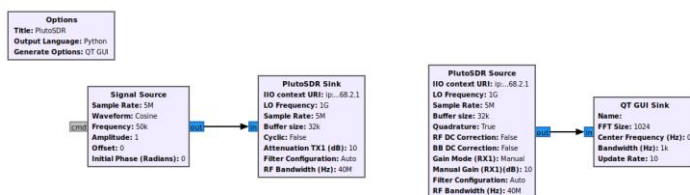


Tytułowa różnica fazy jest detekowana między dwoma kanałami odbiorczymi ADALM-Pluto rev C. Do konfiguracji ADALM-Pluto, nadawania, odbierania, a następnie przetwarzania danych istnieje wiele dostępnych narzędzi. Jednym z nich jest GnuRadio. Jest to darmowy zestaw narzędzi do tworzenia kodu za pomocą bloków przetwarzania sygnału. Dzięki dedykowanym blokom umożliwia pracę z wieloma zewnętrznymi modułami RF, a może także służyć do przeprowadzania symulacji. Tworzenie schematów jest niezwykle intuicyjne, dzięki czemu zaznajamianie się z programem nie wymaga dużych nakładów pracy. Przykładowy schemat z GnuRadio został przedstawiony na rysunku. Przed uruchomieniem programu nadajnik i odbiornik ADALM-Pluto zostały połączone. Blok signal source odpowiada za generację sygnału o zadanych parametrach i następnie podawany jest na wejście bloku PlutoSDR Sink. Umożliwia on konfigurację kanału nadawczego

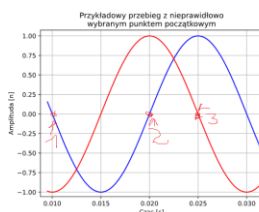


pluto i transmisję sygnału. Kanał odbiorczy ADALM-Pluto jest konfigurowany za pomocą PlutoSdr source, a następnie odebrany sygnał trafia do bloku QT GUI sink, dzięki któremu możliwa jest obserwacja odbieranego sygnału. Pomimo wielu zalet bloki odpowiedzialne za programowanie ADALM-Pluto nie są dostosowane do wersji C urządzenia i posiadają jedynie jeden kanał nadawczy i odbiorczy, co uniemożliwia wykorzystanie Gnu Radio do pomiaru różnicy fazy. Kolejnym oprogramowaniem jest IIO Oscilloscope. Jest to aplikacja GUI, która odpowiada za konfigurację pracy płytek ewaluacyjnych i tworzenie wykresów odbieranych danych w czterech trybach: dziedzina czasu, dziedzina częstotliwości, konstelacja i korelacja krzyżowa. Przykładowy zrzut z programu został przedstawiony na rysunku. Nie została wykorzystana do opracowania detektora różnicy fazy, ponieważ nie umożliwia dalszego przetwarzania odbieranych sygnałów. Natomiast idealnie nadaje się do eksploracji płytek ewaluacyjnych, ponieważ dzięki ustawieniom początkowym umożliwia obserwację odbieranych sygnałów bezpośrednio po podłączeniu płytki do komputera. W programie MATLAB dostępny jest moduł Communications Toolbox Support Package for Analog Devices ADALM-Pluto Radio, który umożliwia konfigurowanie parametrów nadawania i odbioru sygnału, a także przetwarzanie sygnału za pomocą diagramów blokowych. Na rysunku przedstawiono przykładowy schemat. Występuje jednak taki sam problem jak w programie GnuRadio, dostępne bloki są dostosowane do poprzednich wersji ADALM-Pluto i nie występuje możliwość jednoczesnej pracy dwóch kanałów odbiorczych. Możliwe jest również programowanie ADALM-Pluto bezpośrednio w języku python. Dostępne są dwie biblioteki: libiio, która umożliwia pracę z zewnętrznym sprzętem, a także libad9361-iio odpowiedzialną za pracę z czipem RF w ADALM-Pluto. Na ich podstawie działania API pluto w pythonie- pyadi-iio. W odróżnieniu od poprzednich rozwiązań, sposób funkcjonowania ADALM-Pluto jest sterowany z poziomu kodu, co zapewnia

większą elastyczność i możliwość dostosowania do indywidualnych potrzeb. Największą zaletą jest możliwość pracy z dwoma kanałami odbiorczymi, co umożliwia wykorzystanie tego rozwiązania do detekcji różnicy fazy, jednak konfiguracja obu kanałów odbiorczych jest identyczna. Ponadto istnieje rozbudowana dokumentacja oraz wiele przykładowych kodów, co ułatwia szybkie zapoznanie się z możliwościami platformy. Z pomocą pyadi-iiio zostały opracowane dwie metody detekcji różnicy fazy między sygnałami z kanałów odbiorczych ADALM-Pluto:

- Metoda próbek,
- Metoda arctg.

