



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Comunicaciones

Análisis y mejoras en algoritmos para posicionamiento y  
localización basado en Ultra-Wide Band

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Tecnologías, Sistemas y Redes de  
Comunicaciones

AUTOR/A: Ge, Yujun

Tutor/a: Sempere Paya, Víctor Miguel

Cotutor/a externo: Todolí Ferrandis, David

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



## **Análisis y mejoras en algoritmos para posicionamiento y localización basado en Ultra-Wide Band**

**Autor: Yujun Ge**  
**Tutor: Víctor Miguel Sempere Payá**  
**Cotutor: David Todolí Ferrandis**



## Resumen

El sistema de posicionamiento por satélite de Estados Unidos (*GPS*) y el sistema de navegación por satélite chino (*Beidou*) brindan el respaldo tecnológico para servicios de navegación y posicionamiento en exteriores. Este método de posicionamiento basado en señales satelitales es maduro tecnológicamente, ofrece una alta precisión de ubicación, tiene una buena capacidad en tiempo real y es resistente a interferencias. Sin embargo, debido a que las señales satelitales pueden ser obstruidas y el entorno interior es complejo y variable, este método no puede aplicarse en interiores.

No obstante, la creciente demanda de posicionamiento en entornos interiores, como la planificación de rutas en estacionamientos subterráneos, la guía de compras en centros comerciales y las operaciones de rescate en caso de incendios, ha impulsado el desarrollo de la tecnología de posicionamiento en interiores. La realización de una ubicación precisa y confiable en interiores se ha convertido en un enfoque clave de investigación en los últimos años. Entre las tecnologías emergentes, la tecnología de posicionamiento por *Ultra Wideband (UWB)* se destaca por su alta precisión, bajo consumo de energía y resistencia a interferencias, ganando cada vez más atención y aplicación.

El propósito de este artículo es comparar y analizar las tecnologías de posicionamiento comúnmente utilizadas, centrándose especialmente en la aplicación de la tecnología de posicionamiento *UWB* en este campo. Se busca verificar la viabilidad y precisión mediante simulaciones y experimentos diseñados para este fin.



## Índice

Capítulo 1.	Introducción .....	5
1.1	Contexto del posicionamiento <i>indoor</i> .....	5
1.2	Importancia y aplicaciones de la tecnología de posicionamiento .....	5
1.3	Objetivos del trabajo .....	5
Capítulo 2.	Tecnologías de posicionamiento <i>indoor</i> : Una comparación .....	6
2.1	Tecnología <i>UWB</i> .....	6
2.2	Tecnología 5G .....	6
2.3	Tecnología Bluetooth .....	7
2.4	Tecnología <i>WiFi</i> .....	8
2.5	Otras tecnologías .....	8
2.5.1	Tecnología RFID .....	8
2.5.2	Tecnología ZigBee .....	9
2.5.3	Tecnología Ultrasónico .....	9
2.5.4	Tecnología Infrarrojos .....	10
2.5.5	Tecnología LiFi .....	10
2.6	Comparación de las tecnologías: Ventajas y desventajas .....	11
Capítulo 3.	Tecnología de posicionamiento <i>indoor</i> con <i>UWB</i> .....	12
3.1	Principios de la tecnología <i>UWB</i> .....	12
3.1.1	. Definición de Ultra Wide Band .....	12
3.1.2	Características técnicas de <i>UWB</i> .....	13
3.2	Componentes y requisitos del sistema <i>UWB</i> .....	15
3.3	Algoritmos de posicionamiento utilizados .....	17
3.3.1	ToA .....	17
3.3.2	TDoA .....	18
3.3.3	AoA .....	19
3.3.4	Fusión de algoritmos .....	20
3.4	Arquitectura del sistema <i>UWB</i> .....	22
3.4.1	Capa de detección .....	22
3.4.2	Capa de transmisión .....	22
3.4.3	Capa de servicio .....	22
3.4.4	Capa de aplicación .....	23
3.4.5	Soporte de hardware para el sistema de posicionamiento <i>UWB</i> .....	23



3.5	Ventajas y desafíos del uso de <i>UWB</i> para posicionamiento <i>indoor</i> .....	23
Capítulo 4.	Pruebas de simulación .....	25
4.1	Diseño experimental de las pruebas .....	25
4.1.1	TDoA.....	25
4.1.2	AoA .....	26
4.1.3	ToA .....	27
4.1.4	Algoritmo de fusión TDoA y AoA.....	28
4.1.5	Algoritmo de fusión TDoA y ToA.....	29
4.1.6	Algoritmo de fusión ToA y AoA .....	30
4.2	Resultados y análisis de las pruebas de simulación .....	31
4.2.1	TDoA.....	31
4.2.2	AoA .....	32
4.2.3	ToA .....	33
4.2.4	Algoritmo de fusión TDoA y AoA.....	33
4.2.5	Algoritmo de fusión TDoA y ToA.....	34
4.2.6	Algoritmo de fusión ToA y AoA .....	35
4.3	Comparativa de algoritmos .....	36
Capítulo 5.	Conclusiones y perspectivas.....	37
	Agradecimientos .....	38
	Bibliografía .....	39
Anexos.....		42

## Capítulo 1. Introducción

### 1.1 Contexto del posicionamiento *indoor*

El posicionamiento *indoor* se refiere a la realización de la localización de posición en entornos interiores. Cuando no se puede utilizar la localización por satélite en entornos interiores, la tecnología de localización en interiores sirve como localización auxiliar de la satelital, resolviendo el problema de que la señal del satélite es débil cuando llega al suelo y no puede penetrar edificaciones, localizando finalmente la posición actual del objeto. Las tecnologías comunes de localización en interiores incluyen *WiFi*, Bluetooth, tecnología de localización celular (5G), *UWB*, *RFID*, infrarrojo, captura de movimiento, ZigBee y ultrasonido. La aplicación de El posicionamiento *indoor* es muy extensa y juega un papel vital en campos como la manufactura, la logística, el transporte inteligente y el desarrollo de ciudades inteligentes 错误!未找到引用源。 .

### 1.2 Importancia y aplicaciones de la tecnología de posicionamiento

En el ámbito comercial, la tecnología de posicionamiento en interiores ofrece la posibilidad de servicios de guía de compras y posicionamiento preciso en supermercados, centros comerciales y otros lugares, permitiendo a los comerciantes ofrecer servicios y estrategias de promoción más personalizados, adaptados a la ubicación específica de los clientes.

En el campo médico, la tecnología de posicionamiento en interiores se emplea para el posicionamiento y monitoreo de pacientes en hospitales, residencias de ancianos y otros entornos de atención médica. Esto contribuye significativamente a mejorar la seguridad y la salud del paciente al proporcionar información en tiempo real sobre la ubicación y el estado de los pacientes.

En el ámbito educativo, la tecnología de posicionamiento en interiores se convierte en una herramienta valiosa para monitorear la ubicación de los estudiantes, lo que no solo mejora su seguridad al permitir respuestas rápidas en situaciones de emergencia, sino que también puede aumentar la eficacia de la enseñanza al ofrecer datos sobre el movimiento y la participación de los estudiantes en el entorno educativo.

En el campo de la investigación, la tecnología de posicionamiento en interiores se utiliza para estudiar y analizar el comportamiento y las actividades de las personas en entornos cerrados. Esto es crucial para diseñar espacios interiores más humanos y adaptados a las necesidades de las personas. Además, la investigación en tecnología de posicionamiento en interiores impulsa el desarrollo de campos como Internet de las cosas, inteligencia artificial y robótica, brindando servicios y experiencias de vida más inteligentes a la sociedad.

En resumen, la investigación y aplicación de la tecnología de posicionamiento en interiores tienen una importancia académica significativa y desempeñan un papel crucial en el progreso y desarrollo de la sociedad humana, influyendo en diversos sectores como el comercial, médico, educativo y de investigación.

### 1.3 Objetivos del trabajo

El objetivo principal de este estudio incluye un análisis comparativo de los efectos de aplicación, ventajas y desventajas de diferentes tecnologías de posicionamiento en interiores, como el posicionamiento 5G, el posicionamiento por Bluetooth, el posicionamiento por *WiFi*, el posicionamiento por *UWB*, etc., y una exploración en profundidad de los principios y métodos de implementación de Tecnología de posicionamiento *UWB*, y diseño e implementación de un sistema de simulación. Construya una plataforma experimental de posicionamiento *UWB* y verifique la tecnología de posicionamiento *UWB* mediante análisis de resultados de experimentos y simulaciones.

## Capítulo 2. Tecnologías de posicionamiento *indoor*: Una comparación

### 2.1 Tecnología *UWB*

La tecnología de posicionamiento *UWB* (banda ultra ancha) es una tecnología de posicionamiento de alta precisión basada en señales de banda ultra ancha. Su principio básico es calcular con precisión la posición del objeto objetivo midiendo la pequeña diferencia de retardo en la propagación de la señal en el espacio.

En comparación con la tecnología de comunicación inalámbrica tradicional, la tecnología *UWB* utiliza una banda de frecuencia extremadamente amplia, que normalmente supera los 500 MHz. Esto es diferente de la forma en que la tecnología tradicional utiliza solo bandas de frecuencia limitadas para transmitir datos. La tecnología *UWB* puede utilizar simultáneamente cientos de bandas de frecuencia para enviar y recibir señales rápidas de pulso corto. Estas señales de pulso son extremadamente cortas en el dominio del tiempo, generalmente desde unos pocos nanosegundos hasta cientos de picosegundos [2].

El principio de posicionamiento de la tecnología *UWB* se basa en medir el tiempo de llegada de la señal para calcular la distancia exacta entre el objeto y la estación base. Cuando se envía una señal *UWB* desde una estación base a un objeto objetivo y luego se refleja en el objeto de regreso a la estación base, la estación base puede medir con precisión el retardo de tiempo de la señal. Debido a que las señales *UWB* se propagan extremadamente rápido, la precisión de la medición es muy alta [3].

Para lograr un posicionamiento de alta precisión, generalmente es necesario distribuir varias estaciones base en el espacio para comunicarse con los objetos. Midiendo la diferencia de latencia entre el objeto y varias estaciones base y aplicando métodos como la triangulación o el efecto Doppler, el sistema es capaz de calcular la ubicación exacta del objeto [3].

La tecnología de posicionamiento *UWB* tiene múltiples ventajas. En primer lugar, logra un posicionamiento de alta precisión excepcional, normalmente en el rango de unos pocos centímetros a unos pocos milímetros. En segundo lugar, las señales *UWB* tienen una gran capacidad de penetración en entornos complejos y pueden funcionar de forma fiable en entornos interiores, exteriores y con interferencias de trayectos múltiples. Además, el bajo consumo de energía de la señal *UWB* y la baja interferencia con otros dispositivos de comunicación inalámbrica la convierten en una solución de posicionamiento ideal [4].

La tecnología *UWB* tiene amplias perspectivas de aplicación en navegación en interiores, hogares inteligentes, conducción autónoma de vehículos, seguimiento de objetos de valor y otros campos. Por ejemplo, en la navegación en interiores, la tecnología *UWB* se puede utilizar para lograr un posicionamiento y una navegación del personal de alta precisión y mejorar la precisión del destino. En la conducción de vehículos autónomos, la tecnología *UWB* puede lograr un posicionamiento de alta precisión del vehículo y el entorno circundante y evitar obstáculos [4].

En general, la tecnología de posicionamiento *UWB* ofrece nuevas posibilidades para muchos campos con sus ventajas de señales de *UWB*, posicionamiento de alta precisión, fuerte robustez ante las interferencias y bajo consumo de energía, y crea nuevas oportunidades para lograr un posicionamiento confiable y de alta precisión.

### 2.2 Tecnología 5G

3GPP Release16 (Rel-16) introduce capacidades de posicionamiento en el estándar 5G por primera vez, lo que requiere una precisión de posicionamiento 5G para alcanzar los 3 metros (80% de precisión) en interiores y 10 metros (80% de precisión) en exteriores para cumplir con los requisitos de nivel de medidor en comerciales. Escenarios Necesidades de posicionamiento. La versión Rel-16 presenta una serie de soluciones de posicionamiento para 5G, incluida la diferencia horaria de llegada del enlace descendente (DL-*TD<sub>o</sub>A*), la diferencia horaria de llegada del enlace

ascendente (UL-*TD $\theta$ A*), el ángulo de salida del enlace descendente (DL-AOD) y el ángulo del enlace ascendente. de llegada (UL-A $\theta$ A), tiempo de viaje de ida y vuelta múltiple (multi-RTT) e identificación de celda mejorada (E-CID) [5-7].

En Rel-17, se cancela la diferencia entre los requisitos de precisión de posicionamiento en interiores y exteriores, y los requisitos de precisión de posicionamiento se aumentan a una precisión horizontal de 1 metro (90% de precisión) y una precisión vertical de 3 metros (90% de precisión). Además, para industrias verticales como Internet de las cosas (*IoT*) e Internet de los vehículos (V2X), se proponen requisitos para mejorar el posicionamiento, incluida una precisión horizontal de 0,2 metros (90% de precisión), una precisión vertical de 1 metro (90% de precisión) y una latencia de 100 milisegundos [6-8].

En Rel-18, se centra en resolver los problemas de bajo consumo de energía y posicionamiento de terminales de alta precisión, y estudia la viabilidad de mejorar la precisión del posicionamiento mediante la agregación de portadoras [9].

En general, las redes 5G tienen algunas ventajas naturales en la tecnología de posicionamiento, incluido un gran ancho de banda (alta resolución temporal), el uso de tecnología masiva de múltiples entradas y múltiples salidas (mMIMO) y haces de mayor resolución, que pueden lograr un rango y ángulo más precisos.

### 2.3 Tecnología Bluetooth

La tecnología Bluetooth, como una forma de comunicación inalámbrica de corta distancia, se originó en Ericsson en 1994. Tras años de evolución, ha llegado a la versión Bluetooth 4.0, que combina la tradicional con la de bajo consumo. Esta especificación técnica permite la comunicación inalámbrica en distancias cortas entre dispositivos que sigan dicha normativa. Bluetooth 4.0 integra las variantes tradicionales, de alta velocidad y de bajo consumo, destacando el rendimiento de bajo consumo durante la transmisión de datos. Esta tecnología se ha convertido en la forma más simple y efectiva de comunicación inalámbrica entre dispositivos a corta distancia, siendo también el estándar inalámbrico más amplio y funcional del mercado [10].

iBeacon, como un dispositivo de baliza, fue propuesto por Apple en 2013. Esta tecnología incorpora un módulo Bluetooth de bajo consumo en un pequeño dispositivo de hardware, convirtiéndolo en una estación base Bluetooth. Cuando un dispositivo terminal entra en el área cubierta por la señal de la estación base Bluetooth, la aplicación del dispositivo terminal escanea la intensidad de la señal y otros datos de transmisión de la estación base. Al colocar múltiples dispositivos de estación base Bluetooth de manera adecuada, se puede formar una red de cobertura de señal Bluetooth de gran área. Cuando un dispositivo terminal ingresa a esta red y obtiene datos de transmisión de múltiples estaciones base Bluetooth, puede utilizar estos datos para cálculos de posicionamiento. Sin embargo, debido a que las señales de Bluetooth son fácilmente afectadas por el entorno interior, la señal recibida puede volverse inestable, afectando la precisión de los resultados de posicionamiento.

Para superar este problema, los investigadores han propuesto diversos métodos de mejora. En 2013, Chen L. y otros propusieron un método de fusión bayesiana (BF) que combina información estadística del RSS Bluetooth medido con información previa en el modelo de movimiento. Sin embargo, el método BF depende de mapas predefinidos y no considera cómo extraer el RSS Bluetooth efectivo del ruido, resultando en una mejora limitada en la precisión del posicionamiento, con una precisión promedio de alrededor de 4.7 metros. En 2016, Juri A. y otros propusieron un posicionamiento en interiores basado en señales tolerantes a fallas con reconocimiento de interferencias (OASLTIP), que combina múltiples tecnologías para ofrecer el mejor rendimiento de seguimiento, considerando los obstáculos en el entorno y siendo capaz de manejar la pérdida de señal. Utilizando un filtrado promedio en ejecución para suavizar los datos de la señal recibida y un filtrado múltiple para encontrar la posición de medición de la etiqueta, el sistema logró un error promedio de 2.29 metros en un entorno de oficina congestionado. En 2017, Zhou C. y otros propusieron un método para lograr el posicionamiento en interiores basado



en Bluetooth mediante agrupación y distribución de probabilidad. Este método requiere entrenar primero el modelo de propagación de señales Bluetooth del lugar de posicionamiento. Durante el posicionamiento, se utilizan el método de mínimos cuadrados y el posicionamiento de cuatro lados para calcular los valores medidos de la ubicación del punto. La precisión de posicionamiento de este método alcanza el nivel de la habitación. En 2018, Yoon J. y otros propusieron un nuevo algoritmo ponderado debido a la precisión limitada del algoritmo de posicionamiento trilateral. Para compensar las limitaciones del algoritmo de posicionamiento trilateral, al comparar la precisión con datos de medición reales, los experimentos demostraron que la información de posición obtenida por el algoritmo ponderado tiene una tasa de error menor que el algoritmo de posicionamiento tradicional de tres lados. En 2019, Martins P. y otros propusieron un método de posicionamiento basado en balizas Bluetooth, basado en la medición de la intensidad de la señal de cada baliza a una distancia crítica, permitiendo el uso de diferentes tipos de balizas, marcas y condiciones/limitaciones de ubicación. Dependiendo de la situación, la curva de medición de distancia se puede ajustar para minimizar errores y admitir distancias más largas manteniendo una buena precisión. Los resultados experimentales muestran que el error BLE es inferior a 1.5 metros aproximadamente el 90% del tiempo [11-15].

