

# Дослідження методів підвищення ефективності визначення просторового положення мобільного об'єкту.

## ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	2
ВСТУП .....	3
1 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ .....	6
1.1 Опис проблеми.....	6
1.2 Принцип трилатерації. ....	7
1.3 Обмеження методів трилатерації. ....	9
1.4 Методи оцінки відстані. ....	11
1.5 Модель втрати шляху.....	12
1.6 Моделювання загасання.....	13
1.7 Геометричне розмивання точності (GDOP).....	15
Висновки до розділу. ....	18
2 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ І АЛГОРИТМІВ ЛОКАЛІЗАЦІЇ. ....	19
2.1 Постановка задачі. ....	19
2.2 Алгоритм периметра .....	20
2.3 Алгоритм площі. ....	24
2.4 Алгоритм потужності кутового сигналу .....	26
2.5 Алгоритм потужності сигналу (SS). ....	28
2.6 Алгоритм щільності.....	29
2.7 Рівносторонній алгоритм .....	33
Висновки до розділу. ....	35
3 МОДЕЛЮВАННЯ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА .....	36
3.1 Математична модель процесу трилатерації. ....	36
3.2 Умови експерименту. ....	38
3.3 Результати експерименту.....	40
Висновки до розділу. ....	41
ВИСНОВОК .....	43
REFERENCES.....	44
ДОДАТОК 1. ....	46
ДОДАТОК 2. ....	54

## СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БПЛА - безпілотний літальний апарат

GDOP – geometrical dilution of precision (геометричне розведення точності)

HDOP – horizontal dilution of precision (горизонтальне розведення точності)

VDOP – vertical dilution of precision (вертикальне розведення точності)

PDOP – time dilution of precision (час розведення точності)

ADOP – angle dilution of precision (кутове розведення точності)

GPS – global positioning system (глобальна система позиціонування)

LOS – line of sight (пряма видимість)

OASIS – optimum anchor selection algorithms (оптимальні алгоритми вибору якоря)

ToA – time of arrival (час прибуття)

RSS – received signal strength (потужність отриманого сигналу)

SS – signal strength (потужність сигналу)

## ВСТУП

Бездротові технології стають все більш важливими для потоку інформації. Технології IEEE 802.11, 802.15 почали швидко поширюватися, що дозволяє споживачам створювати власні бездротові мережі [1].

Найвідомішою формою застосування є навігація, керована системою глобального позиціонування (GPS). Сьогодні GPS-навігаційний пристрій доступний кожному за низькою ціною. Ці пристрої, як правило, встановлюються в автомобілях, щоб показувати місцезнаходження та маршрут руху водієві. Останнім часом практично усі сучасні моделі мобільних телефонів та смартфонів оснащуються GPS-приймачем.

Для ефективної роботи GPS потрібна пряма видимість (LOS) для супутників GPS, щоб отримати точні позиції. GPS не працює належним чином у багатьох ситуаціях, наприклад, у міських районах, у приміщенні чи під землею. Якщо в одному з цих ситуацій потрібна послуга, що базується на розташуванні, слід враховувати інші технології. Залежно від того, які вимоги до системи існують, можна запропонувати багато різних рішень. Прикладами цього можуть бути підлоги, чутливі до тиску, для спостереження, в яких кімнатах перебувають люди, або ультразвукові приймачі, що виявляють звукові хвилі від випромінювачів, які несуть люди.

Найбільш поширеним вибором технології є бездротові радіочастотні сигнали короткого діапазону, які використовуються в Bluetooth або WLAN IEEE 802.11. Це пов'язано з величезним проникненням на ринок цих технологій. Сьогодні більшість мобільних телефонів, ноутбуків та інших персональних пристроїв підтримують дані технології, тому програми, що використовують радіочастотні сигнали знаходять широкий попит на ринку та можуть бути легко реалізовані за низькою вартістю.

Широке поширення технології Wi-Fi дозволяє використовувати її для визначення координат об'єктів в аварійних ситуаціях. Під час ліквідації наслідків катастроф рятувальним службам потрібно швидко знати місця знаходження людей. Оскільки майже у кожної людини є мобільний телефон з

Wi-Fi, можливо визначити її положення. Рятувальні служби можуть скористатися безпілотним літальним апаратом (БПЛА), який оснащений GPS-приймачем та Wi-Fi радіо. БПЛА пролітає над територією та реєструє виявлені пристрої. БПЛА з коротким інтервалом записує своє поточне положення та потужність сигналу на пристрій Wi-Fi, і надсилає ці дані на сервер. За цією інформацією можна визначити координати телефону за допомогою Wi-Fi за методом трилатерації.

Позиціонування мобільних об'єктів за допомогою Wi-Fi можна використовувати у випадку, коли система GPS неефективна, наприклад, у приміщенні. Мобільний об'єкт (робот-прибиральник, робот-гід, робот-транспорт) може визначати своє положення у великому приміщенні (торгівельному центрі, промисловому ангарі, складі), в якому є точки доступу Wi-Fi. Проблема виникає в тому випадку, коли таких точок багато.

Метод трилатерації дозволяє, знаючи відстань від початкової точки до 3 маяків, і знаючи координати маяків, обчислювати координати вихідної точки. Потрібно лише 3 маяки, а БПЛА, або мобільний робот роблять набагато більше вимірювань. Різні комбінації потрібних маяків дадуть різне розташування результатів. Таким чином, потрібен певний алгоритм, який би вибрав найкращу комбінацію з 3-х якорів для трилатерації.

**Об'єкт дослідження** - процес визначення місця положення (локалізації) мобільного об'єкту.

**Предмет дослідження** – метод вибору якорів для трилатерації.

**Мета дослідження** – підвищення ефективності системи визначення положення мобільного об'єкта шляхом скорочення часу обчислення та зменшення помилки локалізації.

**Завдання дослідження :**

Огляд відомих методів зменшення помилки локалізації.

Вибір інформаційних параметрів для оцінки відстані.

Дослідження впливу обмеженої кількості маяків для вирішення проблеми локалізації з мінімальною похибкою.

Експериментальне дослідження реалізації алгоритмів вирішення проблеми локалізації.

**Наукова новизна (інноваційність)** полягає у розвитку існуючих методів оцінки просторового положення мобільного об'єкта шляхом поєднання критеріїв пошуку якорів та спрощення обчислень.

**Практична цінність** полягає у можливості використання запропонованих алгоритмів у існуючих системах локалізації мобільних об'єктів на основі Wi-Fi трилатерації.

**Публікації.** За результатами досліджень підготовлена наукова стаття для публікації у науковому фаховому виданні (Додаток 1).

# 1 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

## 1.1 Опис проблеми

Взагалі, процес визначення позиції мобільного об'єкту, який може вимірювати параметри сигналу від стаціонарних маяків (якорів) складається з наступних основних етапів (рис.1.1):

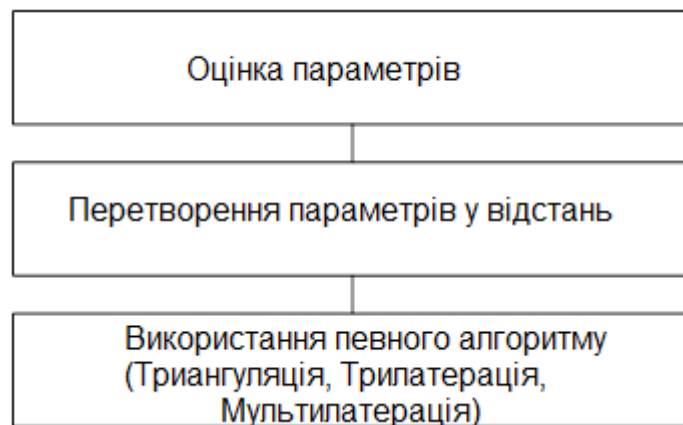


Рисунок 1.1 – Процес локалізації.

Після того, як мінімум три стаціонарні вимірювачі з різними координатами (якорі) отримують відстань до необхідного об'єкта, можливо використовувати алгоритм локалізації, щоб знайти його положення (координати) (рис. 1.2).

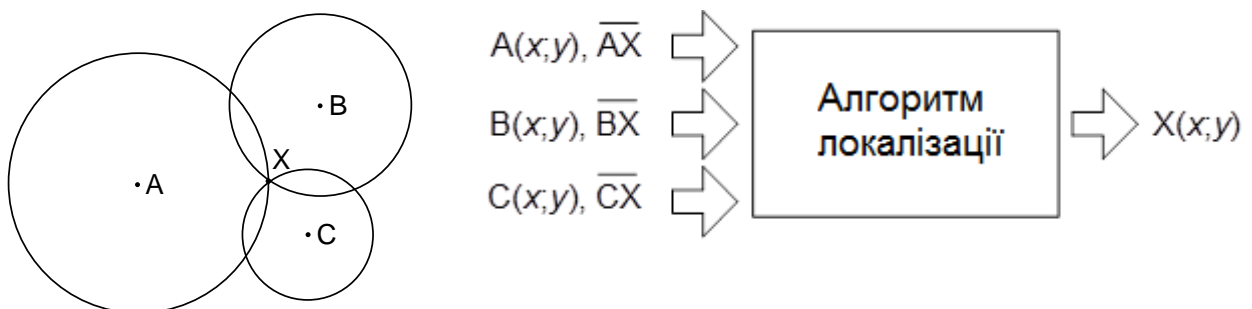


Рисунок 1.2 – Визначення координат об'єкта за допомогою 3-х якорів з відомими координатами.

В ситуації, коли існує більш ніж трьох якорів існує проблема вибору найкращого їх набору для більш точного обчислення місця положення об'єкту (рис. 1.3).

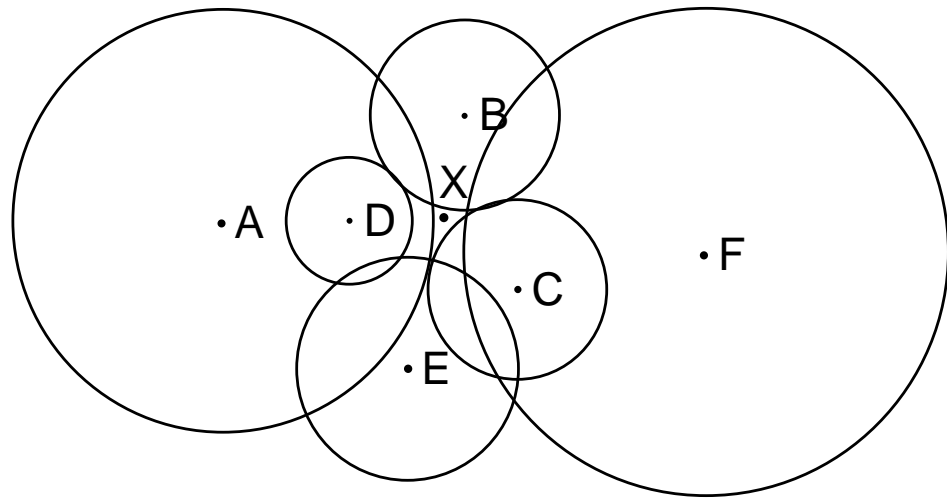


Рисунок 1.3 – Типова ситуація локалізації.

X – реальна позиція об'єкту. A, B, C, D, E, F – якорі.

Кожна комбінація якорів дає різний результат. Для досягнення найкращого результату потрібні критерії та алгоритм вибору якорів [2].

## 1.2 Принцип трилатерації.

Використання трилатерації, дає можливість обчислити невідоме положення об'єкта, використовуючи інформацію трьох відомих вимірювань (три координати та відстані) [3,4]. Метод, що використовується в трилатерації дозволяє за допомогою трьох відомих вимірювань отримати оцінку невідомого розташування (координати) об'єкту (рис. 1.4).

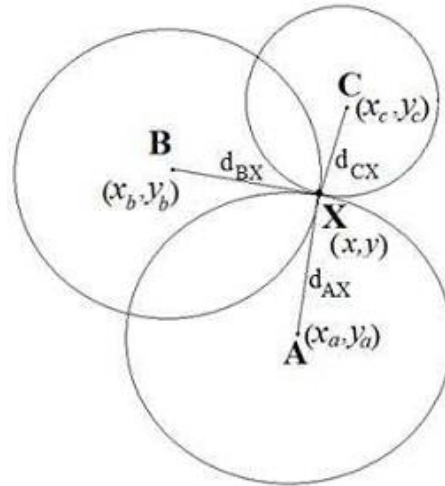


Рисунок 1.4 – Принцип трилатерації.

Координати точок A, B, C відомі, тобто:  $A(x_a; y_a)$ ,  $B(x_b; y_b)$  and  $C(x_c; y_c)$ . Координати точки  $X(x; y)$  невідомі. Відстань від точок A, B, C до точки X виміряні і відомі. Визначимо відстань між A та X як  $d_{AX}$ , між B та X як  $d_{BX}$  та між C та X як  $d_{CX}$ .

Відстань між X та точками A, B, C може бути обчислена за формулою Евкліда,

$$(x - x_a)^2 + (y - y_a)^2 = (d_{AX})^2 \quad (1.1)$$

$$(x - x_b)^2 + (y - y_b)^2 = (d_{BX})^2 \quad (1.2)$$

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = (d_{CX})^2 \quad (1.3)$$

Вирази (1.1), (1.2) і (1.3) відповідають трьом колам (рис. 1.5). Точка X знаходиться на перетині цих кіл.

Таким чином, для двовимірного простору, якщо відомі відстані від трьох точок відомого положення до точки з невідомим положенням; тоді точку з невідомим місцем розташування можна визначити однозначно.



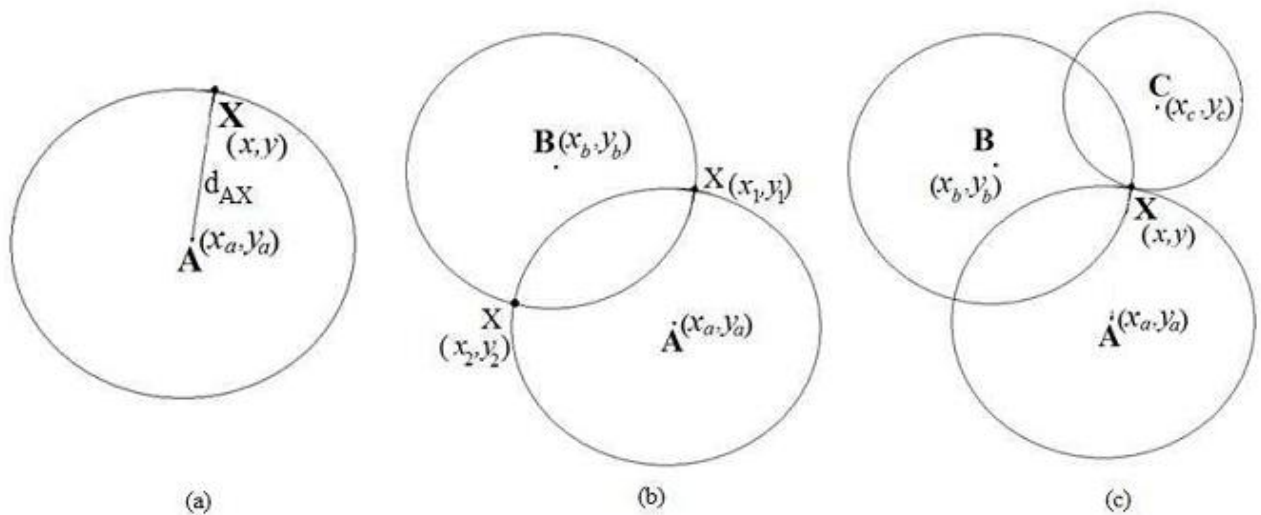


Рисунок 1.5 – Процес локалізації у двовимірному просторі з використанням алгоритму трилатерації.

а) одне коло; б) два кола; с) три кола.

### 1.3 Обмеження методів трилатерації.

Хоча трилатерація призводить до фактичної локалізації даної точки, двома факторами, що сприяють точності остаточної локалізації, є: геометричне розташування точок та точність виміру відстані.

Для того, щоб локалізувати точку за допомогою методу трилатерації, точка перетину трьох різних кіл розглядається як фактичне розташування точки. Але слід зазначити, що три точки не повинні бути колінеарними, інакше перетин трьох кіл спостерігається у двох можливих точках (рис. 1.6).

