

Parte III

POSICIONAMIENTO Y SEGUIMIENTO EN REDES INALÁMBRICAS

Se plantean soluciones de posicionamiento utilizando en forma oportunista la información de los protocolos de comunicación sobre redes inalámbricas como Bluetooth, Wi-Fi, LTE, etc.

Como hemos visto, conocer la ubicación es una capacidad muy importante para los teléfonos inteligentes. Estos dispositivos incluyen capacidad de comunicación, acceso a la red y sensores integrados y la información de ubicación se utiliza para proporcionar servicios basados en la ubicación (*LBS: Location Based Services* en inglés). En muchos casos se puede usar la localización basada en GNSS pero no en entornos interiores o de transición con el exterior. Hay estrategias desarrolladas que utilizan frecuencias de radio para la localización absoluta del usuario en función del despliegue de hardware especial en el entorno interior. Pero una alternativa es el uso de señales ya disponibles, las llamadas señales de oportunidad. Wi-Fi es una de las señales de oportunidad más utilizadas para el posicionamiento y el seguimiento de usuarios móviles debido a la disponibilidad de infraestructura ya implementada para comunicaciones y la capacidad de los dispositivos móviles para procesar estas señales. Hoy en día, se puede detectar una gran cantidad de puntos de acceso (AP) de redes públicas y privadas que brindan una alta ubicuidad de la señal.

Al investigar los sistemas de última generación y ya estandarizados, por ejemplo, GSM o LTE, se vuelve obvio que la información de posición no es a priori parte de los sistemas, sino que se ha visto más como un complemento de estas comunicaciones. Estos sistemas han sido diseñados únicamente con fines de comunicación. Sin embargo, alentados por los requisitos de reguladores (como la FCC de EEUU) y la demanda de información de ubicación sin GPS en los móviles, los sistemas se ampliaron para permitir también el posicionamiento independiente. Por esto, las organizaciones de estándares de telecomunicaciones trabajaron para incluir tecnologías de ubicación en sus estándares, por ejemplo, para GSM, UMTS, LTE, cdmaOne, CDMA2000, Wideband CDMA (W-CDMA) o WiMAX.

En esta parte veremos distintas formas de utilizar de forma oportunista para la localización, información disponible en redes de comunicaciones existentes y desarrolladas con el objetivo de transferir datos o comunicar equipos. Por ejemplo las redes celulares, Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, UltraWideband, RFID, NFC, entre otras.

3.1 REDES CELULARES [5]

Las redes celulares son la plataforma principal para los servicios inalámbricos basados en la ubicación (LBS). Esto es natural considerando la amplia distribución de teléfonos celulares y la cobertura de las

redes entre una gran parte de la población mundial. Las demandas de precisión de posición y los métodos utilizados para el posicionamiento dependen en gran medida de la naturaleza de estos servicios. La razón principal para agregar la capacidad de ubicación a la comunicación celular fue la seguridad física para los titulares de teléfonos móviles, al menos en los Estados Unidos, donde los proveedores de telefonía celular están obligados por las regulaciones de telecomunicaciones a brindar posicionamiento como un servicio sin suscripción. Una vez que la infraestructura y/o los modelos de terminales estuvieron disponibles para brindar ubicación, era natural que la gama de servicios basados en la ubicación comenzara a florecer. En Europa y otras regiones del mundo son estos servicios comerciales los que están generando la inclusión de la capacidad de localización en las redes celulares. Algunos de los servicios basados en la ubicación más comunes, además de la seguridad personal, son las instrucciones de navegación, la identificación de comercios cercanos, el rastreo de personas, animales y cosas, la facturación sensible a la ubicación, etc.

La localización no solo puede ser utilizada en los teléfonos sino también en para objetos o equipos a través de modems. Estos no solo pueden comunicar información sino también ubicarse con algunas de las estrategias de localización usando información de redes celulares que analizaremos a continuación.

3.1.1 *Identificación de la Celda (Cell-ID)*

La tecnología de posicionamiento más básica disponible para sistemas celulares es utilizando la identificación de las celdas (Cell-ID). Puede estar basado en un teléfono ¹ o basado en la red. Para llevar a cabo la comunicación, un teléfono está asociado con una base individual ubicado en una celda de red celular. Por supuesto, la estación base conoce la identidad y la ubicación de la celda. La identidad de la celda también la conoce el teléfono, que puede obtener la posición de la celda de la red. Este método de ubicación se conoce como proximidad. Su precisión básica depende únicamente de las dimensiones de la celda, pero se puede mejorar con el apoyo de otros métodos de ubicación. Se logra una reducción del área de ubicación y por lo tanto una mayor resolución en celdas que están divididas en tres o seis sectores por antenas direccionales de estación base. Esto se muestra en la figura 3.1.a donde EM es la estación móvil que se desea ubicar. Con antenas con un ancho de haz de 120° , el área de la celda y, por lo tanto, la inexactitud de la tecnología de identificación de la celda se reduce en aproximadamente un tercio. La precisión de la ubicación se puede mejorar utilizando la intensidad de la señal recibida (fig. 3.1.b). La intensidad de la señal varía considerablemente, debido al desva-

¹ o modem, a continuación nos referiremos a teléfonos pero en general queremos referirnos a un dispositivo que transmite información usando las redes celulares