## 2.4 Tecnología WiFi

*WiFi* es una tecnología de comunicación inalámbrica basada en el estándar IEEE802.11, que puede operar en las bandas de frecuencia de 2.4GHz o 5GHz, destacándose por su amplia cobertura y alta escalabilidad. Su velocidad de transmisión alcanza hasta 11Mbps. En el contexto de sistemas de posicionamiento en interiores basados en tecnología *WiFi*, varios puntos de acceso (AP) inalámbricos colaboran para determinar con precisión la ubicación de un objetivo dentro de un espacio interior. Los métodos de localización más prominentes incluyen la identificación de huellas dactilares y el modelado de atenuación de la transmisión de señales [16].

RADAR es uno de los pioneros en sistemas de posicionamiento en interiores basado en *WiFi*. Para mejorar la precisión del posicionamiento, introduce factores de atenuación de paredes y del piso, permitiendo el seguimiento de múltiples objetivos de posicionamiento. Por otro lado, el sistema de posicionamiento Ekahau está diseñado específicamente para aplicaciones comerciales, compuesto por AP inalámbricos, etiquetas, planos del ambiente interior y software de posicionamiento. Los usuarios portan o colocan las etiquetas, y el sistema detecta las señales en diferentes AP, utilizando la triangulación para estimar las coordenadas bidimensionales de posición del objetivo [17-18].

En la actualidad, la cobertura de redes *WiFi* está extendida en la mayoría de los lugares. Los usuarios pueden buscar señales *WiFi* en cualquier momento a través de sus teléfonos inteligentes e incluso utilizar puntos de acceso compartidos como fuente de datos. La tecnología *WiFi* se ha consolidado como líder en el posicionamiento en interiores, gracias a sus ventajas como alta escalabilidad, instalación sin necesidad de equipos adicionales, alta velocidad y transmisión sin línea de visión. Sin embargo, es importante destacar que, debido a la influencia del entorno, el posicionamiento puede experimentar variaciones.

## 2.5 Otras tecnologías

### 2.5.1 Tecnología RFID

La tecnología de posicionamiento *RFID* es adecuada para el posicionamiento de ubicación regional, es decir, a través de la tecnología *RFID* de 2.4G y 125K de baja frecuencia, se puede lograr la identificación y gestión del posicionamiento de personas y objetos. El posicionamiento *RFID* implica principalmente leer la información característica relevante de la etiqueta *RFID* medida. Este proceso se implementa a través de un conjunto de lectores fijos, y luego la ubicación específica de la etiqueta se calcula mediante métodos relevantes, como la intensidad de la señal recibida, entre otros.

Los métodos de posicionamiento basados en *RFID* incluyen el algoritmo de posicionamiento de objetivos estáticos en interiores y el algoritmo de posicionamiento de objetivos dinámicos en interiores. Los algoritmos de posicionamiento de objetivos estáticos en interiores incluyen algoritmos de posicionamiento de rango y algoritmos de posicionamiento sin rango. Por ejemplo, el algoritmo de posicionamiento de nodos de recuento de saltos de vector de distancia, el algoritmo de posicionamiento de centroide y el algoritmo de posicionamiento de *k*-vecinos, entre otros. Los algoritmos de posicionamiento dinámico de objetivos incluyen el algoritmo de rango de diferencia de fase en el dominio del tiempo, el algoritmo de rango de diferencia de fase en el dominio de la frecuencia y el algoritmo de rango de diferencia de fase en el dominio espacial, entre otros.

La tecnología de posicionamiento *RFID* tiene un amplio rango de transmisión de señales, bajo costo de aplicación, ventajas sin contacto y sin línea de visión, y es adecuada para el posicionamiento en interiores. Sin embargo, debido al alcance limitado de esta tecnología, la falta de capacidades de comunicación y la mala integración con otros sistemas, el posicionamiento no es lo suficientemente preciso [19].

### 2.5.2 Tecnología ZigBee

La tecnología de posicionamiento ZigBee se basa en el protocolo de comunicación inalámbrica ZigBee. Cada nodo del dispositivo se comunica de forma inalámbrica con un bajo consumo de energía y utiliza algoritmos de posicionamiento como el alcance *RSSI* y las huellas dactilares de ubicación para localizar el nodo objetivo. Esta tecnología tiene buena escalabilidad y confiabilidad, así como alto rendimiento y precisión en tiempo real, y es muy adecuada para escenarios de posicionamiento en interiores.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que la tecnología ZigBee es susceptible a interferencias del entorno externo. Factores como la estructura del edificio y la atenuación de la señal afectarán la estabilidad de la señal. Además, la precisión del posicionamiento de la tecnología ZigBee también depende del rendimiento del algoritmo de posicionamiento utilizado. Por lo tanto, al utilizar el posicionamiento ZigBee, es necesario considerar de manera integral múltiples factores, incluidos factores ambientales y la selección de algoritmos, para mejorar la precisión del posicionamiento [20].

### 2.5.3 Tecnología Ultrasónico

El principio del posicionamiento ultrasónico se basa en la tecnología de alcance ultrasónico, que utiliza principalmente el método de alcance por reflexión. En el proceso de posicionamiento, en primer lugar, un generador de ondas sonoras fijado en el objeto a medir envía periódicamente señales de la misma frecuencia a etiquetas electrónicas con posiciones conocidas. Al recibir la misma señal en diferentes momentos, se puede calcular la distancia de correlación entre ellas para determinar las coordenadas de posicionamiento del objetivo.

Por lo general, la medición ultrasónica utiliza el método de detección del tiempo de propagación, en el que la distancia de transmisión de la onda ultrasónica es igual al producto del tiempo de propagación ultrasónica y la velocidad de propagación de la onda ultrasónica en el aire. Al utilizar un algoritmo de posicionamiento para combinar múltiples conjuntos de datos de distancia medidos por ondas ultrasónicas, se pueden calcular las coordenadas de posición específicas del objeto posicionado. El posicionamiento ultrasónico se implementa principalmente utilizando el algoritmo de posicionamiento *ToA* (Tiempo de llegada) y el algoritmo de posicionamiento *TDoA* (Diferencia de tiempo de llegada).

Este método tiene las ventajas de bajo costo, bajo consumo de energía y una considerable precisión de posicionamiento. Sin embargo, en entornos complejos, el efecto de posicionamiento puede verse afectado hasta cierto punto [21].

#### 2.5.4 Tecnología Infrarrojos

La tecnología de posicionamiento en interiores mediante infrarrojos representa una de las primeras aproximaciones empleadas en este ámbito. Actualmente, se distinguen dos métodos principales de posicionamiento por infrarrojos: en el primero, se instala un sensor óptico en el entorno interior que capta señales de infrarrojos emitidas por un transmisor colocado en el objeto a medir, permitiendo la determinación precisa de la posición del objeto. En el segundo método, se colocan múltiples conjuntos de emisores y receptores en la zona de interés, estableciendo una red de infrarrojos que abarca todo el espacio para la localización de objetos en movimiento. El sistema *Active Badge* ejemplifica un sistema temprano de posicionamiento implementado mediante tecnología infrarroja.

A pesar de la notable madurez de la tecnología infrarroja, que posibilita un posicionamiento en interiores altamente preciso, sus limitaciones radican en la incapacidad de la luz infrarroja para atravesar obstáculos, limitando su propagación a cortas distancias y dentro del campo de visión directa. Además, los rayos infrarrojos son susceptibles a factores ambientales, como la iluminación y los retrasos. El diseño y la instalación de receptores de infrarrojos implican complejidades y costos elevados, lo que restringe la aplicabilidad de la tecnología de posicionamiento por infrarrojos. Este enfoque tecnológico se emplea comúnmente en entornos experimentales de pequeña escala, donde se lleva a cabo el seguimiento de la trayectoria de objetos simples y la determinación precisa de la posición de robots inteligentes en entornos interiores [22].

#### 2.5.5 Tecnología LiFi

La tecnología *LiFi* es una forma de comunicación inalámbrica que utiliza luz visible (*VLC*) para transmitir datos. Emplea señales de luz visible intermitente emitidas por bombillas *LED*. La tecnología *LiFi* destaca por su mayor ancho de banda y menor interferencia en comparación con la tecnología *WiFi* tradicional, lo que la convierte en una posible solución para el posicionamiento en interiores.

El posicionamiento en interiores basado en la tecnología *LiFi* se apoya principalmente en receptores para decodificar y procesar las señales *LiFi*. Para lograr el posicionamiento en interiores, el receptor recopila señales de bombillas *LED* en diversas ubicaciones y las procesa mediante algoritmos para analizar información como el tiempo de propagación de la señal, la intensidad de la luz, y la intensidad de la señal. Estos datos permiten determinar la posición del receptor con alta precisión. En comparación con los métodos tradicionales de posicionamiento en interiores, la tecnología *LiFi* ofrece ventajas significativas, como alta precisión, baja interferencia y alta seguridad.

A pesar de estas ventajas, el posicionamiento en interiores basado en tecnología *LiFi* enfrenta desafíos. En primer lugar, el costo de implementar la tecnología *LiFi* es relativamente alto, ya que requiere un gran número de bombillas *LED* y dispositivos receptores para abarcar todo el espacio interior. En segundo lugar, debido a la complejidad de los entornos interiores, la presencia de obstáculos como paredes y muebles puede afectar la transmisión de la señal *LiFi*. Por tanto, se necesita más investigación y optimización para mejorar el rendimiento del posicionamiento *LiFi* en interiores [23-24].

## 2.6 Comparación de las tecnologías: Ventajas y desventajas

Tecnología de posicionamiento	Precisión de posicionamiento	Ventajas	Desventajas
<i>UWB</i>	10 cm – 50 cm	Fuerte penetración, alta precisión, bajo consumo de energía.	Alto costo
Bluetooth	1 m – 3 m	Bajo consumo de energía, fácil de integrar	Distancia corta, poca estabilidad, susceptible a interferencias de ruido.
<i>WiFi</i>	3 m – 10 m	Fácil de instalar, alta precisión general del sistema	El establecimiento de la biblioteca de funciones supone una gran carga de trabajo, se ve afectado por otras señales y requiere calibración.
<i>RFID</i>	3 m – 10 m	Alta precisión, bajo costo, tamaño de marcado pequeño	La distancia es corta, el logo no tiene capacidad de comunicación y no es fácil de integrar.
ZigBee	3 m – 5 m	Bajo consumo de energía, bajo costo.	Baja estabilidad y susceptible a interferencias ambientales.
Ultrasónico	1 m – 10 m	Alta precisión general y estructura simple.	Efecto multipath, atenuación obvia, afectado por la temperatura, alto costo.
Infrarrojos	5 m – 10 m	Alta precisión.	Incapaz de atravesar obstáculos, alto costo, alto consumo de energía y susceptible a interferencias de luz.
<i>LiFi</i>	0.5 m – 1 m	Alta precisión, baja interferencia, alta seguridad.	El alto costo y el entorno complejo tienen un impacto en la transmisión de señales.

Table 1. Comparación de tecnologías de posicionamiento en interiores.

En general, las tecnologías de posicionamiento en interiores presentan ventajas y desventajas únicas en distintos aspectos. La tecnología de *UWB* destaca por su gran precisión, penetración y bajo consumo, pero su coste es relativamente alto. La tecnología Bluetooth tiene las ventajas de un bajo consumo de energía y una fácil integración, pero está limitada por una corta distancia de transmisión y una escasa estabilidad. La tecnología *WiFi* destaca por su precisión general y su fácil instalación, pero tiene que hacer frente a las interferencias de otras señales y es engorrosa de instalar. La tecnología *RFID* tiene las ventajas de una alta precisión, un bajo coste y un tamaño reducido, pero es difícil de integrar debido a la corta distancia de comunicación. La tecnología ZigBee tiene las ventajas de La tecnología ZigBee tiene las ventajas del bajo consumo y coste, pero es más sensible a las interferencias ambientales. La tecnología ultrasónica ofrece buenos resultados en cuanto a precisión global y simplicidad estructural, pero debe afrontar los retos de los efectos multipath y los costes más elevados. La tecnología de infrarrojos tiene una gran precisión, pero está limitada por la incapacidad de atravesar obstáculos, su elevado coste y su gran consumo de energía, etc. La tecnología *LiFi* es conocida por su gran precisión, sus bajas interferencias y su alta seguridad, pero su coste es elevado y la transmisión de la señal en entornos complejos puede verse afectada en cierta medida.

Por lo tanto, a la hora de elegir la tecnología de posicionamiento en interiores, es necesario considerar exhaustivamente según los requisitos específicos del proyecto, el presupuesto y las características del escenario de aplicación para encontrar la solución más adecuada.

## Capítulo 3. Tecnología de posicionamiento *indoor* con *UWB*

### 3.1 Principios de la tecnología *UWB*

#### 3.1.1 . Definición de *Ultra Wide Band*

Las tecnologías tradicionales de transmisión inalámbrica suelen tener un ancho de banda limitado, generalmente por debajo de los 20 MHz. La disponibilidad limitada de recursos de espectro y las características de desvanecimiento de los múltiples trayectos del canal son los principales factores que restringen la velocidad de transmisión. Sin embargo, la tecnología de *UWB* se destaca por utilizar un ancho de banda que va desde los 500 MHz hasta varios gigahercios, lo que permite una transmisión de datos de alta velocidad. Esta tecnología puede ofrecer velocidades de transmisión de hasta 100 Mbit/s o incluso 1 Gbit/s en distancias de hasta 10 m, y puede coexistir con los sistemas inalámbricos de banda estrecha existentes.

La historia de la tecnología de *UWB* se remonta a la década de 1960, cuando se refería específicamente a la comunicación inalámbrica mediante señales de pulso estrecho no sinusoidal. En aquel entonces, se usaban varios términos como "banda base", "sin portadora" o "radio de pulso". Inicialmente, esta tecnología estaba estrictamente controlada por el ejército de los EE. UU. y se utilizaba principalmente para fines militares, como radares de alta potencia y comunicaciones seguras.

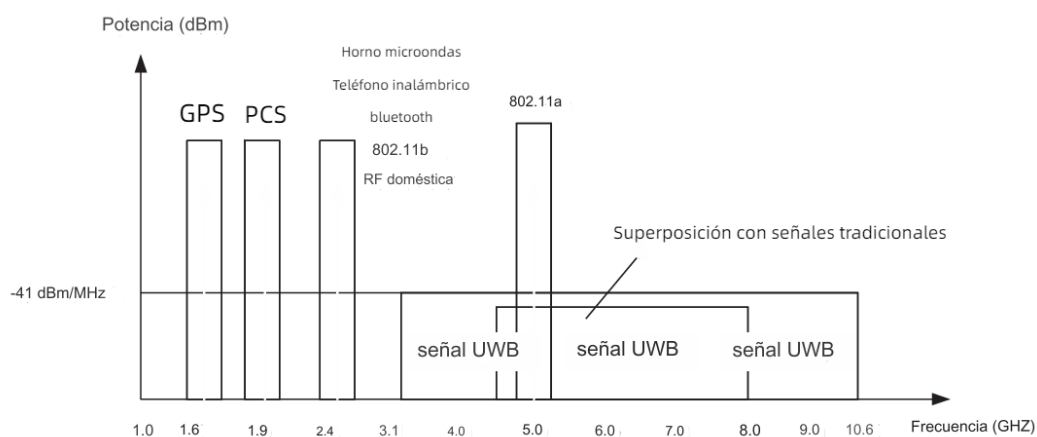


Figura 1. La relación entre el espectro *UWB* y otros espectros de señales inalámbricas.

En 1989, el Departamento de Defensa de EE. UU. adoptó el término "*UWB*" y estableció que una señal sería considerada de *UWB* si su ancho de banda absoluto a 20 dB era mayor que 1,5 GHz o si su ancho de banda relativo era superior al 25 %. Desde entonces, el término "*UWB*" se ha utilizado en la industria para referirse a una tecnología de radio con una alta relación de ancho de banda, sin especificar una implementación particular.

En febrero de 2002, la Comisión Federal de Comunicaciones (*FCC*) aprobó la aplicación de la tecnología de *UWB* a sistemas civiles, redefinió el concepto y asignó bandas de frecuencia sin licencia para su uso. A partir de entonces, la tecnología *UWB* comenzó a entrar en el ámbito civil.

A día de hoy, la definición de señales de *UWB* proporcionada por la *FCC* en 2002 todavía se basa en dos indicadores: el ancho de banda absoluto y el ancho de banda relativo.

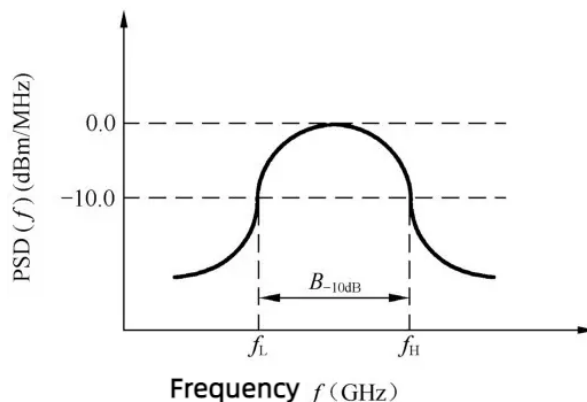


Figura 2. Definición de ancho de banda absoluto (PSD: Signal Power Spectral Density)

El ancho de banda absoluto se refiere a la diferencia entre la frecuencia de corte superior  $f_H$  y la frecuencia de corte inferior  $f_L$  correspondiente a un punto de caída a ambos lados del valor máximo del espectro de potencia de la señal. Por ejemplo, el ancho de banda absoluto de -10dB de la señal se muestra en la figura.

$$B - 10dB = f_H - f_L \quad (3.1.1)$$

En aplicaciones prácticas, el ancho de banda absoluto tiene diferentes opciones, como un ancho de banda absoluto de -3dB y un ancho de banda absoluto de -20dB.

