

Kierunek: **Informatyka algorytmiczna (INA)**

**PRACA DYPLOMOWA**  
**MAGISTERSKA**

**Mechanizm multilateracji w  
rozproszonej sieci sensorów audio**

**Multilateration mechanism in  
distributed net of audio sensors**

Gabriel Budziński

Opiekun pracy  
**dr inż. Przemysław Błaśkiewicz**

Słowa kluczowe: multilateracja, sensory audio, synchronizacja czasu

---

## Streszczenie

Problem pozycjonowania w przestrzeni na podstawie emitowanego dźwięku obiektu pozycjonowanego wiąże się z wykorzystaniem możliwie zsynchronizowanych w czasie węzłów (mikrofonów) i pomiarze różnic czasu odbioru dźwięku przez czujniki. W pracy zostanie zbudowana sieć (co najmniej 4 sztuki) sensorów audio połączonych bezprzewodowo między sobą i ze stacją główną. Zadaniem sieci będzie wskazanie lokalizacji w przestrzeni punkowego przedmiotu emitującego dźwięk. Oprócz wyboru i implementacji algorytmu multilateracji zaproponowane zostanie rozwiązanie problemu synchronizacji czasu między sensorami, minimalizacji opóźnień w komunikacji oraz kalibracji systemu.

**Słowa kluczowe:** multilateracja, sensory audio, synchronizacja czasu

## Abstract

The problem of positioning in space based on the emitted sound of the positioned object involves the use of as closely synchronized nodes (microphones) as possible in time and measuring the differences in the time of sound reception by sensors. In the work, a network (of at least 4 units) of audio sensors connected wirelessly to each other and to the main station will be built. The network's task will be to indicate the location in space of a point-like object emitting sound. In addition to selecting and implementing the multilateration algorithm, a solution to the problem of time synchronization between sensors, minimizing communication delay, and system calibration will be proposed.

**Keywords:** multilateration, WASN, clock synchronization

# Spis treści

<b>1. Przedstawienie problemu</b>	<b>8</b>
1.1. State of the art	9
<b>2. Sprzęt systemowy</b>	<b>10</b>
2.1. Serwer MQTT	10
2.2. Węzeł	11
2.3. Serwer obliczeniowy	11
<b>3. Eksperyment zerowy</b>	<b>12</b>
3.1. Opis działania	12
3.1.1. Program węzła	12
3.1.2. Program serwera	12
3.1.3. Opis algorytmu	12
3.2. Ewaluacja działania systemu	12
3.3. Interpretacja wyników i wnioski	12
<b>4. Synchronizacja czasu</b>	<b>13</b>
4.1. Synchronizacja programowa	13
4.1.1. Algorytm synchronizacji NTP	13
4.1.2. Pomiar różnic zegarów	13
4.2. Synchronizacja sprzętowa	13
4.2.1. Synchronizacja z użyciem mikrofonów	13
<b>5. Metody multilateracji</b>	<b>14</b>
5.1. Omówienie zastosowanych metod	14
5.1.1. Układ równań liniowych	14
5.1.2. Liniowa metoda najmniejszej sumy kwadratów	14
5.1.3. Nieliniowa metoda najmniejszej sumy kwadratów	14
5.1.4. Rozkład według wartości osobliwych (SVD)	14
5.2. Wyniki	14
5.2.1. Interpretacja	14
5.2.2. Wnioski	14
<b>6. Podsumowanie</b>	<b>15</b>
<b>Literatura</b>	<b>16</b>

# Spis rysunków

1.1. Egzemplarz problemu multilateracji . . . . .	8
2.1. Topologia systemu . . . . .	10

**Spis tabel**

# Spis listingów

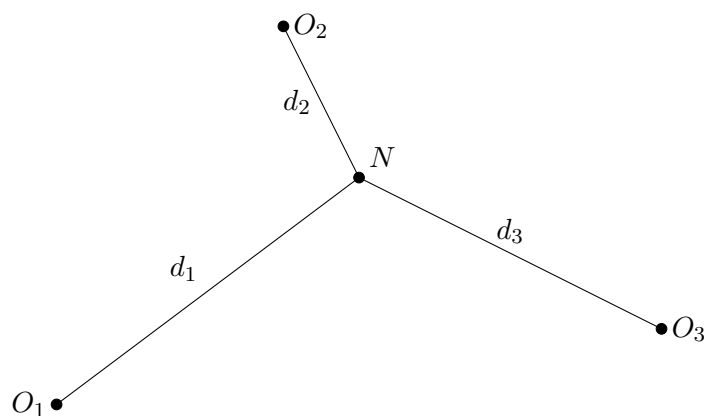
# Skróty

**WASN** (ang. *Wireless Audio Sensor Networks*)

# Rozdział 1

## Przedstawienie problemu

Multilateracja jest techniką lokalizacji pozwalającą obliczyć nieznane koordynaty punktu na podstawie odległości od innych, znanych punktów. Weźmy dwuwymiarowy egzemplarz naszego problemu (Rys. 1.1), gdzie  $N$  - nadajnik,  $O_i$  - odbiorniki,  $d_i$  - odległości



