



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ ELEKTRONIKI,
TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI



Imię i nazwisko studenta: Przemysław Łaszczuk

Nr albumu: 171869

Poziom kształcenia: Studia pierwszego stopnia

Forma studiów: stacjonarne

Kierunek studiów: Elektronika i telekomunikacja

Profil: Inżynieria mikrofalowa i antenowa

PROJEKT DYPLMOWY INŻYNIERSKI

Tytuł projektu w języku polskim: Urządzenie wbudowane do lokalizacji wewnątrzbudynkowej w sieci BLE wykorzystujące antenę rekonfigurowalną

Tytuł projektu w języku angielskim: An embedded device for indoor localization in BLE networks based on a reconfigurable antenna

Opiekun pracy: dr hab. inż. Łukasz Kulas

Data ostatecznego zatwierdzenia raportu podobieństw w JSA: 15.01.2021

ABSTRACT

This paper presents information on the resulting complete system for indoor location of objects. The resulting system uses the Fingerprinting method to determine the location, basing on the Electronically Steerable Parasitic Array Radiator (ESPAR antenna) and a smartphone serving as a mobile broadcast station. The antenna covers the space around itself, by switching configurations and receiving information about the strength of the signal received from the phone.

The diploma thesis contains, among other things, information about the antenna used in the project, the Bluetooth standard used and the implemented fingerprinting method. The process of creating an algorithm simulating the operation of the antenna and the one controlling it, as well as the problems encountered during the creation of the code was also described.

The complete system was tested at home using the telephone as a localized object. The phone's antenna was controlled by a generally available application recommended by the manufacturer of the electronic board used in the ESPAR antenna.

A series of measurements was made in various conditions in the room, resulting in confirmation of the correctness of the system operation and noting the influence of many factors on its operation. Measurement results were documented and ways to improve system performance were proposed as well.

Keywords: Internet of Things (IoT), wireless sensor network (WSN), Bluetooth Low Energy (BLE), electronically steerable parasitic array radiator (ESPAR) antenna, Fingerprinting

OECD Fields of Science and Technology: Engineering and technology, electronic engineering, information engineering



InSecTT (www.insectt.eu) has received funding from the ECSEL Joint Undertaking (JU) under grant agreement No 876038. The JU receives support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and Austria, Sweden, Spain, Italy, France, Portugal, Ireland, Finland, Slovenia, Poland, Netherlands, Turkey.

The document reflects only the author's view and the Commission is not responsible for any use that may be made of the information it contains.



STRESZCZENIE

W tej pracy przedstawiono informacje na temat powstałego w jej wyniku kompletnego systemu do wewnątrzbudynkowej lokalizacji obiektów. Powstały system wykorzystuje do określania lokalizacji metodę Fingerprinting bazując na antenie Electronically Steerable Parasitic Array Radiator (ESPAR) oraz telefonie pełniącym rolę mobilnej stacji nadawczej. Antena pokrywa przestrzeń dookoła siebie przełączając konfiguracje i odbierając informacje o sile sygnału otrzymywanego z telefonu.

Praca dyplomowa zawiera między innymi informacje o zastosowanej w projekcie antenie, wykorzystanym standardzie Bluetooth oraz zaimplementowanej metodzie Fingerprintingu. Opisano również proces tworzenia algorytmu symulującego pracę anteny oraz nią sterującego, jak również napotkane podczas powstawania kodu problemy.

Kompletny system przebadano w warunkach domowych używając telefonu jako obiektu lokalizowanego. Antenę telefonu sterowana była za pomocą ogólnodostępnej aplikacji polecanej przez producenta wykorzystywanej technologii.

Wykonano serię pomiarów w różnych warunkach panujących w pomieszczeniu, potwierdzając poprawność działania systemu oraz odnotowując wpływ wielu czynników na jego pracę. Udokumentowano wyniki pomiarów i zaproponowano sposoby na poprawę funkcjonowania systemu.

Słowa kluczowe: Internet Rzeczy, IoT, Bezprzewodowa Sieć Sensorowa, WSN, Bluetooth, antena z przełączaną wiązką, ESPAR, Fingerprinting

Dziedzina nauki i techniki zgodna z OECD: Nauki inżynierskie i techniczne, elektronika, inżynieria informatyczna



InSecTT (www.insectt.eu) has received funding from the ECSEL Joint Undertaking (JU) under grant agreement No 876038. The JU receives support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and Austria, Sweden, Spain, Italy, France, Portugal, Ireland, Finland, Slovenia, Poland, Netherlands, Turkey.

The document reflects only the author's view and the Commission is not responsible for any use that may be made of the information it contains.



SPIS TREŚCI

| | |
|---|----|
| WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW | 6 |
| 1. WSTĘP I CEL PRACY | 7 |
| 1.1 Wprowadzenie | 7 |
| 1.2 Cel pracy..... | 7 |
| 2. WYKORZYSTANA TECHNOLOGIA ORAZ METODY LOKALIZACJI | 8 |
| 2.1 Bluetooth..... | 8 |
| 2.2 Płytki nRF52840-DK..... | 8 |
| 2.3 Metody lokalizacji | 9 |
| 2.3.1 Tri/Multilateracja | 9 |
| 2.3.2 Tri/Multiangulacja | 9 |
| 2.3.3 Metoda Fingerprinting | 9 |
| 3. ANTENA ESPAR | 11 |
| 3.1 Czym jest antena rekonfigurowalna | 11 |
| 3.2 Czym jest antena ESPAR..... | 11 |
| 3.3 Zasada działania i budowa Anteny..... | 11 |
| 4. SYMULACJA PRACY ANTENY..... | 13 |
| 4.1 Ewolucja założeń projektowych..... | 13 |
| 4.2 Proces tworzenia algorytmu | 13 |
| 4.3 Wyniki symulacji i wnioski..... | 16 |
| 5. ALGORYTM STERUJĄCY ANTENĄ..... | 18 |
| 5.1 Założenia projektowe | 18 |
| 5.2 Algorytm | 19 |
| 5.3 Warunki testów..... | 23 |
| 5.4 Testy Pracy Anteny | 25 |
| 5.4.1 Antena 50 cm nad płaszczyzną siatki pomiarowej..... | 25 |
| 5.4.2 Ponowna kalibracja systemu..... | 28 |
| 5.4.3 Praca anteny dla różnych wysokości nad płaszczyzną siatki pomiarowej..... | 31 |
| 5.5 Omówienie wyników..... | 33 |
| 6. PODSUMOWANIE | 35 |
| WYKAZ LITERATURY | 36 |

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

| | | |
|-----------|---|---|
| RSSI | – | Received Signal Strength Indicator, siła odebranego sygnału |
| BLE | – | Bluetooth Low Energy |
| ESPAR | – | Electronically Steerable Parasitic Array Radiator |
| λ | – | Lambda – długość fali sygnału |
| DoA | – | Direction of Arrival |
| TOA | – | Time of Arrival |
| TDOA | – | Time Difference of Arrival |
| AOA | – | Angle of Arrival |
| SoC | – | System on Chip |
| Hardware | - | Sprzęt Elektroniczny/Komputerowy |

1. WSTĘP I CEL PRACY

1.1 Wprowadzenie

W XXI wieku świat postępuje do przodu w bardzo szybkim tempie. Powoli dochodzimy do momentu, w którym nie będzie można wymyślić już czegoś mniejszego, szybszego czy tańszego. Zasoby świata są ograniczone, atom pozostanie najmniejszą cząstką wszechświata, a ceny technologii z uwagi na ograniczenie zasobów będą tylko rosły. Przychodzi więc czas na inne podejście dla zarówno najmniejszych przedsiębiorstw jak i największych korporacji.

Na pomoc firmom przy oszczędzaniu cennych środków finansowych przychodzi optymalizacja. Może ona przyjmować różne formy, np. skrócenie czasu produkcji, zmniejszenie kosztów czy nawet regulacja zatrudnienia. Jest to luka w rynku, którą uzupełnić może technologia wykorzystująca komunikację bezprzewodową. Założeniem optymalizacji pracy jest efektywność. Technologia zastosowana w celu jej uzyskania musi więc sama spełniać założenia, które ma gwarantować. Od urządzeń komunikacji bezprzewodowej oczekiwania więc można niskiego zużycia energii, szybkiej pracy, bezawaryjności, łatwości w obsłudze i funkcjonalności.

Przydatnym zastosowaniem komunikacji bezprzewodowej w pracy wielu firm jest lokalizacja obiektów. Dużą część czasu pracy osoby pracującej w magazynie stanowi określenie położenia poszukiwanego przedmiotu. Czas ten można skrócić do minimum stosując urządzenie do wykonywania tej części pracy za człowieka. Do wysłania/odebrania informacji potrzebna jest antena. Do lokalizacji w dużych magazynach należałoby jednak wykorzystać wiele anten, biorąc pod uwagę ich charakterystykę promieniowania. Aby spełniać wyżej wspomniane założenia optymalizacji pracy potrzebna jest jak najmniejsza ilość anten.

Dobrym rozwiązaniem jest tutaj antena rekonfigurowalna z elektronicznie sterowanym szykiem radiatorów ESPAR [1] służąca do określania kierunku nadchodzącego sygnału. Polega ona na koncepcie wydajnego energetycznie sterowania wiązką. Posiada kilka lub więcej elementów pasywnych służących do ukierunkowania unikalnych wiązek. W przeciwieństwie do podobnych w działaniu systemów anten wykorzystujących wiele jednostek cyfrowego przetwarzania sygnału są mniej kosztowne i zużywają mniej energii przy utrzymaniu zbliżonej dokładności w określaniu lokalizacji obiektów.

1.2 Cel pracy

Celem pracy było stworzenie kompletnego urządzenia wbudowanego na bazie anteny rekonfigurowalnej, która bazując na pomierzonej mocy pakietów odebranych w sieci Bluetooth Low Energy (BLE) będzie w stanie podać pozycję obiektu wewnątrz budynku.

W ramach pracy na bazie dostępnego projektu anteny rekonfigurowalnej konieczne jest zaprojektowanie kompletnego autonomicznego bezprzewodowego systemu wbudowanego, w tym m.in. wybór mikrokontrolera/komputera jednopłytkowego, implementacja oprogramowania wbudowanego oraz algorytmów do wyznaczania lokalizacji obiektu.

2. WYKORZYSTANA TECHNOLOGIA ORAZ METODY LOKALIZACJI

2.1 Bluetooth

Bluetooth [2] czyli niskopoziomowy, naziemny, bezprzewodowy standard ad hoc (doraźny) do komunikacji krótkiego zasięgu. Jest przeznaczony do małych i tanich urządzeń z niskim zużyciem energii. Technologia ta operuje na trzech różnych klasach urządzeń:

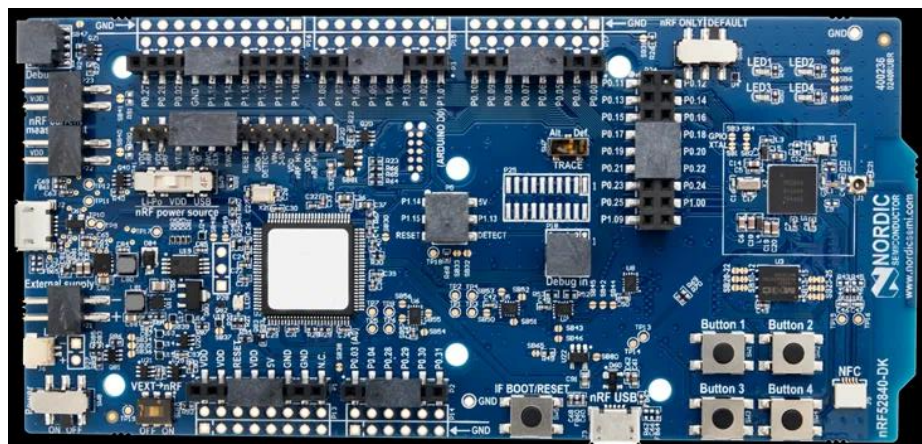
- klasa 1 - do 100 metrów, 100 mW
- klasa 2 - do 10 metrów, 2.5 mW
- klasa 3 - do 1 metra, 1 mW

Bezprzewodowa sieć Bluetooth działa na falach radiowych w paśmie od 2.402 GHz do 2.480 GHz. Istnieją różne wersje tego standardu dzielone głównie ze względu na przepustowość. Obecnie najnowszą wersją tego standardu jest Bluetooth 5.2.