Schemat blokowy opisujący działanie metod został przedstawiony na rysunku. W metodzie próbek różnica fazy jest detekowana pomiędzy rzeczywistymi częściami sygnału. Jest to spowodowane faktem, że część rzeczywista sygnału jest przesunięta w fazie stale o 45 st w stosunku do sygnału odtworzonego (sumy części rzeczywistej i urojonej), więc różnica fazy pomiędzy częściami rzeczywistymi sygnałów jest taka sama jak sygnałów odtworzonych. Odtworzenie sygnałów wymaga wykonania dodatkowych operacji dodawania, co zwiększa złożoność obliczeniową programu. Kluczowym etapem metod jest detekcja miejsc zerowych części rzeczywistej sygnału. Są one wykrywane jedynie na opadającym zboczach sygnału. Aby zostały odpowiednio detekowane wymagany jest wybór odpowiedniego miejsca rozpoczęcia pomiaru, tak aby wykryte miejsca zerowe sygnałów sobie odpowiadały. W przebiegu przedstawionym na rysunku sygnał czerwony wyprzedza sygnał niebieski w fazie o 90 st. Pierwsze miejsce zerowe sygnału niebieskiego zostanie wykryte w punkcie 1, natomiast sygnału czerwonego w punkcie 3. W późniejszych krokach spowoduje to błąd, ponieważ sygnał niebieski zostanie zinterpretowany jako wyprzedzający w fazie sygnał czerwony. Aby uniknąć tego błędu odejmuję od siebie początkowe wartości sygnałów i szukam w nich najmniejszej wartości bezwzględnej, co umożliwia znalezienie punktu przecięcia sygnałów. Ustawienie tego punktu jako początku pomiaru gwarantuje, że próbki początkowe będą mieć te same znaki, co wyeliminuje błąd.

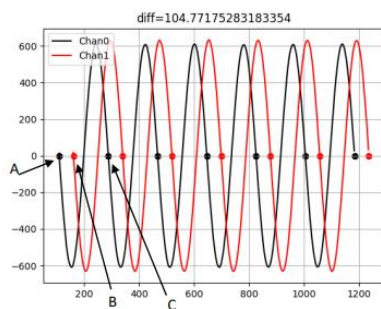


Po wybraniu odpowiedniego punktu początkowego pomiaru kolejnym krokiem jest wykrycie miejsc zerowych dla obu sygnałów. Są możliwe dwa warianty:

- Wartość próbki równa zero (przypadek idealny)

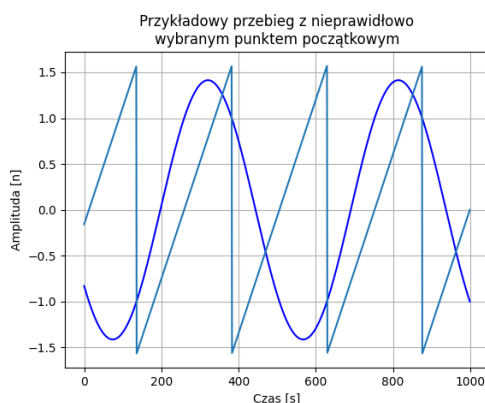
- Wykrywana jest próbka, która przyjmuje wartość ujemną, a poprzednia dodatnią. W takim przypadku jako miejsce zerowe przyjmowana jest próbka o wartości ujemnej.

