 12, 1952

- [86] Sen S., Radunovic B., Choudhury R. R., Minka T.: *Spot Localization Using PHY Layer Information*, Proceedings of ACM Mobisys, 2012
- [87] Sholz M., Riedel T., Decker C.: *A Flexible Architecture for a Robust Indoor Navigation Support Device for Firefighters*, Seventh International Conference on Networked Sensing Systems (INSS), 2010
- [88] Specht C.: *System GPS*, Wydawnictwo Bernardinum, Pelplin, 2007, ISBN: 978-83-7380-4692
- [89] Stachurski A., Wierzbicki A. P.: *Podstawy optymalizacji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2001, ISBN: 83-7207-247-7
- [90] Stefański J., Sadowski J.: *Analiza przydatności metody TWR dla potrzeb lokalizacji osób i mienia w środowisku wewnątrzbudynkowym*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 4, 2012, ISSN: 1230-3496
- [91] Stefański J.: *Analiza efektywności metod estymacji położenia terminala ruchomego w środowisku propagacji wielodrogowej*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 6, 2009, ISSN: 1230-3496
- [92] Stefański J.: *Badanie metod i projektowanie usług lokalizacyjnych w sieciach radiokomunikacyjnych*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2012, ISBN: 978-83-7348-417-7
- [93] **Studańska⁹ A.**, Stefański J., Sadowski J.: *Analiza dokładności zmodyfikowanej metody gradientowej do lokalizacji w wewnątrzbudynkowym systemie radiolokalizacyjnym*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 6, 2013, ISSN: 1230-3496
- [94] **Studańska A.**: *Analysis of Position Calculating Methods in Indoor Environment*, materiały konferencyjne ICT Young, Gdańsk, 2013
- [95] Szczepański M.: *Podstawy astronawigacji część I*, Wydawnictwo Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni, 1992
- [96] Tian L., Degli-Esposti V., Vitucci E. M., Yin X.: *Semi-Deterministic Radio Channel Modelling Based on Graph Theory and Ray-Tracing*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Volume: 64, Issue 6, 2016, ISSN: 1558-2221
- [97] Tsui Bao-Yen J.: *Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A Software Approach*, John Wiley & Sons, 2000, ISBN 0-471-20054-9
- [98] Venkatraman S. and Caffery J. Jr: *A Statistical Approach to Non-Line-of-Sight BS Identification*, The 5th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, Volume:1, 2002

⁹ Nazwisko panięskie autorki rozprawy

- [99] Wan Bejuri Y., Mohamad M., Sapri M.: *Ubiquitous Positioning: A Taxonomy for Location Determination on Mobile Navigation System*, Proceedings on Signal & Image Processing: An International Journal (SIPIJ), vol. 2, no. 1, 2011
- [100] Wang Y., Zhang J.: *Application of SVM in Object Tracking Based on Laplacian Kernel Function*, 8th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC), 2016
- [101] Wesołowski K.: *Podstawy cyfrowych systemów telekomunikacyjnych*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2003, ISBN 83-206-1508-9
- [102] Wesołowski K.: *Systemy radiokomunikacji ruchomej*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2003, ISBN 83-206-1469-4
- [103] Wylie M. P. and Holtzmann J.: *The Non-Line of Sight Problem in Mobile Location Estimation*, 5th IEEE International Conference on Universal Personal Communications, Volume:2, 1996
- [104] Wysota M., Jagodzińska K., Walkowiak M.: *Sidelob suppression in unequally spaced antenna arrays*, 1st International Conference on Information Technology, IT 2008
- [105] Yang H., Zhang R., Bordoy J., Höflinger F., Li W., Schindelbauer C., Reindl L.: *Smartphone-Based Indoor Localization System Using Inertial Sensor and Acoustic Transmitter/Receiver*, IEEE Sensor Journal, Volume: 16, Issue: 22, 2016, ISSN: 1558-1748

Załącznik A.

Opis radiowych pomiarów odległości zrealizowanych w środowisku wewnątrzbudynkowym

W załączniku opisano serie pomiarowe zrealizowane w pomieszczeniach zamkniętych. Serie oznaczono numerami. Do opisu dołączone są rysunki obrazujące rozmieszczenie urządzeń na planie budynku. Rysunki te występują w dwóch wersjach:

- planów narysowanych w układzie PUWG 2000 (Państwowym Układzie Współrzędnych Geodezjnych) – są to budynki Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej oraz
- map generowanych programowo w środowisku Matlab.

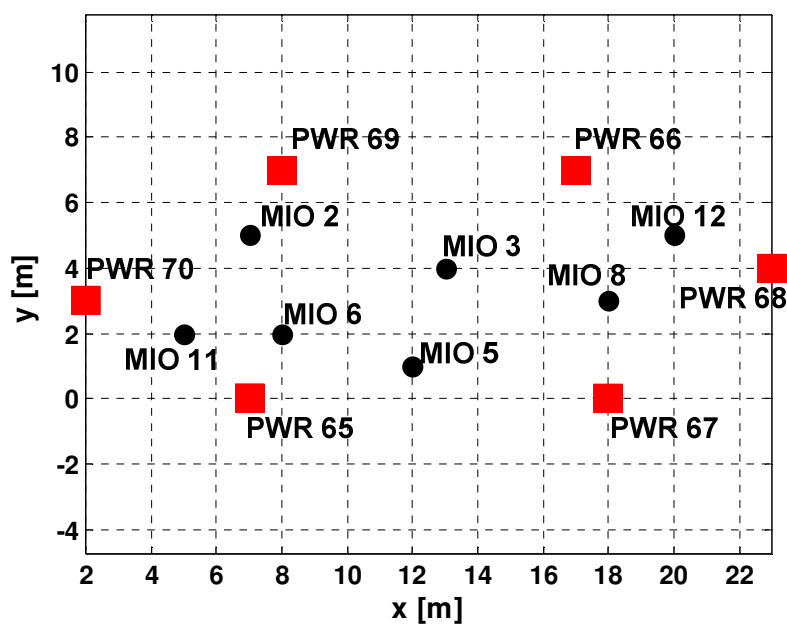
Jeśli na rysunku nie ma zaznaczonych ścian, oznacza to, że dana seria pomiarowa była wykonana na korytarzu i wszystkie urządzenia znajdowały się w jednym pomieszczeniu.

Seria 1

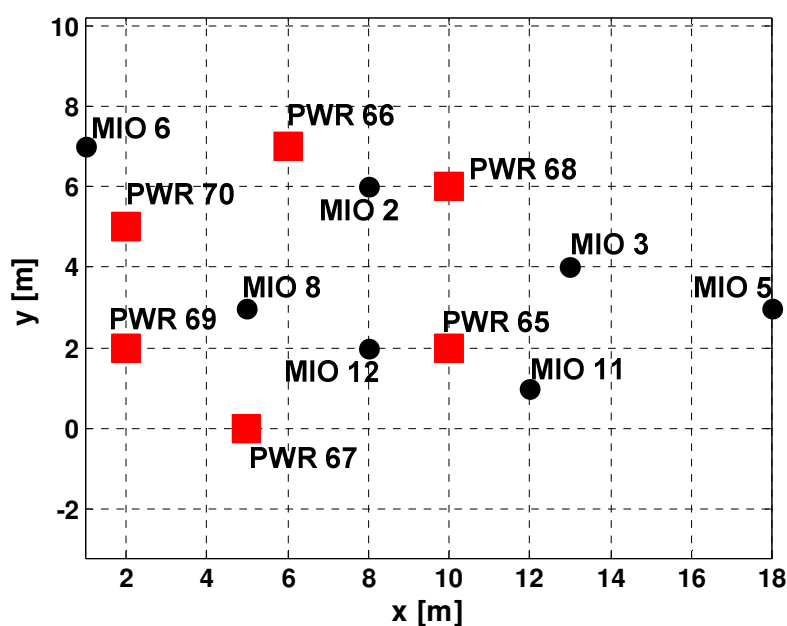
Pomiary przeprowadzono w południowym korytarzu na drugim piętrze nowego gmachu Wydziału ETI (zdjęcie korytarza pokazano na rys. 6.7). Do pomiaru użyto 6 węzłów PWR oraz 7 modułów MIO. Wszystkie urządzenia lokalizowane znajdowały się wewnątrz obszaru określonego przez stacje PWR. Na rys. A.1 widoczne jest rozmieszczenie urządzeń podczas pomiarów.

Seria 2

Pomiary wykonano w tym samym miejscu co pomiary w serii 1. Użyto także taką samą liczbę urządzeń. Jednak w przypadku tej serii tylko trzy moduły MIO były otoczone przez węzły PWR. Pozostałe znajdowały się poza obszarem otoczonym przez stacje referencyjne. Uzyskano w ten sposób pogorszenie geometrii sieci radiolokalizacyjnej. Na rys. A.2 przedstawiono rozmieszczenie urządzeń w tej serii.



