

1.- Red de Sensores -- tesis y asesoraciones
2.- Sistemas de comunicación inalámbrica

Tesis
TK
872
-1148
V35
2010

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Localización de Sensores en Ambientes Cerrados Dinámicos

94395.

José Pablo Valarezo García

Tesis de Grado presentada como requisito para la obtención del título de Ingeniero
Eléctrico/Electrónico

Quito, Enero del 2010



BIBLIOTECA	
d. Autor	
10-03-18	
18 MAR. 2010	014752

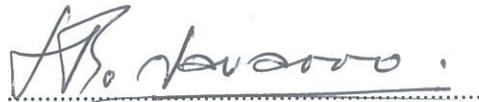
**Universidad San Francisco de Quito
Colegio de Ciencias e Ingeniería**

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

Localización de sensores en ambientes cerrados dinámicos

José Pablo Valarezo García

Santiago Navarro, PhD.
Director de la Tesis y
Miembro del Comité de Tesis



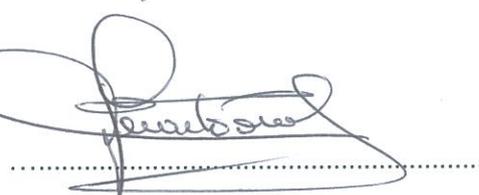
.....

René Játiva, DEA
Miembro del Comité de Tesis



.....

Daniel Cárdenas, PhD.
Miembro del Comité de Tesis



.....

Fernando Romo P., M.Sc.
Decano del Colegio de Ciencias e Ingeniería



.....

Quito, Enero 2010

© Derechos de autor
José Pablo Valarezo García
2010

Agradecimientos

Deseo expresar mi sincero agradecimiento y aprecio a mi Director de Tesis Santiago Navarro por su atención, guía, visión y apoyo durante el desarrollo de la Tesis y mi vida estudiantil universitaria. Además, expreso mis agradecimientos a los miembros del Comité de Tesis, René Játiva y Daniel Cárdenas, por sus comentarios constructivos y sugerencias.

Quisiera expresar mi agradecimiento profundo a mi familia por su apoyo y amor incondicional desde mi niñez hasta este punto de mi carrera. Finalmente, agradezco a Dios por permitirme culminar de manera exitosa esta meta importante en mi vida.

José Pablo Valarezo García

Enero 2010, Quito, Ecuador

Resumen

La localización de sensores en redes de sensores inalámbricos es un área importante que atrae mucho interés en el campo de la investigación. El descubrimiento de la posición es un problema fundamental que debe ser resuelto para soportar aplicaciones conscientes de la posición. La creciente demanda de aplicaciones conscientes de la posición requiere el desarrollo de soluciones de localización con orientaciones específicas de la aplicación y balances apropiados entre precisión y costos. La presente tesis se concentra en mejorar el desempeño de soluciones de localización simples y de bajo costo, basadas en principios de propagación, en ambientes cerrados dinámicos.

Primero, se provee una visión global de los diferentes métodos para localización en redes de sensores inalámbricos, en la cual se resaltan sus principales características y problemas. Luego se investigan las fuentes de variabilidad de la intensidad de señal recibida. Los problemas en ambientes cerrados dinámicos del método de estimación de distancias basado en la pérdida de señal son analizados empíricamente. En base a estos análisis teóricos y empíricos previos, se implementa un sistema robusto de conversión de intensidad de señal recibida a distancia, el cual contrarresta los problemas causados por el canal de radio. Para encontrar las posiciones desconocidas de los sensores en base a las distancias estimadas, la solución implementa el método de optimización de cuadrados mínimos con función de valoración, el cual reduce el impacto de los errores de la estimaciones de distancias en la estimación de la posición.

Abstract

Wireless sensor network localization is an important area that attracts significant research interest. Localization discovery is a fundamental problem that must be solved in order to support location-aware applications. The growing demand of location-aware applications requires the development of application-oriented localization solutions with appropriate trade-offs between accuracy and costs. The present thesis concentrates on enhancing the performance of simple and low-cost propagation-based localization solutions in dynamic indoor environments.

First, an overview of the different approaches in wireless sensor networks localization is provided, in which their main features and problems are highlighted. Next, sources of received signal strength variability are investigated. Then, the problems of the signal-strength distance estimation approach in dynamic indoor environments are empirically analyzed. Based on these previous theoretical and empirical analysis, a robust ranging system, that counteracts the problems caused by the radio channel, is implemented. For finding the unknown location of sensors based on the estimated distances, the solution implements a weighted least-squares optimization algorithm that reduces the impact of the distance estimates errors in the location estimate.

Tabla de Contenidos

Agradecimientos.....	IV
Resumen.....	V
Abstract.....	VI
Tabla de Contenidos.....	VII
Lista de Figuras.....	IX
Lista de Tablas.....	IX
Abreviaciones.....	X
1 Acerca de Localización de Sensores	1
1.2 Campo de interés.....	2
1.3 Definición del Problema.....	2
1.4 Revisión de la Literatura.....	4
1.4 Metodología de Investigación.....	7
1.5 Perfil de Tesis.....	8
2 Estudio Teórico de los Métodos de Localización	10
2.1 Métodos de Estimación de Rango.....	10
2.1.1 Intensidad de Señal Recibida.....	10
2.1.2 Tiempo de Vuelo.....	11
2.1.3 Haz de recepción.....	13
2.1.4 Interferencia de Radio.....	14
2.2 Métodos Libres de Estimación de Rango.....	15
2.2.1 Basados en Conectividad.....	15
2.2.2 Basados en Proximidad.....	16
2.2.3 Basados en Huellas.....	17
2.3 Mediciones y Soluciones Híbridas.....	18
2.4 Metodología de la Solución.....	19
3 Desarrollo del Sistema de Estimación de Distancias	21
3.1 Fuentes de variabilidad de RSS.....	21
3.1.1 Fuentes externas de variabilidad de RSS.....	21
3.1.2 Fuentes intrínsecas de variabilidad de RSS.....	25
3.2 Modelo de Pérdida de Señal.....	26
3.2.1 Pérdida de señal dependiente de la distancia.....	27
3.2.2 Efecto multicamino.....	28
3.2.3 Apantallamiento.....	32
4 Algoritmos de Localización Basados en Distancias	36
4.1 Optimización.....	36
4.2 Algoritmo de Localización a implementar.....	39
4.3 Delineamientos del problema de localización.....	40
4.4 Optimización de cuadrados mínimos.....	40
4.5 Función de valoración.....	42
4.6 Análisis de desempeño vía simulación.....	45

5	Plataforma Empírica	50
5.1	El Estándar IEEE 802.15.4.....	50
5.1.1	Topología de la red.....	51
5.1.2	Capa Física.....	52
5.1.3	Que más es relevante?.....	53
5.2	Sensinodes.....	54
5.2.1	Potencia de Salida.....	55
5.2.2	RSSI / Detección de Energía.....	56
6	Demostración empírica de la solución	58
6.1	Creando la Aplicación.....	58
6.2	Puesta en Marcha del Experimento.....	60
6.3	Análisis de Resultados.....	63
6.3.1	Contrarrestando el efecto multicamino.....	63
6.3.2	Contrarrestando el apantallamiento.....	65
6.3.3	Estimación de la Posición.....	66
7	Conclusiones	68
	Referencias	70

5	Plataforma Empírica	50
5.1	El Estándar IEEE 802.15.4.....	50
5.1.1	Topología de la red.....	51
5.1.2	Capa Física.....	52
5.1.3	Que más es relevante?.....	53
5.2	Sensinodes.....	54
5.2.1	Potencia de Salida.....	55
5.2.2	RSSI / Detección de Energía.....	56
6	Demostración empírica de la solución	58
6.1	Creando la Aplicación.....	58
6.2	Puesta en Marcha del Experimento.....	60
6.3	Análisis de Resultados.....	63
6.3.1	Contrarrestando el efecto multicamino.....	63
6.3.2	Contrarrestando el apantallamiento.....	65
6.3.3	Estimación de la Posición.....	66
7	Conclusiones	68
	Referencias	70

Lista de Figuras

3.1 Escenario de la campaña de mediciones preliminar.....	30
3.2 Aproximación de la curva de RSS a distancia (ambiente estático).....	31
3.3 Aproximación de la curva de RSS a distancia (ambiente dinámico).....	34
4.1 Comparación de desempeño entre metric-MDS y WLS.....	47
4.2 Desempeño de las matrices C, H_D , y H usando metric-MDS.....	48
4.3 Desempeño de las matrices C, H_D , y H usando WLS.....	48
5.1 Topología de la Red.....	51
5.2 U100 micro.2420 sensinode.....	54
5.3 Valor típico de RSSI vs potencia de entrada.....	56
6.1 Antena monopolo externa.....	60
6.2 Escenario Empírico.....	61
6.3 Despliegue de Nodos sujetadores.....	61
6.4 Aproximación de la curva RSS a distancia cuando las técnicas de diversidad propuestas son utilizadas.....	64
6.5 Aproximación de la curva RSS a distancia cuando solamente diversidad de tiempo es utilizada.....	64
6.6 Error estándar de la aproximación de las curvas.....	66
6.7 Estadísticas de la estimación de la posición.....	67

Lista de Tablas

5.1 Configuraciones de salida de potencia @ 2.45 Ghz.....	55
---	----

Abreviaciones

FFD	Full Function Device
GPS	Global Positioning System
HUT	Helsinki University of Technology
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LOS	Line-of-Sight
LR-WPAN	Low-Rate Wireless Personal Area Network
MAC	Medium Access Control
MDS	Multidimensional Scaling
NLOS	Non-Line-of-Sight
PCB	Printed Circuit Board
PHY	Physical Layer
RSS	Received Signal Strength
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RIPS	Radio Interferometric Positioning System
RFD	Reduced Function Device
RTT	Round Trip Time
SoC	System-on-Chip
SS	Spread Spectrum
TDOA	Time Difference of Arrival
TOF	Time-of-Flight
UWB	Ultra Wide Band
WLS	Weighted Least-Squares
WPAN	Wireless Personal Area Network

WSN

Wireless Sensors Network

CAPÍTULO 1

ACERCA DE LOCALIZACIÓN DE SENSORES

La aplicación de sensores inalámbricos en red empezó en el área de la defensa, proveyendo capacidades de reconocimiento y vigilancia así como también otras aplicaciones tácticas. En la actualidad, las redes de sensores inalámbricos (Wireless Sensor Network, WSN) es una tecnología relevante que provee soluciones para múltiples “ambientes inteligentes”, incluyendo automatización industrial, monitoreo del ambiente y del hábitat, aplicaciones para cuidado de la salud, automatización de hogares y control de tráfico. Sensores multi-funcionales de bajo costo y baja potencia, que son pequeños en tamaño y se comunican en cortas distancias, hacen de WSNs una tecnología adecuada para soluciones de gran escala.

Auto-localización, o descubrimiento de la posición, se refiere a la habilidad de un sistema para deducir la posición geográfica de un nodo, el cual es un problema fundamental que debe ser solucionado en una red de sensores. El conocimiento de las posiciones de los nodos de una red es crucial para dar soporte a varias aplicaciones y protocolos. Por ejemplo, el monitoreo del ambiente requiere que la información censada sea estampada con la posición absoluta de donde proviene. También, las redes de actuadores llevan acabo funciones de acuerdo a la información de posición, como en aplicaciones para detección de presencia. Así también, aplicaciones relacionadas con tráfico pueden generar rutas de acuerdo a la posición de los nodos.

En la situación actual, sistemas de localización en ambientes abiertos, usando el Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System, GPS), han sido desplegados de manera exitosa durante la última década para aquellos sistemas donde la forma y el costo no son mayores preocupaciones. Pero, solucionar el problema de localización para otro tipo de requerimientos, como son ambientes cerrados sin acceso a GPS, continúan siendo un problema que presenta grandes retos como la limitación de no línea de vista (non-line-of-sight, NLOS), mediciones de corto alcance y propiedades de radio propagación hostiles.

1.1 Campo de interés

Auto-localización es un problema fundamental que debe ser solucionado en una red de sensores, el cual es el campo de investigación de mi Tesis de Ingeniería. La investigación busca dar solución al problema de localización en redes de sensores en ambientes cerrados dinámicos, utilizando recursos de la red existentes, esto es, sin recurrir a hardware de localización adicionales, para así lograr un balance justo entre precisión y costos.

La presente Tesis ha sido desarrollada de manera personal en mi calidad de miembro del grupo de trabajo en redes de sensores inalámbricos (WSN working group) de la Universidad de Tecnología de Helsinki (Helsinki University of Technology, HUT).

1.2 Definición del Problema

Los algoritmos de localización estiman las posiciones desconocidas de los nodos usando el conocimiento previo de las posiciones absolutas de unos pocos nodos y ya sea mediciones de rango tales como mediciones de distancia y orientación, u otra información de la red tales como mapas de conectividad, información de proximidad y huellas de intensidad de señal. Los nodos que conocen su posición se conocen como nodos sujetadores, cuyas posiciones pueden ser obtenidas usando GPS o instalando los nodos en posiciones de coordenadas conocidas. Los nodos con posiciones desconocidas serán llamados nodos ciegos.

Ciertamente existen varios aspectos que hacen de la auto-localización en WSNs un problema poco trivial. Algunos de estos problemas son los costos relacionados a los circuitos adicionales y su consumo de potencia para realizar mediciones de distancia y/u orientación, la necesidad de nodos sujetadores, mediciones de corto alcance, mediciones imprecisas, no línea de vista, redes no isotrópicas, costos de comunicación adicionales y ataques de seguridad. Dependiendo en los requerimientos del sistema y especialmente en la precisión requerida de la aplicación, los aspectos anteriormente citados pueden inhabilitar

la realización de una solución efectiva en términos de costo.

Reconociendo la creciente demanda de varias aplicaciones conscientes de la posición, con cierta tolerancia a errores en la información de posición, una solución simple y de bajo costo basada en radio será diseñada. Claramente, crear un sistema efectivo de localización en ambiente cerrados dinámicos conlleva verdaderos retos debido a las propiedades especiales del canal de radio en cuestión.

La solución diseñada emplea un sistema de estimación de distancias, basado en la pérdida de señal (esto es, conversión de intensidad de señal recibida a distancia), más elaborado que otros sistemas básicos, como por ejemplo aquellas soluciones de localización que usan el motor de ubicación CC2431 —el primer sistema en chip (system-on-chip, SoC) con un motor de localización en hardware diseñado para aplicaciones en redes de sensores ZigBee / IEEE 802.15.4 [35]—. Además, la presente solución ha sido pensada para aplicaciones prácticas, gracias a que esta elude cualquier tipo de calibraciones/estimaciones fuera de operación, esto es, no requiere de planificación previa.

En términos generales, la solución implementa técnicas de diversidad y un modelo de radio propagación adecuado para mejorar la precisión en la conversión de RSS a distancia. Además, se implementa un algoritmo de localización que reduce el impacto de los errores de las estimaciones de distancias en la estimación de la posición.

La solución implementada soporta redes par a par (peer-to-peer) de un solo salto. La solución ha sido implementada de tal forma que recibe toda la información requerida de la red y realiza los cálculos en una estación central usando MATLAB, puesto que esto es suficiente para validar el presente diseño. Sin embargo, la solución pudiera ser actualizada aún para redes ad-hoc de gran escala siempre que una infraestructura de mayor tasa de transmisión sea provista.

Implementar la solución en forma descentralizada es posible, pero requiere de una implementación rigurosamente cuidadosa debido a los limitados recursos de cómputo de los sensores, lo cual podría ser objeto de una investigación futura.

1.3 Revisión de la Literatura

En WSN hay muchos métodos intencionados a resolver el problema de localización bajo diferentes escenarios y para aplicaciones con diferentes necesidades de precisión. En [19, 3] se presenta una revisión global de las técnicas de medición y metodologías en localización en WSN.

Los métodos de localización en WSN pueden ser dos grandes categorías: métodos de estimación de rango y métodos libres de estimación de rango.

Métodos de Estimación de Rango

Los métodos de rango localizan nodos basados en mediciones (estimaciones) de distancia y/o orientación. Los métodos de rango utilizan sistemas de estimación de rango para deducir distancias y/o ángulos para luego ejecutar un algoritmo de localización que determine finalmente la posición de los nodos ciegos. En la literatura, el término rango es normalmente utilizado para indicar mediciones de distancia; sin embargo, en este contexto, rango es también utilizado para referirse a mediciones de orientación, ya que ambos implican modelado de un fenómeno físico para convertir de mediciones a distancia o ángulos. En localización WSN, la información de distancia se deduce ya sea de mediciones de amplitud, tiempo o interferencia de radio; mientras que la información de orientación se deduce tanto de mediciones del haz de recepción o interferencia de radio.

El desempeño de los métodos de localización basados en estimaciones de rango está determinado principalmente por la precisión en la estimación de distancias y/o ángulos. De hecho, en [28, 29] los autores manifiestan que el desempeño de sistemas de

localización basados en estimación de rango está limitado por los errores de estimación de rango, cuyo desempeño no puede ser mejorado significativamente aún si se utiliza algoritmos de localización complejos. Como una regla de oro, los sistemas de estimación de rango que dan mejores resultados que otros requieren configuraciones de hardware más complejas.

Los sistemas de estimación de rango más complejos son empleados para sistemas de alta precisión donde la forma y el costo no son mayor preocupación. Comúnmente, estos sistemas utilizan mediciones de tiempo de propagación de la señal [1, 2, 10]. Las técnicas de interferencia de radio están ganando fuerza últimamente debido a que estas pueden alcanzar tanto precisión como alcance, en ambientes abiertos [20] y potencialmente en ambientes cerrados también [21]. Sin embargo, la simplicidad de los sistemas de estimación de rango de interferencia de radio es bastante cuestionable, ya que estos requieren comúnmente plataformas más potentes para realizar observaciones detalladas de las señales.