Zapisywane są numery próbek w których zostało wykryte miejsce zerowe, dla obu kanałów w osobnej liście. Na tej podstawie obliczana jest długość okresu sygnału, wyrażona w ilości próbek. Odejmowany jest numer próbki, w której zarejestrowano drugie miejsce zerowe, od numeru próbki pierwszego miejsca zerowego jednego z kanałów. Następnie numery próbek odpowiadające sobie są odejmowane, a następnie obliczana jest wartość bezwzględna. Na rysunku przedstawiono przebieg. Punkt A oznacza pierwsze zarejestrowane miejsce zerowe sygnału z kanału 0, natomiast punkt B wskazuje pierwsze zarejestrowane miejsce zerowe sygnału z

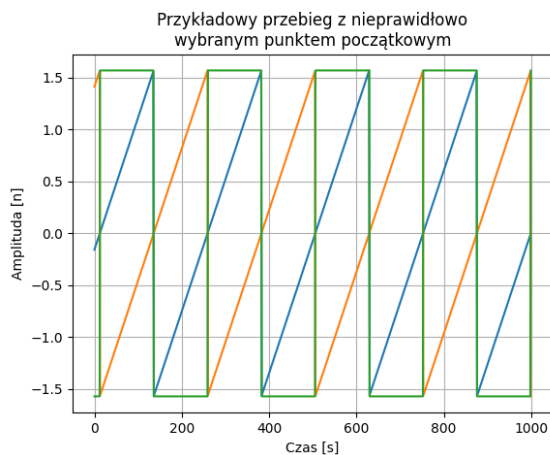


kanału 1. Różnicę fazową pomiędzy sygnałami wyrażoną w próbkach obliczam poprzez $\text{abs}(A-B)$. Długość okresu jest obliczana jako $\text{abs}(A-C)$. Wyrażenie $\text{abs}(A-B)/\text{abs}(A-C) * 360$ pozwala na obliczenie stosunku pomiędzy różnicą fazową wyrażoną w próbkach, a długością okresu, a pomnożenie przez 360 stopni zamienia stosunek na stopnie. W rzeczywistości dla każdej pary miejsc zerowych wykonuje się tę operację bez zamiany na stopnie i zapisuje, a następnie oblicza się ich średnią wartość. Dopiero wartość średnia jest zamieniana na stopnie, co stanowi końcowy wynik pomiaru różnicy fazy metodą próbek.

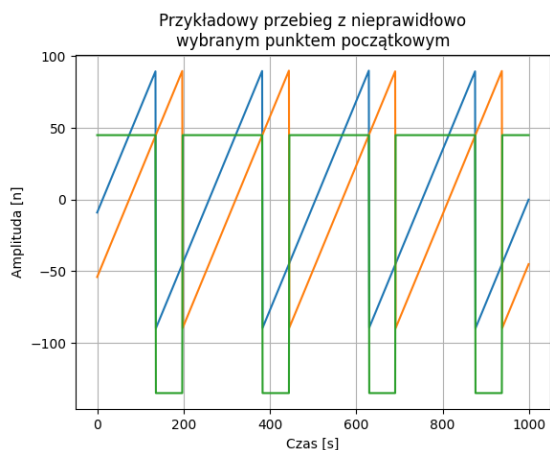
Metoda arctg bazuje na zespolonej naturze odbieranego sygnału. Obliczając fazę sygnału z zależności otrzymujemy sygnał piłokształtny przedstawiony na rysunku. Sygnał arctg jest okresowy z okresem równym π i przyjmuje wartości od $-\pi/2$ do $\pi/2$. Nieciągłości sygnału wynikają z nieokreśloności funkcji tg w wielokrotnościach $-\pi/2$ i $\pi/2$.



