

# Sprawozdanie

## Zadanie – Stworzenie systemu lokalizacji opartego na Bluetooth Angle of Arrival (AoA)

Dokumentacja producenta: [doc.telink-semi.cn/index/index/detail/id/143/type/1.html?lang=en](http://doc.telink-semi.cn/index/index/detail/id/143/type/1.html?lang=en)

Sprzęt: TLSR8278 ([TLSR8278IP48D-KIT](http://wiki.telink-semi.cn/wiki/solution/Location-Services/))

<https://wiki.telink-semi.cn/wiki/solution/Location-Services/>

Oprogramowanie:

**TScript:** [https://wiki.telink-semi.cn/tools\\_and\\_sdk/BLE/827x\\_AoA\\_AoD\\_Tool.7z](https://wiki.telink-semi.cn/tools_and_sdk/BLE/827x_AoA_AoD_Tool.7z)

**BDT:** [https://wiki.telink-semi.cn/tools\\_and\\_sdk/Tools/BDT/BDT.zip](https://wiki.telink-semi.cn/tools_and_sdk/Tools/BDT/BDT.zip)

Instrukcja:

<https://wiki.telink-semi.cn/wiki/IDE-and-Tools/Burning-and-Debugging-Tools-for-all-Series/>

**Eclipse IDE:**

<https://wiki.telink-semi.cn/wiki/IDE-and-Tools/IDE-for-TLSR8-Chips/>

## Spis treści

Uruchomienie sprzętu .....	2
Wgranie plików binarnych do płytek .....	2
Uruchomienie wgranych na płytki programów i odczytanie wartości kątów .....	3
Sposób działania technologii AoA .....	3
Pomiary .....	4
Pomiary Statyczne .....	4
Pomiary dynamiczne .....	7
Obliczenie błędu pomiarowego .....	8
Filtrowanie kątów .....	10
Triangulacja .....	10
Skrypt do pobrania wartości kątów .....	11
Pomiary .....	11
Wnioski .....	11
Podział prac .....	11

## Uruchomienie sprzętu.

W celu poprawnego uruchomienia układu należy odpowiednio połączyć poszczególne elementy modułu, podłączyć do zasilania i wgrać odpowiednie programy.

Należy wykonać następujące kroki:

- Wkręcić 8 *Whip* anten do płytki *positioning board*.
- Połączyć *positioning board* do *burning board* za pomocą trzech kabli znajdujących się na płytce w następujący sposób:

Burning Board	Positioning Board
3V3	3v3
SWM	SWS
GND	GND

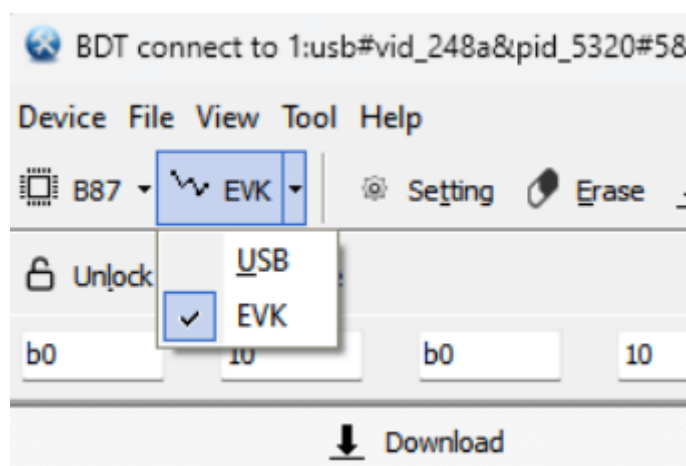
Z uwagi na architekturę płytki *positioning board* (brak portu USB) nie ma możliwości podłączenia płytki przez USB, wymagane podłączenie przez EVK.

- Połączyć *burning board* z komputerem za pomocą kabla USB.
- Wkręcić 1 *Whip* antenę do płytki *development board*.
- Płytkę podłączyć bezpośrednio do komputera za pomocą kabla USB.

## Wgranie plików binarnych do płytek

Sposób 1 - używając gotowych plików binarnych dostarczonych przez TScript.