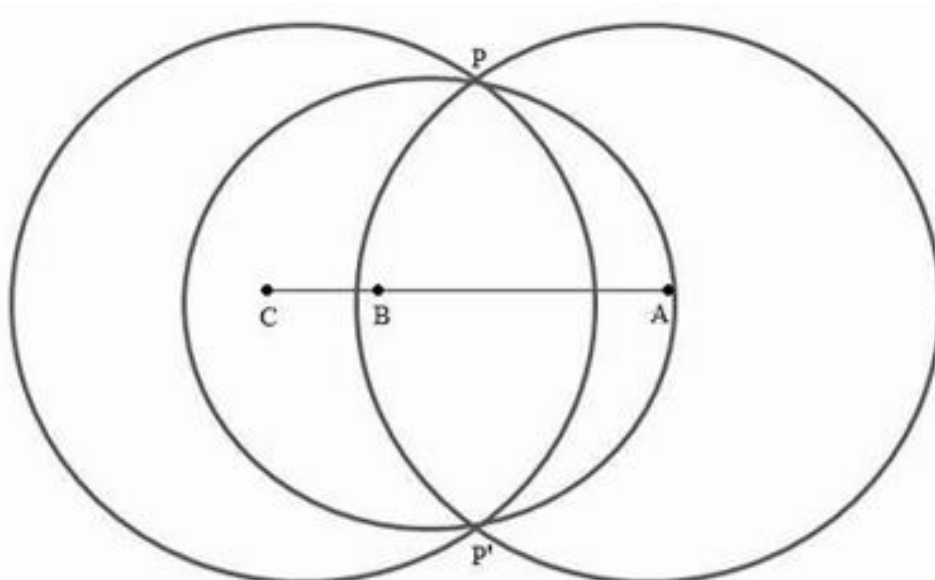


Рисунок 1.6 - Неоднозначність локалізації точки  $P$   
у випадку колінеарності точок  $A, B, C$ .

Якщо, наприклад, точка  $B$  переміститься від прямої  $AC$  на відстань  $d$ , відповідне коло з центром  $B$  переміститься від точки  $P'$  на відстань  $D$ , що дорівнює  $2d$  (рис.1.7).

Метод трилатерації призводить до фактичної локалізації точок, лише якщо отримані вимірювання відстані є точними. Але в реальних додатках точних вимірювань відстані ніколи не можна отримати, оскільки жоден далекомір не є досконалим і має деякі неточності та невизначеність через властивий шум. Через цю проблему локалізація точок є неточною, і остаточний результат, отриманий внаслідок такої локалізації, суттєво відрізняється від фактичного положення об'єкта [5].

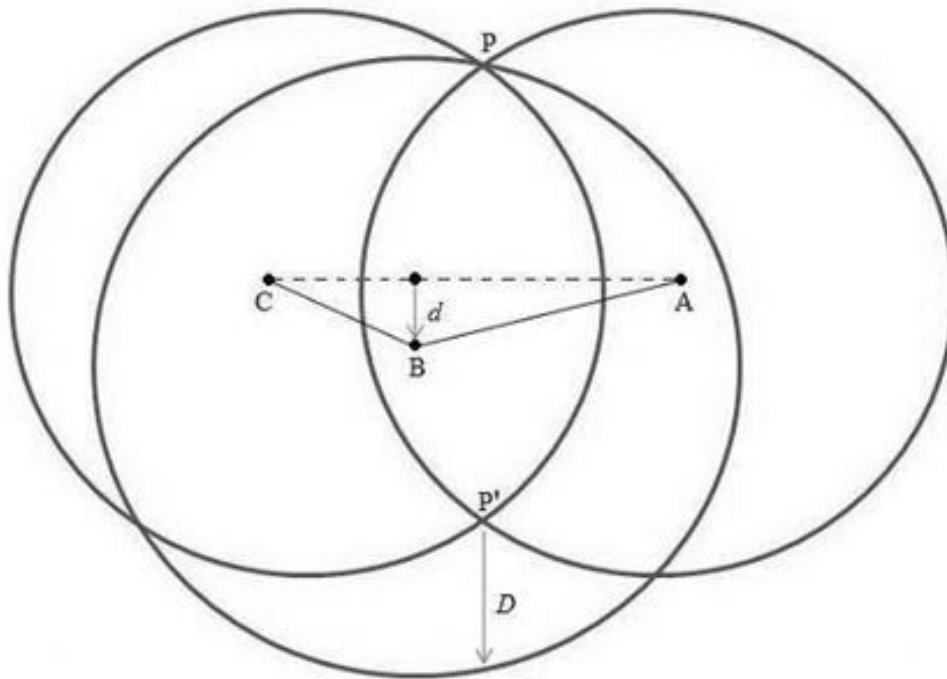


Рисунок 1.7 - Однозначна локалізація точки P за трьома неколінарними точкам A, B, C.

#### 1.4 Методи оцінки відстані.

Для використання трилатерації потрібно визначити відстані від якорів до об'єкту. Існує кілька методів, які можуть забезпечити вимір відстані між трансиверами Wi-Fi.

##### 1.4.1 Time of Arrival (TOA)

Для вимірювання відстані між передавачем та рухомих об'єктом може бути використаний метод ToA [6]. Сигнал передавача містить часову мітку, що вказує момент передачі сигналу. Приймач отримує іншу мітку часу миттєво при отриманні сигналу від передавача. Враховуючи, що передавач і приймач синхронізовані за часом, і обидві позначки часу відомі, можна розрахувати час руху сигналу між передавачем і приймачем. Це також відомо як затримка поширення сигналу. Припускаючи, що швидкість радіосигналу є швидкістю світла у вакуумі, відстань можна отримати як:

$$d = c \cdot t \quad (1.4),$$

де:  $c$  – швидкість світла;  $t$  – час розповсюдження сигналу.

Недоліком методу є те, що годинник передавача повинен бути синхронізований з годинником приймача. Синхронізація може бути дуже складною і дорогою в розгортанні. Також можуть знадобитися атомні годинники, щоб мінімізувати відхилення годинника в системі. Це виявляється практично неможливим, коли одним із двох пристроїв у системі є мобільний телефон або подібний недорогий пристрій Wi-Fi .

#### 1.4.2 Received Signal Strength (RSS)

RSS вимірює потужність сигналу на приймачі, і на основі відомої потужності передачі можна розрахувати ефективні втрати на поширення [7]. Далі, використовуючи теоретичні та емпіричні моделі, цю втрату можна перевести в оцінку відстані. Цей метод застосовувався переважно для радіочастотних сигналів. RSS є відносно дешевим рішенням без зайвих пристроїв, оскільки всі пристрої Wi-Fi можуть вимірювати RSS. Основною проблемою використання RSS як параметра оцінки відстані є модель втрати шляху [8].

#### 1.5 Модель втрати шляху.

Для того, щоб знайти відстань, потрібна модель втрати шляху зі спеціальними коефіцієнтами. У цій моделі отримана потужність на відстані  $d$  від передавача ( $Pr(d)$ ) визначається, як:

$$Pr(d) = \overline{Pr}(d) + X_{\sigma} \quad (1.5)$$

$$Pr(d) = Pr_0 - 10\alpha \log(d) + X_{\sigma} \quad (1.6),$$

де:  $Pr_0$  – потужність сигналу на відстані 1 метр від передавача;  $\alpha$  – показник втрати шляху;  $X_\sigma$  – випадкову величину з розподілення Гауса з нульовим середнім значенням та стандартним відхиленням  $\sigma$ .

У наведеному вище рівнянні,  $Pr(d)$  представляє середню (очікувану) потужність вимірювачів потужності на відстані  $d$  від передавача, тоді, як  $\overline{Pr}(d)$  позначає випадковий результат. Ця модель враховує різні перешкоди, що існують у безлічі шляхів передавача-приймача з однаковим розділенням, це явище називають нормальним логарифмічним затіненням.

Параметри  $(\alpha; \sigma)$  визначають статистичну модель і розглядаються як сильно залежні від навколишнього середовища. При практичних вимірюваннях використовують емпіричні значення  $\alpha$  в діапазоні від 1,8 (слабо перешкоджене середовище з коридорами) до 5 (багатоповерхові будівлі), тоді як значення  $\sigma$ , як правило, потрапляють в інтервал від 4 до 12.

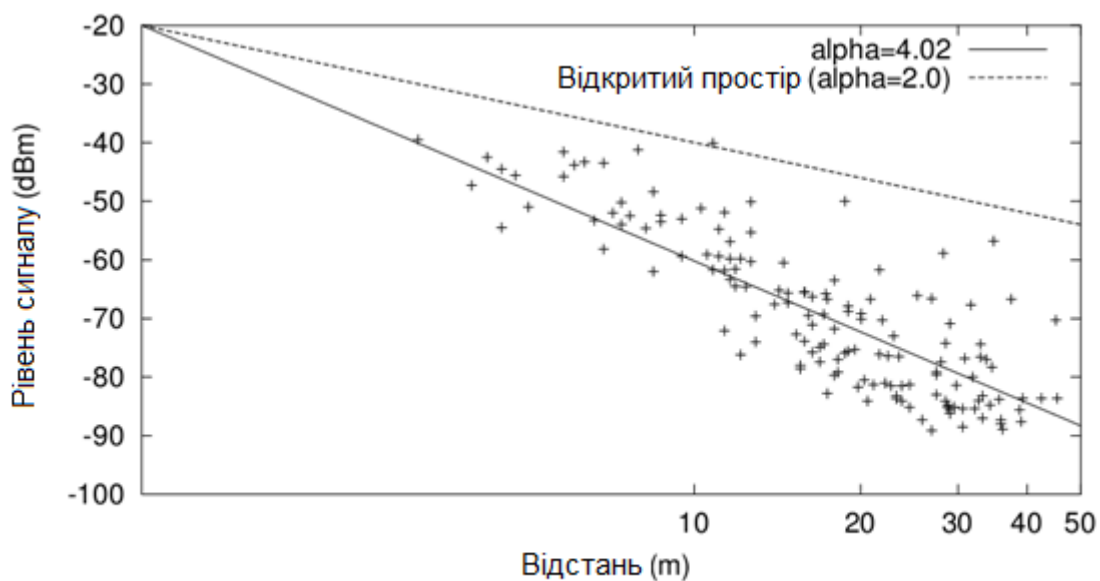
## 1.6 Моделювання загасання

Існуючі дослідження припускають, що модель (1.5, 1.6), може бути використана для прогнозування проникнення сигналу в будівлі [9]. У цьому випадку потужність сигналу, виявленого точкою доступу всередині будівлі щодо пристрою, що знаходиться зовні, може бути оцінена за допомогою рівняння:

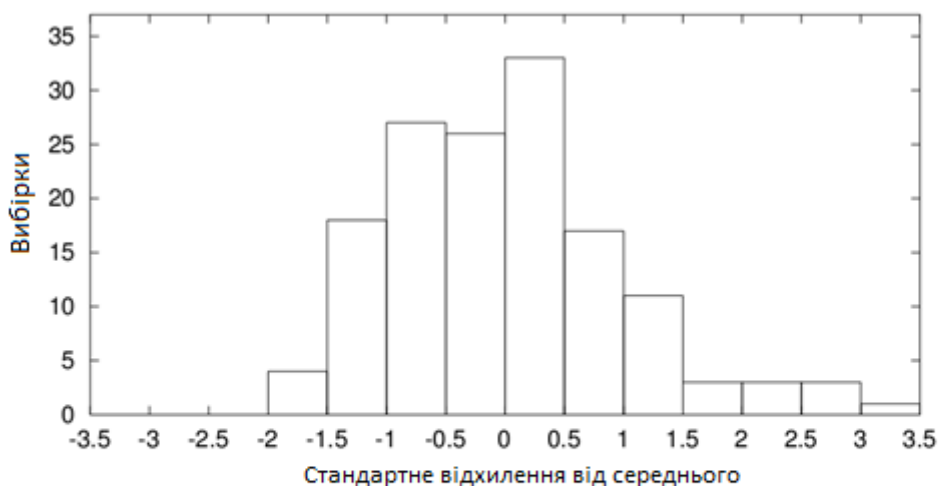
$$Pr(d) = Pr_0 - 10\alpha \log(d) - W + X_\sigma \quad (1.7),$$

де  $W$  – коефіцієнт ослаблення, що відповідає рівню згасання, спричиненому зовнішніми стінами будівлі.

Вимірювання вказують на те, що модифікована модель відстані (1.7), наближена до фактичного рівня загасання поза будівлею (рис. 1.8).



(a) Середня потужність сигналу як функція відстані



(b) Розподіл відхилення як функція від  $\sigma$ .

Рисунок 1.8 – Моделювання поширення сигналу за межами будівлі .

Суцільна лінія показує екземпляр моделі, знайдений за допомогою лінійної регресії; вона отримана для  $W = 4.8dB$  and  $\alpha = 3.32$  при стандартному відхиленні  $3.1 dB$  [10]. Незважаючи більш низьку швидкість загасання сигналу в порівнянні із його розповсюдженням у будинку ( $\alpha = 4.02$  vs.  $\alpha = 3.32$ ), сигнал продовжує загасати набагато швидше ніж прогнозує модель розповсюдження сигналу вільним простором.

Відхилення від середнього значення можуть бути апроксимовані розподіленням випадкових величин Гауса. У наведеному експерименті 70% проб в межах 1 стандартного відхилення від середнього значення, 95% у межах 2 відхилень та 100% у межах 3 стандартних відхилень.

Результати наведених експериментів із апаратним забезпеченням 802.11 показують, що модель втрати шляху з логарифмічним нормальним затіненням може бути використана для оцінки загасання сигналу як всередині, так і зовні офісної будівлі з помірною точністю [11].

Ці результати демонструють, що потужність сигналу можна передбачити за допомогою кількох моделей, навіть використовуючи обладнання IEEE 802.11. Отже, він може бути корисним як для досліджень, так і для промислових рішень, як перший крок оцінки нових бездротових послуг.

Остаточні формули для розрахунку відстані:

$$d = r_0 \cdot 10^{\left(\frac{Pr_0 - Pr(d) + X_\sigma - W}{10 \cdot \alpha}\right)} \quad (1.8)$$

$$d = 1 \cdot 10^{\left(\frac{-40 - Pr(d) + 3.1 - 4.8}{10 \cdot 3.32}\right)} \quad (1.9)$$

### 1.7 Геометричне розмивання точності (GDOP)

Існує метод, який використовується в GPS для вибору супутників. Він включає обчислення відносного геометричного положення супутників, обчислення спеціальних коефіцієнтів та вибір найкращої комбінації супутників на основі цих коефіцієнтів. [12]

Ідея GDOP полягає в тому, щоб визначити, як похибки вимірювання вплинуть на остаточну оцінку стану. Це можна визначити як:

$$GDOP = \frac{\Delta OutputLocation}{\Delta MeasuredData} \quad (1.10)$$

Концептуально можливо уявити похибки вимірювання, що призводять до зміни значення  $\Delta MeasuredData$ . В ідеалі невеликі зміни виміряних даних не призведуть до значних змін у розташуванні вихідних даних, оскільки такий результат означатиме, що рішення дуже чутливе до помилок (рис.1.9).

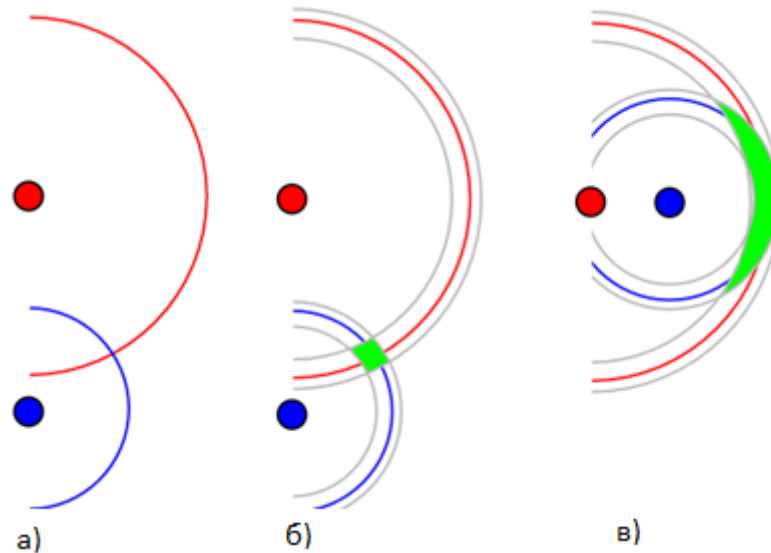


Рисунок 1.9 – Вплив GDOP на результати вимірювання.

- а) - триангуляція; б) - триангуляція з помилкою;
- в) - триангуляція з помилкою та поганим GDOP.

Зовсім недавно цей термін став набагато ширшим уживанням із розробкою та впровадженням GPS. Нехтуючи іоносферними та тропосферними ефектами, сигнал із супутників GPS має фіксовану точність. Отже, відносна геометрія приймача-супутника відіграє важливу роль у визначенні точності розрахункових положень та часу. Завдяки відносній геометрії будь-якого даного супутника до приймача, точність у псевдодіапазоні супутника перетворюється на відповідний компонент у кожному з чотирьох вимірів положення, виміряного приймачем (тобто  $x$ ,  $y$ ,  $z$  та  $t$ ).