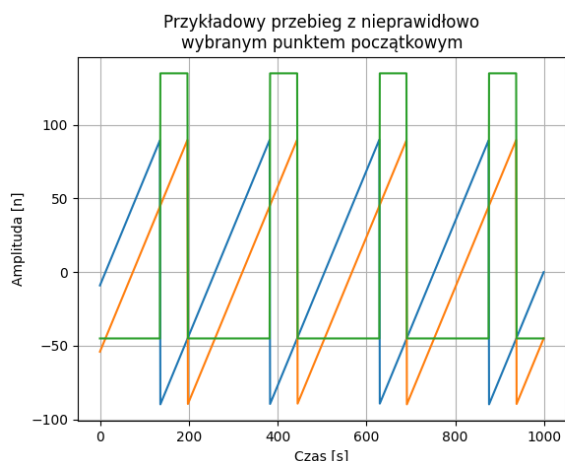
Różnica fazy jest definiowana jako różnica sygnałów \arctg dwóch sygnałów. Sygnał różnicy fazy jest prostokątny i w zależności od różnicy fazy między sygnałami przyjmuje różne wartości i współczynniki wypełnienia. Na rysunku została przedstawiona sytuacja, gdy różnica fazy pomiędzy sygnałami wynosi 90 st. W takim przypadku współczynnik wypełnienia sygnału różnicy fazy wynosi 50%, a przyjmowane wartości to $\pi/2$ i $-\pi/2$. W tym przypadku wartość bezwzględna dodatniej i ujemnej części sygnału jest taka sama i wskazuje poprawną wartość różnicy fazy.



W przypadku przedstawionym na rysunku różnica fazy pomiędzy sygnałami wynosi 45 st i odjemną w działaniu obliczenia różnicy fazy jest sygnał opóźniony w fazie.



Prawidłowa wartość różnicy fazy stanowi dodatnią część sygnału prostokątnego, a ujemna część przyjmuje wartość -135 . W każdym z przypadków różnica pomiędzy dodatnią częścią sygnału prostokątnego, a ujemną wynosi 180 stopni i jest spowodowana odejmowaniem od siebie nie odpowiadających sobie okresów sygnału. Na rysunku przedstawiono dualny przypadek, lecz sygnał wyprzedzający w fazie jest odjemną w działaniu obliczenia różnicy fazy jest sygnał wyprzedzający w fazie.



W tym przypadku ujemna część sygnału prostokątnego zawiera prawidłową informację na temat różnicy fazy. Z powyższych przykładów wynika, że wiedza na temat początkowych wartości opóźnień sygnałów i ich wzajemnych zależności jest kluczowa do prawidłowego pomiaru różnicy fazy. W celu określenia który z sygnałów jest wyprzedzający w fazie wykorzystano algorytm opracowany w poprzedniej metodzie. Pierwsze kroki są dualne, wybór prawidłowego punktu początkowego oraz detekcja miejsc zerowych. Następnie porównywane są ze sobą zapisane numery próbek w których wystąpiło miejsce zerowe i na tej podstawie tworzony jest sygnał zero-jedynkowy. Jeśli sygnał z kanału zerowego jest wyprzedzający w fazie przypisywana jest wartość jeden, w przeciwnym wypadku wartość zero. Następnie obliczana jest mediana powstałego sygnału i jeśli jej wartość jest większa od 0.5 przyjmowane jest, że sygnał z kanału zerowego jest wyprzedzającym w fazie sygnał. Szczególnym przypadkiem jest sytuacja, gdy różnica fazy między sygnałami jest na tyle mała, że miejsca zerowe są rejestrowane w tym samym numerze próbki. W tej sytuacji przez próbkę, w której zarejestrowano miejsce zerowe i poprzednią prowadzona jest prosta i jako miejsce zerowe przyjmowane jest miejsce zerowe prowadzonej prostej. Z poprawnych wartości różnicy fazy obliczana jest wartość średnia i mediana, a następnie wynik jest zamieniany z radianów na stopnie.

