

---

# Introducción a los sistemas de radionavegación y radiodeterminación

---

PID\_00185446

José A. López-Salcedo  
Gonzalo Seco Granados

---

Tiempo mínimo de dedicación recomendado: 2 horas

---





Los textos e imágenes publicados en esta obra están sujetos –excepto que se indique lo contrario– a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada (BY-NC-ND) v.3.0 España de Creative Commons. Podéis copiarlos, distribuirlos y transmitirlos públicamente siempre que citéis el autor y la fuente (FUOC. Fundació para la Universitat Oberta de Catalunya), no hagáis de ellos un uso comercial y ni obra derivada. La licencia completa se puede consultar en <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/legalcode.es>

# Índice

<b>Introducción</b> .....	5
<b>Objetivos</b> .....	7
<b>1. Fundamentos de la radionavegación</b> .....	9
<b>2. Tipos de medidas</b> .....	12
2.1. Potencia .....	12
2.2. Tiempo de llegada (TOA) .....	12
2.3. Diferencia de tiempo de llegada (TDOA) .....	13
2.4. Desviación de frecuencia .....	14
2.5. Ángulo de llegada (AOA) .....	14
2.6. Proximidad .....	15
2.7. Otros tipos de observaciones .....	15
<b>3. Métodos de posicionamiento</b> .....	16
3.1. Medidas únicamente de TOA o RSS .....	16
3.2. Medidas únicamente de TDOA .....	16
3.3. Medidas únicamente de AOA .....	17
3.4. Medidas de TOA (o RSS) y AOA .....	18
3.5. Otros métodos .....	18
<b>4. Clasificación de los sistemas de radionavegación</b> .....	20
<b>5. Sistemas de radiodeterminación</b> .....	22
<b>Resumen</b> .....	25
<b>Abreviaturas</b> .....	27
<b>Bibliografía</b> .....	28



## Introducción

Esta asignatura pretende describir los sistemas de radionavegación y radiodeterminación más relevantes desde un punto de vista general, al mismo tiempo que se hace énfasis en los aspectos de los mismos más relacionados con la ingeniería de telecomunicaciones, como son el procesado de señal, el diseño de receptores, etc.

Como se verá a lo largo del curso, los sistemas de radionavegación (donde incluimos también los de radiodeterminación, aunque no se diga explícitamente por abreviar) son sistemas muy complejos, donde confluyen aspectos avanzados de física, matemáticas, electrónica, telecomunicaciones, etc. Una descripción completa de estos sistemas conllevaría varios cursos, así que hemos decidido darle un enfoque que permita a los estudiantes tener una visión general sobre los sistemas y que les permita más adelante profundizar en algunos de sus aspectos.

En particular, los temas relacionados con la ingeniería de telecomunicación son los que se presentan en mayor detalle en la asignatura. En definitiva, al final del curso el estudiante será capaz de entender el principio de funcionamiento de cualquier sistema de posicionamiento y conocer los detalles de los principales sistemas, así como sus prestaciones y limitaciones. El estudiante también conocerá los principales algoritmos que forman un receptor, por lo que el curso también sirve de introducción al desarrollo de receptores de posicionamiento.

Este material ofrece una cobertura muy amplia de todos los tipos de sistemas de posicionamiento, desde los que tienen más importancia actualmente hasta los que han tenido un impacto en el desarrollo tecnológico a lo largo de la historia. Además, se tratan los sistemas terrestres, sistemas basados en satélite, radar, etc.

En el módulo "Sistemas radar", se trata un tipo particular de sistemas de posicionamiento que se suelen denominar sistemas de radiodeterminación o simplemente radar. Su principal característica es que desde un único terminal se pueden determinar las posiciones de los objetos que hay a su alrededor. El resto de sistemas de posicionamiento normalmente se basan en las señales transmitidas por, o recibidas en, varios terminales. Cuando únicamente se utiliza infraestructura terrestre, los sistemas se denominan *sistemas de radionavegación terrestre*, y a ellos se dedica la primera mitad del módulo "Fundamentos de los sistemas de radionavegación". Al principio de este módulo se describen los aspectos más básicos de sistemas de coordenadas, que es un tema recurrente en todo lo relacionado con el posicionamiento. En la segunda mitad del módulo "Fundamentos de los sistemas de radionavegación", se introducen los aspec-

tos más generales de los sistemas de radionavegación que se basan en señales transmitidas desde satélites. Los dos sistemas más importantes de este tipo son GPS y Galileo, a los cuales se dedican los módulos "El sistema GPS" y "Evolución de la navegación por satélite: Galileo y sistemas híbridos", respectivamente. Al final del módulo "Evolución de la navegación por satélite: Galileo y sistemas híbridos", se aprovecha para discutir algunos aspectos más avanzados, como son los sistemas de mejora o aumentación de GPS y Galileo, y los métodos de posicionamiento basados en varios sistemas y en la hibridación con sensores inerciales.

