

Dokumentacja Projektu: obliczanie wartości sygnałów odbieranych przez anteny w szyku fazowym

Kamil Soćko

10 września 2024

1 Teoria

Projekt dotyczy obliczania wartości sygnałów odbieranych przez anteny rozmieszczone w przestrzeni, przy założeniu, że fale elektromagnetyczne padają na nie w określony sposób. W poniższej sekcji przedstawiono teorię stojącą za obliczeniami oraz operacjami realizowanymi przez kod w C++.

1.1 Opis Problemu

W projekcie, za pomocą symulacji komputerowej, obliczamy wartości sygnałów odbieranych przez zestaw anten rozmieszczonych w przestrzeni. Symulacja uwzględnia wpływ fal elektromagnetycznych padających na anteny oraz różne parametry związane z rozmieszczeniem anten i właściwościami fal.

1.2 Instrukcja obsługi kodów

Wystarczy rozpakować folder, do symulacji załączyłem gotową aplikację terminalową, ma ona w sobie intuicyjny interfejs i obsługę, cały kod jest napisany z podstawowymi bibliotekami c++. Następnie po uzyskaniu pliku csv z danymi należy w matlabie uruchomić skrypt analiza.m i ukażą się wyniki

1.3 Opis Parametrów

- **Liczba Anten** (N, M): Liczba anten wzdłuż osi x (N) i osi y (M).
- **Rozstaw Anten** (dx, dy): Odległość między antenami wzdłuż osi x (dx) i osi y (dy).
- **Częstotliwość Próbkowania** (F_{smp}): Częstotliwość próbkowania sygnału.
- **Liczba Próbek** (N_{smp}): Całkowita liczba próbek sygnału.
- **Wektory Falowe** ($Waves$): Informacje o falach elektromagnetycznych, w tym amplituda, wektor falowy oraz częstotliwość.

1.4 Fala Elektromagnetyczna

Fala elektromagnetyczna opisana jest równaniem:

$$\phi(\mathbf{r}, t) = A \cdot \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)$$

gdzie:

- A to amplituda fali,
- \mathbf{k} to wektor falowy, który opisuje kierunek i długość fali,
- \mathbf{r} to wektor pozycji anteny,
- $\omega = 2\pi f$ to częstość kątowna, gdzie f to częstotliwość fali,
- t to czas.

1.5 Konstrukcja Symulacji

1.5.1 Inicjalizacja Pozycji Anten

Anteny są rozmieszczone w przestrzeni zgodnie z dwuwymiarowym układem współrzędnych. Pozycje anten są definiowane jako:

$$\mathbf{r}_{ij} = (j \cdot dx, (N - i - 1) \cdot dy, 0.0)$$

gdzie i i j oznaczają indeksy wzdłuż osi x i y .

1.5.2 Obliczanie Wartości Sygnałów

Dla każdej anteny, wartość sygnału w danym momencie czasowym jest obliczana poprzez zmierzenie wpływu wszystkich fal elektromagnetycznych. Obliczenia wykonywane są w pętli czasowej, gdzie dla każdej próbki czasu obliczana jest wartość sygnału dla wszystkich anten:

$$\text{Sygnał}_{ij}(t) = \sum_{k=0}^K A_k \cdot \cos(\mathbf{k}_k \cdot \mathbf{r}_{ij} - \omega_k t)$$

gdzie:

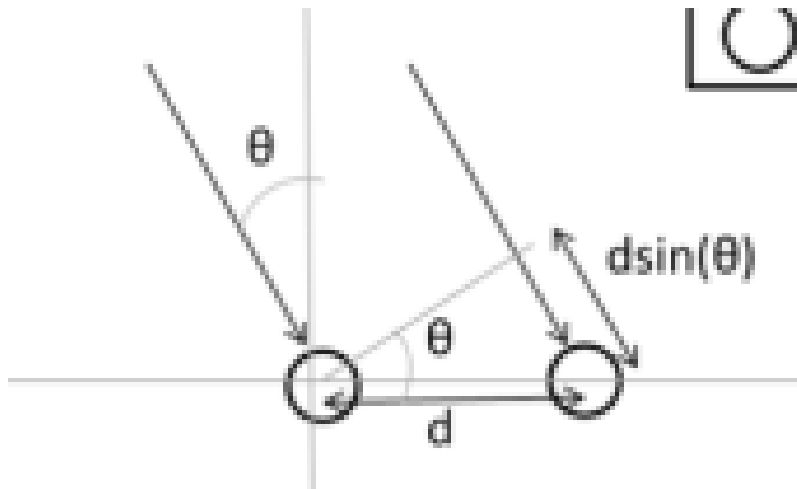
- A_k to amplituda k -tej fali,
- \mathbf{k}_k to wektor falowy k -tej fali,
- ω_k to częstość kątowna k -tej fali,
- \mathbf{r}_{ij} to pozycja anteny i, j ,
- t to aktualny czas.