El ancho de banda relativo se refiere a la relación entre el ancho de banda absoluto y la frecuencia central. Dado que los sistemas de *UWB* suelen utilizar señales de pulso estrecho sin modulación portadora sinusoidal para transportar información, la frecuencia central no es la frecuencia portadora en el sentido habitual, sino el valor medio  $(f_H + f_L)/2$  de los cortes superior e inferior. fuera de frecuencias. Por ejemplo, el ancho de banda relativo calculado con el ancho de banda absoluto de -10dB es

$$B_{Fractional} = \frac{B_{-10dB}}{(f_H + f_L)/2} = \frac{2(f_H - f_L)}{f_H + f_L} \quad (3.1.2)$$

La FCC estipula que las señales *UWB* son señales de radio con un ancho de banda absoluto  $B_{-10dB}$  superior a 500MHz o un ancho de banda relativo superior al 20%. De acuerdo con las regulaciones de la Parte 15 de la FCC, la banda de frecuencia sin licencia que el sistema de comunicación *UWB* puede usar es de 3,1 a 10,6 GHz, un ancho de banda total de 7,5 GHz. Para proteger los sistemas existentes (como los sistemas *GPS*, los sistemas celulares móviles, etc.), la potencia de transmisión total de las señales *UWB* en la banda de frecuencia de 3,1-10,6 GHz es de solo -2,55 dBm [25-26].

### 3.1.2 Características técnicas de *UWB*

#### (1) Alta tasa de transferencia

Dado que el sistema *UWB* utiliza un ancho de banda de hasta 500 MHz~7,5 GHz, según la fórmula de capacidad del canal de Shannon, incluso si la potencia de transmisión es muy baja, puede alcanzar una velocidad de transmisión de varios cientos de megabytes a 1 Gbit/s en una distancia corta. Por ejemplo, si se utiliza un ancho de banda de 7 GHz, incluso si la relación señal-ruido es tan baja como -10 dB, su capacidad de canal teórica puede llegar a 1 Gbit/s. Las curvas de energía de la señal de *UWB* y banda estrecha son las siguientes: se puede ver que la eficiencia energética de *UWB* es mucho mayor que la de banda estrecha, lo que permite que *UWB* transmita distancias más largas con una potencia de transmisión relativamente menor.



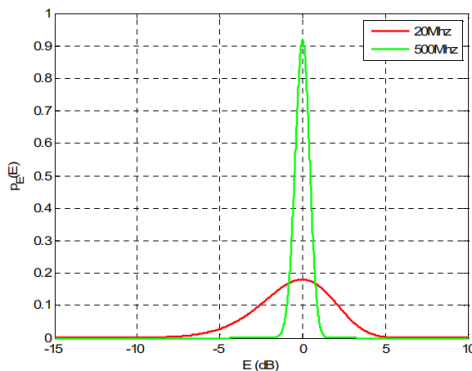


Figura 3. Curvas de energía de señal *UWB* y de banda estrecha

(2) Buena coexistencia de sistemas y alta seguridad en las comunicaciones

Dado que el límite superior de la densidad espectral de potencia transmitida del sistema *UWB* es de solo  $-41,3$  dBm/MHz, para el sistema tradicional de banda estrecha, la densidad espectral de la señal es incluso menor que el nivel de ruido de fondo. La interferencia puede considerarse como ruido blanco de banda ancha. Esto significa que el sistema *UWB* tiene una buena coexistencia con el sistema tradicional de banda estrecha, lo que es muy beneficioso para mejorar la utilización de los recursos de espectro inalámbrico cada vez más limitados. Al mismo tiempo, la densidad espectral de potencia extremadamente baja hace que las señales *UWB* sean muy ocultas y difíciles de interceptar, lo que también es muy beneficioso para mejorar la confidencialidad de las comunicaciones. La señal transportada por *UWB* se puede transmitir a una SNR más baja.

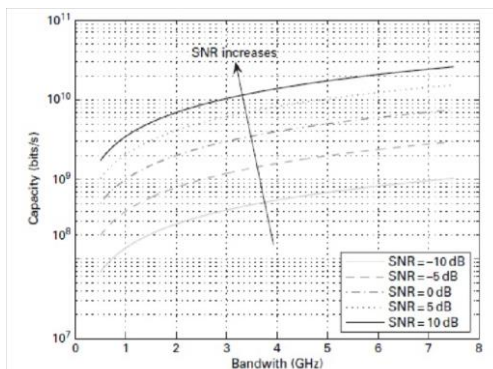


Figura 4. Relación entre capacidad, ancho de banda y SNR

(3) Alta resiliencia a los efectos del multipath

Dado que la señal *UWB* utiliza un pulso estrecho con una duración muy corta, sus capacidades de resolución de tiempo y espacio son muy fuertes. El ancho de pulso *UWB* generalmente está en el nivel de subnanosegundos, por lo que tiene capacidades de posicionamiento y rango de alta precisión de nivel centimétrico. Al mismo tiempo, la señal de pulso contiene ricos componentes de baja frecuencia (la banda de frecuencia central del sistema inicial es de 1 GHz), por lo que tiene una gran capacidad para penetrar la superficie del suelo, las paredes y otros objetos, y se puede colocar con precisión en interiores y subterráneo. Mediante la comunicación por radio de *UWB*, se pueden integrar el posicionamiento y la comunicación. La información de pulsos extremadamente cortos tiene una alta resolución multipath natural y una fuerte capacidad anti-multipath, por lo que tiene un rendimiento de transmisión superior en diversos entornos inalámbricos. Las señales *UWB* generalmente se transmiten a nivel de nanosegundos, y la resolución de tiempo de alta precisión admite un posicionamiento de mayor precisión. Como se muestra en la figura a continuación, la pérdida de ruta de *UWB* es  $\sim 7$  dBs menos que la de la comunicación de banda estrecha en la peor ruta.

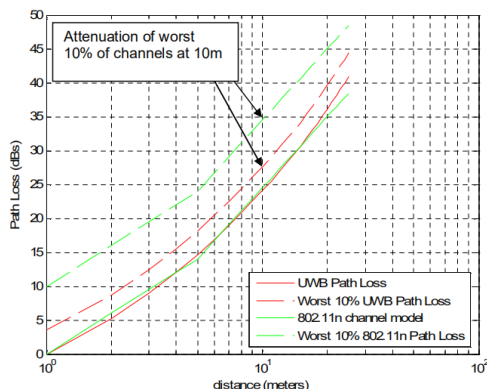


Figura 5. Pérdida de ruta UWB

#### (4) Corta distancia de comunicación

Las señales de *UWB* tienen componentes de frecuencia extremadamente ricos. Dado que los canales inalámbricos exhiben diferentes características de transmisión en diferentes bandas de frecuencia, las señales de alta frecuencia se desvanecen más rápido con el aumento de la distancia de transmisión, lo que conduce a una distorsión grave de las señales *UWB*, lo que afecta el rendimiento del sistema. Por lo tanto, el sistema *UWB* es más adecuado para comunicaciones de corta distancia. Los estudios han demostrado que cuando la distancia entre los transceptores es inferior a 10 m, la capacidad del canal del sistema *UWB* es mayor que la de los sistemas tradicionales de banda estrecha. Cuando la distancia entre los transceptores supera los 12 m, la ventaja del sistema *UWB* en la capacidad del canal ya no existirá.

#### (5) Tamaño pequeño, bajo consumo de energía

La tecnología *UWB* tradicional no necesita una portadora sinusoidal, los datos se modulan y transmiten en el pulso estrecho de banda base de nanosegundos, y el receptor usa el correlacionador para completar directamente la detección de la señal. El transceptor no requiere complejos circuitos y filtros de modulación y demodulación de frecuencia portadora. Por lo tanto, la complejidad del sistema puede reducirse en gran medida y el volumen y el consumo de energía del transceptor pueden reducirse.

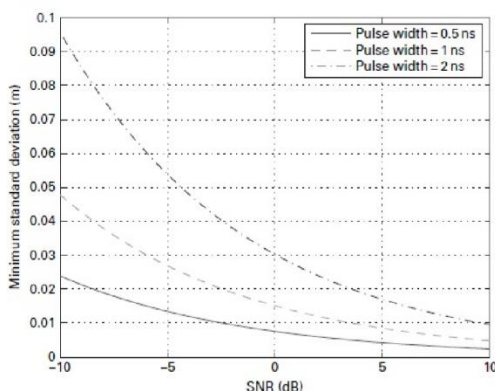


Figura 6. Precisión de la señal *UWB* con diferente ancho de pulso

En resumen, las ventajas de *UWB* lo hacen muy adecuado para posicionamiento de alta precisión. Podemos ver en la figura que la precisión de posicionamiento de *UWB* es  $< 10$  cm, que es mucho mayor que la de otras tecnologías.

### 3.2 Componentes y requisitos del sistema *UWB*

Para construir un sistema *UWB* hay que dominar los conceptos de puntos de anclaje y etiquetas. Los puntos de anclaje suelen consistir en dispositivos *UWB* fijos, mientras que las etiquetas suelen estar asociadas a dispositivos *UWB* móviles. El intercambio de información entre anclas y



etiquetas permite calcular la distancia entre ellas. La comunicación con múltiples anclas permite determinar la ubicación exacta de la etiqueta.

Algunos dispositivos pueden actuar a la vez como anclas y etiquetas. Tomemos por ejemplo el caso de dos teléfonos móviles que utilizan la tecnología *UWB* para determinar la distancia que los separa. En este cálculo, los dispositivos pueden intercambiar sus papeles, turnándose como etiquetas o anclas.

Para funcionar con eficacia, los dispositivos *UWB* tradicionales requieren un nivel específico de potencia de procesamiento y una funcionalidad concreta. Para las etiquetas básicas, el procesador debe tener una cantidad limitada de memoria flash (memoria no volátil programable) y de memoria de datos (memoria de acceso aleatorio volátil o RAM). Sin embargo, para aplicaciones de anclaje como la Diferencia Horaria de Llegada (*TDoA*), pueden ser necesarios procesadores con mayor capacidad flash y RAM, y a menudo también es necesario el *backhaul* de datos.

Otro aspecto a tener en cuenta es la antena. Cada aplicación requiere una antena distinta. Por ejemplo, las etiquetas suelen utilizar pequeñas antenas omnidireccionales. Los anclajes, en cambio, prefieren antenas direccionales, dependiendo de la topología.

La pila de software *UWB* desempeña un papel fundamental en la conexión de los componentes de comunicación *UWB* con diversas aplicaciones, garantizando una interoperabilidad y coexistencia sin fisuras con dispositivos externos. Además, el software facilita la comunicación entre los componentes de comunicación *UWB* y los microcontroladores internos. Por ejemplo, al gestionar la conexión entre un smartphone y un coche, el software coordina el proceso de comunicación.

La gestión simultánea de múltiples aplicaciones y casos de uso es otra de las características del software. Por ejemplo, puede integrarse en un ecosistema doméstico inteligente y se encarga de controlar varios dispositivos, como altavoces, aparatos de iluminación y sistemas de calefacción. Utiliza la información de localización para comunicarse eficazmente con todas las etiquetas *UWB* y los dispositivos habilitados para *UWB* con el fin de gestionar el entorno, incluidas tareas como bloquear y desbloquear puertas y activar y desactivar sistemas de alarma. La pila de software *UWB* puede gestionar con eficacia todos estos escenarios simultáneamente.

En algunos casos, es necesario priorizar las distintas funciones dentro de una aplicación. Por ejemplo, en una aplicación en la que la atención se centra en la gestión de la energía y la duración de la batería, más que en mantener una alta frecuencia de actualización de la posición o maximizar el caudal de datos. En este caso, el software puede optimizar el consumo de energía permitiendo que el dispositivo se apague durante los periodos de inactividad y se encienda cuando se requiera comunicación.

En situaciones en las que las señales *LOS* de los sensores no son óptimas o proceden de direcciones diferentes, el software puede desempeñar un papel vital en la obtención de mediciones de distancia precisas. Al promediar los resultados y eliminar las señales ruidosas, el software garantiza la precisión. Para aplicaciones que requieren una mayor precisión, especialmente en escenarios de alta velocidad, o en las que hay que combinar datos direccionales, el software puede integrar información del chipset *UWB* con datos de dispositivos de medición inercial como acelerómetros, giroscopios y magnetómetros. Esta integración de datos proporciona resultados más completos y fiables.

En resumen, la configuración de un sistema *UWB* requiere una combinación de varios factores en términos de hardware y software para garantizar que el sistema funcionará eficazmente en un escenario de aplicación determinado [27].

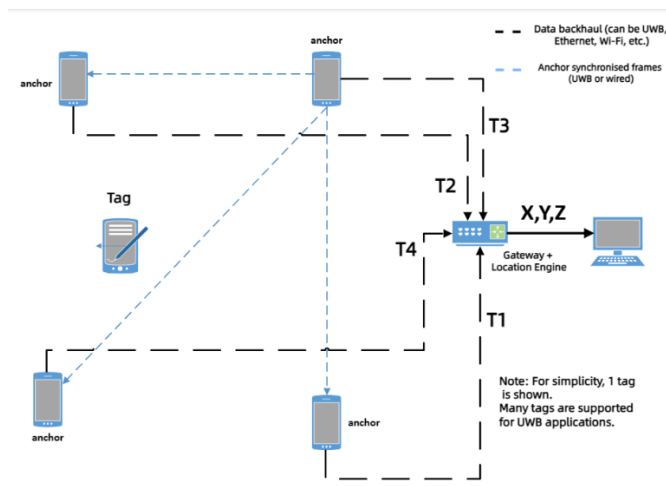


Figura 7. Componentes de un sistema *TDoA*

### 3.3 Algoritmos de posicionamiento utilizados

En la actualidad, la mayoría de los algoritmos de posicionamiento basados en tecnología de *UWB* se basan en la distancia. Los métodos más utilizados son: método de hora de llegada de la señal (Hora de llegada, *ToA*), método de diferencia de hora de llegada de la señal (Tiempo diferente de llegada, *TDoA*) y método de ángulo de llegada de la señal (Angle of Arrival, *AoA*) [28-32].

#### 3.3.1 *ToA*

*ToA*, o "Time of Arrival", es un algoritmo de posicionamiento utilizado en sistemas de localización inalámbrica. En este proceso, el nodo objetivo emite una señal de onda de radio hacia la estación base con información de alcance. Luego, la estación base responde al recibir la señal específica y registra el tiempo que su nodo tarda en enviar y recibir la información.

Dado que las ondas de radio se propagan a la velocidad de la luz en el aire, es posible estimar la distancia entre la estación base y el nodo objetivo. En este contexto, la estación base generalmente requiere conocer al menos 3 o más posiciones conocidas para participar en la medición de manera efectiva. Una vez que se tienen estas referencias, se puede establecer y resolver un sistema de ecuaciones utilizando el método de triangulación y fórmulas geométricas para determinar con precisión la ubicación del nodo objetivo.

En resumen, el algoritmo *ToA* aprovecha la velocidad constante de propagación de las ondas de radio para calcular la distancia entre la estación base y el nodo objetivo, lo que permite determinar la ubicación del nodo mediante la resolución de un sistema de ecuaciones y la aplicación de métodos geométricos avanzados.

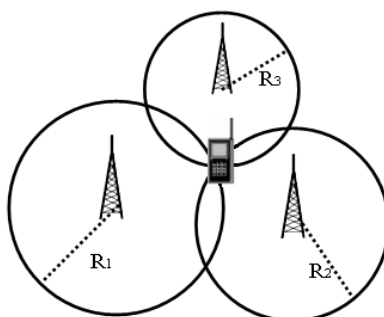


Figura 8. Modelo de algoritmo de posicionamiento de tres lados.

La imagen presenta el modelo del algoritmo de posicionamiento trilateral. Se disponen de las coordenadas conocidas de la estación base 1, la estación base 2 y la estación base 3, denotadas como  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$  y  $(x_3, y_3)$  respectivamente. Se asume que las coordenadas del nodo

objetivo a medir son  $(x, y)$ . El nodo objetivo emite una señal en el tiempo  $t$ , y luego, las tres estaciones base registran los tiempos  $t_1$ ,  $t_2$  y  $t_3$  en los que reciben la señal. La fórmula del algoritmo de posicionamiento trilateral se puede expresar de la siguiente manera:

$$\begin{cases} \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} = c (t_1 - t) \\ \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} = c (t_2 - t) \\ \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2} = c (t_3 - t) \end{cases} \quad (3.3.11)$$

Las coordenadas de posición del nodo objetivo se pueden determinar utilizando la fórmula proporcionada. Sin embargo, es crucial tener en cuenta que el cálculo del algoritmo de posicionamiento *ToA* se basa completamente en el tiempo. Por lo tanto, se requiere que el sistema tenga una precisión de sincronización y de reloj extremadamente alta. Incluso un ligero error de sincronización del reloj, al ser multiplicado por la velocidad de la luz, puede amplificarse significativamente.

Además, el algoritmo de posicionamiento *ToA* puede ser susceptible a diversos tipos de interferencias, como efectos de trayectorias múltiples, reflejos y ruido. Estas interferencias pueden tener un impacto considerable en la precisión del posicionamiento, especialmente en entornos interiores donde las señales pueden rebotar en las paredes y objetos circundantes.

### 3.3.2 *TDoA*

*TDoA*, o diferencia de tiempo de llegada, es un algoritmo de posicionamiento que representa una mejora respecto al algoritmo de posicionamiento *ToA*. En *TDoA*, se selecciona una estación base como estación de referencia, y se combinan otras estaciones base con esta referencia para establecer múltiples hipérbolas, donde la estación base actúa como el foco de cada una de ellas. La diferencia de distancia entre los puntos en la hipérbola y el foco representa la posición del nodo objetivo, mientras que la diferencia de distancia a otras estaciones base define la ecuación de la hipérbola. La ubicación del nodo objetivo se determina mediante la intersección de múltiples hipérbolas.

Para calcular la distancia entre el nodo objetivo y cada estación base, *TDoA* utiliza el método de alcance *ToA* para obtener el valor del tiempo de llegada entre el nodo objetivo y cada estación base. Posteriormente, este valor se multiplica por la velocidad de la luz.

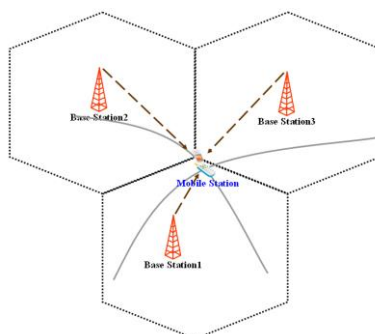


Figura 9. Diagrama del modelo del algoritmo de posicionamiento *TDoA*.