Точність декількох супутників з огляду на приймач поєднують відповідно до взаємного розташування супутників для визначення рівня точності в кожному вимірі приймача. Коли видимі супутники GPS розташовані близько один до



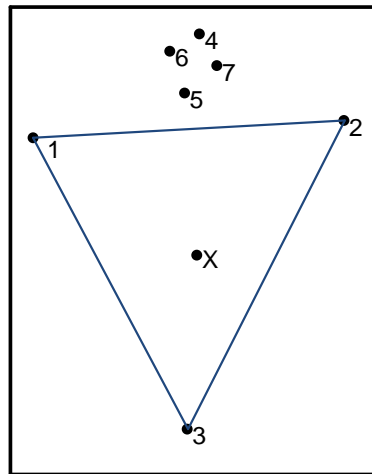
одного на небі, геометрія вважається слабкою, а значення DOP високим; коли далеко один від одного, геометрія сильна, а значення DOP низьке.

Розглянемо два кільця з різних центрів, що перекриваються. Якщо вони перекриваються під прямим кутом, найбільший ступінь перекриття значно менший, ніж якщо вони перекриваються майже паралельно. Таким чином, низьке значення DOP являє собою кращу точність позиціонування GPS завдяки ширшому кутовому розділенню між супутниками, що використовуються для обчислення положення GPS-пристрою. Іншими факторами, які можуть підвищити ефективний DOP, є перешкоди, такі як сусідні гори або будівлі.

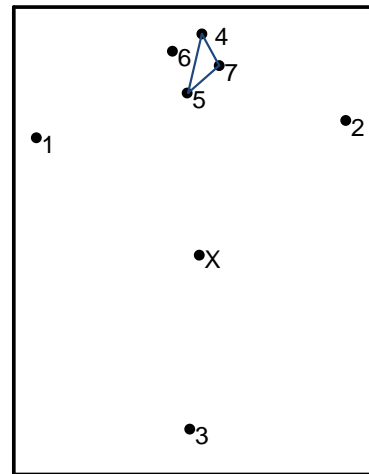
DOP може бути виражений у вигляді окремих вимірювань. HDOP, VDOP, PDOP і TDOP - це відповідно горизонтальне, вертикальне, позиційне (3D) та розмивання точності в часі. Вони визначаються математично з позицій корисних супутників. GPS-приймачі дозволяють відображати ці позиції (*skyplot*), а також значення DOP.

Цей термін також може бути застосований до інших систем визначення місця розташування, які використовують кілька GE про графічних відстані одного від одного ділянок. Це може статися в електронному лічильнику - заходи (радіоелектронна боротьба) при обчисленні розташування ворожих випромінювачів (радіолокаційних перешкод і пристроях радіозв'язку). Використання такої техніки інтерферометрії може забезпечити певну геометричну компоновку там, де є рівні свободи, які неможливо врахувати через неадекватні конфігурації.

Вплив геометрії супутників на похибку положення називається геометричним розмиванням точності, і це приблизно тлумачиться як відношення похибки положення до похибки дальності. Чим більша кількість супутників та відстань між ними, тим кращим є значення GDOP (рис. 1.10).



кращій GDOP



поганий GDOP

Рисунок 1.10 – Приклад GDOP. 1-7 – Якорі, X – реальна позиція об'єкту.

Розрахунок GDOP включає визначення псевдоінвертованої матриці, що є дуже витратною операцією і займає багато часу [13].

Висновки до розділу.

Проведено аналіз процесу визначення позиції мобільного об'єкту. Визначені проблеми і недоліки існуючих методів трилатерації і методів оцінки відстані, які пов'язані з розташуванням якорів у просторі і з недосконалістю моделей розповсюдження сигналу.

Розташування якорів для визначення положення мобільного об'єкту методом трилатерації суттєво впливає на можливість однозначно визначити місце його положення, навіть за умови високоточних методів оцінки відстані, що потребує додаткових критеріїв вибору якорів для трилатерації.

Велика віддаленість якорів від мобільного об'єкту, навіть за умови їх оптимального геометричного положення призводить до великого рівня помилок оцінки відстані, що потребує внесення змін до існуючих алгоритмів трилатерації.

## 2 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ І АЛГОРИТМІВ ЛОКАЛІЗАЦІЇ.

### 2.1 Постановка задачі.

Відповідно до теоретичних положень, алгоритми вибору якорів повинні розроблятися з використанням критеріїв геометричного положення та сили сигналу.

Потужність сигналу є гарним параметром для оцінки відстані, але вона має один серйозний недолік. При збільшенні відстані від джерела, потужність сигналу падає, а похибка в його вимірюванні збільшується. Підсилення, або перетворення сигналу на відстані призведе до ще більшої помилки. У деяких випадках похибка в оцінці відстані може становити до 30% [14]. Експериментальні дослідження показали, що оцінка відстані є прийнятною, якщо значення сили сигналу перевищує  $-80$  дБ. Менше значення потужності сигналу призводить до великих помилок і не може бути використано. Щоб позбутися таких похибок, необхідно реалізувати алгоритми, що використовують якорі з найбільшою силою сигналу.

Інший критерій - геометричне положення якорів. Алгоритм не повинен вибирати колінеарні якорі, оскільки результат трилатерації буде мати велику помилку. Ідеальне рішення, коли три якорі утворюють рівносторонній трикутник. У цьому випадку помилка трилатерації буде досить невеликою. Вибір рівностороннього трикутника є проблемою, оскільки потрібні деякі додаткові критерії.

Алгоритм повинен вибирати якорі таким чином, щоб вони геометрично утворювали трикутник, близький до рівностороннього трикутника, та кожен з цих якорів мав значення сили сигналу, прийнятне для оцінки відстані. Алгоритм, що включає всі ці аспекти має складатися з різних алгоритмів, з певною комбінацією параметрів .

## 2.2 Алгоритм периметра

Основна ідея цього алгоритму полягає у виборі 3 якорів, які утворюють трикутник, периметр якого має найбільший периметр серед усіх можливих комбінацій трійки якорів. (рис. 2.1).

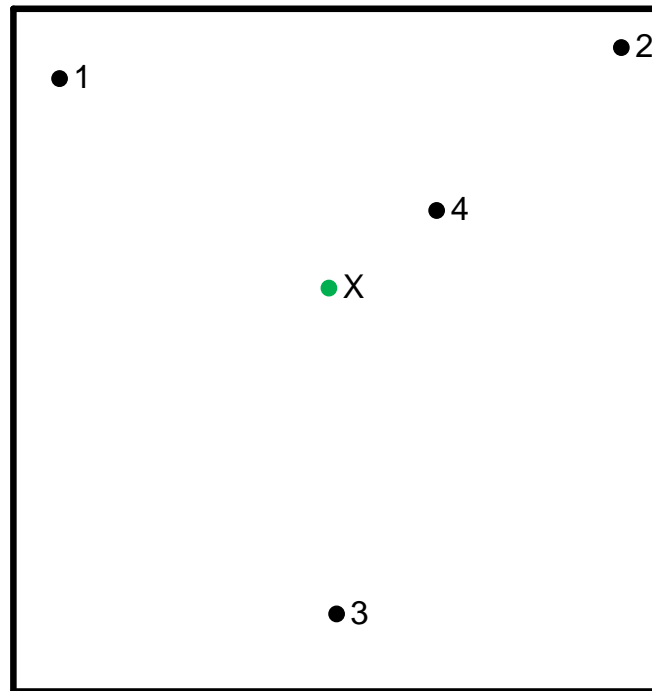


Рисунок 2.1 – Приклад ситуації локалізації об'єкту.

Точка  $X$  відповідає реальному положенню об'єкта. Точки з номерами «1», «2», «3», «4» являють собою якорі. По-перше потрібно поєднати трійки якорів, щоб отримати трикутники. Після побудови кожного трикутника його периметр вимірюється шляхом підсумовування відстані між парами якорів (рис. 2.2).

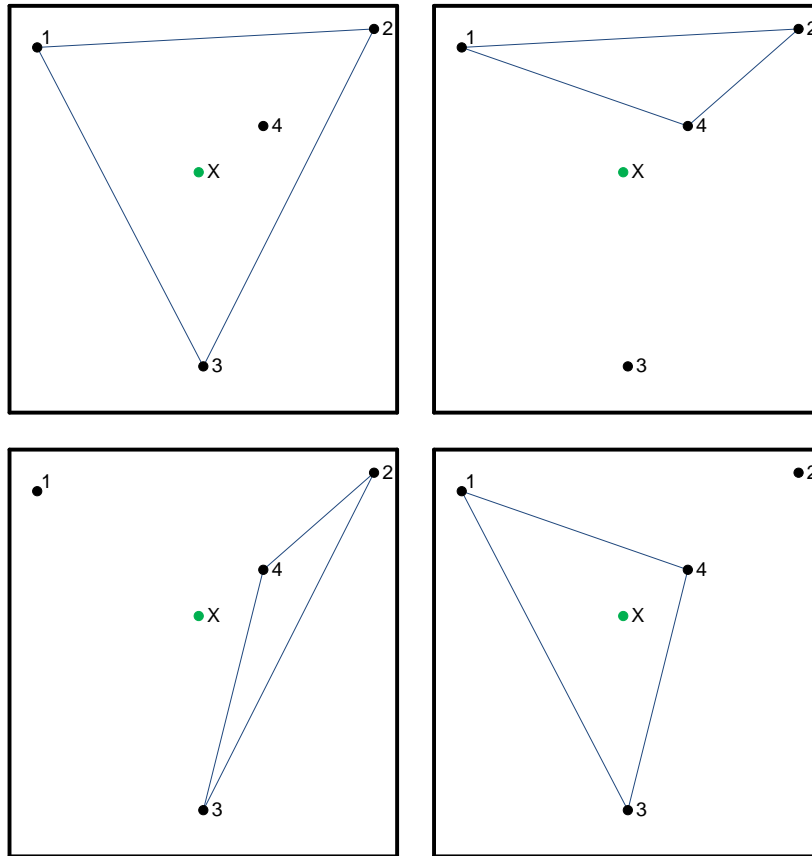


Рисунок 2.2 – Комбінації з 3-х якорів.

Якщо  $P(x; y)$  – координати якоря, то відстань між двома якорями визначається як:

$$\Delta_{P_1, P_2} = \sqrt{(P_1(x) - P_2(x))^2 + (P_1(y) - P_2(y))^2} \quad (2.1),$$

А периметри трикутників утворених відповідними якорями визначаються як:

$$\begin{aligned}
 T_{0,1,2} &= \Delta_{0,1} + \Delta_{0,2} + \Delta_{1,2} \\
 &\dots \\
 T_{1,2,3} &= \Delta_{1,2} + \Delta_{1,3} + \Delta_{2,3} \\
 &\dots \\
 T_{i,j,k} &= \Delta_{i,j} + \Delta_{i,k} + \Delta_{j,k}
 \end{aligned} \quad (2.2)$$

Необхідно вибрати  $\max(T)$  з усіх комбінацій. On Fig.2.2 Якорі “1”, “2”, “3” (рис. 12) утворюють трикутник із найбільшим периметром. Отже, ці якорі можна використовувати для процедури трилатерації.

Кількість унікальних трикутників, які можна сформувати з усіх можливих комбінацій якорів  $s$ , можна обчислити за формулою:

$$TC = \sum_{j=1}^{n-k+1} \left( \sum_{x=1}^j x \right) \quad (2.3),$$

де:  $TC$  – кількість трикутників

$n$  – кількість якорів

$k$  – кількість сторін багатокутника. Для трикутника  $k = 3$ .

З ростом числа якорів кількість можливих трикутників стрімко зростає (рис. 2.3).

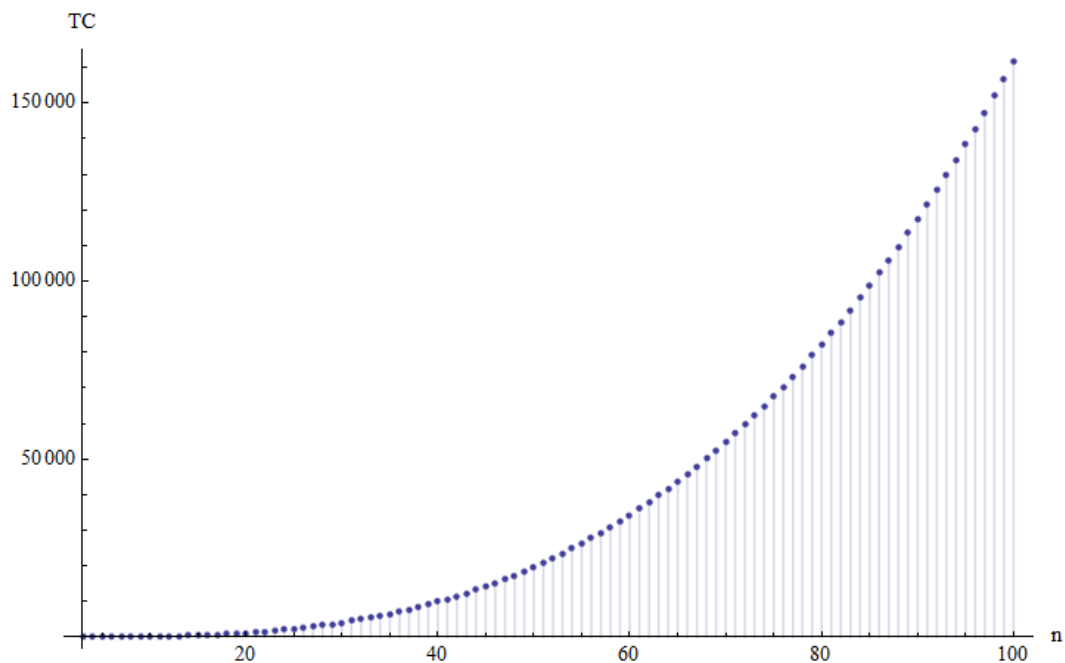


Рисунок 2.3 - Залежність кількості трикутників  $TC$  від числа якорів  $n$ .

Структуру алгоритму периметра наведено на рис. 2.4.



Рисунок 2.4 – Блок-схема алгоритму «Периметр»

Перевага цього алгоритму полягає в тому, що він використовує інформацію з усіх прив'язок і вибирає прив'язки, які знаходяться далеко одна від одної. Отже, ці якорі не будуть колінеарними.

Недоліком цього алгоритму є те, що все ж таки існує ймовірність того, що потрібні якорі з найбільшою сумою відстаней між ними будуть колінеарними, або розташованими дуже далеко від мобільного об'єкту. У цьому випадку результат трилатерації буде мати велику помилку.

### 2.3 Алгоритм площі.

Ідея цього алгоритму така ж, як “Алгоритм периметра”, але замість периметра обчислюється площа. І тоді вибирається трикутник з найбільшою площею.

Для обчислення площі трикутника використовується формула Герона:

$$S = \sqrt{p(p - a)(p - b)(p - c)} \quad (2.4),$$

де:

$p$  – полупериметер ;

$a, b, c$  – сторони трикутника;

$S$  – площа трикутника.

Вибір трикутника ненульовою площею гарантує виконання умови неколінеарності якорів.