Rys. 1.1: Egzemplarz problemu multilateracji

Znalezienie koordynatów  $(x, y)$  punktu  $N$  jest równoważne z rozwiązaniem układu równań,

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = d_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = d_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = d_3^2 \end{cases} \quad (1.1)$$

który może zostać przekształcony do postaci

$$\begin{cases} (x^2 + y^2) - 2x_1x - 2y_1y = d_1^2 - x_1^2 - y_1^2 \\ (x^2 + y^2) - 2x_2x - 2y_2y = d_2^2 - x_2^2 - y_2^2 \\ (x^2 + y^2) - 2x_3x - 2y_3y = d_3^2 - x_3^2 - y_3^2 \end{cases} \quad (1.2)$$

lub w reprezentacji macierzowej,

$$\begin{bmatrix} 1 & -2x_1 & -2y_1 \\ 1 & -2x_2 & -2y_2 \\ 1 & -2x_3 & -2y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^2 + y^2 \\ x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1^2 - x_1^2 - y_1^2 \\ d_2^2 - x_2^2 - y_2^2 \\ d_3^2 - x_3^2 - y_3^2 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

którą można przedstawić jako

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (1.4)$$



Uogólniona forma równania macierzowego problemu multilateracji dla przestrzeni  $n$ -wymiarowej i  $m$  odbiorników:

$$\begin{bmatrix} 1 & -2\mathbf{x}^{(1)} \\ 1 & -2\mathbf{x}^{(2)} \\ \vdots & \vdots \\ 1 & -2\mathbf{x}^{(m)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1^2 - \sum_{i=1}^n x_i^{(1)2} \\ d_2^2 - \sum_{i=1}^n x_i^{(2)2} \\ \vdots \\ d_m^2 - \sum_{i=1}^n x_i^{(m)2} \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

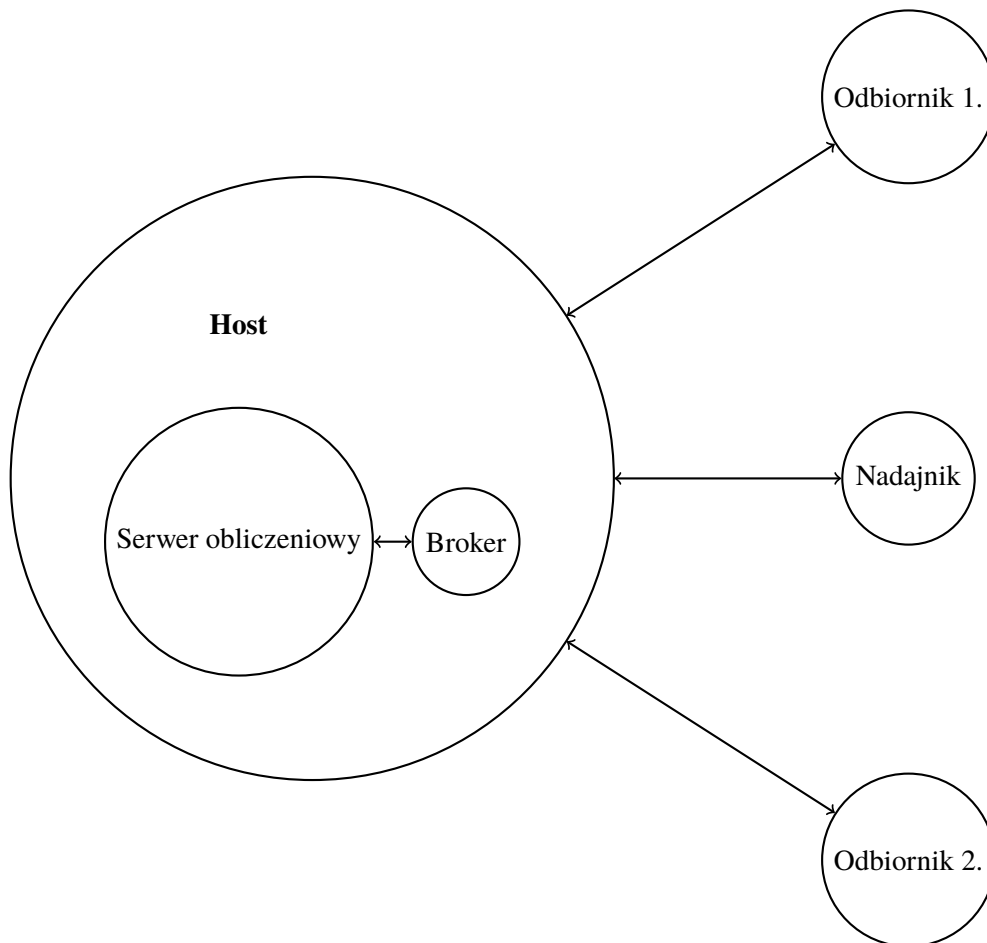
## 1.1. State of the art

Napisać coś o [1],[2]

## Rozdział 2

# Sprzęt systemowy

Znaczna większość prac adresujących temat multilateracji opiera się na systemach urządzeń działających w zakresie fal elektromagnetycznych ([1],[2],[3]). W tej pracy poświęcimy uwagę systemowi działającemu w domenie dźwięku, jak ten aspekt wpływa na skuteczność i dokładność rozwiązania problemu multilateracji.