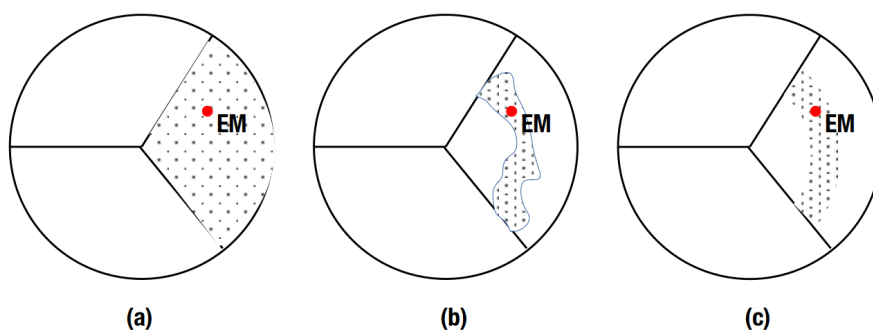


Figura 3.1: Método de identificación por celda y sus mejoras. De izquierda a derecha, por sectorizado de celda, utilizando RSS y con uso de temporizado

necimiento, la topografía, los patrones de antena, la potencia radiada y la frecuencia de funcionamiento.

Otra forma de limitar la incertidumbre de ubicación en la tecnología de ID de celda es usar el avance de tiempo que calcula la estación base en los sistemas GSM. El avance de tiempo es la corrección que la red hace a la temporización de la estación móvil para tener en cuenta el retraso de propagación de modo que los intervalos asignados a las EM no se superpongan (el método de acceso al medio de GSM es TDMA). La resolución del avance de tiempo en GSM es de $3,69\mu\text{s}$, equivalente a una distancia de 554m en un solo sentido. La Figura 3.1.c muestra cómo se reduce la incertidumbre de posición cuando el avance de tiempo se combina con la ID de celda para estimar la ubicación.

3.1.2 Localización usando TDOA

Se han desarrollado varias tecnologías de ubicación que se basan en el método TDOA de medición de distancia. Sus detalles dependen de si están basados en un teléfono o en una red, y cómo se aplican a un protocolo de red específico. En todos los casos dependen de la estimación del tiempo de llegada de la señal celular. Este se encuentra buscando la correlación cruzada máxima de una señal recibida con una réplica retrasada de la señal transmitida que es conocida. Dentro de las tramas de transmisión de señales celulares se encuentran secuencias de sincronización o entrenamiento que son conocidas por el receptor y que tienen baja autocorrelación cuando la señal y su réplica no están alineadas bit a bit.

Los relojes del teléfono y la estación base usualmente no están sincronizados, por lo que solo se pueden estimar los retrasos de tiempo relativos de las diferentes estaciones. En un sistema basado en un teléfono, este estima los retardos de tiempo relativos de las secuencias de entrada de tres o más estaciones base, en comparación con el tiem-

po de la secuencia conocida que se basa en el reloj del teléfono. A menudo no hay sincronización entre los relojes de diferentes estaciones base. Para estimar su propia posición mediante el método TDOA de hipérbolas (en dos dimensiones) el terminal debe recibir de una fuente externa los tiempos de transmisión de las secuencias de cada una de las estaciones base según un reloj común, o las diferencias entre ellas, y también las posiciones geográficas de esas estaciones base. Como alternativa, el teléfono puede enviar sus diferencias de tiempo observadas a un terminal fijo especial que tiene la información de posición de la estación base y el tiempo y puede usar esas diferencias de tiempo observadas para calcular la posición del teléfono.

En GSM se utiliza un método denominado *Enhanced Observed Time Differences*. En este caso, el móvil mide las diferencias de tiempo y las comunica a la *Mobile Location Center* que con la información de las estaciones base, calcula la posición del móvil. En UMTS el método implementado es el del *Observed Time Difference of Arrival*, similar al sistema GSM donde la posición es obtenida por una *Radio Network Controller* que sirve al móvil.

3.1.3 Localización usando Ángulo de Arribo

El método del ángulo de arribo es práctico para su consideración solo en aplicaciones basadas en red, ya que requiere conjuntos de antenas direccionales para su funcionamiento. Incluso entonces, no se puede esperar una adopción a gran escala debido al costo de reemplazar o superponer antenas de estaciones base celulares de segunda y tercera generación instaladas. Sin embargo, la tecnología es particularmente atractiva en circunstancias y entornos particulares. Mientras que para los arreglos TDOA se necesitan tres y preferentemente más estaciones base, para AOA sólo se necesitan dos estaciones base con antenas direccionales. Las regiones rurales, donde las celdas son grandes y, a menudo, no más de dos estaciones base pueden escuchar un terminal móvil, AOA puede ser una solución útil. Además, las rutas de línea de vista desde el móvil a las estaciones base son imprescindibles para este método, y las áreas urbanas pueden ser muy inadecuadas para AOA. AOA podría combinarse con un método de medición de distancia, como TOA, para brindar una solución de posicionamiento unilateral. Se espera que el despliegue de antenas inteligentes en redes celulares de generaciones más modernas aumente el interés en AOA para el posicionamiento celular.

3.1.4 Patrones de Potencia de señal recibida

Los datos de intensidad de la señal recibida, utilizados por sí solos, no son útiles para el posicionamiento celular para la mayoría de las aplicaciones. Sin embargo, cuando se puede armar una base de datos

para una región definida, como se describe en 1.11, se puede obtener una precisión satisfactoria. El sistema puede estar basado en un teléfono o en una red. En el primer caso, las lecturas de RSS obtenidas de varias estaciones base se envían desde el móvil a un servidor de ubicación para la búsqueda y comparación de bases de datos. Particularmente en el caso de un sistema basado en red, la base de datos puede contener, además de la intensidad de la señal recibida, información relacionada con otros parámetros de señal y canal, por ejemplo, respuesta de impulso de canal en una ubicación particular. La tarea principal en un sistema de reconocimiento de patrones es compilar y mantener la base de datos. La compilación se realiza mediante mediciones directas en ubicaciones en toda el área de cobertura, mediante cálculos basados en topografía conocida, o ambos. El método tiene el potencial de brindar una precisión utilizable en lugares donde otros métodos de posicionamiento dan resultados deficientes, donde no hay una ruta de línea de vista, por ejemplo, común en ubicaciones urbanas e interiores.