La imagen presenta el diagrama del modelo del algoritmo de posicionamiento *TDoA*. Se conocen las coordenadas de las estaciones base 1, 2 y 3 como  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$  y  $(x_3, y_3)$  respectivamente. Suponiendo que las coordenadas del nodo objetivo a medir son  $(x, y)$ , la fórmula del algoritmo *TDoA* se puede expresar de la siguiente manera:

$$\begin{cases} D_1 - D_2 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} - \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} \\ D_1 - D_3 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} - \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2} \end{cases} \quad (3.3.21)$$

Las coordenadas de posición del nodo objetivo se pueden determinar mediante la fórmula proporcionada. Un aspecto distintivo del posicionamiento *TDoA* es que no requiere sincronización entre las estaciones base y los nodos de destino, sino únicamente entre las estaciones base. Dado que las ubicaciones de las estaciones base son fijas, lograr la sincronización entre ellas es más accesible en comparación con la sincronización entre estaciones base y nodos objetivo. No obstante, es importante tener en cuenta que este método impone exigencias elevadas en términos de hardware, y su precisión de posicionamiento puede disminuir significativamente en entornos sin línea de visión o más complejos.

### 3.3.3 AoA

*AoA* (Ángulo de Llegada) es un algoritmo de posicionamiento basado en la medición del ángulo de llegada de las señales de onda de radio. Este método utiliza dos o más estaciones base y configura un conjunto de antenas o antenas direccionales para obtener información sobre el ángulo de la señal emitida por el nodo objetivo. El objetivo principal es estimar la distancia entre la estación base y el nodo objetivo.

Este algoritmo aprovecha la capacidad de las antenas direccionales para determinar la dirección desde la cual la señal está llegando. Al medir el ángulo de llegada desde diferentes estaciones base, se puede triangular la posición del nodo objetivo. Es importante destacar que *AoA* generalmente requiere hardware especializado, como antenas direccionales o matrices de antenas, para medir con precisión los ángulos de llegada.

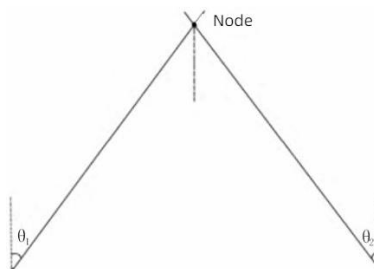


Figura 10. Modelo de algoritmo de posicionamiento *AoA*.

La Figura 3 muestra un diagrama modelo del algoritmo de posicionamiento *AoA*. Se conocen las coordenadas de la estación base 1 y la estación base 2 como  $(x_1, y_1)$  y  $(x_2, y_2)$  respectivamente. Supongamos que las coordenadas del nodo objetivo a medir son  $(x, y)$ . Utilizando la dirección de la línea entre la estación base 1, la estación base 2 y el nodo objetivo como referencia, podemos obtener lo siguiente:

$$\begin{cases} \tan\theta_1 = \frac{y-y_1}{x-x_1} \\ \tan\theta_2 = \frac{y-y_2}{x-x_2} \end{cases} \quad (3.3.31)$$

Las coordenadas de posición del nodo objetivo se pueden obtener utilizando la fórmula proporcionada. En comparación con otros sistemas de posicionamiento, el sistema de posicionamiento *AoA* se distingue por su estructura simple y la necesidad de solo dos estaciones base para llevar a cabo el posicionamiento. No obstante, es importante tener en cuenta que es extremadamente susceptible al efecto de trayectorias múltiples de la señal o a entornos sin línea de visión, lo que puede reducir significativamente su precisión de posicionamiento. Además, este sistema requiere altos requisitos para la medición de ángulos y demanda un conjunto de antenas

con alta sensibilidad y resolución espacial, lo que incrementa el costo asociado con su implementación y mantenimiento.

### 3.3.4 Fusión de algoritmos

#### 3.3.4.1 Algoritmos de fusión TDoA y AoA

Este método de localización por fusión mide primero el momento en que cada estación base recibe la señal y calcula la diferencia de tiempo y la diferencia de distancia correspondiente teniendo en cuenta el ruido, y construye un sistema de ecuaciones para calcular la posición preliminar basada en TDoA mediante relaciones geométricas.

Establece la posición objetivo en  $TP = (x, y, z)$ , La ubicación de la estación base es  $AP_i = (x_i, y_i, z_i)$ , El tiempo de llegada de la señal a cada estación base es  $t_i$ , La velocidad de la luz es  $c$ .

Calcula la diferencia de tiempo:

$$\Delta t_{ij} = t_i - t_j \quad (3.3.4.1)$$

Calcula la diferencia de distancia:

$$d_{ij} = c * \Delta t_{ij} \quad (3.3.4.2)$$

Cálculo de posición:

$$\begin{cases} \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} = d_{21} \\ \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} = d_{31} \\ \sqrt{(x-x_4)^2 + (y-y_4)^2 + (z-z_4)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} = d_{41} \end{cases} \quad (3.3.4.3)$$

A continuación, se mide el ángulo con el que cada estación base recibe la señal, y se construye un sistema de ecuaciones para calcular la posición preliminar basada en AoA mediante la información angular de múltiples estaciones base.

Establece la posición objetivo en  $TP = (x, y, z)$ , La ubicación de la estación base es  $AP_i = (x_i, y_i, z_i)$ , El ángulo de llegada de la señal a la estación base  $i$  es  $\theta_i$ .

Calcula el ángulo:

$$\tan \theta_i = \frac{y-y_i}{x-x_i} \quad (3.3.4.4)$$

Cálculo de posición:

$$\begin{cases} \tan(\theta_1) = \frac{y-y_1}{x-x_1} \\ \tan(\theta_2) = \frac{y-y_2}{x-x_2} \\ \tan(\theta_3) = \frac{y-y_3}{x-x_3} \end{cases} \quad (3.3.4.5)$$

Por último, se combinan las ventajas de los algoritmos TDoA y AoA y se combinan los dos tipos de información de medición para el posicionamiento conjunto. Por último, combinando las ventajas de los algoritmos TDoA y AoA, se calcula la posición final mediante el método de la media ponderada utilizando las dos informaciones de medición para el posicionamiento conjunto.

Calcular las posiciones iniciales de TDoA y AoA para obtener el  $TP_{TDoA}$  y  $TP_{AoA}$ , fusión por el método de la media ponderada ( $\alpha$  es el coeficiente de ponderación):

$$TP_{fusión} = \alpha TP_{TDoA} + (1 - \alpha) TP_{AoA} \quad (3.3.4.6)$$

### 3.3.4.2 Algoritmos de fusión TDoA y ToA

Este método de fusión mide primero el momento en que se recibe la señal en cada estación base. Establezca  $(x_i, y_i, z_i)$  como la posición del  $i$  punto de anclaje y  $(x_{tp}, y_{tp}, z_{tp})$  como la posición objetivo para resolver la distancia verdadera  $d_i$ :

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_{tp})^2 + (y_i - y_{tp})^2 + (z_i - z_{tp})^2} \quad (3.3.4.7)$$

Suponga que la velocidad de la luz es  $c$ , calcule el  $ToA$  en función de la distancia:

$$ToA_i = \frac{d_i}{c} \quad (3.3.4.8)$$

Ajuste  $N_i$  a ruido para añadir ruido a  $ToA$ :

$$ToA_{noisy,i} = ToA_i + \frac{N_i}{c} \quad (3.3.4.9)$$

A continuación, calcula la diferencia de tiempo y la correspondiente diferencia de distancia teniendo en cuenta el ruido, y construye un sistema de ecuaciones para calcular la posición preliminar basada en  $TDoA$  mediante la relación geométrica.

Seleccione el  $ToA$  del primer punto de anclaje como punto de referencia  $ToA_{ref}$  y calcule  $TDoA$ :

$$TdoA_i = ToA_{noisy,i} - ToA_{ref} \quad (3.3.4.10)$$

A continuación, se optimiza la información procedente de varias estaciones base combinando las ponderaciones  $\omega_i$  y, por último, se calcula la posición final mediante el método de la media ponderada utilizando las ventajas de la  $ToA$  y la  $TDoA$  fusionadas para lograr una estimación precisa de la posición del objetivo.

Ajustar  $\epsilon$  a un valor muy pequeño se utiliza para evitar dividir por cero para calcular el peso  $\omega_i$ :

$$\omega_i = \frac{1}{d_i + \epsilon} \quad (3.3.4.11)$$

Establezca  $n$  como el número de anclas para normalizar los pesos:

$$\omega_i = \frac{\omega_i}{\sum_{j=2}^n \omega_j} \quad (3.3.4.12)$$

### 3.3.4.3 Algoritmos de fusión ToA y AoA

Este método de localización por fusión mide primero los tiempos a los que se reciben las señales en cada estación base; estos tiempos contienen el ruido de medición.

Establezca la posición del objetivo como  $TP_{loc}$ ,  $AP_{loc,i}$  como la posición del  $i$  punto de anclaje, la velocidad de la luz como  $c$ , el ruido como  $N$  y utilice la fórmula de Euclides para calcular la distancia entre la posición del objetivo y el punto de anclaje para calcular el  $ToA$ :

$$ToA_i = \frac{\|TP_{loc} - AP_{loc,i}\|}{c} + N \quad (3.3.4.13)$$

A continuación, se calculan los ángulos acimutales del objetivo respecto al punto de anclaje, y estos ángulos contienen el ruido de medición.

$TP_{loc,1}$ ,  $TP_{loc,2}$  son la coordenada x y la coordenada y de la posición del objetivo,  $AP_{loc,i,1}$  y  $AP_{loc,i,2}$  son la coordenada x y la coordenada y de la posición del ancla i-ésima, respectivamente.  $\arctan2$  es la función arctangente de cuatro cuadrantes utilizada para calcular el acimut del objetivo con respecto a la posición del ancla, y N es el ruido para calcular el  $AoA$ :

$$AoA_i = \arctan2(TP_{loc,2} - AP_{loc,i,2}, TP_{loc,1} - AP_{loc,i,1}) + N \quad (3.3.4.14)$$

Por último, se calcula la suma de errores al cuadrado entre la posición que se desea estimar y las mediciones, que se utiliza para minimizar los errores de medición  $ToA$  y  $AoA$  para encontrar la estimación óptima de la posición del objetivo.

Establezca  $err$  como el error total de la función de error,  $pos$  como el vector de posiciones a estimar, y n como el número de puntos de anclaje, y calcule la suma de errores al cuadrado entre las posiciones a estimar y los valores medidos:

$$err = \sum_{i=1}^n \left( \left( \frac{\|pos - AP_{loc,i}\|}{c} - ToA_i \right)^2 + \left( \arctan2(pos_2 - AP_{loc,i,2}, pos_1 - AP_{loc,i,1}) - AoA_i \right)^2 \right) \quad (3.3.4.15)$$

### 3.4 Arquitectura del sistema UWB

El sistema de posicionamiento en interiores *UWB* consta de una capa de aplicación, una capa de servicio, una capa de transmisión y una capa de percepción (estación base de posicionamiento y etiquetas de posicionamiento). La capa de transmisión constituye la columna vertebral de la red de comunicación, ya sea por cable o inalámbrica [33-35].

#### 3.4.1 Capa de detección

La capa de detección incluye principalmente la estación base de posicionamiento y la etiqueta de posicionamiento. La estación base y la etiqueta son los equipos centrales del sistema de posicionamiento; la etiqueta emite una señal de radio con su propio número de identificación en función de la franja horaria; la estación base de posicionamiento recibe la señal enviada por la etiqueta y, a continuación, transmite la marca de tiempo de la señal recibida y el número de la tarjeta de identificación de la etiqueta a la capa de servicio a través de la red troncal para completar el posicionamiento de la tarjeta de la etiqueta; la estación base también recibe los comandos emitidos por la capa de aplicación para completar los ajustes pertinentes.

#### 3.4.2 Capa de transmisión

La capa de transmisión, también denominada red troncal de comunicaciones ("*red troncal*"), es el canal de transmisión de datos entre la estación base, la capa de servicio y la capa de aplicación. Transmite los comandos pertinentes de la capa de aplicación a la estación base, y transmite los datos brutos de posicionamiento (la distancia entre la etiqueta y la estación base) hacia arriba a la capa de servicio.

#### 3.4.3 Capa de servicio

Al medir la distancia entre la etiqueta y la estación base de posicionamiento que cubre el área, la capa superior resuelve las coordenadas de la etiqueta mediante el algoritmo *TDoA* o el algoritmo *ToA* a través de la posición de cada estación base y la distancia de la etiqueta. Además, la capa de



servicio proporciona funciones flexibles de gestión de dispositivos y gestión de red, así como diversas funciones frontales e interfaces de aplicación.

#### 3.4.4 *Capa de aplicación*

La capa de servicio obtiene la posición específica de la etiqueta de posicionamiento, muestra la posición de la etiqueta en tiempo real en forma de mapas unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales, y proporciona funciones como la reproducción de pistas, la gestión de información personal y la petición de ayuda. Además, la capa de aplicación también proporciona interfaz *WebSocket* e interfaz *http*, a través de la interfaz *WebSocket* se pueden obtener los datos de localización en tiempo real de la tarjeta tag, a través de la interfaz *http* se pueden obtener los datos relacionados con el sistema, por lo que el sistema de posicionamiento es fácil para el desarrollo secundario y la integración.

#### 3.4.5 *Soporte de hardware para el sistema de posicionamiento UWB*

Las estaciones base de posicionamiento en interiores y las etiquetas de posicionamiento son los componentes de hardware del sistema de posicionamiento *UWB*. Las estaciones base de posicionamiento están situadas en los bordes geométricos del área de la escena y proporcionan cobertura de señal de la zona. La función principal de la estación base de posicionamiento en interiores es detectar la información de datos de la etiqueta y cargarla en el servidor para realizar un análisis resumido. Las etiquetas de posicionamiento se fijan a la superficie del objeto y, cuando la etiqueta entra en la zona de cobertura de la señal de la estación base, establece contacto automáticamente con ésta. Las etiquetas de posicionamiento pueden fijarse de distintas formas según las necesidades de la aplicación, como colgadas, pegadas, etc., y el tamaño y la forma serán diferentes según los distintos objetos de posicionamiento.

### 3.5 **Ventajas y desafíos del uso de *UWB* para posicionamiento *indoor***

En el ámbito del posicionamiento en interiores, la tecnología *UWB* destaca por su capacidad de ofrecer posicionamiento en tiempo real con una precisión excepcional. El tiempo de retardo en el posicionamiento es notablemente menor en comparación con otras tecnologías como Bluetooth y *WiFi*. La característica distintiva de *UWB* es su capacidad para lograr una precisión de posicionamiento a nivel de centímetros, satisfaciendo ampliamente los requisitos de posicionamiento de alta precisión en diversos escenarios.

La tecnología *UWB* emplea el algoritmo *TDoA* (diferencia de tiempo de llegada) para medir el tiempo que tardan las ondas electromagnéticas en viajar desde el transmisor hasta el receptor. Múltiples receptores distribuidos en la habitación reciben simultáneamente las ondas electromagnéticas, permitiendo calcular con precisión la posición del transmisor en la habitación. La precisión del posicionamiento puede llegar a 10 cm, cumpliendo con los requisitos de la mayoría de los escenarios de posicionamiento en interiores.

La señal *UWB* no requiere portadora, utilizando pulsos intermitentes para la transmisión de datos. Con pulsos de corta duración (generalmente entre 0,20 y 1,5 ns) y bajo ciclo de trabajo, el sistema *UWB* requiere un suministro de energía muy bajo, típicamente entre 50 y 70 mW, una décima parte de la tecnología Bluetooth. La tecnología *UWB* puede lograr velocidades de transmisión de hasta 100 Mbit/s-500 Mbit/s, incluso con una baja densidad espectral de potencia.

En el ámbito civil, el *UWB* tiene aplicaciones versátiles, con áreas de cobertura de hasta 400 metros cuadrados por unidad de posicionamiento. La distancia máxima entre nodos transmisores y receptores puede alcanzar los 60 metros. La señal *UWB* presenta una penetración fuerte, capaz de atravesar hojas, tierra, hormigón y agua. Esta capacidad la hace útil para aplicaciones militares, como la detección de minas terrestres, y aplicaciones civiles, como la detección de tuberías subterráneas.

La velocidad de transmisión de *UWB* de hasta 500 Mbit/s lo convierte en una tecnología de modulación ideal para comunicaciones personales y LAN inalámbrica. La capacidad de





intercambiar un amplio ancho de banda de frecuencia para la transmisión de datos de alta velocidad, sin ocupar recursos exclusivos de frecuencia, brinda tasas de detección bajas, alta seguridad y transmisión de datos de alta velocidad. La potencia de los dispositivos *UWB* es significativamente inferior a la de los teléfonos móviles tradicionales y dispositivos Bluetooth, lo que resulta en ventajas notables en duración de la batería y radiación electromagnética en comparación con los dispositivos inalámbricos convencionales.

Sin embargo, el posicionamiento interior mediante *UWB* presenta algunas desventajas que es importante considerar. En primer lugar, requiere una red de posicionamiento completa y el respaldo de al menos tres estaciones base de posicionamiento en cualquier punto de ubicación. La fundamentación del posicionamiento *UWB* se basa en la triangulación de tres puntos, por lo que reducir el número de estaciones base afectará significativamente la precisión del posicionamiento.

En segundo lugar, otra desventaja del posicionamiento *UWB* en interiores es su sensibilidad a los obstáculos que pueden bloquear la transmisión de radio. Aunque obstáculos pequeños no impactarán considerablemente debido a la difracción de la señal, si la transmisión se bloquea completamente, la estación base de posicionamiento no recibirá la señal, lo que resultará en una mayor inexactitud en la precisión del posicionamiento. Por lo tanto, el despliegue de una red de posicionamiento en interiores mediante *UWB* requiere una cuidadosa consideración de la presencia y disposición de obstáculos.