En este módulo se describen los aspectos fundamentales que subyacen en todos los sistemas de radionavegación y radiodeterminación, con el objetivo primordial de entender cómo se acaba pasando de un conjunto de señales electromagnéticas a la determinación de una posición. Se presentan los diferentes tipos de medidas que se pueden relacionar con la posición y cómo se calcularía la misma para diferentes combinaciones de medidas. Esto nos lleva finalmente a presentar diferentes criterios de clasificación a alto nivel de los sistemas de posicionamiento.

## Objetivos

Los principales objetivos de esta asignatura son:

1. Presentar los principios básicos de funcionamiento de los sistemas que sirven para determinar una posición y ofrecer una clasificación de los mismos.
2. Ofrecer una visión general sobre los diferentes sistemas radar existentes, sus aplicaciones más comunes y su evolución histórica.
3. Describir los diferentes elementos que forman un sistema radar y los parámetros básicos que lo describen, así como los fundamentos teóricos que lo sustentan.
4. Comprender los efectos de propagación que sufre la señal radar y sus implicaciones desde el punto de vista práctico. Calcular la precisión que ofrecen las señales de radar.
5. Presentar los sistemas de coordenadas y proyecciones más utilizados en radionavegación.
6. Describir los sistemas terrestres de radionavegación basados en radiofaros y sistemas hiperbólicos. Mostrar los sistemas utilizados en aeropuertos para el control de aproximación y ayuda para el aterrizaje de aeronaves.
7. Introducir los conceptos básicos de los sistemas de radionavegación por satélite y de mecánica orbital. Presentar los sistemas de navegación por satélite de cobertura global y regional más importantes.
8. Describir las arquitecturas de los sistemas GPS y Galileo, así como las señales correspondientes.
9. Detallar las modulaciones y técnicas de multiplexado utilizadas en las señales modernizadas y analizar el impacto que tienen en el receptor.
10. Describir la arquitectura de un receptor GNSS, el funcionamiento de los bloques que lo integran y los fundamentos matemáticos que permiten calcular la posición del usuario a partir de la solución de navegación.
11. Presentar los fundamentos de los receptores GNSS de alta-sensibilidad, aquellos que operan en condiciones de trabajo para las que el sistema GNSS no fue inicialmente diseñado.

- 12.** Conocer las fuentes de error que afectan al cálculo de la posición y comprender los métodos de procesamiento de datos que permiten combatir los efectos no deseados provocados por dichas fuentes de error.
- 13.** Formular diferentes tipos de ecuaciones de navegación y deducir algoritmos para solucionarlas. Entender los fundamentos del posicionamiento diferencial y con fases de portadora.
- 14.** Presentar los sistemas de aumentación, centrándose en los casos de DGPS y SBAS.
- 15.** Introducir el principio de funcionamiento de los receptores con capacidad multi-frecuencia/multi-constelación y la hibridación con sensores inerciales.



## 1. Fundamentos de la radionavegación

La necesidad de determinar la posición de personas, animales u objetos ha estado presente durante toda la Historia. Es tal dicha necesidad, que los propios seres humanos y los animales disponen de mecanismos biológicos internos que les permiten localizarse y orientarse en muchas circunstancias. La lista de métodos desarrollados para obtener información de posición es numerosa.

Hace ya algunos milenios, el posicionamiento y la orientación eran posibles utilizando dispositivos similares a las brújulas, mapas de corrientes marinas y de vientos, o técnicas de navegación celestial. Este último tipo de técnicas basadas en la observación del sol y de las estrellas, ha sido durante siglos la principal forma de obtener información de posición. Incluso hoy en día se utiliza cuando no hay ninguna otra alternativa disponible. Aunque la navegación basada en la observación del cielo y en la brújula ya se había utilizado durante al menos dos mil años, estas técnicas avanzaron significativamente durante la exploración de los océanos en los siglos XV y XVI. Este fue un periodo de tiempo importante en la historia de los sistemas de posicionamiento. Se desarrollaron artilugios, como el astrolabio (y ya en los siglos XVII y XVIII, el cuadrante y el sextante), que permitieron a los navegantes leer la posición de las estrellas y, a partir de ahí, calcular su propia posición con la ayuda de los incompletos mapas de la época. Junto con todo esto, aparecieron también técnicas para predecir posiciones futuras partiendo del análisis de los movimientos pasados. Estas técnicas se utilizaron habitualmente para navegar cuando, por ejemplo, el cielo estaba cubierto, y se complementaban en general con el conocimiento de puntos ancla, como ciertos accidentes de la costa. Son las técnicas precursoras de los métodos actuales de *dead reckoning* que emplean sensores inerciales.

En el siglo XVIII, fue posible medir otra magnitud que es fundamental en el posicionamiento: el tiempo. Se inventó el cronómetro, que fue ampliamente utilizado en la navegación marítima.