1.6 Teoria Obliczania Kąta Padania Fal

Obliczanie kąta padania fal elektromagnetycznych wymaga użycia przynajmniej dwóch anten odbiorczych (RX). Poniżej opisano podstawowe zasady tego procesu, wraz z odpowiednimi wzorami.

1.6.1 Model Radarowy z Dwoma Antenami

Założmy, że mamy radar z jedną anteną nadawczą (TX) i dwiema antenami odbiorczymi (RX) umieszczonymi w odległości d od siebie.



Rysunek 1: Model radarowy z dwoma antenami RX.

Sygnał nadawany przez antenę TX jest odbierany przez obie anteny RX. Jeśli obiekt znajduje się pod kątem θ względem radaru, to sygnał odbity od obiektu musi przebyć dodatkową odległość $d \sin(\theta)$, aby dotrzeć do drugiej anteny RX. Ta dodatkowa odległość powoduje różnicę fazową między sygnałami odebranymi przez obie anteny.

1.6.2 Różnica Fazowa

Różnica fazowa $\Delta\phi$ między sygnałami odebranymi przez anteny RX można opisać wzorem:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin(\theta)$$

gdzie:

- λ to długość fali,
- d to odległość między antenami RX,
- θ to kąt padania.

1.6.3 Obliczanie Kąta Padania

Aby obliczyć kąt padania θ , należy przekształcić różnicę fazową $\Delta\phi$ na kąt. Można to zrobić, przekształcając wzór na $\Delta\phi$:

$$\sin(\theta) = \frac{\Delta\phi \cdot \lambda}{2\pi d}$$
$$\theta = \arcsin\left(\frac{\Delta\phi \cdot \lambda}{2\pi d}\right)$$

1.6.4 Zakres Niejednoznaczności

Różnica fazowa $\Delta\phi$ może być jednoznacznie estymowana tylko w zakresie $(-\pi, \pi)$. Dlatego dla zapewnienia jednoznaczności obliczeń kąt padania θ musi mieścić się w określonym zakresie:

$$|\Delta\phi| < \pi$$

A zatem maksymalny kąt padania θ_{max} można obliczyć przy użyciu:

$$\theta_{max} = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2d}\right)$$

Dla optymalnego rozdzielczości kąta, odległość między antenami RX powinna wynosić $\frac{\lambda}{2}$.

1.6.5 Radar MIMO z Wieloma Antenami

W radarach MIMO z więcej niż dwoma antenami RX, różnice fazowe są mierzone między kolejnymi antenami. W takich systemach, sygnał odebrany przez każdą antenę ma dodatkową fazę o wartości ω w porównaniu do poprzedniej anteny.

Ostatecznie, różnice fazowe między antenami są analizowane za pomocą szybkiej transformacji Fouriera (FFT), co pozwala na dokładne estymowanie kąta padania θ . Zwiększając liczbę anten RX, poprawia się dokładność estymacji kąta oraz rozdzielczość kątowa.

1.7 Wzory i Rozdzielczość Kątowa

Dla macierzy radarowych z N równomiernie rozmieszczonymi antenami (oddzielonymi o $\lambda/2$), rozdzielczość kąta jest opisana wzorem:

$$\text{Rozdzielczość kąta} = \frac{\lambda}{N \cdot d}$$

gdzie N to liczba anten RX.

2 Podsumowanie Kodów do symulacji

2.1 Plik `symulacje.cpp`

Plik `symulacje.cpp` jest odpowiedzialny za przeprowadzanie symulacji fal elektromagnetycznych. Wykonuje następujące operacje:

- Inicjalizuje parametry symulacji, takie jak liczba próbek, rozmiar siatki, częstotliwość próbkowania itp.
- Tworzy i konfiguruje obiekty klasy `Wave`, które reprezentują różne fale elektromagnetyczne.
- Oblicza wartości sygnału w różnych punktach przestrzennych na podstawie zadanych fal.
- Zapisuje szczegóły symulacji oraz wyniki do plików w odpowiednich formatach.