Rys. 2.1: Topologia systemu

### 2.1. Serwer MQTT

Urządzenia systemowe porozumiewają się przy użyciu protokołu MQTT, każdy z węzłów oraz serwer łączą się z centralnym brokerem (?), który przekierowuje wiadomości do klientów, które zasubskrybowały dany temat.

## 2.2. Węzeł

Każdy z węzłów oparty jest o mikrokontroler ESP8266 zaprogramowany przy użyciu Arduino IDE. W systemie występują dwa rodzaje węzłów:

- nadajnik,
- odbiornik.

Nadajnik jest wyposażony jest w przełącznik cewkowy sterowany przez mikrokontroler, który służy do kontrolowania brzęczyka zasilanego napięciem  $12V$ . Wybrano brzęczyk o głośności  $90dB$  w celu zmaksymalizowania zasięgu działania systemu.

Odbiornik natomiast wyposażony jest w mikrofon elektretowy dającego binarny sygnał wyjściowy. Czułość mikrofonu dostrajana jest ręcznie poprzez potencjometr.

## 2.3. Serwer obliczeniowy

Centralnym urządzeniem systemu jest serwer obliczeniowy kumulujący dane otrzymane z sensorów do rozwiązania problemu multilateracji. Serwer hostowany jest na tej samej maszynie co broker MQTT.

## Rozdział 3

# Eksperyment zerowy

Po przygotowaniu komponentów systemu wstępnie zaimplementowano program rozwiązujący problem multilateracji, aby zbadać, czy problem nie jest zbyt trywialny, aby opisać go w pracy, lub przeciwnym razie, na podstawie wyników eksperymentu zastanowić się jakie przeszkody stoją na drodze do rozwiązania o zadowalającej precyzji.

### 3.1. Opis działania

Program zaimplementowano na podstawie rozwiązania aproksymacyjnego równania 1.4 postaci

$$\hat{\mathbf{x}} = \left( \mathbf{A}^T \mathbf{A} \right)^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (3.1)$$

zaczepniętego z artykułu [2].

#### 3.1.1. Program węzła

---

**Algorithm 1** Program nadajnika

---

```
1: buzz  $\leftarrow$  False
2: buzzTime  $\leftarrow$  0
3: lastBuzzTime  $\leftarrow$  0
4: if beep && micros() – lastBuzzTime > 500000 then
5:   buzzTime  $\leftarrow$  micros()
6:   publish(buzzTime)
7:   lastBuzzTime  $\leftarrow$  buzzTime
8:   buzzer()
9: end if
```

---

#### 3.1.2. Program serwera

#### 3.1.3. Opis algorytmu

### 3.2. Ewaluacja działania systemu

### 3.3. Interpretacja wyników i wnioski

## **Rozdział 4**

# **Synchronizacja czasu**

### **4.1. Synchronizacja programowa**

#### **4.1.1. Algorytm synchronizacji NTP**

#### **4.1.2. Pomiar różnic zegarów**

### **4.2. Synchronizacja sprzętowa**

#### **4.2.1. Synchronizacja z użyciem mikrofonów**

## **Rozdział 5**

# **Metody multilateracji**

### **5.1. Omówienie zastosowanych metod**

#### **5.1.1. Układ równań liniowych**

#### **5.1.2. Liniowa metoda najmniejszej sumy kwadratów**

#### **5.1.3. Nieliniowa metoda najmniejszej sumy kwadratów**

#### **5.1.4. Rozkład według wartości osobliwych (SVD)**

### **5.2. Wyniki**

#### **5.2.1. Interpretacja**

#### **5.2.2. Wnioski**

## **Rozdział 6**

# **Podsumowanie**

# Literatura

- [1] W. Hereman, "Determination of a position in three dimensions using trilateration and approximate distances," *Colorado School of Mines*, 1995.
- [2] A. Norrdine, "An algebraic solution to the multilateration problem," in *Proceedings of the 15th international conference on indoor positioning and indoor navigation, Sydney, Australia*, vol. 1315, 2012.
- [3] S. Wiszniewski, O. Błaszkiwicz, A. Olejniczak, J. Sadowski, and J. Stefański, "Implementation of the innovative radiolocalization system vcs-mlat (voice communication system – multilateration)," in *2020 Baltic URSI Symposium (URSI)*, pp. 95–99, 2020.