Pomiary

Podsumowanie pomiarów

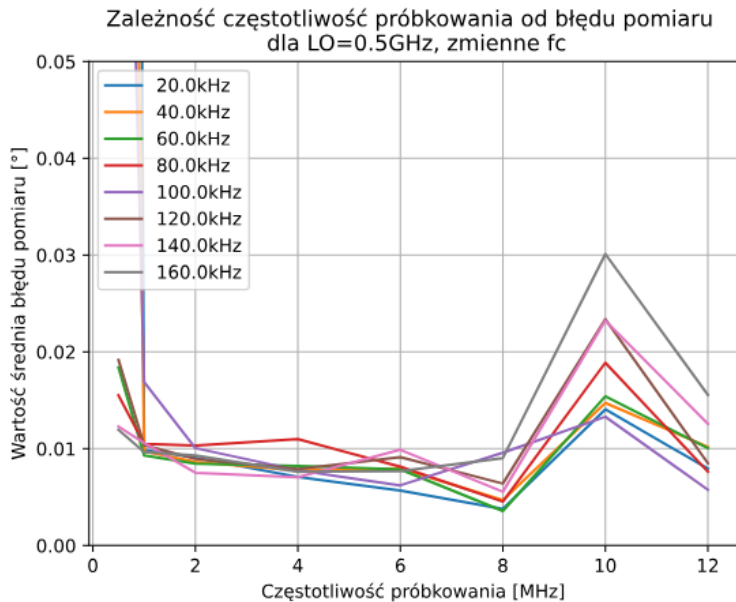
Pomiary zostały przeprowadzone na dwóch stanowiskach pomiarowych. Na pierwszym z nich przedstawionym na Rysunku sygnał jest nadawany przez ADALM-Pluto i odbierany przez kanały odbiorcze. Różnica fazy pomiędzy nadawanymi sygnałami jest zmieniana programowo o 1° 80 razy, a różnica fazy jest mierzona pomiędzy sygnałami odbieranymi.

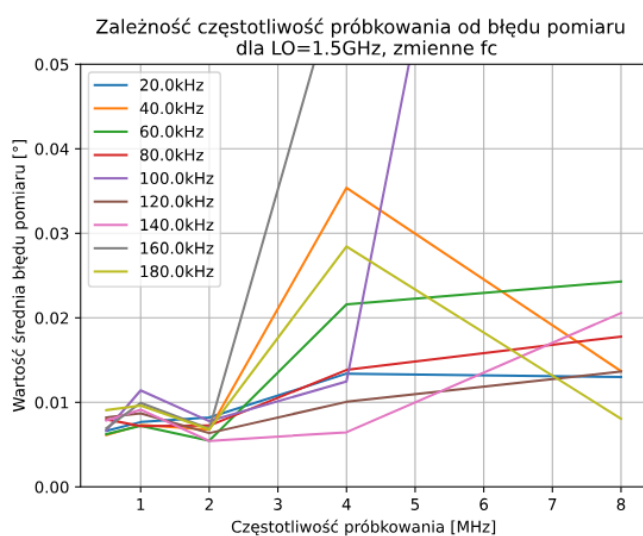
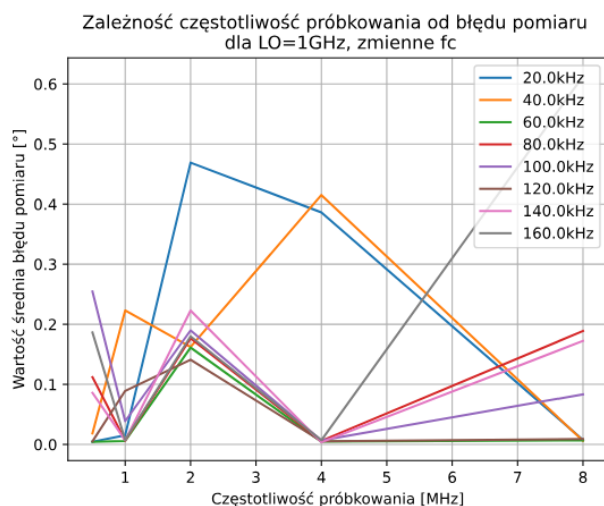


Pierwsza została przetestowana metoda arctg. Badany był wpływ następujących zmiennych na błąd pomiaru:

- Częstotliwość próbkowania (f_s),
- Częstotliwość sygnału z lokalnego oscylatora (LO),
- Mierzona wartość różnicy fazy,
- Częstotliwość sygnału modulującego (f_c).