BLE – wykorzystana w projekcie odmiana Bluetooth mająca za zadanie utrzymanie podobnego zasięgu transmisji do Bluetooth, natomiast pobierająca znacznie mniej energii. BLE działa na tym samym paśmie częstotliwościowym co jego przodek.

2.2 Płytki nRF52840-DK

Płytki nRF52840-DK [3] to hardware z rodziny nRF52 najbardziej polecany przez producenta do pracy z oprogramowaniem nRF Connect przy tworzeniu i testowaniu projektów bezprzewodowych. Wspiera on wszystkie standardy bezprzewodowe krótkiego zasięgu dostępne w rodzinie urządzeń nRF52 i posiada wbudowany kontroler USB zapewniający interfejs komunikacyjny o wysokiej przepustowości danych.



Rysunek 1. Płytki nRF52840-DK, zdjęcie pochodzi ze strony producenta: Nordic Semiconductor

Ten wszechstronny, zestaw deweloperski na jednej płytce o niskim zużyciu energii przystosowany jest m.in. do pracy z technologiami: Bluetooth Low Energy (BLE), siatka Bluetooth, Thread oraz Zigbee.

Płytkę posiada konfigurowalne diody LED oraz przycisk, posiada też wiele (48) uniwersalnych wejść i wyjść GPIO (General Purpose Input Output) rozmieszczonych wzdłuż płytki. Poza komunikacją radiową, nRF52840 może komunikować się z komputerem również przez USB.

Najważniejszym elementem płytki nRF52840-DK dla tego projektu dyplomowego jest zintegrowana antena pracująca na częstotliwości 2.4 GHz. Dzięki niej umożliwia się działanie ze standardem Bluetooth.

nRF52840 wykorzystuje standard Bluetooth 5.0. Dzięki S140 SoftDevice czyli stosowi protokołów BLE wspiera on następujące funkcjonalności:

- przesył 2 Mbps,
- daleki zasięg,
- rozszerzenia advertisingu,
- algorytm wyboru kanału,
- konfigurowalna ilość i szerokość kanałów,
- do 20 połączeń jednocześnie,

2.3 Metody lokalizacji

W tym punkcie zostaną przybliżone definicje trzech popularnych przy określaniu lokalizacji obiektów podejść wykorzystujących sygnały radiowe.

2.3.1 Tri/Multilateracja

W tej metodzie [4] wykorzystywane jest m.in. zjawisko tłumienia sygnału. Sygnał pochodzący od obiektu bardziej oddalonego będzie słabszy niż sygnał pochodzący z obiektu znajdującego się bliżej.

Obiekt lokalizowany posiadający informacje o pozycji nadajników wysyłających sygnał, może określić na podstawie siły odbieranego sygnału (RSSI) swoją pozycję przez wskazanie odległości od nadajników. Implementacja trzech nadajników potrzebnych do określenia pozycji obiektu to trilateracja, podczas gdy zastosowanie w systemie ich większej ilości to multilateracja.

Multilateracja nie musi opierać się wyłącznie na pomiarze RSSI. Przykładowo w nawigacji samochodowej zamiast siły sygnału odebranego wykorzystywany jest czas w jakim sygnał trafi do odbiornika [5]. Każda stacja odbiorcza mierzy wówczas czas potrzebny do osiągnięcia przez sygnał radiowy swojej pozycji, a gdy znane są czasy z trzech lub więcej stacji odbiorczych, można obliczyć pozycję odbiornika.

2.3.2 Tri/Multiangulacja

Inna lub dodatkowa metoda określania pozycji to tri/multiangulacja [4]. W porównaniu do tri/multilateracji nie jest mierzony tylko dystans od stacji nadawczej ale również kąt, z którego sygnał nadszedł. W tej metodzie potrzebny jest pomiar przynajmniej dwóch kątów nadchodzenia sygnału (AOA: Angle Of Arrival) oraz jednej długości dystansu między stacją odbiorczą a nadawczą. AOA mierzony jest przez wykorzystanie opóźnienia sygnału (TOF: Time Of Flight). TOF mierzy czas w jakim sygnał przedostanie się od obiektu lokalizowanego do stacji odbiorczej znajdującej się w znanym punkcie w przestrzeni.

2.3.3 Metoda Fingerprinting

Fingerprinting [6] to metoda lokalizacji bazująca na sile odebranego sygnału, składająca się z dwóch faz. Faza offline/faza uczenia się, gdzie wektory składają się z wartości pomierzonych RSSI oraz czasem z dodatkowych informacji pomierzonych w określonych i znanych punktach. Te pomierzone wartości składają się na zestaw danych kalibracyjnych

razem z informacją o koordynatach punktu pomiarowego. Zestaw ten nazywany jest bazą fingerprintów. Druga faza – lokalizacja obiektu, mierzone jest RSSI pochodzące od szukanego nadajnika i porównywane z bazą fingerprintów wykorzystując metody najlepiej spełniające dane założenia projektowe np.:

- Odległość Euklidesowa,
- metody probabilistyczne,
- sieci neuronowe,

Metoda Fingerprinting jest bardzo złożonym sposobem na określenie lokalizacji obiektu biorąc pod uwagę liczbę modyfikowalnych parametrów w celu uzyskania konkretnego efektu. Niżej sporządzony został opis [1] faz tej metody w kontekście tego konkretnego projektu dyplomowego:

- Offline - podział pomieszczenia na siatkę punktów pomiarowych oraz dokonanie pomiarów. Siła sygnału odebranego od urządzenia lokalizowanego, którego rolę pełni telefon, jest mierzona dla każdego punktu ustawienia telefonu w siatce pomiarowej przez 12 konfiguracji anteny ESPAR, określoną ilość razy na konfigurację. Dla pomiarów z każdej konfiguracji dokonywane jest uśrednienie wyników. Mamy dzięki temu wektor o długości równej ilości konfiguracji, przetrzymujący wartości RSSI. Takich wektorów istnieje tyle, ile istnieje punktów pomiarowych w siatce. W efekcie końcowym fazy offline otrzymujemy wektor „x” lokalizacji lub też numerów punktów pomiarowych, zależnie od przyjętej formy oraz „x” wektorów otrzymanych dla nich RSSI – tak zwanych Fingerprint’ów.
- Online – w tej fazie lokalizacji obiektu wykonujemy niemalże ten sam proces co w fazie offline. Wykonuje się pomiary w dokładnie tej samej kolejności co w fazie offline w celu możliwości późniejszego porównania wektorów zebranych próbek w czasie fazy online oraz tych zebranych w fazie offline. Najprostszym sposobem na odnalezienie miejsca lokalizacji nadajnika jest określenie wektora fingerprintów o najmniejszym dystansie dzielącym go od wektora próbek. Do określenia wartości odległości wybrano wzór na dystans Euklidesa [7]:

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^n (RSSI_{ci} - RSSI_{pi})^2} \quad (2.1)$$

Gdzie n oznacza ilość konfiguracji anteny, $RSSI_{ci}$ to wartość RSSI pomierzona dla i-tej konfiguracji podczas fazy offline – kalibracji, natomiast, $RSSI_{pi}$ to wartość RSSI pomierzona dla i-tej konfiguracji w fazie online – lokalizacji obiektów. Im mniejsza wartość zmiennej d, tym większe podobieństwo między próbkami więc większe prawdopodobieństwo określenia pozycji obiektu.

3. ANTENA ESPAR

3.1 Czym jest antena rekonfigurowalna

Aby pracować z układem bazującym na antenie rekonfigurowalnej, którą w przypadku tego projektu jest antena ESPAR, należy wiedzieć czym tak właściwie jest antena rekonfigurowalna oraz jak działa.

W elektronice pojawia się coraz większe zapotrzebowanie na urządzenia o elastycznej funkcjonalności, zdolne do wykonywania wielu zadań. Wymaga się od nich, aby zmiana funkcjonalności urządzenia nie wiązała się z jego fizycznym przekształceniem. Do takich urządzeń należą anteny rekonfigurowalne.

Antena rekonfigurowalna dzięki swojej budowie jest w stanie zmieniać swoje parametry jak charakterystyka promieniowania, częstotliwościowe pasmo pracy, polaryzacja lub kombinacja wcześniej wymienionych. Zmiana dokonywana jest poprzez przełączniki realizowane na wiele sposobów, na przykład diody PIN lub tranzystory przystosowane do pracy na wysokich częstotliwościach.

3.2 Czym jest antena ESPAR

Antena ESPAR jest przykładem anteny rekonfigurowalnej o zmiennej charakterystyce promieniowania. W ramach projektu nie potrzebna jest zmiana częstotliwości na której pracuje antena, ponieważ wykorzystuje ona pasmo odpowiadające pasmu BLE.

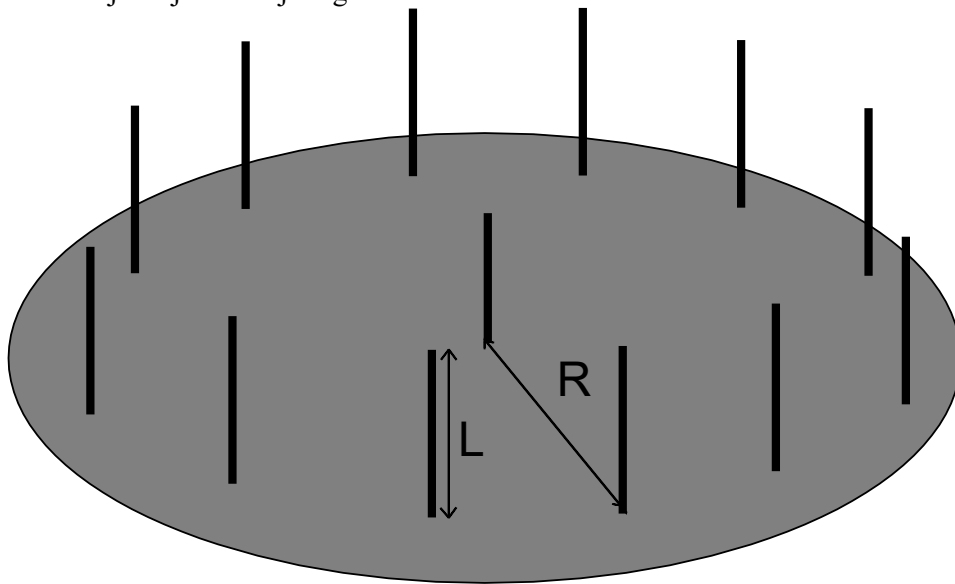


Rysunek 2. Antena ESPAR w obudowie, zapewniona przez KIMiA.

3.3 Zasada działania i budowa Anteny

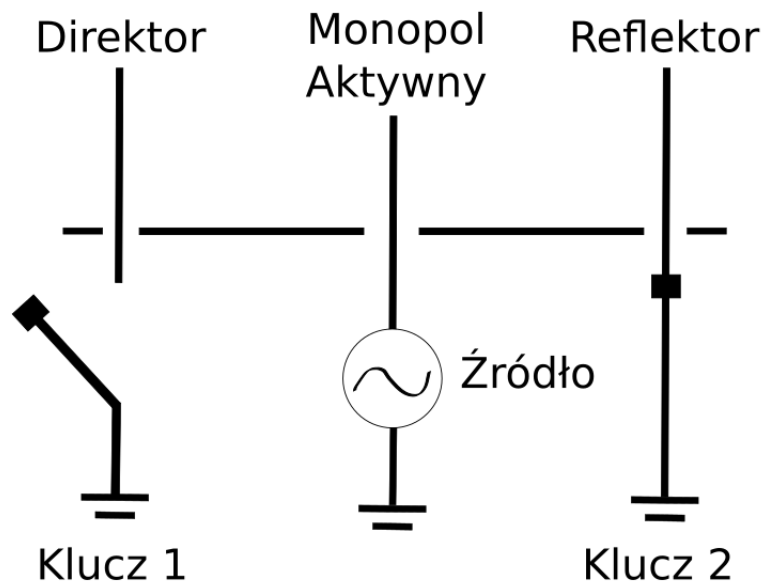
Antena ESPAR wykorzystana w projekcie posiada jeden centralny element aktywny podłączony do odbiornika radiowego – pojedynczy biegun aktywny (monopole). Dookoła centralnego elementu w równych odległościach od środka anteny (R) oraz od samych siebie,

znajduje się 12 elementów pasywnych o długości L (Rysunek 3.) Zarówno wartość R jak i L jest zbliżona do jednej czwartej długości fali.