Używając BDT należy wgrać plik binarny B87\_RF\_AOA\_RX\_0Xfcaab2c1\_2440.bin do Receiver'a (*positioning board*), oraz plik B87\_RF\_AOA\_TX\_0Xfcaab2c1\_2440.bin do Transmitter'a (*development board*). Wgranie programu w BDT polega na wybraniu rodzaju chipu, sposobu przesyłania danych (EVK czy USB) oraz pobraniu pliku na urządzenie (Download).



Sposób 2 – modyfikacja pliku źródłowego app.c, kompilacja projektu i wgranie utworzonego pliku binarnego używając BDT.

W folderze telink\_b85m\_driver\_sdk znajduje się demo RF\_AOA\_Demo z plikami źródłowymi programu. Aby przygotować program do wgrania na płytkę należy zmodyfikować flagę RF\_TXRX\_MODE w pliku app.c wpisując wartość RX jeśli program ma być wgrany do Recivera (*positioning board*), albo TX jeśli program ma być wgrany do Transmittera (*development board*). Następnie używając IDE Eclipse należy skompilować projekt. Plik binarny projektu RF\_AOA\_Demo.bin powinien się znajdować w folderze project RF\_AOA\_Demo. Plik ten należy wgrać na płytkę przez BDT. Nie należy wgrywać tego samego pliku binarnego do Recievera i Transmittera. Należy pamiętać o ponownym skompilowaniu programu po zmianie flagi.

## Uruchomienie wgranych na płytki programów i odczytanie wartości kątów

Programy można uruchomić używając TScript lub BDT. Tscript jest wygodniejszy w użyciu, bo umożliwia zapisanie wyników pomiarów do pliku, gdzie możemy zobaczyć więcej informacji na temat danego pomiaru, niż w przypadku okna logów. W tym dane surowe pakietu AoA, wartość RSSI, Input angle, Zaxis angle, wartości minimalna i maksymalna. W naszym przypadku odczytanie mocy sygnału RSSI nie powiodło się, mimo ingerencji w kod pliku AoA\_Sniffer\_draw\_by\_sws\_V1.2. lua. Nie udało się jednoznacznie ustalić przyczyny, ale może być to spowodowane tym, że oprogramowanie TScript nie odczytuje poprawnie wartości RSSI, bo według dokumentacji oprogramowanie jest zgodne tylko z modelem płytki 8258, a nasz model to 8278. To sugeruje, że mogły wystąpić błędy w komunikacji między oprogramowaniem a sprzętem.

Programy wgrane na płytki można uruchomić bezpośrednio używając BDT. Wtedy po uruchomieniu w “Log window” powinny się wyświetlić informacje o kątach.