En el siglo XIX se descubrieron las ondas electromagnéticas, que, como es bien sabido, son la base de los sistemas inalámbricos de comunicaciones. Pero las ondas electromagnéticas no han servido solo para comunicarse, sino que también son la base de los más precisos sistemas de posicionamiento que se han desarrollado hasta la fecha y que lógicamente se han englobado bajo el término de sistemas de *radionavegación* o *radioposicionamiento*. El primero de dichos sistemas que se inventó se denominó *radio direction finder*. Era un dispositivo que permitía detectar la dirección de la que provenía una señal obser-

### Cronómetro

Como veremos a lo largo de la asignatura, muchos de los sistemas de navegación actuales, como el GPS, son en parte cronómetros muy precisos.

vando la potencia recibida con una antena directiva. El mismo principio de funcionamiento se sigue aplicando hoy en día en las radiobalizas que se emplean por ejemplo para localizar animales.

Ya fue a mediados del siglo XX cuando se inventaron los primeros radares. En esa época se produjeron grandes avances en la tecnología y técnicas de posicionamiento, que se materializaron en una gran variedad de sistemas terrestres de posicionamiento. Quizás uno de los más representativos ha sido el sistema LORAN por la excelente precisión que proporcionaba, lo que hizo que estuviera activo hasta el año 2010. LORAN se basaba en la transmisión de señales por parte de varias estaciones de forma síncrona, lo que permitía al receptor medir la diferencia de distancias a pares de estaciones.

A partir de 1960 se empezaron a desarrollar los sistemas de navegación basados en la transmisión por satélite, y finales de los noventa el sistema GPS se declaró operacional. El sistema GPS es el mejor ejemplo de sistema de posicionamiento basado en señales electromagnéticas transmitidas desde largas distancias. El GPS ha supuesto la verdadera revolución de los sistemas de navegación porque ha permitido obtener la posición en cualquier lugar con visibilidad del cielo y en cualquier momento utilizando un receptor relativamente barato. El GPS generalizó la disponibilidad de información de localización, y a raíz de ello surgieron muchísimas y muy diversas aplicaciones que utilizan información de posición.

### Aplicaciones de los sistemas de posicionamiento

Hoy en día los sistemas de posicionamiento se utilizan en un gran número de sectores: transporte, ocio, turismo, geodesia, aplicaciones científicas (desde el estudio de la atmósfera hasta la medida de la velocidad de propagación de partículas subatómicas), seguridad (generación de barreras virtuales o *geofencing*), datación de operaciones financieras, sincronización de la red eléctrica, publicidad, optimización de sistemas de telecomunicaciones, etc.

El GPS es un sistema americano, y el sistema ruso equivalente se denomina GLONASS. Ambos son los dos representantes actuales del concepto más general que se ha denominado *global navigation satellite systems* (GNSS). Dado el ingente número de actividades mencionadas arriba que dependen de la existencia de un sistema GNSS, dichos sistemas se consideran hoy en día una infraestructura básica de los países, casi tan básica como podrían ser las autopistas o los aeropuertos. Por lo tanto, muchos países están desarrollando sus propios sistemas GNSS, como es el caso de Galileo en Europa.

Los sistemas GNSS son hoy en día los sistemas de posicionamiento por antonomasia, pero dada la gran importancia que tiene disponer de información de localización, se observa la tendencia a incluir en los sistemas de comunicaciones funcionalidades de posicionamiento como complemento a algunas de las limitaciones que tienen los sistemas GNSS, básicamente a lo referente a la recepción de la señal en entornos urbanos o interiores.

#### Nota

Vista la importancia de los sistemas GNSS, aproximadamente la mitad de esta asignatura estará dedicada a estudiar dichos sistemas, en particular al GPS y al Galileo.

Vamos a presentar en los siguientes dos apartados los fundamentos en los que se basan de una manera u otra todos los sistemas de posicionamiento. Seguidamente, proporcionaremos algunos criterios, en base a los cuales se pueden clasificar los sistemas para intentar poner cierto orden en la gran variedad de los que se han desarrollado a lo largo de la historia.

De una forma cualitativa, se puede pensar que la función de un sistema de radionavegación es generar unas señales electromagnéticas, de las cuales se acabe pudiendo extraer información sobre la posición de alguno de los equipos involucrados en la generación o recepción de las señales. Por lo tanto, a nivel conceptual, en el proceso de obtención de la posición se tiene que pasar de señales electromagnéticas a unas coordenadas. Esta transformación, que en cierto modo puede parecer sorprendente, se puede visualizar en dos pasos. El primero consiste en medir ciertos parámetros de la señal electromagnética. En el segundo se explota la relación que tienen dichos parámetros con las coordenadas para estimar estas últimas. Existen múltiples opciones para ambos pasos, que vamos a presentar en los apartados siguientes.

**Nota**

A medida que se vaya avanzando en los módulos siguientes, podéis intentar recordar lo que se explica aquí y reflexionar sobre cómo cada uno de los sistemas concretos que se explicarán corresponde a una combinación de determinadas opciones para cada uno de los pasos.

## 2. Tipos de medidas

En este apartado vamos a describir los diferentes parámetros físicos de las señales que luego podrán ser relacionados con la posición. A pesar de la gran variedad de sistemas de posicionamiento, la mayoría acaba utilizando medidas que pueden ser de unos pocos tipos, los cuales se presentan a continuación.