Rysunek 3. Poglądowy rysunek 12-elementowej anteny ESPAR

Antena ma możliwość zmiany konfiguracji czyli w efekcie również charakterystyki promieniowania poprzez przełączanie elementów pasywnych. Proces ten odbywa się przez zwieranie lub rozwieranie elementów pasywnych z płaszczyzną uziemienia. Zadanie to wykonują przełączniki single pole – double throw, czyli jeden przełącznik z dwoma stanami, na które może się przełączyć.



Rysunek 4. Przełączanie elementów pasywnych na przykładzie anteny o dwóch elementach.

Zwarcie danego elementu pasywnego z płaszczyzną uziemienia, której funkcję spełnia metalizacja górnej warstwy laminatu, sprawia że od tego momentu dany element pasywny pełni funkcję reflektora odbijającego fale elektromagnetyczne anteny w przeciwnym kierunku.

W przypadku rozwarcia elementu pasywnego od płaszczyzny uziemienia, możemy ustawić jeden z 12 monopoli na funkcję direktora mającego zwiększyć promieniowanie anteny w danym kierunku.

Dzięki takiej budowie przez odpowiednie przełączanie elementów pasywnych, można regulować charakterystykę promieniowania anteny.

4. SYMULACJA PRACY ANTENY

4.1 Ewolucja założeń projektowych

Na początku pracy planowano uwzględnienie przy symulacji jak najprawdziwszych warunków pomiarowych. Symulacja miała uwzględniać położenie anteny w pomieszczeniu (sufit) oraz szumy Gaussowskie. Z uwagi na złożoność projektu zdecydowano się dokonać pewnych uproszczeń, mianowicie:

- Uwzględniono szumy jako liczbę pseudolosową ze skończonego zakresu,
- Antena oraz punkty pomiarowe znajdują się w jednej płaszczyźnie,
- Kierunkowość anteny zrealizowano jako liczbę malejącą wraz z rosnącym kątem od wiązki głównej,

Przez przyjęte założenia, symulacja ma służyć jako wyidealizowany przypadek użycia anteny w celu zrozumienia jej działania oraz stworzenia podwalin dla dokładniejszej i przemyślanej implementacji algorytmów na rzeczywistym modelu.

Na język programowania, który miał posłużyć do stworzenia symulacji wybrano Python. Język ten posiada biblioteki pozwalające na stosunkowo prostą implementację wzorów oraz graficzną reprezentację wyników, ma on także przejrzystą składnię i istnieje wiele ogólnodostępnych źródeł informacji potrzebnych do pracy z tym językiem.

4.2 Proces tworzenia algorytmu

Pierwszym problemem, który należało rozwiązać stały się parametry odbiornika, sygnału oraz anteny. W matematyczny sposób należało zasymulować działanie realnych urządzeń oraz fizycznych zjawisk.

Pracę nad algorytmem rozpoczęto od implementacji potrzebnych do symulacji pracy anteny wzorów – równania Friisa oraz Odległości Euklidesowej, czy równania opisującego charakterystykę promieniowania anteny. Założono, że antena modułu lokalizowanego promieniuje idealnie dookólnie.

Zaimplementowane równanie Friisa na moc odebraną w antenie P_r :

$$P_r = P_t * G_t * G_r * \left(\frac{\lambda}{4*\pi*d}\right)^2 + S \quad (4.1)$$

Gdzie P_t to moc transmitowana przez nadajnik obiektu lokalizowanego w symulacji, G_r oraz G_t (w symulacji: 1 dBi) to kierunkowości odpowiednio anteny odbierającej i transmitującej sygnał, λ to długość fali o częstotliwości 2,48 GHz, a d to odległość pomiędzy antenami. S to niestanowiący części wzoru dodatek - szum, dodany aby urzeczywistnić uzyskiwane wyniki.

Tabela 1. Wartości parametrów równania Friisa w symulacji.

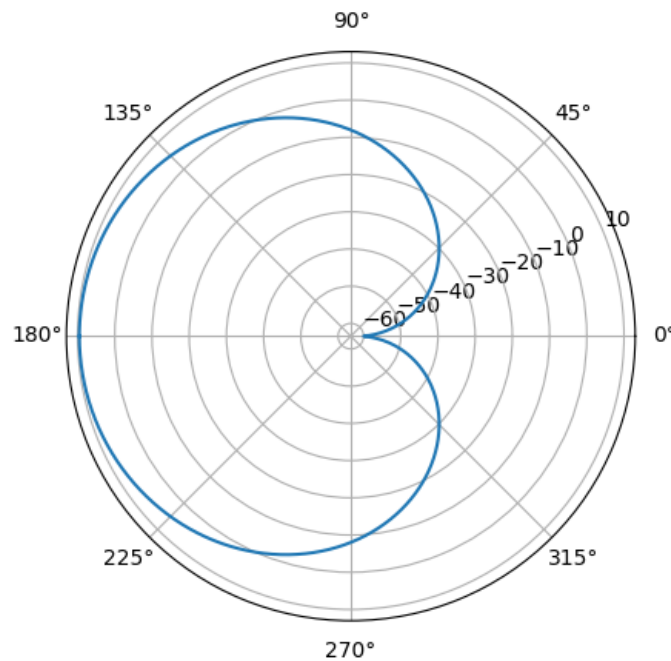
| Oznaczenie | Wartość w symulacji |
|------------|---|
| P_t | 0 dBm |
| G_r | Obliczane przy pomocy wzoru (2.1) |
| G_t | 1 dBi |
| λ | 0.12 m |
| d | Zależy od wylosowanej pozycji modułu lokalizowanego w siatce pomiarowej |
| S | Liczba losowa z zakresu od -2 do 2 [dBm] |

W celu określenia punktu pomiarowego z fazy offline, o wektorze z wartościami RSSI najbliższymi tym z wektora RSSI otrzymanego od lokalizowanego urządzenia wykorzystano wzór (2.1).

Charakterystykę promieniowania anteny przedstawiono matematycznie na podstawie pracy [8], w której mowa jest o 3 decybelowym paśmie o szerokości wiązki równej 73.2° . Wzór wygląda następująco:

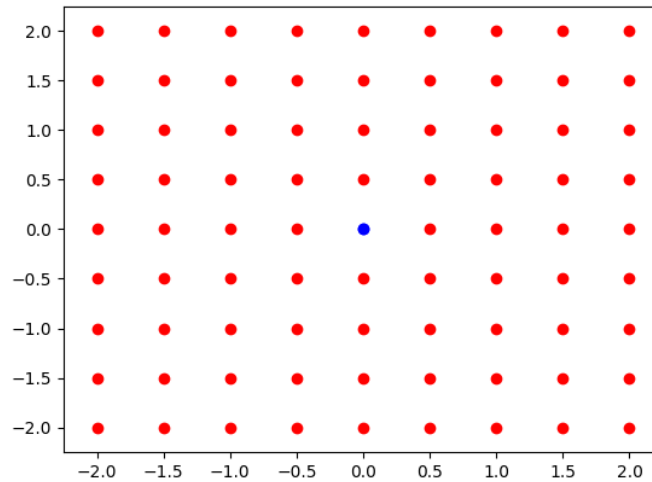
$$Gain = D * e^{-\left(\frac{k}{45}\right)^2} \quad (4.2)$$

Gdzie D to kierunkowość anteny (w symulacji przyjęto 9 dBi) malejąca eksponencjalnie wraz ze wzrastającym czynnikiem k, który oznacza wartość kąta odchylenia względem wiązki głównej anteny. Po przemianie jednostki na decybele, charakterystyka prezentuje się tak:



Rysunek 5. Charakterystyka symulowanej anteny

Po implementacji ważnych do obliczeń danych będących podstawą symulacji, przystąpiono do odwzorowania warunków testowych anteny – siatka punktów pomiarowych. Po implementacji w kodzie, siatka została przedstawiona graficznie jako grupa kropek oddalonych od siebie o równą odległość (0.5) w osi x i y, gdzie osie te mieszczą się w zakresie: (-2.25,2.25). Daje to 80 punktów pomiarowych w fazie kalibracji, ponieważ wyłączony z symulacji został punkt o współrzędnych (0,0), który w symulacji odgrywa rolę anteny.



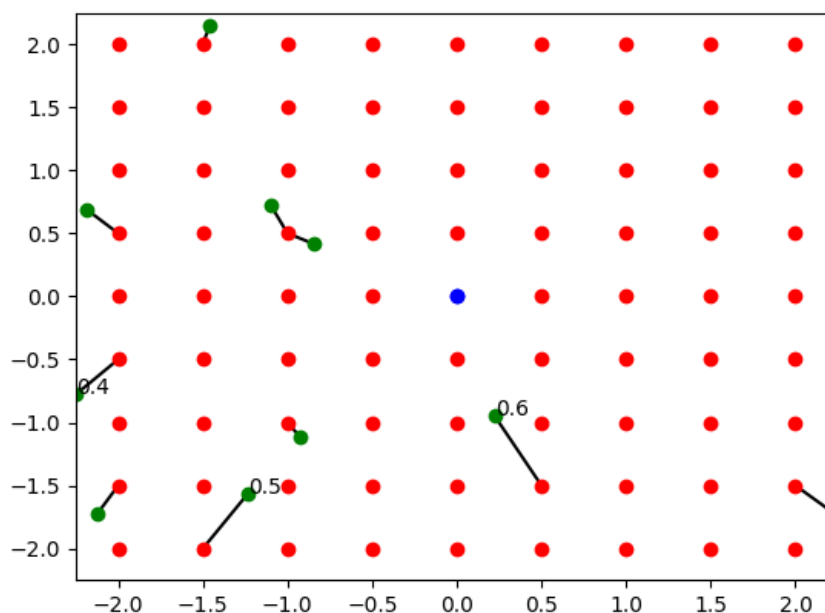
Rysunek 6. Siatka punktów pomiarowych symulacji.

Na wyżej zamieszczonym rysunku kolorem niebieskim zaznaczono antenę, podczas gdy kolor czerwony oznacza punkty obrane do kalibracji w fazie offline.

Kolejne etapy tworzenia algorytmu:

1. Obliczenie wartości RSSI dla określonej ilości próbek dla każdego punktu siatki pomiarowej, uśrednienie otrzymanych wartości próbek. Czynność jest powtórzona dla każdej z 12 konfiguracji zaimplementowanego modułu lokalizującego. W ten sposób uzyskiwane są wektory uśrednionych wartości - faza offline.
2. Losowe rozłożenie punktów testowych – Pozycja w mapie punktów (x,y) losowana jest z zakresu stanowionego przez rozmiar siatki. Ilość wygenerowanych punktów testowych definiuje zmienna.
3. Powtórzenie punktu 1 dla losowo umieszczonych w siatce punktów testowych.
4. Porównanie wektorów punktów z fazy offline oraz online za pomocą równania na odległość Euklidesową.
5. Określenie lokalizacji punktów z fazy online. Przypisanie punktów z fazy offline do tych z fazy online o najmniejszej odległości Euklidesowej między nimi (jako ich lokalizacja) i graficzne przedstawienie połączenia.
6. Określenie błędnie zlokalizowanych punktów i błędu pomiarów. Na bieżąco po przypisaniu punktu testowego do kalibracyjnego określana jest odległość między nimi w osi x i osi y. Uzyskane odległości między punktami są dodawane i uśredniane, a informacja o średniej odległości dla wszystkich punktów jest wypisana na ekranie. Odległość większa niż $\frac{\sqrt{2}}{2}$ oznaczana jest jako duży błąd i dodawana do zmiennej oznaczającej ich ilość w danej symulacji. Na schemacie siatki pomiarowej duży błąd jest wypisywany obok połączenia (linii) między punktami.

4.3 Wyniki symulacji i wnioski



Rysunek 7. Przykładowy wynik symulacji - zlokalizowane obiekty w siatce punktów pomiarowych.