Reconociendo que una gran variedad de aplicaciones requieren sistemas de localización simples y de bajo costo, los sistemas de estimación de rango basados en principios de propagación han sido investigados de manera extensa. Los sistemas de estimación de rango basados en principios de propagación son apropiados para localización en WSN ya que estos utilizan el Indicador de Intensidad de Señal Recibida (Received Signal Strength Indicator, RSSI) construido en los radios de los sensores. Sin embargo, la precisión de sistemas de localización basados en principios de propagación es cuestionable, especialmente para ambientes cerrados dinámicos donde los problemas del canal de radio en cuestión, tales como la propagación multicamino y el apantallamiento (esto es, pérdidas de señal causada por obstáculos), incrementan el error de localización, esto es, la distancia entre la posición estimada y la posición real.

Por otro lado, los sistemas de localización basados en mediciones de orientación carecen de popularidad debido a que estos requieren configuraciones complejas y calibraciones meticulosas de arreglos de antenas [19], aparte de que estas parecen no

superar sistemas de estimación de rango de similar complejidad basados en mediciones de tiempo.

Métodos Libres de Estimación de Rango

En vista de los costos relacionados de los sistemas de estimación de rango complejos, los investigadores han buscado soluciones libres de estimación de rango para el problema de localización en WSN [12]. Los métodos libres de estimación de rango no realizan mediciones de distancia y/u orientación; en lugar de ello, estos métodos usan otros recursos como mapas de conectividad, información de proximidad y huellas de intensidad de señal para localizar un nodo ciego.

Los métodos libres de estimación de rango están hechos para aplicaciones que son tolerantes a errores significativos en la información de posición. A diferencia de los métodos basados en estimaciones de rango, los métodos libres de estimaciones de rango no pueden alcanzar una localización perfecta, en teoría. De ahí que, los métodos libres de estimación de rango se enfocan en disimular errores a través de métodos de tolerancia de errores, redundancia, agregación u otros medios.

El desempeño de los métodos libres de estimación de rango está determinado principalmente por la cantidad de recursos (en términos de nodos sujetadores e implementación) utilizados en el sistema, de manera similar a los métodos de estimación de rango en donde el desempeño de la solución es dado por la complejidad del sistema de estimación de rango. En general, los métodos libres de estimación de rango parecen no resolver el problema de localización de alta precisión.

Los métodos libres de estimación de rango más simples buscan resolver el problema de localización de baja precisión para redes de ad-hoc de gran escala, en base a mapas de conectividad [16, 17]. Los métodos libres de estimación de rango basados en mapas de conectividad no solo son los más simples en términos de recursos que utilizan sino también los más intuitivos, por lo que su desempeño es limitado. Buscando mejorar el

desempeño de los métodos libres de estimación de rango basados en mapas de conectividad, pero sin necesidad de realizar el difícil procedimiento de estimación de rango, los investigadores han buscado métodos de localización basados en información de proximidad [12, 13, 14, 31]. La información de proximidad permite crear estimadores de posición, tales como centros de gravedad [12, 13, 14], así como también estimadores de distancias [31]. En general, los métodos basados en información de proximidad se desempeñan satisfactoriamente en la presencia de un número relativamente alto de nodos sujetadores distribuidos uniformemente. Entonces, los métodos basados en información de proximidad son apropiados para redes con una densa distribución de nodos, la mayoría de los cuales desconocen su posición. Para tratar de eliminar los efectos del canal en cuestión, tales como el efecto multicamino y el apantallamiento, se han propuesto sistemas de localización utilizando huellas de intensidad de señal [15]. En la práctica, su aplicación en ambientes dinámicos es cuestionable debido a que los mapas de intensidad de señal se construyen fuera de operación (los mapas de intensidad de señal no obedecen a las condiciones actuales del canal), lo cual incrementa los errores de localización, aparte que estos métodos necesitan planeación previa.

1.4 Metodología de Investigación

La metodología de investigación de la presente tesis se constituye de cuatro fases. La primera fase consiste en un estudio global de las metodologías de localización en WSN existentes en la literatura. La primera fase entonces nos ayudará tanto a identificar las diferentes métodos en el tema de localización en WSN como a justificar la dirección de la metodología de solución escogida, basada en estimaciones de rango.

La segunda fase consiste en un análisis empírico de los problemas causados por el canal de radio en cuestión en ambientes dinámicos cerrados. En esta fase, se requiere de una campaña de mediciones preliminar, llevada a cabo en un escenario cerrado. Este análisis empírico proporciona la bases para las técnicas de mitigación de errores del sistema de estimación de distancias propuesto.

Antes de pasar a la demostración del desempeño del sistema de estimación de distancias propuesto, la tercera fase proporciona un análisis de desempeño de los algoritmos de localización basados en distancias via simulación, esto es, algoritmos que utilizan información de distancia entre nodos para encontrar la posición de los nodos ciegos. Las simulaciones se ejecutan utilizando MATLAB y asumen una cierta distribución de error de las estimaciones de distancias, esto es, la distancia entre la distancia estimada y la distancia real. La tercera fase entonces nos ayudará a definir un algoritmo de localización robusto contra los errores de estimaciones de distancia.

Finalmente, la cuarta fase esta dirigida a demostrar el desempeño de la solución de localización diseñada, basada en principios de propagación. En esta fase, la aplicación del sistema de estimación de rango y la aplicación del logaritmo de localización son integrados en una misma solución. Esta fase nos ayudará principalmente a validar las técnicas de mitigación de errores del sistema de estimación de distancias propuesto. así como también a dar una visión global del desempeño de la solución.

1.5 Perfil de Tesis

Localización es un problema fundamental que tiene que ser solucionado para dar soporte a aplicaciones conscientes de la posición. Como se postula en [3], ningún método de localización proporciona un servicio de posicionamiento universal para todas las aplicaciones. En lugar de ello, las soluciones de localización deben ser orientadas a los requerimientos específicos de cada aplicación con balances apropiadas entre precisión y costos.

Tomando en cuenta la creciente demanda de varias aplicaciones conscientes de la posición y tolerantes a errores, la presente investigación intenta mejorar el desempeño de soluciones de localización simples y de bajo costo basadas en principios de propagación para sistemas IEEE 802.15.4 operando en la banda 2.4 GHz en ambientes cerrados, donde el costo y la forma son preocupaciones mayores.

Los principales problemas de los métodos de estimación de rango, basados en principios de la propagación, en ambientes cerrados dinámicos son causados por las propiedades de propagación hostil del canal de radio en cuestión, tales como el efecto multicamino y el apantallamiento. Por consiguiente, la presente solución busca mitigar estos problemas de mayor preocupación, los cuales son comúnmente descuidados o al menos no son contrarrestado de manera práctica. La solución elude calibraciones/estimaciones torpes y poco prácticas fuera de operación, esto es, nada que requiera planeación previa.

Una vez que las fuentes de los errores de estimación de rango han sido contrarrestados, otro aspecto importante es el algoritmo de localización en sí. En la literatura existen muchos algoritmos que pueden ser utilizados para calcular las posiciones desconocidas de los nodos en base a la información de distancias entre ellos. Algoritmos de localización diferentes se comportan de diferente manera, especialmente en la presencia de errores de estimaciones de distancias. Entonces, en la presente solución es relevante definir un algoritmo de localización robusto en la presencia de errores de estimación de distancias.

CAPÍTULO 2

ESTUDIO TEÓRICO DE LOS MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN

En el capítulo 1 se proporcionó una revisión de los diferentes métodos de localización en WSN. En el presente capítulo, recopilamos y analizamos estas metodologías más en detalle, para así dirigir el presente estudio en una dirección segura.

2.1 Métodos de Estimación de Rango

Como se mencionó anteriormente, los métodos de estimación rango localizan nodos basados en mediciones de la distancia y/u orientación. Señales de radio y ultrasonido son comúnmente utilizadas para medir distancias. Por otro lado, los arreglos de antena son la opción más común para medir ángulos. Recientemente, técnicas de interferencia de radio han sido propuestas para mediciones de distancia y orientación. A continuación se discuten las principales características y problemas de las mediciones de distancia y orientación.

2.1.1 Intensidad de Señal Recibida

Mediciones de intensidad de señales de radio son utilizadas de manera extensa para estimar distancias. En el caso ideal (esto es, espacio libre y radiación isotrópica), el cambio de la potencia recibida está determinada únicamente por la distancia entre el transmisor y el receptor, referido como la pérdida de señal dependiente de la distancia de aquí en adelante. Desafortunadamente, los escenarios reales están lejos del caso ideal, es por esto que, muchas fuentes de variabilidad de la intensidad de señal recibida (Received Signal Strength, RSS) tienen que ser contrarrestadas para obtener estimaciones de distancias en base al modelo de propagación ideal.

Las fuentes de variabilidad de RSS están dadas por el canal de radio, la plataforma de radio y el patrón de radiación de la antena. En el capítulo 3 se proporciona una descripción más detallada de las fuentes de variabilidad de RSS. Típicamente, los

problemas causados por el canal de radio, tales como propagación multicamino y apantallamiento, son considerados de mayor preocupación [3].

La propagación multicamino ocurre debido a que las señales de radio son reflejadas, difractadas o dispersadas, de modo que las señales multicamino se suman constructivamente (la señal es reforzada) y/o destructivamente (la señal es debilitada) en el receptor; mientras que, apantallamiento ocurre cuando las obstrucciones debilitan las señales de radio. En el caso de ambientes cerrados, los problemas causados por el canal de radio en cuestión son más críticos debido a las propiedades de propagación hostil propiamente de estos ambientes.

Los sistemas de localización más robustos, basados en radio, intentan disminuir el efecto multicamino a través de técnicas de espectro extendido (Spread Spectrum, SS), mientras que el apantallamiento no es contrarrestado, o por lo menos no de una manera práctica (esto es, sin incluir la atenuación dada por obstáculos fijos como las paredes). Sin embargo, técnicas de espectro extendido requieren más recursos de ancho de banda, los cuales son limitados en sistemas de banda angosta como es el caso de los sensores de interés IEEE 802.15.4. Por lo tanto, la presente tesis se concentra principalmente en mejorar la robustez de los sistemas de localización basados en la propagación contra los problemas causados por el canal de radio en ambientes cerrados dinámicos. El sistema de estimación de distancias propuesto se describe en el capítulo 3.

2.1.2 Tiempo de Vuelo

Mediciones de tiempo de señales acústicas y radio son ampliamente utilizados para estimar distancias. Para localización en WSN, las medidas de tiempo de vuelo (time-of-flight, TOF) de señales acústicas son comúnmente la alternativa para estimar distancias con alta precisión. Gracias a que la velocidad de las señales acústicas son relativamente lentas (aproximadamente 343 m/s, pero varían dependiendo de las condiciones ambientales), su retraso en la transmisión puede ser medido por relojes de bajo costo. Además, debido a su baja velocidad, las señales reflejadas tienen un retraso significativo relativo a la señal de la

línea de vista (line-of-sight, LOS), por lo que las señales reflejadas pueden ser descartados. Nuevamente, gracias a su baja velocidad, la metodología de TOF de señales acústicas elude el difícil problema de sincronización por medio de la técnica de diferencia en el tiempo de arribo (time-difference-of-arrival, TDOA), donde este último (TDOA) mide el tiempo de recepción transcurrido entre dos señales que son transmitidas simultáneamente por el transmisor: la señal de radio (inicia conteo) y la señal acústica (finaliza conteo). Sin embargo, como se menciona en [3], las señales acústicas presentan tres grandes limitaciones. Primero, estas se atenúan rápidamente con la distancia, y proveyendo cobertura limitada. Segundo, requieren LOS para medir la distancia de separación correcta, de lo contrario, la distancia medida corresponde a una señal reflejada. Tercero, las señales audibles por el ser humano no son adecuadas, es por esto que las señales de ultrasonido se convierten en la alternativa. Sin embargo, las señales de ultrasonido son uni-direccionales, y por lo tanto, se requieren radiadores especiales para alcanzar una cobertura apropiada, por ejemplo, micrófonos múltiples o cono reflector [3].

Alternativamente, las mediciones de distancia pueden también ser obtenidas midiendo el TOF de las señales de radio. Puesto que la velocidad de propagación de las señales de radio es extremadamente alta (aproximadamente 3×10^8 m/s), se requieren de medidores de tiempo con precisión de nano-segundos para obtener una medición precisa del TOF. Es así que, los errores de mediciones de tiempo de vuelo de señales de radio son causados principalmente por la resolución y precisión (drift) del reloj. Para evitar el difícil problema de sincronización de mediciones de tiempo de un solo sentido (solo de ida), mediciones de tiempo de ida y vuelta (Round Trip Time, RTT) pueden ser utilizadas; sin embargo, el tiempo de procesamiento del receptor tiene que ser filtrado. De manera similar, también se puede evitar el problema de sincronización midiendo los tiempos de diferencia basados en los tiempos de referencia proporcionados por pocos nodos de alta sincronización, equipados con relojes atómicos precisos como en el sistema GPS.

Además de los errores de medición causados por el reloj, el método de tiempo de vuelo es vulnerable a la propagación multicamino. Debido a su velocidad muy alta, resolver el problema multicamino en sistemas de radio de banda angosta no es viable, por

lo que, las técnicas de espectro extendido (SS) se convierten en la alternativa.

Por otra parte, como alternativa al método de tiempo de vuelo con señales de ultrasonido, mediciones de distancia precisas pueden ser obtenidas con radios ultra-wideband (UWB) debido a su alta resistencia a la propagación multicamino [10, 11]; sin embargo, su alcance es también limitado. Los sistemas de TOF basados en radios UWB mejoran la precisión de las mediciones de distancia al costo de utilizar hardware especializado para alcanzar frecuencia de muestreo en GHz, sincronización en nanosegundos y mayores recursos de ancho de banda.

En [3] los autores concluyen que tanto las mediciones de distancia (esto es, mediciones RSS y mediciones de TOF) sufren ya sea de baja precisión o de corto alcance. Sin embargo, las medidas de distancia pueden también ser obtenidas a través de técnicas de interferencia de radio, mediante las cuales los problemas de una baja precisión y corto alcance son parcialmente resueltos.

2.1.3 Haz de Recepción

Haz de recepción se refiere al uso del patrón de recepción no isotrópico de la antena (antena directiva). En WSN, las antenas directivas son usadas para deducir la dirección del transmisor. En el método de haz de recepción, la decisión de la dirección esta dada por la máxima intensidad de señal cuando el haz principal de recepción es rotado electrónica o mecánicamente. Después, la posición del nodo ciego se aproxima en base de principios de triangulación.

Desafortunadamente, este método es vulnerable a muchas fuentes de variabilidad de intensidad de la señal dadas por las propiedades del canal de radio y las no linealidades de la plataforma de radio. Las principales fuentes de error en la detección del haz de recepción son causadas por el efecto multicamino y las no linealidades de la potencia del amplificador del transmisor. En teoría, las antenas de haz estrecho pueden disminuir los problemas causados por el efecto multicamino, mientras que, la información errónea

causada por la potencia de transmisión variable puede ser descartada normalizando las mediciones de la antena directiva con las mediciones obtenidas de una antena omnidireccional, ambas instaladas en el mismo receptor [19]. Sin embargo, configuraciones de antenas de haz estrecho son bastante complejas y presentan grandes retos, resultando en soluciones poco prácticas para redes de sensores.

2.1.4 Interferencia de Radio

Recientemente, sistemas de localización basados en técnicas de interferencia de radio parecen ser prometedoras. Tanto mediciones de distancias como de orientación pueden ser deducidas a través de técnicas de interferencia de radio. Buscando evitar los problemas de los sistemas basados en mediciones de intensidad de señal, el Sistema de Posicionamiento basado en interferencia de radio (Radio Interferometry Positioning System, RIPS) [20] estima distancias midiendo el desfase entre dos señales de radio que se interfieren (transmisores operan a frecuencias ligeramente diferentes), de modo que, el desfase relativo de las señales recibidas en dos receptores diferentes es una función de las distancias entre los cuatro nodos. En teoría, este método elude dos problemas de mayor preocupación en sistemas basados en mediciones de intensidad de señal: el problema de orientación de la antena (RIPS permite localización en tres dimensiones) y el apantallamiento; pero, este no resuelve el problema del efecto multicamino. En [20], los autores argumentan que RIPS alcanza tanto precisión como alcance en ambientes abiertos, resolviendo los problemas de baja precisión y de corto alcance de las medidas de distancia de RSS y TOF. El rendimiento de RIPS para el caso de ambientes cerrados no se demuestra en [20], sin embargo, se espera que sea bastante limitado en la presencia de propagación multicamino.

Por otro lado, información de orientación puede ser deducida usando técnicas de interferencia de radio. Utilizando los radios de los sensores se pueden medir desplazamientos Doppler [21, 22, 23]. La dirección de un transmisor en movimiento puede ser derivada a partir de un desplazamiento Doppler. De ahí que, la posición del transmisor (nodo ciego) puede ser aproximada cuando múltiples receptores (nodos sujetadores)

detectan el desplazamiento (dirección). En [22,23] los autores reportan que el cambio de frecuencia del desplazamiento Doppler es resistente a la interferencia multicamino, por lo que, el método es apropiado aún para localización en ambientes cerrados. Sin embargo, sus experimentos fueron limitados a ambientes abiertos. El método de desplazamiento Doppler basado en interferencia de radio se ajusta a sistemas móviles donde las mediciones de desplazamiento Doppler pueden ser tomadas sobre nodos en movimiento. Pero, en el caso de nodos ciegos estáticos, las mediciones de desplazamiento Doppler requieren de un motor de rotación para generar desplazamientos posibles de ser medidos.