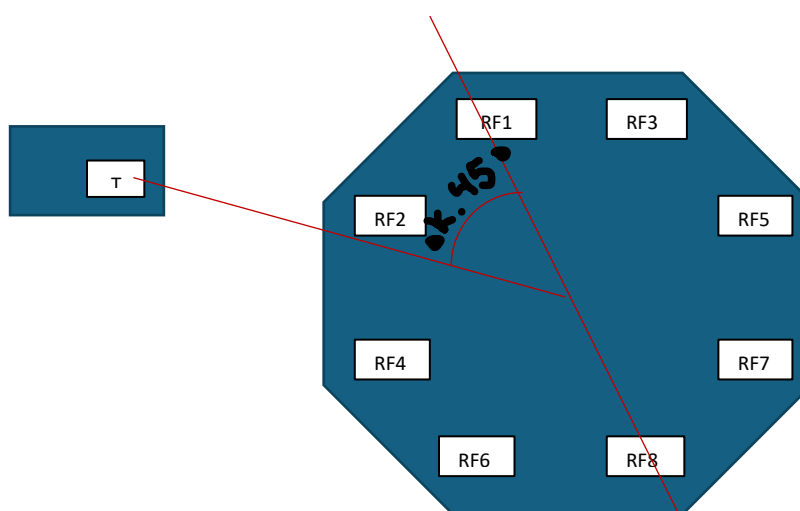
## Sposób działania technologii AoA

Nadajnik wysyła pakiety za pomocą jednej anteny. Pakiety są typu “direction finding enabled packets”, co oznacza, że mają określoną strukturę, aby umożliwić urządzeniu odbierającemu określenie kierunku, z którego nadchodzi sygnał. To pozwala odbiornikowi określić kąt, pod jakim sygnał został nadany. Odbiornik, składający się z przełącznika RF i macierzy anten, przełącza anteny podczas odbierania pakietów i przechwytywa próbki IQ (in-phase i quadrature). Próbkę IQ są reprezentacjami sygnału radiowego w dziedzinie czasu i częstotliwości. Są one używane do obliczenia różnicy faz sygnału radiowego odbieranego przez różne elementy macierzy anten, co przekłada się na oszacowanie kąta.

Odbiór sygnału za pomocą macierzy anten polega na jednoczesnym odbiorze sygnału przez wszystkie anteny w macierzy, dlatego że każda antena odbiera sygnał niezależnie. Ze względu na różne położenie anten w przestrzeni sygnał radiowy dotrze do każdej anteny z minimalnym przesunięciem czasowym (z racji, że sygnał przebywa różne odległości do poszczególnych anten), co powoduje różnice w fazie odbieranego sygnału. Na podstawie różnic faz i znając rozmieszczenie anten w macierzy można obliczyć kąt nadejścia sygnału.

Każda antena w macierzy odpowiada określonemu kątowi względem środka macierzy:

- **RF1:** 0 stopni
- **RF2:** 45 stopni
- **RF4:** 90 stopni
- **RF6:** 135 stopni
- **RF8:** 180 stopni
- **RF7:** 225 stopni
- **RF5:** 270 stopni
- **RF3:** 315 stopni



Rys. 1. Poglądowy rysunek działania układu nadajnik-odbiornik.

## Pomiary

Pomiary realizowano używając programu TScript. Z każdego odbiornika niezależnie zbierano dane do pliku. Po każdym pomiarze otrzymywaliśmy dwa pliki (dla odbiornika R1 i odbiornika R2) zawierające 100 próbek (pakietów). Każda próbka zawiera szczegółowe informacje o otrzymanym przez odbiornik pakiecie (dane surowe), wartość RSSI, wartość kąta w poziomie oraz wartość kąta wysokości. Z racji, że wartość RSSI otrzymana z pakietu u nas zawsze wynosi 0, program pokazuje -110 jako wartość RSSI. Przeprowadzono dwa rodzaje pomiarów:

- Statyczne – dwa odbiorniki i nadajnik ustawiono w określony układ, mierzono kąty i następnie porównywano je z kątami oczekiwanymi. Wykonano 40 takich pomiarów.
- Dynamiczne – dwa odbiorniki ustawiono nieruchomo, natomiast nadajnik się poruszał według określonego toru. Dla tego typu pomiarów zwiększono liczbę próbek do 300. Wykonano 3 takie pomiary dla trzech różnych torów ruchu.

## Pomiary Statyczne

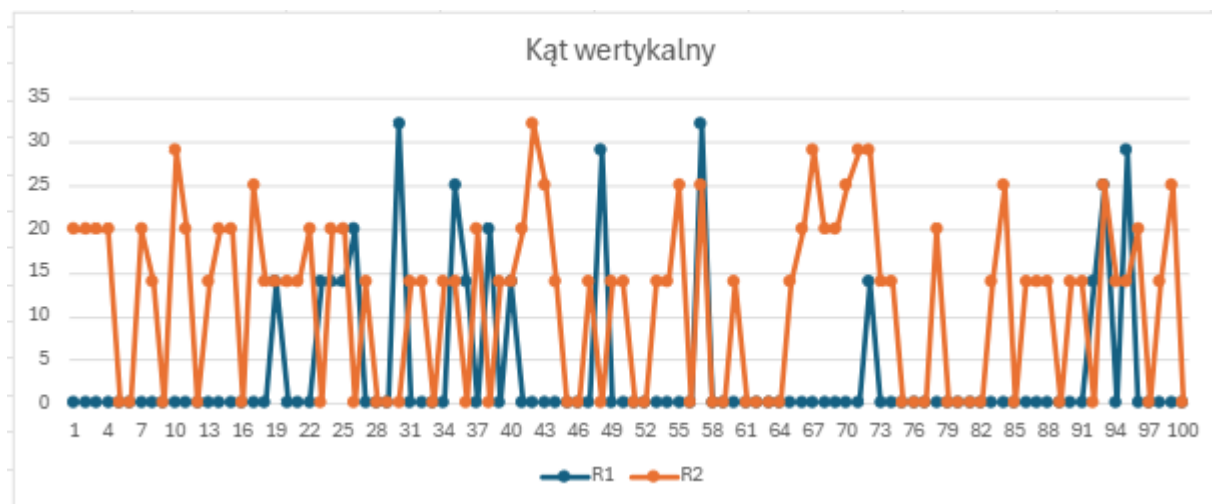
Pomiary podzielono na 4 serie.