En resumen, mientras que el posicionamiento en interiores con *UWB* ofrece ventajas significativas en términos de precisión y tiempo real, es crucial tener en cuenta estas desventajas, que incluyen la necesidad de una red completa y la sensibilidad a los obstáculos, lo que puede llevar a costos relativamente altos de implementación y mantenimiento [36-37].

## Capítulo 4. Pruebas de simulación

Parámetro	Unidades/Valor
Dimensiones del Espacio	
Eje X	100m
Eje Y	100m
Eje Z	100m
Ruido del Sistema	
Ruido	0.1
Coordenadas de las Etiquetas	
Etiqueta 1	(30, 40, 50)
Posiciones de las Estaciones Base	
Estación Base 1	(0, 0, 0)
Estación Base 2	(100, 0, 0)
Estación Base 3	(0, 100, 0)
Estación Base 4	(100, 100, 0)

Table 2. Diseño experimental de las pruebas.

### 4.1 Diseño experimental de las pruebas

#### 4.1.1 TDoA

Esta simulación muestra cómo puede estimarse la ubicación de una etiqueta desconocida utilizando cuatro estaciones base con ubicaciones conocidas y diferencias de tiempo de llegada de señal medidas mediante la simulación de un sencillo sistema de posicionamiento basado en TDoA. El método de optimización da lugar a una estimación más precisa de la ubicación de la etiqueta y el código también visualiza y analiza los resultados en busca de errores [38-39].

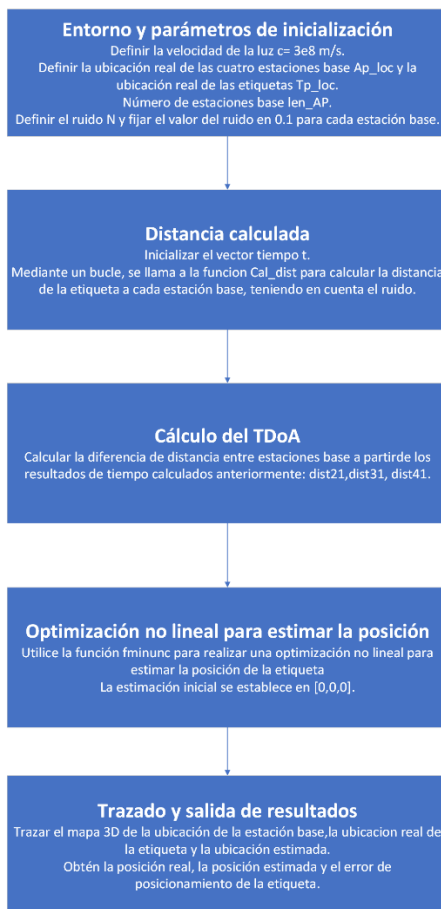
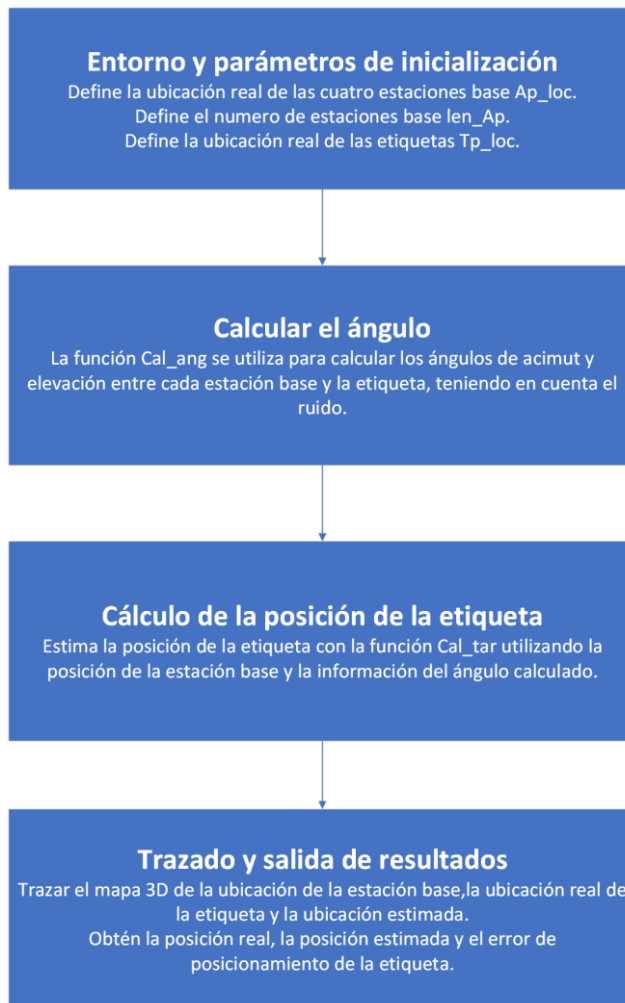


Figura 11. Diagrama de flujo del algoritmo *TDoA*.

#### 4.1.2 AoA

Esta simulación estima la posición de una etiqueta desconocida utilizando el algoritmo de *AoA*. Primero se calculan los ángulos acimutales y de elevación desde la estación base hasta la etiqueta y se añaden al ruido. A continuación, esta información angular se utiliza para estimar la ubicación de la etiqueta mediante métodos geométricos. Por último, el código dibuja un mapa 3D de la posición de la estación base, la posición real de la etiqueta y la posición estimada, y emite la posición real, la posición estimada y el error de posicionamiento [38].



**Figura 12. Diagrama de flujo del algoritmo AoA.**

### 4.1.3 ToA

Esta simulación estima la ubicación de una etiqueta desconocida mediante un algoritmo basado en el tiempo de llegada (*ToA*). Primero se calcula la distancia de la etiqueta a cada estación base, teniendo en cuenta el efecto del ruido. A continuación, se estima la ubicación de la etiqueta mediante un método de optimización no lineal. Por último, el código dibuja un gráfico 3D de la ubicación de la estación base, la ubicación real de la etiqueta y la ubicación estimada, y muestra la ubicación real, la ubicación estimada y el error de posicionamiento [39].

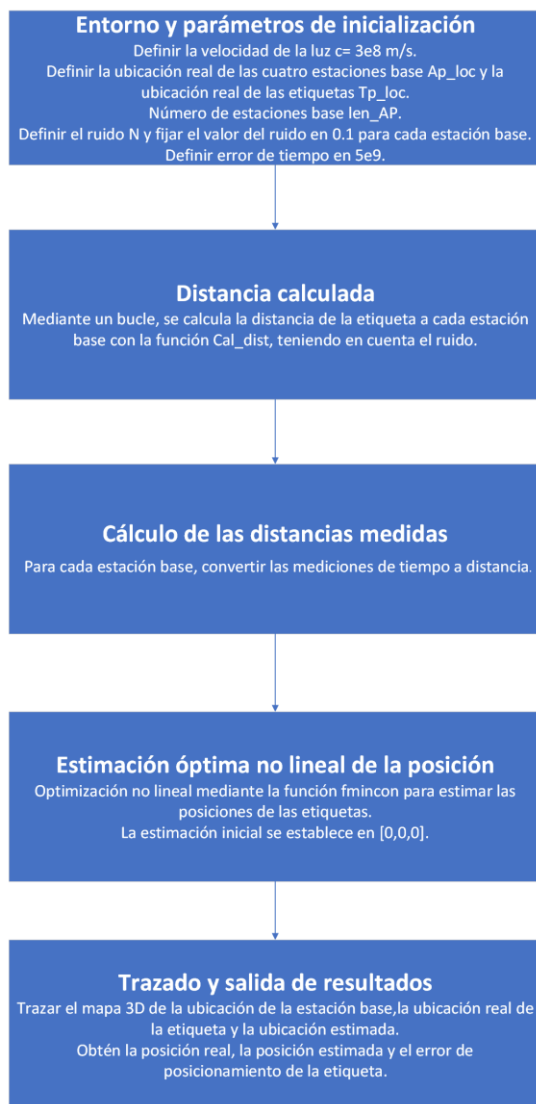


Figura 13. Diagrama de flujo del algoritmo ToA.

#### 4.1.4 Algoritmo de fusión TDoA y AoA

Esta simulación estima la ubicación de una etiqueta desconocida fusionando los algoritmos *TDoA* y *AoA*. En primer lugar, se calcula la distancia de la etiqueta a cada estación base y se tiene en cuenta el efecto del ruido. A continuación, los algoritmos *TDoA* y *AoA* estiman la ubicación de la etiqueta por separado y combinan los pesos de ambos algoritmos para obtener la estimación final fusionada. Por último, el código dibuja un mapa 3D de la posición de la estación base, la posición real de la etiqueta y la posición estimada, y muestra la posición real, la posición estimada y el error de posicionamiento [38].

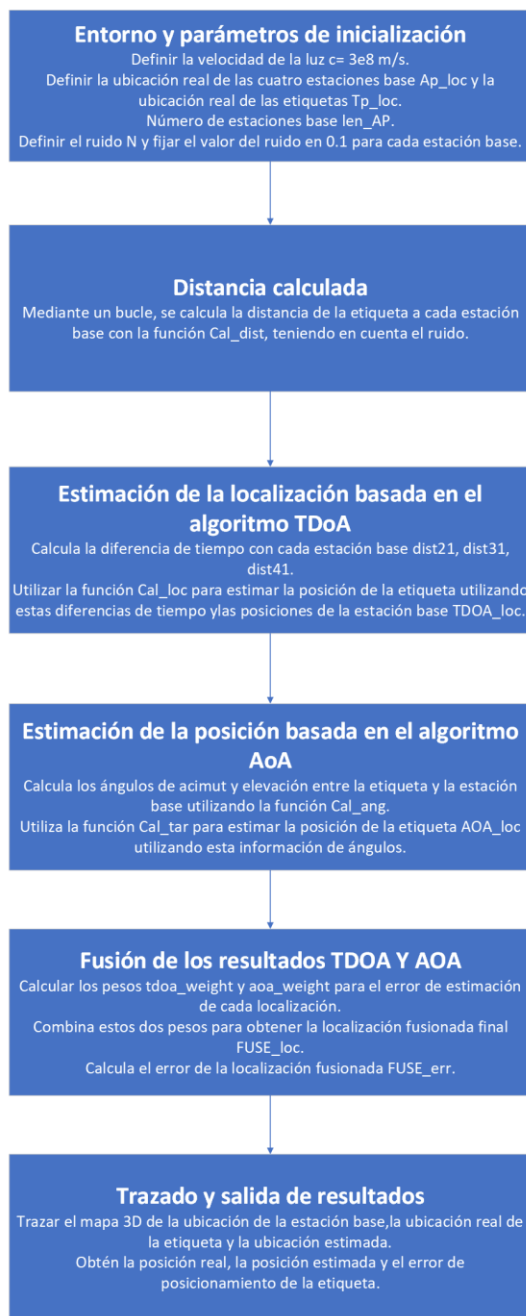


Figura 14. Diagrama de flujo del algoritmo fusión *TDoA* y *AoA*.

#### 4.1.5 Algoritmo de fusión *TDoA* y *ToA*

Esta simulación estima la ubicación de una etiqueta desconocida fusionando los algoritmos *TDoA* y *ToA*. Primero se calculan la distancia real y la hora de llegada de la etiqueta a cada estación base con ruido añadido. A continuación, se calculan la hora de llegada y la diferencia de hora de llegada con ruido, seguidas de la posición inicial estimada por pesos. Se utiliza un algoritmo de optimización para minimizar el error en el tiempo de llegada y la diferencia de tiempo de llegada para estimar finalmente la ubicación de la etiqueta. Por último, el código dibuja un mapa 3D de la ubicación de la estación base, la ubicación real de la etiqueta y la ubicación estimada, y emite la ubicación real, la ubicación estimada y el error de posicionamiento.

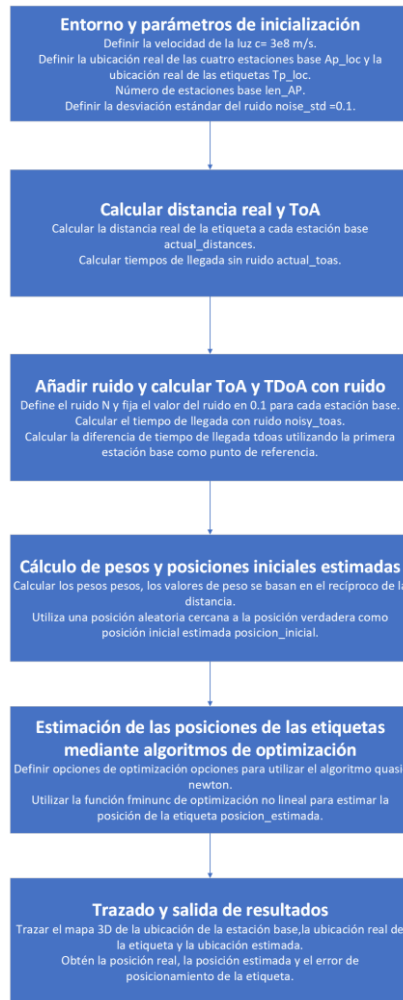


Figura 15. Diagrama de flujo del algoritmo fusión *TDoA* y *ToA*.

#### 4.1.6 Algoritmo de fusión *ToA* y *AoA*

Esta simulación estima la posición de una etiqueta desconocida fusionando los algoritmos *ToA* y *AoA*. Primero se generan mediciones de *ToA* y *AoA* con ruido y, a continuación, se utiliza una posición aleatoria cercana a la posición real como posición inicial estimada. Por último, la posición de la etiqueta se estima optimizando el algoritmo para minimizar los errores en el tiempo de llegada y el ángulo de llegada. Por último, el código dibuja un mapa en 3D de la posición de la estación base, la posición real de la etiqueta y la posición estimada, y emite la posición real, la posición estimada y el error de posicionamiento.

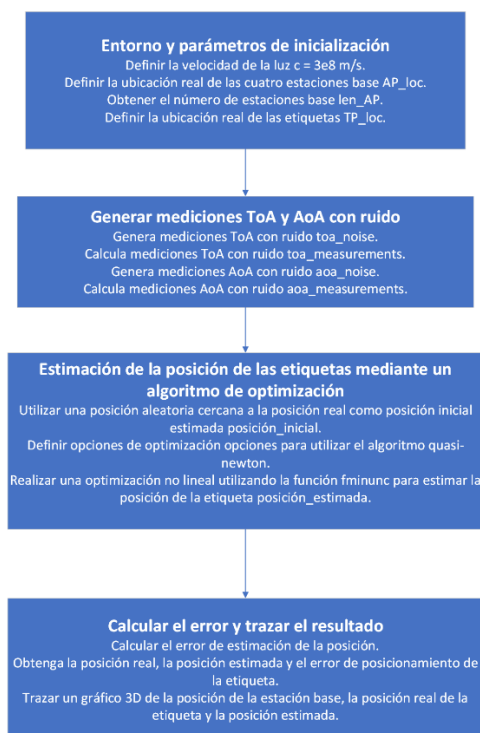


Figura 16. Diagrama de flujo del algoritmo fusión *ToA* y *ToA*.

## 4.2 Resultados y análisis de las pruebas de simulación

### 4.2.1 *TDoA*

Resultados de la simulación *TDoA*:

Localización real es: 30.00m, 40.00m, 50.00m

Localización estimada es: 30.79m, 40.38m, 43.48m

Error estimado es: 6.5760m

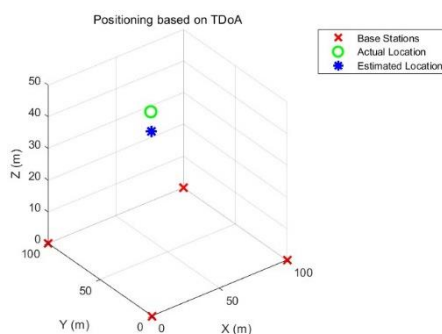


Figura 17. Gráfico de coordenadas tridimensionales *TDoA*.

En este sistema de coordenadas, podemos ver dos marcadores diferentes para la posición real (posición *TP*) y la posición estimada (posición *TP* estimada). Las coordenadas de la posición real son (30,00 metros, 40,00 metros, 50,00 metros) y se indican con círculos verdes. Y el asterisco azul indica la posición estimada calculada mediante el algoritmo de posicionamiento *TDoA* con coordenadas (30,79 m, 40,38 m, 43,48 m).

De los resultados se desprende que existe una cierta desviación entre la posición estimada y la posición real. En concreto, la desviación es de 0,79 m en la dirección del eje X, de 0,38 m en la



dirección del eje Y y de 6,52 m en la dirección del eje Z. Estas desviaciones reflejan la precisión y el margen de error de la técnica de posicionamiento *TDoA*.

Además, los resultados proporcionan un error de aproximación de 6,5760 metros, lo que significa que la distancia euclidiana entre la posición estimada y la posición real es de aproximadamente 6,5760 metros. Este error relativamente grande sugiere que, aunque la técnica de posicionamiento *TDoA* proporcionó resultados de posicionamiento útiles en este escenario de simulación, en algunos casos puede ser necesaria una mayor precisión.

En conjunto, la simulación del posicionamiento *TDoA* en el espacio tridimensional demuestra su eficacia y utilidad. A pesar de algunos errores, en general el algoritmo demostró cierta precisión. La precisión del posicionamiento puede mejorarse optimizando el algoritmo y añadiendo más estaciones base.

#### 4.2.2 AoA

Resultados de la simulación *AoA*:

Localización real es: 30.00m, 40.00m, 50.00m

Localización estimada es: 25.20m, 39.50m, 54.04m

Error estimado es: 6.29m

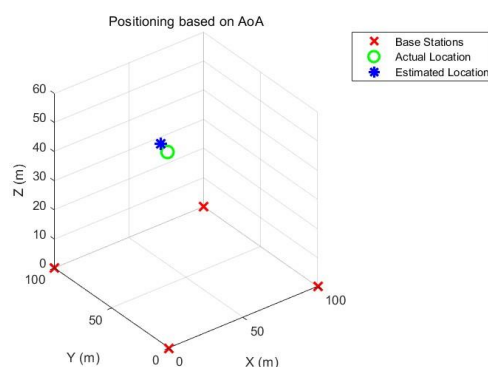


Figura 18. Gráfico de coordenadas tridimensionales *AoA*.