De ahí, aunque las técnicas de interferencia de radio parecen ser prometedoras, estas requieren sistemas de rango complejos. Estimaciones basados en mediciones de interferencia de radio comúnmente requieren sincronización de alta precisión, operación ajustada de tareas, alta estabilidad de reloj, calibración de transmisiones de multi-frecuencia y plataformas potentes para realizar observaciones detalladas de las señales.

2.2 Métodos Libres de Estimación de Rango

Como se mencionó anteriormente, los métodos libres de estimación de rango no realizan mediciones de distancia y/u orientación. En lugar de ello, estos usan otros recursos como mapas de conectividad, información de proximidad y huellas de RSS para localizar un nodo ciego.

2.2.1 Basados en Conectividad

Los métodos libres de estimación de rango que usan mapas de conectividad calculan posiciones basados en estimaciones de distancia, pero, sin utilizar mediciones explícitas de distancias tales como medidas de amplitud, tiempo o interferencia de radio. Los métodos basados en la conectividad son comúnmente conocidos como métodos de camino más corto o vector de distancia ya que estos estiman distancias basados en el número de saltos sobre el camino más corto y el promedio del alcance del radio [16,17]. El promedio del

alcance de radio es obtenido a través de la comunicación entre nodos sujetadores, calculando la distancia de salto promedio basada en la distancia entre nodos sujetadores (deducida de la posición de los nodos sujetadores) y el número de saltos sobre el camino más corto.

Los métodos basados en la conectividad intentan aliviar dos problemas principales en las redes de ad-hoc: mediciones de corto alcance y un número limitado de nodos sujetadores. Estos métodos proveen localización de baja precisión. En la práctica, la aplicación de métodos del camino más corto es bastante limitada por los grandes errores de estimación de distancias, especialmente en el caso de redes no uniformes. Por supuesto, errores muy grandes pueden ser descartados usando límites para estimar distancias, como en el método de **upper bound** [44] para localizar sensores en áreas cóncavas.

2.2.2 Basados en Proximidad

La característica principal de los métodos libres de estimación de rango usando información de proximidad es que la información de proximidad inferida tiene sus bases en la asunción de que la intensidad de señal decae de manera monótona con la distancia. En efecto, esta asunción permite hacer estimaciones de proximidad, con lo cual se elude el difícil procedimiento de estimación de rango. Sin embargo, estos métodos son también vulnerables a variaciones aleatorias de la intensidad de señal, las mismas que incrementan el error de localización debido a que generan información de proximidad incoherente.

La mayoría de los métodos libres de estimación de rango basados en información de proximidad localizan un nodo ciego dentro del área de intersección de los polígonos formados por los nodos sujetadores [12, 13, 14]. En la literatura, este tipo de métodos son conocidos como métodos basados en áreas [3]. La mayoría de métodos basados en áreas deducen la información de proximidad por medio de comparaciones de mediciones de RSS como en [12] y [13]. Sin embargo, una metodología más sofisticada para inferir información de proximidad es utilizada en el método de aprendizaje basado en funciones de kernel asociadas a inferencia estadística [14]. En esta metodología un nodo ciego es

localizado en dos fases. En la primera fase, llamada localización de baja precisión, un nodo ciego es clasificado dentro de algunas áreas (regiones) al minimizar una función de kernel que considera un decaimiento monótono de la intensidad de la señal. Después, en la segunda fase, llamada localización de precisión, el centro de gravedad es calculado, esto es, la intersección de las áreas que contienen al nodo ciego, clasificadas en la primera fase.

Por otro lado, la información de proximidad también se utiliza para deducir distancias, como en la método de mapa de distancias de proximidad [31]. En este tipo de metodología, las distancias de nodos ciegos a nodos sujetadores puede ser deducida de la distancia entre un par de nodos sujetadores cuando el nodo ciego está lo suficientemente cerca de uno de los nodos sujetadores. De este modo, este método intenta reducir los errores incurridos a través de la metodología del camino más corto en el caso de redes no uniformes.

De ahí, los métodos libres de estimación de rango basados en proximidad requieren relativamente un gran número de nodos sujetadores esparcidos equitativamente ya sea para localizar nodos dentro de áreas (regiones) o para deducir distancias. Por lo tanto, estos métodos son apropiados para redes con una distribución de nodos densa, en la cual la mayoría de las posiciones de los nodos son desconocidas.

2.2.3 Basados en Huellas

Los sistemas basados en huellas tratan de eliminar los efectos del canal de radio tales como el efecto multicamino y el apantallamiento. Los sistemas basados en huellas localizan nodos usando mapas del sitio específico de intensidad de señal, elaborados previamente fuera de operación.

En principio, estos métodos permiten localización en ambientes cerrados, como por ejemplo el sistema RADAR. En la práctica, la aplicación de estos métodos en ambientes dinámicos es cuestionable debido a que las huella de intensidad de señal son comúnmente pasadas y no representan la situación actual del canal de radio, lo cual incrementa el error

de localización. Además, a pesar de que los métodos basados en huellas requieren relativamente pocos nodos sujetadores para localizar un nodo ciego, estos requieren un considerable esfuerzo de planeación previa.

2.3 Mediciones y Soluciones Híbridas

Los sistemas de estimación de rango basados en mediciones híbridas pueden mejorar la precisión de las estimaciones ya que los errores para diferentes tipos de mediciones proviene de diversas fuentes. Además, diferentes tipos de mediciones conducen a estimadores, por lo menos, parcialmente independientes. Un mejoramiento en el desempeño puede ser alcanzado usando técnicas de fusión de datos para crear estimadores más robustos y precisos a partir de mediciones parcialmente independientes [19]. Por supuesto, mediciones híbridas mejoran la precisión de la estimación de rango al costo de una mayor complejidad, con sistemas de estimación que requieren configuraciones e implementaciones de hardware más complejas [10].

De manera similar a las mediciones híbridas, soluciones híbridas basadas (parcialmente) en estimaciones de rango y libres de estimaciones de rango pueden mejorar el desempeño global de la solución. Además, dichas soluciones permiten atacar dos problemas principales en redes ad-hoc, tales como mediciones de corto alcance y un número limitado de nodos sujetadores. Por ejemplo, el algoritmo de localización de dos fases [30] combina mediciones de rango y un método de camino más corto para estimar distancias de un solo salto y de varios saltos, respectivamente. Este algoritmo puede mejorar el desempeño general de la solución. De manera similar, se pueden combinar mediciones de rango y estimaciones de distancia en base a información de proximidad para estimar distancias de un solo salto y de varios saltos, respectivamente, con lo cual, se puede mejorar el desempeño global de la solución y evitar errores grandes en el caso de redes no uniformes, al costo de más nodos sujetadores comparado con el algoritmo de localización de dos fases [30].

2.4 Metodología de la Solución

Como se menciona en [3], ningún método de localización proporciona servicio de localización universal. En lugar de ello, las soluciones de localización deben ser diseñadas cumpliendo los requerimientos específicos de cada solución, con balances apropiados entre precisión y costos.

Tomando en cuenta la creciente demanda de aplicaciones conscientes de la ubicación y tolerantes a errores en la información de ubicación, es necesario diseñar soluciones de localización simples y de bajo costo. Es claro que, metodologías basadas en radio se consideran como las más adecuadas y potencialmente las más competitivas, partiendo de que un radio está disponible en cualquier sensor y los requerimientos de potencia están incluidos.

La solución diseñada emplea un sistema de estimación de distancias, basado en la pérdida de señal, más elaborado que otros sistemas básicos existente en el mercado, como por ejemplo, aquellas soluciones que usan el motor de posición CC2431 [35]. Además, la presente solución ha sido pensada para su utilización en aplicaciones prácticas, dado que elude cualquier tipo de calibración/estimación fuera de operación.

En términos generales, la solución implementa técnicas de diversidad y un modelo de pérdida de señal adecuado para mejorar la precisión de la conversión de RSS a distancia. Además, un algoritmo de localización robusto contra errores de rango es implementado.

La parte subsiguiente de la tesis está estructurada como sigue. En el capítulo 3, las fuentes de variabilidad de RSS y las medidas para contrarrestarlas son discutidas. En el capítulo 4 se discute la robustez de algoritmos de localización en la presencia de errores de estimaciones de distancias. En el capítulo 5 se presentan detalles sobre la plataforma empírica. En el capítulo 6, el desempeño del sistema de estimación de distancias propuesto

y la solución de localización global son analizados. Una conclusión breve se presenta en el capítulo 7.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL SISTEMA DE ESTIMACIÓN DE DISTANCIAS

En el presente capítulo se investigan las fuentes de variabilidad de RSS y medidas para contrarrestarlas, propuestas en el presente sistema de estimación de distancias, el cual está basado en principios de propagación (esto es, de pérdida de señal). Luego, se presenta el modelo de pérdida de señal, a través del cual se realiza la aproximación y conversión de RSS a distancia.

3.1 Fuentes de variabilidad de RSS

Los sistemas de estimación de distancias basados en principios de radio propagación deben contrarrestar toda posible distorsión sobre el modelo ideal de pérdida de señal, esto es, espacio libre, radiación isotrópica y libre de ruido e interferencia.

Las fuentes de variabilidad de RSS pueden ser clasificadas en dos grandes categorías: externas e intrínsecas. Las externas son aquellas que obedecen a las propiedades del canal de radio (medio de propagación) y al patrón de radiación de la antena; mientras que, las intrínsecas son aquellas que obedecen a las características del módulo de radio (transmisor/receptor).

Por lo anteriormente mencionado, la presente tesis busca mitigar las mayores fuentes de variabilidad de RSS, en ambientes cerrados dinámicos, como son aquellas que obedecen a las propiedades del medio de propagación en cuestión.

3.1.1 Fuentes externas de variabilidad de RSS

Esta categoría incluye las fuentes de variabilidad causadas por el canal de radio — propagación multicamino, atenuación causada por obstáculos, interferencia y ruido— y por el patrón de radiación de la antena.

a) Atenuación

En términos generales, la señal de radio presenta atenuación de gran escala (esto es, la pérdida de señal dependiente de la distancia y apantallamiento) y de pequeña escala (esto es, el efecto multicamino).

Atenuación de gran escala

Este tipo de atenuación incluye la pérdida de intensidad de señal dependiente de la distancia y causada por obstáculos, donde esta última se conoce como apantallamiento. El modelo de pérdida de señal se describe en la sección 3.2.1.

apantallamiento ocurre cuando la línea de propagación entre el transmisor y el receptor es obstruida por un cuerpo denso, cuyas dimensiones son relativamente grandes respecto de la longitud de onda, de tal manera que, ondas secundarias se forman detrás del mismo, las cuales llegan al receptor.

El presente sistema de estimación de rango implementa un modelo adecuado de propagación de gran escala, esto es, intenta predecir la potencia de señal recibida tomando en cuenta la pérdida de señal dependiente de la distancia y el apantallamiento. Para ello, la atenuación causada por los obstáculos es incorporada en el modelo de pérdida de señal, lo cual se describe en detalle en la sección 3.2.

Atenuación de pequeña escala

Este tipo de atenuación toma en cuenta los diferentes estilos de propagación de la señal en un sistema de radio tales como reflexión, difracción y dispersión, lo cual se conoce como efecto multicamino. Este efecto obedece a que la energía radiada viaja sobre diferentes rayos hacia el receptor. En el receptor, las señales multicamino que arriban en fase se suman constructivamente (señal es reforzada, así, nótese que el efecto multicamino no siempre implica atenuación), mientras que, las señales que arriban fuera de fase se suman

destruictivamente (señal es debilitada). La señal total es entonces la sumatoria vectorial de todas las señales multicamino.

El presente sistema de estimación de rango intenta contrarrestar el efecto multicamino por medio de técnicas de diversidad, lo cual se describe en detalle en la sección 3.2. En sistemas de radio, técnicas de diversidad son empleadas para explotar la naturaleza aleatoria de la radio propagación, para encontrar canales de comunicación independientes (o al menos parcialmente independientes). En el tema de localización de sensores, las técnicas de diversidad permiten crear mejores estimadores a partir de mediciones realizadas en canales parcialmente independientes.

b) Interferencia y ruido del medio

En situaciones reales, la interferencia y ruido del medio (ruido térmico) constituyen otras fuentes de error para estimaciones de rango.

La banda de interés 2.4 GHz aloja varios sistemas para operaciones que no requieren licencia, incluyendo tecnologías de gran acogida como Wi-Fi y ZigBee; así, estos sistemas se encuentran expuestos a interferencia de radio. La interferencia de radio es no estacionaria y no afecta de igual forma a todos los receptores. El nivel de interferencia en diferentes receptores varía de acuerdo a las pérdida de señal correspondientes hacia el transmisor generando la interferencia.

Como se muestra en [32], interferencia de radio representa un problema de mayor preocupación cuando el transmisor generando interferencia presenta alta actividad. Por lo cual, interferencia de radio debe ser contrarrestada para permitir la coexistencia de los sistemas. Cancelar la interferencia no es una tarea sencilla debido a que esta no es predecible y no puede ser medida con los radios IEEE 802.15.4 en cuestión. Así, el presente sistema de estimación de rango trata de contrarrestar la interferencia por medio de saltos de frecuencias (frequency hopping), cuya técnica es utilizada ampliamente para mitigar la interferencia de radio.

Por otra parte, en ambientes con la presencia de máquinas y gente, el ruido del medio no es necesariamente estacionario o igual en todos los receptores, como ocurre en los ambientes cerrados dinámicos (la temperatura puede cambiar con el tiempo y la ubicación). Usando 16 radios ubicados en diferentes posiciones, la desviación estándar global de las mediciones de ruido realizadas se calculó en 1.5 dB.

De ahí, el presente sistema de estimación de rango trata de contrarrestar el ruido del medio por medio de mediciones de energía en cada receptor (sobre el canal libre de transmisiones) cada vez que este realiza el proceso de localización, esto es, cuando se realizan mediciones de RSS. Todas las mediciones de RSS son normalizadas al filtrar el ruido medido en el receptor correspondiente. En la práctica, el ruido térmico es una fuente de error de menor preocupación en sistemas de estimación de rango, pero, la variabilidad del ruido total que experimenta cada receptor se ve mayormente afectado debido al ruido shot (esto es, ruido generado en la presencia de flujo de corriente durante la recepción de un mensaje), el cual varía entre diferentes receptores.

c) Patrón de radiación de la antena

El patrón de radiación de una antena describe como la antena radia energía en el espacio o como ésta recibe energía. Cada antena tiene su propio patrón de radiación, el cual no es uniforme, esto es, no existen radiadores isotrópicos. De acuerdo a esto, la ganancia de la antena se define como la razón entre la máxima intensidad de radiación/recepción y la intensidad promedio, multiplicada por la eficiencia de la antena.

Los sistemas de localización basados en principios de propagación típicamente asumen radiación uniforme, de tal manera que, la ganancia combinada de los pares de antenas sea una constante en el modelo de pérdida de señal para cualquier orientación entre los sensores. De ahí, un sistema de localización basado en principios de propagación está limitado a la región donde la radiación es uniforme. En teoría, aquello ocurre en redes alineadas a un plano (dos dimensiones), usando antenas omni-direccionales donde todas estas presentan polarización vertical, dado que la el patrón de radiación omni-direccional

es uniforme a lo largo de la azimut. En vista de ello, la presente solución aplica a redes de dos dimensiones, pero pudiera ser aplicada a redes donde las diferencias de las alturas entre antenas es pequeña (menor a un metro), dado que dipolos de media onda (o monopolos de cuarto de onda) radian relativamente de manera uniforme en esta región [4].

Por otra parte, las antenas omni-direccionales deben ser cuidadosamente montadas en los sensores, debido a que su patrón de radiación es afectado tanto por la tierra eléctrica del tablero del circuito (Printed Circuit Board, PCB) como de los circuitos eléctricos del mismo. En [33], los autores muestran que monopolos externos, montados una longitud de onda aparte del PCB, radian uniformemente en la azimut, lo cual ha sido considerado en la presente solución.

3.1.2 Fuentes intrínsecas de variabilidad de RSS

Esta categoría incluye fuentes de variabilidad de RSS que obedecen al módulo de radio (transmisor/receptor) en cuestión, como son las no linealidades del amplificador de potencia en el transmisor y la sensibilidad (figura de ruido) en el receptor.

Variabilidad del transmisor

Como se demuestra en [4], diferentes transmisores se comportan diferentemente, aun cuando estos han sido igualmente configurados. Para un cierto transmisor, la potencia real transmitida es cercana al nivel de potencia configurado, pero no necesariamente exactamente igual. Además, este desplazamiento en la potencia transmitida varía para diferentes transmisores. En la sección 5.2.1 se proveen datos del transmisor, de la plataforma empírica en cuestión, relacionados a la potencia de transmisión.

Una manera de mitigar este problema sería de normalizar las mediciones de RSS con respecto a un solo transmisor. Pero, ello requiere estimar el desplazamiento en la potencia transmitida para cada transmisor usando un solo receptor, lo cual a su vez, implica planeación previa. Por lo cual, el presente sistema de estimación de rango no contrarresta

la variabilidad de RSS causada por el transmisor.