### 2.1. Potencia

Es habitual referirse a este tipo de medidas como RSS (*received signal strength*). Esta medida es útil porque está relacionada con la distancia entre transmisor y receptor.

De forma sencilla, se puede decir que la dependencia entre la RSS en dBW y la distancia  $d$  es:

$$\text{RSS} = \alpha - 10\gamma \log(d) \quad (1)$$

donde  $\alpha$  es una constante que depende entre otras cosas de la potencia transmitida y de las ganancias de las antenas del transmisor y receptor, y  $\gamma$  es conocido como *path loss exponent* y depende de las condiciones de propagación.

#### Constante $\gamma$

La constante  $\gamma$  es igual a 2 en el espacio libre, pero puede tomar valores en un rango  $[1, 5]$  o incluso mayor a 5 si las señales se propagan en el interior de edificios o cualquier otro entorno complejo.

La expresión anterior pretende únicamente ilustrar de forma simple la relación entre la magnitud física (RSS) y una magnitud más relacionada con la geometría o la posición (la distancia). En la práctica puede haber muchos efectos (desvanecimientos de gran y pequeña escala, propagación multicamino, bloqueo de la señal directa, ruido de media, etc.) que hacen que la expresión 1 sea en general meramente aproximada.

### 2.2. Tiempo de llegada (TOA)

El tiempo de llegada<sup>1</sup> es una medida que permite obtener el tiempo (o retardo) de propagación de la señal entre el transmisor y el receptor. Si este retardo se multiplica por la velocidad de propagación de la señal, se obtiene una medida de la distancia entre ambos dispositivos ( $d$ ), como indica la expresión 2.

<sup>(1)</sup>En inglés, *time of arrival* (TOA)

$$d = c(\text{TOA} - t_{tx}) \quad (2)$$

donde  $t_{tx}$  representa el instante en que se transmitió la señal, la cual se recibe en el instante TOA, y  $c$  es la velocidad de propagación.

Como se observa en la expresión anterior, para que el tiempo de llegada de la señal sea realmente útil y permita obtener el retardo de propagación (es decir,  $\text{TOA} - t_{tx}$ ) es necesario por un lado conocer el instante de transmisión de la señal, y por otro lado, que las escalas de tiempo del transmisor y del receptor sean las mismas (o si son diferentes, que lo sean de una manera conocida).

Estas condiciones no son fáciles de conseguir, y esto hace que los sistemas basados en TOA tengan una complejidad añadida. En ocasiones se presentan los sistemas GNSS como sistemas que utilizan medidas TOA. No obstante, las medidas de TOA utilizadas en GNSS no proporcionan directamente la distancia, sino que incluyen un término adicional que se tiene que determinar. Dada la complejidad añadida que suele llevar asociada el uso de las medidas de TOA, existen básicamente dos alternativas para obtener estimaciones de distancia a partir de los retardos de propagación. Una son las medidas de TDOA, que veremos a continuación, y otra son las medidas del retardo de ida y vuelta de la señal entre dos objetos. Esta última alternativa es en la que se basan los sistemas radar (donde los dos objetos involucrados son el propio radar y el blanco). En la medida del retardo de ida y vuelta, un mismo equipo hace de transmisor y receptor, eliminando automáticamente, de esta manera, el problema de la sincronización de las dos escalas de tiempo que se ha comentado previamente.

También se puede obtener el retardo de propagación de la señal a partir de medidas de la fase de la misma, que se pueden denominar como POA (*phase of arrival*), aunque no es un término tan habitual como el TOA, que a veces engloba también las medidas de fase. Las medidas POA, además de llevar asociados los mismos requerimientos de sincronización de las escalas de tiempo, tienen la dificultad añadida de la ambigüedad intrínseca de las medidas de fase, aunque como contrapartida son en general más precisas.

### 2.3. Diferencia de tiempo de llegada (TDOA)

Una medida de la diferencia de tiempo de llegada<sup>2</sup> es la diferencia de los instantes de llegada a un receptor de dos señales emitidas cada una de ellas por un transmisor diferente. También se puede generar a partir de una única señal enviada por un transmisor y recibida en dos receptores. Conceptualmente, ambos casos son similares, aunque consideraremos en los comentarios que siguen únicamente el primer caso por claridad. La TDOA, escalada adecuadamente por la velocidad de propagación, proporciona la diferencia de las distancias del receptor a los dos transmisores. Para que esto sea así, es necesario que los

#### Ved también

Para saber más sobre las medidas de TOA utilizadas en GNSS podéis ver el módulo "El sistema GPS".

#### Ved también

En el módulo "El sistema GPS" veréis que las medidas POA son en general más precisas.

<sup>(2)</sup>En inglés, *time difference of arrival* (TDOA)

dos transmisores transmitan las señales de forma sincronizada, pero al menos se evita el requisito de que los transmisores y el receptor estén sincronizados como ocurría con los TOA.