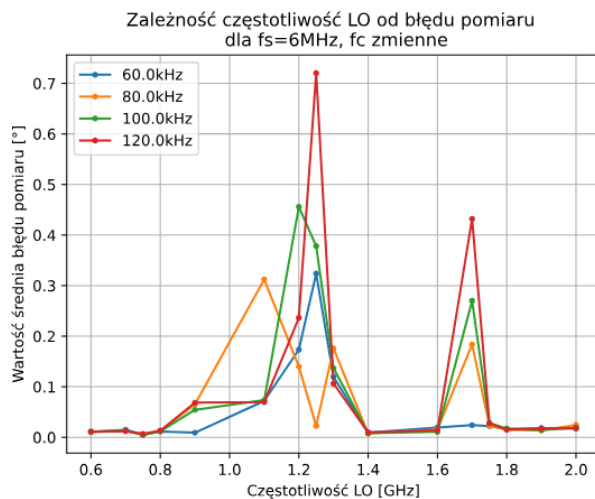
Pomiary badające wpływ częstotliwości próbkowania na błąd pomiaru zostały przeprowadzone dla częstotliwości sygnału z lokalnego oscylatora równych 0.5GHz, 1GHz, 1.5GHz oraz dla częstotliwości sygnału modulującego z przedziału od 20kHz do 160kHz. Wyniki pomiarów zostały przedstawione na rysunkach.





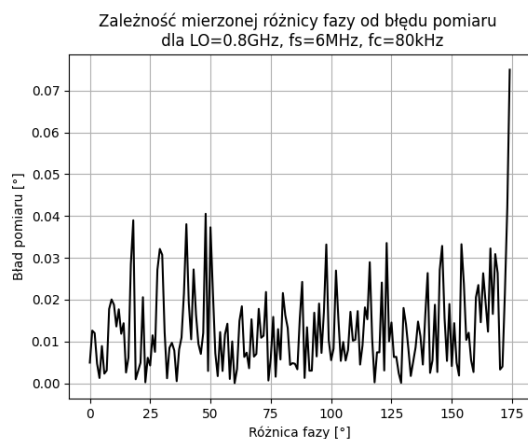
Z pomiarów wynika, że przy częstotliwości sygnału z lokalnego oscylatora równej 1.5GHz częstotliwość próbkowania większa niż 2MHz wpływa negatywnie na jakość pomiaru. Najlepsze wyniki dla wszystkich częstotliwości sygnału modulującego zostały osiągnięte dla częstotliwości próbkowania równej 1MHz. Dla częstotliwości sygnału z lokalnego oscylatora równej 0.5GHz częstotliwość próbkowania nie wpływa znacząco na błąd pomiaru. Optymalne częstotliwości próbkowania dla częstotliwości sygnału z lokalnego oscylatora równej 1GHz to 1MHz i 4MHz. Reasumując, optymalne częstotliwości próbkowania są zmienne dla poszczególnych częstotliwości sygnału z lokalnego oscylatora. Kolejnym wnioskiem jest brak znacznego wpływu częstotliwości sygnału modulującego na błąd pomiaru, jedynie częstotliwości 20kHz i 40kHz dla pomiaru z częstotliwością sygnału z lokalnego oscylatora 1GHz i częstotliwości 100kHz oraz 160kHz dla pomiaru z częstotliwością sygnału z lokalnego oscylatora 1.5GHz odbiegają od trendu zmian reszty pomiarów. Najbardziej znaczącym czynnikiem wpływającym na błąd pomiaru jest częstotliwość sygnału z lokalnego oscylatora.

Kolejny pomiar miał za zadanie sprawdzić jak częstotliwość sygnału z lokalnego oscylatora w zakresie od 0.5GHz do 2GHz wpływa na jakość pomiaru. Pomiary zostały przeprowadzone dla częstotliwości próbkowania 6MHz i częstotliwości sygnału modulującego z zakresu od 60kHz do 120kHz. Wyniki zostały przedstawione na rysunku.