Variabilidad del receptor

De manera similar al caso del transmisor, diferentes receptores se comportan diferentemente, aun cuando estos han sido igualmente configurados, como se muestra en [4]. Esto quiere decir que el valor de RSS detectado no es necesariamente igual para diferentes receptores, aun cuando todos los parámetros que afectan la variabilidad de RSS se mantienen constantes, lo cual obedece a la sensibilidad variable específica de cada receptor. En la sección 5.2.2 se proveen datos del receptor, de la plataforma empírica en cuestión, relacionados a la sensibilidad.

De ahí, diferentes receptores experimentan diferente ruido shot (figura de ruido). Desafortunadamente, realizando mediciones de energía del canal libre de transmisiones, como se propone en la sección 3.1.1, para medir el ruido del medio, no permite filtrar el ruido shot específico de cada receptor (el ruido shot se genera en la presencia de flujo de corriente cuando un mensaje es recibido).

De manera similar al caso del transmisor, una posible solución sería realizar una estimación, fuera de operación, del ruido shot en cada receptor, para de esta forma normalizar las mediciones de RSS con respecto a un solo receptor. Debido al requerimiento de estimación fuera de operación, el presente sistema no contrarresta la variabilidad de RSS causada por el ruido shot específico de cada receptor.

3.2 Modelo de Pérdida de Señal

El modelo de pérdida de señal en el tema de localización de sensores busca predecir la relación RSS-a-distancia, la cual está determinada tanto por la atenuación y el patrón de radiación de la antena.

En la presente solución, la estimación de pérdida de señal (aproximación de la curva de RSS a distancia) se realiza durante la operación de la misma, basado en las distancias entre nodos sujetadores conocidas y las mediciones de RSS correspondientes, las cuales se realizan cada vez que los nodos ciegos necesitan ser localizados. En otras palabras, los parámetros de la curva de pérdida de señal son actualizados cada vez que los nodos ciegos necesitan ser localizados, lo cual reduce el impacto de estimaciones de pérdida de señal pasadas, como se demuestra en [25], y elude estimaciones fuera de operación poco prácticas.

En esta sección, primero estudiamos las leyes físicas que gobiernan la propagación de señal en línea de vista. Luego, introducimos métodos novedosos para contrarrestar el efecto multicamino y el apantallamiento.

3.2.1 Pérdida de señal dependiente de la distancia

Pérdida de señal dependiente de la distancia obedece meramente al caso de propagación de señal en línea de vista. Estrictamente hablando, la pérdida de señal en línea de vista está gobernada por dos fenómenos físicos como son la ley cuadrática inversa y la atenuación atmosférica. De la teoría electromagnética, sabemos que la intensidad de una señal electromagnética, que se expande en el espacio desde una fuente de radiación isotrópica hacia afuera, es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia desde la fuente, cuya ley se conoce como ley cuadrática inversa. Por otro lado, la atenuación atmosférica reduce la intensidad de la señal electromagnética debido a la absorción y dispersión de fotones en la atmósfera. Por lo tanto, la predicción del cambio total en la intensidad de señal involucra tanto la ley cuadrática inversa como la estimación de la atenuación atmosférica sobre el rayo de enlace.

El efecto de la atenuación atmosférica en espacios relativamente pequeños (por ejemplo, oficinas) puede ser descartado, ya que su impacto en la estimación de la pérdida de señal dependiente de la distancia es mínimo, por ejemplo, la atenuación es menor a 10 dB/km.

De aquí, la ley cuadrática inversa predice la intensidad de señal cierta distancia aparte de la fuente de radiación isotrópica. Ahora, necesitamos predecir la cantidad de señal detectada (esto es, RSS) por un receptor ubicado cierta distancia aparte del transmisor, lo cual es calculado por medio de la ecuación de transmisión de Friis, definida como,

$$P_R = P_T \frac{G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \quad 3.1$$

donde d es la distancia entre el transmisor y el receptor, P_R es la potencia disponible en los terminales de la antena (en Watts), P_T es la potencia de transmisión nominal y G_T y G_R son las ganancias de las antenas del transmisor y receptor, respectivamente.

La ecuación de Friis pone juntas la pérdida de señal dependiente de la distancia con la habilidad de una antena de capturar la señal (apertura de antena) y la directividad de la radiación electromagnética (ganancia de la antena). Debe notarse que la ecuación 3.1 es la ecuación de transmisión de Friis simplificada, la cual asume perfecto acoplamiento de las impedancias, no atenuación atmosférica y polarizaciones de las antenas iguales.

En la práctica, las asunciones requeridas para la predicción de RSS-a-distancia, basado en la ecuación de transmisión de Friis, son: plataforma de radio ubicua (esto es, mismo módulo de radio, conectores, cable de alimentación y antena en cada nodo) y antenas omni-direccionales que presenten la misma polarización; dado que, la atenuación atmosférica en espacios pequeños puede ser descartada y las pérdidas debido a los desacoplamientos de impedancias están incluidos en el modelo de pérdida de señal.

3.2.2 Efecto Multicamino

Como vimos, la ecuación de transmisión de Friis predice la potencia total recibida en un receptor ubicado una cierta distancia aparte del transmisor cuando la línea de vista es el único enlace entre ellos. En situaciones reales, las comunicaciones de radio terrestres presentan propagación multicamino (esto es, múltiples caminos de propagación entre transmisor y receptor); especialmente en el caso de ambientes cerrados, donde las

superficies que rodean, los muebles y las personas crean múltiples caminos entre el transmisor y el receptor.

En la literatura, la mayoría de modelos de propagación dan cuenta de la propagación multicamino por medio de estimaciones del exponente de pérdida de señal (n), en lugar de usar la ley cuadrática inversa apropiada, como sigue:

$$P_R = P_T \frac{G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 d^n} \quad 3.2$$

Por ejemplo, el exponente de pérdida de señal en el modelo de reflexión en tierra de dos-rayos tiene el valor de 4, lo cual logra una predicción precisa de RSS cuando la distancia de separación es mucho mayor respecto a las alturas de las antenas. Sin embargo, esta método es deficiente en situaciones hostiles como lo son ambientes cerrados dinámicos.

Por conveniencia, la ecuación 3.2 se denota en escala logarítmica, como sigue,

$$RSS(d) = P_T + P_0 - 10\eta \log_{10}[d] \quad 3.3$$

donde $(P_T + P_0)$ es la potencia recibida a una distancia de referencia de 1 m y η es el exponente de pérdida de señal (recuérdese que la unidad de potencia en la ecuación 3.3 es dBm).

Puesto que el método de estimación del exponente de propagación es deficiente en situaciones hostiles, un término aleatorio (α), dando cuenta del efecto multicamino, es adicionado al modelo de la ecuación 3.3, como sigue:

$$RSS(d) = P_T + P_0 - 10\eta \log_{10}[d] + \alpha \quad 3.4$$

El efecto multicamino puede fluctuar hasta varias decenas de dB. En efecto, fluctuaciones de hasta 20 dB se observaron en la campaña de mediciones preliminar, llevada a cabo en un ambiente bastante metálico y con varios objetos. La Figura 3.1 muestra el escenario donde se realizaron las mediciones.



Figura 3.1: Escenario de la campaña de mediciones preliminar

La Figura 3.2 muestra la curva de aproximación de RSS-a-distancia para un ambiente cerrado sin la presencia de objetos en movimiento; en la cual se puede observar una diferencia de alrededor de 20 dB entre dos valores de RSS correspondientes a valores de distancias similares. Esto se explica debido a que la una señal es reforzada por el canal mientras que la otra es debilitada. Vale la pena mencionar que la campaña de mediciones preliminar se realizó para justamente identificar los problemas del método de propagación en el tema de localización de sensores en ambientes cerrados.

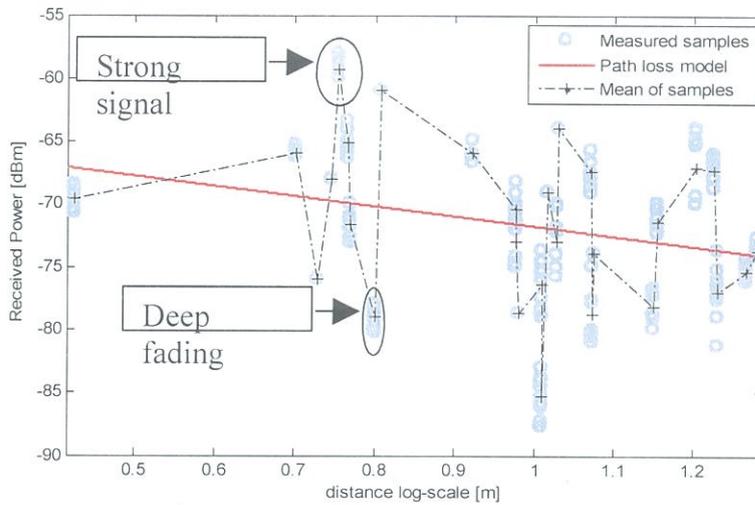


Figura 3.2: Aproximación de la curva de RSS a distancia (ambiente cerrado estático)

Contrarrestando el efecto multicamino

Cancelar el efecto multicamino (o por lo menos promediarlo) no es tan directo como promediar cierto número de mediciones “independientes en el tiempo” como muchos métodos en la literatura lo asumen [24, 25]; especialmente en ambientes estáticos debido a que las mediciones tomadas en diferentes tiempos experimentan el mismo efecto multicamino, como se observa en la figura 3.2. Las pequeñas diferencias entre mediciones no se deben al efecto multicamino, sino principalmente a la asimetría del enlace y a fuentes de variabilidad de RSS causadas por el transmisor/receptor. Por lo tanto, a pesar que la diversidad en el tiempo es importante en ambientes dinámicos, esta no es suficiente para dar cuenta del efecto multicamino de forma eficiente.

Por lo que se menciona anteriormente, el presente sistema de estimación de rango intenta obtener mediciones de RSS poco co-relacionadas (esto es, las mediciones presentan diferentes efectos multicamino) por medio de técnicas de diversidad, sobre las cuales el efecto multicamino es promediado.

De ahí, el efecto multicamino puede cambiar con el espacio, frecuencia y tiempo.

Diferentes efectos multicamino se experimentan en diferentes ubicaciones, debido a que el desfase entre las señales que llegan al receptor presentan diferentes desfases y atenuaciones de gran escala en diferentes ubicaciones. También, el desfase entre las señales que llegan al receptor, así como también los coeficientes de reflexión de las diferentes superficies del sitio, dependen de la frecuencia, lo cual cambia el efecto multicamino de acuerdo a la frecuencia. Además, en ambientes dinámicos, diferentes caminos de propagación se crean en diferentes tiempos, espaciados por lo menos por un tiempo de coherencia del canal, debido al movimiento de los objetos. Por lo tanto, la presente solución emplea diversidad del espacio (también conocida como diversidad de antenas), diversidad de frecuencia y diversidad de tiempo para contrarrestar el efecto multicamino.

3.2.3 Apantallamiento

A pesar que las técnicas de diversidad permiten mitigar el efecto multicamino, de modo que se pueda estimar más precisamente la pérdida de señal dependiente de la distancia, es estrictamente necesario dar cuenta del efecto que causan las señales obstruidas en el cambio de la potencia total recibida. En ambientes cerrados dinámicos, obstáculos tales como muebles y las personas atenúan la señal.

De ahí, un modelo de propagación de gran escala adecuado debe considerar tanto la pérdida de señal dependiente de la distancia como la pérdida de señal debido a las obstrucciones, definido como sigue,

$$RSS(d) = P_T + P_0 - 10\eta \log_{10}[d] + \psi \quad 3.5$$

donde ψ denota el término de apantallamiento aleatorio que afecta la observación. En la ecuación 3.5 se asume que el efecto multicamino ha sido promediado y se incluye en la pérdida de señal dependiente a la distancia, por lo cual no aparece en la ecuación.

La figura 3.3 muestra la aproximación de la curva RSS a distancia basada en mediciones realizadas en un ambiente cerrado dinámico (los puntos en amarillo representan información obtenida en la presencia de objetos en movimiento, mientras que

los puntos en azul representan información obtenida en un escenario estático). En la figura 3.3, el promedio de las mediciones presenta claramente una desviación (debida al apantallamiento) respecto del promedio de las mediciones en la figura 3.2, la cual obedece al caso de un escenario estático donde no existen obstrucciones.

Sistemas de estimación de rango básicos, basados en principios de propagación, reconocen que los errores de predicción de RSS a distancia son debidos al apantallamiento [19, 24, 36]. Por consiguiente, cuando no se considera el efecto de la atenuación causada por las obstrucciones en el modelo de pérdida de señal y se usa un modelo de propagación basado únicamente en la pérdida de señal dependiente de la distancia, como en la ecuación 3.3, las estimaciones de distancia presentan una desviación como sigue,

$$\hat{d} = d_{true} 10^{\left(\frac{\psi}{10\eta}\right)} \quad 3.6$$

De acuerdo a la ecuación 3.6, el error de estimación es proporcional a la distancia estimada. Por ejemplo, en [24] los autores intentan contrarrestar este efecto extrayendo el error esperado de la distancia estimada. Así, obedeciendo al hecho que el término de apantallamiento es Gaussiano con media cero y desviación estándar σ_ψ , en general, el error esperado de la distancia estimada se calcula como sigue,

$$E[\hat{d}] = d_{true} E\left[e^{\frac{\psi \log 10}{10\eta}}\right] = d_{true} e^{\frac{1}{2}\left(\frac{\sigma_\psi \log 10}{10\eta}\right)^2} \quad 3.7$$

Sin embargo, in [24] los autores asumen que el término de apantallamiento es idénticamente distribuido, lo cual, por lo general, no es verdad. En la práctica, el proceso de apantallamiento es independiente y generalmente presenta correlación espacial. Por consiguiente, este método introduce otro fuente de aleatoriedad en la estimación de distancias.

De ahí, la atenuación causada por obstáculos constituye una fuente de error de mayor preocupación en la estimación de distancias, tomando en cuenta que su desviación estándar va desde alrededor 4 dB hasta 12 dB dependiendo de las características del sitio,

por lo cual, debe ser contrarrestado de alguna manera.

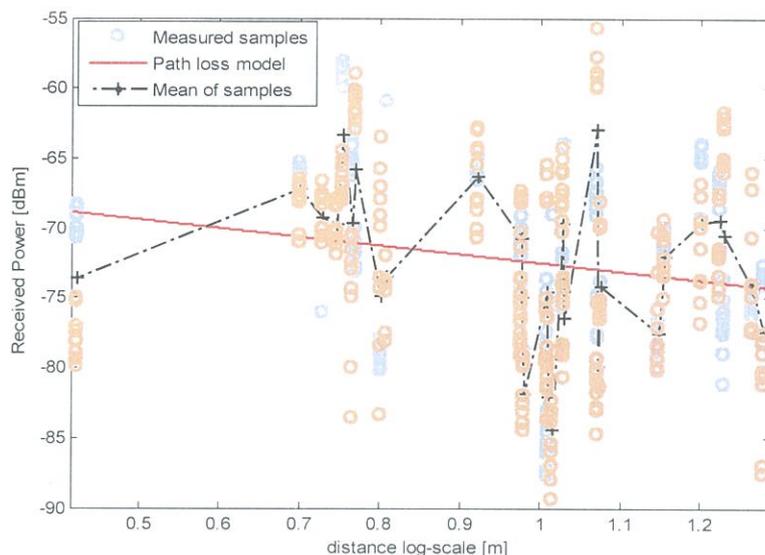


Figure 3.3: Aproximación de la curva de RSS a distancia (ambiente cerrado dinámico)

Contrarrestando el apantallamiento

Reconociendo lo discutido anteriormente, un método práctico y novedoso para contrarrestar la atenuación causado por obstáculos se propone en el presente sistema para estimación de distancias. El método implementa un modelo de propagación de gran escala adecuado que considera tanto la pérdida de señal dependiente de la distancia y la atenuación causada por obstáculos. A diferencia de métodos poco prácticos como aquellos que estiman la atenuación causada por obstáculos fuera de operación, el presente sistema incorpora la atenuación causada por obstáculos en el modelo de pérdida de señal, el cual se calcula durante la operación de sistema.

Basados en el hecho que el apantallamiento presenta correlación espacial, se asume que las mediciones detectadas en un cierto receptor experimentan igual apantallamiento (o por lo menos parcialmente igual apantallamiento), el cual es independiente del apantallamiento que experimentan otros receptores (nodos sujetadores en nuestro caso)

ubicados en diferentes posiciones. Basados en esta asunción, el presente sistema de estimación de distancias utiliza curvas de RSS a distancia específicas de cada nodo sujetador, de modo que, para un nodo sujetador *i-ésimo* genérico, la potencia recibida es afectada por un término de apantallamiento (ψ_i) independiente, tal como se define seguidamente,

$$RSS(d)_i = P_T + P_0 - 10\eta \log_{10}[d] + \psi_i \quad 3.8$$

Mediante este modelo de propagación de gran escala propuesto, las estimaciones de distancia se asume no presentan ninguna desviación debida a la atenuación causada por obstáculos, ya que el término de apantallamiento está incluido en la curva de RSS a distancia.

Resumen del sistema de estimación de distancias

Claramente, el presente sistema de estimación de distancias intenta contrarrestar el efecto multicamino por medio de técnicas de diversidad e implementa un modelo de pérdida de señal que considera tanto la pérdida de señal dependiente de la distancia como la causada por obstáculos.

CAPÍTULO 4

ALGORITMOS DE LOCALIZACIÓN BASADOS EN DISTANCIAS

Una vez que las fuentes de error en la estimación de distancias han sido contrarrestadas, otro aspecto importante es el algoritmo de localización por su cuenta. En la literatura, existen varios algoritmos que pueden ser empleados para calcular posiciones desconocidas de nodos basados en información de distancias entre los nodos. Diferentes algoritmos se comportan diferentemente, en especial en la presencia estimaciones de distancias imprecisas. De modo que, en la presente solución es relevante definir un algoritmo de localización robusto en la presencia de estimaciones de distancias imprecisas.