3.1.5 Posicionamiento en LTE

Originalmente, LTE especificó el soporte para tres métodos de posicionamiento: identificación de celda mejorada (o E-CID y mostrado en la figura 3.1.c), OTDOA y GNSS asistido. El cuarto método, basado en TDOA pero resuelto desde la red y no desde el móvil, se incluyó en versiones posteriores. Los cuatro métodos fueron ya descritos a lo largo del curso.

El posicionamiento del móvil involucra dos pasos: (1) medición de la señal y (2) estimación de la posición (y, opcionalmente, la velocidad) a través de cálculos basados en las mediciones. Las señales se miden en el móvil o la estación base. Los cálculos se realizan en el móvil o en la red (en el *Serving mobile location center*). Usamos los términos **basado en teléfono** y **basado en red** en cada uno de estos casos y para clasificar los sistemas de posicionamiento usados en redes celulares. La palabra *basado* significa que el nodo es responsable de realizar el cálculo de posicionamiento y puede (pero no necesariamente) también realizar las mediciones. Un nodo asistido proporciona las medidas pero no realiza los cálculos.

Hay dos formas en que el cliente puede comunicarse con el servidor de ubicación. Una es usando la conexión de datos estándar que se conecta a la plataforma de ubicación con un protocolo de posicionamiento de propósito general desarrollado por Open Mobile Alliance (OMA). La segunda es en los canales de control de la red. Ambas son entidades lógicas y pueden estar ubicadas en el mismo servidor físico y se considera más confiable y robusta en una situación de emergencia, particularmente cuando hay congestión en los canales de la red.

3.2 REDES INALÁMBRICAS DE CORTO ALCANCE Y RFID

Las redes inalámbricas que se analizan en esta sección tienen varias características notables que son significativas desde el punto de vista del posicionamiento inalámbrico. Todos funcionan con baja potencia en distancias relativamente cortas, generalmente hasta 100 m. En consecuencia, para los métodos de tiempo de llegada, el tiempo de vuelo es corto y para obtener precisiones útiles, la resolución de tiempo no debe ser superior a 10 ns, equivalente a un rango de 3 m. Además, todas las redes se utilizan básicamente en interiores, lo que somete las señales inalámbricas a condiciones severas de rutas múltiples y sin visibilidad directa. Estos sistemas operan en las bandas sin licencia y, por lo tanto, son susceptibles a la interferencia de una amplia gama de tipos de señales. Los terminales móviles son pequeños y deben tener un consumo de corriente muy bajo para alargar la vida de la batería. También están usualmente diseñados con bajo costo. Las tecnologías para incorporar servicios de localización en estas redes deben tener en cuenta todas las características mencionadas anteriormente.

3.2.1 WLAN/Wi-Fi

Probablemente la mayoría de los sistemas de localización que utilizan Wi-Fi se basan en la proximidad. Existen empresas llamadas agregadores de ubicación que compilan bases de datos escaneando las señales de Wi-Fi existentes en la vía pública, anotando las MAC y/o el SSID de los Access Points (AP) y asociándolos a una ubicación estimada obtenida en un vehículo con una antena y un GNSS. Debido a que las direcciones MAC transmitidas no están encriptadas, las ubicaciones de los puntos de acceso comerciales y privados pueden estar disponibles para los servicios de ubicación, generalmente sin el conocimiento y permiso de la fuente. Los suscriptores del servicio prestado por estas empresas utilizan cualquier dispositivo móvil equipado con Wi-Fi y pueden obtener una indicación de su ubicación, dentro del rango de cobertura de Wi-Fi de varias decenas de AP, simplemente usando la RSS y el ID y luego consultando la base de datos, que puede ser de alcance internacional. La amplia distribución de puntos de acceso Wi-Fi, particularmente en áreas urbanas, hace que estos servicios sean útiles con precisiones de hasta alrededor de 10 m.

Un método común de posicionamiento de WLAN es por lo tanto el de Fingerprinting basada en RSS, discutido en la sección 1.11. Sin embargo, para evitar la necesidad de prepararse con anticipación, actualizar las bases de datos y mejorar la precisión, existen propuestas basadas en TOA o TDOA. Las tecnologías utilizadas se dividen además por aquellas que utilizan dispositivos comerciales estándar sin modificación de hardware pero con software o firmware especial,

y aquellas que recurren a modificaciones de hardware o hardware especialmente diseñado para la función de posicionamiento.

3.2.1.1 TOA

La medición de distancia por tiempo de vuelo unidireccional requiere que el receptor que mide y estima el tiempo de llegada de la señal de un transmisor distante, conozca el tiempo de transmisión de esa señal en términos de su propio reloj. Para ello, los relojes del receptor y del transmisor deben estar sincronizados con el grado de precisión requerido de la medición de la distancia. El estándar Wi-Fi IEEE 802.11 especifica la sincronización del reloj mediante un temporizador de función de sincronización de tiempo (TSF) que cuenta en incrementos de microsegundos. El mecanismo descrito en el estándar está diseñado para mantener la sincronización de todos los temporizadores TSF en una red dentro de $4\mu\text{s}$, más el retardo de propagación. La precisión del temporizador, $1\mu\text{s}$, equivale a una distancia de 300 m, que es demasiado grande para el uso directo en la red, donde los terminales normalmente están separados por solo decenas de metros. Sin embargo, cuando se emplea TOA bidireccional (RTT: *Round Trip Time*), la sincronización del temporizador de transmisión y recepción no es necesaria. En este caso, el iniciador/interrogador transmite un mensaje a un segundo terminal, que responde con un mensaje de retorno.