- Seria 1** - Wyniki 10 pomiarów statycznych tylko dla kąta w poziomie dla 10 różnych układów umieszczono w arkuszu **seria\_13\_05** (załączony do sprawozdania plik Excel). Zauważono, że odbiornik 2 dużo częściej oblicza błędny kąt, niż odbiornik 1. W obu przypadkach jednak występują próbki “nieadekwatne”, czyli tak zwane outliers, które mogły być spowodowane na przykład zakłóceniem sygnału. W celu wyeliminowania takich próbek w późniejszych seriach pomiarowych (serie 3 i 4) stosowano filtrację wyników. Jako filtr służył program napisany w języku Python (również dołączony do sprawozdania).



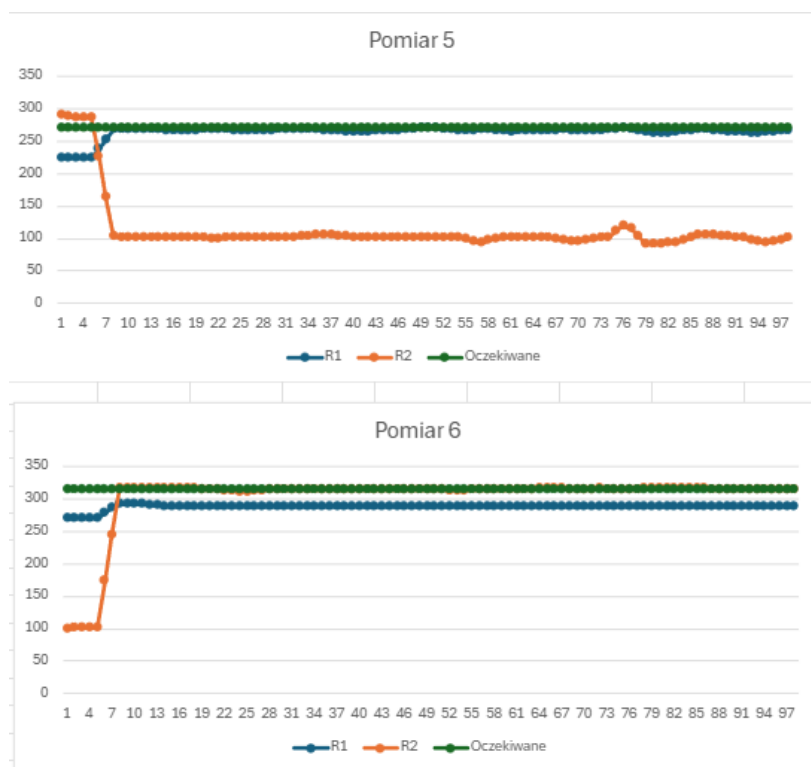
Rys 2. Przykładowy pomiar z serii 1

- Seria 2** - Wyniki 12 pomiarów znajdujące się w arkuszu **seria\_27\_05** zostały wykonane w analogiczny sposób dla 10 układów z serii 1 oraz dwóch nowych. Tym razem przy analizie wyników uwzględniono również kąt wysokości i porównano z oczekiwanym. Jak można zobaczyć na wykresach obliczanie kąta wysokości jest bardzo niedokładne.