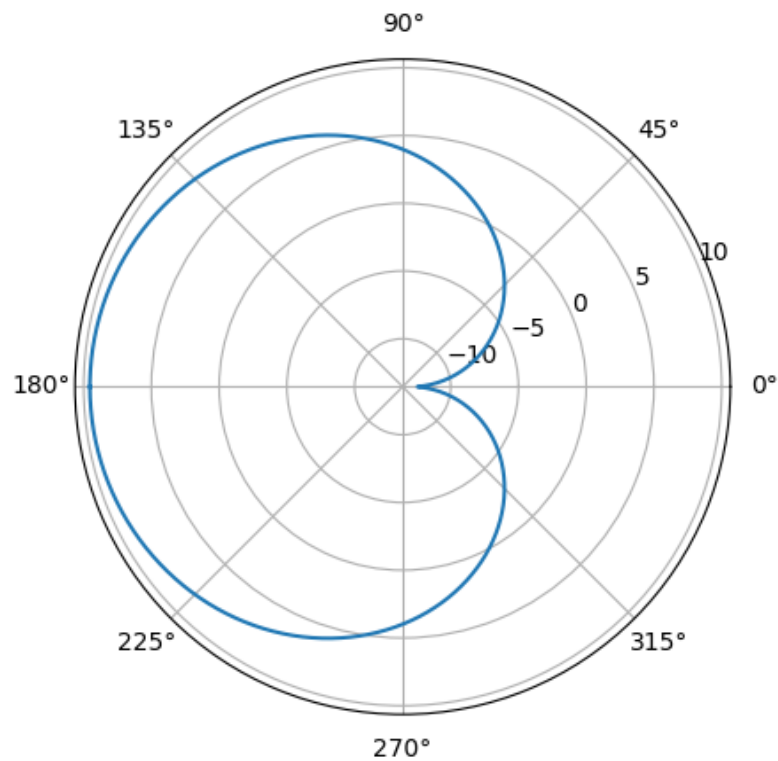
Graficzna reprezentacja przykładowego wyniku symulacji pokazuje, że algorytm określa poprawnie lokalizację niemal wszystkich punktów testowych. Na niej (Rysunek 7.) widać, że błędnie zostały określone pozycje trzech z dziesięciu punktów testowych. Algorytm oznacza błędnie określone punkty poprzez wypisanie odległości dzielącej je od punktów z fazy offline. Wyznacznikiem uznania punktu za błędnie przypisany jest dystans dzielący dwie lokalizacje. Punkty siatki oddalone są od siebie po przekątnej o $\frac{\sqrt{2}}{2}$ jednostki więc punkty oddalone od siebie o więcej niż połowę tej odległości, a mimo to przypisane do siebie – są uznane za błędnie połączone. Mimo, że dzieli je najmniejsza odległość Euklidesowa to istnieją punkty w siatce mniej oddalone od nich niż ten, który został przypisany.

Przy takim warunku występuje możliwość, że punkt testowy znajdujący się pomiędzy punktami kalibracyjnymi oddalonymi od siebie o 0.5 jednostki zostanie przypisany błędnie i nie zostanie uznany za niepoprawnie przypisany, lecz jest to błąd na tyle mały, że można pominąć go w rozważaniach. W przypadku zmiany warunku określania przypisania jako błędne na „błędne są przypisania oddalone od siebie o więcej niż 0.25 jednostki” na siatce powstanie wiele ślepych obszarów, przez co wiele poprawnie przypisanych punktów zostałyby określonych jako błędne.

Dla wielu testów symulacji uwzględniających lokalizację 10 000 punktów testowych ilość błędów wynosiła od 1400 do 1700, czyli 14 % - 17 % o średniej wartości 0.23. Na podstawie tych wyników można powiedzieć, że algorytm działa wystarczająco dokładnie, jednak postanowiono zmienić charakterystykę promieniowania symulowanej anteny, aby zmniejszyć częstotliwość występowania błędnych pomiarów. W tym celu manipulowano wzorem (4.2). Po testach różnych charakterystyk, najlepsze wyniki uzyskano dla opisanej wzorem:

$$Gain = D * e^{-\left(\frac{k}{80}\right)^2} \quad (4.3)$$

Po zmianie wzoru opisującego charakterystykę, prezentuje się ona następująco:



Rysunek 8. Charakterystyka promieniowania symulowanej anteny po zmianie wzoru

Dla takiej implementacji anteny, wyniki symulacji są nieporównywalnie lepsze. Ilość błędnie określonych lokalizacji punktów testowych wynosi zaledwie od 290 do 320 na 10 000 punktów testowych czyli 2,9 % - 3 %, gdzie średnia wartość dystansu między dopasowanymi punktami wynosi około 0,19. Po zmianie wzoru, otrzymano większy zysk co w rzeczywistym środowisku oznacza, że antena lepiej przekształca otrzymane fale radiowe w moc elektryczną. W symulacji ma to wpływ na moc odebraną w module lokalizującym wyliczaną ze wzoru (4.1).

Dzięki otrzymanym wynikom, stwierdzono poprawne działanie symulacji oraz zaimplementowanych wzorów, których użycie będzie wymagane przy lokalizowaniu obiektów w środowisku rzeczywistym.

5. ALOGRYTM STERUJĄCY ANTENĄ

5.1 Założenia projektowe

Projekt ma za zadanie stworzyć możliwość wewnątrzbudynkowej lokalizacji obiektów. W tym celu należało stworzyć system mogący odbierać sygnał z nadajników lokalizowanych oraz umożliwiający interpretację otrzymanych pomierzonych wartości RSSI i działania na nich. Do sprawnego działania algorytmu, możliwości monitorowania wyników czy postępu prac wymagana jest także komunikacja pomiędzy użytkownikiem a urządzeniem lokalizującym.

Pomiary z wykorzystaniem anteny ESPAR miały się odbywać według następujących założeń:

- użytkownik decyduje jaką operację ma wykonać antena,
- użytkownik musi mieć czas pomiędzy pomiarami, aby przemieścić telefon do kolejnego punktu pomiarowego,
- musi istnieć możliwość sprawdzania postępów kalibracji i lokalizacji obiektu,
- musi istnieć prosty sposób na zmianę parametrów testów jak ilość pobieranych próbek na punkt, czy rozmiar siatki pomiarowej fazy offline,
- powinna istnieć możliwość sprawdzenia charakterystyki promieniowania dla danego punktu z fazy offline,

W porównaniu do symulacji omówionej w punkcie 4 (Symulacja Pracy Anteny), projekt w rzeczywistości nie pracuje w dwóch, tylko w trzech wymiarach. Szумы i odbicia nie są już tylko stałą liczbą ustalaną przez użytkownika tylko parametrami mającymi realny wpływ na wyniki otrzymane przy przeprowadzaniu testów zaprojektowanego systemu. Funkcję nadajnika pełni telefon z aplikacją nRF Connect. Telefon przestawiany jest ręcznie z miejsca w miejsce w pomieszczeniu, a wraz z ilością mierzonych próbek rośnie czas oczekiwania na wyniki, stąd również ilość przykładów testowych będzie mniejsza oraz mniej dokładna. Z uwagi na ograniczoną dostępną do pomiarów przestrzeń, zdecydowano się na siatkę punktów mniejszą niż ta stworzona na rzecz symulacji pracy anteny ESPAR.

Antena telefonu nie jest idealnie dookólna jak zakładano w przypadku symulacji co może mieć wpływ na uzyskiwane wyniki. Do zmiany parametrów transmitowanego sygnału z telefonu wykorzystana została aplikacja nRF Connect. Dzięki niej możliwa jest zmiana mocy sygnału oraz częstotliwości wysyłania pakietu. Ustawione wartości to kolejno 1 dBm oraz pakiet/100 ms.

5.2 Algorytm

Sterowanie anteną odbywa się przez kooperację dwóch języków programowania. Program w języku Python służy do wysyłania komunikacji użytkownika z systemem wbudowanym i do obliczeń na pomierzonych wartościach, natomiast system wbudowany ma za zadanie sterowanie anteną, czyli 12-krotne przesunięcie wektora ustawienia dyrektorów anteny dla każdego punktu pomiarowego. W ten sposób zmieniany jest kierunek głównej wiązki anteny o kąt 30°. W Tabeli 2., wartość 1 w wektorze oznacza dyrektor, a 0 oznacza reflektor.

Tabela 2. Wektor sterowania elementami pasywnymi anteny.

| Konfiguracja anteny | Wektor ustawienia elementów pasywnych anteny ESPAR | Kąt kierunku wiązki |
|---------------------|--|---------------------|
| 1 | [1,1,1,0,0,0,0,0,0,1,1] | 0° |
| 2 | [1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,1] | 30° |
| 3 | [1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0] | 60° |
| 4 | [0,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0] | 90° |
| 5 | [0,0,1,1,1,1,1,0,0,0,0] | 120° |
| 6 | [0,0,0,1,1,1,1,1,0,0,0] | 150° |
| 7 | [0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,0] | 180° |
| 8 | [0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0] | 210° |
| 9 | [0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0] | 240° |
| 10 | [0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1] | 270° |
| 11 | [1,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1] | 300° |
| 12 | [1,1,0,0,0,0,0,0,0,1,1] | 330° |

Urządzenie oczekuje na rozkaz wysyłany poprzez interfejs Universal Asynchronous Receiver and Transmitter (UART), w celu zresetowania urządzenia i oczekiwania na próbki RSSI odbierane od nadajnika. Konfiguracje ustawienia elementów pasywnych anteny ESPAR zmieniane są automatycznie przez system wbudowany, po wybraniu opcji kalibracji lub lokalizacji. Ilość pobieranych próbek jest możliwa do ustawienia przez użytkownika w zależności od potrzeb. Są one po odebraniu wysyłane do programu napisanego w języku Python w celu dalszej pracy z ich udziałem.

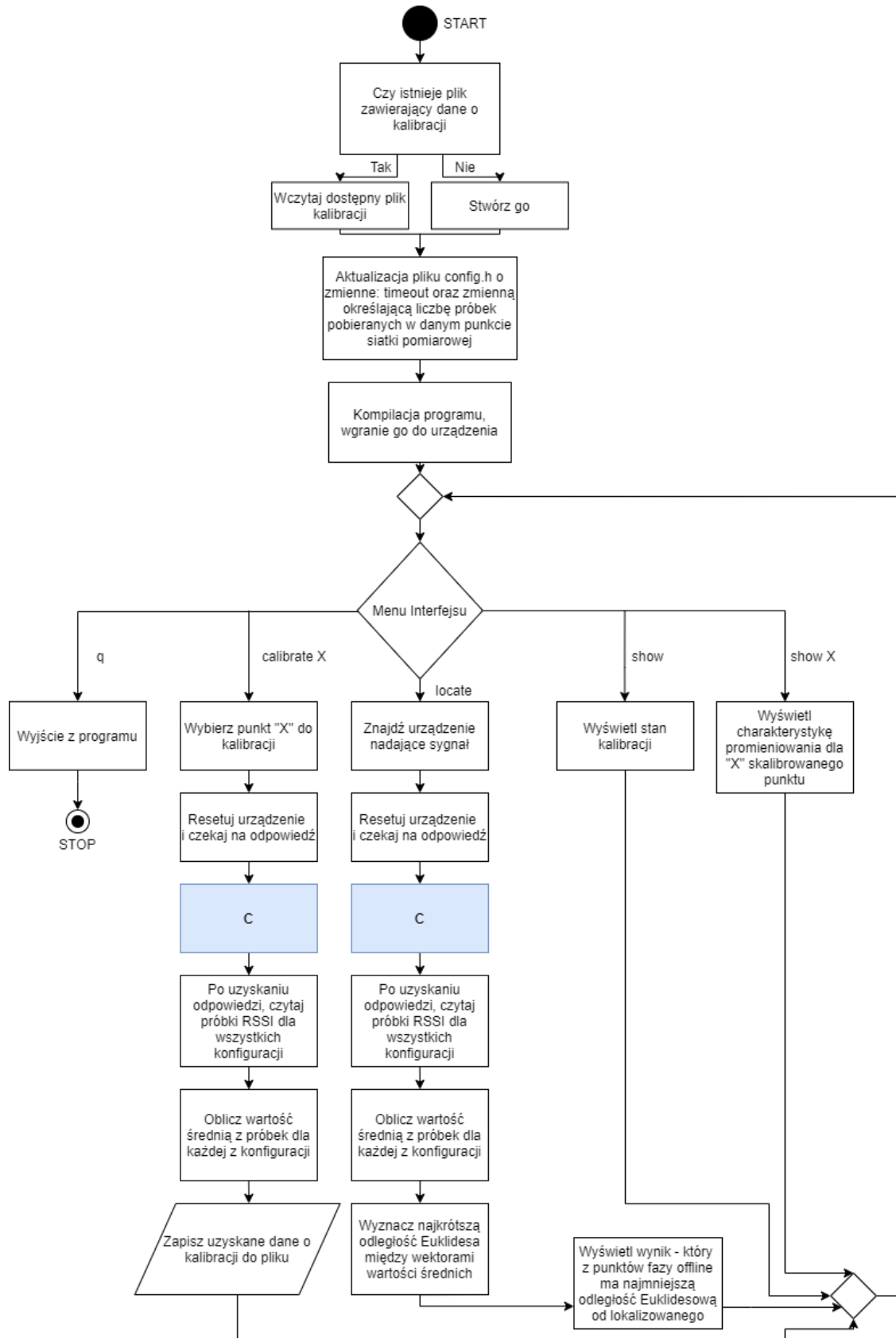
Język Python służy do stworzenia możliwości monitorowania wyników i umożliwienia komunikacji użytkownika z urządzeniem poprzez prosty interfejs w konsoli - command-line interface (CLI). Krótkimi komendami użytkownik wysyła rozkazy do programu lub urządzenia. Za wszelkie wyliczenia czy demonstrację wyników odpowiada właśnie ten algorytm.