Lo que hace que la medición de distancia TOA bidireccional sea una posibilidad en redes Wi-Fi es que una respuesta de mensaje después de un intervalo de tiempo fijo desde la recepción del mensaje puede generarse automáticamente en el hardware del terminal como parte del protocolo de acceso. El método de acceso del estándar IEEE 802.11 se conoce como acceso múltiple con detección de portadora y evitado de colisiones (CSMA/CA). Una estación que tiene un mensaje para transmitir y desea obtener acceso al canal debe asegurarse de que el canal esté libre antes de transmitir. Lo hace monitoreando el canal y solo si está despejado por un período de tiempo requerido puede intentar acceder. La probabilidad de colisiones entre transmisiones de dos o más terminales se reduce mediante un procedimiento que rige la interrupción aleatoria o períodos de espera adicionales, una vez que un terminal descubre que el canal parece estar libre. Se hace una excepción al requisito de monitoreo del canal antes de la transmisión en el caso de mensajes de acuse de recibo (ACK). El propósito del ACK es informar al remitente que su mensaje fue recibido correctamente. Si no recibe el ACK durante un período de tiempo determinado después de que se envió su mensaje, puede intentar enviarlo nuevamente, mientras observa la rutina prescrita para evitar colisiones. La función de mensaje-ACK reduce en gran medida la posibilidad de perder datos, incluso en redes densas y canales de transmisión de RF difíciles.

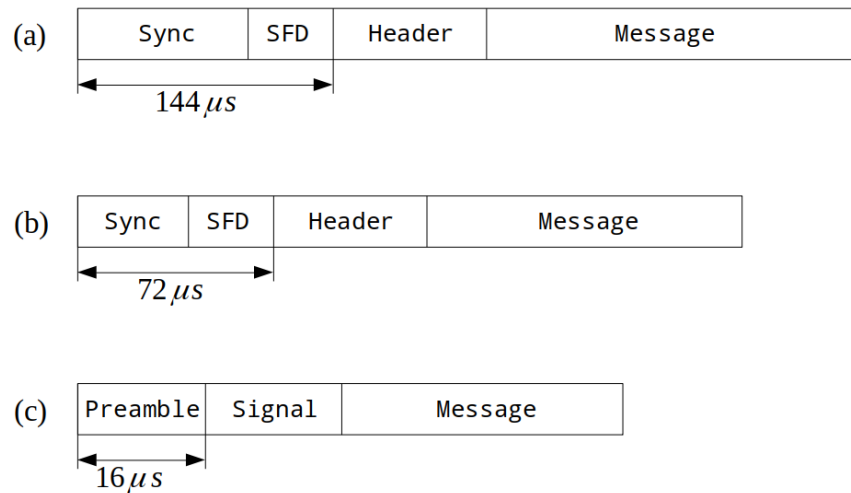


Figura 3.2: Formatos de las tramas de la capa física del estándar IEEE 802.11; (a) formato largo, (b) formato corto y (c) formato IEEE 802.11a

Dado que el ACK se envía sin verificar si el canal está ocupado o no, el protocolo tiene disposiciones para protegerlo de posibles colisiones. Un aspecto de esta protección es asignar al ACK un período de tiempo, llamado espacio entre tramas corto (SIFS), entre el final del mensaje recibido y el comienzo de la transmisión del ACK. SIFS es más corto que el período mínimo antes de que un terminal comience la transmisión, por lo que otro terminal que desee acceder al canal escuchará la trama ACK y pospondrá su transmisión de acuerdo con las reglas. La respuesta automática del mensaje ACK después de un retraso conocido es la base de la medición de distancia TOA bidireccional en IEEE 802.11.

La medición de la distancia TOA depende de la determinación precisa del tiempo en un momento específico de un paquete recibido. En la figura 3.2 se muestran tres tipos de formatos de trama de capa física IEEE 802.11. Todos tienen un preámbulo que facilita la sincronización de bits de la trama recibida e incluye un delimitador de trama de inicio (SFD) o equivalente, que indica el comienzo de la cabecera de trama. El comienzo de la cabecera puede ser el mejor momento para referirse a él como el momento de recepción de la trama, aunque cualquier otro punto podría utilizarse para contar los períodos de chip o símbolo.

El principio TOA bidireccional se muestra en la figura 3.3. Una trama enviada desde el terminal Wi-Fi iniciador a un respondedor llega después de un retraso de propagación de T_p . Si la trama se recibe correctamente, se envía una transmisión ACK al iniciador. La diferencia de tiempo entre el final del mensaje recibido y el comienzo del acuse de recibo, ACK, debe ser menor que SIFS, que en 802.11b y g tienen un valor nominal de $10\mu s$. Este tiempo incluye retrasos de