Los algoritmos de localización basados en distancias pueden ser divididos en dos categorías: trilateración y optimización.

El método de trilateración es el método más básico e intuitivo, el cual tiene sus bases en principios geométricos. Este método encuentra la posición de un nodo ciego en la intersección de tres circunferencias centradas en nodos sujetadores —recuérdese que la solución está dada en dos dimensiones—. El método de trilateración logra una localización perfecta cuando las distancias son exactas, pero es el más deficiente en la presencia de estimaciones de distancias imprecisas, puesto que las circunferencias no se interceptan en un punto común.

4.1 Optimización

Los algoritmos de optimización basados en distancias aproximan la posición de un nodo ciego al minimizar una función de costo que contiene información de distancia entre los nodos. Estos algoritmos pueden demandar recursos para computo significantes, lo cual depende en el método numérico usado para resolver el problema de optimización, por ejemplo, el método Newton-Raphson es el método más conocido para funciones de valor real.

Los problemas de optimización pueden también incluir condicionamientos. Los condicionamientos pueden mejorar la convergencia del algoritmo. Por ejemplo, en el caso del problema de localización, condicionamientos basados en principios geométricos pueden reducir el impacto de los errores de las estimaciones de distancia en la posición estimada [26]. Así también, limitando las estimaciones de distancias dentro de un rango esperado puede mejorar el desempeño del algoritmo [9]. Sin embargo, los problemas de optimización con condicionamientos comúnmente demandan recursos de cómputo significantes, y pueden resultar en tiempos de convergencia inaceptables, como se muestra en [8]. En la presente solución, nos concentramos en problemas de optimización sin condicionamientos y se deja los problemas de optimización con condicionamientos para una futura investigación.

Entre los algoritmos de optimización más populares de la literatura tenemos: multilateración, mínimo-máximo, máxima verosimilitud y optimización global.

Multilateración

El método de multilateración tiene sus bases en el método de trilateración, pero este primero provee una estructura para estimación de posiciones más flexible en la presencia de estimaciones de distancia imprecisas. A diferencia del método de trilateración, el cual intenta determinar la posición de un nodo ciego cuyas distancias a los nodos sujetadores son exactamente igual a las distancias estimadas (distancia obtenida del sistema de estimación de distancias) correspondientes, el método de multilateración busca encontrar la posición de un nodo ciego que minimice las diferencias entre las distancias aproximadas y las distancias estimadas. En el método de multilateración, todas las distancias estimadas son aproximadas idénticamente, basadas en la asunción que todas presentan la misma distribución de error. De esta forma, el método de multilateración encuentra la posición óptima cercana a la verdadera posición con una alta probabilidad [3].

Mínimo-Máximo

Este método es popular debido a su simplicidad de implementación. En el método mínimo-

máximo, un nodo ciego traza un par de líneas horizontales y un par de líneas verticales alrededor de cada nodo sujetador, de tal manera que la distancia mínima entre cada línea y la ubicación del nodo sujetador es igual a la distancia estimada [24]. Este algoritmo no logra localización perfecta aún en la presencia de estimaciones de distancias precisas.

Máxima verosimilitud

La técnica de localización de máxima verosimilitud está basada en la teoría de inferencia estadística clásica [26]. Este algoritmo encuentra la posición de un nodo ciego en la cual se maximiza la probabilidad de recibir la matriz de potencia recibida dentro de un cierto rango. Esta probabilidad considera las distribuciones estadísticas de los errores de las distancias estimadas, así, el método de máxima verosimilitud minimiza la variación del error de localización a medida que el número de señales de referencia, esto es, beacons originados por los nodos sujetadores, crece infinitamente.

Optimización global

Los algoritmos de optimización global intentan solucionar dos problemas de mayor preocupación en redes ad-hoc de gran escala como son información de distancias incompleta (debido a mediciones de corto alcance) y número limitado de nodos sujetadores [7, 8, 9]. En la ausencia de nodos sujetadores, los algoritmos de optimización global calculan las posiciones de los sensores relativas.

Los métodos de optimización global usan toda la información de distancias disponible (esto es, cualquier distancia es estimada y usada para localizar un nodo, siempre que exista conectividad), debido a que no todos los nodos ciegos tienen suficientes nodos sujetadores a su alrededor para ser localizados. Por lo tanto, estos métodos también usan información de distancia entre nodos ciegos para asistir el proceso de localización. Desafortunadamente, los algoritmos de optimización pueden calcular un mapa de la red errado cuando se usa información de distancia entre nodos ciegos, puesto que el gráfico de la red no está completamente sujeto, de modo que, este puede tener varias realizaciones [19].

Como alternativa a los métodos de optimización global, investigadores han buscado métodos recursivos para solucionar tanto el problema de información de distancias incompleta como el problema del número limitado de nodos sujetadores en redes ad-hoc de gran escala. En los métodos recursivos, los nodos ciegos que son localizados de manera precisa se convierten en nodos sujetadores nuevos. Entonces, estos nodos sujetadores nuevos son usados como referencia para otros nodos ciegos que no han sido localizados aún. De modo que, el proceso de localización se propaga desde el área cercana a los nodos sujetadores de arranque al área que se encuentra inaccesible a los mismos.

4.2 Algoritmo de Localización a implementar

En la presente solución es relevante definir un algoritmo de localización que reduzca el impacto de estimaciones de distancias imprecisas en la estimación de la posición. Además, también se busca establecer un balance justo entre desempeño (precisión) y complejidad.

En [24], los autores argumentan que el método mínimo-máximo provee un balance justo entre desempeño y complejidad; sin embargo, este método no contrarresta el impacto de estimaciones de distancias imprecisas en la estimación de la posición. Por otro lado, el método de máxima verosimilitud intenta contrarrestar el impacto de las estimaciones de distancias imprecisas en la estimación de la posición al costo de mayor complejidad [24]. Por lo tanto, la presente solución implementa el algoritmo de cuadrados mínimos con función de valoración (Weighted Least-Squares, WLS) [8], el cual provee una estructura de aproximación más simple que el método de máxima verosimilitud y contrarresta los errores de las estimaciones de distancias para la estimación de la posición de mejor forma que el método de multilateración, como se explica en la sección 4.4.1.

Por otra parte, a pesar que la presente solución no busca solucionar el problema de optimización global, el algoritmo WLS puede solucionar dicho problema en la presente implementación centralizada, en caso que la solución necesite solucionar el problema de localización para redes ad-hoc de gran escala, siempre que una infraestructura base de mayor tasa de datos sea provista.

4.3 Delineamientos del problema de localización

Antes de pasar a estudiar el método de cuadrados mínimos, es necesario definir el problema de localización genérico. Vamos a considerar una red de N nodos embebidos en el espacio Euclidiano de m dimensiones. En el espacio Euclidiano, la distancia entre nodos i y j está dada por,

$$d_{i,j} = D(x_i, x_j) = \sqrt{\langle (x_i - x_j), (x_i - x_j) \rangle}, \quad 4.1$$

donde \mathbf{D} denota la matriz de distancias Euclidianas (Euclidean Distance Matrix, EDM), x_i denota el vector de coordenadas del nodo i , y $\langle a, b \rangle$ el producto interno de a y b . Debe notarse que la matriz $N \times N$ de distancias Euclidianas es simétrica y no negativa, con ceros en la diagonal principal. De ahí, una estimación de distancia entre los nodos i y j , obtenida del sistema de estimación de distancias, se denota por $\delta_{i,j}$.

También se define la matriz de conectividad C , donde $c_{i,j}$ es un valor 1/0 binario que representa la existencia/no existencia de un enlace (esto es, estimación de distancia) entre los nodos i y j . También, el *nivel de conectividad* se define como el número promedio de nodos dentro del alcance de radio. Más adelante se emplea el término *completitud de la matriz de distancias* para referirnos a la razón entre el número total de distancias estimadas en la red y el número total de aristas del gráfico de la red completamente conectado.

4.4 Optimización de cuadrados mínimos

La optimización de cuadrados mínimos es un algoritmo que permite ajustar datos basado en un cierto criterio (función de costo), por medio de la aproximación del valor mínimo de la sumatoria de los cuadrados de la función de costo. La presente solución implementa el algoritmo de cuadrados mínimos con función de valoración (WLS) [8]. El desempeño del algoritmo se compara con un método de cuadrados mínimos estándar, como lo es el método de Escalamiento Multidimensional métrico (metric Multidimensional Scaling, metric-MDS).

MDS [27] es un conjunto de métodos usados para producir una representación de ciertas diferencias en un número pequeño de dimensiones. En localización en WSN, MDS permite el trazado de la red a partir de la información de las distancias entre los nodos. Entre las diferentes variedades de MDS, metric-MDS es empleado comúnmente para solucionar el problema de optimización global en la presencia de información de distancias incompleta e imprecisa, como se muestra en [7].

Formulación del problema de localización

Tanto metri-MDS como WLS pertenecen a la familia de optimización de cuadrados mínimos no lineal. El método metric-MDS intenta determinar la posición de un nodo ciego tal que la diferencia entre las distancias aproximadas y las distancias estimadas sea mínima, como sigue,

$$\min_{\hat{X} \in \mathbb{R}^{m \times N}} \sum_{i < j} c_{i,j} (\delta_{i,j} - D([\hat{x}_i, \hat{x}_j]))^2, \quad 4.2$$

donde \hat{X} es la matriz $m \times N$ de vectores de coordenadas de las posiciones aproximadas (también referidas como posiciones estimadas). Los demás términos se definen en la sección 4.3.

En este método de aproximación de distancias, todas las distancias estimadas son aproximadas idénticamente basándose en la asunción que estas presentan la misma distribución de error, igual al método de multilateración (cuando únicamente distancias respecto a nodos sujetadores se usa, la formulación en 4.2 describe el método de multilateración). Sin embargo, las distancias estimadas no presentan la misma distribución de error necesariamente, no por lo menos en el caso de sistemas de estimación basados en principios de propagación, donde el error de estimación es proporcional a la distancia estimada [36].

Reconociendo lo anteriormente mencionado, el método WLS introduce una función de valoración, la cual da cuenta de las distribuciones de error variables de las estimaciones

de distancias. Dicho método reduce efectivamente el impacto de las estimaciones de distancias imprecisas en la estimación de la posición. La función de valoración se describe detalladamente en la siguiente sección.

Por otra parte, el método WLS no solamente introduce la función de valoración, sino también presenta un criterio de aproximación diferente respecto del método de cuadrados mínimos para aproximación de distancias estándar, como lo es *metric-MDS*. El método WLS intenta determinar la posición de un nodo ciego tal que las diferencias entre los *cuadrados* de las distancias aproximadas y los *cuadrados* de las distancias estimadas sea mínima, como sigue,

$$\min_{\hat{x} \in \mathbb{R}^{m \times N}} \sum_{i < j} h_{i,j} \left(\delta_{i,j}^2 - D([\hat{x}_i, \hat{x}_j])^2 \right)^2, \quad 4.3$$

donde $h_{i,j}$ representa la valoración de la distancia estimada $\delta_{i,j}$ correspondiente.

En [47], los autores argumentan que este método de aproximación de distancias garantiza que la matriz de distancias aproximada es una matriz Euclidiana en efecto. En [8], los autores argumentan que este método de aproximación es robusto en la presencia de baja completitud de la matriz de distancias y permite el uso de métodos Newton, por lo tanto, no demanda cálculos de gran escala. Sin embargo, la precisión del método WLS no ha sido comparado respecto de métodos de aproximación de distancias estándares como lo es *metric-MDS*. En la sección 4.6 se compara el desempeño de *metric-MDS* y WLS por medio de extensas simulaciones.

4.5 Función de valoración

La función de valoración tiene como objeto valorar la contribución de cada distancia estimada para minimizar la función de costo.

En ausencia de una teoría óptima, y teniendo en cuenta que otras técnicas calculan valores basados únicamente en intuición, así como en [48] donde el valor es proporcional al número de saltos entre los sensores correspondientes a la distancia estimada, la presente

solución usa la función de valoración propuesta en [46]. En esta función de valoración, cada entrada de la matriz de valoración es proporcional a la relevancia de la entrada correspondiente de la matriz de distancias estimadas. La expresión matemática de la función contiene dos factores independientes: la confianza en la distancia estimada (H_D), y el impacto que la arista correspondiente tiene en la rigidez del gráfico de la red (H_C), como sigue,

$$H = H_D \bullet H_C \quad 4.4$$

Debe notarse que la matriz de valoración es simétrica y no negativa

Matriz de valores de confianza

La matriz de valores de confianza H_D mide la confiabilidad en las distancias estimadas $\delta_{i,j}$ obtenidas del sistema de estimación de distancias. La expresión matemática de las entradas de la matriz es como sigue,

$$h_{D_{i,j}} \approx Q\left(-\frac{(\alpha + \rho_{i,j}) \cdot \sqrt{K_{i,j}}}{2 \cdot \hat{\sigma}_{\delta_{i,j}}}\right) - Q\left(\frac{(\alpha - \rho_{i,j}) \cdot \sqrt{K_{i,j}}}{2 \cdot \hat{\sigma}_{\delta_{i,j}}}\right) \quad 4.5$$

En otras palabras, $h_{D_{i,j}}$ representa la probabilidad que la distancia estimada $\delta_{i,j}$, sujeta a un desplazamiento $\rho_{i,j}$, este dentro de un rango α cercana a la distancia verdadera $d_{i,j}$; donde $\hat{\sigma}_{\delta_{i,j}}$ es la variación muestral de $\delta_{i,j}$, calculada a partir de las muestras $K_{i,j}$ disponibles, y $Q(x)$ es la función Q Gaussiana.

De ahí, $\rho_{i,j}$ permite dar cuenta de distribuciones de error variables. En el caso de la estimación de distancias basada en principio de propagación, el desplazamiento $\rho_{i,j}$ es proporcional a la distancia estimada (dado que el error de estimación es proporcional a la distancia estimada), como sigue,

$$\rho_{i,j} \approx \delta_{i,j} \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_\psi \log 10}{10\eta}\right)^2}\right), \quad 4.6$$

donde σ_ψ es el error estándar de la aproximación de la curva de RSS a distancia resultante, el cual se asume es la desviación estándar del término de apantallamiento, y es el

exponente de pérdida de señal correspondiente.

En [46] los autores no proveen una teoría óptima para determinar α , en lugar de ello, se menciona únicamente que mayor precisión se puede alcanzar para valores de α pequeños, al costo de mayor variación. En [46] los autores usan α igual a 0.1 m y 1m.

Matriz de valores de estructura

La matriz de valores de estructura H_C tiene relación con el impacto que la presencia/ausencia de cada arista tiene sobre la estructura global del gráfico de la red, independientemente de cuan bien o mal la distancia ha sido estimada. Entonces, la matriz mide la relevancia que cada arista tiene en la rigidez del gráfico de la red.

En [46], el impacto que la presencia/ausencia de una arista tiene sobre la estructura global del gráfico de la red es estimado calculando la cantidad de perturbación que sufre el espectro del gráfico cuando se elimina la arista (i, j) . Dicha perturbación se calcula como sigue,

$$\tau \cong \frac{\|\Lambda_G - \Lambda_{Gp}\|_2}{\|\Lambda_G\|_2}, \quad 4.7$$

donde $\|\cdot\|_2$ denota la norma-2 y Λ_G y Λ_{Gp} son los vectores de valores propios de las matrices de representación del gráfico no perturbado G y del gráfico perturbado Gp , respectivamente. La matriz de representación considerada en [2] es la matriz Laplaciana sin signo (*signless Laplacian matrix*),

$$\mathbf{L} \cong \mathbf{\Theta} + \mathbf{C}, \quad 4.8$$

donde $\mathbf{\Theta}$ es la matriz diagonal donde cada entrada en la diagonal principal está determinada por el número de enlaces que el nodo, correspondiente a la entrada en cuestión, mantiene con otros nodos en la red real.

De ahí, finalmente obtenemos,

$$h_{C_{i,j}} \cong \frac{\tau_r}{\max(\Delta)}, \quad 4.9$$

donde el subíndice r se refiere a la arista que conecta los nodos (i, j) y $\Delta = \{\tau_1, \dots, \tau_{|E|}\}$ es el conjunto de perturbaciones calculadas, donde $|E|$ representa el número de enlaces existentes.

4.6 Análisis de desempeño vía simulación

En el presente análisis vía simulación, se busca evaluar la validez tanto del criterio de aproximación de distancias del algoritmo de cuadrados mínimos WLS respecto del método metric-MDS, como de la función de valoración.

Para llevar a cabo las siguientes simulaciones, se debe asumir un cierto escenario y modelo de canal. De este modo, se considera una habitación de 10x10 metros cuadrados, para un rango de 7 a 35 nodos distribuidos idénticamente de manera aleatoria. Se considera el número de nodos sujetadores mínimo $m+1$, donde m es la dimensión de la solución. El alcance de radio (R) se establece en 8.5 m, de tal modo que, más del 70% de las distancias entre nodos son detectadas siempre, es decir, se considera una red con conectividad parcial. Se usa el modelo del canal de la ecuación 3.5 para generar las mediciones de distancia (σ_w se estableció en 6 dB y η en 1.64). Vale la pena mencionar que, únicamente para propósitos de simulación, se asume que el término de apantallamiento es independiente e idénticamente distribuido, aunque este generalmente presenta correlación espacial.