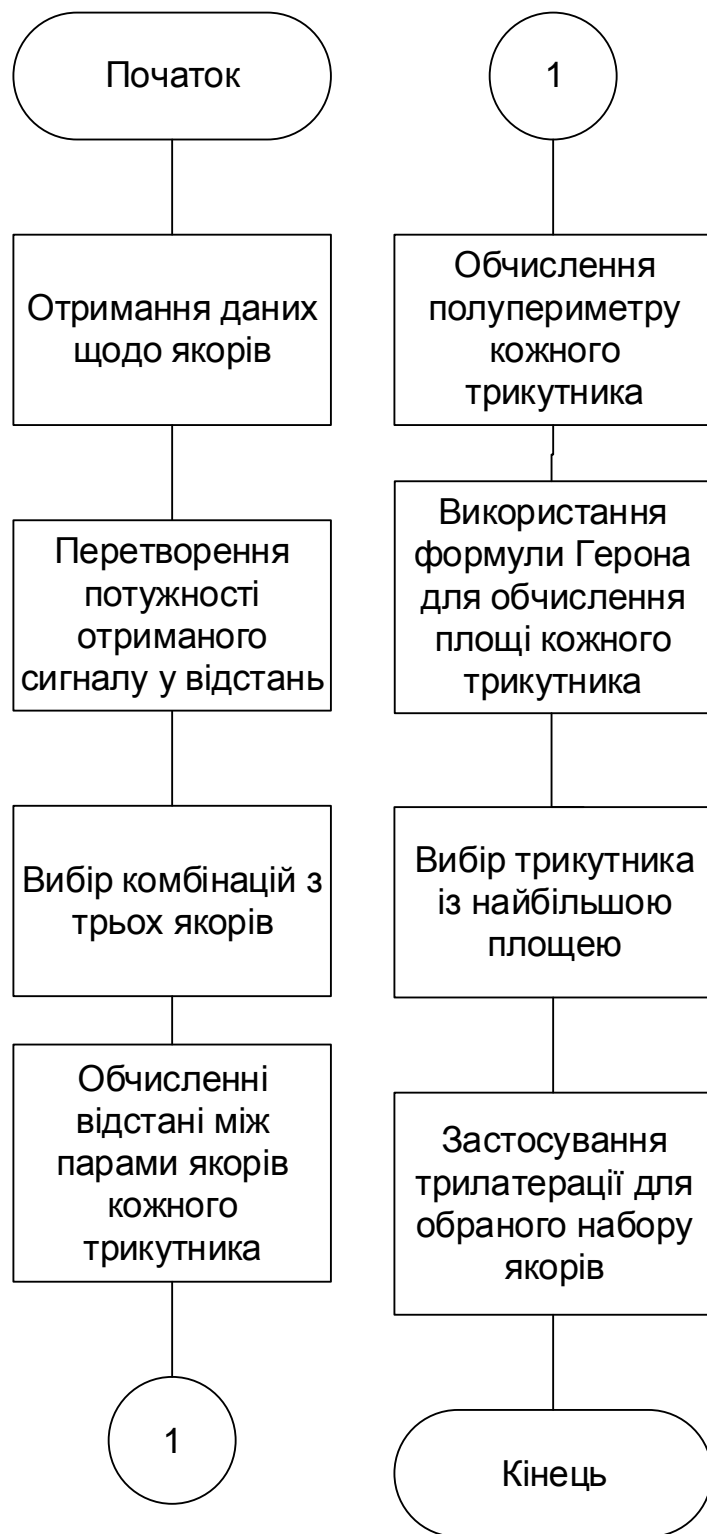


Рисунок 2.5 - Блок-схема алгоритму “Площа”

Перевага цього алгоритму полягає в тому, що він використовує інформацію з усіх прив'язок і вибирає прив'язки, які знаходяться далеко один від одного. Отже, ці якорі не будуть колінеарними.

Недоліком цього алгоритму є те, що він передбачає обчислення великої кількості комбінацій якорів, і це займає певний час.

## 2.4 Алгоритм потужності кутового сигналу

Алгоритм полягає в розділенні простору дії якорів на три сектори (по  $120^\circ$  кожний) та виборі з кожного сектору одного якоря з найбільшим рівнем потужності сигналу (SS) (рис. 2.6).

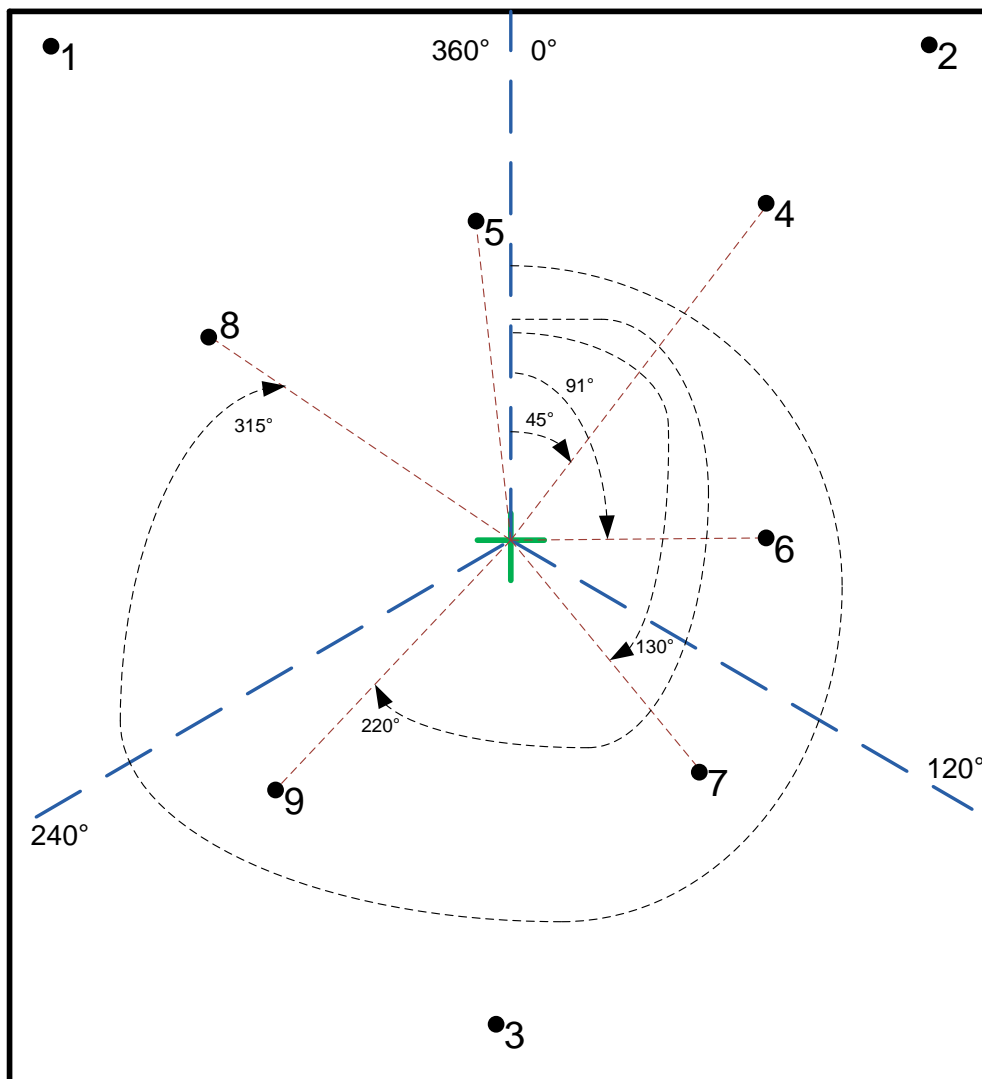


Рисунок 2.6 – Визначення кутів та відстаней якорів.

Точкою відліку кутів якорів є геометричний центр прямокутної області, де вони розташовані. Блок схема алгоритму показана на рис. 2.7.

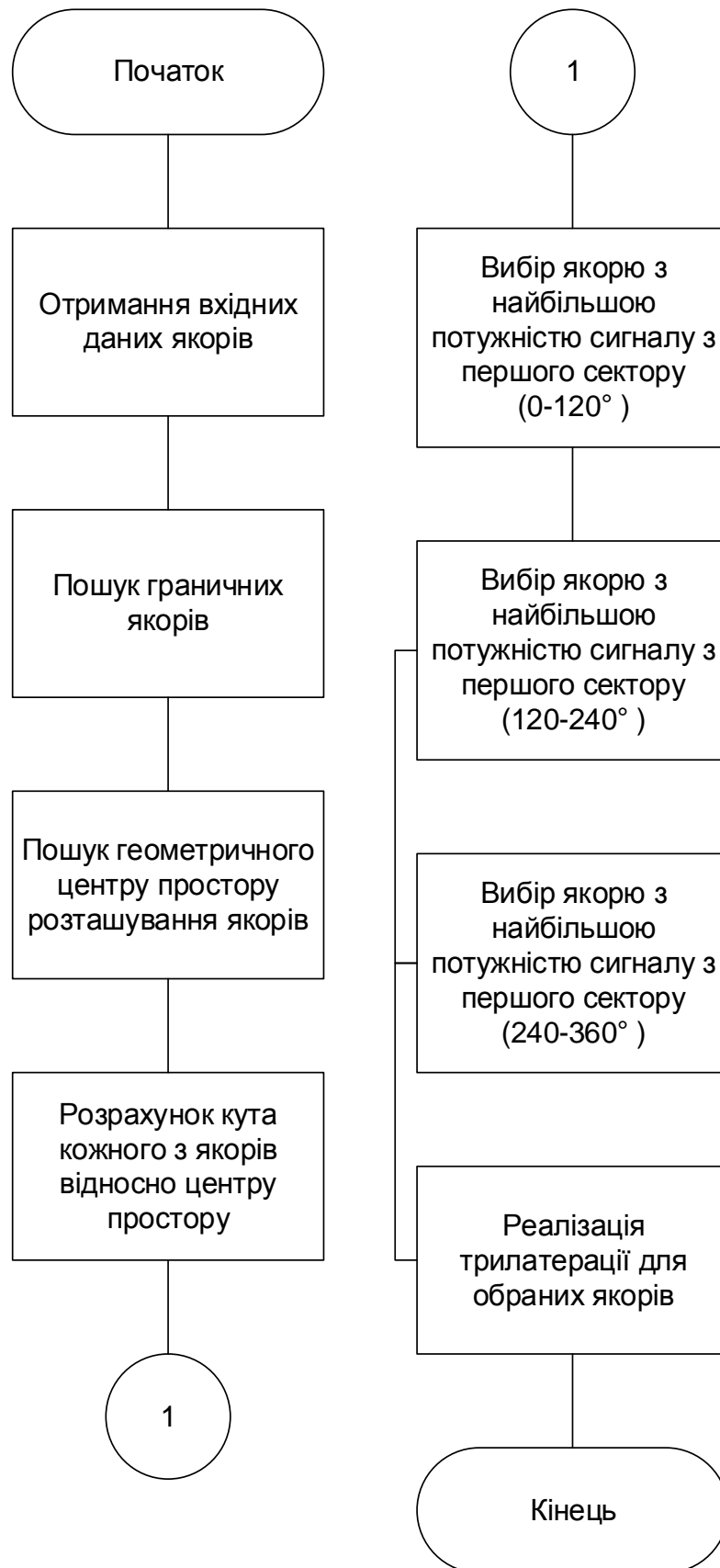


Рисунок 2.7 - Структурна схема алгоритму потужності кутового сигналу.

Перевага цього алгоритму полягає в тому, що вибрані якорі мають найбільші рівень потужності сигналу. Це означає, що похибка при її

перетворенні на відстань менша, ніж у якорях із слабшим сигналом. Також вибрані якорі знаходяться в такому геометричному положенні, що існує велика ймовірність, що об'єкт, положення якого ми шукаємо, знаходиться всередині трикутника, утвореного цими 3 якорями.

Недоліком цього алгоритму є ймовірність розміщення якорів впритул один до одного. У цьому випадку трилатерація дає велику помилку. Також може бути ситуація, коли в одному із секторів немає якорів. У цьому випадку трилатерацію використовувати неможливо.

## 2.5 Алгоритм потужності сигналу (SS).

Використання даного алгоритму полягає у виборі 3-х якорів з найбільшими рівнями інтенсивності сигналу, які і використовуються для трилатерації.

Чим більша інтенсивність сигналу якоря, тим вища точність оцінки, і в результаті відстань вимірюється з меншою похибкою. Отже, якщо помилка в оцінці відстані мала, то помилка трилатерації також мала. Блок-схема алгоритму показана на рис. 2.8.

Однак, у цього алгоритму є один можливий недолік. Якіри з найбільшими інтенсивностями сигналів можуть розташовуватися близько один до одного або навіть бути колінеарними. Якщо це трапляється, результат трилатерації дуже поганий.



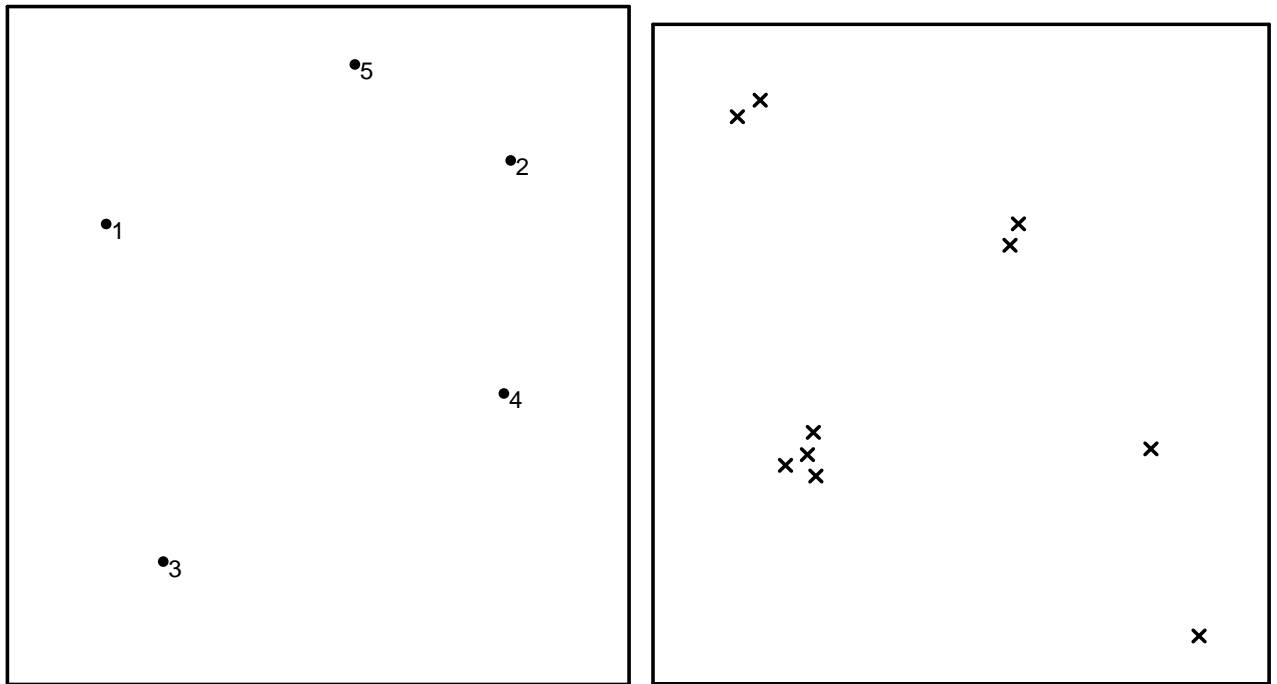
Рисунок 2.8 – Структурна схема алгоритму потужності сигналу.

## 2.6 Алгоритм щільності

Алгоритм щільності складається із наступних кроків:

1. Виконується розрахунок за методом трилатерації з використанням усіх можливих комбінацій трійки якорів.
2. Вибирається прямокутник “вікно” з деякою шириною та висотою .
3. Центр “вікна” встановлюється однієї обчисленої позиції, а сума інших позицій всередині цього вікна підсумовується. Крок повторюється для всіх обчислених положень.

4. Вибирається обчислювана позиція з найбільшою кількістю позицій усередині вікна. Три якоря, які дали цю позицію, є остаточним результатом (рис. 2.9).



a)

b)

Рисунок 2.9 – Якорі для трилатерації (a), розраховані позиції об'єктів (b)

Наступним кроком обирається розмір вікна. Для вибору кількості груп, які впливають на розмір вікна використовується формула [14]:

$$k = 1 + \log_2 n \quad (2.5),$$

де:  $k$  – кількість груп;

$n$  – кількість об'єктів.

Ширина та висота вікна розраховуються за формулами:

$$Width = \frac{\max(DOT(x)) - \min(DOT(x))}{k} \quad (2.6),$$

$$Height = \frac{\max(DOT(y)) - \min(DOT(y))}{k} \quad (2.7),$$

де:

$\max(DOT(x))$  – розрахована позиція з найбільшим значення координати  $x$ ;

$\min(DOT(x))$  – розрахована позиція з найменшим значення координати  $x$ ;

$\max(DOT(y))$  – розрахована позиція з найбільшим значення координати  $y$ ;

$\min(DOT(y))$  – розрахована позиція з найменшим значення координати  $y$ .

Вікно розміщується в центрі кожного розрахункового положення та визначається кількість розрахованих точок у вікні. Обирається розміщення вікна з максимальною кількістю розрахункових точок у ньому (рис. 2.10).