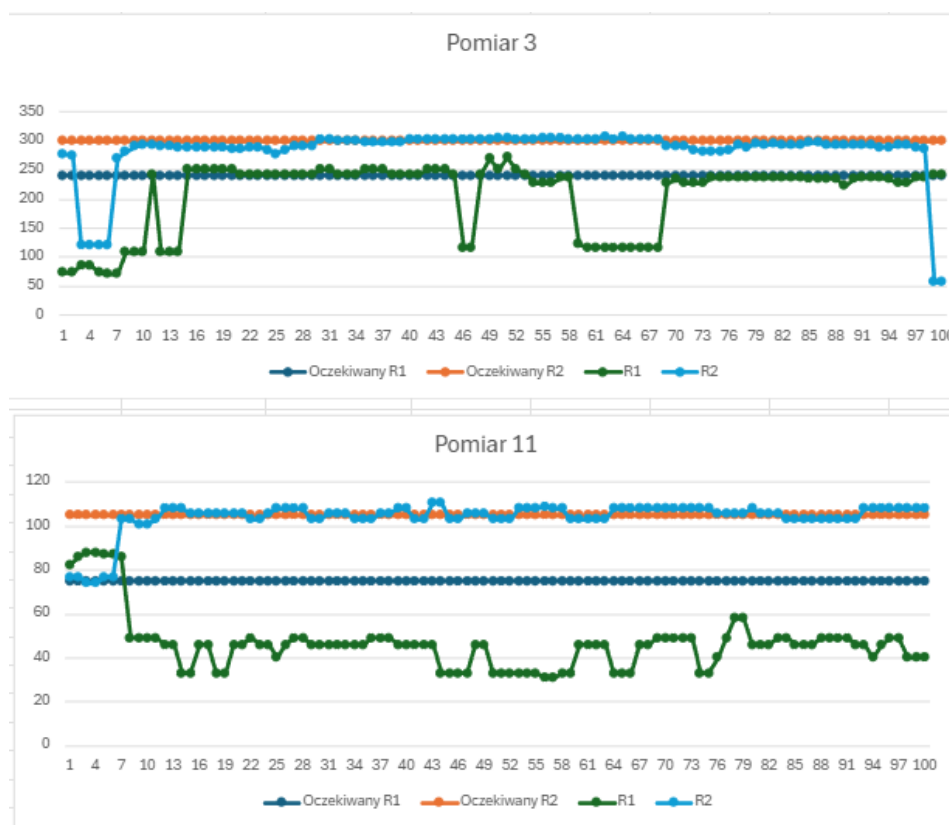
Rys 3. Przykładowy pomiar z serii 2 dla kąta wysokości

- Seria 3** - w tej serii wykonano 6 pomiarów dla każdego odbiornika osobno ustawiając nadajnik blisko określonej anteny sprawdzając czy właśnie ta antena odbierze sygnał najwcześniej i tym samym otrzymamy oczekiwany kąt. Z doświadczenie wynikało, że odbiornik 1 lepiej oszacował kąt dla kątów w zakresie 180 do 360 stopni, natomiast odbiornik 2 dobrze oszacował jedynie kąt 315 w 6 pomiarze. W obu przypadkach widać, że pierwsze około 10 próbek pokazuje zupełnie nieadekwatne kąty, co wskazuje, że sygnał musi się ustabilizować zanim odbiornik zacznie dobrze szacować kąt. Wyniki pomiarów z tej serii znajdują się w arkuszu 10.06.