Usando este modelo de canal y parámetros, se observó que el error promedio de las mediciones de distancias generadas es de 4 m (cuando el error máximo es limitado a 50% el alcance de radio). Esta distribución de error de estimaciones de distancias considerada está en acuerdo con lo que se presenta en [2, 3].

Por conveniencia, el desempeño de los algoritmos se mide en términos del error promedio de las distancias aproximadas relativo al radio de transmisión, como sigue,

$$\zeta = \frac{\sum_{i < j} |D(x_i; x_j) - D(\hat{x}_i; \hat{x}_j)|}{(M - A) \cdot R}, \quad \forall i \vee j \notin \mathbf{q}, \quad 4.10$$

donde \mathbf{q} se define como el conjunto de índices de los vectores de posición de los nodos sujetadores, M se refiere al número de combinaciones $(i, j) \forall i \neq j$ (M es igual a $N(N-1)/2$) y A se refiere al número de aristas que conectan los nodos sujetadores (en nuestro caso A es igual a $(m+1)m/2$).

Resultados de la simulación

Como se puede notar, todas las figuras obtenidas de las simulaciones presentan un punto de quiebre bastante visible en N igual a 15. Esto es debido a que la distribución espacial de los nodos considerada (distribuciones normales independientes centradas en el origen para cada eje) conlleva a altas tasas de completitud de la matriz de distancias en la presencia de pocos nodos, la cual decrece a medida que el número de nodos se incrementa hasta que se estabiliza alrededor de 75% completitud para N mayor que 15. De modo que, el error crece hasta N igual a 15 debido a la decreciente tasa de completitud, pero luego empieza a reducirse debido a que el nivel de conectividad se incrementa gradualmente (los nodos tienen mejores oportunidades para ser referenciados a medida que el número de beacons crece al infinito).

Optimización de cuadrados mínimos

En el primer grupo de simulaciones, correspondientes a la Figura 4.1, se compara el desempeño entre los algoritmos WLS y metric-MDS, cuando únicamente la matriz de conectividad \mathbf{C} es usada, es decir, no se usa la matriz de valoración.

Se puede notar que ambos métodos de aproximación de distancias tienen desempeños similares, en promedio (metric-MDS supera en alrededor 1%). A pesar que en [8] se argumenta que WLS es más robusto que metric-MDS en la presencia de bajas tasas de completitud, no se dice nada acerca de la robustez en la presencia de errores de las estimaciones de distancias. De hecho, la presente solución no se enfoca en el problema de bajas tasas de completitud como ocurre en redes de gran escala; no obstante, este problema

podiera ser aliviado al formar mapas locales con buen modelo de conectividad sobre los cuales las posiciones son estimadas, para luego alinear estos mapas conjuntamente basándose en sus nodos comunes, como en [10].

Más relevante para la presente solución constituye la robustez en la presencia de errores de las estimaciones de distancias, para lo cual los criterios de aproximación WLS y metric-MDS se comportan de manera similar.

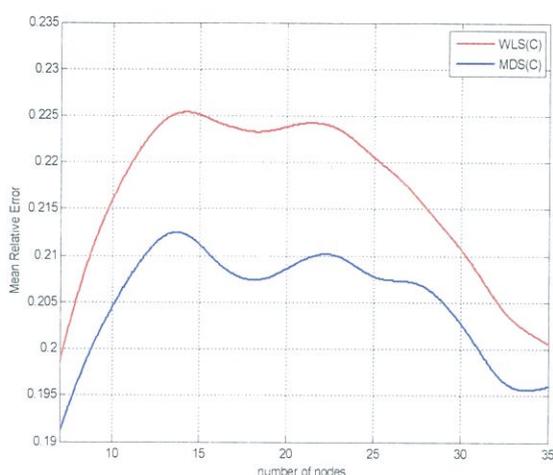


Figure 4.1: Comparación de desempeño entre metric-MDS y WLS

Por otra parte, se pudo observar que el método WLS converge más rápidamente que el método metric-MDS, donde el tiempo de convergencia de este primero es menor a 1 segundo, en promedio. Vale la pena mencionar que los algoritmos de cuadrados mínimos fueron implementados usando la función `lsqnonlin()` del software de optimización de MATLAB.

Función de valoración

En el segundo grupo de simulaciones, correspondiente a las figuras 4.2 y 4.3, se evalúan las matrices de valoración \mathbf{C} , \mathbf{H}_D y \mathbf{H} . Las figuras 4.2 y 4.3 muestran el desempeño de los algoritmos metric-MDS y WLS, respectivamente, para las diferentes matrices de

valoración. Se puede observar que tanto la matriz \mathbf{H}_D como la matriz \mathbf{H} resultan en aproximadamente 5% de ganancia respecto de la matriz de conectividad \mathbf{C} , en promedio; sin embargo, esta ganancia parece incrementar a medida que el nivel de conectividad aumenta.

En [46], se muestra que esta ganancia alcanza hasta un 25%, cuando se considera la aleatoriedad de mediciones de distancias basadas en tiempo de arribo con radios UWB.

Además, como se muestra en [46] y como también se puede observar en las figuras 4.2 y 4.3, la matriz de valores de estructura \mathbf{H}_C es menos relevante que la matriz de valores de confianza \mathbf{H}_D , dado que las matrices \mathbf{H}_D y \mathbf{H} resultan en la misma ganancia.

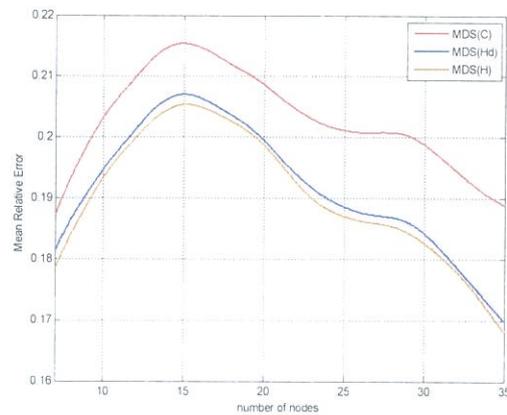


Figure 4.2: Comparación de desempeño de las matrices \mathbf{C} , \mathbf{H}_D , y \mathbf{H} usando metric-MDS

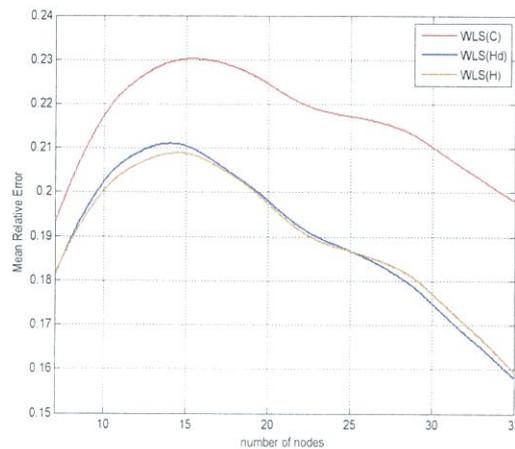


Figure 4.3: Comparación de desempeño de las matrices C , H_D , y H usando WLS

Conclusiones

Está claro que la función de valoración evaluada reduce el impacto de los errores de las estimaciones de distancias en la estimación de la posición, y, por lo tanto, la presente solución implementa la misma. Por otra parte, a pesar que los métodos de aproximación metric-MDS y WLS resultan en estimaciones con precisiones similares, la presente solución implementa el método WLS dado que este converge más rápidamente y representa un valor agregado en la presencia de bajas tasas de completitud de la matriz de distancias, esto en el caso que la solución necesite ser actualizada para redes ad-hoc de gran escala.

CAPÍTULO 5

PLATAFORMA EMPÍRICA

Antes de pasar a la demostración empírica de la solución propuesta en el Capítulo 6, es necesario revisar algunos detalles relevantes de la tecnología IEEE 802.15.4 que implementa la plataforma que se usa en la experimentación. Sensinodes son los nodos (motest) utilizados por el grupo de trabajo en redes de sensores (WSN working group) de la Universidad de Tecnología de Helsinki.

El presente capítulo consiste en una pequeña descripción del estándar IEEE 802.15.4 [43] y los nodos Sensinodes [41].

5.1 El Estándar IEEE 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4 provee las especificaciones de la Capa Física (Physical Layer, PHY) y de Control de Acceso al Medio (Media Access Control, MAC) para redes de área local inalámbricas de baja tasa de transmisión (Low-Rate Wireless Personal Area Networks, LR-WPANs). LR-WPAN proveen comunicaciones confiables de corto alcance que dan soporte a aplicaciones de bajas tasas de transmisión, bajo consumo de potencia y bajo costo.

En el estándar, dos tipos de nodos de red son definidos: un dispositivo de función completa (full-function device, FFD) o un dispositivo de función reducida (reduced-function device, RFD). Los FFDs pueden actuar tanto como coordinadores o como dispositivos normales. Cada WPAN necesita al menos un FFD operando como coordinador de la red. Mientras que, los RFDs no pueden actuar como coordinadores y solo pueden ser conectados a un FFD al mismo tiempo. Los RFDs son utilizados meramente para aplicaciones muy simples que requieren mínimas capacidades.

5.1.1 Topología de la Red

En redes basadas en IEEE 802.15.4, los nodos pueden ser arreglados en una estrella o una topología par a par (peer-to-peer) como se muestra en la Figura 5.1.

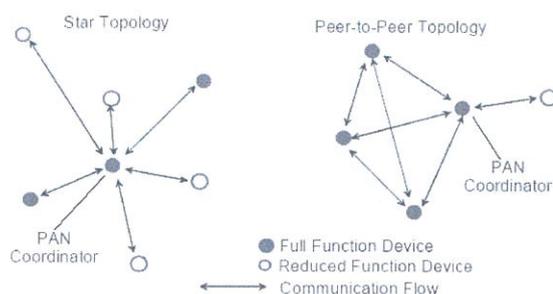


Figura 5.1: Topología de la Red

En la topología de estrella, un nodo actúa como el controlador de la red, denominado coordinador PAN. El controlador principalmente controla y enruta la comunicación entre nodos en la red, pero este también puede tener otros roles de acuerdo a la estrategia de aplicación. En una topología de estrella, la confiabilidad de la comunicación depende meramente en la confiabilidad del coordinador.

En la topología de par a par (peer-to-peer), los nodos de la red se comunican de una manera tipo malla siempre que exista conectividad, donde los caminos de comunicación pueden ser de múltiples saltos (ad-hoc). Entonces, las comunicaciones requieren organización por sí solas y autosaneamiento. Enrutar un mensaje es entonces más complicado, pero más confiable.

Una topología tipo estrella es típicamente utilizada para aplicaciones con patrones de comunicación definidos como automatización de casas, los periféricos del computador, aplicaciones de cuidado de salud, juguetes y juegos; mientras que, la topología de par a par (peer-to-peer) es utilizada en aplicaciones con patrones de comunicación no definidos como redes de sensor es para monitoreo de ambientes y hábitat, control de tráfico y control

y monitoreo industrial.

Soluciones de localización generalmente asumen comunicaciones par a par (peer-to-peer), de modo que cualquier información entre nodos (medición) puede ser obtenida siempre que exista conectividad.

5.1.2 Capa Física

El estándar IEEE 802.15.4 define atributos específicos de la capa física como frecuencias de radio, formatos de modulación, tasas de transmisión, esquemas de codificación. Entonces, la capa física es responsable de manejar el transmisor/receptor físico. Una descripción detallada de los atributos y funciones del PHY puede ser encontrados en las especificaciones del estándar [43]. En la presente solución es relevante la coexistencia con otros sistemas en términos de uso del espectro.

Tres bandas de frecuencia posibles que no requieren licencia de operación son definidas: banda 868 MHz, banda 912 MHz y banda 2.4 GHz. Los sistemas IEEE 802.15.4 son entonces sometidos a interferencia entre sistemas. La primera banda es usada en Europa, permitiendo un canal de comunicación (868.0-868.6 MHz). La segunda banda es usada en Norte América, permitiendo más de diez canales (902-928 MHz). La banda 2.4 GHz en cuestión es utilizada a nivel mundial, proporcionando 16 canales de radio para operaciones que no requieren licencia. Los canales adyacentes están 5 MHz aparte, en un rango que va desde 2405 MHz hasta 2480 Mhz.

La banda de frecuencia 2.4 GHz aloja muchos sistemas para operaciones que no requieren licencia, incluyendo las tecnologías de gran aceptación como Wi-Fi y ZigBee. En la presente solución, saltos de frecuencia son utilizados para permitir una mejor coexistencia de los sistemas dado que los canales de Wi-Fi pueden superponerse con los

canales de ZigBee, aún cuando estos no comparten las mismas portadoras.

5.1.3 Que más es relevante?

Cuando se diseñan aplicaciones para redes de sensores, los principales aspectos son el consumo de potencia y la escalabilidad.

Redes de sensores son frecuentemente utilizados para monitorear situaciones donde el acceso es difícil, peligroso o costoso. El tiempo de vida de los elementos de la red tiene que ser entonces maximizados para evitar operaciones de mantenimiento.

En el lado de las aplicaciones, el tiempo de vida de los elementos depende principalmente del tiempo de vida de las baterías, puesto que los elementos son utilizados en las condiciones correctas [42]. Aplicaciones conscientes del consumo de potencia deben ser entonces desarrolladas para maximizar el tiempo de vida de las baterías.

En el estándar IEEE 802.15.4, el manejo de potencia del dispositivo se realiza haciendo uso del modo de descanso (sleep mode). De acuerdo a la estrategia de aplicación, este modo dormir puede ser establecido con longitud fija o hasta que un nuevo evento ocurra.

Aquí, es deseable para los elementos de la red estar en modo de descanso la mayoría del tiempo, lo que depende meramente en la frecuencia de la ocurrencia del evento. De acuerdo a esto, el intervalo de descanso de una solución de localización dependerá generalmente en que tan frecuente el blanco necesita ser localizado, que a su vez depende de su velocidad de movimiento.

Otro aspecto importante en términos de consumo de potencia es la cantidad de tráfico que la aplicación genera. Más probable, metodologías de descentralizadas reducen la cantidad de tráfico en la red, mientras que, metodologías centralizadas no escalan bien.

La implementación de la solución en una forma descentralizada es objeto de una investigación futura. Sin embargo, la presente implementación centralizada puede escalar incluso a redes de gran escala, siempre que exista una infraestructura base de mayor tasa de

transmisión, por ejemplo, infraestructuras en base al estándar IEEE 802.11. El problema de localización a gran escala puede ser entonces reducido ya sea alineando mapas locales de manera conjunta (en presencia de suficientes nodos sujetadores rodeando cada nodo ciego) o un problema de optimización global (en presencia de insuficientes nodos sujetadores rodeando cada nodo ciego o para localización relativa en la ausencia de nodos sujetadores).

5.2 Sensinodes

Sensinodes proveen módulos de radio de baja potencia para ser usados en redes de sensores. Sensinodes tienen la pila de protocolos NanoStack™, la misma que constituye un software de red embebido, el cual da soporte a aplicaciones IP de bajo consumo de potencia ejecutándose sobre radios IEEE 802.15.4 operando en la banda 2.4 GHz [41].

En los experimentos, el sensinode U100 micro.2420 es utilizado (ver figura 5.2), que es un nodo de comunicación que es completa e independientemente operable con conectores accesibles para integración de sensores y elementos [37]. Este tiene el MSP430 micro controlador y el transmisor/receptor de radio CC2420 que cumple con las especificaciones IEEE 802.15.4 [40] proporcionado por Chipcon. El radio permite una tasa de datos de 250 kbps y un rango de transmisión de 100 m con su antena a bordo.

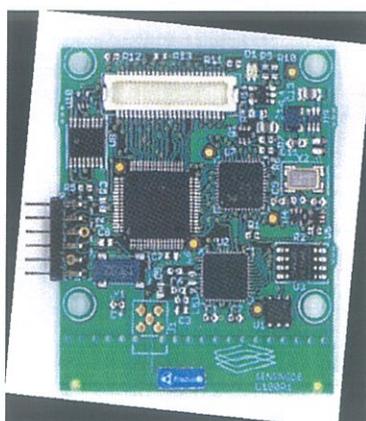


Figure 5.2: U100 micro.2420 sensinode

El microcontrolador y el radio pueden ser programados tanto con el sistema operativo FreeRTOS [38] como con el sistema operativo TinyOS [39], los mismos que constituyen sistemas operativo en tiempo real, portables y de libre acceso.

En FreeRTOS, las aplicaciones son escritas en C, mientras que, en TinyOS las aplicaciones son escritas en NesC [45], el cual es un lenguaje de programación diseñado especialmente para sistemas de red embebidos y que tiene sus bases en C. Además, el manejo de tareas en TinyOS no permite la generación de hilos, mientras que, FreeRTOS permite manejo preventivo de varios hilos (esto es, las tareas son servidas en tiempo real de acuerdo con su prioridad).

5.2.1 Potencia de Salida

En el chip de radio CC2420, el nivel de potencia de salida del transmisor de radio puede ser controlado configurando el registro TXCTRL.PA_LEVEL. La Tabla 5.1 muestra la potencia de salida para valores diferentes de TXCTRL.PA_LEVEL. Debe notarse que, el registro TXCTRL.PA_LEVEL consiste en 5 bits, entonces, 32 niveles de referencia de potencia de salida que puede son posibles. Sin embargo, los niveles de potencia de salida en la tabla 5.1 son los únicos que están especificados en las especificaciones del chip de radio 2420 [40].