Rys. A.1. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 1



Rys. A.2. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 2

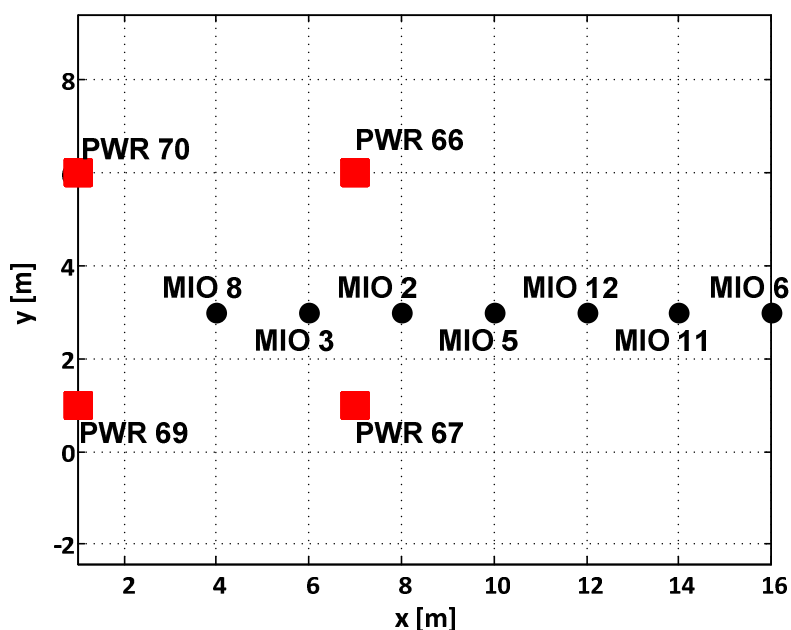
Seria 3

Seria 3 również była przeprowadzona w południowym korytarzu na drugim piętrze nowego gmachu Wydziału ETI. Do tych pomiarów użyto tylko 4 węzłów PWR rozstawionych w rogach kwadratu. Moduły MIO ustawiono w równych odległościach od

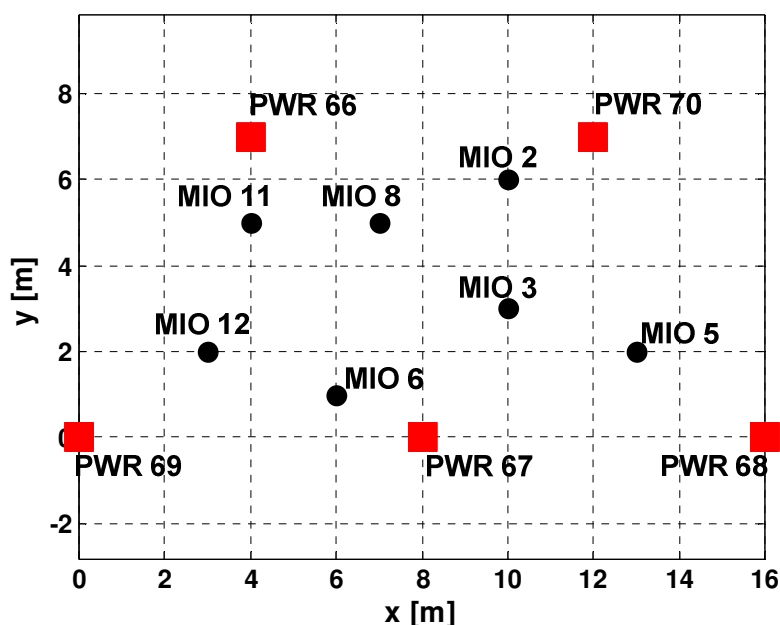
siębie wzdłuż jednej linii o początku w środku kwadratu wyznaczonego przez stacje referencyjne. Na rys. A.3 zaprezentowano to rozstawienie.

Seria 4

Serię pomiarową nr 4 wykonano w tym samym miejscu co poprzednie 3 serie. Do pomiarów użyto 5 węzłów PWR. Rozmieszczenie urządzeń widoczne jest na rys. A.4.



Rys. A.3. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 3



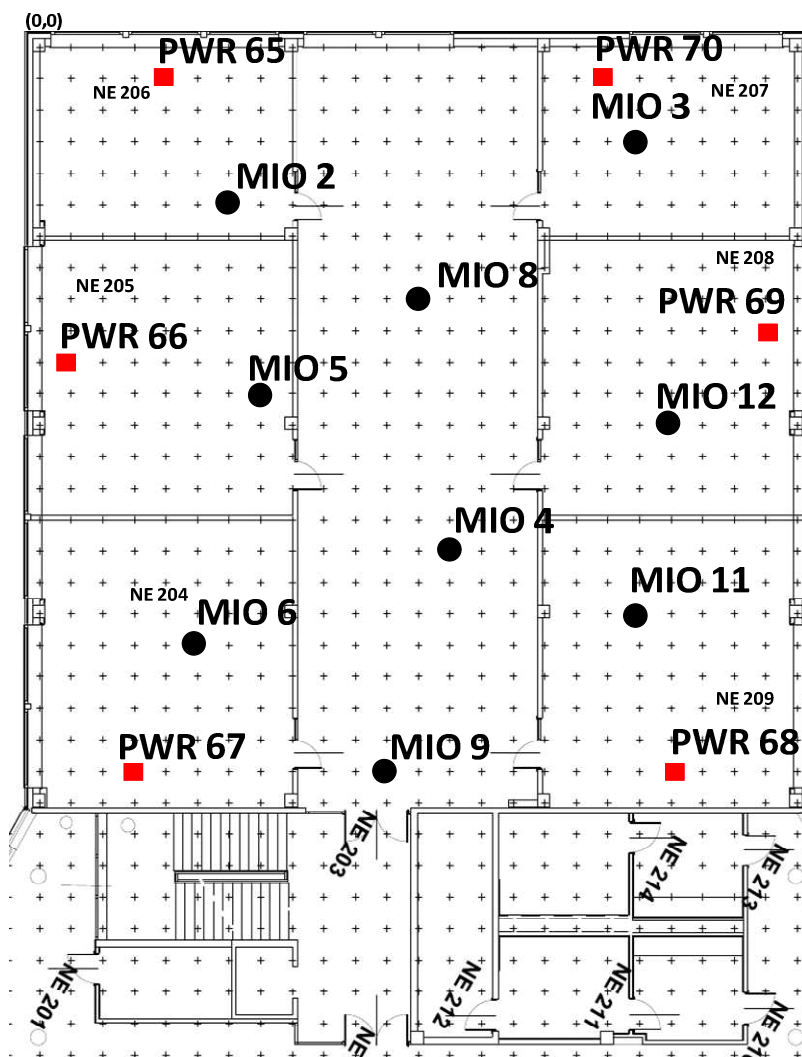
Rys. A.4. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w seriach pomiarowych nr 4 i 5

Seria 5

Rozmieszczenie modułów MIO i węzłów PWR było identyczne jak w serii 4. Różnica pomiędzy obiema seriami wiąże się z warunkami tych pomiarów. W serii 4 w obszarze pomiarowym znajdowały się tylko urządzenia systemu SALOn, a w serii 5 w obszarze tym poruszało się kilka osób.

Seria 6

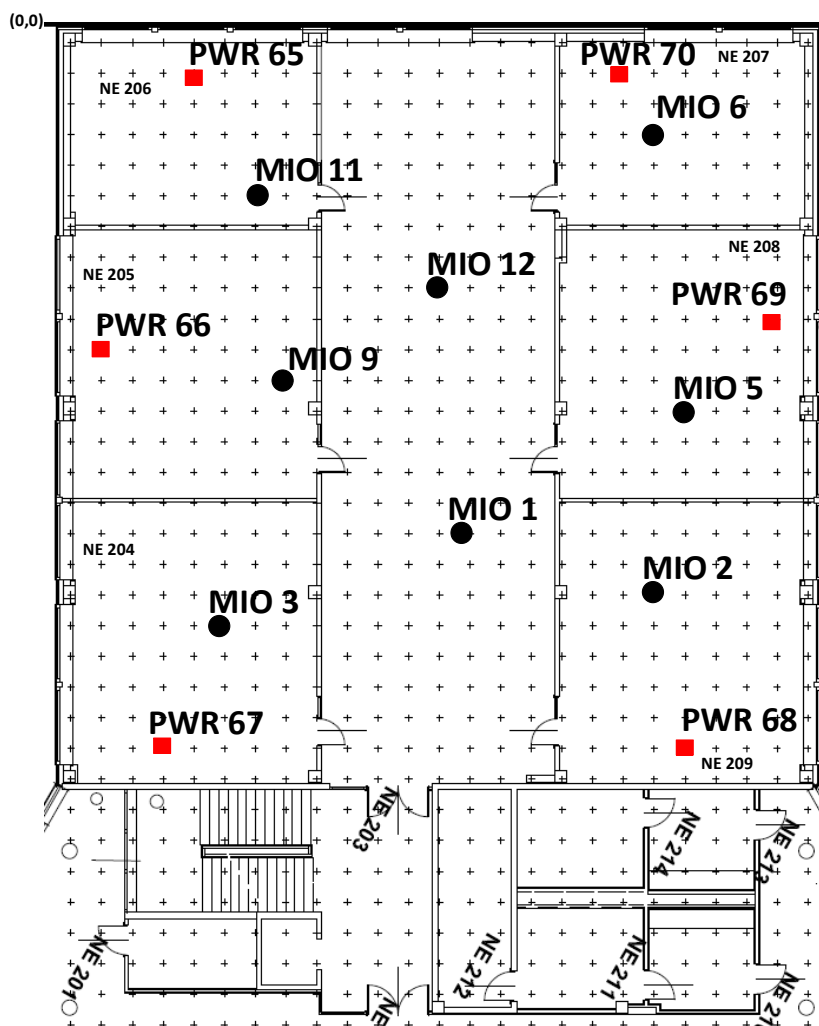
Pomiary w tej serii również wykonano na drugim piętrze nowego gmachu Wydziału ETI. Użyto 6 węzłów PWR i 9 modułów MIO. Urządzenia jednak były rozmieszczone nie tylko na korytarzu, ale również w różnych salach ćwiczeniowych jak pokazano na rys. A.5. Pogorszone zostały w ten sposób warunki propagacyjne pomiędzy urządzeniami, które dzieliły teraz ściany oraz krzesła i ławki.