## 2.4. Desviación de frecuencia

El receptor también puede medir la frecuencia Doppler de la señal recibida o la diferencia de frecuencias Doppler de dos señales. Aunque tecnológicamente la medida de frecuencias o de instantes de llegada tiene implicaciones muy diferentes, conceptualmente es similar al TOA o TDOA. La frecuencia Doppler se puede interpretar como la variación del TOA con el tiempo. Así como el TOA indica la distancia entre transmisor y receptor, la frecuencia Doppler indica cómo varía la distancia entre ambos o, lo que es lo mismo, la velocidad relativa entre transmisor y receptor.

## 2.5. Ángulo de Llegada (AOA)

A diferencia de los casos anteriores, del ángulo de llegada no se deduce un valor de distancia, sino que el receptor obtiene la dirección en la que se encuentra el transmisor. Esta dirección se puede calcular realizando un barrido electrónico de haz o comparando los retardos o desfases de la señal recibida en varias antenas de las que disponga el receptor. O bien, si dichas antenas tienen diagramas de radiación diferentes y dependientes del ángulo, se pueden comparar las potencias recibidas en cada una de ellas. De todas maneras, existen otras formas muy diferentes de obtener el AOA, siendo algunas de ellas auténticos ejemplos paradigmáticos de ingeniería, como son el sistema VOR o el MLS.

La medida del valor absoluto del AOA presupone que el receptor que lo mide tiene acceso a alguna referencia que le indique la orientación del sistema de coordenadas. Es decir, si el receptor determina que el AOA de una señal es  $30^\circ$ , tiene que saber con respecto a qué dirección se miden estos  $30^\circ$ .

Hay ocasiones en las que no se dispone de dicha referencia, en cuyo caso únicamente tiene utilidad realizar medidas diferenciales de ángulo de llegada. En esta situación se suele hablar de ADOA (*angle difference of arrival*), que corresponde a la diferencia entre los ángulos de llegada de dos señales y es evidentemente una medida independiente de la orientación del sistema de coordenadas.

### DOA

El ángulo de llegada (*angle of arrival*, AOA) también se conoce por las siglas en inglés de *direction of arrival* (DOA).

### Ved también

Los sistemas VOR y MLS se describen en el módulo "Sistemas de radionavegación" de esta asignatura.

## 2.6. Proximidad

Las medidas que acabamos de comentar (TOA, POA, TDOA, frecuencia Doppler, AOA, ADOA) son la base de cualquier sistema de posicionamiento que utilice medidas de distancia, velocidad o ángulo. No obstante, se puede hablar asimismo de otros tipos de observaciones que también están relacionados con la posición, aunque no estén directamente relacionados con parámetros concretos de las señales electromagnéticas. La proximidad es un ejemplo. Por esto se entiende la recepción de una determinada señal (por ejemplo, de una estación base de telefonía móvil o de un punto de acceso WiFi), que sirve para acotar la región en la que se encuentra el receptor. Esto parece un mecanismo demasiado simple, pero realmente se ha utilizado en la práctica en redes celulares (se ha denominado el método del Cell ID) y es la base del posicionamiento con WiFi del exitoso sistema de Skyhook.

## 2.7. Otros tipos de observaciones

Otros tipos de observaciones que no están relacionadas ni con la distancia ni con la orientación también pueden ser útiles para el posicionamiento. Algunos ejemplos son la respuesta impulsional del canal o la potencia recibida (simplemente el valor como tal, sin relacionarlo con la distancia). La forma de obtener información de posición a partir de dichas observaciones se denomina *fingerprinting*.

### RFID

El posicionamiento mediante RFID también se basa en este sencillo concepto, ya que dado el corto alcance de RFID, la recepción de una señal de RFID indica de forma automática que el lector y la tarjeta RFID están muy próximos.

### Ved también

El *fingerprinting* se trata en el apartado 3 de este módulo.

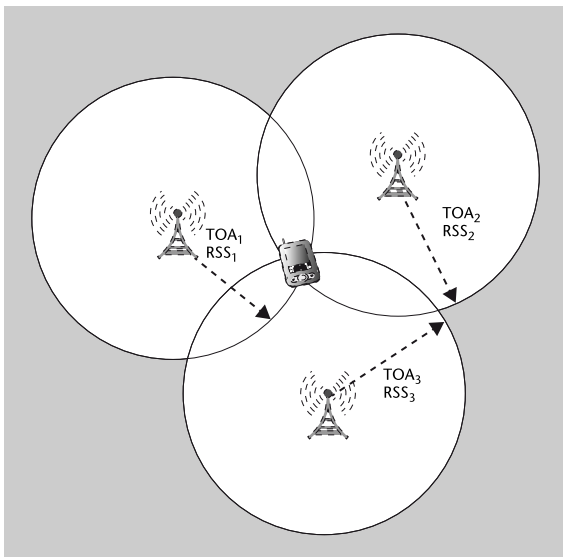
### 3. Métodos de posicionamiento

El segundo paso en el proceso de cálculo de la posición consiste en relacionar un conjunto de medidas de uno o varios de los tipos que acabamos de describir en la apartado anterior con la propia posición, que es la incógnita de nuestro problema. Las relaciones entre las medidas y la posición son las que nos permitirán obtener los valores de las coordenadas, y conducen habitualmente a problemas geométricos. Es imposible describir todas las opciones posibles, ya que existen tantas como combinaciones posibles de los tipos de medidas. No obstante, vamos describir a continuación las más relevantes.