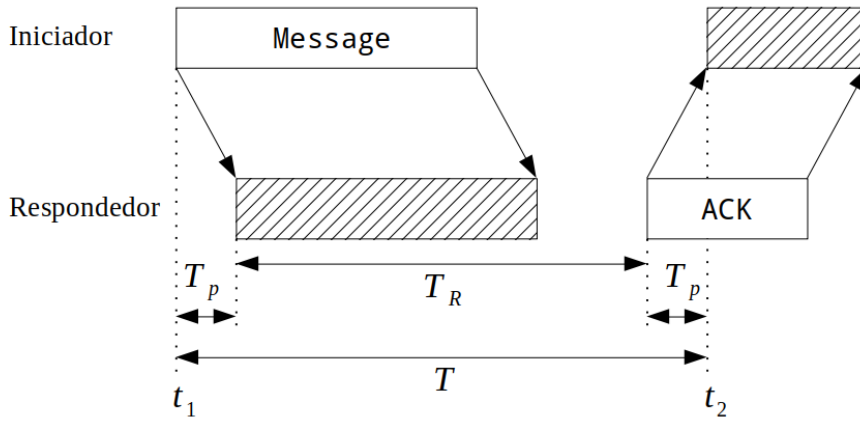


Figura 3.3: Proceso de TOA bidireccional en WLAN

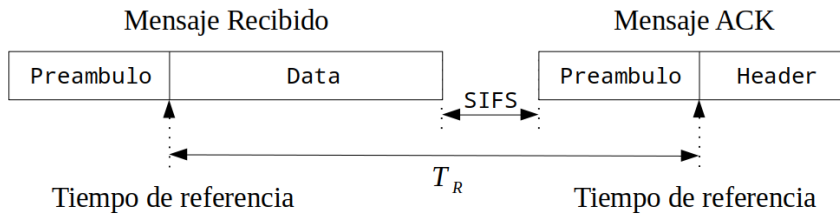


Figura 3.4: Trama de datos mas la de ACK

hardware y procesamiento. El ACK es enviado automáticamente por el hardware del chip y el iniciador lo recibe después de un retraso de propagación de T_P . De la Figura 3.3 se ve que el tiempo total de propagación es:

$$2T_P = (t_2 - t_1) - T_R \quad (3.1)$$

En la Figura 3.3, la marca del comienzo de un mensaje o trama ACK es el final del preámbulo. Como se ve en la figura 3.4, T_R es igual a la duración total de la trama del mensaje de datos menos el preámbulo, más el SIFS, más la longitud del preámbulo de la trama ACK de respuesta. La precisión de la estimación de T_P depende en su mayor parte de la precisión de SIFS.

Hay varias fuentes de incertidumbre que dificultan obtener la precisión deseada cuando se cumple con el estándar IEEE 802.11. Los tiempos t_1 , t_2 y T_R (figura 3.3) cuando se miden en la capa física tienen la precisión del reloj del chip. Para IEEE 802.11b la fuente de reloj típica tiene una frecuencia de 44 MHz, con un periodo de 22,7 ns, equivalente a una distancia de 6,8 m. El SIFS es nominalmente de 10 μ s y puede variar en diferentes implementaciones. Esta es quizás la mayor fuente de incertidumbre. Las bases de tiempo inexactas y el hecho de que las frecuencias de reloj de transmisión y recepción

a menudo no están sincronizadas también agrega imprecisión que es una función de la longitud del paquete. Por ejemplo, supongamos que el reloj del receptor está sincronizado con el reloj de transmisión mediante un PLL con el oscilador local durante el preámbulo del paquete. Si la frecuencia del reloj difiere de la nominal en 20 ppm, y si el valor verdadero de $t_2 - t_1$ es digamos, 300 μs , entonces el error en la medición debido a la imprecisión del reloj es:

$$\Delta T_{\text{error}} = 300\mu\text{s} \times 20 \times 10^{-6} = 6\text{ns} \quad (3.2)$$

Esto, para una velocidad de propagación de $3 \times 10^8 \text{m/s}$, significa un error de distancia de 1.8m.

Mientras que el intervalo de tiempo ($t_2 - t_1$) se mide en el lado del iniciador, la estimación más precisa de T_R tendría que determinarse en el lado del respondedor del enlace. Esto se debe a que el respondedor determina, en hardware, el SIFS. Cuando el respondedor mide T_R , podría transmitir el resultado de la estimación al iniciador para el cálculo de $(t_2 - t_1) - T_R = 2T_P$. Sin embargo, en muchos casos, esto es indeseable o imposible. Por ejemplo, si se pretende que la estimación de la distancia se utilice para la seguridad contra el acceso no deseado a la red, el intruso no cooperará. Sin embargo, el iniciador puede aproximar T_R . Conoce la longitud del mensaje y del preámbulo ACK y puede suponer que un tiempo SIFS es el mismo que en el terminal iniciador, en cuyo caso se cancelará exactamente. Si este fuera el caso, la estimación del tiempo de propagación sería, a partir de la ecuación 3.1 y la figura 3.3:

$$T_P = \frac{1}{2} [(t_2 - t_1) - (T_{\text{Data}} + \text{SIFS} + T_{\text{Preambulo}})] \quad (3.3)$$

Las estimaciones de rango se pueden mejorar con relojes de baja precisión aumentando el número de mediciones y por lo tanto el tiempo de medición. La precisión se mejora promediando un conjunto de medidas hechas con varios mensajes de datos y ACK (>100) en forma consecutiva.

Son varias las ventajas de usar este método sobre otros en redes WiFi:

- Incluso con un AP, se puede determinar el rango con una precisión de una fracción de metro en dispositivos que tienen relojes de alta precisión.
- Se puede encontrar una ubicación bidimensional inequívoca a partir de la triangulación utilizando un mínimo de tres puntos de acceso. Las mediciones de tiempo simultáneas de los AP no son necesarias cuando el movimiento del móvil no es significativo y no existe un requisito de sincronización.
- Usando el promedio, se puede lograr una resolución TOA mucho mejor que la del reloj local.