En el sistema de coordenadas, podemos ver dos círculos diferentes que representan la posición real (posición *TP* real) y la posición estimada (posición *TP* estimada). Las coordenadas de la posición real son (30,00 metros, 40,00 metros, 50,00 metros) y están representadas por los círculos verdes. En cambio, los asteriscos azules indican las coordenadas de la posición estimada, que se calcularon utilizando el algoritmo de posicionamiento *AoA* (25,20 m, 39,50 m, 54,04 m).

Como puede observarse en los resultados, existe una ligera diferencia entre las posiciones previstas y las reales. Más concretamente, la desviación en la dirección del eje X es de 4,80 metros, en la dirección del eje Y de 0,50 metros y en la dirección del eje Z de 4,04 metros. En conjunto, estas desviaciones indican la precisión y el margen de error asociados a la técnica de posicionamiento *AoA*.

Además, la salida proporciona un error de aproximación de 6,29 metros, lo que significa que la diferencia entre la posición estimada y la posición real es de aproximadamente 6,29 metros. Este error relativamente grande sugiere que la técnica de posicionamiento por ángulo frontal, aunque proporciona resultados de posicionamiento útiles en este escenario de simulación, puede requerir un mayor nivel de precisión en algunos casos. Puede verse que la posición estimada se desvía algo de la posición real, pero en general el algoritmo demuestra cierta precisión.

En general, la técnica de posicionamiento *AoA* demostró su eficacia y utilidad en el espacio 3D en esta simulación. A pesar de ciertos errores, sigue teniendo un importante valor de referencia y perspectivas de aplicación en la práctica, especialmente en escenarios que no requieren una

precisión de posicionamiento demasiado alta. La precisión del posicionamiento puede mejorarse aún más optimizando el algoritmo y añadiendo más estaciones base.

#### 4.2.3 ToA

Resultados de la simulación *ToA*:

Localización real es: 30.00m, 40.00m, 50.00m

Localización estimada es: 30.91m, 42.82m, 51.26m

Error estimado es: 3.22m

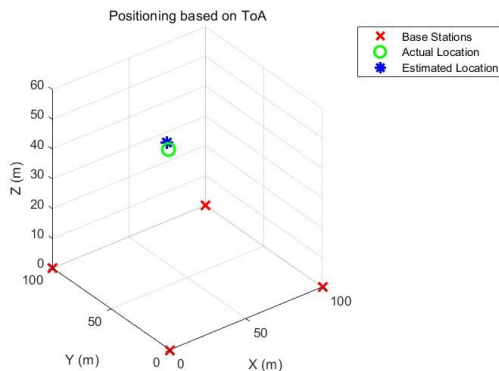


Figura 19. Gráfico de coordenadas tridimensionales *ToA*.

En el sistema de coordenadas, podemos ver dos marcadores diferentes que representan la posición verdadera (posición *TP* real) y la posición estimada (posición *TP* estimada). Las coordenadas de la posición verdadera son (30,00 m, 40,00 m, 50,00 m) y están representadas por círculos verdes. Por el contrario, los asteriscos azules indican las coordenadas de las posiciones estimadas que se calcularon utilizando el algoritmo de localización *ToA* (30,91 m, 42,82 m, 51,26 m).

Como se desprende de los resultados, la posición prevista se aproxima mucho a la posición real. En concreto, la desviación en la dirección del eje X es de 0,91 metros, en la dirección del eje Y es de 2,82 metros y en la dirección del eje Z es de 1,26 metros. Estos valores de desviación indican que la técnica de posicionamiento *ToA* tiene una gran precisión y un cierto margen de error.

Además, los resultados proporcionan un error de estimación de 3,22 metros, lo que significa que existe cierto error entre la posición estimada y la posición real. A pesar del error, éste se encuentra dentro de un cierto margen, lo que indica que la técnica de posicionamiento *ToA* sigue presentando una elevada precisión de posicionamiento en esta simulación. En este caso concreto, la posición estimada se aproxima mucho a la posición real con un error relativamente pequeño, lo que demuestra el buen rendimiento de la técnica de posicionamiento *ToA*.

#### 4.2.4 Algoritmo de fusión *TDoA* y *AoA*

Resultados de la simulación fusión *TDoA* y *AoA*:

Localización real es: 30.00m, 40.00m, 50.00m

Localización estimada es: 26.68m, 39.70m, 44.14m

Error estimado es: 6.74m

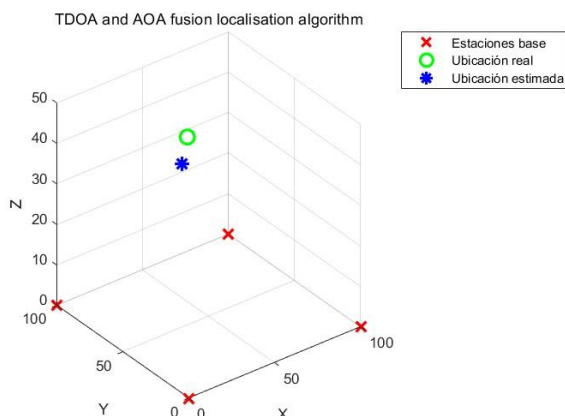


Figura 20. Algoritmos de fusión de mapas de coordenadas 3D AOA y TDOA.

En este resultado de posicionamiento, podemos ver dos marcadores diferentes que indican la posición real (posición *TP* real) y la posición estimada (posición *TP* estimada). Las coordenadas de la posición real son (30,00 metros, 40,00 metros, 50,00 metros) y se indican mediante círculos verdes. En cambio, los asteriscos azules indican las coordenadas de la posición estimada, que se calcularon utilizando los algoritmos de posicionamiento *TDoA* y *AoA* fusionados (26,68 m, 39,70 m, 44,14 m).

Como puede observarse en los resultados, existe una diferencia significativa entre las posiciones previstas y las reales. Más concretamente, la desviación en la dirección del eje X es de 3,32 metros, en la dirección del eje Y es de 0,30 metros y en la dirección del eje Z es de 5,86 metros. En conjunto, estas desviaciones indican el rango de precisión y error asociado a las técnicas de posicionamiento *TDoA* y *AoA* fusionadas.

Además, la salida proporciona un error de aproximación de 6,74 metros, lo que significa que la diferencia total de distancia entre la posición estimada y la posición real es de 6,74 metros. Este gran valor de error sugiere que la técnica de posicionamiento *TDoA* y *AoA* fusionada puede mejorarse en este escenario de simulación y que es necesaria una mayor optimización del algoritmo para mejorar la precisión.

#### 4.2.5 Algoritmo de fusión *TDoA* y *ToA*

Resultados de la simulación fusión *TDoA* y *ToA*:

Localización real es: 30.00m, 40.00m, 50.00m

Localización estimada es: 29.9699m, 39.8351m, 50.6277m

Error estimado es: 0.6497 m

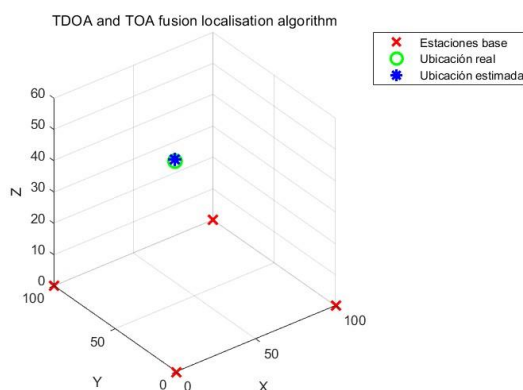


Figura 21. Algoritmos de fusión de mapas de coordenadas 3D *TOA* y *TDOA*.

En este resultado de posicionamiento, podemos ver dos marcadores diferentes que indican la posición real (posición *TP* real) y la posición estimada (posición *TP* estimada). Las coordenadas de la posición real son (30,00 metros, 40,00 metros, 50,00 metros) y se indican con círculos verdes. En cambio, los asteriscos azules indican las coordenadas de la posición estimada, que se calcularon utilizando los algoritmos de posicionamiento *TDoA* y *ToA* fusionados (29,9699 m, 39,8351 m, 50,6277 m).

De los resultados se desprende que existe una ligera diferencia entre la posición prevista y la posición real. Más concretamente, la desviación en la dirección del eje X es de 0,0301 metros, en la dirección del eje Y es de 0,1649 metros y en la dirección del eje Z es de 0,6277 metros. En conjunto, estas desviaciones indican la precisión y el margen de error asociados a las técnicas de posicionamiento *TDoA* y *ToA* fusionadas.

Además, la salida proporciona un error de aproximación de 0,6497 metros, lo que significa que la diferencia de distancia total entre la posición estimada y la posición real es de 0,6497 metros. Este valor de error relativamente pequeño indica que las técnicas de posicionamiento *TDoA* y *ToA* fusionadas funcionan bien en este escenario de simulación y proporcionan resultados de posicionamiento relativamente precisos.

#### 4.2.6 Algoritmo de fusión *ToA* y *AoA*

Resultados de la simulación fusión *ToA* y *AoA*:

Localización real es: 30.00m, 40.00m, 50.00m

Localización estimada es: 30.7857m, 38.3082m, 51.4193m

Error estimado es: 2.3439 m

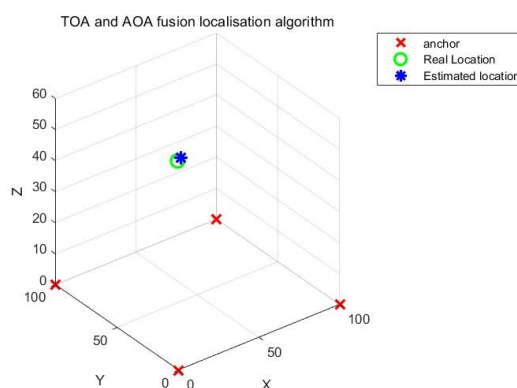


Figura 22. Algoritmos de fusión de mapas de coordenadas 3D *TOA* y *AOA*.

En el sistema de coordenadas, podemos ver dos círculos diferentes que representan la posición real (posición *TP* real) y la posición estimada (posición *TP* estimada). Las coordenadas de la posición real son (30,00 metros, 40,00 metros, 50,00 metros), que se indican con los círculos verdes. En cambio, los asteriscos azules indican las coordenadas de la posición estimada, que se calcularon utilizando el algoritmo de posicionamiento por fusión *ToA* y *AoA* (30,7857 m, 38,3082 m, 51,4193 m).

Como puede observarse en los resultados, existen algunas diferencias entre las posiciones previstas y las reales. La posición estimada tiene una desviación de 0,7857 m, 1,6918 m y 1,4193 m en las direcciones de los ejes X, Y y Z respectivamente, lo que da un error total de 2,3439 m.

Esta simulación simula el posicionamiento 3D por fusión *ToA* y *AoA*, muestra la distribución de las posiciones real y estimada en el espacio 3D y verifica el rendimiento de la técnica de posicionamiento por fusión *ToA* y *AoA* mediante análisis numéricos y de errores específicos. A pesar de algunos errores, esta técnica de posicionamiento fusionado demuestra su potencial en

aplicaciones prácticas, especialmente con un buen rendimiento en algunos escenarios que requieren una precisión de posicionamiento moderada.

### 4.3 Comparativa de algoritmos

Algoritmo de posicionamiento	Coordenadas	La ubicación real	La ubicación estimada	El error estimado
<i>TDoA</i>	X	30m	30.79m	6.5760m
	Y	40m	40.38m	
	Z	50m	43.48m	
<i>AoA</i>	X	30m	25.20m	6.29m
	Y	40m	39.50m	
	Z	50m	54.04m	
<i>ToA</i>	X	30m	30.91m	3.22m
	Y	40m	42.82m	
	Z	50m	51.26m	
Fusión <i>TDoA</i> y <i>AoA</i>	X	30m	26.68m	6.74m
	Y	40m	39.70m	
	Z	50m	44.14m	
Fusión <i>TDoA</i> y <i>ToA</i>	X	30m	29.9699m	0.6497 m
	Y	40m	39.8351m	
	Z	50m	50.6277m	
Fusión <i>AoA</i> y <i>ToA</i>	X	30m	30.7857m	2.3439 m
	Y	40m	38.3082m	
	Z	50m	51.4193m	

Table 3. Comparación de la posición y el error de cada algoritmo.

En esta comparación, analizamos el rendimiento de varios algoritmos de posicionamiento, incluidos *TDoA*, *AoA*, *ToA* y sus técnicas de fusión. Los resultados muestran que el algoritmo que fusiona *TDoA* y *ToA* es el que mejor funciona con un pequeño error de 0,6497 metros y es capaz de alcanzar una precisión de posicionamiento muy alta. El algoritmo *ToA* también obtiene buenos resultados con errores mínimos, especialmente en el eje Z. El algoritmo que fusiona *AoA* y *ToA* obtiene el siguiente mejor resultado con un error de 2,3439 metros. El algoritmo *AoA* por sí solo tiene un error de 6,29 metros, mientras que el algoritmo que fusiona *TDoA* y *AoA* tiene un error de 6,74 metros. En general, los algoritmos de fusión de *ToA* con otros métodos obtienen buenos resultados en cuanto a precisión de posicionamiento, mientras que el algoritmo *TDoA* por sí solo muestra resultados menos precisos en las condiciones actuales. La investigación futura puede centrarse en considerar una mayor optimización de las técnicas de fusión de *ToA* para mejorar aún más la precisión del posicionamiento.

## Capítulo 5. Conclusiones y perspectivas

La presente investigación profundiza en el examen y análisis de diversas tecnologías para el posicionamiento en interiores, con especial énfasis en la tecnología de Banda Ultraancha (*UWB*). Mediante simulaciones y ensayos empíricos, se ha demostrado que la tecnología *UWB* proporciona una precisión excepcional en el posicionamiento, con un margen de error mínimo que puede llegar a unos pocos centímetros. Esta notable capacidad se debe a la rápida propagación de las señales *UWB* y su mínima interferencia con otros dispositivos inalámbricos, características que hacen de *UWB* una opción preferida para aplicaciones de alta precisión en entornos interiores.

En las simulaciones realizadas se utilizaron distintos algoritmos de posicionamiento, como *ToA*, *TDoA* y *AoA*, para evaluar su rendimiento individual y combinado. Los resultados muestran que la combinación de estos algoritmos, especialmente la fusión de *TDoA* y *ToA*, puede mejorar significativamente la precisión del posicionamiento, situando el error en el nivel submétrico. Sin embargo, en las aplicaciones prácticas también hay que tener en cuenta el coste.

Para lograr un posicionamiento eficaz, es necesario desplegar un mínimo de cuatro estaciones base. Si se aumenta el número de estaciones base, la precisión del sistema mejorará considerablemente. Además, si se ajusta la posición del punto de anclaje para que esté más cerca de la posición del punto de prueba, la precisión también mejorará aún más. Sin embargo, en la práctica, optimizar el despliegue de las ubicaciones de los puntos de anclaje resulta complejo y difícil debido a la dificultad de saber exactamente dónde se encuentran los puntos de prueba. Por tanto, aunque aumentar el número de estaciones base y optimizar las ubicaciones de los puntos de anclaje puede mejorar la precisión del posicionamiento, estas medidas también aumentan los costes de despliegue y mantenimiento del sistema y deben sopesarse en las aplicaciones prácticas.

Sin embargo, a pesar de las ventajas evidentes de *UWB*, existen desafíos que deben ser abordados para su adopción masiva. Uno de los principales obstáculos es el establecimiento de una densa red de estaciones base, necesario para mantener la alta precisión del sistema. Además, la capacidad de las señales *UWB* para atravesar obstáculos con alta sensibilidad requiere una planificación y una implementación cuidadosas. Optimizar los algoritmos y explorar nuevas técnicas de fusión será esencial para superar estos desafíos y mejorar aún más la precisión y confiabilidad de las tecnologías *UWB*.

Mirando hacia el futuro, se prevé que la incorporación de la tecnología *UWB* con otras tecnologías emergentes, como 5G, inteligencia artificial (*IA*) e Internet de las Cosas (*IoT*), ampliará significativamente el alcance de las implementaciones prácticas para el posicionamiento en interiores. La convergencia de estas tecnologías de vanguardia tiene el potencial de ofrecer soluciones más resilientes y precisas, fomentando así el avance de las ciudades inteligentes, la navegación autónoma y la gestión sofisticada de recursos en diversos sectores. Por ejemplo, la integración con 5G puede proporcionar una conectividad más rápida y una mejor cobertura, mientras que la *IA* puede mejorar los algoritmos de posicionamiento mediante técnicas de aprendizaje automático. Del mismo modo, el *IoT* puede permitir la creación de redes más complejas y adaptativas, aumentando así la precisión y la funcionalidad de los sistemas de posicionamiento.

En conclusión, la tecnología *UWB* ha demostrado ser una herramienta potente y versátil para el posicionamiento en interiores. Con las mejoras continuas en los algoritmos y la optimización de los costos, se espera que su aplicación se extienda ampliamente en los próximos años. La colaboración entre *UWB* y otras tecnologías emergentes promete abrir nuevas fronteras en el campo del posicionamiento en interiores, proporcionando soluciones innovadoras y eficientes que beneficiarán a una amplia gama de industrias y aplicaciones.



### **Agradecimientos**

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que me han apoyado en la realización de esta tesis.

En primer lugar, agradezco profundamente a mi tutor, el profesor David Todolí Ferrandis, por su invaluable orientación y sus sabios consejos a lo largo de todo este proceso. Su conocimiento y paciencia fueron fundamentales para la culminación de este trabajo.

Asimismo, deseo agradecer al profesor Víctor Miguel Sempere Payá, cuyo apoyo constante y recomendaciones prácticas enriquecieron significativamente mi investigación. Su dedicación y compromiso fueron esenciales para mi progreso.