Rys 4. Przykładowe pomiary z serii 3

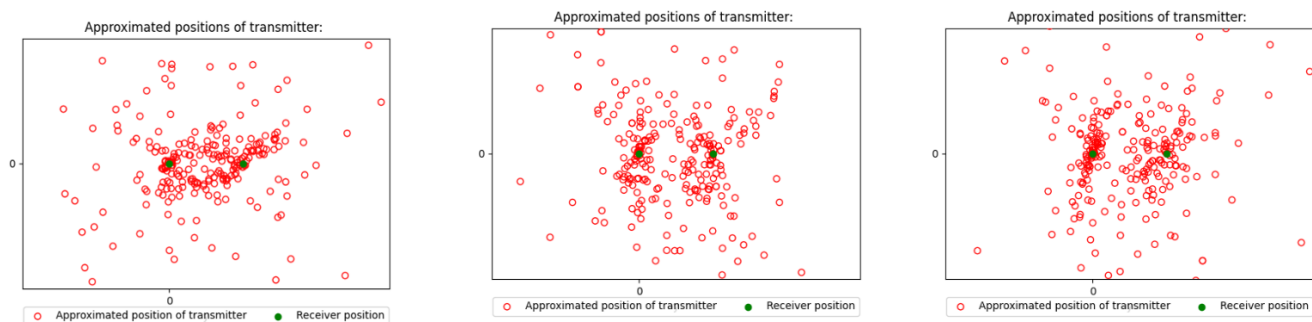
- Seria 4** – kolejne 9 pomiarów (arkusz 13.06) wykonano z myślą o zweryfikowaniu czy oba odbiorniki będą obliczać dokładniejsze kąty dla zakresu od 180 do 360 stopni. W tym celu nadajnik umieszczono pomiędzy odbiornikami, a odbiorniki obrócono w taki sposób, aby anteny odpowiadające za kąty z zakresu 180-360 stopni zwrócone były w stronę nadajnika. Kąty mierzono punktowo statycznie przesuwając nadajnik, ale tak, żeby pozostawał pomiędzy odbiornikami. Wyniki pokazują, że rozbieżność w pracy odbiorników nadal występuje. Odbiornik 1 lepiej oszacował badany kąt, niż odbiornik 2. Natomiast po obróceniu odbiorników o 180 stopni tak, żeby zbadać dokładność obliczania kątów dla zakres 0 – 180 stopni okazało się, że odbiornik 2 dokładniej oszacował kąt nadejścia. Pomiarów z odwróconym układem wykonano 3.



Rys 5. Przykładowe pomiary z serii 4 (dla zakresu 180-360 i dla 0-180)

## Pomiary dynamiczne

Wykonano 3 pomiary liczące po 300 próbek dla nadajnika w ruchu. Wyniki pomiarów w postaci wykresów wraz z diagramem układu płytek i toru ruchu zamieszczono w arkuszu 10.06. Wyniki pokazują, że obliczany kąt dla nadajnika, który się porusza jest bardzo niedokładny.



Rys 6. Pomiary dynamiczne dla 3 różnych torów ruchu

Zauważono, że szybkość rejestrowania pakietu przez program TScript zależy od rodzaju procesora komputera, na którym został uruchomiony program. Na maszynach ze rdzeniem firmy Intel próbki rejestrowane były 3-krotnie szybciej, niż na maszynach z procesorem firmy AMD.

## Obliczenie błędu pomiarowego

Aby zweryfikować czy dany pomiar jest dobry obliczono parametry statystyczne dla każdego pomiaru: odchylenie standardowe, średnią kwadratową, skośność i kurtozę.

W tym celu skorzystaliśmy ze wzorów wbudowanych w arkusz kalkulacyjny Excel:

- Odchylenie standardowe – funkcja `ODCH.STANDARDOWE()`
- Średnia kwadratowa – zaimplementowano wzór  $x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N x_i^2}$
- Skośność - funkcja `SKOŚNOŚĆ()`
- Kurtoza – funkcja `KURTOZA()`

Przykładowe dwa pomiary, których wynik można uznać za dobry przedstawione są poniżej.

Tabela 1. Parametry statystyczne – pomiar 12, seria 27\_05

	Kąt horyzontalny R1	Kąt wysokości R1	Kąt horyzontalny R2	Kąt wysokości R2
Odchylenie standardowe	24,56	11,98	28,11	7,16
Średnia kwadratowa	193,15	28,90	174,80	29,61
Skośność	0,93	0,56	-0,38	0,73
Kurtoza	1,70	1,82	17,57	3,96