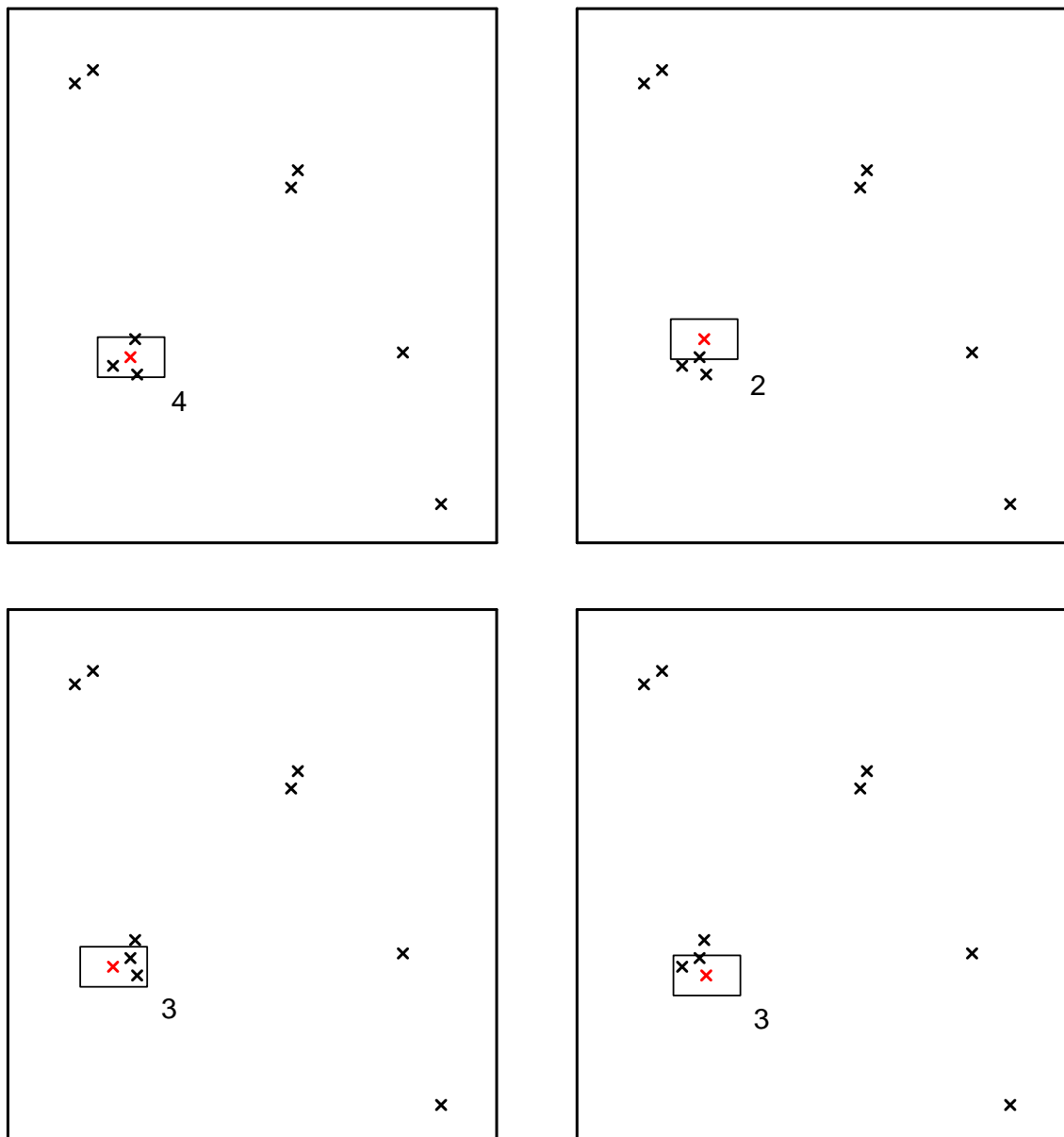


Рисунок 2.10 - Переміщення вікна в кожну позицію

Для трилатерації будуть обрані якорі, що сформували найбільш щільне вікно (4 якоря всередині вікна).

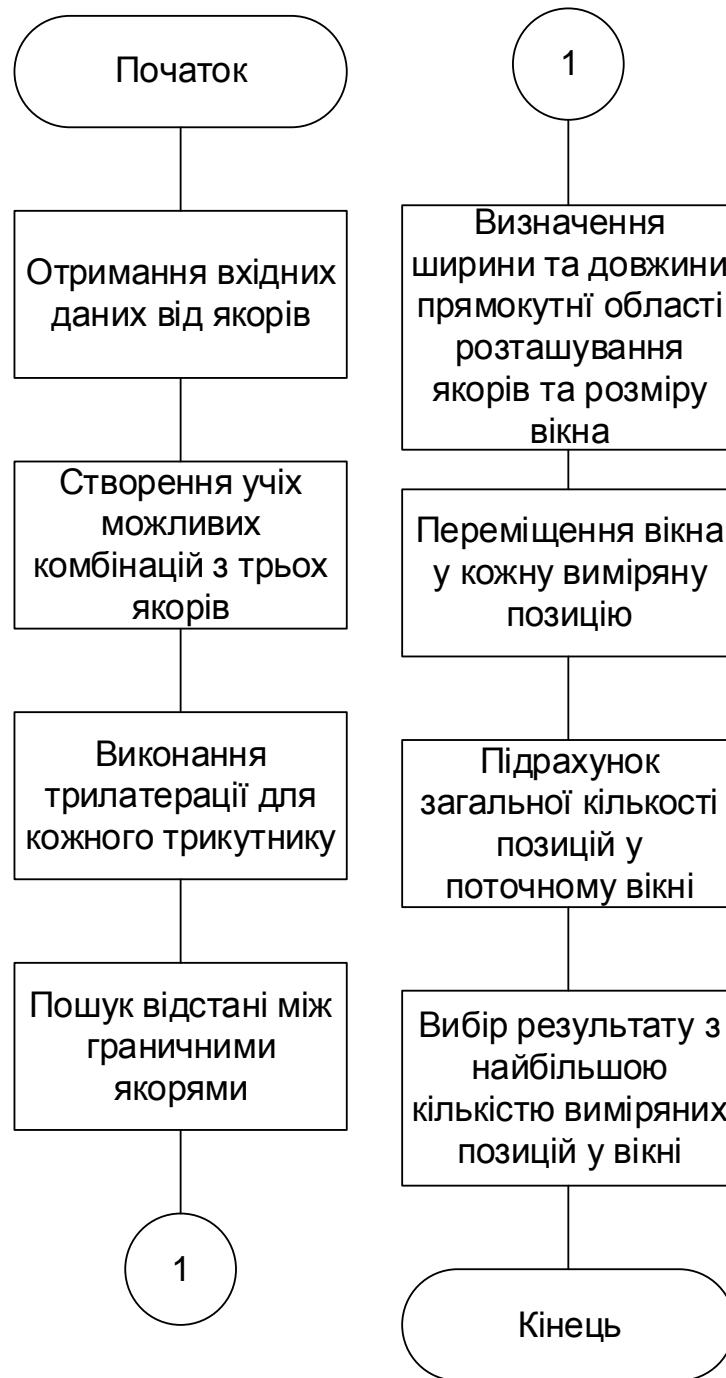


Рисунок 2.11 – Структурна схема алгоритму щільності.

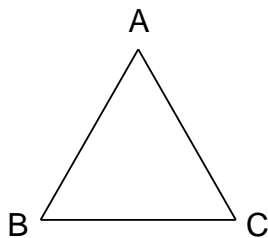


Перевага цього алгоритму полягає в тому, що похибка повинна зменшуватися зі збільшенням кількості якорів. Точність вимірювання залежить від точності якорів: якщо більшість якорів дають неправильний результат, то обирається неправильний результат.

Недоліком цього алгоритму є величезна кількість обчислень, які потрібно зробити.

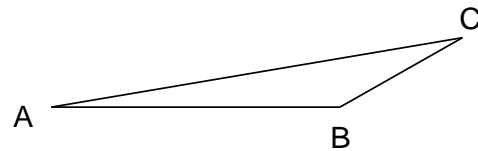
## 2.7 Рівносторонній алгоритм

Алгоритм полягає у пошуку та виборі трикутника якорів, кути якого близькі до  $60^\circ$ . Отже, для порівняння різних трикутників потрібні деякі критерії рівностороннього трикутника. В якості критерію можна використовувати суму синусів кутів трикутника. Рівносторонній трикутник має найбільшу суму синусів кутів (рис. 2.12).



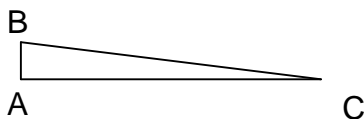
$$A = 60^\circ; B = 60^\circ; C = 60^\circ;$$

$$\sin A + \sin B + \sin C = 2.59;$$



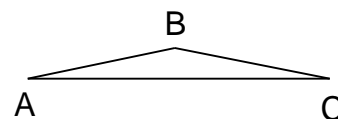
$$A = 10^\circ; B = 149^\circ; C = 21^\circ;$$

$$\sin A + \sin B + \sin C = 1.04;$$



$$A = 90^\circ; B = 83^\circ; C = 7^\circ;$$

$$\sin A + \sin B + \sin C = 2.11;$$



$$A = 11.5^\circ; B = 11^\circ; C = 157.5^\circ;$$

$$\sin A + \sin B + \sin C = 0.77;$$

Рисунок 2.12 - Різні комбінації якорів і сум синусів.

Тож можна використовувати такі критерії, як «кутове розведення точності» (Angle Dilution of Precision – ADOP). Чим вище ADOP, тим більш трикутник наближений до рівностороннього.

$$ADOP = \sum_{i=0}^2 \sin(\varphi_i) \quad (2.8)$$

Точність визначення місця розташування об'єкту у разі рівномірного розташування якорів навколо нього буде максимальною (рис. 2.13).

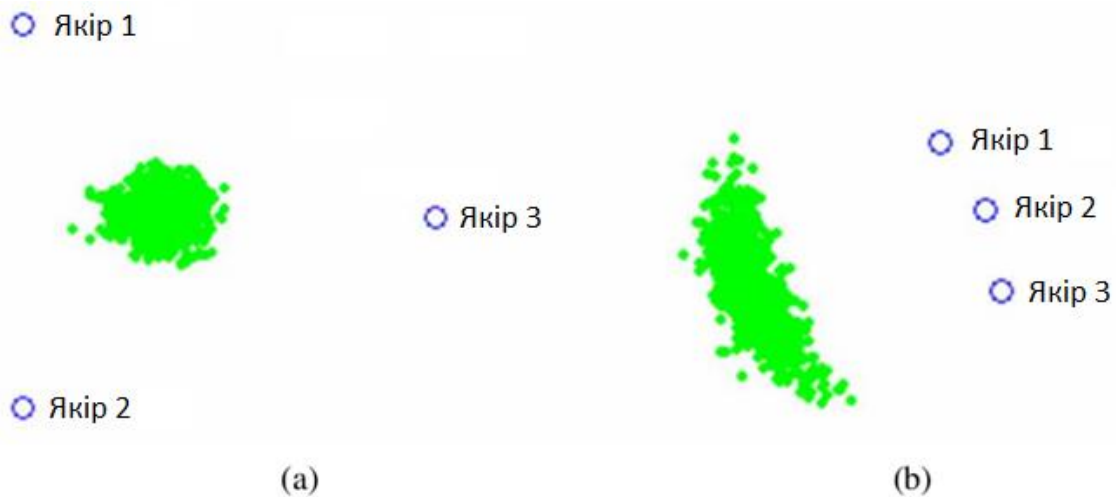


Рисунок. 2.13 - Вплив геометрії розташування якорів на оцінку положення об'єкту: а) – вдале розположення, висока точність; б) – погане розположення: низька точність.

Однак, існує висока вірогідність ситуації коли даний алгоритм не може бути застосований (рис. 2.14). Трикутник, сформований із якорів "1", "2", "3", є рівностороннім і повинен використовуватися для тристоронньої обробки. Але ці якорі розташовані близько один до одного і далеко від реального положення об'єкта. Трилатерація призводить до великої помилки, якщо ці анкери використовуються для розрахунку.

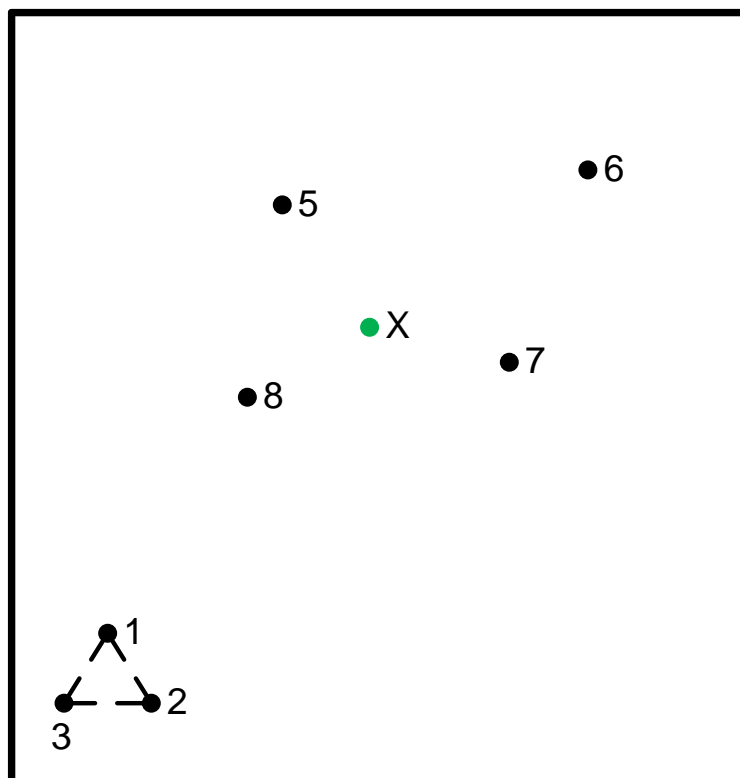


Рисунок 2.14 – Неєфективне розташування. X-реальне положення об'єкта. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 - якорі.

Висновки до розділу.

Проведено дослідження методів локалізації мобільних об'єктів. Визначені переваги і недоліки розглянутих методів. Запропоновано математичну модель та алгоритми реалізації методів локалізації мобільного об'єкту.

Визначені шляхи покращення ефективності процесу локалізації мобільного об'єкту шляхом усунення існуючих недоліків найбільш простих алгоритмів локалізації за рахунок розширення переліку критеріїв вибору якорів для трилатерації.

### 3 МОДЕЛЮВАННЯ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА.

#### 3.1 Математична модель процесу трилатерації.

Обраний метод та математична модель процесу трилатерації базується на наступних результатах теоретичного дослідження:

- усі запропоновані методи та алгоритми в заданих умовах використовують різну кількість вхідних даних, деякі з них використовують тільки відстань (потужність) якорю, другі – додатково кутові значення та взаємне положення якорів;
- обчислювальна складність запропонованих алгоритмів суттєво залежить не тільки від кількості вхідних даних, але й від складності математичної моделі обчислень від елементарної алгебри до складних тригонометричних обчислень;
- запропоновані методи потребують повного перебору варіантів і не враховують можливості додаткових критеріїв щодо скорочення кількості обчислень.

Запропонована математична модель та алгоритм трилатерації базується на припущенні існування критеріїв достатньо приємного рішення. Таким критерієм запропоновано вважати трикутник з максимальним периметром й ненульовою площею:  $P_{max}(S \neq 0)$ .

Запропонований алгоритм полягає в комбінації алгоритмів периметра і площі із скороченням обчислень периметру за наявності додаткового критерію пошуку найкращого рішення (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритму «Периметр-площа».

### 3.2 Умови експерименту.

Експеримент був проведений у закритому приміщенні, розміром 18 x 12 м. із встановленою в його геометричному центрі точкою доступу Wi-Fi. У якості мобільного об'єкту використовувалась модель колесного роботу на базі Arduino, обладнаного пристроєм Wi-Fi та датчиками перешкод (рис. 3.2).

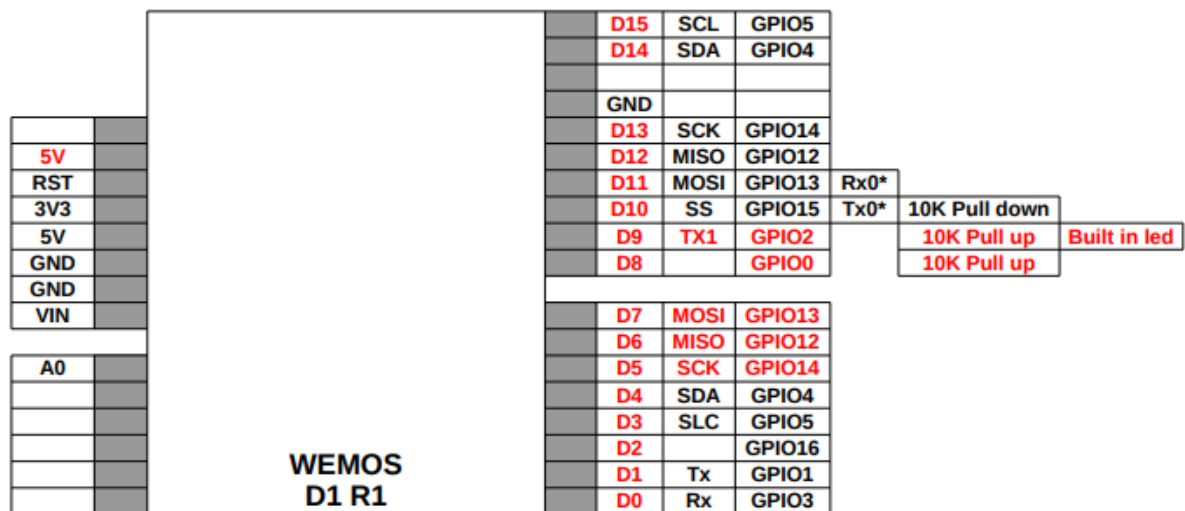


Рисунок 3.2 – Схема функціональна Wemos D1 R2 Wi-Fi UNO (ESP-12E).