Wszystkie założenia projektowe udało się spełnić, użytkownik uruchamia kalibrację po ustawieniu telefonu w odpowiednim punkcie siatki, parametry testów zmienia się poprzez zmianę dwóch zmiennych w kodzie programu, istnieje możliwość sprawdzenia postępu testów oraz otrzymanych charakterystyk promieniowania.

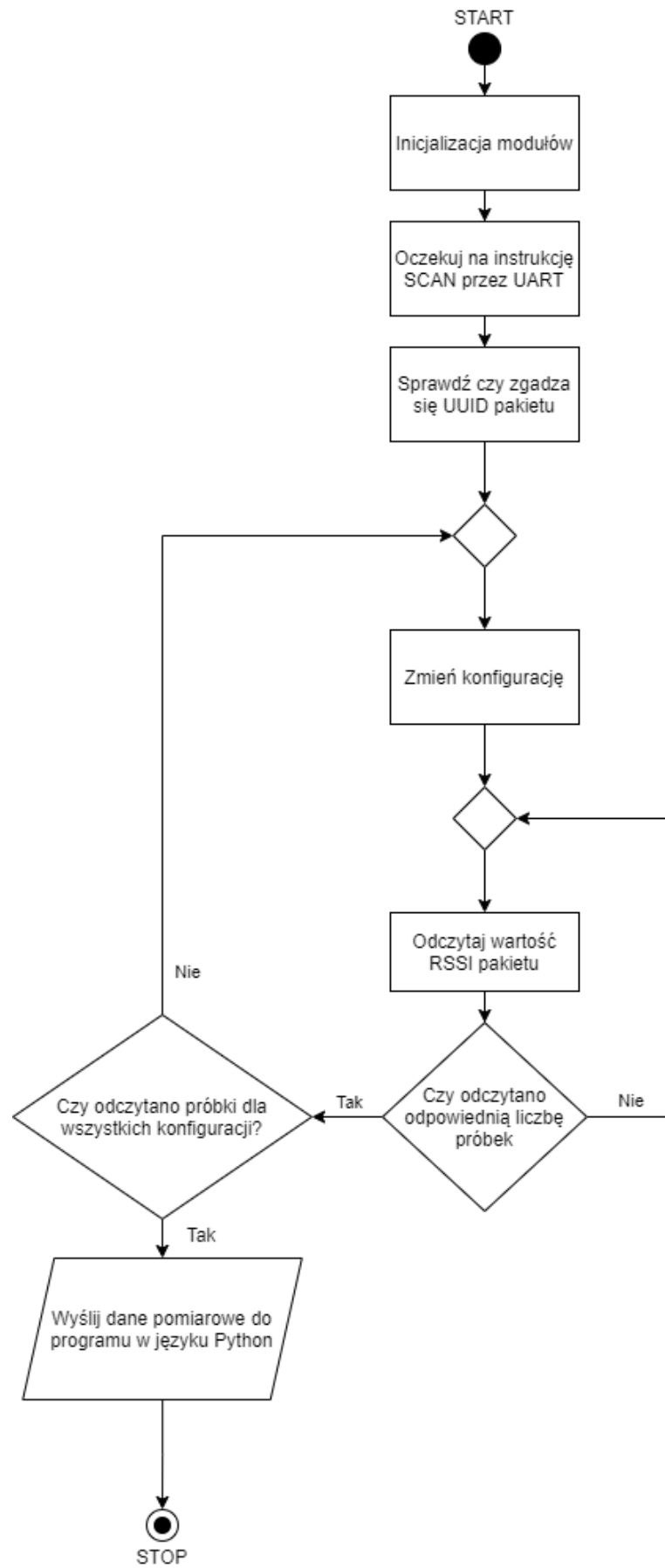
Tabela 3. Wykaz komend używanych w programie wraz z krótkimi opisami.

| Komenda | Opis |
|-------------|---|
| calibrate X | Komenda powoduje uruchomienie procesu kalibracji, X – to wpisywany przez użytkownika numer punktu kalibracyjnego, w którym znajduje się w danym momencie telefon. |
| show | Pokazuje siatkę punktów w konsoli z podziałem na te już skalibrowane oraz na te czekające na kalibrację. |
| show X | Pokazuje charakterystykę uzyskaną w wyniku kalibracji danego punktu: „X”. |
| locate | Po pomiarach, komenda wykreśla charakterystykę otrzymaną w wyniku lokalizacji obiektu i zaznacza w siatce punktów w konsoli punkt określony jako lokalizacja obiektu. |
| q | Zakończenie pracy programu. |

Na rysunku nr 9, przedstawiono diagram aktywności dla programu sterującego urządzeniem, blok zaznaczony kolorem niebieskim oznacza, że instrukcje w nim zawarte odbywają się wewnątrz mikrokontrolera, a nie w programie. Diagram aktywności dla tego bloku przedstawiono niżej na rysunku nr 10.



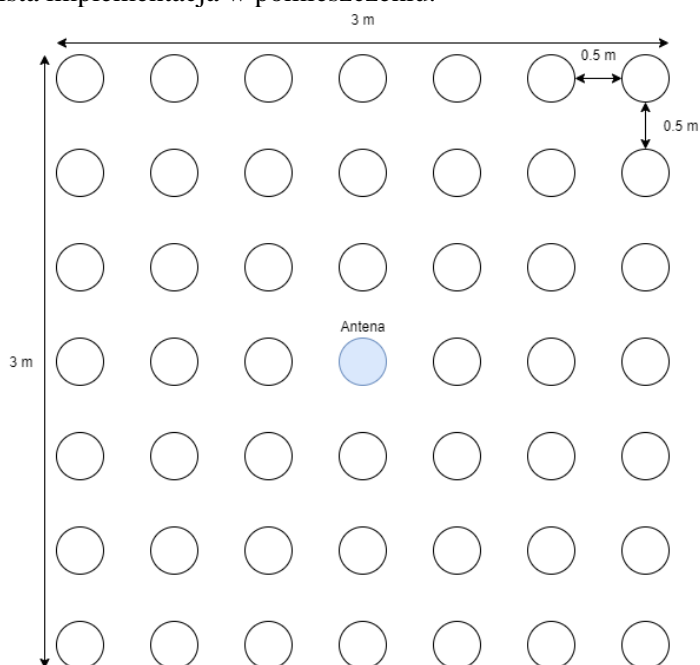
Rysunek 9. Diagram aktywności stworzonego programu.



Rysunek 10. Diagram kodu w języku C.

5.3 Warunki testów

W celu przeprowadzania testów sporządzono siatkę pomiarową złożoną z 49 punktów oddalonych od siebie o 50 cm. Daje to pole robocze w postaci kwadratu o wymiarach 3 m x 3 m umieszczonego horyzontalnie na jednej płaszczyźnie – bezpośrednio na podłodze w pomieszczeniu. Poniżej umieszczono zdjęcia i rysunki pokazujące warunki przeprowadzanych testów, między innymi schemat rozłożenia siatki punktów pomiarowych oraz jego rzeczywista implementacja w pomieszczeniu.



Rysunek 11. Schemat poglądowy siatki pomiarowej, przygotowanej do testów

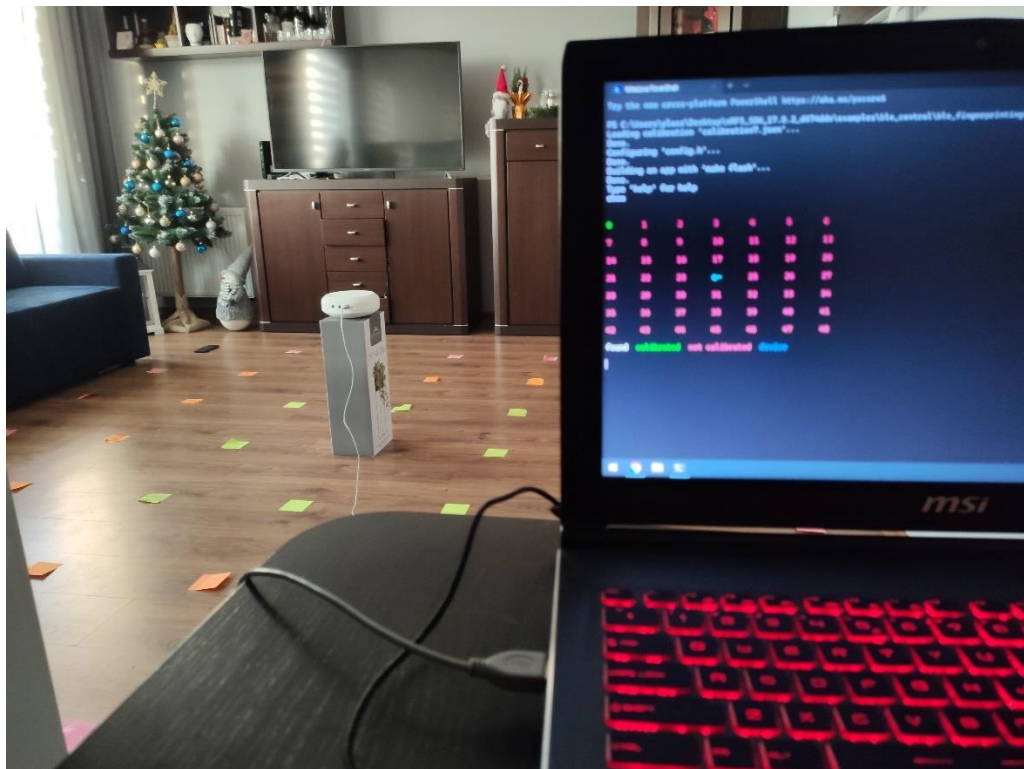


Rysunek 12. Ustawienie układu pomiarowego w pomieszczeniu wraz z anteną znajdującą się w samym środku siatki pomiarowej, 50 cm nad nią.

Antena położona jest w samym środku siatki na wysokości 50 cm oraz w kolejnych seriach testów: 7 cm oraz 120 cm. Została ona ustawiona do góry dnem, ponieważ płaszczyzna uziemienia znajdująca się w urządzeniu nie może oddzielać wiązki promieniowania od nadajnika. Dodatkowo dzięki takiemu rozwiązaniu, można przeprowadzić testy dla trzech różnych wysokości między anteną a telefonem bez konieczności przemieszczania telefonu na podwyższeniu 48 - krotnie. Zamiast tego wystarczy przemieszczać sam moduł lokalizowany bez podwyższenia.

Na rysunku 13, pokazano sposób w jaki dokonywano pomiarów. Stanowisko do komunikacji z anteną zostało oddalone od niej w taki sposób by nie zakłócać pomiarów.

Jako, że urządzenie do lokalizacji wewnątrzbudynkowej ma z założenia służyć w pomieszczeniach, bez względu na warunki jakie w nich panują, testy zostały przeprowadzone w warunkach domowych. Oznacza to, że na otrzymywane wyniki mają wpływ warunki aktualnie panujące w pomieszczeniu.

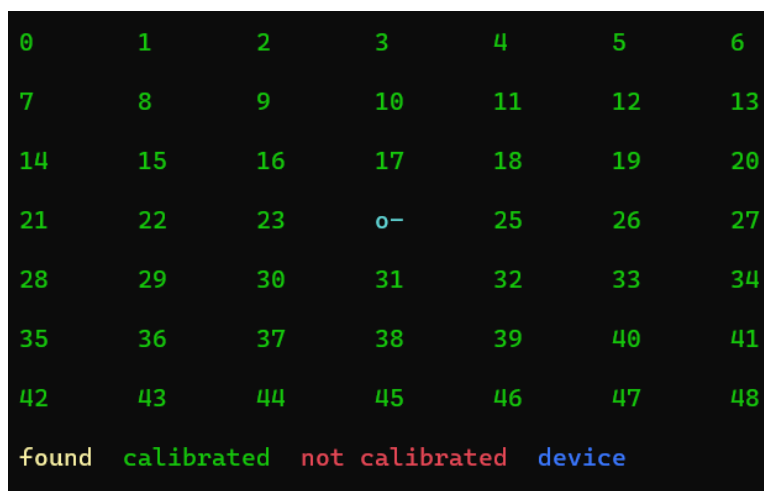


Rysunek 13. Urządzenie do komunikacji użytkownika z anteną wraz z anteną ESPAR i nadajnikiem (telefon w rogu siatki).