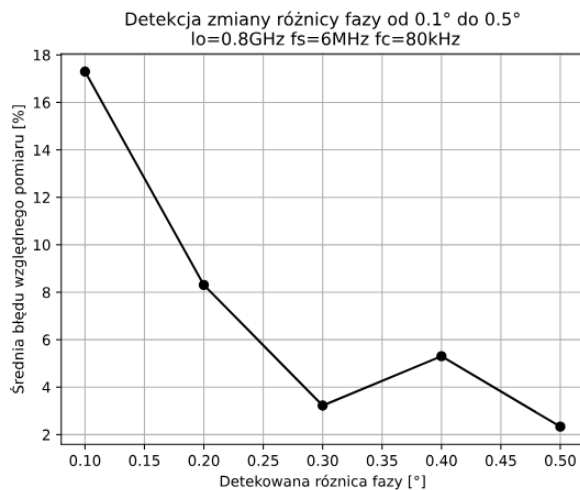


Wyniki obarczone największym błędem zostały zaobserwowane dla częstotliwości sygnału z lokalnego oscylatora równej około 1.3GHz i 1.7GHz. Częstotliwość sygnału modulującego wpływa na wielkość błędu (im wyższa częstotliwość tym większy błąd), natomiast trend dla wszystkich częstotliwości został zachowany. Powodem błędów nie jest jednak dokładność metody, tylko błędy w odbiorze sygnału. W okolicach częstotliwości 1.3GHz i 1.7GHz znacznie częściej występują błędy grube, czyli fazę odbieranego sygnału jest zmieniona o 180° , a także błędy spowodowane różnicą między amplitudami odbieranych sygnałów.

Następnie sprawdzono czy wartość mierzona ma wpływ na błąd pomiaru. W początkowym punkcie pomiaru różnica fazy między sygnałami wynosiła około 0° , podczas pomiaru różnica była zwiększana i mierzona do osiągnięcia różnicy fazy równej 175° . Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że mierzona wartość wpływa na dokładność pomiaru jedynie przy wartościach większych niż 175° , jest to spowodowane nieciągłością funkcji \arctg używanej do obliczenia różnicy fazy.

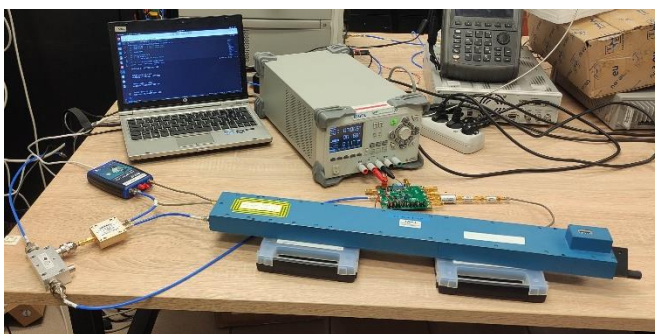


Kolejno sprawdzono jaka najmniejsza wartość wprowadzanego przesunięcia fazowego może zostać prawidłowo zmierzona. Przeprowadzono pomiary dla przesunięć fazy od 0.5° do 0.1° w serii 30 pomiarów. Na rysunku przedstawiono średnie wartości względnego błędu pomiaru w zależności od kroku wprowadzanego przesunięcia.



Błąd rośnie wraz ze zmniejszaniem się kroku, średni błąd przy optymalnych warunkach pracy w poprzednich pomiarach wynosi około 0,02, więc zmniejszając krok wprowadzanego przesunięcia fazowego ma on większy wpływ na pomiar.

Następnie zostały przeprowadzone pomiary na drugim stanowisku pomiarowym przedstawionym na rysunku. W przeciwieństwie do poprzedniego stanowiska sygnał nadawany pochodził z zewnętrznego generatora. W celu zachowania synchronizacji pomiędzy pluto a generatorem należało zastosować w ADALM-Pluto zewnętrzny sygnał zegarowy, co wymagało wprowadzenia zmian w konfiguracji ADALM-Pluto.



Sygnał z generatora został wprowadzony na sprzęgacz 20 db. Sygnał z portu sprzężonego był następnie podawany na dzielnik mocy. Jedno z wyjść zostało podłączone bezpośrednio do kanału odbiorczego ADALM-Pluto, podczas gdy drugie jest połączone z regulowanym przesuwnikiem fazy, a dopiero potem trafia do kanału odbiorczego. Sygnał z portu wyjściowego sprzęgacza został wprowadzony na układ z PLL, którego celem jest podział częstotliwości nadawanej. Następnie został podany

na filtr dolnoprzepustowy i dwa tłumiki 10 dB, a następnie do dedykowanego portu ADALM-Pluto przeznaczonego do przyjmowania zewnętrznego sygnału zegarowego. Założenia pomiarów:

- Sygnału nadawany o parametrach: częstotliwość 1GHz i moc 0 dbm,
- Współczynnika podziału PLL równy 25 (częstotliwość sygnału zegarowego równa 40MHz),
- Sygnał wyjściowy PLL w standardzie LVCMOS.