Робота було запрограмоване рухатися по випадковій траєкторії, та вимірювати в певних точках з відомим положенням потужність сигналу від точки доступу Wi-Fi (рис. 3.3).

В результаті експерименту робот зробив 25 вимірювань. Таким чином було отримано 25 якорів, можливих для трилатерації.

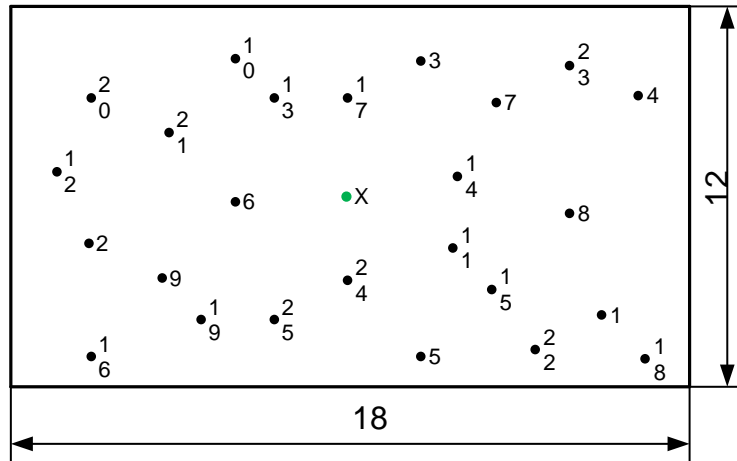


Рисунок 3.3 – Тестове приміщення.

X - реальне положення точки доступу Wi-Fi, 1 – 25 точки вимірювання

Після кожного нового вимірювання робот надсилав дані до персонального комп'ютера через локальну мережу. Далі за допомогою спеціального програмного забезпечення, що застосовує всі розглянуті алгоритми було виконано процес локалізації (рис. 3.4).

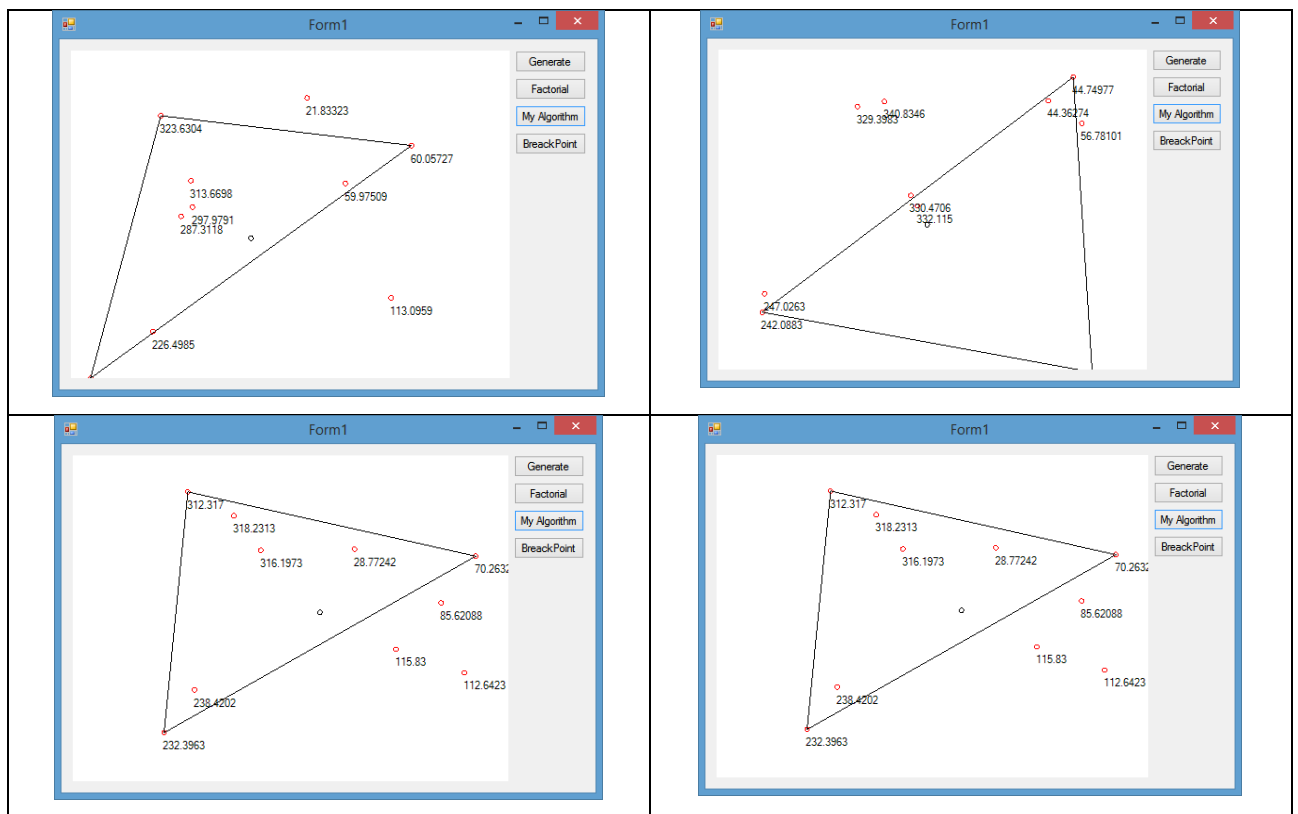


Рисунок 3.4 – Інтерфейс програми моделювання вибору якорів для трилатерації

### 3.3 Результати експерименту.

Алгоритми площі, потужності сигналу та кутової потужності сигналу показали найкращий результат за часом визначення локалізації. Найповільнішим виявився алгоритм щільності (рис.3.5,3.6).

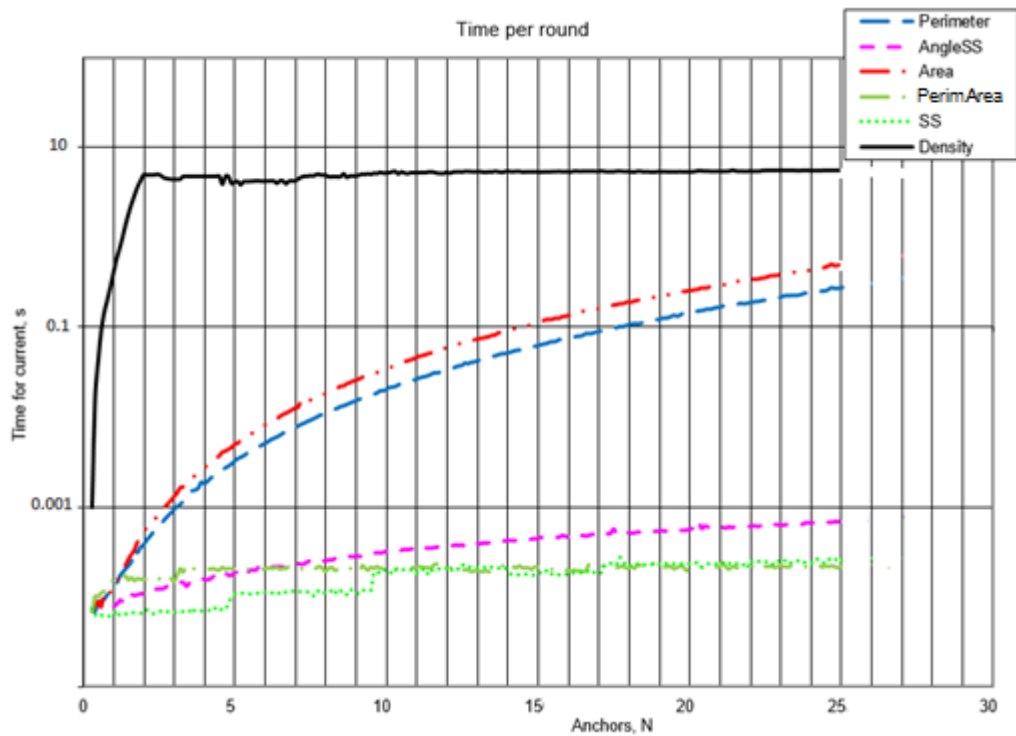


Рисунок 3.5 – Час, необхідний кожному алгоритму локалізації за умови отримання нових даних.

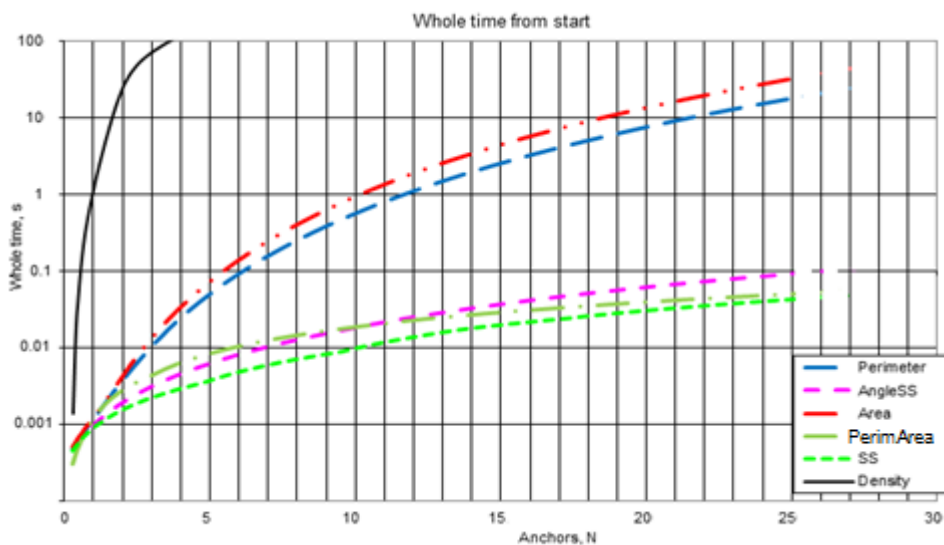




Рисунок 3.6 – Час, необхідний для кожного алгоритма для локалізації з використанням всієї інформації.

Помилка локалізації для кожного алгоритму залежить від кількості якорів. Найменшу середню помилку локалізації дають алгоритм ваги площі, алгоритм потужності сигналу та алгоритм кутової потужності сигналу (рис. 3.7).

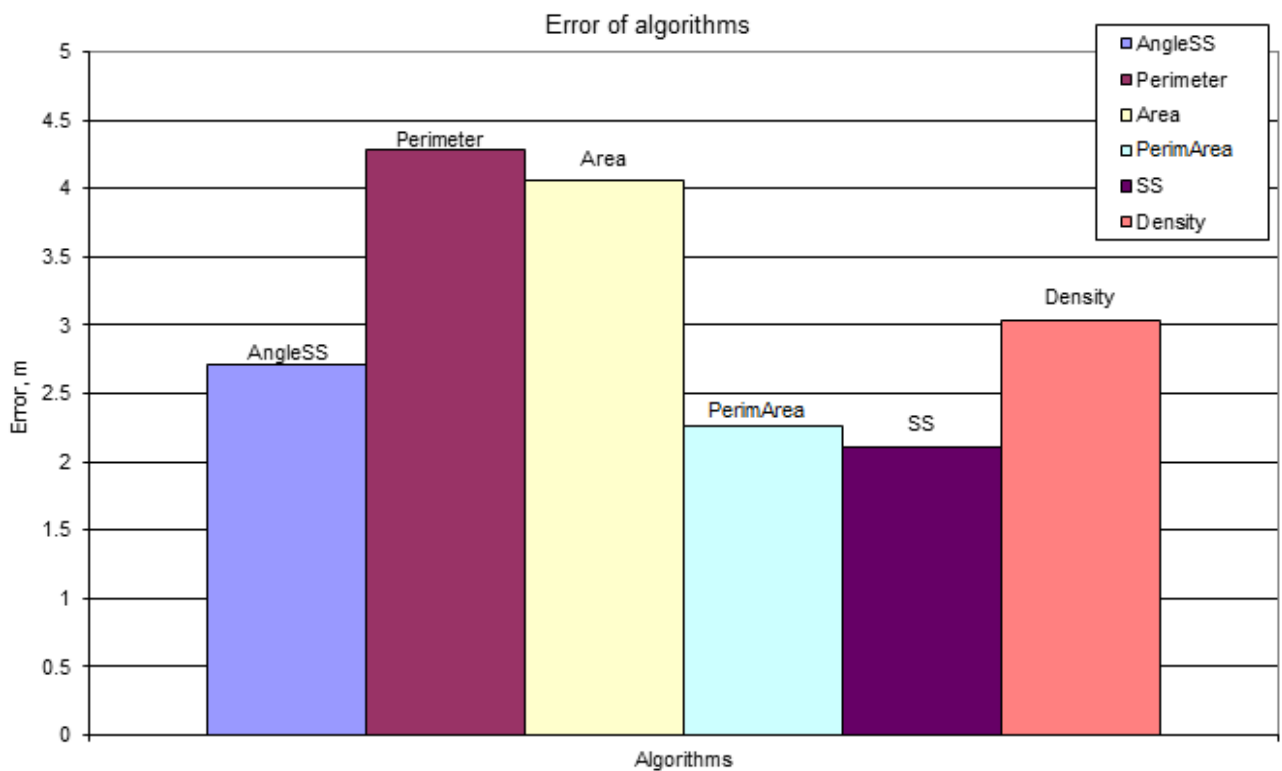


Рисунок 3.7 – Середня помилка кожного алгоритму.

Висновки до розділу.

Результати експерименту доводять суттєвий вплив на ефективність визначення позиції мобільного об'єкту методу визначення якорів. Досліджені алгоритми мають суттєву різницю у швидкості та точності визначення позиції мобільного об'єкту.

Запропонована модифікація методів та алгоритмів периметру та площі шляхом їх комбінування та визначення додаткового критерію приємного рішення дозволяє суттєво підвищити, як час, так і середню похибку локалізації.

## ВИСНОВОК

У кваліфікаційній роботі магістра була досліджена проблема ефективного вибору якорів для підвищення точності процесу локалізації методом трилатерації. Було досліджено декілька алгоритмів для локалізації з використанням трилатерації. Запропоновано модифікацію існуючих алгоритмів шляхом їх комбінування та введення додаткового критерію для скорочення об'єму обчислень. Проведено моделювання та експериментальну перевірку для порівняння ефективності розглянутих та запропонованого алгоритмів.

Алгоритм “щільності” потребує величезної кількості обчислень і часу, оскільки він робить трилатерацію для всіх можливих комбінацій трикутників. Помилка локалізації становить близько 3 м (15%), і цей алгоритм не рекомендується для подальшого використання через час обчислень.

Алгоритми потужності сигналу, периметр-площа та кутової потужності сигналу показали дуже добрі результати. Весь час, необхідний для цих алгоритмів, становить близько 1 секунди. Середня помилка локалізації також досить мала – 1.7 м (8%). Ці алгоритми можуть бути рекомендовані для подальшого використання в системах локалізації.

Алгоритми периметра і площі мають великі похибки за умови великої кількості якорів. Якщо, кількість якорів не дуже велика, ці алгоритми також можна використовувати для локалізації. Запропонована модифікація та комбінація цих алгоритмів суттєво покращує результат трилатерації.

Подальші дослідження рекомендується провести для методів збільшення швидкості обчислень в GDOP і кутових алгоритмів.

## REFERENCES

1. Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications – Amendment 4: Further higher-speed physical layer extension in the 2.4 GHz band, – IEEE, IEEE Standard 802.11g, 2003.
2. Artemenko O., Mann S., Schorcht G., Tarasov M., Schulz D. – A Groupwise Universal Improvement Scheme for Location Estimation in Wireless Networks.– IEEE ICCCN 2011, Maui, Hawaii, August 2011.
3. Trilateration basic. [Electronic resource] – Mode of access to the site: <http://en.wikipedia.org/wiki/Trilateration>.
4. Yogendra J. Patil – Self-calibrating cricket motes for indoor navigation.– SenSys '06 Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems, 2006.
5. Faria Daniel B. – Modeling Signal Attenuation in. – IEEE 802.11 Wireless LANs Vol.1, 2008.
6. Brian O’Keefe, Finding Location with Time of Arrival and Time Difference of Arrival Techniques. ECE Senior Capstone Project 2017 Tech Notes. [Electronic resource] – Mode of access to the site: [https://sites.tufts.edu/eeniordesignhandbook/files/2017/05/FireBrick\\_OKeefe\\_F1.pdf](https://sites.tufts.edu/eeniordesignhandbook/files/2017/05/FireBrick_OKeefe_F1.pdf)
7. HA Obeidat, RA Abd-Alhameed, JM Noras, S. Zhu, T Ghazaany, E. Elkhazmi., Indoor localization using received signal strength. December 2013, DOI: 10.1109/IDT.2013.6727138, Conference: 2013 Design and Test Symposium (IDT).
8. Saunders S.R. Antennas and propagation for wireless communication systems. England: John Wiley & Sons Ltd, 2007.
9. Rappaport T. Wireless Communications: Principles and Practice. USA: Prentice Hall, 2002.
10. Neskovic A., Neskovic N., and Paunovic G. – Modern approaches in modeling of mobile radio systems propagation environment. –, IEEE Communications Surveys, vol. <http://www.comsoc.org/pubs/surveys>, 2000.