#### 3.1. Medidas únicamente de TOA o RSS

Esta alternativa se denomina también método rho-rho o *lateration*. Cada una de las medidas de TOA determina una circunferencia (en posicionamiento en 2D) o una superficie esférica (en 3D). La posición vendrá dada por el punto de intersección de varias circunferencias o superficies esféricas (figura 1). Puede entenderse que GPS utiliza este método de posicionamiento (con alguna salvedad que veremos) o también el siguiente.

Figura 1. Posicionamiento mediante medidas de distancia



#### 3.2. Medidas únicamente de TDOA

En este caso, una medida de TDOA, también conocido como posicionamiento hiperbólico, se traduce en que la posición a calcular se encuentra sobre una determinada hipérbola (en 2D) o superficie hiperbólica (en 3D), cuyos focos son las dos estaciones transmisoras (o receptoras si lo que se tiene que posicionar es el transmisor).

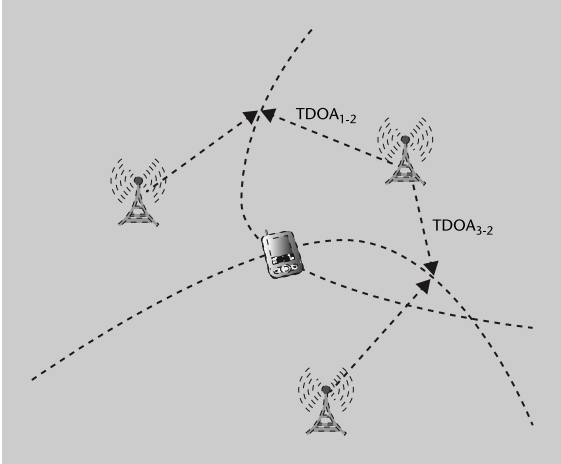
#### Hipérbola

Recuérdese que una hipérbola es el lugar geométrico de los puntos cuyas distancias a dos puntos fijos difieren en un cierto valor.



En este caso, la determinación de la posición consistirá en calcular la intersección de varias hipérbolas (figura 2). Los sistemas Omega y LORAN son sistemas de posicionamiento hiperbólico.

Figura 2. Posicionamiento mediante medidas de diferencia de distancia.

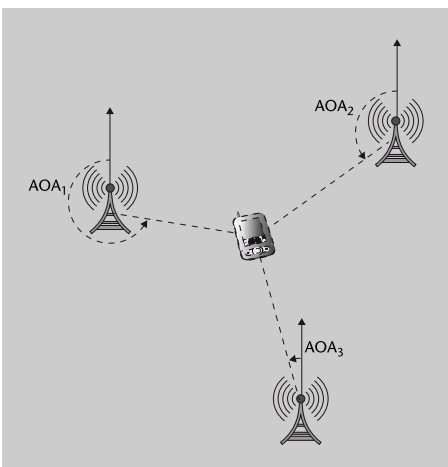


### 3.3. Medidas únicamente de AOA

En las medidas únicamente de AOA, conocido también como método tetra-tetha o *angulation*, cada medida de ángulo determina una recta sobre la que se encuentra el terminal, cuya posición vendrá dada por tanto por la intersección de varias rectas (esto se ilustra en la figura 3).

El término habitual de triangularización (*triangulation*) se refiere a cualquier método de *lateration*, *angulation*, posicionamiento hiperbólico o combinaciones entre ellos.

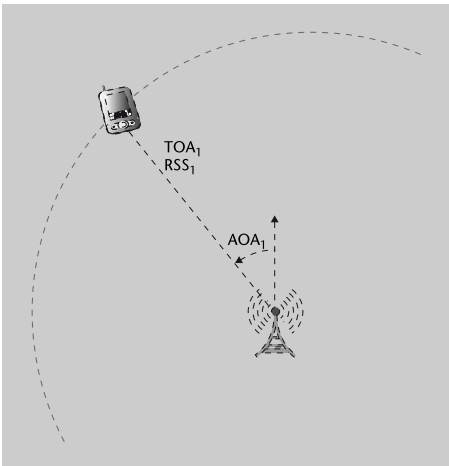
Figura 3. Posicionamiento mediante medidas de AOA



### 3.4. Medidas de TOA (o RSS) y AOA

En las medidas de TOA (o RSS) y AOA (conocido como método rho-tetha o *hybrid angulation and lateration*), está claro que la posición vendrá dada por la intersección de circunferencias y rectas. Es interesante observar que una única medida de TOA y otra de AOA tomadas desde un único punto son suficientes para posicionarse (figura 4). El AOA determina la dirección en la que se encuentra el objeto a posicionar y el TOA determina la distancia. Sabiendo la dirección y la distancia, se obtiene la posición. Es el método de posicionamiento más intuitivo que hay, y es la base de los sistemas radar. También sería lo que se obtendría al combinar medidas de los sistemas VOR y DME. Geométricamente corresponde a la intersección de una superficie esférica con una recta. De forma similar se pueden combinar medidas de TDOA y AOA (lo que se denominaría *hybrid angulation and hyperbolic locatizacion*).