2.2 Plik `funkc.h`

Plik `funkc.h` zawiera funkcje pomocnicze używane w różnych częściach kodu. Obejmuje:

- Funkcje do odczytu wartości i sprawdzania typu danych.
- Funkcje do formatowania łańcuchów znaków i konwersji wektorów na różne formaty.
- Funkcje do inicjalizacji i czyszczenia tablic.

2.3 Plik `Wave.h`

Plik `Wave.h` definiuje klasę `Wave` do reprezentacji fal elektromagnetycznych. Klasa ta:

- Przechowuje amplitudę, wektor falowy i częstotliwość kątową fal.
- Umożliwia obliczanie rzeczywistej, urojonej i bezwzględnej wartości fali w zadanych punktach przestrzennych i czasowych.
- Oferuje metody do ustawiania parametrów fal, odczytywania danych od użytkownika oraz generowania reprezentacji tekstowych i JSON.
- Zawiera funkcję `correctk()`, która dostosowuje wektor falowy do prędkości światła.

2.4 Plik `Waves.h`

Plik `Waves.h` zawiera funkcje do zarządzania kolekcją obiektów klasy `Wave`. Wśród funkcji znajdują się:

- `print()` i `print_json()` - formatują dane fal w łańcuchach znaków i JSON.
- `details_to_file()` - zapisuje szczegóły symulacji do pliku.
- `details_string()` - generuje szczegółowy raport w formie łańcucha znaków.
- `measure_signal()` - oblicza wartości sygnału na podstawie zadanych fal.
- `read_waves()` - umożliwia interaktywne wprowadzanie i edytowanie fal przez użytkownika.

3 Podsumowanie Kodów MATLAB

3.1 Kod Główny

Kod MATLAB realizuje następujące kroki:

1. Wczytywanie danych:

- Wczytanie sygnałów i szczegółów symulacji z plików.
- Wczytanie kątów symulowanych.

2. Analiza sygnałów:

- Wykonanie transformacji Fouriera na próbkach sygnałów.
- Oddzielenie sygnałów według częstotliwości.
- Obliczenie różnic fazowych oraz kątów padania dla każdej częstotliwości.
- Porównanie obliczonych kątów z wartościami symulowanymi.

3.2 Funkcje w Pliku `funkc.m`

Plik `funkc.m` definiuje następujące metody:

- **read_signal:** Wczytuje sygnały i czasy z pliku CSV.
- **read_details:** Wczytuje szczegóły symulacji z pliku JSON.
- **fourier:** Wykonuje transformację Fouriera, oblicza amplitudę i fazę oraz opcjonalnie wyświetla wykresy.
- **find_peaks:** Znajduje maksima amplitud w widmie i odpowiadające im indeksy.
- **signals_separate:** Oddziela sygnały według częstotliwości.
- **read_angles:** Wczytuje i oblicza kąty z danych symulacji.
- **find_max_peak:** Znajduje największe maksimum w amplitudzie.
- **calc_theta:** Oblicza kąt padania na podstawie fazy sygnałów.
- **calc_theta_vectors:** Oblicza kąt między dwoma wektorami.
- **vec_len:** Oblicza długość wektora.
- **calculate_phase_difference:** Oblicza różnicę fazową między dwoma sygnałami i kąt padania na jej podstawie.

4 Podsumowanie

Kod realizuje obliczenia dla wartości sygnałów odbieranych przez anteny, uwzględniając wpływ fal elektromagnetycznych i ich parametrów. Umożliwia to symulację i analizę wpływu różnych parametrów fal i rozmieszczenia anten na odbierane sygnały.

5 Literatura

1. teoria radarów MIMO <https://www.ti.com/lit/an/swra554a/swra554a.pdf>
2. film instruktażowy <https://www.youtube.com/watch?v=GpXF4wVQ-L4>
3. <https://www.mwrf.com/technologies/embedded/systems/article/21849496/algorithms-to-antenna-increasing-angular-reso>
4. https://en.wikipedia.org/wiki/Phased_array