Rys. A.5. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 6

Seria 7

Miejsce przeprowadzenia pomiarów było takie jak w serii 6. Rozstawienie urządzeń było zbliżone do tego w poprzedniej serii. Użyto 6 węzłów PWR i 8 modułów MIO. Pomiary wykonano jednak innego dnia. Na rys. A.6 zaprezentowano to rozstawienie.



Rys. A.6. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 7

Seria 8

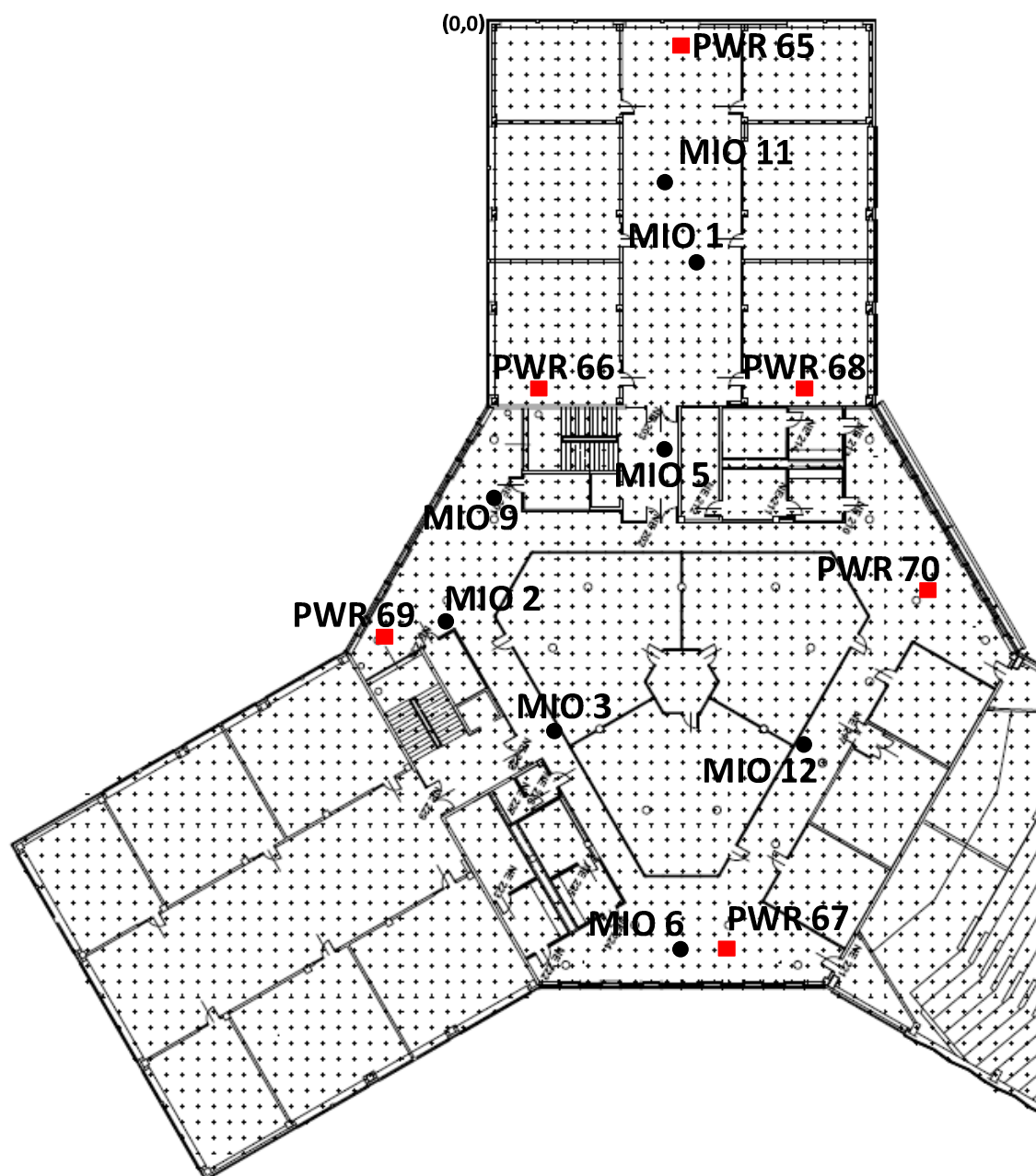
W tej serii powtórzono pomiary z serii 7.

Seria 9

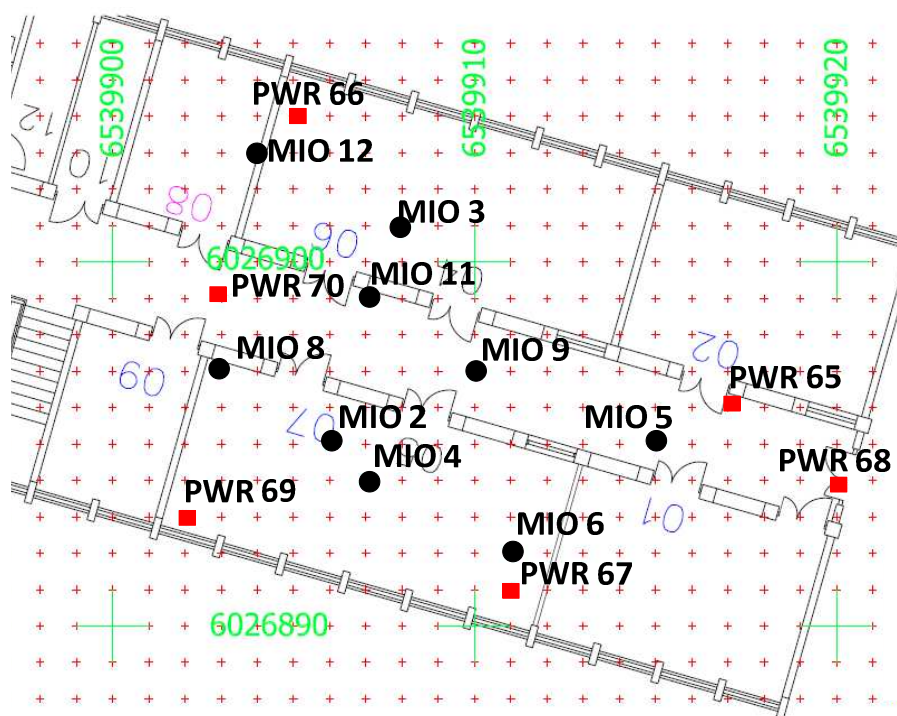
Pomiary w tej serii również zrealizowano na drugim piętrze nowego gmachu Wydziału ETI. Urządzenia zostały jednak rozstawione na dużo większym obszarze – zajęto jedno skrzydło oraz część centralną budynku. Liczba użytych urządzeń była taka jak w serii poprzedniej, a ich rozstawienie jak na rys. A.7.

Seria 10

Serię 10 przeprowadzono w starym budynku Wydziału ETI. Urządzenia, zarówno węzły PWR (6 węzłów) jak i moduły MIO (9 urządzeń) rozmieszczono wewnątrz budynku we wschodniej części parteru, w różnych pomieszczeniach. Rys. A.8 przedstawia to rozstawienie. Na rysunku tym zaznaczono współrzędne w układzie PUWG 2000.