Z powyższej tabeli wynika, że dla kąta wysokości pomiary są bardziej precyzyjne, ponieważ odchylenie standardowe jest niskie, a więc wartości są blisko średniej. W przypadku kąta horyzontalnego można uznać, że otrzymane odchylenie standardowe dla tego pomiaru jest stosunkowo niskie w porównaniu do innych pomiarów. Średnia kwadratowa dla wszystkich obliczonych kątów jest zbliżona do kąta oczekiwanego, który wynosi: kąt horyzontalny R1 – ok. 200 st,



kąt horyzontalny R2 – ok. 160 st, kąt wysokości R1 oraz R2 – ok. 30 st. Dla wszystkich kątów z tego pomiaru skośność jest bliska zeru, co wskazuje na symetryczność rozkładu danych względem średniej. Kurtoza mierzy “szczytowość” rozkładu danych. Z racji, że kurtoza dla kątów mierzonych przez odbiornik 1 jest mniejsza od 3 wnioskujemy rozkład danych jest bardziej płaski. Natomiast w przypadku odbiornika 2 wartość kurtozy dla kąta horyzontalnego znacznie różni się od 3, co wskazuje na nienormalność rozkładu i duże wartości odstające. Dla kąta wertykalnego odbiornika 2 rozkład danych jest normalny.

*Tabela 2. Parametry statystyczne – pomiar 1, seria 27\_05*

	Kąt horyzontalny R1	Kąt wysokości R1	Kąt horyzontalny R2	Kąt wysokości R2
Odchylenie standardowe	67,13	7,98	2,75	9,79
Średnia kwadratowa	152,46	8,62	84,24	15,20
Skośność	-0,20	2,42	0,82	0,04
Kurtoza	0,66	4,79	2,00	-1,27

Tutaj można zauważyć różnicę w dokładności pomiaru kąta horyzontalnego przez odbiornik 1 i odbiornik 2. Wartość odchylenia standardowego pokazuje, że wartość kąta obliczona przez R2 jest dużo dokładniejsza w tym pomiarze od wartości kąta obliczonej przez R1. Średnia kwadratowa jest zbliżona do kąta oczekiwanego równego 90 st. w przypadku kąta horyzontalnego R2, natomiast znacznie odbiega dla pozostałych. Kąt horyzontalny R1 powinien wynosić 180 st, a oba kąty wertykalne powinny wynosić 0 st. Wartości skośności wskazują, że dla wszystkich kątów, z wyjątkiem kąta wysokości R1, rozkład danych jest symetryczny. Rozkład danych z pomiaru kątów horyzontalnego R1 i wysokości R2 jest bardziej płaski, ma krótkie ogony i szeroki niski szczyt. Rozkład dla kąta wysokości R1 jest bardziej szczytowy, a dla kąta w poziomie R2 rozkład jest zbliżony do normalnego. Niemniej jednak powyższy pomiar można uznać za stosunkowo dokładny.

*Tabela 3. Parametry statystyczne – pomiar 10, seria 27\_05*

	Kąt horyzontalny R1	Kąt wysokości R1	Kąt horyzontalny R2	Kąt wysokości R2
Odchylenie standardowe	91,61	9,91	89,10	11,47
Średnia kwadratowa	238,46	11,08	102,15	13,73
Skośność	-0,49	2,01	2,10	1,39
Kurtoza	-0,59	3,47	3,27	1,20

Wyniki powyższego pomiaru, szczególnie dla kątów horyzontalnych uznajemy za niedokładne ze względu na wysoką wartość odchylenia standardowego, które pokazuje, że wartości są znacznie rozproszone wokół średniej. Wartość średniej kwadratowej nie jest zbliżona do wartości oczekiwanych kątów - ok. 300 st. dla R1 oraz ok. 40 st. dla R2.

W celu poprawy dokładności wyników zastosowaliśmy filtrację pomiarów, która rzeczywiście poprawiła dokładność otrzymanych kątów.