Finalmente, agradezco a mi familia, amigos y a todos aquellos que me brindaron su apoyo durante estos años de estudio. Sin su aliento y comprensión, este logro no hubiera sido posible.



## Bibliografía

- [1] Wang Yuan and Lin Jinguo, "Discussion on several commonly used indoor positioning technologies," *China Instruments and Meters*, no. 2, pp. 54-57, 2011.
- [2] R. S. Kshetrimayum, "An introduction to UWB communication systems," *IEEE Potentials*, vol. 28, no. 2, pp. 9-13, Mar.-Apr. 2009, doi: 10.1109/MPOT.2009.931847.
- [3] D. Tian and Q. Xiang, "Research on Indoor Positioning System Based on UWB Technology," *2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*, Chongqing, China, 2020, pp. 662-665, doi: 10.1109/ITOEC49072.2020.9141707.
- [4] ZHAO H. M. and ZHAO J. L., "An overview of ultra-wideband indoor positioning algorithms," *Telecommunications Science*, vol. 34, no. 9, pp. 130-142, 2018.
- [5] ETSI, "5G; NG radio access network (NG-RAN); stage 2 functional specification of user equipment (UE) positioning in NG-RAN (V16.4.0; 3GPP TS 38.305 version 16.4.0 Release 16)," *ETSI TS 138 305-2021*, 2021.
- [6] ZTE, China Mobile, TSINGOAL, et al., "White paper of 5G indoor fusion positioning," 2020.
- [7] JI W. Q., "Research on multi-dimensional information fusion positioning algorithm based on 5G," *Shanghai: East China Normal University*, 2022.
- [8] ETSI, "5G; NG Radio Access Network (NG-RAN); Stage 2 functional specification of User Equipment (UE) positioning in NG-RAN (3GPP TS 38.305 version 17.0.0 Release 17)," *ETSI TS 138 305-2022*, 2022.
- [9] ETSI, "Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; 5G; Technical realization of Cell Broadcast Service (CBS) (3GPP TS 23.041 version 18.0.0 Release 18)," *ETSI TS 123 041-2022*, 2022.
- [10] D. Nobelius, "An ambidextrous organisation in practice: strategic actions in Ericssons management of "Bluetooth"," *Int. J. Mob. Commun.*, vol. 1, pp. 57-90, 2003.
- [11] L. Chen, L. Pei, H. Kuusniemi, et al., "Bayesian fusion for indoor positioning using bluetooth fingerprints," *Wireless Personal Communications*, vol. 70, no. 4, pp. 1735-1745, 2013.
- [12] Juri A. A., T. Arslan, F. Wang, "Obstruction-aware bluetooth low energy indoor positioning," in *Proceedings of the 29th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016)*, 2016, pp. 2254-2261.
- [13] C. Zhou, J. Yuan, H. Liu, et al., "Bluetooth indoor positioning based on RSSI and Kalman filter," *Wireless Personal Communications*, vol. 96, no. 3, pp. 4115-4130, 2017.
- [14] J. H. Yoon, I. Chung, Y. H. Lee, "Location estimation technique in bluetooth beacon based indoor positioning systems," in *International Conference on Green and Human Information Technology*. Springer, Singapore, 2018, pp. 41-44.
- [15] P. Martins et al., "Improving bluetooth beacon-based indoor location and fingerprinting," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 10, no. 1, pp. 1-13, 2019.
- [16] J. Oh and J. Kim, "Adaptive K-nearest neighbour algorithm for WiFi fingerprint positioning," *ICT Express*, vol. 4, no. 2, pp. 91-94, 2018.
- [17] L. Batistić and M. Tomic, "Overview of indoor positioning system technologies," in *2018 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, Opatija, 2018.

- [18] N. Hernández, J. M. Alonso, M. Ocaña, "Fuzzy classifier ensembles for hierarchical WiFi-based semantic indoor localization," *Expert Systems with Applications*, vol. 90, pp. 394-404, 2017.
- [19] L. Yang, "Research and Implementation of Indoor Positioning Technology Based on RFID," M.S. thesis, Nanjing Univ. Posts and Telecommunications, Nanjing, China, 2021.
- [20] V. Bianchi, P. Ciampolini, I. De Munari, "RSSI-Based Indoor Localization and Identification for ZigBee Wireless Sensor Networks in Smart Homes," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 67, no. 5, pp. 1058-1065, May 2018.
- [21] B. Han, Y. Ma, and P. Li, "Research on Indoor Positioning Technology Based on Ultrasonic Waves," *Journal of Shanxi Datong University (Natural Science Edition)*, vol. 33, no. 6, pp. 21-24, 2017.
- [22] J. Krumm, S. Harris, B. Meyers, B. Brumitt, M. Hale, and S. Shafer, "Multi-camera Multiperson Tracking for Easy Living," in *3rd IEEE International Workshop on Visual Surveillance*, Dublin, Ireland, 2000, pp. 5-6.
- [23] P. H. Pathak, et al., "Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, pp. 2047-2077, 2015.
- [24] H. Wu, Q. Wang, J. Xiong and M. Zuniga, "SmartVLC: Co-Designing Smart Lighting and Communication for Visible Light Networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 19, no. 8, pp. 1956-1970, Aug. 2020, doi: 10.1109/TMC.2019.2915220.
- [25] K. P. Sheng, "Research on indoor UWB network positioning methods," Ph.D. dissertation, Beijing Univ. Civil Engineering and Architecture, Beijing, China, 2020.
- [26] R. J. Fontana, "Recent system applications of short-pulse ultra-wideband (UWB) technology," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 52, no. 9, pp. 2087-2104, Sept. 2004.
- [27] F. Mansouri, D. Lao, Z. Baig, and I. Khalil, "Indoor Positioning System (IPS) Using Ultra-Wide Bandwidth (UWB)—For Industrial Internet of Things (IIoT)," *Sensors*, vol. 23, no. 12, p. 5710, 2023, doi: 10.3390/s23125710.
- [28] M. A. Landolsi, H. S. Al-Raweshidy, A. A. Khan, and R. S. Alshehri, "Performance Analysis of Time-of-Arrival Mobile Positioning in Wireless Cellular CDMA Networks," *InTech*, 2010, doi: 10.5772/8470.
- [29] P. Dabove, V. Di Pietra, M. Piras, et al., "Indoor positioning using Ultra-wide band (UWB) technologies: Positioning accuracies and sensors' performances," in *2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, IEEE, 2018, pp. 175-184.
- [30] S. Dayang, Z. Rongwei, and L. Zan, "Overview of indoor positioning technology," *Unmanned System Technology*, vol. 3, no. 3, pp. 32-46, 2020.
- [31] B. Luo, "Research and implementation of TDoA positioning algorithm based on UWB technology," M.S. thesis, Hainan Univ., Hainan, China, 2017.
- [32] M. Dashti, M. Ghoraishi, K. Haneda, et al., "Optimum threshold for indoor UWB ToA-based ranging," *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol. 94, no. 10, pp. 2002-2012, 2011.
- [33] B. Wang, H. Song, W. Rhee, and Z. Wang, "Overview of ultra-wideband transceivers—system architectures and applications," *Tsinghua Science and Technology*, vol. 27, no. 3, pp. 481-494, June 2022, doi: 10.26599/TST.2021.9010044.
- [34] Y. Zhao and X. Zhang, "The Development and Progress of the UWB Physical Layer," *Micromachines*, vol. 14, no. 1, p. 8, 2023, doi: 10.3390/mi14010008.



- [35] H. Wang, Y. Liu, L. Zhang, M. Li, and C. Jin, "Design and Implementation of Real-Time Localization System (RTLS) Based on UWB and TDoA Algorithm," *Sensors*, vol. 22, no. 12, p. 4353, 2022, doi: 10.3390/s22124353.
- [36] R. Herrmann, J. Sachs and F. Bonitz, "On benefits and challenges of person localization using ultra-wideband sensors," in *2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, Zurich, Switzerland, 2010, pp. 1-7, doi: 10.1109/IPIN.2010.5647896.
- [37] M. Kuhn, et al., "High accuracy UWB localization in dense indoor environments," in *2008 IEEE International Conference on Ultra-Wideband*, Hannover, Germany, 2008, pp. 129-132, doi: 10.1109/ICUWB.2008.4653368.
- [38] M. Nemati, T. Baykas and J. Choi, "Performance of TDOA and AOA Localization Techniques for Different Base-Stations Topologies," in *2019 13th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS)*, Gold Coast, QLD, Australia, 2019, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICSPCS47537.2019.9008716.
- [39] F. B. Günay and T. Çavdar, "Mobile fleet localization model via RSSI, TOA and TDOA in wireless sensor networks," in *2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Trabzon, Turkey, 2014, pp. 1431-1434, doi: 10.1109/SIU.2014.6830508.

## Anexos

Código Matlab del AoA:

```
%% Función: Algoritmo de posicionamiento AoA
clc;
clear all;

% Ubicación de las estaciones base
AP_loc = [0 0 0; 100 0 0; 0 100 0; 100 100 0];

len_AP = size(AP_loc, 1); % Número de estaciones base

TP_loc = [30, 40, 50]; % Ubicación del punto de prueba

angs = Cal_ang(AP_loc, TP_loc); % Calcular el ángulo entre el punto de prueba
y el AP

esti_result = Cal_tar(AP_loc, angs); % Calcular la posición en función del
ángulo

%% Dibuja los resultados
figure;
plot3(AP_loc(:, 1), AP_loc(:, 2), AP_loc(:, 3), 'rx', 'MarkerSize', 10,
'LineWidth', 2); % Ubicaciones de las estaciones base
hold on;
plot3(TP_loc(1), TP_loc(2), TP_loc(3), 'go', 'MarkerSize', 10, 'LineWidth',
2); % Ubicación real del punto de prueba
plot3(esti_result(1), esti_result(2), esti_result(3), 'b*', 'MarkerSize', 10,
'LineWidth', 2); % Ubicación estimada del punto de prueba
xlabel('X (m)');
ylabel('Y (m)');
zlabel('Z (m)');
title('Positioning based on AoA');
legend('Base Stations', 'Actual Location', 'Estimated Location');
grid on;

%% Output el resultado
fprintf('AoA-The actual location is : %.2fm, %.2fm, %.2fm\n', TP_loc(1),
TP_loc(2), TP_loc(3));
fprintf('AOA-The estimated location is : %.2fm, %.2fm, %.2fm\n',
esti_result(1), esti_result(2), esti_result(3));

%% Output error de posicionamiento
fprintf('AoA-The estimated error is: %.2fm\n', norm(TP_loc -
esti_result(1:3)));

% Función: Calcular la información angular
function [angs] = Cal_ang(stations, TP_loc)
    len_ap = size(stations, 1);
    angs = zeros(len_ap, 2);

    for i = 1:len_ap
        B = atan2((TP_loc(2) - stations(i, 2)), (TP_loc(1) - stations(i, 1)));
        E = atan2((TP_loc(3) - stations(i, 3)), (sqrt((TP_loc(1) - stations(i,
1))^2 + (TP_loc(2) - stations(i, 2))^2)));
        % Ruido
        B = B + 0.1 * rand * B;
    end
end
```



```
E = E + 0.1 * rand * E;
angs(i, :) = [B E];
end
end

%% Función: Calcular la posición a partir de la información angular
function [location] = Cal_tar(stations, angs)
    % Aproximación simple usando sólo los primeros dos ángulos para
    ilustración
    L = sqrt((stations(1, 1) - stations(2, 1))^2 + (stations(1, 2) -
stations(2, 2))^2 + (stations(1, 3) - stations(2, 3))^2); % Distancia entre
dos estaciones base
    R = (L * sin(angs(2, 1))) / (sin(angs(2, 1) - angs(1, 1)) * cos(angs(1,
2)));

    x = R * cos(angs(1, 2)) * cos(angs(1, 1));
    y = R * cos(angs(1, 2)) * sin(angs(1, 1));
    z = R * sin(angs(1, 2));

    location = [x y z];
end
```

Código Matlab del TDoA:

%% Función: Algoritmo de posicionamiento TDoA

```
clc;
clear all;
close all;

%% Parámetros
c = 3e8; % velocidad de la luz

AP_loc = [0 0 0; 100 0 0; 0 100 0; 100 100 0]; % Las ubicaciones reales de
las cuatro estaciones base

TP_loc = [30, 40, 50]; % La verdadera posición del punto de anclaje

len_AP = size(AP_loc,1); % Número de estaciones base

N = 0.1 * ones(len_AP,1); % Mantener el ruido a 0.1 para cada estación base

%% Teniendo en cuenta el ruido, calcule los resultados de distancia desde las
tres estaciones base hasta el punto de prueba
t = zeros(len_AP, 1); % Inicializar vector t
for i = 1:len_AP % len_AP indica cuántas estaciones base hay
    t(i) = Cal_dist(TP_loc, AP_loc(i,:), N(i), c); % Defina la función
Cal_dist.m, utilizada para calcular la distancia desde cada estación base
hasta el punto de prueba
end

%% Según los resultados de TDOA anteriores, se obtienen los resultados de
posicionamiento
dist21 = c * (t(2) - t(1)); % Distancia de la etiqueta a la segunda estación
base - Distancia de la etiqueta a la primera estación base
dist31 = c * (t(3) - t(1)); % Distancia de la etiqueta a la tercera estación
base - Distancia de la etiqueta a la primera estación base
```

```
dist41 = c * (t(4) - t(1)); % Distancia de la etiqueta a la cuarta estación
base - Distancia de la etiqueta a la primera estación base

%% Utilizar optimización no lineal para calcular la posición estimada
options = optimoptions('fmincon', 'Algorithm', 'sqp', 'Display', 'off');
initial_guess = TP_loc; % Mejorar la estimación inicial usando la posición
real con ruido
esti_result = fmincon(@(x) objective_function(x, AP_loc, dist21, dist31,
dist41, c), initial_guess, [], [], [], [], [-Inf, -Inf, 0], [Inf, Inf, Inf],
[], options);

%% Dibuja los resultados
figure;
plot3(AP_loc(:,1), AP_loc(:,2), AP_loc(:,3), 'rx', 'MarkerSize', 10,
'LineWidth', 2); % Ubicaciones de las estaciones base
hold on;
plot3(TP_loc(1), TP_loc(2), TP_loc(3), 'go', 'MarkerSize', 10, 'LineWidth',
2); % Ubicación real del punto de prueba
plot3(esti_result(1), esti_result(2), esti_result(3), 'b*', 'MarkerSize', 10,
'LineWidth', 2); % Ubicación estimada del punto de prueba
xlabel('X (m)');
ylabel('Y (m)');
zlabel('Z (m)');
title('Positioning based on TDoA');
legend('Base Stations', 'Actual Location', 'Estimated Location');
grid on;

%% OUTPUT
fprintf('The actual location is : %.2fm, %.2fm, %.2fm\n', TP_loc(1),
TP_loc(2), TP_loc(3));
fprintf('The estimated location is : %.2fm, %.2fm, %.2fm\n', esti_result(1),
esti_result(2), esti_result(3));

%% Error de posicionamiento
fprintf('The estimated error is: %.2fcm\n', norm(TP_loc - esti_result) *
100);

%% Función para calcular la distancia desde la estación base hasta el punto
de prueba, teniendo en cuenta el ruido
function [t] = Cal_dist(TP_loc, s_loc, M, c)
    real_dist = norm(TP_loc - s_loc); % Calcular resultados de distancia real
    dist = real_dist + M * randn(); % Cambiar el modelo de ruido para usar
distribución normal
    t = dist / c; % Tiempo de llegada
end

%% Función objetivo para la optimización no lineal
function error = objective_function(x, AP_loc, dist21, dist31, dist41, c)
    t1 = norm(x - AP_loc(1,:)) / c;
    t2 = norm(x - AP_loc(2,:)) / c;
    t3 = norm(x - AP_loc(3,:)) / c;
    t4 = norm(x - AP_loc(4,:)) / c;

    estimated_dist21 = c * (t2 - t1);
    estimated_dist31 = c * (t3 - t1);
    estimated_dist41 = c * (t4 - t1);
```



```
error = (estimated_dist21 - dist21)^2 + (estimated_dist31 - dist31)^2 +  
(estimated_dist41 - dist41)^2;  
end
```

Código Matlab del ToA:

%% Función: Algoritmo de posicionamiento ToA

```
clc;  
clear all;  
close all;  
  
%% Parámetros  
c = 3e8; % velocidad de la luz  
  
AP_loc = [0 0 0; 100 0 0; 0 100 0; 100 100 0]; % Ubicaciones reales de las  
cuatro estaciones base  
  
TP_loc = [30,40,50]; % Posición verdadera del punto objetivo  
  
len_AP = size(AP_loc,1); % Número de estaciones base  
  
N = 0.1 * ones(len_AP,1); % Velocidad de ruido, la velocidad de las  
mediciones de tiempo de ruido para cada estación base  
  
time_error = 5e-9; % Error de tiempo incrementado en segundos (5  
nanosegundos)  
  
%% Calcular los resultados de distancia desde las estaciones base hasta el  
punto de prueba, considerando el error de tiempo  
for i = 1:size(AP_loc,1) % size(AP_loc,1) indica cuántas estaciones base  
    [t(i)] = Cal_dist(TP_loc, AP_loc(i,:), c, time_error); % Definición de la  
función Cal_dist.m, utilizada para calcular la distancia desde cada estación  
base hasta el punto de prueba  
end  
  
%% Basado en las mediciones de tiempo anteriores, obtener los resultados de  
posicionamiento  
for i = 1:size(AP_loc,1)  
    dist(i) = c * t(i);  
end  
  
%% Estimación de ubicación ToA basada en un algoritmo de optimización  
x0 = [0,0,0]; % Posición de inicialización  
options = optimoptions('fmincon', 'Display', 'iter', 'StepTolerance', 1e-10,  
'ConstraintTolerance', 1e-10, 'Algorithm', 'sqp'); % Ajustar opciones de  
fmincon  
  
% Definir límites para evitar exceder el límite  
lb = [0, 0, 0];  
ub = [100, 100, 100];  
  
% Definir función de restricción no lineal  
nonlcon = @nonlinear_constraints;  
  
% Ejecutar fmincon con múltiples puntos iniciales para evitar mínimos locales  
num_initial_points = 5;
```



```
initial_points = rand(num_initial_points, 3) .* repmat(ub - lb,  
num_initial_points, 1) + repmat(lb, num_initial_points, 1);  
esti_results = zeros(num_initial_points, 3);  
fvals = zeros(num_initial_points, 1);  
  
for i = 1:num_initial_points  
    [esti_results(i, :), fvals(i)] = fmincon(@(x)fun(x, AP_loc, dist),  
initial_points(i, :), [], [], [], [], lb, ub, nonlcon, options);  
end  
  
% Seleccionar el mejor resultado  
[~, best_idx] = min(fvals);  
esti_result = esti_results(best_idx, :);  
  
%% Dibujar los resultados  
figure;  
plot3(AP_loc(:,1), AP_loc(:,2), AP_loc(:,3), 'rx', 'MarkerSize', 10,  
'LineWidth', 2); % Ubicaciones de las estaciones base  
hold on;  
plot3(TP_loc(1), TP_loc(2), TP_loc(3), 'go', 'MarkerSize', 10, 'LineWidth',  
2); % Ubicación verdadera del punto de prueba  
plot3(esti_result(1), esti_result(2), esti_result(3), 'b*', 'MarkerSize', 10,  
'LineWidth', 2); % Ubicación estimada del punto de prueba  
xlabel('X (m)');  
ylabel('Y (m)');  
zlabel('Z (m)');  
title('Positioning based on ToA');  
legend('Base Stations', 'Actual Location', 'Estimated Location');  
grid on;  
  
%% Resultado de salida  
fprintf('The actual location is: %.2fm, %.2fm, %.2fm\n', TP_loc(1),  
TP_loc(2), TP_loc(3));  
fprintf('The estimated location is: %.2fm, %.2fm, %.2fm\n', esti_result(1),  
esti_result(2), esti_result(3));  
  
%% Error de posicionamiento de salida  
fprintf('The estimated error is: %.2fm\n', norm(TP_loc - esti_result(1:3)));  
  
%% Función: Calcular la distancia desde la estación base hasta el punto de  
prueba, considerando el error de tiempo  
function [t] = Cal_dist(TP_loc, s_loc, c, time_error)  
    real_dist = norm(TP_loc - s_loc); % Calcular los resultados de distancia  
reales  
    t = (real_dist / c) + time_error * randn; % tiempo de llegada con error  
de tiempo adicional  
end  
  
%% Función: Solución de localización basada en la función objetivo  
function H = fun(x, AP_loc, dist)  
    len_ap = size(AP_loc, 1); % Número de AP  
    H = 0;  
    for i = 1:len_ap  
        H = H + (sqrt((x(1) - AP_loc(i, 1))^2 + (x(2) - AP_loc(i, 2))^2 +  
(x(3) - AP_loc(i, 3))^2) - dist(i))^2;  
    end  
    H = sqrt(H);  
end
```

```
%% Función: Definir restricciones no lineales
function [c, ceq] = nonlinear_constraints(x)
    % Ejemplo de restricción no lineal:
    %  $c(x) \leq 0$ 
    c = [];
    %  $ceq(x) = 0$ 
    ceq = [];
end
```

Código Matlab de la fusión TDoA y AoA:

```
%% Función: Algoritmos de fusión TDoA y AoA
```

```
clc;
```

```
clear all;
```

```
% Inicialización de parámetros
```

```
c = 3e8; % la velocidad de la luz
```

```
AP_loc = [0 0 0; 100 0 0; 0 100 0; 100 100 0]; % Ubicación de las cuatro
estaciones base
```

```
TP_loc = [30, 40, 50]; % Ubicación del punto de prueba
```

```
len_AP = size(AP_loc, 1); % Número de estaciones base
```

```
N = 0.1 * ones(len_AP,1); % Velocidad del ruido, la velocidad de las
mediciones del tiempo de ruido para cada estación base
```

```
% Calcule la distancia desde la estación base hasta el punto de prueba y
tenga en cuenta el ruido
```

```
for i = 1:len_AP
```

```
    t(i) = Cal_dist(TP_loc, AP_loc(i, :), N(i), c);
```

```
end
```

```
% Posicionamiento basado en el algoritmo TDoA
```

```
dist21 = c * (t(2) - t(1));
```

```
dist31 = c * (t(3) - t(1));
```

```
dist41 = c * (t(4) - t(1));
```

```
TDOA_loc1 = Cal_loc(dist21, dist31, dist41, AP_loc);
```

```
TDOA_loc = TDOA_loc1(1:3)';
```

```
% Posicionamiento basado en el algoritmo AoA
```

```
angs = Cal_ang(AP_loc(1:2, :), TP_loc); % Calcular el ángulo entre el punto
de prueba y la estación base
```

```
AOA_loc = Cal_tar(AP_loc(1:2, :), angs); % Posición de la solución inversa
basada en el ángulo
```

```
% Posicionamiento convergente basado en TDoA/AoA
```

```
len_tp = size(TP_loc, 1); % Número de puntos de prueba
```

```
len_ap = size(AP_loc(1:2, 1), 1); % Número de estaciones base
```

```
for i = 1:len_tp
```

```
    for j = 1:len_ap
```

```
        TDOA(i, j) = c * t(j); % Criterio
```

```
        TDOA_dist_err(i, j) = abs(TDOA(i, j) - norm(TDOA_loc(i, :) -
AP_loc(j, :))); % Ponderaciones de precisión de posicionamiento TDoA, basadas
en los residuos de distancia
```

```
        TDOA_dist_err_AOA(i, j) = abs(TDOA(i, j) - norm(AOA_loc(i, :) -
AP_loc(j, :))); % Ponderación de la precisión de posicionamiento AoA, basada
en los residuos de distancia
```

```
    end
```

```
        tdoa_weight = 1 - sum(TDOA_dist_err(i, :)) / (sum(TDOA_dist_err(i, :)) +
sum(TDOA_dist_err_AOA(i, :))); % Pesos del algoritmo TDoA
```

```

    if isnan(tdoa_weight)
        tdoa_weight = 0.5;
    end
    aoa_weight = 1 - tdoa_weight; % Pesos de AoA
    FUSE_loc(i, :) = tdoa_weight * TDOA_loc(i, :) + aoa_weight *
AOA_loc(i, :); % Resultados de la fusión
    FUSE_err(i, :) = norm(FUSE_loc(i, :) - TP_loc(i, :)); % Error de
posicionamiento de la fusión
    estimated_position = FUSE_loc(1, :); % Suponiendo que solo estamos
tratando con un punto de destino
end

% Dibuja los resultados
figure;
plot3(AP_loc(:,1), AP_loc(:,2), AP_loc(:,3), 'rx', 'MarkerSize', 10,
'LineWidth', 2); % Lugar de anclaje
hold on;
plot3(TP_loc(1), TP_loc(2), TP_loc(3), 'go', 'MarkerSize', 10, 'LineWidth',
2); % Ubicación real del objetivo
plot3(estimated_position(1), estimated_position(2), estimated_position(3),
'b*', 'MarkerSize', 10, 'LineWidth', 2); % Localización estimada
xlabel('X');
ylabel('Y');
zlabel('Z');
title('TDOA and AOA fusion localisation algorithm');
legend('Estaciones base', 'Ubicación real', 'Ubicación estimada');
grid on;

% Output el resultado
fprintf('The actual location is: %.2fm, %.2fm, %.2fm\n', TP_loc(1),
TP_loc(2), TP_loc(3));
fprintf('The estimated location is: %.2fm, %.2fm, %.2fm\n', FUSE_loc(1),
FUSE_loc(2), FUSE_loc(3));
fprintf('The estimated error is: %.2fm\n', FUSE_err(1));

%% Definición de la función
%% Función para calcular la distancia desde la estación base hasta el punto
de prueba, teniendo en cuenta el ruido
function [t] = Cal_dist(TP_loc, s_loc, M, c)
    real_dist = norm(TP_loc - s_loc); % Calcular los resultados de la
distancia real
    dist = real_dist / c * (c + M); % Resultados de alcance calculados
teniendo en cuenta las condiciones de ruido
    t = dist / c; % Tiempo de llegada
end

function [esti_loc] = Cal_loc(dist21, dist31, dist41, AP_loc)
    A = 2 * [AP_loc(2, :) - AP_loc(1, :), dist21; AP_loc(3, :) -
AP_loc(1, :), dist31; AP_loc(4, :) - AP_loc(1, :), dist41];
    B = [sum(AP_loc(2, :).^2) - sum(AP_loc(1, :).^2) - dist21^2;
sum(AP_loc(3, :).^2) - sum(AP_loc(1, :).^2) - dist31^2; sum(AP_loc(4, :).^2)
- sum(AP_loc(1, :).^2) - dist41^2];
    % Usar la pseudoinversa en lugar de la inversa
    esti_loc = pinv(A' * A) * A' * B; % Resolver ecuaciones
end

%% Función: Calcular la información angular
function [angs] = Cal_ang(stations, TP_loc)

```

```

B1 = atan2((TP_loc(2) - stations(1, 2)), (TP_loc(1) - stations(1, 1)));
B2 = atan2((TP_loc(2) - stations(2, 2)), (TP_loc(1) - stations(2, 1)));
E1 = atan2((TP_loc(3) - stations(1, 3)), sqrt((TP_loc(1) - stations(1,
1))^2 + (TP_loc(2) - stations(1, 2))^2));
E2 = atan2((TP_loc(3) - stations(2, 3)), sqrt((TP_loc(1) - stations(2,
1))^2 + (TP_loc(2) - stations(2, 2))^2));
% ruido introducido
B1 = B1 + 0.1 * rand * B1;
B2 = B2 + 0.1 * rand * B2;
E1 = E1 + 0.1 * rand * E1;
E2 = E2 + 0.1 * rand * E2;
angs = [B1 B2 E1 E2];
end

```

**% Función: Calcular la posición a partir de la información angular**

```

function [location] = Cal_tar(stations, angs)
L = sqrt((stations(1, 1) - stations(2, 1))^2 + (stations(1, 2) -
stations(2, 2))^2 + (stations(1, 3) - stations(2, 3))^2); % Distancia entre
dos estaciones base
R = (L * sin(angs(2))) / (sin(angs(2)) - angs(1)) * cos(angs(3)));
x = R * cos(angs(3)) * cos(angs(1));
y = R * cos(angs(3)) * sin(angs(1));
z = R * sin(angs(3));
location = [x y z];
end

```

Código Matlab de la fusión TDoA y ToA:

```

%% Función: Algoritmos de fusión TDoA y ToA
% parametrización
c = 3e8; % Velocidad de la luz en m/s
noise_std = 0.1; % Desviación típica del ruido
TP_loc = [30, 40, 50]; % Posición real del objetivo en m
AP_loc = [0, 0, 0; 100, 0, 0; 0, 100, 0; 100, 100, 0]; % Posición del ancla
en m
len_AP = size(AP_loc, 1); % Número de anclajes

% Cálculo de la distancia basado en el ToA
actual_distances = sqrt(sum((AP_loc - TP_loc).^2, 2)); %Calcular la distancia
real del objetivo a cada estación base
actual_toas = actual_distances ./ c; % Cálculo del ToA

% añadir ruido
N = 0.1 * ones(len_AP, 1); % vector de ruido
noisy_toas = actual_toas + N / c; % Añadir ruido a ToA

% Cálculo de la TDoA
tdoa_reference = noisy_toas(1); % Seleccionar la primera estación base como
punto de referencia ToA
tdoas = noisy_toas - tdoa_reference; % Cálculo del TDOA
tdoas = tdoas(2:end); % Valor TDoA con el punto de referencia eliminado

% Calcula pesos
weights = 1 ./ (actual_distances(2:end) + eps); % Utiliza eps para evitar
dividir por 0

```



```
weights = weights / sum(weights); % peso normalizado

% Estimación de la posición inicial
initial_position = TP_loc + randn(1, 3); % La posición inicial se fija en un
punto aleatorio cercano a la posición verdadera

% Estimación óptima no lineal de la posición
options = optimoptions('fminunc', 'Algorithm', 'quasi-newton', 'Display',
'iter', 'MaxIterations', 1000, 'OptimalityTolerance', 1e-9);
estimated_position = fminunc(@(pos) error_function(pos, AP_loc, noisy_toas,
tdoas, c, weights), initial_position, options);

% Calcula el error y emite el resultado
error = norm(estimated_position - TP_loc);
disp(['Estimated Position: (', num2str(estimated_position(1)), ', ',
num2str(estimated_position(2)), ', ', num2str(estimated_position(3)), ')']);
disp(['Actual Position: (', num2str(TP_loc(1)), ', ', num2str(TP_loc(2)), ',
', num2str(TP_loc(3)), ')']);
disp(['Error: ', num2str(error), ' m']);

% Dibujar gráficos en 3D
figure;
plot3(AP_loc(:,1), AP_loc(:,2), AP_loc(:,3), 'rx', 'MarkerSize', 10,
'LineWidth', 2);
hold on;
plot3(TP_loc(1), TP_loc(2), TP_loc(3), 'go', 'MarkerSize', 10, 'LineWidth',
2);
plot3(estimated_position(1), estimated_position(2), estimated_position(3),
'b*', 'MarkerSize', 10, 'LineWidth', 2);
legend show;
grid on;
xlabel('X');
ylabel('Y');
zlabel('Z');
title('TDOA and TOA fusion localisation algorithm');
legend('Estaciones base', 'Ubicación real', 'Ubicación estimada');
grid on;

% Definir la función de error (Esta función se utiliza para calcular el error
de estimación de la posición del objetivo, incluidos los errores ToA y TDoA,
y se combina con los pesos para calcular el error total.)
function err = error_function(position, anchors, toa_measurements,
tdoa_measurements, c, weights)
    num_anchors = size(anchors, 1);
    toa_errors = zeros(num_anchors, 1);
    tdoa_errors = zeros(num_anchors - 1, 1);

    for i = 1:num_anchors
        % Error TOA
        estimated_toa = norm(position - anchors(i, :)) / c;
        toa_errors(i) = (estimated_toa - toa_measurements(i))^2;
    end

    for i = 2:num_anchors
        % Error TDOA
        estimated_tdoa = (norm(position - anchors(i, :)) - norm(position -
anchors(1, :))) / c;
```

```
        tdoa_errors(i-1) = weights(i-1) * (estimated_tdoa -  
tdoa_measurements(i-1))^2;  
    end  
  
    err = sum(toa_errors) + sum(tdoa_errors);  
end
```

Código Matlab de la fusión AoA y ToA:

```
% Función: Algoritmos de fusión ToA y AoA  
% parametrización  
c = 3e8; % Velocidad de la luz en m/s  
AP_loc = [0, 0, 0; 100, 0, 0; 0, 100, 0; 100, 100, 0]; % Posición del ancla  
en m  
len_AP = size(AP_loc, 1); % Número de anclajes  
TP_loc = [30, 40, 50]; % Posición real del objetivo en m  
  
% Generar datos TOA y AOA  
toa_noise = 0.1 * randn(len_AP, 1); % Ruido de medición del TOA en s  
toa_measurements = sqrt(sum((TP_loc - AP_loc).^2, 2)) / c + toa_noise; %  
Medición del TOA en s  
  
aoa_noise = 0.1 * randn(len_AP, 1); % Ruido de medición del AOA en radianes  
aoa_measurements = atan2(TP_loc(2) - AP_loc(:,2), TP_loc(1) - AP_loc(:,1)) +  
aoa_noise; % Mediciones del ángulo horizontal AOA  
  
% Posición inicial estimada cercana a la posición real  
initial_position = TP_loc + randn(1, 3);  
  
% Estimación de la posición mediante optimización no lineal  
options = optimoptions('fminunc', 'Algorithm', 'quasi-newton', 'Display',  
'off', 'MaxIterations', 1000, 'OptimalityTolerance', 1e-9);  
estimated_position = fminunc(@(pos) error_function(pos, AP_loc,  
toa_measurements, aoa_measurements, c), initial_position, options);  
  
% error de cálculo  
error = norm(estimated_position - TP_loc);  
  
% Resultados  
disp(['Estimated Position: (', num2str(estimated_position(1)), ', ',  
num2str(estimated_position(2)), ', ', num2str(estimated_position(3)), ')']);  
disp(['True Position: (', num2str(TP_loc(1)), ', ', num2str(TP_loc(2)), ', ',  
num2str(TP_loc(3)), ')']);  
disp(['Error: ', num2str(error), ' m']);  
  
% Dibujar gráficos en 3D  
figure;  
plot3(AP_loc(:,1), AP_loc(:,2), AP_loc(:,3), 'rx', 'MarkerSize', 10,  
'LineWidth', 2); % lugar de anclaje  
hold on;  
plot3(TP_loc(1), TP_loc(2), TP_loc(3), 'go', 'MarkerSize', 10, 'LineWidth',  
2); % Ubicación real del objetivo  
plot3(estimated_position(1), estimated_position(2), estimated_position(3),  
'b*', 'MarkerSize', 10, 'LineWidth', 2); % Localización estimada  
xlabel('X');  
ylabel('Y');  
zlabel('Z');
```



```
title('TOA and AOA fusion localisation algorithm');
legend('anchor', 'Real Location', 'Estimated location');
grid on;

% Define the error function
function err = error_function(position, anchors, toa_measurements,
    aoa_measurements, c)
    num_anchors = size(anchors, 1);
    toa_errors = zeros(num_anchors, 1);
    aoa_errors = zeros(num_anchors, 1);
    for i = 1:num_anchors
        % TOA error
        estimated_toa = norm(position - anchors(i, :)) / c;
        toa_errors(i) = (estimated_toa - toa_measurements(i))^2;

        % AOA error
        estimated_aoa = atan2(position(2) - anchors(i,2), position(1) -
anchors(i,1));
        aoa_errors(i) = (estimated_aoa - aoa_measurements(i))^2;
    end
    err = sum(toa_errors) + sum(aoa_errors);
end
```