Rys. A.7. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 9



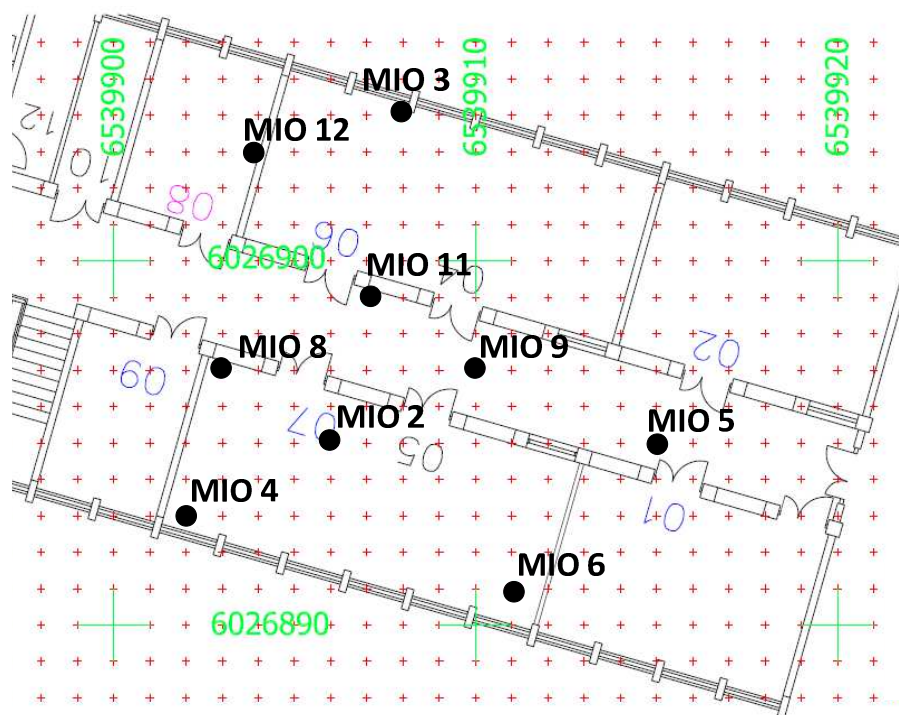
Rys. A.8. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 10

Seria 11

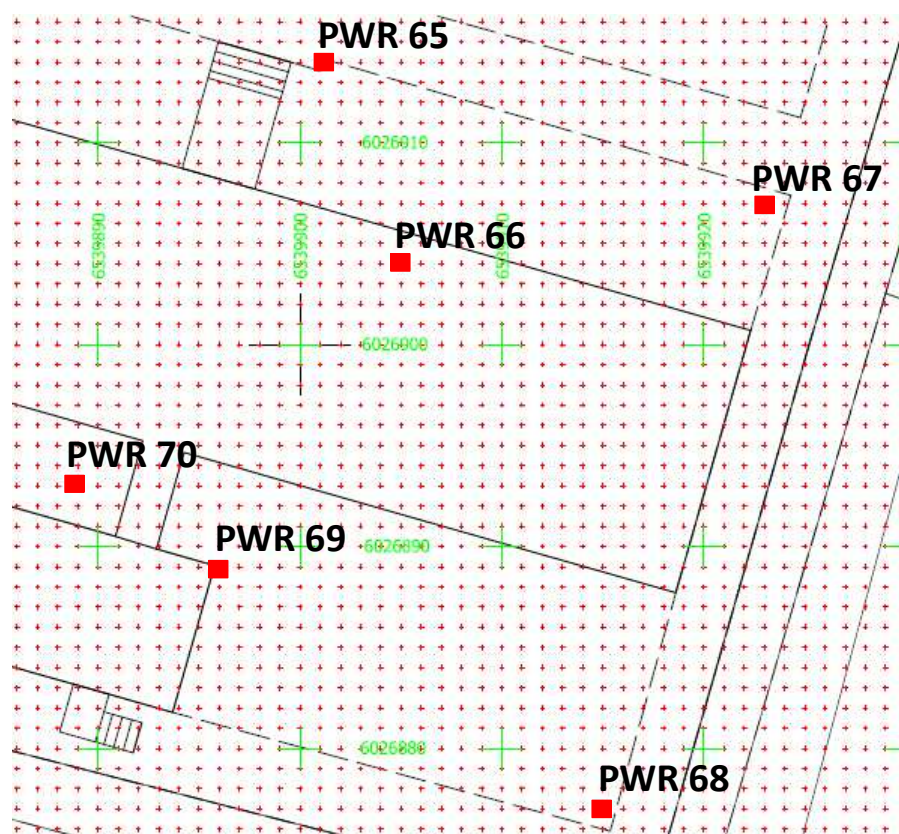
W tej serii moduły MIO znajdowały się wewnątrz starego budynku Wydziału ETI w różnych salach we wschodniej części parteru, a węzły PWR na zewnątrz tego budynku od wschodniej strony. Rozmieszczenie 9 modułów MIO pokazano na rys. A.9, a 6 stacji referencyjnych na rys. A.10.

Seria 12

Ta seria pomiarowa została przeprowadzona w niezamieszkanym jednopiętrowym domu jednorodzinnym. Był on jeszcze w budowie, ale już w stanie zamkniętym. Wewnątrz znajdowały się nieliczne sprzęty budowlane. Na rys. A.11 zaprezentowano rozstawienie urządzeń (6 węzłów PWR i 7 modułów MIO) wewnątrz tego budynku na parterze podczas 12 serii pomiarowej.



Rys. A.9. Rozmieszczenie modułów MIO systemu SALOn w serii pomiarowej nr 11



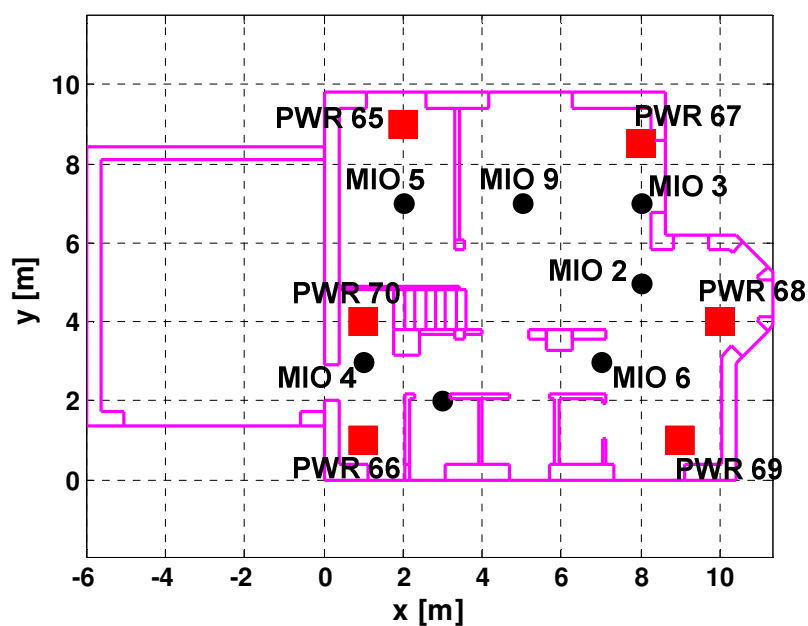
Rys. A.10. Rozmieszczenie węzłów PWR systemu SALOn w serii pomiarowej nr 11

Seria 13

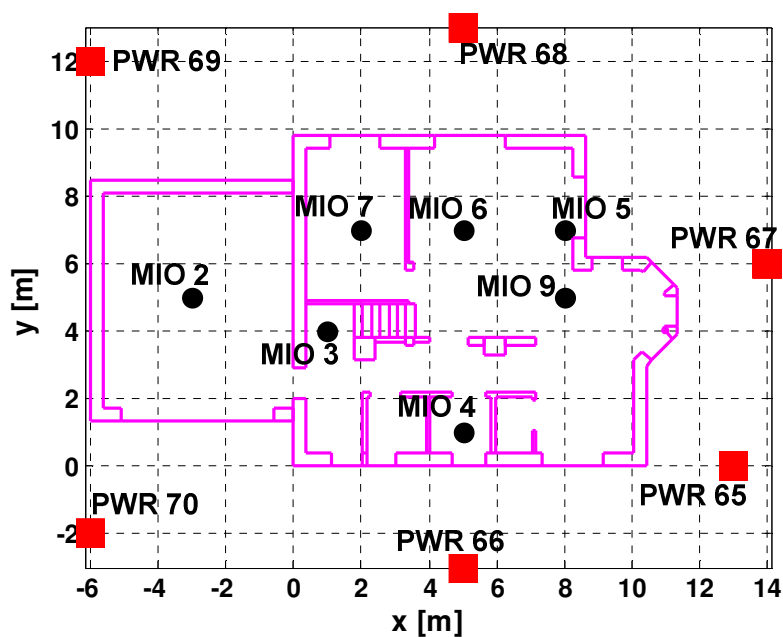
Seria 13 była zrealizowana w tym samym budynku co seria 12. Inne było jednak rozmieszczenie urządzeń: 6 węzłów PWR otaczało budynek, a 7 modułów MIO rozstawiono wewnątrz na parterze. Można przyjąć, że wszystkie urządzenia znajdowały się w jednej płaszczyźnie. Na rys. A.12 pokazano to rozmieszczenie.

Seria 14

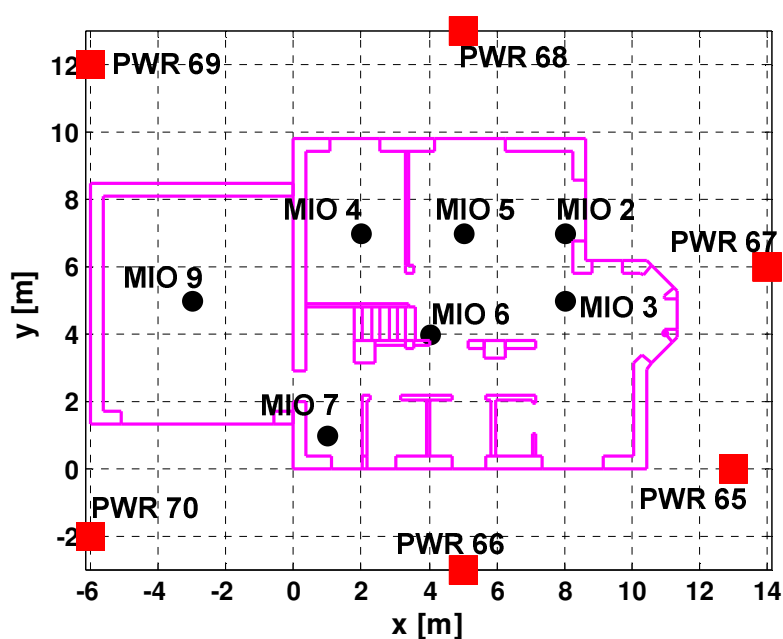
Pomiary przeprowadzono w tym samym budynku, w którym zrealizowano serie 12 i 13. Nie zmieniono ustawienia węzłów referencyjnych, natomiast moduły MIO umieszczono na piętrze (wysokość 3,04 m). Na rys. A.13 zobrazowano to rozstawienie w rzucie z góry.