Celem pomiarów była weryfikacja wpływu następujących zmiennych na pomiar:

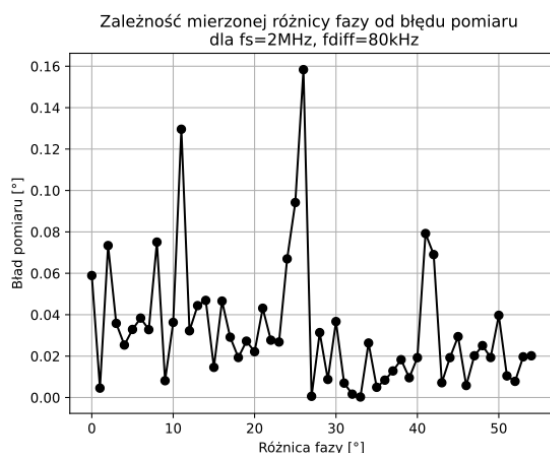
- Różnica częstotliwości pomiędzy sygnałem z lokalnego oscylatora, a sygnałem nadawanym (f_{diff}),
- Częstotliwość próbkowania (f_s),
- Mierzonej wartości różnicy fazy.

W celu zbadania wpływu różnicy częstotliwości między sygnałem z lokalnego oscylatora, a sygnałem nadawanym i częstotliwości próbkowania na błąd pomiaru za pomocą mechanicznego przesuwника fazy różnica fazy pomiędzy sygnałami była zmieniana o 1° , 50 razy.

Różnica częstotliwości między z sygnałem z lokalnego oscylatora, a sygnałem nadawanym	Częstotliwość próbkowania	
	2MHz	6MHz
50MHz	0,043°	0,028°
80MHz	0,029°	0,024°

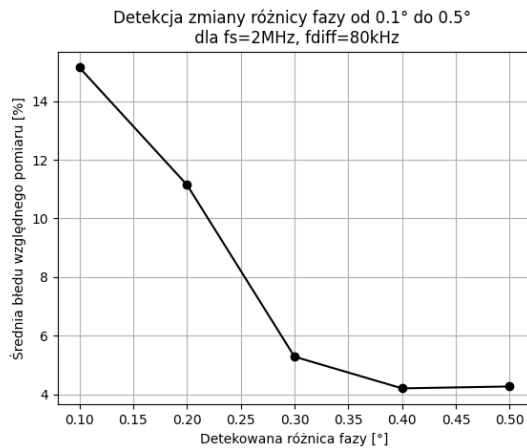
Z pomiarów wynika, że zarówno częstotliwość próbkowania i różnica częstotliwości pomiędzy sygnałem z lokalnego oscylatora, a sygnałem nadawanym nie mają znacznego wpływu na błąd pomiaru.

Następnie zostały przeprowadzone pomiary mające na celu sprawdzenie, czy mierzona wartość różnicy fazy ma wpływ na błąd pomiaru. Wartość różnicy fazy pomiędzy sygnałami była zmieniana w przedziale od 0° do 50° , wyniki zostały przedstawione na rysunku. Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że mierzona



wartość różnicy fazy nie ma wpływu na błąd pomiaru.

Dodatkowo sprawdzono jaka najmniejsza wartość jest możliwa do detekcji, wyniki pomiarów zostały przedstawione na rysunku. W tym celu przeprowadzono pomiary zmieniając wartość przesunięcia fazowego z krokiem od 0.1° do 0.5° 25 razy, wyniki przedstawiono na rysunku.



Podobnie jak na pierwszym stanowisku pomiarowym błąd rośnie wraz ze zmniejszającym się krokiem zmian co jest spowodowane zwiększającym się wpływem średniego błędu pomiaru.

Reasumując, wartości błędów pomiaru są porównywalne na obu stanowiskach pomiarowych, więc zastosowanie generatora i zewnętrznego sygnału zegarowego nie wpłynęło negatywnie na jakość pomiarów. W obu przypadkach średni błąd pomiaru przy optymalnych warunkach pracy wynosi od 0.02° do 0.03° , więc można uznać metodę arctg za wiarygodny sposób pomiaru różnicy fazy.

<https://www.gnuradio.org/about/>

https://wiki.analog.com/resources/tools-software/linux-software/iio_oscilloscope