Tabela 4. Parametry statystyczne – pomiar 3, seria 10\_06, przed filtracją

	Kąt horyzontalny R1	Kąt horyzontalny R2
Odchylenie standardowe	43,02	56,60
Średnia kwadratowa	163,45	220,10
Skośność	1,25	-1,23
Kurtoza	5,05	4,98

Tabela 5. Parametry statystyczne – pomiar 3, seria 10\_06, po filtracji

	Kąt horyzontalny R1	Kąt horyzontalny R2
Odchylenie standardowe	20,96	22,58
Średnia kwadratowa	155,30	219,15
Skośność	1,69	-0,40
Kurtoza	6,58	0,75

Jak widać powyżej w Tabeli 4. i Tabeli 5. filtracja znacznie poprawiła dokładność obliczonych kątów. Wartość odchylenia standardowego zmniejszyła się o około połowę, co oznacza, że błąd pomiarowy zmalał, a wartości średniej kwadratowej są zbliżone do oczekiwanych. Skośność i kurtoza jednak zarówno przed jak i po filtracji wskazują na stosunkowo niesymetryczny rozkład danych oraz obecność dużych wartości odstających.

## Filtrowanie kątów

Do filtrowania pomiarów (wykluczenia błędnych wartości) wykorzystujemy kilka filtrów:

- filtr mediany,
- filtr średniej ruchomej,

Umożliwia nam to otrzymanie (prawie) dokładnych kątów, bliskich do tych oczekiwanych/rzeczywistych.

## Triangulacja

Wzór na przewidywaną odległość na osi X, wyrażona w metrach od punktu [0,0] (odbiornika 1)

$$x_{\tau} = \frac{((-x_d \cdot \tan(\beta)) + y_d)}{\tan(\alpha) - \tan(\beta)}$$

gdzie:

$x_d$  to odległość w metrach pomiędzy odbiornikiem 1 a odbiornikiem 2 na osi X.

$y_d$  to odległość w metrach pomiędzy odbiornikiem 1 a odbiornikiem 2 na osi Y.

$\alpha$  to kąt odmierzony z odbiornika 1, wyrażony w radianach.

$\beta$  to kąt odmierzony z odbiornika 2, wyrażony w radianach.

Wzór na przewidywaną odległość na osi Y w metrach od odbiornika 1 (punktu [0,0])

$$y_\tau = \tan(\alpha) \cdot x_\tau$$

gdzie:

$\alpha$  to kąt odmierzony z odbiornika 1, wyrażony w radianach.

$x_\tau$  to przewidywana odległość na osi X wyrażona w metrach od odbiornika 1.

## Skrypt do pobrania wartości kątów

Napisany został skrypt w języku Python, który umożliwił nam uzyskanie oczekiwanych wartości kątów z pliku generowanego przez TScript (program dostarczony wraz ze sprzętem). Niestety okazało się niemożliwe uzyskanie wartości RSSI, jako iż płytka nie pozwalała na takie rozwiązanie, bądź skrypt nie przewidywał takiego rozwiązania.

## Pomiary

Wszystkie dokonane przez nas pomiary znajdują się w załączonym pliku Excel. Przy pomiarach statycznych zebrane zostało 100 próbek przy każdej próbie. Natomiast w pomiarach ruchomych – 300 próbek.

Zawarliśmy w nim:

- Oczekiwane wartości kątów,
- Uzyskane wartości kątów,
- Filtrowane wartości kątów,
- Wykresy wartości kątów, umożliwiające zobrazowanie przebiegu pomiaru oraz wynikające z błędu pomiarowego sprzętu odchylenia.

## Wnioski

W trakcie wykonywania pomiarów zauważyliśmy pewną rozbieżność między wynikami uzyskanymi z poszczególnych odbiorników. Mianowicie, jeden odbiornik zwracał wartości przybliżone dla realnej lokalizacji nadajnika, z kolei drugi (R2) - znacznie rozbieżne, często “rozstrzelone” po całej osi koła 360 stopni. Naszym zdaniem któryś z odbiorników mógł być wadliwy, stąd te rozbieżności.

## Podział prac

Grzegorz Janasek – Pomiary kątów, edycja skryptu Lua, uruchomienie sprzętu

Hubert Klonowski – Pomiary kątów, skrypt, filtrowanie kątów

Wiktoria Bilecka – Uruchomienie sprzętu, pomiary, instrukcja uruchomienia

Sebastian Kuciński – Pomiary kątów, triangulacja, skrypt