Rys. A.11. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 12



Rys. A.12. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 13

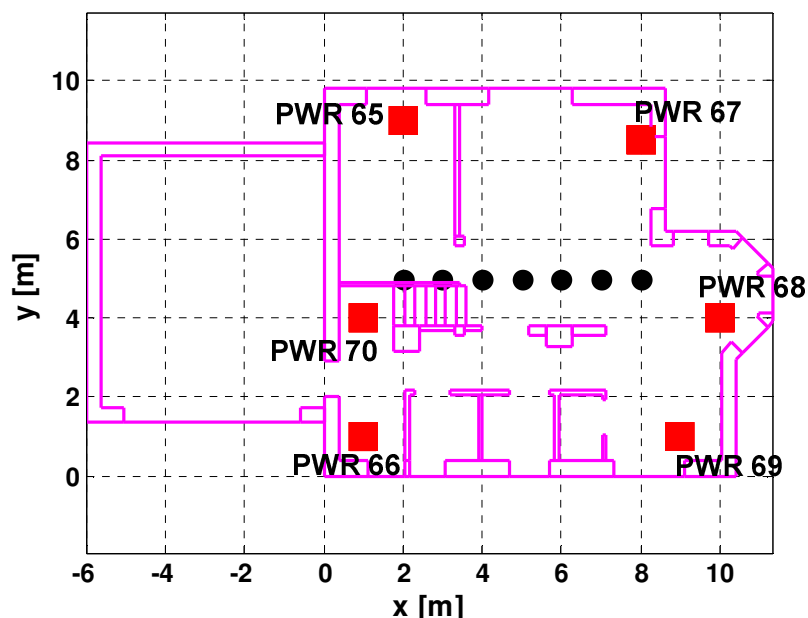


Rys. A.13. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 14

Seria 15

Seria pomiarowa o numerze 15 została przeprowadzona w tym samym domu co poprzednie 3 serie. Rozstawienie stacji referencyjnych było takie jak w serii 12, natomiast MIO ustawiono na parterze w jednej linii w równych odstępach od siebie, co pokazano na

rys. A.14. Nie zaznaczono na tym rysunku numerów MIO, ponieważ stały się on nieczytelny. Współrzędne poszczególnych MIO podano w tab. A.1.



Rys. A.14. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 15

Tab. A.1. Współrzędne modułów MIO w serii 15

Numer MIO	Współrzędna x [m]	Współrzędna y [m]	Współrzędna z [m]
2	3	5	0
3	4	5	0
4	7	5	0
5	2	5	0
6	6	5	0
7	5	5	0
9	8	5	0

Seria 16

Pomiary w serii 16 zostały wykonane w zamieszkanym jednopiętrowym domu jednorodzinny. Oprócz wyposażenia w sprzęty codziennego użytku, różnił się od niezamieszkanego domu jednorodzinnej wielkością. Zajmował większą powierzchnię.

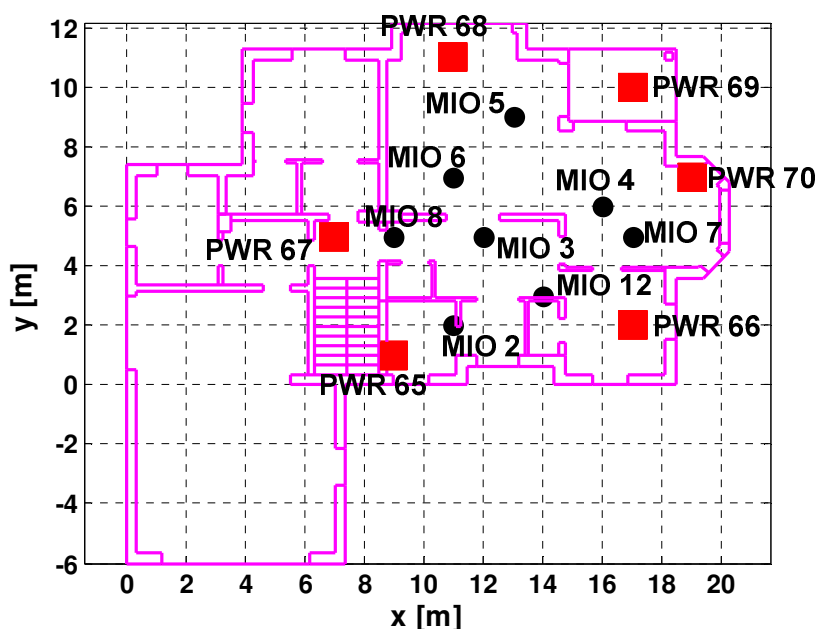
W serii 16 wszystkie urządzenia systemu SALOn (6 węzłów PWR i 8 modułów MIO) znajdowały się wewnątrz budynku na parterze. Zostało to pokazane na rys. A.15.

Seria 17

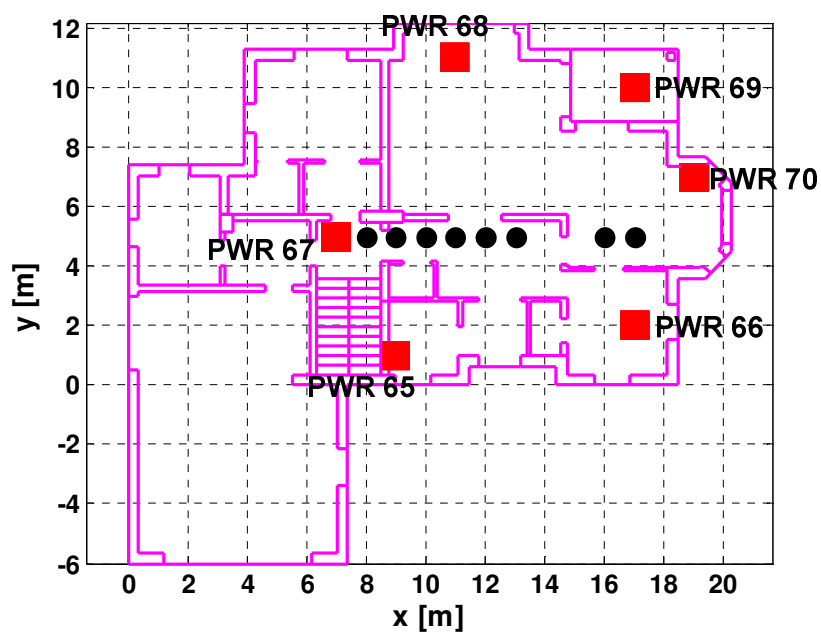
W tej serii radiowe pomiary odległości wykonano w tym samym budynku co pomiary w serii 16. Rozstawienie węzłów referencyjnych było takie samo jak we wspomnianej serii. Inaczej ustawiono moduły MIO, a mianowicie w jednej linii na parterze co pokazano na rys. A.16. Aby nie zmniejszać czytelności rysunku numery MIO oraz ich współrzędne podano w tab. A.2.

Seria 18

Serię o numerze 18 zrealizowano w tym samym obiekcie co poprzednie dwie serie. Tym razem węzły referencyjne zostały umieszczone na zewnątrz budynku, a moduły MIO wewnątrz na parterze (rys. A.17). Wszystkie urządzenia znajdowały się na jednakowej wysokości. W tym celu węzły PWR umieszczono na stojakach, tak by tworzyły jedną płaszczyznę równą z płaszczyzną podłogi, na której stały moduły MIO, wewnątrz budynku.