5.4 Testy Pracy Anteny

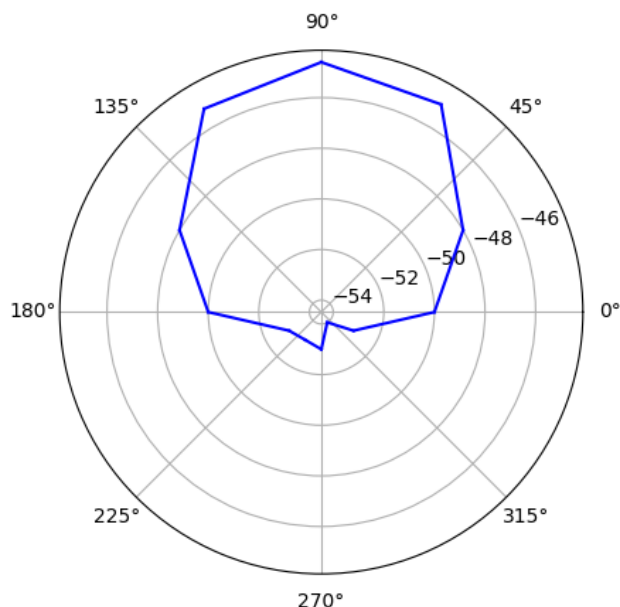
5.4.1 Antena 50 cm nad płaszczyzną siatki pomiarowej

W pierwszej fazie testów systemu bazującego na Antenie ESPAR, stacja bazowa została ustawiona na 50 centymetrowej podstawie w samym środku siatki punktów pomiarowych. Wykonano kalibrację i dwa dni później podjęto się próby lokalizacji obiektów. Siatkę punktów służących do kalibracji systemu pozostawiono bez zmian. Zachowano także plik z danymi uzyskanymi w fazie kalibracji. Dzięki interfejsowi CLI można było sprawdzić jej stan.



Rysunek 14. Interfejs w konsoli po kalibracji systemu

Dodatkowo istnieje też możliwość sprawdzenia charakterystyki uzyskanej dla każdego punktu pomiarowego, wraz z wektorem RSSI ją tworzącym.

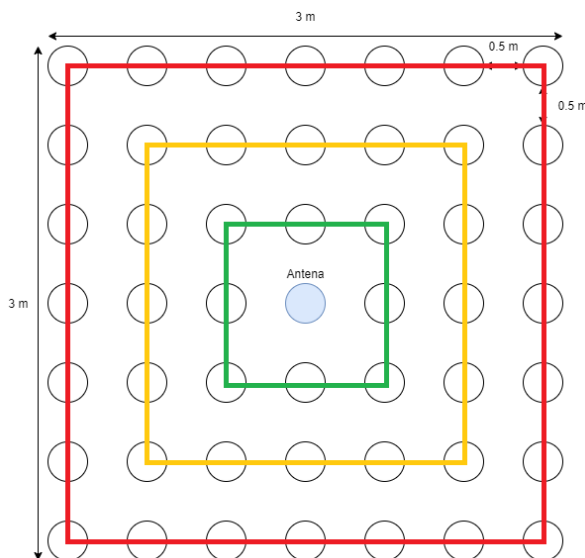


Rysunek 15. Przykładowa charakterystyka dla punktu kalibracyjnego, znajdującego się 1 metr od anteny.

W celu potwierdzenia poprawnego działania anteny wykonano łącznie 40 prób zlokalizowania obiektu. Obiekt umieszczano w okolicach któregoś z punktów siatki. Pozycja lokalizowanego obiektu była zmieniana losowo i wykonywano pomiar po uprzednim określeniu odległości od najbliższego punktu za pomocą miarki (w celu późniejszej możliwości weryfikacji błędu). Wyniki prób umieszczono w tabeli 4 na podstawie następujących kryteriów:

Dobrze – poprawnie określono punkt znajdujący się najbliżej szukanego obiektu, Źle – punkt przypisany jako najbliższy antenie telefonu znajduje się w odległości metra lub więcej od rzeczywistej lokalizacji punktu, Poprawnie – algorytm oznaczył punkt sąsiedni rzeczywistej lokalizacji jako właściwy. Przy każdym pomiarze odnotowywano również wartość błędu lokalizacji.

Założono, że istnieje również potrzeba sprawdzenia zależności poprawności wyników od odległości w jakiej nadajnik modułu lokalizowanego znajduje się od anteny. Pomiarów wykonano dzieląc siatkę pomiarową na 3 obszary: zielony (do około 70 cm od anteny), żółty (od 70 cm do $\sqrt{2}$ m) oraz najdalej oddalony od anteny – czerwony (od $\sqrt{2}$ m do $\frac{3\sqrt{2}}{2}$ m).



Rysunek 16. Poglądowy rysunek podziału siatki pomiarowej na obszary

Tabela 4. Wyniki pomiarów

| Kolor obszaru | Wyniki dobre | Wyniki złe | Wyniki poprawne |
|---------------|--------------|------------|-----------------|
| Zielony | 3 | 2 | 5 |
| Żółty | 10 | 3 | 7 |
| Czerwony | 1 | 2 | 7 |

Otrzymane wyniki nie są zadowalające, w najlepszym przypadku otrzymano skuteczność określania lokalizacji obiektu na poziomie 50% dla danego obszaru. Dla wszystkich 40 pomiarów skuteczność ta wynosi zaledwie 35%, wyniki poprawne stanowią większość – 47.5%, duży odsetek pomiarów stanowią te nieudane – aż 17.5%. Oznacza to, że wyniki nieudane stanowią połowę tych udanych.

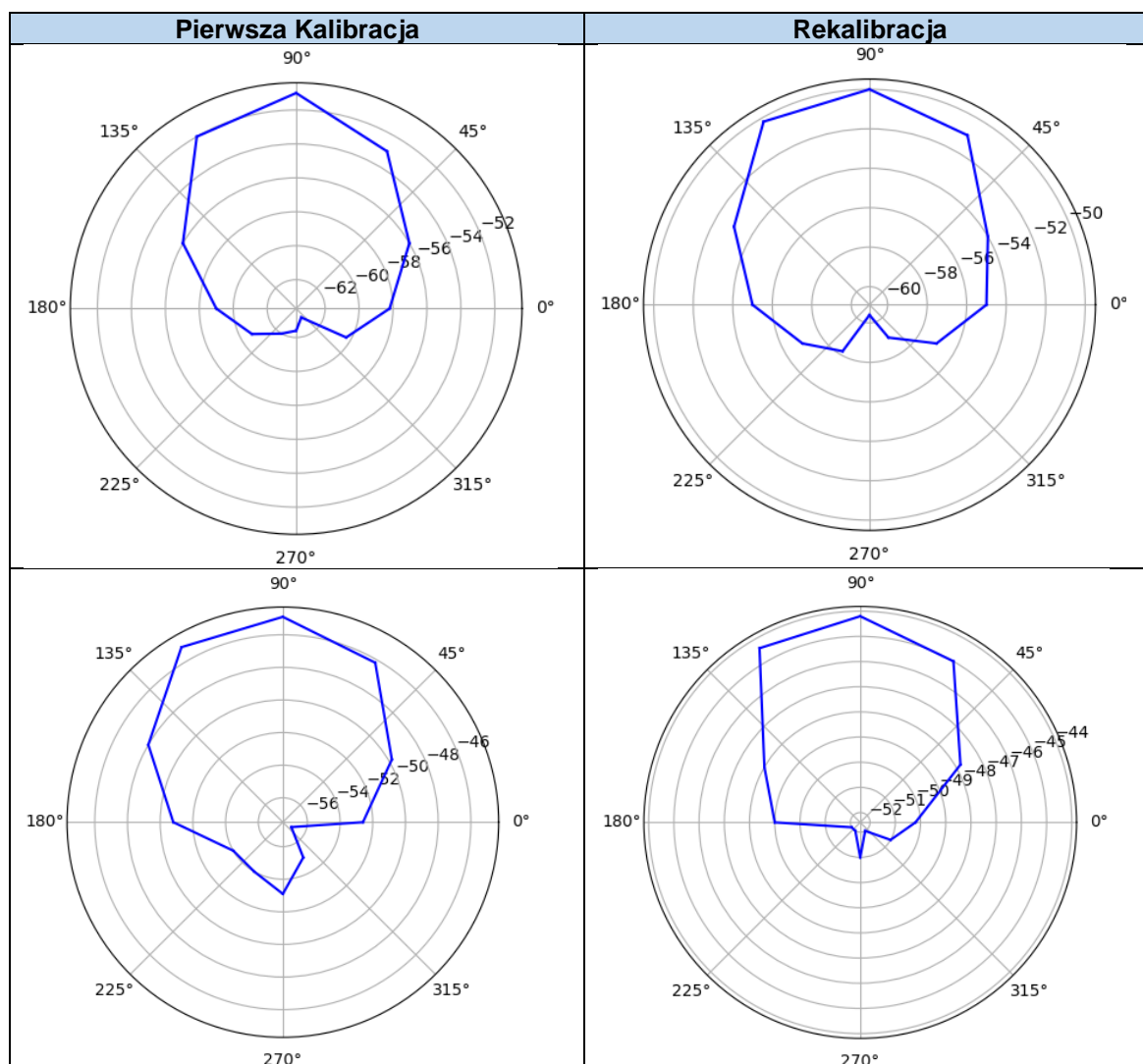
Najlepsze wyniki otrzymano dla punktów oddalonych o średnią odległość od anteny. Niestety nie można stwierdzić żadnej zależności wyników pomiarów od odległości punktu pomiarowego od anteny, ponieważ wyniki są niejednoznaczne.

Problemowi tak złych wyników postanowiono przyjrzeć się bliżej. W tym celu sprawdzone zostały wartości pobieranych przy kalibracji oraz lokalizacji próbek. Wartości RSSI różniły się jednak między sobą nieznacznie (do 1 dBm różnicy między kolejnymi przychodzącymi próbkami), można więc było wykluczyć wpływ zakłóceń i szumów na pomiary.

Na kolejny możliwy powód występowania takich błędów pomiarowych obrano wpływ układu pomieszczenia na wyniki pomiarów. Kalibracja wykonywana była dwa dni wcześniej niż próby lokalizacji obiektu – do tego czasu w pomieszczeniu zostało zmienione położenie mebli czy innych przedmiotów i mimo, że sama siatka pomiarowa pozostała niezmiennie w tym samym miejscu, to otoczenie siatki się zmieniło. Aby sprawdzić postawioną tezę, dokonano ponownej kalibracji w niektórych punktach.

W tabeli 5 pokazano tylko przykłady (kolejno punkty 3 i 17 z rysunku nr 14) różnic między uzyskanymi charakterystykami. W sprawdzonych punktach, różnice między wartościami RSSI próbek dla konfiguracji pierwszej i kolejnej w zmienionym otoczeniu siatki pomiarowej wynoszą nawet 5 dBm. Potwierdziły się więc przypuszczenia, że lokalizacja obiektów wykonywana w zmienionym po kalibracji środowisku, przyniesie błędne wyniki.

Tabela 5. Zestawienie charakterystyk wybranych punktów z fazy kalibracji przed i po zmianie otoczenia siatki pomiarowej.



5.4.2 Ponowna kalibracja systemu

Po spostrzeżeniach opisanych w poprzednim podrozdziale postanowiono wykonać test ponownie, ale tym razem od razu po skończonej kalibracji. Wyniki przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Wyniki pomiarów po ponownej kalibracji

| Kolor obszaru | Wyniki dobre | Wyniki złe | Wyniki poprawne |
|---------------|--------------|------------|-----------------|
| Zielony | 8 | 2 | 2 |
| Żółty | 8 | 1 | 5 |
| Czerwony | 7 | 1 | 6 |

W celu weryfikacji poprawności procesu lokalizacji obiektów, wykonano 40 pomiarów jak w przypadku pierwszego testu. Tym razem, dobrze określono 57.5% wyników. Uzyskano więc niemal dwukrotnie większą skuteczność działania systemu. Prawie dwukrotnie zmalała też ilość błędnie określanych pozycji nadajnika i wynosi ona jedynie 10% wszystkich pomiarów. Pozostałe 32.5% stanowią pomiary poprawne gdzie błąd określenia lokalizacji wynosił średnio 0.56 m.