PA_LEVEL	Output Power [dBm]
31	0
27	-1
23	-3
19	-5
15	-7
11	-10
7	-15
3	-25

Tabla 5.1: Configuraciones de salida de potencia @ 2.45 GHz

Variabilidad de la Potencia de Salida

Como se menciono anteriormente en la sección 3.1.2, la potencia actual transmitida es más cercana al nivel de potencia configurado pero no necesaria y exactamente igual. Además, diferentes transmisores se comportan diferentemente aún cuando estos están configurados de la misma manera. En [4] se encontró que, la desviación estándar global del desplazamiento de la potencia transmitida fue de 2.24 dB. Los resultados fueron obtenidos utilizando un solo receptor y nueve diferentes transmisores (el chip de radio CC2420 radio chip fue utilizado).

5.2.2 RSSI / Detección de Energía

El chip de radio CC2420 provee un RSSI (Received Signal Strength Indicator) para la detección de energía del canal, donde el valor puede ser leído del registro RSSI (RSSI.RSSI_VAL). En cumplimiento a las especificaciones IEEE 802.15.4, el RSSI es siempre promediado sobre 8 periodos de símbolo (128 μ s).

La Figura 5.3 muestra un valor típico de registro RSSI vs. la curva de potencia de entrada. En la Figura 5.3, se puede notar que, de acuerdo a las especificaciones del chip de radio CC2420 [40], el valor de registro RSSI tiene un desplazamiento de aproximadamente:

$$RF_{power}(dBm) = -45 + RSSI_{register_value} \quad 5.1$$

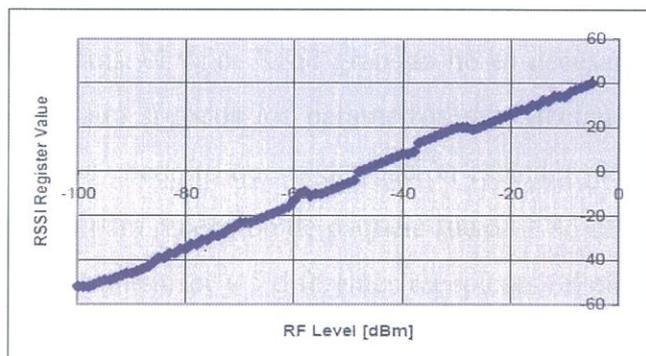


Figura 5.3: Valor típico de RSSI vs potencia de entrada

Procedimiento de Detección de Energía

Existen dos tipos de procedimientos para la detección de energía: la detección de energía para la recepción de mensajes y detección de energía continua.

En el primer tipo, el RSSI medido es promediado sobre los 8 periodos de símbolo siguiendo el SFD (Start of Frame Delimiter) del paquete recibido. El valor de RSSI medido es entonces anexado al penúltimo byte del paquete recibido. Este valor necesita ser manejado por la aplicación para hacer cualquier estimación de distancia basada en la intensidad de la señal recibida.

En el Segundo tipo, el valor de RSSI es continuamente calculado y actualizado cada periodo de símbolo mientras el radio es habilitado. Este valor de RSSI actualizado puede ser leído del registro RSSI (RSSI.RSSI_VAL). De hecho, la aplicación diseñada mejora la detección de ruido a través de la lectura del registro RSSI.

Variabilidad de Detección de Energía

La detección de energía con el chip de radio CC2420 es muy lineal como puede observarse en la Figura 5.3, pero no tiene precisión con respecto a la potencia real. En efecto, la linealidad y precisión de la curva típica de detección de energía con el chip de radio CC2440 son +/- 3 dB and +/- 6 dB, respectivamente [40].

Además, las no linealidades en la detección de energía varían en los diferentes receptores. En otras palabras, el valor RSSI grabado no es necesariamente el mismo para los diferentes receptores aun si todos los parámetros que afectan la variabilidad RSS se mantienen igual. En [4], se encontró que la desviación estándar global del desplazamiento en la detección de energía para recepción de paquete fue de 1.86 dB. Los resultados fueron obtenidos usando un solo transmisor y 5 diferentes receptores (el chip de radio CC2420 fue utilizado).

CAPÍTULO 6

DEMOSTRACIÓN EMPÍRICA DE LA SOLUCIÓN

En el presente capítulo, el desempeño de la presente solución de localización es demostrado. Sin embargo, antes de pasar al análisis de los resultados del experimento y el escenario que se levantó para la experimentación, es necesario entender el procedimiento de la aplicación de la localización para encontrar una posición de un nodo ciego.

6.1 Creando la Aplicación

La solución ha sido implementada a fin de que esta arrastre toda la información de la red y realice un cómputo centralizado usando MATLAB, ya que esto es suficiente para validar la solución diseñada. Ambos, el sistema de rango y el algoritmo de localización son después implementados en MATLAB usando la información obtenida desde la red.

Recordando que el sistema de estimación de rango constituye la aproximación y conversión de RSS a distancias, específicas de cada nodo sujetador; mientras que, el algoritmo de localización constituye la optimización por medio de cuadrados mínimos con función de valoración (WLS), para encontrar la posición de nodos ciegos basados en las estimaciones de la distancia obtenida del sistema de estimación de rango.

Aquí, cada vez que los nodos ciegos necesitan ser localizados, todos los nodos de la red difunden (broadcast) mensajes de referencia (beacons) basados en una programación de tiempo para evitar colisiones, y también para permitir diversidad de tiempo. Mensajes de referencia (beacons) son necesarios para realizar mediciones de RSS, las cuales contienen dos campos: *fuentes ID* y *número de paquetes*, necesarios para asistir el cómputo centralizado.

Cada nodo difunde (broadcast) el mismo número de mensajes de referencia (beacons), un mensaje de referencia (beacon) dentro de una estructura tiempo (time frame).

En cada estructura de tiempo (time frame) siguiente, el canal de radio es cambiado de acuerdo a la secuencia de los saltos de frecuencia (frequency hopping), para permitir diversidad de frecuencia y reducir el impacto de interferencia de radio.

Además, cada nodo representa un nodo dual (por ejemplo, dos módulos de radio y antenas) donde las dos antenas están apartadas por una longitud de onda, para permitir diversidad de espacio.

También, cada nodo mide la energía del canal libre de transmisión cada vez que este recibe un paquete (después de la recepción), para la estimación del ruido del medio en cada receptor.

Sistema de Estimación de Rango

El sistema de estimación de rango utiliza mediciones de RSS entre nodos sujetadores y sus correspondientes distancias conocidas para realizar aproximaciones de curvas RSS a distancias, específicas de cada nodo sujetador. Aquí, el método de cuadrados mínimos de la herramienta de aproximación de MATLAB es usada para la aproximación de curvas, el cual reduce el impacto de errores muy grandes.

Debe notarse que tanto las aproximaciones como la conversión de RSS a distancia son realizados durante la operación del sistema basados en mediciones obtenidas de las condiciones del canal actualizadas, el cual en efecto reduce el impacto de estimaciones de pérdida de señal pasadas y también elude estimaciones no prácticas fuera de operación.

Algoritmo de Localización

El algoritmo de cuadros mínimos con función de valoración es implementado usando la función de optimización del software de MATLAB `lsqnonlin()`. Aparte de las estimaciones de distancia obtenidas del sistema de estimación de rango, el algoritmo de

localización también utiliza información arrastrada de la red para computarizar los valores. El algoritmo de localización encuentra después la solución óptima que está más cercana a la posición real con una alta probabilidad.

6.2 Puesta en Marcha del Experimento

Como se mencionó anteriormente, el sensinode U100 micro.2420 es usado como el dispositivo ubicuo para la demostración empírica de la solución. Cada módulo de radio estuvo equipado con una antena monopolo externa montada una longitud de onda aparte del PCB, como se muestra en la figura 6.1, para reducir el impacto de los componentes eléctricos y la tierra de PCB en la omni-direccionalidad de las antenas.

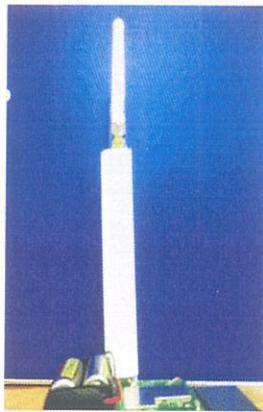


Figura 6.1: Antena monopolo externa

Para mayor facilidad de acceso y monitoreo, el escenario cerrado escogido es una clase de 14x7 metros cuadrados en el Departamento de Comunicaciones y Eléctrica de la Universidad de Tecnología de Helsinki, como se muestra en la Figura 6.2.

localización también utiliza información arrastrada de la red para computarizar los valores. El algoritmo de localización encuentra después la solución óptima que está más cercana a la posición real con una alta probabilidad.

6.2 Puesta en Marcha del Experimento

Como se mencionó anteriormente, el sensinode U100 micro.2420 es usado como el dispositivo ubicuo para la demostración empírica de la solución. Cada módulo de radio estuvo equipado con una antena monopolo externa montada una longitud de onda aparte del PCB, como se muestra en la figura 6.1, para reducir el impacto de los componentes eléctricos y la tierra de PCB en la omni-direccionalidad de las antenas.



Figura 6.1: Antena monopolo externa

Para mayor facilidad de acceso y monitoreo, el escenario cerrado escogido es una clase de 14x7 metros cuadrados en el Departamento de Comunicaciones y Eléctrica de la Universidad de Tecnología de Helsinki, como se muestra en la Figura 6.2.

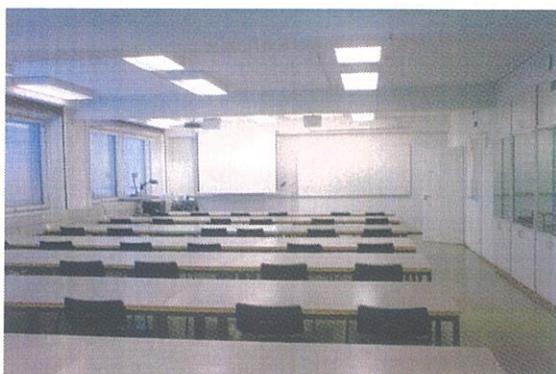


Figura 6.2: Escenario Empirico

Los nodos fueron desplegados a 1.5 m de referencia del suelo (el tope es a 3m). siete nodos sujetadores fueron utilizados. Los nodos sujetadores fueron desplegados como se muestra a continuación,

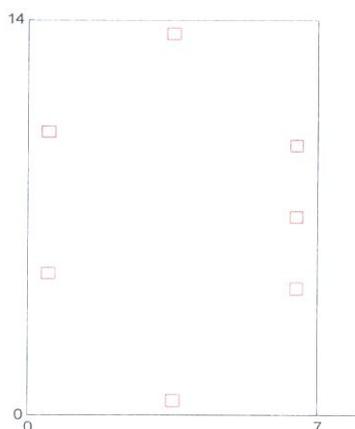


Figura 6.3: Despliegue de Nodos sujetadores

El presente experimento fue llevado a cabo en un ambiente típico con la presencia de muebles y gente moviéndose.

Configuración de Parámetros

Un aspecto importante del experimento son los parámetros de configuración como la potencia de salida, el intervalo de tiempo entre mensajes de referencia (beacons)

consecutivos, secuencia de los saltos de frecuencia y el número de mensajes de referencia (beacons) que cada nodo difunde (broadcast). Estos parámetros constituyen la entrada para la solución.

El modulo de radio CC2420 soporta un rango de configuraciones de potencia discreta desde -25 dBm hasta 0 dBm. En el presente experimento, la potencia de salida es configurada a -10 dBm, ya que las mediciones son opacadas por el ruido del medio cuando la potencia de salida es muy baja, por ejemplo, -25 dBm, o cuando muchas reflexiones de la señal son generadas cuando la potencia de salida es muy alta, por ejemplo, 0 dBm. Debe notarse que, en ambientes dinámicos cerrados, el rango de radio es comúnmente reducido debido al efecto multicamino y al apantallamiento. En la presente puesta en marcha del experimento, establecer la potencia de salida a -10 dBm mostró que alcanzaba un rango de radio de alrededor de 15 m (puede ser más, sin embargo, se asume que sea 15 m).

Cuando se configura el tiempo de intervalo entre mensajes de referencia (beacons) consecutivos, es importante considerar el tiempo de coherencia del canal para permitir la diversidad de tiempo. Cada mensaje de referencia (beacon) después es transmitido cada tiempo de coherencia del canal. En una clase típica, donde la velocidad de tiempo máximo es de alrededor de 1 m/s, el tiempo de coherencia del canal esta debajo de 100 ms. En consecuencia, el presente experimento usa 100 ms como el intervalo de tiempo entre mensajes de referencia (beacons) consecutivos.

De manera óptima, la secuencia del saltos de frecuencia debería considerar canales con bajo tráfico para evitar la interferencia de radio, pero también debería considerar una separación significativa entre canales para ganar más en términos de diversidad de frecuencia. Para censar la actividad del canal se requiere estimaciones fuera de operación, en consecuencia, esto no se implementa aquí (sin embargo es un proceso simple). El presente experimento considera entonces cuatro saltos (hops) con la separación máxima permitida (2405, 2030, 2055, 2080) MHz.

Finalmente, el presente experimento establece el número de mensajes de referencia

en 20 (beacons), el cual provee un número significativo de muestras para estimaciones de distancia. Usar un número mayor de mensajes de referencia (beacons) puede resultar en un tiempo de convergencia inaceptable de la solución.

6.3 Análisis de Resultados

Una vez que el algoritmo de localización mostró reducir el impacto de los errores de rango en la estimación de posición en el capítulo 4, el presente experimento se concentra en demostrar el desempeño de los dos aspectos principales y novedosos del sistema de estimación de rango basados en principios de propagación tales como técnicas de diversidad (para contrarrestar el efecto multicamino) y estimación del término de apantallamiento (a través de aproximaciones de curvas RSS a distancias específicas de cada nodo sujetador). Al final de la sección, una visión acerca de la estimación de posición es proporcionada.

6.3.1 *Contrarrestando el efecto multicamino*

La primera parte del experimento compara la precisión de la estimación de la distancia cuando todas las técnicas de diversidad propuestas son utilizadas (por ejemplo, diversidad en el tiempo, frecuencia y espacio) y solo cuando la diversidad en el tiempo es utilizada, correspondiente a las figuras 6.4 y 6.5 respectivamente. Aquí, las estimaciones del término apantallamiento son omitidas, en tanto que solo las técnicas de diversidad son analizadas.

Claramente, la Figura 6.4 muestra una mejor aproximación de la curva (esto es, que tan bien el valor esperado de las mediciones calza con la curva de aproximación) que la Figura 6.5. En efecto, el error estándar (por ejemplo, la raíz del error cuadrático medio) de la aproximación en la Figura 6.4 es la mitad del error estándar de la aproximación en la Figura 6.5, en promedio. Consecuentemente, cuando las técnicas diversas son utilizadas, los errores de estimación de distancia son reducidos en efecto, puesto que las aproximaciones y conversiones están basados en la información correspondiente a las

condiciones actuales del canal (por ejemplo, en la misma ronda de mediciones).

La ganancia obtenida en la precisión de estimación de distancia no está claramente determinado, ya que los errores de estimación de distancia no son necesariamente reducidos a la mitad como sucede con el error estándar en la aproximación de la curva. En lugar de ello, el beneficio real es más probable que sea proporcional a la distancia estimada.

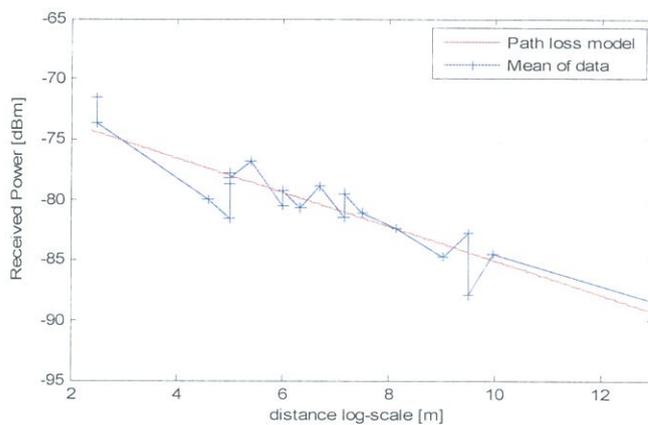


Figura 6.4: Aproximación de la curva RSS a distancia cuando las técnicas de diversidad propuestas son utilizadas

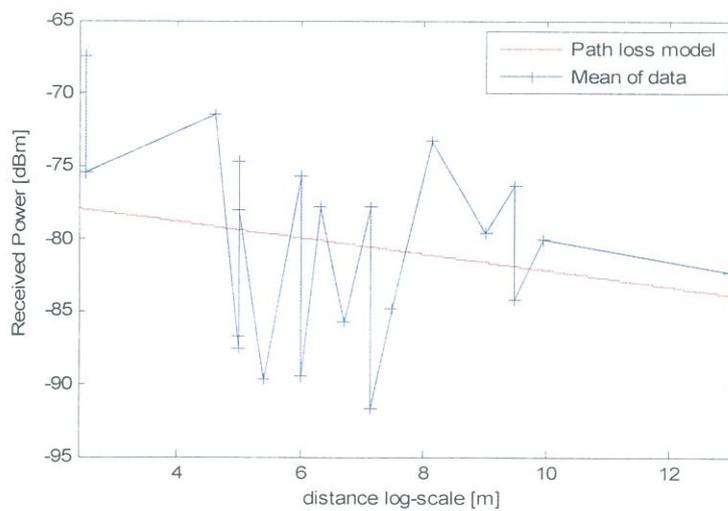


Figura 6.5: Aproximación de la curva RSS a distancia cuando solamente diversidad de tiempo es utilizada

6.3.2 *Contrarrestando el apantallamiento*

La segunda parte del experimento, correspondiente a la figura 6.6, que compara la precisión de la estimación de la distancia cuando las estimaciones del término de apantallamiento son utilizadas (por ejemplo, cuando las curvas de RSS a distancias, específicas de cada nodo sujetador son utilizadas). Aquí, técnicas de diversidad son usadas, ya que estas no interfieren con la presente demostración de estimaciones del término de apantallamiento.