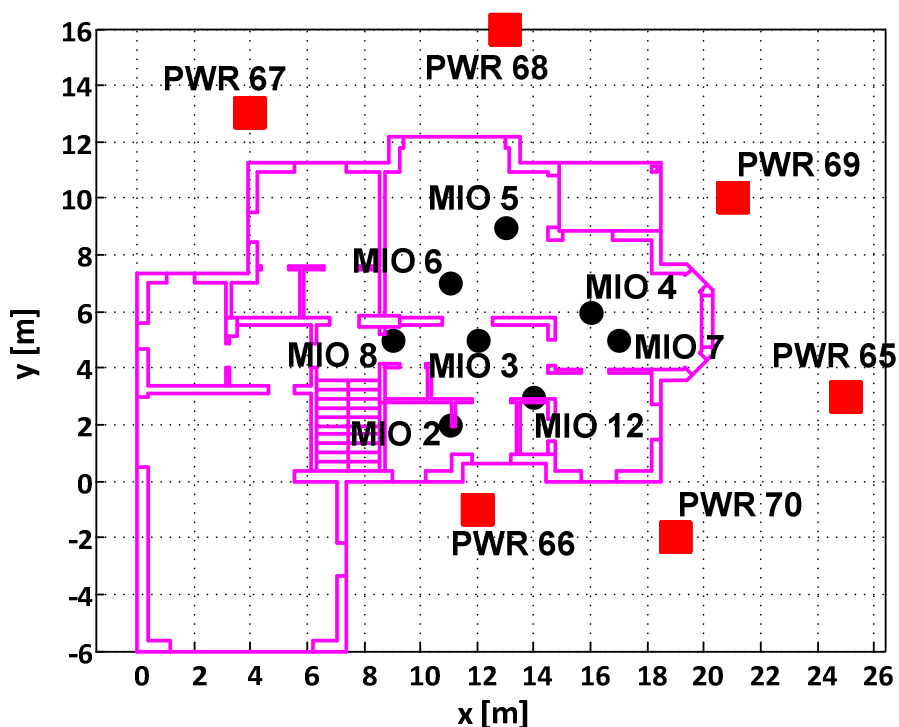
Rys. A.15. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 16



Rys. A.16. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 17

Tab. A.2. Współrzędne modułów MIO w serii 17

Numer MIO	Współrzędna x [m]	Współrzędna y [m]	Współrzędna z [m]
2	8	5	0
3	12	5	0
4	17	5	0
5	13	5	0
6	11	5	0
7	16	5	0
8	9	5	0
12	10	5	0



Rys. A.17. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 18

Seria 19

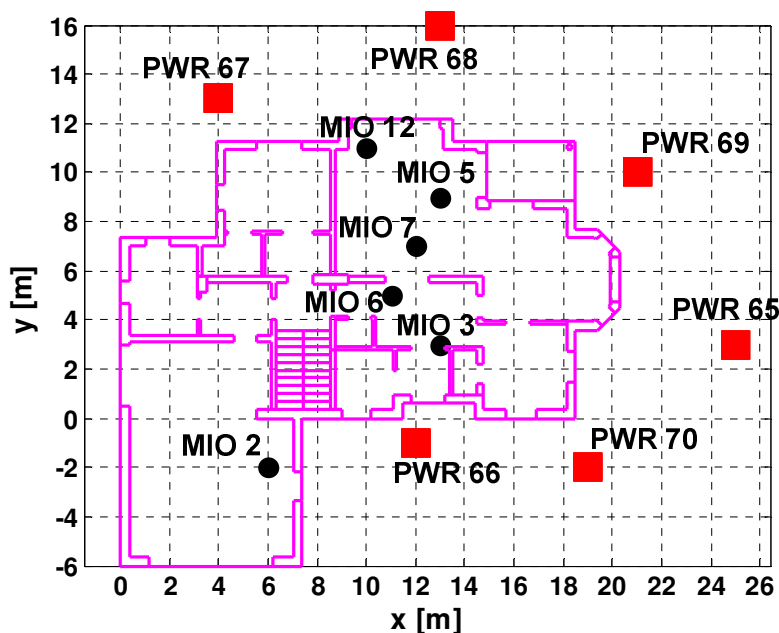
W tej serii rozstawienie urządzeń na płaszczyźnie było takie jak w serii 18. Moduły MIO pozostawiono na tych samych miejscach na wysokości 0 m (we wcześniej przyjętym lokalnym układzie współrzędnych), natomiast węzły PWR rozmieszczono na różnych wysokościach. Dokładne współrzędne węzłów PWR podano w tab. A.3. Na rys. A.17 zaznaczono punkty umiejscowienia urządzeń.

Tab. A.3. Współrzędne węzłów PWR w serii 19

Numer PWR	Współrzędna x [m]	Współrzędna y [m]	Współrzędna z [m]
65	21	10	2,70
66	12	-1	0,00
67	4	13	2,70
68	13	16	0,00
69	25	3	-1,00
70	19	-2	-0,65

Seria 20

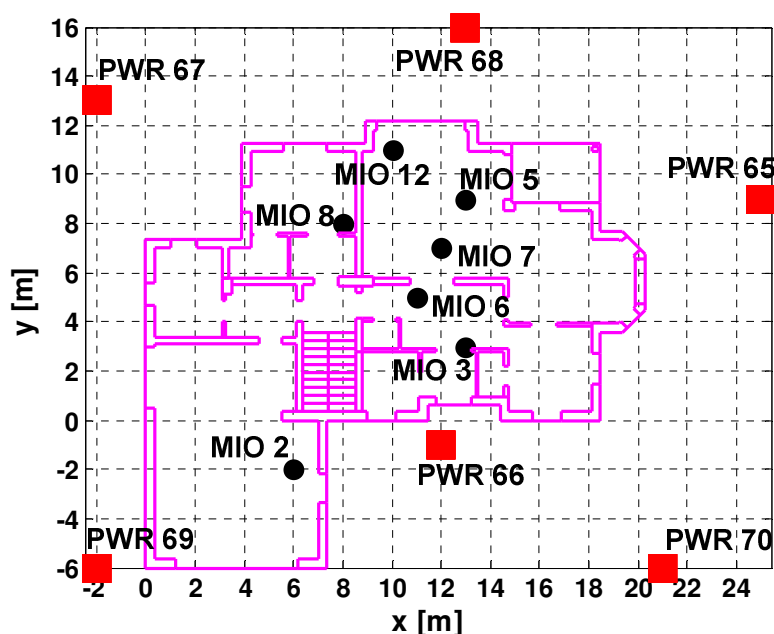
Ta seria również realizowana była w tym samym domu co poprzednie 4 serie. Sześć węzłów PWR rozmieszczono na zewnątrz budynku na wysokości 0 m (we wcześniej przyjętym lokalnym układzie współrzędnych). Moduły MIO umieszczono wewnątrz na piętrze (wysokość 3,1 m), oprócz MIO 5, który został na parterze. Rozstawienie to obrazuje rys. A.18.



Rys. A.18. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 20

Seria 21

Miejscem przeprowadzenia pomiarów był ten sam dom, w którym wykonano pomiary w poprzednich 5 seriach. Rozstawienie modułów MIO było takie jak w serii 20. Zmieniono położenie węzłów PWR, tak by otaczały cały budynek. Wysokość MIO wynosiła 3,1 m (oprócz MIO 5 znajdującego się na wysokości 0 m), a wysokość PWRów 0 m (we wcześniej przyjętym lokalnym układzie współrzędnych). Na rys. A.19 pokazano rozmieszczenie poszczególnych urządzeń.



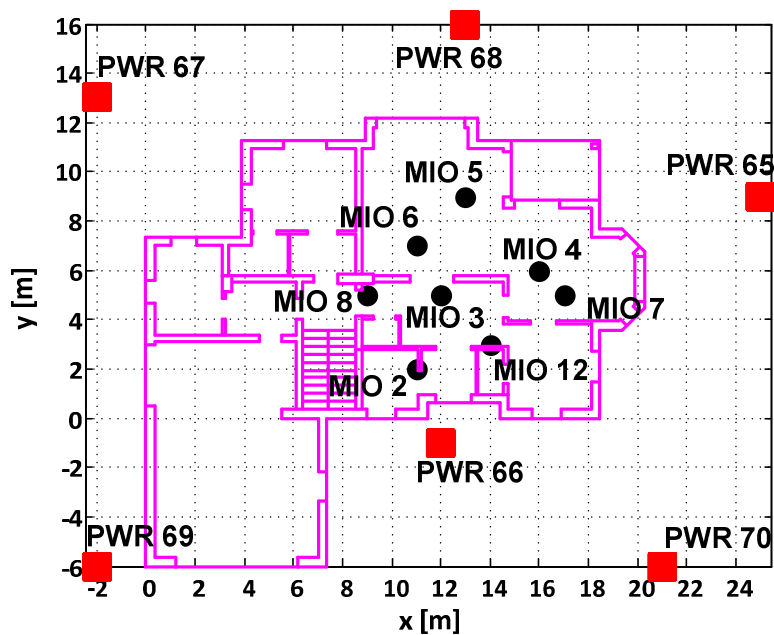
Rys. A.19. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 21

Seria 22

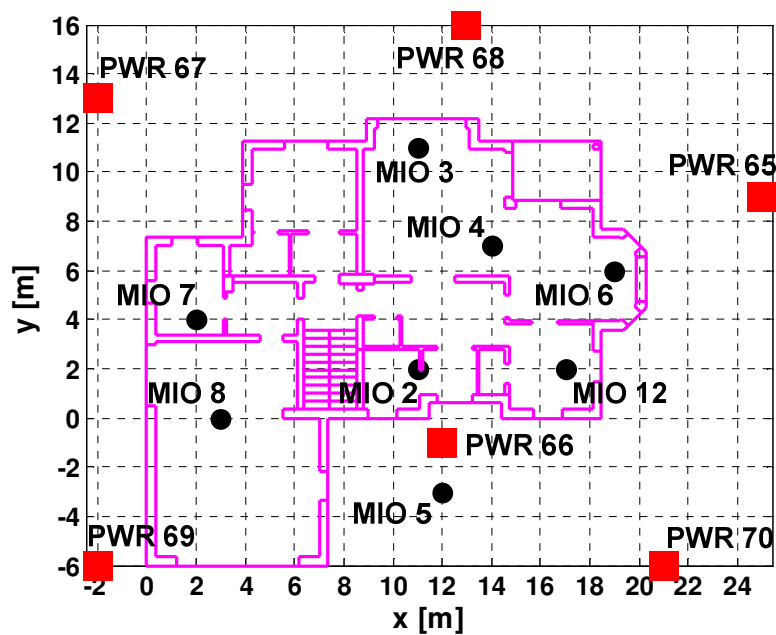
Seria była przeprowadzona w tym samym budynku co seria 21. Wysokość wszystkich urządzeń wynosiła 0 m. Węzły referencyjne były rozstawione tak by otaczały cały budynek. Na rys. A.20 pokazano to rozstawienie.