11. Artemenko O., Schorcht G., Tarasov M. – A refinement scheme for location estimation process in indoor wireless sensor networks., – IEEE Global Communications Conference (IEEE GLOBECOM 2010), Workshop on Heterogeneous, Multi-Hop, Wireless and Mobile Networks (HeterWMN), Miami, USA, 6th - 10th December 2010.
12. Langley Richard B. – Dilution of Precision., – GPS World, May 1999.
13. Guangjie Han, Deo kjai Choi, Wontae k Lim – Reference node placement and selection algorithm based on trilateration for indoor sensor networks.– Wirel. Commun. Mob. Comput. 2009; 9:1017–1027
14. Alsindi Nayef – Indoor Cooperative Localization for Ultra Wideband Wireless Sensor Networks., – EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, Volume 2008, January 2008
15. Histogram description. [Electronic resource] – Mode of access to the site:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Histogram>

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ МОБИЛЬНОГО ОБЪЕКТА МЕТОДОМ ТРИЛАТЕРАЦИИ.

Исследование посвящено способам снижения ошибки определения координат (местоположения) мобильного объекта при использовании метода трилатерации. Основным фактором, влияющим на точность трилатерации является взаимное расположение трех точек (якорей, маяков).

Проведен обзор существующих методов повышения точности. Выбран параметр радио сигнала для его последующего преобразования в расстояние. Выбраны коэффициенты для уравнения зависимости силы радиосигнала от расстояния. Разработаны алгоритмы, учитывающие геометрические особенности трилатерации. Проведен сравнительный анализ алгоритмов, и определены их погрешности определения координат.

Анализ результатов исследования показал, что ошибка определения координат и время выполнения предложенных алгоритмов находится в рамках допустимых величин, что дает возможность их применения на практике.

**Ключевые слова:** трилатерация, точность, локализация, радиосигнал.

**Вступление:** Возможность точного определения координат мобильных объектов имеет важное значение во многих сферах человеческой деятельности. В случае стихийных бедствий, когда людям требуется экстренная помощь, первоочередной задачей является определение их местонахождения на местности. Для этого нам нужно, чтобы у людей было какое-то оборудование, которое может работать как радиомаяк. Эта функция может быть реализована с помощью простого сотового телефона со встроенным WI-FI. Мобильный телефон есть практически у всех людей, поэтому стоит использовать все возможности WI-FI. Если мы запустим беспилотный летательный аппарат (БПЛА), оснащенный WI-FI, и он произведет 3 измерения уровня сигнала (SS) на необходимое устройство WI-FI в 3-х разных координатах, то можно будет определить положение необходимого устройства WI-FI с помощью трилатерации. Но обычно БПЛА делает много измерений, и нам нужен какой-то алгоритм, чтобы выбрать только 3 измерения из всех возможных.

Цель исследования - найти критерии или алгоритм выбора только 3 якорей из всех возможных для трилатерации, которые

дадут результат с максимальной точностью.

Для этого нам нужно решить несколько задач:

- найти модель потерь на трассе WI-FI.
- проанализировать известные алгоритмы выбора якорей.
- изобретать новые или улучшать известные алгоритмы.

**Анализ существующих методов локализации.** В общем, процесс определения местоположения объекта состоит из нескольких шагов, описанных (рис.1).

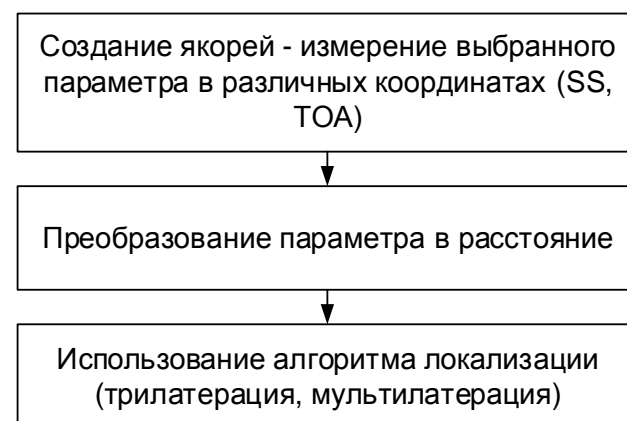


Рис. 1 – Процесс локализации  
В результате выполненных действий можно получить координаты искомого

объекта. В наилучшем случае алгоритм локализации для определения местоположения необходимого объекта

можно использовать для 3-х якорей с разными координатами (рис.2).

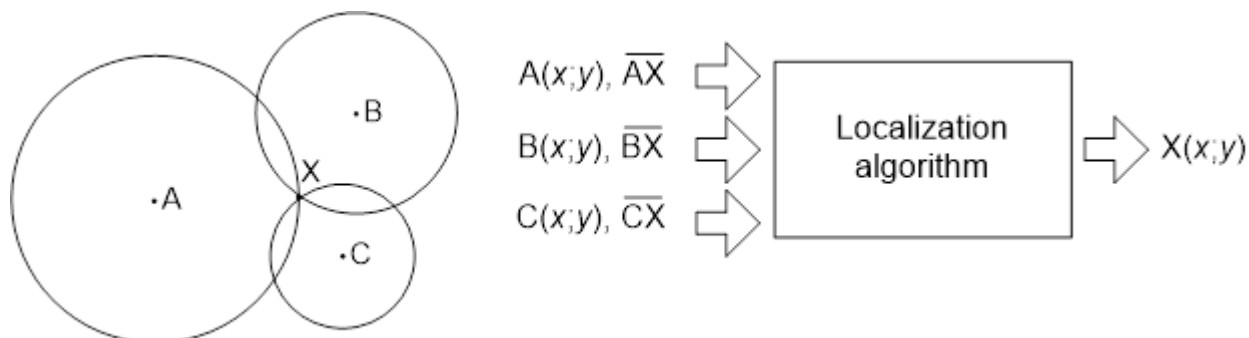


Рис. 2 – Идеальная ситуация. А, В, С - якоря с известными координатами.

X - объект с неизвестными координатами.

$(AX)^{-}$ ,  $(BX)^{-}$ ,  $(CX)^{-}$  – расстояния от якорей до объекта.

На практике, как правило, существует больше трех якорей (источников и приемников широкополосного радиосигнала). В этом случае и возникает проблема выбора комбинации из 3-х якорей (рис. 3).

Расстояние между X и А, В и С может быть определено с помощью формулы Эвклида

$$(x - x_a)^2 + (y - y_a)^2 = (d_{AX})^2 \quad (1),$$

$$(x - x_b)^2 + (y - y_b)^2 = (d_{BX})^2 \quad (2),$$

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = (d_{CX})^2 \quad (3).$$

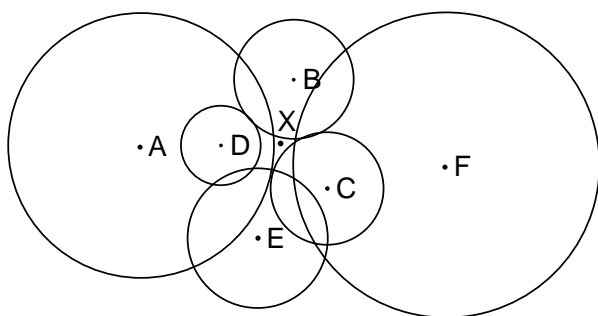


Рис. 3 – Типичная ситуация при локализации объекта.

Каждая комбинация даст различный результат. Для выбора оптимального алгоритма выбора якорей (Optimum Ancor Selection algorithmS - OASIS) необходимы определенные критерии.

Используя трилатерацию, можно рассчитать неизвестное положение устройства с радиомодулем WI-FI, используя данные трех известных измерений (три координаты и расстояния, рис. 4).

Расположение точек А, В и С известно, то есть  $A(x_a; y_a)$ ,  $B(x_b; y_b)$  и  $C(x_c; y_c)$ , а положение точки  $X(x; y)$  неизвестно. Измерения расстояния от точек А, В и С до точки X известны. Измеренное расстояние от точки А до X равно  $d_{AX}$ , от точки В до X –  $d_{BX}$  и от точки С до X –  $d_{CX}$ .

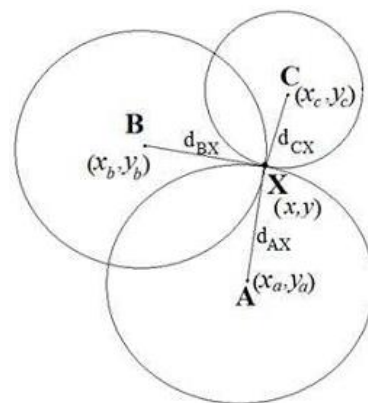


Рис. 4 – Принцип трилатерации.

Уравнения (1), (2) и (3) задают три окружности (рис. 5). Уравнение (1) дает круг с центром в точке  $A(x_a, y_a)$  с радиусом, равным  $d_{AX}$ . Точка X с неизвестным местоположением может находиться в произвольном месте этой окружности.

Одновременное решение уравнений (1) и (2) приводит к двум возможным положениям объекта X, а именно.  $(x_1, y_1)$  и  $(x_2, y_2)$  (рис.5b). Эту неоднозначность можно устранить, используя уравнение (3). Решение уравнений (1), (2) и (3) одновременно дает единственное решение для положения точки X как  $(x, y)$  (рис. 5c). Таким образом, для двумерного пространства, если известны расстояния от

трех точек с известным положением до точки с неизвестным положением; тогда

точка с неизвестным местоположением может быть однозначно определена [1].

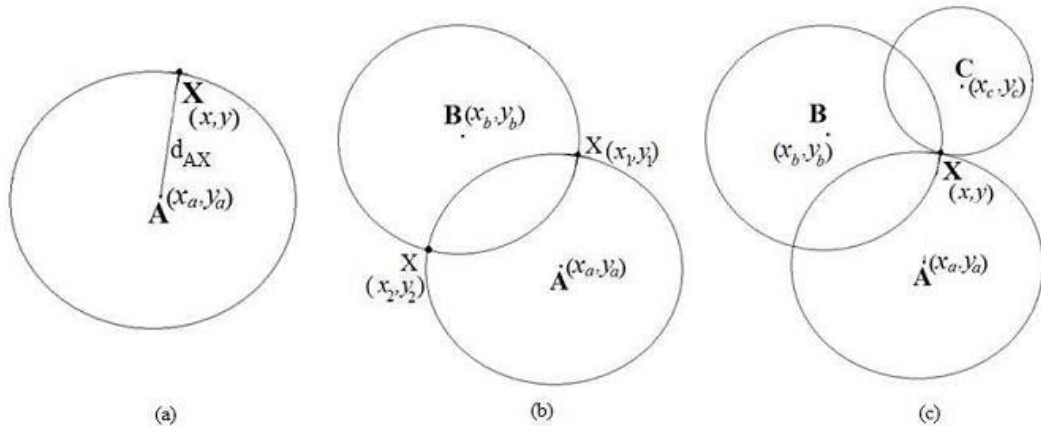


Рис.5 - Процесс локализации в 2D пространстве с использованием принципа трилатерации.

Чтобы найти расстояние необходимо, использовать модель потерь на пути со специальными коэффициентами:

$$Pr(d) = \overline{Pr}(d) + X_\sigma \quad (4),$$

$$Pr(d) = Pr_0 - 10\alpha \log(d) + X_\sigma \quad (5),$$

где:

$Pr(d)$  - принимаемая мощность (в dBm);  
 $d$  – расстояние от передатчика (в метрах);  
 $Pr_0$  – мощность сигнала на расстоянии 1 м. от передатчика;  
 $\alpha$  – показатель потерь на пути;  
 $X_\sigma$  – представляет собой гауссову случайную величину с нулевым средним и стандартным отклонением  $\sigma$ .

В уравнении (4)  $Pr(d)$  представляет собой средний (ожидаемый) уровень сигнала на расстоянии  $d$  метров от передатчика, а  $\overline{Pr}(d)$  – случайный результат. Данная модель учитывает различные препятствия, присутствующие на нескольких трассах распространения сигнала передатчик-приемник с одинаковым разносом. Это явление называется логарифмически нормальным затенением.

Проведенные эксперименты [2] показали следующие значения коэффициентов:

$$Pr_0 = -40; X_\sigma = 3.1; \alpha = 3.32 \quad (6)$$

Существует способ выбора якоря, который используется в GPS. [3] Концепция геометрического снижения

точности (geometry dilution of precision – GDOP) состоит в том, чтобы указать, как ошибки измерения повлияют на окончательную оценку состояния:

$$GDOP = \frac{\Delta OutputLocation}{\Delta MeasuredData} \quad (7)$$

Концептуально можно представить себе ошибки измерения, приводящие к изменению значения расстояния –  $\Delta MeasuredData$ . Если выбранный метод измерения имеет малую чувствительность к ошибкам, небольшие изменения в измеренных данных не приведут к большим изменениям в местоположении выходных данных [4]. Возможны два сценария с приемлемым и плохим GDOP (рис. 7).

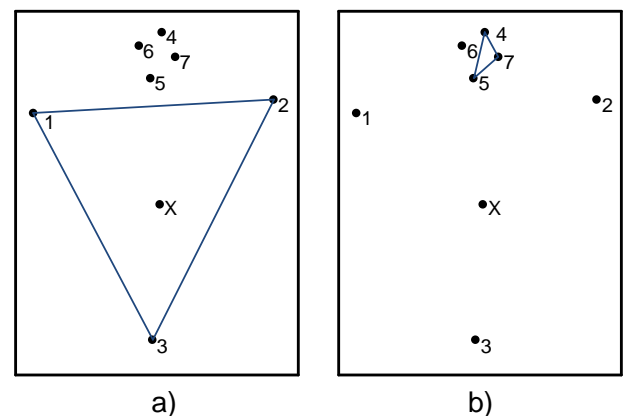


Рис. 7 - Принцип GDOP. X - реальное положение объекта. 1,2,3,4,5,6,7 – якоря: а) наилучший случай, б) наихудший случай.



Расчет *GDOP* требует таких математических операций, как псевдообращение больших матриц, что требует существенных вычислительных ресурсов, которых, как правило, нет на автономных мобильных объектах. Поэтому поиск, нахождение и использование более быстрых алгоритмов является актуальной задачей в области позиционирования мобильных автономных объектов.

**Цель исследования:** определить критерии выбора только 3 якорей из всех возможных для трилатерации, и найти алгоритм их

поиска и определения позиции мобильного автономного объекта с максимальной точностью.

**Исследование методов и алгоритмов выбора якорей.** В ходе исследования предложено несколько алгоритмов позиционирования с помощью трилатерации. Одно из предлагаемых решений заключается в выборе 3-х якорей, которые образуют треугольник с наибольшим всех возможных комбинаций треугольников периметром (рис. 8).

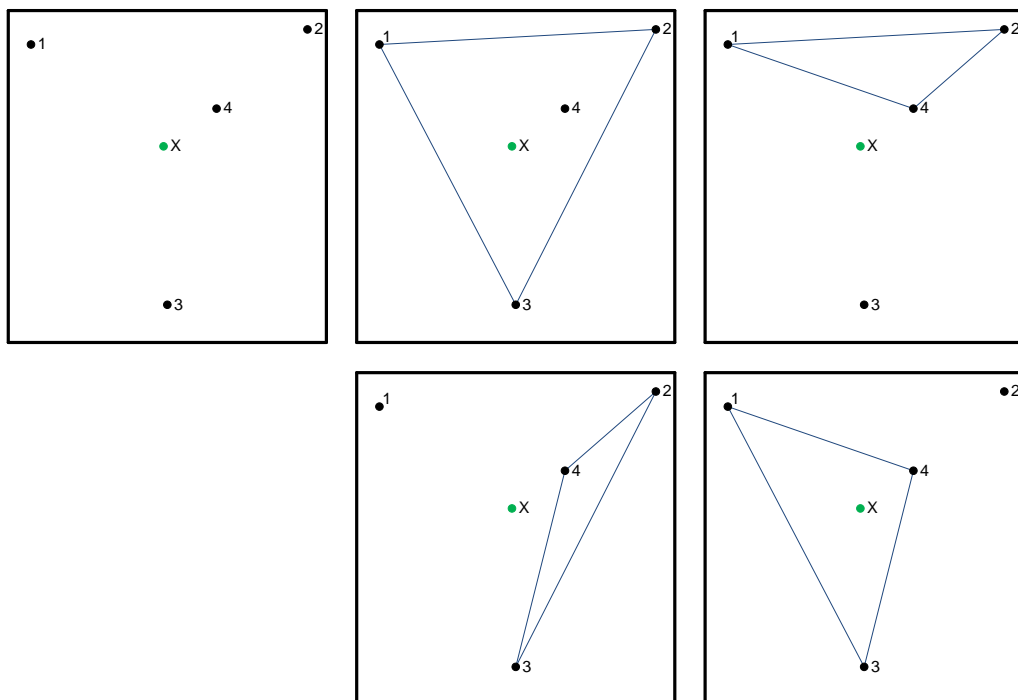


Рис. 8 – Алгоритм периметра. X - реальное положение объекта. 1,2,3,4 - якоря.