- No se necesita conocimiento de la potencia radiada.

Pero, existen dos limitaciones muy importantes:

- En interiores el multicamino reduce la precisión
- Se requiere un tiempo de medición relativamente largo para promediar lograr una alta precisión cuando no se dispone de un reloj de alta resolución.

3.2.1.2 *Fingerprinting*

La técnica de posicionamiento basada en Fingerprinting es ampliamente utilizada para WLAN. Se basa en un conjunto de medidas de RSS tomadas de un objetivo desde múltiples puntos de acceso y la comparación de los resultados con una base de datos compilada previamente (como vimos en 1.11). El método tiene varias ventajas. No se requiere sincronización de tiempo. La lectura de RSS es inherente al protocolo IEEE 802.11 y no se necesita ningún hardware especial. Se pueden rastrear etiquetas o dispositivos basados en el estándar IEEE 802.11. El método es especialmente aplicable a las redes de interior, ya que los problemas de la propagación por trayectos múltiples se tienen en cuenta automáticamente en la base de datos de referencia. En lo negativo, el método implica la creación de una base de datos para el área a cubrir, y los cambios en la implementación de AP y las características físicas del entorno requieren la actualización de la base de datos.

3.2.2 *WPAN/Bluetooth*

Así como el IEEE 802.11, o Wi-Fi, domina la WLAN, existen varias tecnologías y estándares que conforman la WPAN pero Bluetooth es la mas común de todas. Estas redes no tienen la infraestructura que forma parte de la mayoría de las aplicaciones WLAN y el alcance es generalmente mucho más corto, nominalmente 10 m. Los estándares WPAN difieren significativamente en sus capas físicas y además de Bluetooth (IEEE 802.15.1) se pueden nombrar ZigBee o IEEE 802.15.4 o Wireless-USB.

Un método para realizar estimaciones aproximadas de la ubicación del dispositivo Bluetooth utiliza una aproximación del alcance máximo de un enlace. Los servidores de posición de Bluetooth están ubicados en un área donde se va a estimar la posición de un cliente (en la figura 3.5 las estaciones A, B C y D). Estos servidores están programados para dar sus coordenadas de ubicación a un cliente solicitante. También se pueden utilizar dispositivos Bluetooth que no tengan una programación especial para manejar una solicitud de posición. En este caso, la posición del dispositivo está contenida en una

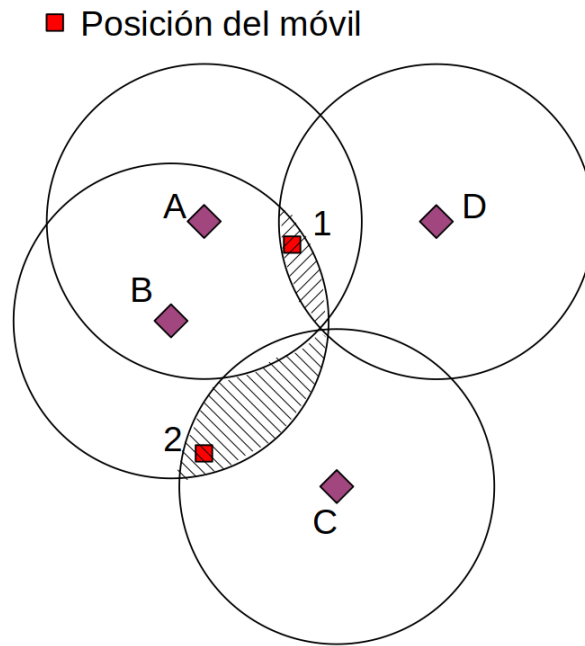


Figura 3.5: Localización Bluetooth usando el área máxima de cobertura. Cada estación base (A,B,C y D) cubre un área máxima (10m) y la ubicación está determinada por la intersección de las áreas que conectan al móvil

tabla referenciada por la ID del dispositivo fijo a la que puede acceder un cliente desde un servidor de ubicación especial que se ha configurado para este propósito. La clase de potencia 3 especificada tiene una salida de potencia máxima de 0 dBm, lo que permite un alcance de alrededor de 10 m. El método de posicionamiento asume que si se realiza una conexión, el dispositivo cliente está dentro de los 10 m del servidor. Se obtiene una mayor precisión como se muestra en la figura 3.5 cuando el cliente realiza una conexión con dos o más servidores de posición o dispositivos cuyas ubicaciones están en la tabla de servidores de ubicación. El cliente en la posición 1 ha establecido conexiones con los dispositivos A, B y C cuyas coordenadas se pueden obtener. El dispositivo D está fuera de rango. El cliente se encuentra en la región sombreada. Las coordenadas de posición estimadas se pueden encontrar calculando el centroide de la región, o una aproximación a partir de las intersecciones de los círculos de radio constante que delimitan la región. Cuando el cliente se mueve a la posición 2, está dentro del alcance solo de los dispositivos C y D, y está ubicado en la región sombreada correspondiente.

Para realizar estimaciones de ubicación, un cliente móvil debe intentar conectarse a varios dispositivos Bluetooth y luego recibir coordenadas de referencia de aquellos con los que la conexión fue exitosa. El tiempo promedio para hacer una estimación de ubicación cuando se consultaron cinco dispositivos base es de entre 20 y 30 segundos.