Seria 23

Pomiary wykonano w tym samym budynku co w poprzedniej serii. Rozstawienie węzłów PWR było także takie samo jak w serii 22. Inaczej rozmieszczono moduły MIO, co zostało pokazane na rys. A.21. Wysokość wszystkich urządzeń wynosiło 0 m.



Rys. A.20. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 22



Rys. A.21. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 23

Spis tabel

Tab. 6.1. Współrzędne stacji referencyjnych PWR w terenie otwartym.....	85
Tab. 6.2. Analiza zbieżności algorytmu WAP w terenie otwartym.....	86
Tab. 6.3. Porównanie efektywności algorytmów: WAP ($\alpha = 0,2$), Chana oraz Foy'a w terenie otwartym.....	90
Tab. 6.4. Współrzędne stacji referencyjnych PWR, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku.....	92
Tab. 6.5. Współrzędne modułów MIO, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku.....	93
Tab. 6.6. Analiza zbieżności algorytmu WAP, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku.....	93
Tab. 6.7. Porównanie efektywności algorytmów, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku.....	97
Tab. 6.8. Współrzędne stacji referencyjnych PWR, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz budynku, a moduły MIO wewnątrz tego budynku.....	99
Tab. 6.9. Współrzędne modułów MIO, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz budynku, a moduły MIO wewnątrz tego budynku.....	99
Tab. 6.10. Analiza zbieżności algorytmu WAP, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz budynku, a moduły MIO wewnątrz.....	99
Tab. 6.11. Błędy wyznaczania położenia obiektów algorytmem Foy'a przy włączonym i wyłączonym warunku końca, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz budynku, a moduł MIO 2 wewnątrz.....	104
Tab. 6.12. Porównanie efektywności algorytmów, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz budynku, a moduły MIO wewnątrz.....	107
Tab. 6.13. Współrzędne stacji referencyjnych PWR, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku.....	110
Tab. 6.14. Współrzędne modułów MIO, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku.....	110
Tab. 6.15. Analiza wpływu współczynnika kierunkowego A na efektywność algorytmu WAP, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się w budynku, dla $B = 10$	111
Tab. 6.16. Analiza wpływu współczynnika kierunkowego B na efektywność algorytmu WAP, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się w budynku, dla $A = 1,1$	113
Tab. 6.17. Porównanie efektywności algorytmów, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku.....	116
Tab. 6.18. Współrzędne stacji referencyjnych PWR, gdy znajdowały się na zewnątrz budynku, a moduły MIO wewnątrz na parterze.....	117

<i>Tab. 6.19. Analiza wpływu współczynnika kierunkowego A na efektywność algorytmu WAP, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na parterze, dla B = 10.....</i>	<i>119</i>
<i>Tab. 6.20. Analiza wpływu współczynnika kierunkowego B na efektywność algorytmu WAP, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na parterze, dla A = 2,3.....</i>	<i>120</i>
<i>Tab. 6.21. Porównanie efektywności algorytmów, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na parterze.....</i>	<i>123</i>
<i>Tab. 6.22. Współrzędne modułów MIO rozstawionych wewnątrz budynku na piętrze.....</i>	<i>124</i>
<i>Tab. 6.23. Analiza wpływu współczynnika kierunkowego A na efektywność algorytmu WAP, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na piętrze, dla B = 10.....</i>	<i>125</i>
<i>Tab. 6.24. Analiza wpływu współczynnika kierunkowego B na efektywność algorytmu WAP, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na piętrze, dla A = 1,4.....</i>	<i>126</i>
<i>Tab. 6.25. Porównanie efektywności algorytmów, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na piętrze.....</i>	<i>130</i>
<i>Tab. 7.1. Współrzędne stacji referencyjnych rozstawionych w wierzchołkach trójkąta.....</i>	<i>134</i>
<i>Tab. 7.2. Współrzędne stacji referencyjnych podczas symulacji dla liczby stacji referencyjnych większej niż 3.....</i>	<i>135</i>
<i>Tab. 7.3. Błąd RMSE określania położenia obiektu [m] w zależności od liczby stacji referencyjnych dla wariancji błędów pomiarów odległości 8,6 m².....</i>	<i>138</i>
<i>Tab. 7.4. Współrzędne stacji referencyjnych podczas symulacji w przestrzeni 3D.....</i>	<i>140</i>
<i>Tab. A.1. Współrzędne modułów MIO w serii 15.....</i>	<i>169</i>
<i>Tab. A.2. Współrzędne modułów MIO w serii 17.....</i>	<i>171</i>
<i>Tab. A.3. Współrzędne węzłów PWR w serii 19.....</i>	<i>172</i>

Spis rysunków

Rys. 2.1. Określenie położenia obiektu w metodzie TOA	25
Rys. 2.2. Ilustracja metody SDS-TWR.....	27
Rys. 2.3. Określanie położenia obiektu w metodzie TDOA	29
Rys. 2.4. Określanie położenia obiektu w metodzie AoA.....	31
Rys. 2.5. Określanie położenia obiektu w metodzie AoA w obecności przeszkód.....	33
Rys. 3.1. Estymaty dystrybuanty błędów określania położenia dla pomiarów odległości wykonanych, gdy stacje referencyjne były rozstawione na zewnątrz budynku a stacje, których położenie określano, wewnątrz na parterze. Seria 13 z załącznika A.....	44
Rys. 3.2. Estymaty dystrybuanty błędów określania położenia dla pomiarów odległości wykonanych, gdy stacje referencyjne były rozstawione na zewnątrz budynku a stacje, których pozycje określano, wewnątrz na piętrze (wys. 3,04 m). Seria 14 z załącznika A.....	44
Rys. 3.3. Estymaty dystrybuanty błędów określania położenia dla pomiarów wykonanych, gdy stacje referencyjne były rozstawione na zewnątrz budynku a stacje, których położenie określano, wewnątrz na parterze. Seria 13 z załącznika A.....	49
Rys.3.4. Estymaty dystrybuanty błędów określania położenia dla pomiarów wykonanych, gdy stacje referencyjne były rozstawione na zewnątrz budynku a stacje, których położenie określano, wewnątrz na piętrze (wys. 3,04 m). Seria 14 z załącznika A.....	50
Rys.3.5. Błąd określania położenia obiektu w funkcji wariancji błędów pomiarów odległości o rozkładzie Gaussa i wartości średniej 0 dla algorytmów: Chana, Foy'a i Fanga	52
Rys. 3.6. Przykładowy rozkład błędów rzeczywistych pomiarów odległości w środowisku wewnątrzbudynkowym	55
Rys. 3.7. Przykładowy wykres nieliniowej funkcji błędów	57
Rys. 4.1. Ogólna struktura sieci SALOn.....	61
Rys. 4.2. Schemat blokowy budowy modułu identyfikacji osobistej MIO.....	65
Rys. 4.3. Prototypowa wersja modułu identyfikacji osobistej MIO.....	65
Rys. 4.4. Schemat blokowy budowy pośredniczącego węzła radiokomunikacyjnego PWR	66
Rys. 4.5. Prototypowa wersja pośredniczącego węzła radiokomunikacyjnego PWR	66
Rys. 4.6. Prototypowa wersja głównej stacji nadzoru GSN z podłączonym węzłem PWR.....	67
Rys. 4.7. Tablet przemysłowy jako komputer do wizualizacji położenia obiektów.....	67
Rys. 5.1. Schemat blokowy programu służącego do wyznaczania estymat położenia obiektów trzema algorytmami: WAP, Chana oraz Foy'a.....	71
Rys. 5.2. Schemat blokowy programu służącego do badania zbieżności algorytmu WAP.....	73