Треугольник, сформированный из якорей 1, 2 и 3, имеет самый большой периметр среди всех комбинаций треугольников. Недостатком этого алгоритма является то, что все же существует вероятность того, что три якоря с наибольшей суммой расстояний между ними будут коллинеарными. В этом случае результат трилатерации будет иметь большую ошибку.

Алгоритм, основанный на выборе трех якорей по критерию максимума площади соответствующего треугольника лишен этого недостатка. Площадь треугольника вычисляется по формуле Герона. Во многих случаях алгоритм выбора якорей по критерию максимума

площади даст тот же результат, что и алгоритм периметра (рис. 8). Недостатком этого алгоритма является его относительно высокая вычислительная сложность.

Алгоритм выбора мощности углового сигнала состоит в разделении пространства действия якорей на три сектора (по  $120^\circ$  каждый) и выборе из каждого сектора по одному якорю с наибольшим уровнем мощности сигнала (рис.9). Точкой отсчета углов якорей является центр прямоугольной области их расположения.

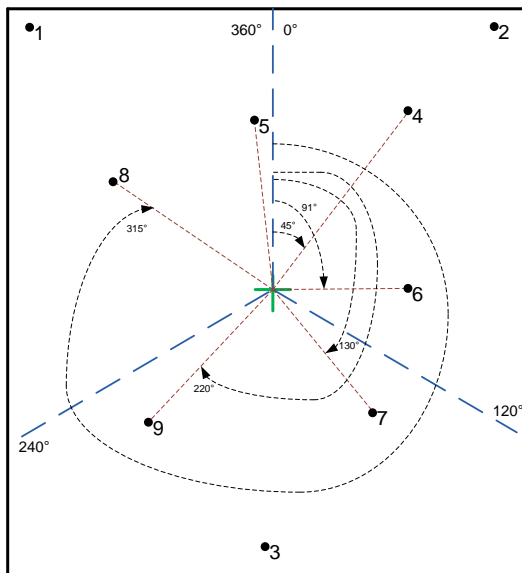


Рис. 9 – Определение углов и дистанций якорей.

Преимущество этого алгоритма заключается в том, что выбранные якоря имеют наибольший уровень мощности сигнала, что снижает погрешность при ее преобразовании в расстояние. Метод выбора якорей повышает вероятность того, что объект, положение которого мы ищем, находится внутри треугольника, который образуют эти якоря.

Недостатком этого алгоритма является возможность размещения якорей близко друг к другу. В этом случае трилатерация дает большую ошибку. Возможна ситуация, когда в одном из секторов нет якорей. В этом случае трилатерацию использовать невозможно.

Алгоритм мощности сигнала (SS) состоит в выборе 3-х якорей с наибольшей интенсивностью сигнала, которые и используются для трилатерации. Чем больше интенсивность сигнала якоря, тем выше точность оценки, и в результате расстояние измеряется с меньшей погрешностью. Итак, если ошибка в оценке расстояния мала, то ошибка трилатерации также мала. Однако, у этого алгоритма есть один возможный недостаток. Якорь с крупнейшими интенсивности сигналов могут располагаться близко друг к другу или даже быть коллинеарными. Если это случается, результат трилатерации будет иметь большую погрешность.

С помощью алгоритма веса площади сначала выбираются несколько (в данном исследовании до 10-ти) якорей с самыми большими мощностями сигналов, а затем еще 3-х якорей с меньшим (но не наименьшим) уровнем мощности. Затем для этих якорей применяется алгоритм площади. Основная идея метода заключается в сочетании якорей. Хотя якоря с большими мощностями сигналов, возможно, могут располагаться близко друг к другу, якоря с более низкими уровнями мощности расположены далеко от них. Благодаря «смешиванию» якорей, алгоритм позволяет избежать ситуации, когда якоря является коллинеарными (рис. 10).

Преимущество этого алгоритма заключается в том, что ситуация, когда якоря является коллинеарными, практически невозможна. Недостатком является то, что существует возможность отсутствия якорей с нужными уровнями мощности. В этом случае алгоритм не дает результата.

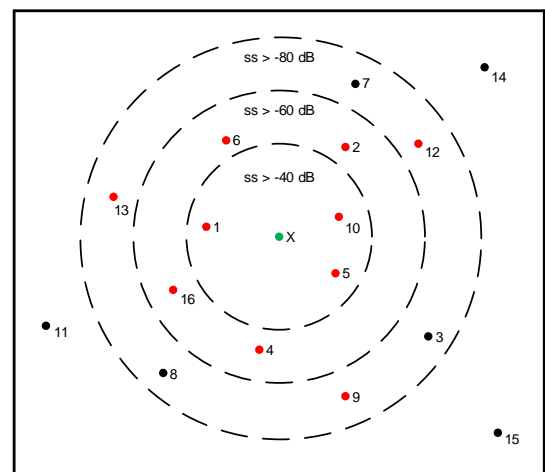


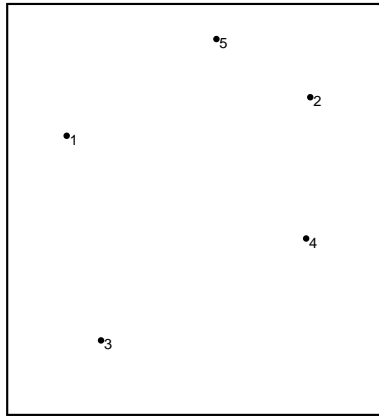
Рис. 10 – Пример применения алгоритма веса площади.

Алгоритм плотности состоит из следующих шагов:

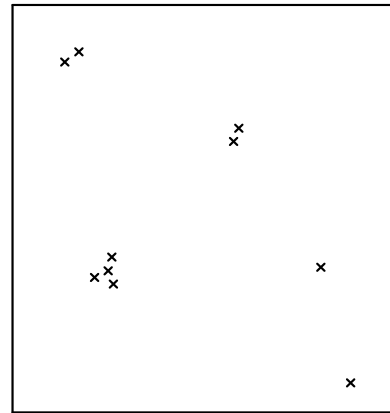
1. Выполняется расчет по методу трилатерации с использованием всех возможных комбинаций тройки якорей.
2. Выбирается прямоугольник "окно" с некоторой шириной и высотой.
3. Центр "окна" устанавливается одной вычисленной позиции, а сумма других позиций внутри этого окна суммируется.

Шаг повторяется для всех вычисленных положений.

4. Выбирается равным позиция с наибольшим количеством позиций



a)



b)

Рис. 11 – Якорі для трилатерації (a), розраховані позиції об'єктів (b)

На выбор размера окна влияют несколько факторов [4]:

$$k = 1 + \log_2 n \quad (8),$$

где:  $k$  – количество групп;

$n$  – количество объектов.

Ширина и высота окна рассчитываются по формулам:

$$Width = \frac{\max(DOT(x)) - \min(DOT(x))}{k} \quad (9),$$

$$Height = \frac{\max(DOT(y)) - \min(DOT(y))}{k} \quad (10),$$

где:

$\max(DOT(x))$  – рассчитанная позиция с наибольшим значением координаты  $x$ ;

$\min(DOT(x))$  – рассчитанная позиция с наименьшим значением координаты  $x$ ;

$\max(DOT(y))$  – рассчитанная позиция с наибольшим значением координаты  $y$ ;

$\min(DOT(y))$  – рассчитанная позиция с наименьшим значением координаты  $y$ .

Окно размещается в центре каждого расчетного положения и определяется количество рассчитанных точек в окне. Выбирается размещение окна с максимальным количеством расчетных точек в нем.

Преимущество этого алгоритма заключается в том, что погрешность должна уменьшаться с увеличением количества якорей. Точность измерения зависит от

внутри окна. Три якоря, которые дали эту позицию, является окончательным результатом (рис. 11).

точности якорей: если большинство якорей дают неправильный результат, то выбирается неправильный результат.

Недостатком этого алгоритма является также большое количество вычислений, которые нужно сделать.

Равносторонний алгоритм состоит в поиске и выборе треугольника якорей, углы которого близки к  $60^\circ$  [5]. Для сравнения различных треугольников в качестве критерия можно использовать сумму синусов углов треугольника [6]. Равносторонний треугольник имеет наибольшую сумму синусов углов. Также можно использовать критерии «углового разведения точности» (Angle Dilution of Precision - ADOP). Чем выше ADOP, тем более треугольник близок к равностороннему:

$$ADOP = \sum_{i=0}^2 \sin(\varphi_i) \quad (11)$$

Точность определения местоположения объекта в случае равномерного расположения якорей вокруг него будет максимальной. Однако, существует высокая вероятность ситуации, когда данный алгоритм не может быть применен (рис. 12).

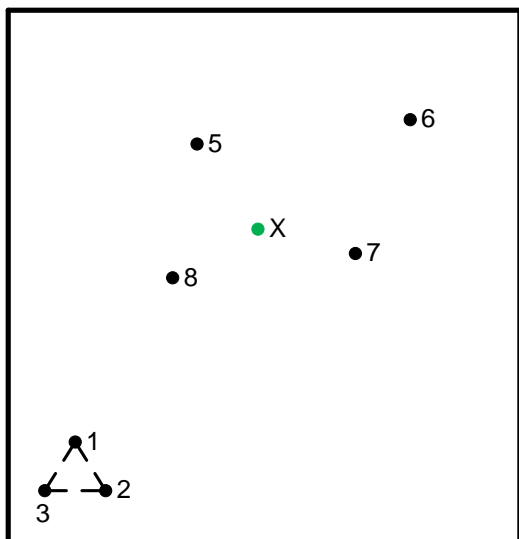


Рис. 12 - неэффективное расположение. X-реальное положение объекта. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 - якоря.

Треугольник, сформированный из якорей "1", "2", "3", является равносторонним и должен использоваться для трехсторонней обработки. Но эти якоря расположены близко друг к другу и далеко от реального положения объекта. Трилатерация приводит к большой ошибке, если эти якоря используются для расчета.

#### Результаты исследования.

Алгоритмы площади, мощности сигнала и угловой мощности сигнала показали лучший результат по времени определения локализации. Самым медленным оказался алгоритм плотности (рис.13)

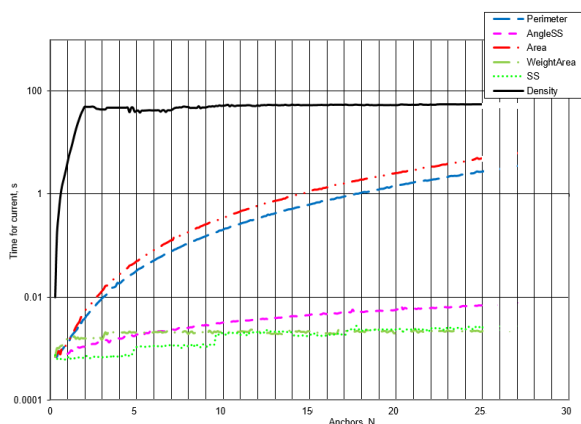


Рис. 13 – Время локализации по всем данным.

Наименьшую среднюю ошибку локализации дают алгоритмы веса площади

и угловой мощности сигнала (рис. 14).

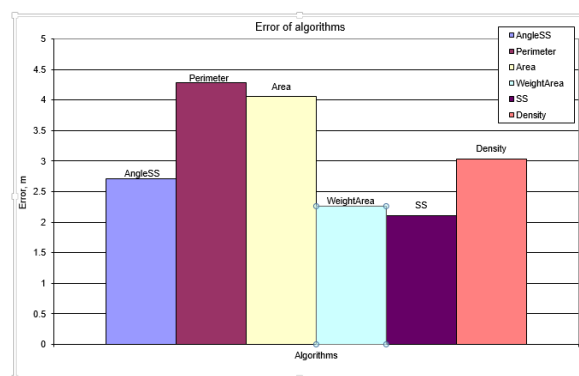


Рис. 14 – Средняя ошибка измерения.

**Выводы:** Проведено исследование проблемы выбора якорей для трилатерации. Предложено и проанализировано несколько алгоритмов улучшения локализации с использованием трилатерации. Моделирование и экспериментальная проверка эффективности и точности предлагаемых методов и алгоритмов показали следующее.

Алгоритм плотности требует огромного количества вычислений и времени, потому что он выполняет трилатерацию для всех возможных комбинаций треугольников. Средняя ошибка локализации составляет около 3 м (15%), и этот алгоритм не рекомендуется использовать в дальнейшем из-за времени вычислений и высокой погрешности.

Алгоритмы мощности, веса площади и угловой мощности показали очень хорошие результаты. Все время, необходимое для вычислений по всему множеству якорей, не менее, чем на порядок лучше, чем у конкурентов. Средняя ошибка локализации также невелика - 1,7 м (8.5%). Эти алгоритмы рекомендуются для дальнейшего использования в системах локализации.

Алгоритмы периметра и площади также можно использовать для локализации при небольшом количестве якорей.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на увеличение скорости вычисления геометрического снижения точности (GDOP).

**References:**

- [1] Yogendra J. Patil – Self-calibrating cricket motes for indoor navigation.– SenSys '06 Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems, 2006.
- [2] Artemenko O., Schorcht G., Tarasov M. – A refinement scheme for location estimation process in indoor wireless sensor networks., – IEEE Global Communications Conference (IEEE GLOBECOM 2010), Workshop on Heterogeneous, Multi-Hop, Wireless and Mobile Networks (HeterWMN), Miami, USA, 6th - 10th December 2010.
- [3] Langley Richard B. – Dilution of Precision., – GPS World, May 1999.
- [4] Faria Daniel B. – Modeling signal Attenuation in. – IEEE 802.11 Wireless LANs Vol.1, 2008.
- [5] Trilateration basic. [Electronic resource] – Mode of access to the site: <http://en.wikipedia.org/wiki/Trilateration>
- [6] Guangjie Han, Deokjai Choi, Wontae k Lim – Reference node placement and selection algorithm based on trilateration for indoor sensor networks.– Wirel. Commun. Mob. Comput. 2009; 9:1017–1027

## ДОДАТОК 2.

## Лістинг коду основних функцій програми (Arduino).

## 1. Вычисление мощности сигнала, принимаемого от маршрутизатора.

```

#include <SPI.h>
#include <WiFi.h>

//SSID-имя wi-fi сети
char ssid[] = "myNetwork";
//пароль WPA-сети
char pass[] = "myPassword";

void setup()
{
  WiFi.begin(ssid, pass);

  if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    Serial.println("Couldn't get a wifi connection");
    while(true);
  }
  // если устройство подключено к WiFi-сети, то выводим информацию о
соединении:
  else {
    // выводим мощность принимаемого сигнала:
    long rssi = WiFi.RSSI();
    Serial.print("RSSI:");
    Serial.println(rssi);
  }
}

void loop () {}

```

## 2. Соединение клиента Arduino с указанным IP-адресом через определенный порт.

```

#include <SPI.h>
#include <WiFi.h>

char ssid[] = "myNetwork";           // SSID-имя сети (name)
char pass[] = "myPassword";         // пароль сети

int status = WL_IDLE_STATUS;
IPAddress server(74,125,115,105);    // Google

// Инициализируем объект client
WiFiClient client;

```

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Attempting to connect to WPA network...");
  Serial.print("SSID: ");
  Serial.println(ssid);

  status = WiFi.begin(ssid, pass);
  if ( status != WL_CONNECTED) {
    Serial.println("Couldn't get a wifi connection");
    // больше ничего не делаем:
    while(true);
  }
  else {
    Serial.println("Connected to wifi");
    Serial.println("\nStarting connection...");
    // в случае успешного подключения - сообщаем об этом через последовательный порт:
    if (client.connect(server, 80)) {
      Serial.println("connected");
      // посылаем HTTP-запрос:
      client.println("GET /search?q=arduino HTTP/1.0");
      client.println();
    }
  }
}

void loop() {

}
```