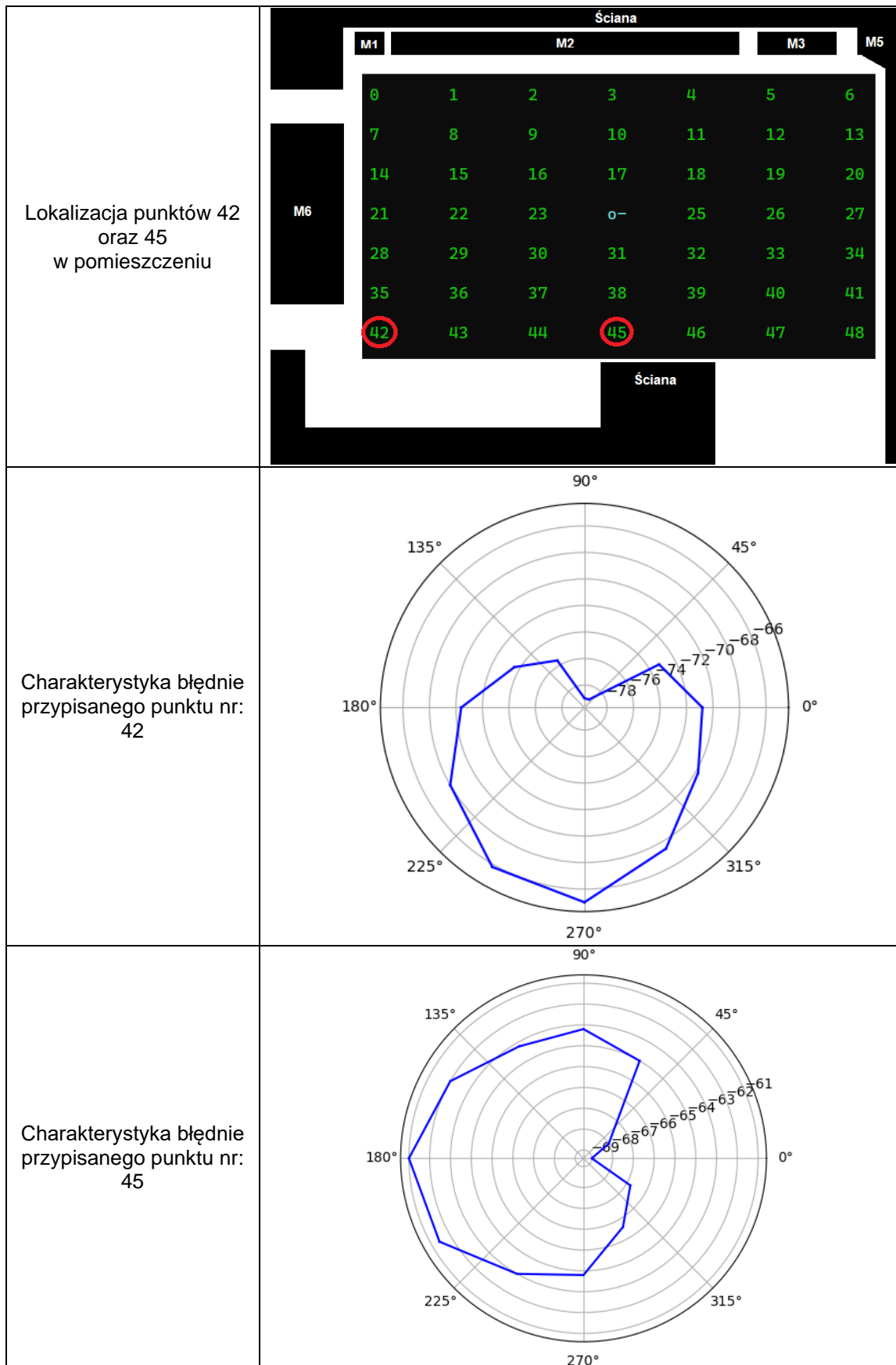
Mimo zadowalających wyników postanowiono odkryć przyczynę występowania błędów. W tym celu poddano głębszej analizie charakterystyki błędnych lokalizacji – zarówno punktu który powinien być przypisany jako lokalizacja, jak i tego który finalnie został przypisany – błędnie.

Okazało się, że punkty które powodowały błędne wskazania lokalizacji mają wspólną cechę. Znajdują się w miejscu o innym otoczeniu niż reszta punktów. Większość punktów w siatce pomiarowej znajduje się w podobnej odległości od ścian czy mebli. Punkty które spowodowały błędne wyniki znajdowały się bardzo blisko ścian lub wnęk między meblami. Dla lepszej możliwości przedstawienia takiej zależności zestawiono otrzymaną w danym punkcie charakterystykę z położeniem punktu na poglądowym schemacie infrastruktury pomieszczenia.

Zdecydowano się na przedstawienie dwóch charakterystycznych punktów, najlepiej pokazujących istotę problemu.

W tabeli 7 przedstawiono rysunek poglądowy pomieszczenia, w którym przeprowadzono testy systemu, meble na schemacie oznaczono indeksami „MX” gdzie „X” to numer mebla.

Tabela 7. Zależność charakterystyki od położenia punktu w pomieszczeniu



W tabeli 7 przedstawione zostały punkty 42 oraz 45 wraz z ich charakterystykami uzyskanymi w fazie kalibracji. W celu potwierdzenia takich wyników, kalibracja tych dwóch punktów była wykonywana wielokrotnie. Zaczynając od punktu numer 42, charakterystyka nie zgadza się, ponieważ największe wartości RSSI powinny występować dla kąta 225° , ponieważ właśnie tam (względem oznaczenia 0° na obudowie anteny) znajdował się nadajnik i najlepiej powinien być odbierany sygnał właśnie z tamtej strony. Punkt 42 znajduje się w miejscu, które ma niekorzystny wpływ na odbierany przez antenę sygnał – przy luce między ścianą a meblem. Na podstawie innych charakterystyk punktów siatki pomiarowej stwierdzono, że albo sygnał z anteny nadajnika częściowo wpada w tą lukę, stąd jest słabszy dla kąta 225° , lub odbija się od ściany na końcu tej łuki powodując wzmocnienie sygnału dla kąta 270° .

Podobna sytuacja dotyczy punktu 45. Tutaj również wartość RSSI powinna być największa dla innego kąta – 270° . Podczas fazy kalibracji, nadajnik umieszczony w punkcie nr 45 znajdował się tak blisko ściany, że odbicia sygnału spowodowały przekłamanie pomiaru. Antena odebrała sygnał, który mógłby pasować do np. punktu nr 21.

Przez warunki propagacji sygnału jakie zapewnia takie pomieszczenie, wyniki pomiarów mogą być miejscami przekłamanie. O ile sam kształt charakterystyki nie świadczy o oznaczeniu punktu jako lokalizacji nadajnika, to różnica w wartościach RSSI między punktem lokalizowanym a kalibracyjnym już tak. Tak duże zmiany mocy sygnału odebranego w wyniku odbić czy innych zjawisk wynikających z infrastruktury pomieszczenia sprawiły, że wystąpiły znaczące błędy. Nadajnik umieszczony obok któregoś z punktów kalibracyjnych może rzeczywiście uzyskać charakterystykę bliższą tej wynikającej z odbić itp. niż właściwej.

Aby poradzić sobie z takim problemem, najprostszym rozwiązaniem jest zapewnienie podobnych warunków otoczenia wszystkim punktom siatki. Jednak z uwagi na cel do jakiego z założenia projekt ma służyć, nie jest to rozwiązanie które należy brać pod uwagę.

Inny sposób na uzyskanie dokładniejszych wyników to według [9]: przez ograniczenia algorytmów stosowanych do DoA (Direction of Arrival), do lokalizacji obiektów najlepiej jest wykorzystać dwie stacje bazowe. Zastosowanie dwóch takich współpracujących stacji zamiast jednej, na pewno przyniosłoby dokładniejsze wyniki, ponieważ porównywane byłyby już łącznie 4 zestawy wektorów RSSI otrzymanych w stacjach. Takie rozwiązanie zwiększa jednak całkowity koszt implementacji takiego systemu w rzeczywistości. Można jednak uzyskać dodatkowe 2 wektory do porównywania odległości Euklidesowej jedynie kosztem czasu obliczeń. W tym celu należałoby mierzyć RSSI kolejnymi 12 konfiguracjami anteny ESPAR, tak jak zrobiono to w [9], gdzie poza zmianą kierunku głównej wiązki, dodatkowo wykonywana jest również konfiguracja tzw wąskiego minimum – czyli przesuwany 12-krotnie wektor ustawienia dyrektorów: [1,0,0,0,1,0,1,1,0,1,0,1].

W uzyskaniu lepszego efektu przy określaniu pozycji obiektu w pomieszczeniu może pomóc też zastosowanie modułu lokalizowanego z idealnie dookólną charakterystyką promieniowania anteny.

5.4.3 Praca anteny dla różnych wysokości nad płaszczyzną siatki pomiarowej

W celu sformułowania najlepszych warunków potrzebnych do uzyskiwania dobrych wyników pomiarów, postanowiono sprawdzić jak system sprawuje się gdy antena modułu lokalizującego znajduje się 120 cm oraz 7 cm nad siatką pomiarową. Wykonano więc 40 pomiarów dla każdej z tych wysokości.

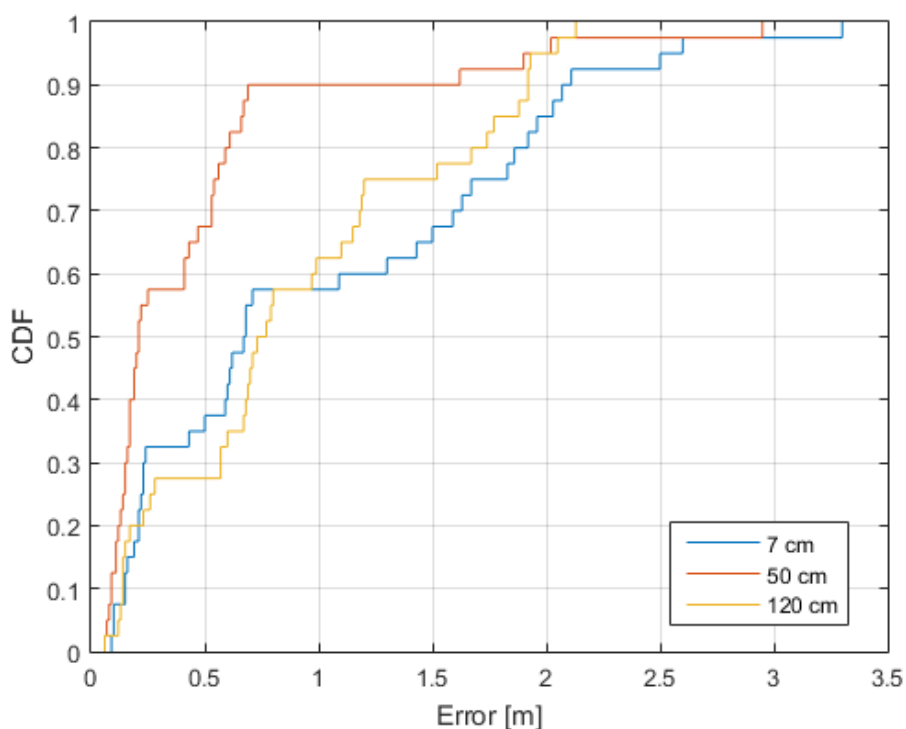
Skuteczność lokalizacji w tych warunkach testowych, zestawiono w tabeli nr 8 z wynikami pomiarów z punktu 5.4.2 gdzie antena znajdowała się 50 cm nad siatką pomiarową – czyli również nad modułem lokalizowanym.