Rys. 5.3. Schemat blokowy programu służącego do badania wpływu nachylenia półprostych tworzących funkcję błędu na efektywność algorytmu WAP.....	75
Rys. 5.4. Schemat blokowy funkcji implementującej nowy wewnątrzbudynkowy algorytm wyznaczania położenia obiektów WAP.....	78
Rys. 5.5. Schemat blokowy funkcji implementującej algorytm Chana.....	80
Rys. 5.6. Schemat blokowy funkcji implementującej algorytm Foy'a.....	81
Rys. 6.1. Obszar rozstawienia systemu SALOn.....	84
Rys. 6.2. Zdjęcia wybranych urządzeń rozstawionych na łące: a) węzeł PWR, b) moduł MIO.....	85
Rys. 6.3. Rozkład błędów rzeczywistych pomiarów odległości dla MIO 4 na łące.....	85
Rys. 6.4. Zależność a) dokładności i b) precyzji od liczby iteracji, gdy parametr $\alpha = 0,3$, a stacje PWR i moduły MIO rozstawiono w terenie otwartym.....	88
Rys. 6.5. Zależność a) dokładności i b) precyzji od liczby iteracji, gdy parametr $\alpha = 0,25$, a stacje PWR i moduły MIO rozstawiono w terenie otwartym.....	89
Rys. 6.6. Estymaty dystrybuanty błędów wyznaczania położenia dla algorytmów: WAP ($\alpha = 0,2$), Chana i Foy'a w terenie otwartym	90
Rys. 6.7. Przestrzeń, w której rozstawiono system SALOn podczas pomiarów w nowym gmachu Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej.....	91
Rys. 6.8. Rozkład błędów rzeczywistych pomiarów odległości zrealizowanych w południowym korytarzu na drugim piętrze nowego gmachu Wydziału ETI	92
Rys. 6.9. Zależność a) dokładności i b) precyzji od liczby iteracji, gdy parametr $\alpha = 0,3$, a węzły PWR i moduły MIO rozstawiono wewnątrz budynku	94
Rys. 6.10. Estymaty położenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomocą algorytmu WAP, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku	95
Rys. 6.11. Estymaty położenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomocą algorytmu Chana, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku.....	95
Rys. 6.12. Estymaty położenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomocą algorytmu Foy'a, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku	96
Rys. 6.13. Estymaty dystrybuanty błędów wyznaczania położenia dla algorytmów: WAP, Chana oraz Foy'a, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku	97
Rys. 6.14. a) Węzeł PWR, b) moduł MIO podczas pomiarów zrealizowanych w niezamieszkanym domu jednorodzinnym.....	98
Rys. 6.15. Rozkład błędów rzeczywistych pomiarów odległości, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz niezamieszkanego domu jednorodzinnego, a moduły MIO wewnątrz tego budynku na parterze	98
Rys. 6.16. Zależność a) dokładności i b) precyzji od liczby iteracji, gdy parametr $\alpha = 0,3$, węzły PWR rozstawione wewnątrz budynku, a MIO na zewnątrz tego budynku.....	100
Rys. 6.17. Zależność a) dokładności i b) precyzji od liczby iteracji, gdy parametr $\alpha = 0,1$, węzły PWR rozstawione wewnątrz budynku, a MIO na zewnątrz tego budynku.....	101
Rys. 6.18. Rozkład błędów rzeczywistych pomiarów odległości dla MIO 2 znajdującego się wewnątrz budynku, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz tego budynku.....	102
Rys. 6.19. Zależność a) dokładności i b) precyzji od liczby iteracji dla MIO 2 znajdującego się wewnątrz budynku, gdy parametr $\alpha = 0,2$, a węzły PWR rozstawiono na zewnątrz budynku	103

Rys. 6.20. Estymaty dystrybuanty błędów wyznaczania położenia algorytmem Foy'a przy włączonym i wyłączonym warunku końca, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz budynku, a moduł MIO 2 wewnątrz.....	104
Rys. 6.21. Estymaty położenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomocą algorytmu WAP, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz budynku, a moduły MIO wewnątrz.....	105
Rys. 6.22. Estymaty położenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomocą algorytmu Chana, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz budynku, a moduły MIO wewnątrz.....	106
Rys. 6.23. Estymaty położenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomocą algorytmu Foy'a, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz budynku, a moduły MIO wewnątrz.....	106
Rys. 6.24. Estymaty dystrybuanty błędów wyznaczania położenia dla algorytmów: WAP, Chana oraz Foy'a, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz budynku, a moduły MIO wewnątrz.....	107
Rys. 6.25. Zdjęcia wybranych urządzeń podczas pomiarów w zamieszkanym domu jednorodzinym.....	111
Rys. 6.26. Zależność dokładności, precyzji oraz średniej liczby iteracji od współczynnika kierunkowego A, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku, dla $B = 10$	112
Rys. 6.27. Zależność dokładności, precyzji oraz średniej liczby iteracji od współczynnika kierunkowego B, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku, dla $A = 1,1$	114
Rys. 6.28. Estymaty położenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomocą algorytmu WAP, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku.....	114
Rys. 6.29. Estymaty położenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomocą algorytmu Chana, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku.....	115
Rys. 6.30. Estymaty położenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomocą algorytmu Foy'a, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku.....	115
Rys. 6.31. Estymaty dystrybuanty błędów wyznaczania położenia dla algorytmów: WAP, Chana oraz Foy'a, gdy wszystkie urządzenia znajdowały się wewnątrz budynku.....	116
Rys. 6.32. Zależność dokładności, precyzji oraz średniej liczby iteracji od współczynnika kierunkowego A, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na parterze, dla $B = 10$	118
Rys. 6.33. Zależność dokładności, precyzji oraz średniej liczby iteracji od współczynnika kierunkowego B, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na parterze, dla $A = 2,3$	121
Rys. 6.34. Estymaty położenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomocą algorytmu WAP, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na parterze	121
Rys. 6.35. Estymaty położenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomocą algorytmu Chana, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na parterze	122
Rys. 6.36. Estymaty położenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomocą algorytmu Foy'a, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na parterze	122
Rys. 6.37. Estymaty dystrybuanty błędów wyznaczania położenia dla algorytmów: WAP, Chana oraz Foy'a, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na parterze	123

Rys. 6.38. Zależność dokładności, precyzji oraz średniej liczby iteracji od współczynnika kierunkowego A , gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na piętrze, dla $B = 10$	124
Rys. 6.39. Zależność dokładności, precyzji oraz średniej liczby iteracji od współczynnika kierunkowego B , gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na piętrze, dla $A = 1,4$	127
Rys. 6.40. Estymaty położenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomocą algorytmu WAP, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na piętrze.....	128
Rys. 6.41. Estymaty położenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomocą algorytmu Chana, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na piętrze.....	128
Rys. 6.42. Estymaty położenia obiektów (MIO) wyznaczone za pomocą algorytmu Foy'a, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na piętrze.....	129
Rys. 6.43. Estymaty dystrybuanty błędów wyznaczania położenia dla algorytmów: WAP, Chana oraz Foy'a, gdy węzły PWR znajdowały się na zewnątrz, a moduły MIO wewnątrz budynku na piętrze.....	129
Rys. 7.1. Zależność pierwiastka błędu średniokwadratowego określania położenia obiektu od wariancji pomiarów odległości w obecności szumu, gdy liczba stacji referencyjnych wynosiła 3.....	134
Rys. 7.2. Zależność pierwiastka błędu średniokwadratowego określania położenia obiektu od wariancji pomiarów odległości w obecności szumu, gdy liczba stacji referencyjnych wynosiła 4.....	135
Rys. 7.3. Zależność pierwiastka błędu średniokwadratowego określania położenia obiektu od wariancji pomiarów odległości w obecności szumu, gdy liczba stacji referencyjnych wynosiła 5.....	136
Rys. 7.4. Zależność pierwiastka błędu średniokwadratowego określania położenia obiektu od wariancji pomiarów odległości w obecności szumu, gdy liczba stacji referencyjnych wynosiła 6.....	136
Rys. 7.5. Zależność pierwiastka błędu średniokwadratowego określania położenia obiektu od wariancji pomiarów odległości w obecności szumu, gdy liczba stacji referencyjnych wynosiła 7.....	137
Rys. 7.6. Zależność pierwiastka błędu średniokwadratowego określania położenia obiektu od wariancji pomiarów odległości dla przypadku trójwymiarowego.....	141
Rys. 7.7. Procentowy udział czasu wykonywania algorytmów wyznaczania położenia obiektów.....	142
Rys. 8.1. Zestawienie pierwiastków błędów średniokwadratowych dokładności dla algorytmów: WAP, Chana oraz Foy'a dla różnych serii pomiarowych przeprowadzonych w warunkach wewnątrzbudynkowych.....	147
Rys. 8.2. Zestawienie pierwiastków błędów średniokwadratowych precyzji dla algorytmów: WAP, Chana oraz Foy'a dla różnych serii pomiarowych przeprowadzonych w warunkach wewnątrzbudynkowych.....	147
Rys. A.1. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 1.....	160
Rys. A.2. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 2.....	160
Rys. A.3. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 3.....	161

Rys. A.4. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w seriach pomiarowych nr 4 i 5.....	161
Rys. A.5. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 6	162
Rys. A.6. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 7	163
Rys. A.7. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 9	164
Rys. A.8. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 10	165
Rys. A.9. Rozmieszczenie modułów MIO systemu SALOn w serii pomiarowej nr 11	166
Rys. A.10. Rozmieszczenie węzłów PWR systemu SALOn w serii pomiarowej nr 11.....	166
Rys. A.11. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 12	167
Rys. A.12. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 13	168
Rys. A.13. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 14	168
Rys. A.14. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 15	169
Rys. A.15. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 16	170
Rys. A.16. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 17	171
Rys. A.17. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 18	172
Rys. A.18. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 20	173
Rys. A.19. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 21	174
Rys. A.20. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 22	175
Rys. A.21. Rozmieszczenie urządzeń systemu SALOn w serii pomiarowej nr 23	175