Figura 4. Posicionamiento mediante medidas de ángulo y distancia



### 3.5. Otros métodos

Los métodos anteriores se basan en explotar la relación entre las medidas de los parámetros de las señales, las distancias o ángulos, y las coordenadas de la posición. Pero los métodos de posicionamiento no se limitan a problemas geométricos, sino que pueden tener un enfoque mucho más amplio.

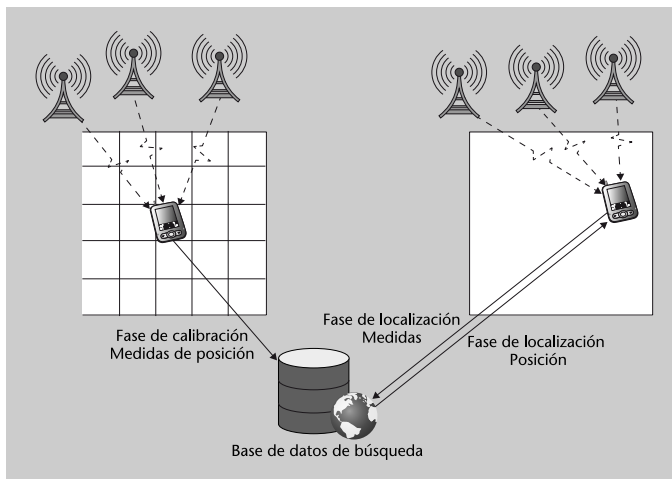
Un claro ejemplo es la técnica de *fingerprinting*<sup>3</sup>, que a grandes rasgos funciona de la siguiente manera, y que se ilustra en la figura 5. Previamente se ha generado una base de datos donde se guardan las observaciones que se realizan en un conjunto de posiciones conocidas. Dichas observaciones pueden ser casi de cualquier tipo:

- las RSS medidas a varios puntos de acceso de WiFi,
- las respuestas impulsionales de los canales que afectan a las señales provenientes de varias estaciones base,
- las imágenes captadas por una cámara, etc.

<sup>(3)</sup> *Fingerprinting* se puede traducir como "análisis de huellas digitales".

A la hora de calcular la posición de un terminal, este realiza las observaciones que se utilicen en el sistema en cuestión y se comparan con las que hay en la base de datos. Las posiciones correspondientes a las entradas de la base de datos que contengan las "huellas" más similares a las observaciones que está tomando el terminal se utilizarán para calcular la posición del mismo. De nuevo, aquí hay múltiples alternativas, desde la más simple, consistente en elegir la entrada más próxima, a calcular un promedio ponderado de las posiciones correspondientes a diferentes entradas, donde los pesos están inversamente relacionados con la diferencia entre las medidas y las huellas de la base de datos.

Figura 5. Posicionamiento mediante *fingerprinting*



Para concluir este apartado vamos a plantear un ejemplo muy ilustrativo de la diferencia que existe entre las medidas (lo que se presentó en el apartado 2) y los métodos de posicionamiento (presentados en este apartado), y del hecho de que ambos elementos son necesarios para obtener finalmente la posición.

### Ejemplo

Imaginemos un receptor que realiza medidas de RSS con las señales de varios transmisores. Hay varias formas de utilizar estas mismas medidas para obtener la posición. Una opción es plantear un esquema rho-rho o de *lateration*, donde se aproveche la relación que existe entre cada RSS y la distancia transmisor-receptor. En el otro extremo está la opción más sencilla posible, consistente en tomar como posición del receptor la de transmisor asociado a una mayor RSS. Una alternativa menos radical sería ponderar las posiciones de los transmisores en función de la RSS (se denomina técnica del centroide). Y por último, se podrían utilizar las RSS medidas en un método de *fingerprinting* si se dispone de una base de datos adecuada.

## 4. Clasificación de los sistemas de radionavegación

Dada la gran variedad de sistemas de radionavegación existente, es difícil encontrar una clasificación que los englobe a todos ellos de forma totalmente coherente. No obstante, vamos a presentar diferentes criterios que permiten al menos identificar grandes grupos y que, al mismo tiempo, son útiles para poner en contexto los diferentes módulos de la asignatura.

Una gran primera división de los sistemas de radionavegación se puede realizar atendiendo a si utilizan señales de radiofrecuencia transmitidas desde equipos terrestres o bien desde satélites.

Otro criterio de clasificación es la cobertura, que puede ser global (por ejemplo, que el sistema se puede utilizar en cualquier lugar de la Tierra) o bien local (por ejemplo, limitado a una región, país, continente, etc.).