La Figura 6.6 muestra el error estándar obtenido de una sola aproximación de curva (por ejemplo, cuando las estimaciones del término de apantallamiento no son utilizadas) junto con los errores estándar de aproximaciones de curvas RSS a distancias, específicas de cada nodo sujetador (por ejemplo, cuando estimaciones del término apantallamiento son utilizadas). Claramente, los errores estándar de aproximaciones de curvas RSS a distancias específicas de cada nodo sujetador son reducidos en un 25% (en promedio) respecto a los errores estándar de la curva única de RSS a distancia (barra en color rojo). Consecuentemente, cuando las estimaciones del término de apantallamiento son usadas, los errores de las estimaciones de distancia son reducidos, debido a que las aproximaciones y conversiones están basadas en información de las condiciones del canal actualizadas (por ejemplo, de la misma ronda de mediciones).

De manera similar en el caso de las técnicas de diversidad, la ganancia alcanzada en la precisión de la estimación de distancia no está claramente determinada, ya que, los errores de estimación de distancia no son necesariamente reducidos en la misma proporción que el error estándar de aproximaciones de curvas RSS a distancias específicas de cada nodo sujetador es reducido.

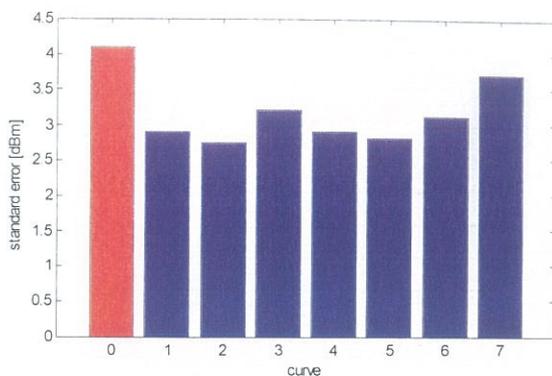


Figura 6.6: Error estándar de la aproximación de las curvas

6.3.3 Estimación de la Posición

Una vez que el sistema de estimación de rango propuesto ha sido validado, la meta final es obtener una visión del desempeño de la solución global, esto es, la precisión de estimación de la posición. Aquí, el desempeño actual de la solución puede variar de acuerdo al número de nodos sujetadores utilizados, el tamaño del espacio de despliegue (rango de radio) y el escenario (por ejemplo, oficina, fábrica, etc)

En el escenario empírico considerado, un nodo ciego fue colocado en diferentes lugares para encontrar su posición. La Figura 6.7 muestra la tendencia de las estadísticas, donde se observó que el error de localización promedio (esto es, la distancia entre la distancia real y la distancia estimada) fue de alrededor de 2.1 m.

No obstante, el sistema de estimación de rango basado en principios de propagación puede llevar en resultados impredecibles como se muestra en la Figura 6.7, donde los errores de localización van hasta alrededor de la mitad del alcance de radio pueden ser observados.

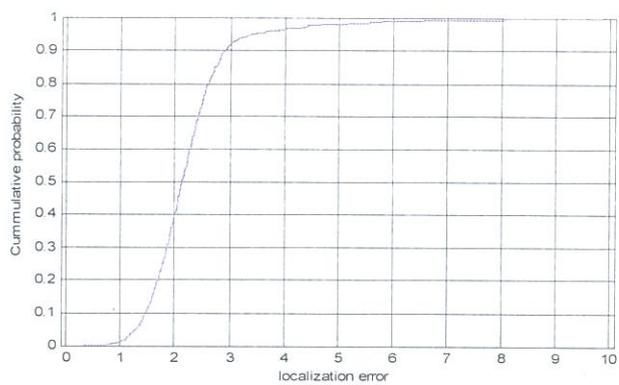


Figura 6.7: Estadísticas de la estimación de la posición

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

Tomando en cuenta la demanda creciente de varias aplicaciones conscientes de la ubicación, tolerantes a errores en la información de ubicación, la presente investigación mejora el desempeño de soluciones de localización simples y de bajo costo, basados en principios de propagación, para sensores IEEE 802.15.4 operando en la banda 2.4 GHz en sistemas cerrados.

La presente solución implementa métodos novedosos y prácticos para contrarrestar las dos principales fuentes de error del método basado en intensidad de señal, tales como el efecto multicamino y el apantallamiento. La solución elude calibraciones/estimaciones poco prácticas fuera de operación, esto es, cualquier esfuerzo que requiera planeación previa.

Aquí, las técnicas de diversidad son utilizadas para contrarrestar el efecto multicamino, las que demostraron reducir a la mitad el error estándar (en promedio) de aproximación de la curva de RSS a distancia, que a su vez, reducen los errores de estimación de distancia, dado que, las aproximaciones y conversiones están basados en información perteneciente a las condiciones actuales del canal. También, estimaciones del término de apantallamiento a través de aproximaciones de curvas RSS a distancias, específicas de cada nodo sujetador, son utilizadas para contrarrestar el problema de apantallamiento, el cual demostró reducir el error estándar de la aproximación de la curva RSS a distancia en alrededor de 25% (en promedio), el cual a su vez reduce los errores de estimación de distancia también. La ganancia alcanzada en la precisión de estimación de distancia no está claramente determinada, sin embargo, es más probable que sea proporcional a la distancia estimada.

Finalmente, la solución implementa un algoritmo de optimización sin condicionamientos (el algoritmo de cuadrados mínimos con función de valoración WLS)

para encontrar la posición de nodos ciegos. El algoritmo demostró reducir el impacto de los errores de estimación de distancia en la estimación de la posición, donde la ganancia alcanzada en la estimación de la posición aumenta a medida que el número de observaciones (señales de referencia) aumenta hasta el infinito. Entonces, con el presente sistema de estimación de rango, la precisión de localización se encontró alrededor de 2.1 m (en promedio), cuando siete nodos sujetadores fueron utilizados en una clase de 14x7 metros cuadrados con la presencia de muebles y gente.

Sin embargo, en situaciones hostiles, las soluciones de localización basadas en principios de propagación pueden llevar a errores impredecibles, además que están limitadas a la región donde la potencia radiada es uniforme.

REFERENCIAS

- [1] N. Priyantha, A. Chakraborty y H. Balakrishnan, *The Cricket Location-Support System*, Proceedings of International Conference on Mobile Computing and Networking, pag. 32-43, Agosto 6-11, 2000, Boston, MA, Disponible en: <http://nms.lcs.mit.edu/papers/cricket.html>
- [2] A. Savvides, C. Han, y M. B. Strivastava, *Dynamic Fine-Grained Localization in Ad-Hoc Networks of Sensors*, Proc. MobiCom, Roma, Italia, 2001, pag. 166–79, Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.20.5448>
- [3] C. Wang y L. Xiao, *Sensor localization under limited measurement capabilities*, IEEE Network, vol. 21, no. 3, pag. 16–23, Mayo-Junio 2007, Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4211213
- [4] D. Lymberopoulos, Q. Lindsey, A. Savvides, *An empirical characterization of radio signal strength variability in 3-d ieee 802.15.4 networks using monopole antennas*, (eds.) EWSN 2006. LNCS, vol. 3868, pag. 326–341, Springer, Heidelberg (2006), Disponible en: <http://www.springerlink.com/content/168764512w3258r2/fulltext.pdf>
- [5] D. Moore et al., *Robust Distributed Network Localization with Noisy Range Measurements*, Proc. SenSys, Baltimore, MD, 2004, pag. 50–61, Disponible en: <http://rvsn.csail.mit.edu/netloc/sensys04.pdf>
- [6] J. Albowicz, A. Chen, y L. Zhang, *Recursive Position Estimation in Sensor Networks*, Proc. ICNP, Riverside, CA, 2001, pag. 35–41, Disponible en: <http://irl.cs.ucla.edu/papers/grab-icnp01.pdf>
- [7] Y. Shang et al., *Localization from Mere Connectivity*, Proc. MobiHoc, Annapolis, MD, 2003, pag. 201–12, Disponible en: <http://www.sigmobile.org/mobihoc/2003/papers/p201-shang.pdf>
- [8] G. Destino, y G.T.F. de Abreu, *Sensor Localization from WLS Optimization with Closed-form Gradient and Hessian*, Center for Wireless Commun., Univ. of Oulu, Oulu, 2006-Dic, Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4151125
- [9] P. Biswas y Y. Ye, *Semidefinite Programming for Ad-Hoc Wireless Localization*, Proceedings of Information Processing in Sensor Networks, pag. 46 - 53, USA, Disponible en: <http://www.stanford.edu/~yyye/adhocn4.pdf>
- [10] Ubisense, Disponible en: <http://www.ubisense.net>
- [11] M. Tuchler, V. Schwarz, y A. Huber, *Location accuracy of an UWB localization*

- system in a multi-path environment*, Proc. of IEEE International Conference on Ultra-Wideband (ICUWB), Septiembre 2005, Disponible en: http://www.fhnw.ch/technik/ime/publikationen/2005/pub_fullpaper.pdf
- [12] T. He et al., *Range-Free Localization Schemes in Large Scale Sensor Networks*, Proc. MobiCom, San Diego, CA, 2003, pag. 81–95, Disponible en: http://www.cs.virginia.edu/~th7c/paper/APIT_CS-2003-06.pdf
- [13] C. Liu, K. Wu, y T. He, *Sensor localization with ring overlapping based on comparison of received signal strength indicator*, IEEE Trans. on Mobile Computing, 2004, Disponible en: <http://www-users.cs.umn.edu/~tianhe/Papers/LocalizationMASS.pdf>
- [14] X. Nguyen, M. I. Jordan, y B. Sinopoli, *A Kernel-Based Learning Approach to Ad Hoc Sensor Network Localization*, ACM Trans. Sensor Networks, vol. 1, no. 1, 2005, pag. 134–52, Disponible en: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1077391.1077397>
- [15] P. Bahl, V. Padmanabhan, *RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System*, Proceedings of INFOCOM 2000 Tel Aviv, Israel, Marzo 2000, pag. 775-84, vol. 2, Disponible en: <http://research.microsoft.com/en-us/groups/sn-res/infocom2000.pdf>
- [16] D. Niculescu y B. Nath, *DV Based Positioning in Ad hoc Networks*, In *Journal of Telecommunication Systems*, 2003, Disponible en: <http://eprints.kfupm.edu.sa/35964/1/35964.pdf>
- [17] R. Nagpal, *Organizing a Global Coordinate System from Local Information on an Amorphous Computer*, A.I. Memo 1666, MIT A.I. Laboratory, Agosto 1999, Disponible en: <http://groups.csail.mit.edu/mac/projects/amorphous/papers/ipsn-2003-v5.pdf>
- [18] Gabriele Di Stefano, Alberto Petricola, *A Distributed AOA Based Localization Algorithm for Wireless Sensor Networks*, Department of Electrical and Information Engineering, University of L'Aquila, Italia, Disponible en: <http://www.academypublisher.com/jcp/vol03/no04/jcp03040108.pdf>
- [19] Guoqiang Mao, Baris Fidan, Brian D.O. Anderson, *Wireless sensor network localization techniques*, *Computer Networks*, Volumen 51, Parte 10, 11 Julio 2007, pag. 2529-2553, Disponible en: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1243139>
- [20] M. Maroti et al., *Radio Interferometric Geolocation*, Proc. SenSys, San Diego, CA, 2005, pag. 1–12, Disponible en: <http://www.stanford.edu/~kusy/pubs/rips.pdf>
- [21] Ákos Lédeczi, János Sallai, Péter Völgyesi, y Ryan Thibodeaux, *Differential Bearing Estimation for RF Tags*, EURASIP Journal on Embedded Systems, Volumen 2009, Disponible en: <http://www.hindawi.com/journals/es/2009/682183.html>

- [22] B. Kusy, J. Sallai, G. Balogh, A. Ledeczi, V. Protopopescu, J. Tolliver, F. DeNap, y M. Parang, *Radio interferometric tracking of mobile wireless nodes*, Proc. of 5th International Conference on Mobile systems, applications and services (MobiSys), Junio 2007, Disponible en: <http://graphics.stanford.edu/projects/lgl/papers/ksblptnp-ritmwt-07/ksblptnp-ritmwt-07.pdf>
- [23] B. Kusy, A. Ledeczi, y X. Koutsoukos, *Tracking mobile nodes using RF Doppler shifts*, in Proc. of 5th ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), Noviembre 2007, Disponible en: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1322267>
- [24] Giovanni Zanca, Francesco Zorzi, Andrea Zanella y Michele Zorzi, *Experimental comparison of RSSI-based localization algorithms for indoor wireless sensor networks*, REALWSN'08, Abril 1, 2008, Glasgow, Reino Unido, Disponible en: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1435473.1435475>
- [25] Stefano Tennina et al., *Locating ZigBee Nodes Using the TI's CC2431 Location Engine: A Testbed Platform and New Solutions for Positioning Estimation of WSNs in Dynamic Indoor Environments*, MELT'08, San Francisco, California, USA, Septiembre 19, 2008, Disponible en: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1410022>
- [26] M. Cao, B.D.O Anderson, A.S. Morse, *Localization with imprecise distance information in sensor networks*, Proceedings of the Joint IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, 2005, pag. 2829–2834, Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1582592
- [27] S. S. Schiffman, M. L. Reynolds, y F. W. Young, *Introduction to Multidimensional Scaling*, Academic Press, 1981.
- [28] Savvides, A., Garber, W., Adlakha, S., Moses, R., y Srivastava, M. B. *On the error characteristics of multihop node localization in ad-hoc sensor networks*. Proc. IPSN (Palo Alto, CA, Abril 2003), pag. 317-332, Disponible en: <http://rvsn.csail.mit.edu/netloc/sensys04.pdf>
- [29] E. Elnahrawy, X. Li, y R. P.Martin, *The limits of localization using signal strength: a comparative study*, Proceeding of Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, IEEE SECON, Octubre 2004, pag. 406–414, Disponible en: <http://paul.rutgers.edu/~eiman/elnahrawy04limits.pdf>
- [30] C. Savarese, K. Langendoen, y J. Rabaey, *Robust Positioning Algorithms for Distributed Ad-Hoc Wireless Sensor Networks*, Proc. USENIX Annual Technical Conf., Monterey, CA, 2002, pag. 317–328, Disponible en: <http://www.comp.nus.edu.sg/~bleong/geographic/related/savarese02robust.pdf>

- [31] H. Lim y J. C. Hou, *Localization for Anisotropic Sensor Networks*, Proc. INFOCOM, Miami, FL, 2005, Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1497886
- [32] Seng-Yong Lau et al., *A measurement study of zigbee-based indoor localization systems under RF interference*, Proc. of the 4th ACM international workshop on Experimental evaluation and characterization, Beijing, China, 2009, pag. 35-42, Disponible en: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1614300>
- [33] Sungwon Yang y Hojung Cha, *An Empirical Study of Antenna Characteristics Toward RF-based Localization for IEEE 802.15.4 Sensor Nodes*, Department of Computer Science, Yonsei University, Seodaemun-gu, Sinchon-dong 134, Seul 120-749, Korea, Disponible en: http://www.eng.yale.edu/enalab/publications/rssi_paper.pdf
- [34] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2005.
- [35] *System-on-chip for 2.4 GHz zigbee/IEEE 802.15.4 with location engine*, Datasheet, Texas Instruments, Julio 2007, Disponible en: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc2431.pdf>
- [36] N. Patwari et al., *Relative Location Estimation in Wireless Sensor Networks*, IEEE Trans. Signal Proc., 2003, vol. 51, no. 8, pag. 2137–48.
- [37] *Micro Hardware Manual*, Sensinodes.
- [38] Disponible en: <http://www.freertos.org/>
- [39] TinyOS community forum, Disponible en: <http://www.tinyos.net/>
- [40] *Chipcon CC2420*, Datasheet, Chipcon AS, 2004, Disponible en: http://www.chipcon.com/files/CC2420_Data_Sheet_1_2.pdf
- [41] Disponible en: <http://www.sensinode.com/>
- [42] Youssef Chraibi, *Localization in Wireless Sensor Networks*, KTH Signals Sensors and Systems, Master's Degree Project, Estocolmo, Suecia 2005.
- [43] Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., *IEEE Std. 802.15.4-2003*, New York: IEEE Press, 2003
- [44] C. Wang y L. Xiao, *Locating Sensors in Concave Areas*, Proc. INFOCOM, Barcelona, Cataluña, España, 2006, Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4146877

- [45] D.Gay, P.Levis, D.Culler y E.Brewer, *nesC 1.1 Language Reference Manual*, Mayo 2003.
- [46] Destino, G. y G.T.F. de Abreu, *Localization from Imperfect and Incomplete Ranging*, Center for Wireless Commun., Univ. of Oulu, Oulu, Sept. 2006, Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4022276
- [47] David I. Chu *et al.*, *On Least Squares Euclidean Distance Matrix Approximation and Completion*, Disponible en: <http://www4.ncsu.edu/~mtchu/Research/Papers/distance03.pdf>
- [48] Yi Shang, Jing Meng, y Hongchi Shi, *A New Algorithm for Relative Localization in Wireless Sensor Networks*, Department of Computer Science, University of Missouri-Columbia, Columbia, MO 65211, Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1302933