Tabela 8. Wyniki lokalizacji obiektu w zależności od odległości od anteny.

| Kolor obszaru | Wyniki dobre | Wyniki złe | Wyniki poprawne | Odsetek dobrych wyników [%] |
|---------------|--------------|------------|-----------------|-----------------------------|
| 7 cm | | | | |

| | | | | |
|---------------|----|----|----|------|
| Zielony | 7 | 2 | 3 | 58.3 |
| Żółty | 4 | 7 | 3 | 28.6 |
| Czerwony | 2 | 8 | 4 | 14.3 |
| Łącznie | 13 | 17 | 10 | 32.5 |
| 50 cm | | | | |
| Zielony | 8 | 2 | 2 | 66.7 |
| Żółty | 8 | 1 | 5 | 57.1 |
| Czerwony | 7 | 1 | 6 | 50.0 |
| Łącznie | 23 | 4 | 13 | 57.5 |
| 120 cm | | | | |
| Zielony | 2 | 8 | 2 | 16.7 |
| Żółty | 5 | 2 | 7 | 35.7 |
| Czerwony | 4 | 7 | 3 | 28.6 |
| Łącznie | 11 | 17 | 12 | 27.5 |

W celu porównania wyników wykonano również wspólny dla 3 pomiarów wykres funkcji CDF pokazujący szansę występowania błędów o danej wartości.



Rysunek 17. Wykres funkcji CDF dla wykonanych pomiarów.

Średnie wartości błędów dla pomiarów przy antenie znajdującej się na wysokości 7 cm, 50 cm i 120 cm nad poziomem siatki wynoszą kolejno: 1,02 m, 0,48 m, 0,91 m. Najlepsze uzyskane wyniki lokalizacji są więc niemalże czterokrotnie bardziej dokładne niż te opisane w [9] gdzie średnia błędów wynosiła około 1,7 m. Należy mieć jednak na uwadze fakt, że w [9] siatka punktów kalibracyjnych różniła się zarówno wymiarami, wysokością ustawienia anteny nad nadajnikami, jak i gęstością rozłożenia punktów od tej przedstawionej w pracy. Punkty siatki kalibracyjnej opisanej wcześniej są rozłożone dwukrotnie gęściej, rozmiar siatki jest 33.(3) % mniejszy, a antena w najgorszym wypadku znajdowała się 120 cm nad nadajnikami, podczas gdy w porównywanej pracy: 2,07 m nad nimi. W przedstawionej pracy przyjęto też inną procedurę testową, obiekt lokalizowany nie był przekładany między stałymi, znanymi lokalizacjami siatki punktów do lokalizacji, zamiast tego jego położenie było losowo ustawiane i mierzona była odległość od najbliższego punktu siatki w celu weryfikacji błędów. Stąd tak duża różnica w wynikach.

Z wykonanych testów wynika, że dokładność lokalizacji obiektu jest w systemie wysoce zależna od odległości mobilnej stacji nadawczej od anteny ESPAR. Nawet jeśli mowa jest o niewielkiej i bardzo gęstej siatce.

Niezależnie od różnicy wysokości ustawienia nadajnika i anteny wyniki pokazują, że im dalej od anteny znajduje się nadajnik (obszar czerwony) tym trudniej określić jego lokalizację. Wyjątkiem jest przypadek anteny ustawionej 120 cm nad nadajnikami, który dla nadajnika znajdującego się blisko anteny wykazał najgorszy odsetek dobrych wyników. Powodem jest zbyt duży stosunek wysokości anteny nad nadajnikiem do odległości dzielącej go od niego w osi poziomej – system nie posiada możliwości lokalizowania obiektów bezpośrednio pod anteną z uwagi na jej charakterystykę oraz charakterystykę anteny nadajnika (telefonu).

Najlepsze wyniki przyniósł test, w którym antena znajdowała się 50 cm nad nadajnikami gdzie odsetek źle odczytanych lokalizacji wynosił zaledwie 10%, dobrze 57.5% a pozostałe wyniki stanowiły te zbliżone do poprawnych. Oznacza to, że system działa i chociaż najlepiej działa w bardzo ściśle określonych warunkach to średnia wartość błędu w porównaniu do symulacji różniąc się o 0.29 m – jest świetnym wynikiem, mimo różnic założeń przyjętych dla symulacji i realnej implementacji systemu.

Należy nadmienić, że działanie systemu zostało dokładnie sprawdzone pod względem poprawności działania. Zostało wykonanych 50 pomiarów mających na celu zlokalizowanie obiektu, po uprzednim ułożeniu go idealnie w punktach kalibracyjnych. 47 z 50 a więc 94% takich pomiarów zakończyło się sukcesywnym odnalezieniem obiektu w siatce (błąd=0 m). System działa więc poprawnie, ale jest wyjątkowo zależny od otoczenia.

5.5 Omówienie wyników

Stworzony system wbudowany, jest w stanie określić lokalizację obiektu w budynku. Spełnia on więc założenia projektu. Niestety jego działanie jest zaburzane oraz ograniczane przez czynniki jak:

- czas wykonywania kalibracji – w zależności od przyjętej ilości próbek na konfigurację anteny oraz od ilości punktów siatki pomiarowej potrzebnych do kalibracji, proces lokalizacji może zająć dużo czasu, (nawet pół godziny dla siatki 3 m x 3 m, więcej dla większej siatki) kiedy użytkownik dysponuje tylko jednym nadajnikiem. W przypadku dyspozycji większą ilością nadajników, można by było po rozstawieniu ich w punktach siatki, zdalnie je włączać/wyłączać i dokonywać kalibracji systemu bez konieczności przestawiania mobilnych stacji nadawczych z miejsca w miejsce. Jest to jednak rozwiązanie kosztowne.
- zmienne otoczenie – najmniejsza zmiana otoczenia punktów siatki pomiarowej może spowodować przekłamanie wyników kalibracji i w efekcie zostanie błędnie określona lokalizacja obiektu,
- rozmiar siatki pomiarowej – im rzadsza siatka pomiarowa, tym samym im większe odległości pomiędzy punktami siatki pomiarowej, tym gorsze otrzymamy wyniki lokalizacji. Im gęściej rozłożone zostaną punkty pomiarowe, tym otrzymamy dokładniejszą pozycję obiektu w pomieszczeniu, ma to niestety wpływ na czas wykonywania kalibracji.
- ustawienie anteny w pomieszczeniu – w zależności od wysokości umiejscowienia anteny lokalizującej, wyniki mogą być lepsze lub gorsze.
- charakterystyka promieniowania nadajnika – wykorzystany jako nadajnik telefon nie posiada anteny idealnie dookólnej, powoduje to zakłamanie wyników pomiarów

wartości RSSI w wyniku odbić wysoce zależnych od ułożenia nadajnika/telefonu w pomieszczeniu.

Mimo wcześniej wymienionych czynników wpływających na pomiary, wśród otrzymanych wyników dominują poprawne lub bliskie poprawnym, a błąd średni błąd pomiaru najlepszych wyników lokalizacji wyniósł mniej niż odległość między punktami kalibracji. Co z kolei oznacza, że w większości przypadków system poprawnie wskaże lokalizację obiektu lub jego otoczenie – tym samym przynajmniej zawężając pole poszukiwań obiektu.

6. PODSUMOWANIE

Do zaprojektowania w pełni funkcjonalnego i niemalże niezawodnego systemu potrzebna jest wiedza na temat teorii antenowej [10], podstawowa znajomość języka programowania pozwalającego na stworzenie interfejsu oraz zaprogramowanie systemu wbudowanego np. jak w rozpatrywanym przypadku języka C i języka Python. Przydatna jest również wiedza na temat wykorzystywanych modułów. Doświadczenie wynikające z kontaktem z tego typu konstrukcjami, pozwala na identyfikowanie przyczyn problemów oraz ich usuwanie. Wskazane jest też określenie charakterystyki anteny telefonu przed rozpoczęciem testów. Testy wykonane w środowisku bezodbiciowym również mogłyby pomóc, służąc jako punkt odniesienia do tych wykonywanych w warunkach domowych.

Stosowanie ogólnodostępnych przedmiotów jako elementów układu pomiarowego wystarcza do sprawnego działania stworzonego systemu. Telefon spełnia swoją rolę jako moduł lokalizowany, jednak zastosowanie profesjonalnej anteny nadajnika, stworzonego właśnie w celu umożliwienia takiego typu pomiarów znacznie zwiększyłoby szansę na uzyskanie lepszych wyników.

Podsumowując, uzyskanie rzetelnych wyników przy wykorzystaniu systemu lokalizacji wewnątrzbudynkowej w warunkach domowych jest możliwe. Należy jednak spełnić wiele warunków w celu uzyskania jak najlepszych wyników co wiąże się z dużą ilością czasu potrzebną na przygotowanie otoczenia do pomiarów, co wyklucza użycie wykonanego projektu w celach komercyjnych, jako że nie spełnia on założeń przyjętych jako kluczowe do jego wykorzystania w przemyśle.

WYKAZ LITERATURY

- [1] Lukasz Kulas, "RSS-Based DoA Estimation Using ESPAR Antennas and Interpolated Radiation Patterns", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 17, no. 1, January 2018
- [2] Angielska strona Wikipedii <https://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth>
- [3] nRF52840 DK Datasheet by nordicsemi.com
- [4] <https://locationbased-services.de/en/start/positioning/trilateration-triangulation-fingerprinting/>
- [5] <https://warszawa24.ovh/trilateracja-vs-triangulacja-poznaj-metody-radiolokacji/>
- [6] Pavel Kriz, Filip Maly, Tomas Kozel, "Improving Indoor Localization Using Bluetooth Low Energy Beacons", Mobile Information Systems, vol. 2016, Article ID 2083094, 11 pages, 2016
- [7] S. Gansemer, U. Großmann and S. Hakobyan, "RSSI-based Euclidean Distance algorithm for indoor positioning adapted for the use in dynamically changing WLAN environments and multi-level buildings," 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Zurich, 2010, pp. 1-6
- [8] L. Kulas, "Simple 2-D Direction-of-Arrival Estimation Using an ESPAR Antenna," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 16, pp. 2513-2516, 2017
- [9] M. Rzymowski, P. Woznica and L. Kulas, "Single-Anchor Indoor Localization Using ESPAR Antenna," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 15, pp. 1183-1186, 2016
- [10] C. A. Balanis, "Antenna Theory: Analysis and Design"

SPIS RYSUNKÓW

| | |
|--|----|
| Rysunek 1. Płytki nRF52840-DK, zdjęcie pochodzi ze strony producenta: Nordic Semiconductor | 8 |
| Rysunek 2. Antena ESPAR w obudowie, zapewniona przez KIMiA..... | 11 |
| Rysunek 3. Poglądowy rysunek 12-elementowej anteny ESPAR | 12 |
| Rysunek 4. Przełączanie elementów pasywnych na przykładzie anteny o dwóch elementach. | 12 |
| Rysunek 5. Charakterystyka symulowanej anteny | 14 |
| Rysunek 6. Siatka punktów pomiarowych symulacji..... | 15 |
| Rysunek 7. Przykładowy wynik symulacji - zlokalizowane obiekty w siatce punktów pomiarowych. | 16 |
| Rysunek 8. Charakterystyka promieniowania symulowanej anteny po zmianie wzoru | 17 |
| Rysunek 9. Diagram aktywności stworzonego programu. | 21 |
| Rysunek 10. Diagram kodu w języku C. | 22 |
| Rysunek 11. Schemat poglądowy siatki pomiarowej, przygotowanej do testów | 23 |
| Rysunek 12. Ustawienie układu pomiarowego w pomieszczeniu wraz z anteną znajdującą się w samym środku siatki pomiarowej, 50 cm nad nią. | 23 |
| Rysunek 13. Urządzenie do komunikacji użytkownika z anteną wraz z anteną ESPAR i nadajnikiem (telefon w rogu siatki)..... | 24 |
| Rysunek 14. Interfejs w konsoli po kalibracji systemu | 25 |
| Rysunek 15. Przykładowa charakterystyka dla punktu kalibracyjnego, znajdującego się 1 metr od anteny..... | 25 |
| Rysunek 16. Poglądowy rysunek podziału siatki pomiarowej na obszary | 26 |
| Rysunek 17. Wykres funkcji CDF dla wykonanych pomiarów. | 32 |

SPIS TABEL

| | |
|---|----|
| Tabela 1. Wartości parametrów równania Friisa w symulacji. | 13 |
| Tabela 2. Wektor sterowania elementami pasywnymi anteny. | 19 |
| Tabela 3. Wykaz komend używanych w programie wraz z krótkimi opisami. | 20 |
| Tabela 4. Wyniki pomiarów | 26 |
| Tabela 5. Zestawienie charakterystyk wybranych punktów z fazy kalibracji przed i po zmianie otoczenia siatki pomiarowej. | 28 |
| Tabela 6. Wyniki pomiarów po ponownej kalibracji | 28 |
| Tabela 7. Zależność charakterystyki od położenia punktu w pomieszczeniu | 30 |
| Tabela 8. Wyniki lokalizacji obiektu w zależności od odległości od anteny. | 31 |