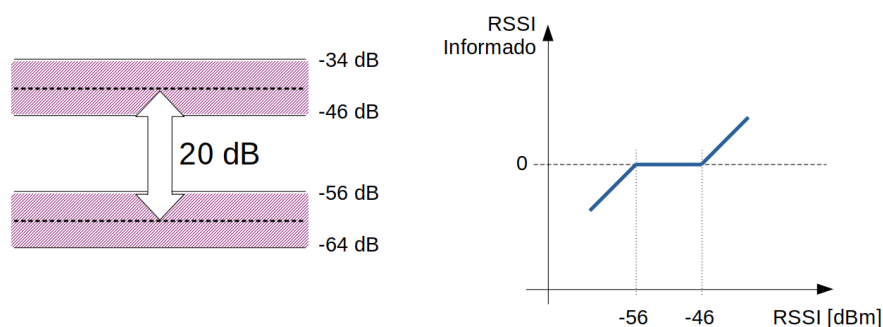


Figura 3.6: El estándar Bluetooth reporta una RSSI que no es lineal. En la zona denominada *Golden Range* entre -46 y -56 dBm informa un valor 0

Estos tiempos son largos en comparación con el tiempo de 16,7 segundos que le toma a un cliente atravesar los 20 m de diámetro del círculo de cobertura a una velocidad de caminata promedio de 1,2 m/s. Por lo tanto, el método no es una buena estrategia cuando el cliente está en movimiento. También afecta la precisión el hecho de que el rango máximo puede variar ampliamente de los 10 m supuestos. La potencia radiada y el patrón de antena de los dispositivos portátiles varían según la forma en que se sostienen y la distancia del cuerpo, y las obstrucciones en la ruta de transmisión en interiores. Todo esto limita la precisión del rango supuesto. A pesar de esto, el método no requiere modificaciones de hardware ni cambios en el protocolo Bluetooth y puede ser adecuado para ciertos servicios de ubicación.

3.2.2.1 RSSI

Otra posibilidad de posicionamiento con Bluetooth es usando las mediciones de RSSI informadas en la capa física. Mas allá de los problemas usuales de utilizar estas medidas en ambientes interiores, las mediciones de RSSI en Bluetooth son imprecisas y no se relacionan de manera lineal con la intensidad de la señal recibida. El propósito principal de la lectura de RSSI en Bluetooth es proporcionar realimentación para el ajuste de potencia del transmisor al que está conectado el receptor. Cuando la señal recibida está dentro de un rango de 20 dB entre un umbral superior (señal fuerte) y un umbral inferior (señal débil), denominado rango dorado de potencia recibida, el RSSI informado es 0 (fig. 3.6). El umbral inferior está entre 6 dB por encima la sensibilidad real del receptor y -56 dBm. El umbral superior es 20 dB mayor, ± 6 dB. El RSSI es negativo cuando la señal está por debajo del umbral inferior, lo que indica que el transmisor debe aumentar la potencia, y positivo cuando la señal está por encima del umbral superior, lo que hace que el transmisor opuesto disminuya su potencia.

La no linealidad de RSSI y los problemas de tiempo de medición prolongado se han resuelto esencialmente en dispositivos Bluetooth de baja energía. La versión 2.1 y posteriores brindan dos características principales que mejoran significativamente la viabilidad de Bluetooth para la medición de distancia y la ubicación. Las lecturas de intensidad de la señal de varios dispositivos Bluetooth dentro del alcance se obtienen rápidamente a través de una función de escaneo, sin la rutina de conexión, y las lecturas de RSSI se informan como valores consecutivos en el rango de sensibilidad del dispositivo. La versión 4, que agregó funciones de Bluetooth Low Energy (LE), hizo que Bluetooth fuera aún más atractivo para el posicionamiento porque brinda a las unidades Bluetooth la capacidad de operar durante períodos prolongados con baterías pequeñas y acorta significativamente el tiempo para realizar conexiones y transferir información. Bluetooth LE tiene una función RSSI completa, por lo que su uso en el posicionamiento es esencialmente el mismo que el de otros dispositivos donde el posicionamiento se basa en la intensidad de la señal, como Wi-Fi.

3.2.3 RFID

RFID (Radio-Frequency IDentification) es una tecnología inalámbrica asimétrica utilizada para la identificación y ubicación de artículos. Un terminal es un *lector* o *interrogador* y el segundo terminal es un *transpondedor* o una etiqueta simple adherida a una estructura, producto, animal o persona que responde con un código de identidad único a las consultas del lector. El RFID opera en bandas de frecuencia sin licencia: baja frecuencia (LF), típicamente 125 kHz y 134,2 kHz; alta frecuencia (HF), 13,56 MHz; y bandas de frecuencia ultra alta (UHF), 433,92 MHz, 860 a 960 MHz, 2,45 GHz y 5,8 GHz. El rango de detección de las etiquetas LF y HF es de hasta 1 m, mientras que las etiquetas UHF pueden cubrir decenas de metros.

Las etiquetas son activas o pasivas. Las etiquetas activas tienen su propia fuente de energía y generan una respuesta de RF modulada en respuesta a la transmisión de un lector. Las etiquetas pasivas funcionan con energía en la señal del lector y responden a través de la tecnología de *backscattering*. La radiación incidente del lector es reflejada por la antena de la etiqueta, modulada a través de cambios en la impedancia de la antena controlada por el IC en la etiqueta. Una tercera categoría de etiqueta es semipasiva, que aumenta el rango de backscattering al alimentar el circuito integrado de la etiqueta para eliminar la carga en las etiquetas pasivas necesarias para crear un voltaje de suministro para operar el chip.

3.2.3.1 Proximidad

El método básico de localización mediante etiquetas RFID es la proximidad. O bien la etiqueta o el lector puede ser el terminal móvil cuya ubicación se va a estimar. Por ejemplo, los lectores de etiquetas se instalan en ubicaciones definidas dentro de una oficina, a menudo en las entradas de las habitaciones ya lo largo de los pasillos. Las personas o equipos cuya ubicación y movimiento están siendo monitoreados están equipados con etiquetas RFID. Cuando una etiqueta está dentro del alcance de un lector, el lector comunica la identificación de la etiqueta a un servidor de ubicación central, ya sea a través de un cableado de infraestructura o una red inalámbrica. El servidor de ubicación recupera de una base de datos la ubicación del lector que luego se considera que es la ubicación del titular de la etiqueta. La operación es análoga en aplicaciones donde las etiquetas se implementan en ubicaciones fijas y conocidas y el lector está conectado al objetivo. En este caso, el lector transmite la identificación de la etiqueta al servidor de ubicación, que ubica al lector cerca de la etiqueta. Es importante resaltar que las etiquetas pasivas que funcionan a 125 kHz suelen tener un alcance de hasta 50 cm. mientras que el alcance de un sistema de 13,56 MHz puede ser de alrededor de 1 m. Esto afecta la densidad de elementos para lograr este tipo de localización.

3.2.3.2 Tags de Referencia

Las etiquetas UHF activas tiene un rango de detección mucho mayor entre el lector y el respondedor que los esquemas de proximidad mencionados. Existen varias propuestas para construir un sistema de localización basados en estas etiquetas. Como ejemplo, tomemos el sistema LANDMARC [16]. Este utiliza etiquetas de referencia y lectores colocadas en un área de hasta decenas de metros cuadrados. El método de ubicación parece similar al *fingerprinting* pero en lugar de crear una base de datos mediante el registro de la intensidad de la señal durante una etapa de inspección, en LANDMARC, las etiquetas de referencia RFID se fijan permanentemente a ubicaciones conocidas. La figura 3.7 muestra un ejemplo del diseño del sistema. Las etiquetas a localizar y las etiquetas de referencia son dispositivos UHF similares. Como el RSSI no está disponible directamente en los lectores de etiquetas, se hacen estimaciones aproximadas de la distancia de la etiqueta ajustando la potencia radiada por el lector en pasos y anotando el número del paso de potencia mínima en el que se detecta la etiqueta. No hay una base de datos preparada de antemano. En la operación de ubicación, las lecturas de intensidad de la señal (paso de potencia) se realizan en todos los lectores de las etiquetas de referencia y la etiqueta de destino. Cada etiqueta de referencia posee un vector de medidas $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{iN})$ donde i es la etiqueta i -ésima, r es el nivel de potencia y N el número de lectores. El vector de

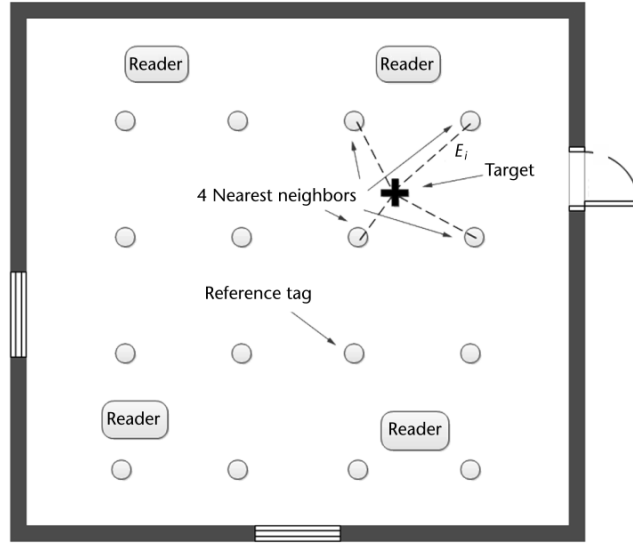


Figura 3.7: Diseño del sistema de ubicación RFID LANDMARC que muestra un ejemplo del despliegue de etiquetas de referencia UHF, lectores y la etiqueta a localizar [5].

medidas del objetivo a localizar es $S = (s_1, s_2, \dots, s_N)$. La distancia euclidiana entre el objetivo y cada una de las etiquetas de referencia será,

$$E_i = \sqrt{\sum_{j=1}^N (r_{ij} - s_j)^2} \quad (3.4)$$

donde j es el índice del lector e i es el índice de la etiqueta de referencia, donde $i \in (1, \dots, M)$ para M etiquetas. Asociado a la etiqueta que se intenta localizar existe un vector de distancias a cada una de las etiquetas de referencia, $\mathbf{E} = (E_1, E_2, \dots, E_M)$. Se supone que el objetivo está cercado a la etiqueta con la menor distancia E_i .

De la misma manera que en el método *Fingerprinting*, la posición del objetivo puede ser estimada por un promedio de las coordenadas de un conjunto de etiquetas cercanas que puede ser mas de una. Los vecinos más cercanos son aquellos que tienen los valores más bajos de E_i . Para L vecinos más cercanos, la estimación de ubicación es

$$(x, y) = \sum_{i=1}^L w_i (x_i, y_i) \quad \text{donde} \quad \sum_{i=1}^L w_i = 1 \quad (3.5)$$

donde (x_i, y_i) son las coordenadas de cada uno de las etiquetas de referencia cercanas, w_i es un factor de peso que enfatiza aquella etiqueta que está mas cercana al objetivo. Un valor posible para ese peso es,

$$w_i = \frac{1/E_i^2}{\sum_{i=1}^L 1/E_i^2} \quad (3.6)$$