### Ved también

Los sistemas de radionavegación basados en equipos terrestres se estudian en los módulos "Sistemas radar" y "Sistemas de radionavegación". En este último módulo se introducirán los sistemas basados en satélite, que luego se estudiarán en detalle en los módulos "El sistema GPS" y "Evolución de la navegación por satélite: Galileo y sistemas híbridos".

Por la propia arquitectura del sistema, es más factible que los sistemas terrestres sean locales y los sistemas por satélite sean globales, pero no se trata de una relación biunívoca ni mucho menos.

En el módulo "Sistemas de radionavegación" se verá que la mayoría de sistemas terrestres tienen cobertura local, como los radiofaros y los sistemas de aproximación y aterrizaje, pero que también hay sistemas de cobertura potencialmente global como el Omega o LORAN. En el módulo "El sistema GPS" se presentará en detalle el sistema GPS, que tiene como una de sus grandes ventajas el hecho de ser un sistema global (como su nombre indica). Galileo, que se estudiará en el módulo "Evolución de la navegación por satélite: Galileo y sistemas híbridos", también está destinado a ser un sistema global. Pero en este último módulo se estudian también otros sistemas, EGNOS y WAAS, que a pesar de estar basados en satélite son sistemas regionales porque están destinados a ser un complemento a GPS en ciertas regiones de la Tierra. Otro tipo de complemento que pueden tener los sistemas GNSS proviene de los sistemas de comunicaciones que existen en la zona en la que se encuentra el receptor. Este es el concepto de A-GNSS (*assisted* GNSS). Un receptor GNSS puede ayudarse de un sistema de comunicaciones para obtener información más precisa que la que envía el propio sistema GNSS, para conocer el estado de la constelación GNSS y facilitar así el procesado de las señales GNSS, para recibir correcciones de las medidas, etc.

Hasta ahora hemos abordado únicamente sistemas de posicionamiento no cooperativos, que son el objeto de esta asignatura. En estos sistemas, si hay varios terminales a posicionar, el cálculo de la posición se realiza de forma independiente para cada uno de ellos. Por lo tanto, el problema de posicionar un terminal se trata independientemente del problema de posicionar otro terminal que esté en la zona. Sin embargo, también sería posible que los terminales a posicionar cooperasen de alguna manera. Cuando esto ocurre se dice que se trata de un sistema de posicionamiento cooperativo.

En un sistema de posicionamiento cooperativo, los sensores (utilizamos ahora este nombre en lugar de terminal porque es más habitual en este contexto) no se posicionan de forma independiente entre ellos, utilizando únicamente medidas realizadas sobre señales transmitidas por sensores cuya posición es conocida (llamados sensores ancla), sino que también utilizan medidas sobre las señales transmitidas por otros sensores cuya posición también se ha de calcular. De esta manera, se tiene un conjunto de medidas entre sensores a posicionar con otros sensores a posicionar y con sensores ancla, y las incógnitas son el conjunto de coordenadas de los sensores a posicionar, que se calculan de forma conjunta. El hecho de que las incógnitas se calculen conjuntamente es lo que permite que los sensores cooperen, y de que un sensor utilice señales transmitidas por otro sensor cuyas coordenadas también son parte del problema.

En definitiva, el problema de posicionamiento cooperativo se puede entender como calcular simultáneamente la posición de todos los sensores de una red, en lugar de hacerlo para cada uno de ellos individualmente.

Si el cálculo del conjunto de coordenadas se realiza por un única entidad que recoge las medidas realizadas por todos los sensores, el sistema es cooperativo centralizado. Cuando cada sensor calcula sus propias coordenadas, pero no de forma aislada (porque en este caso sería un sistema no cooperativo), sino intercambiando información con el resto de sensores, el sistema se denomina cooperativo distribuido, y puede alcanzar en determinadas circunstancias la misma solución que la versión centralizada, pero evitando que todo el cálculo se realice en una entidad central.

**Nota**

Los sistemas de posicionamiento cooperativo han suscitado bastante interés últimamente, en paralelo con el desarrollo de las redes inalámbricas de sensores, pero su estudio excede los objetivos de la asignatura.

## 5. Sistemas de radiodeterminación

El objetivo principal de los sistemas de radiodeterminación es proporcionar información acerca de la localización de un determinado objetivo, ya sea fijo o móvil. Se trata por tanto de sistemas que actúan de manera externa al objetivo, y que a menudo, más que la posición exacta del mismo, proporcionan información acerca de la distancia, velocidad o dirección en la que se encuentra el objetivo respecto de las coordenadas del sistema de radiodeterminación.

Esta información de localización es utilizada habitualmente en aplicaciones de monitorización, control y vigilancia de objetivos, lo cual distingue a los sistemas de radiodeterminación de los de radionavegación. En efecto, los sistemas de radionavegación tienen como finalidad proporcionar información de localización al propio objetivo o terminal móvil, el cual pasa a ser el elemento central del sistema, y utiliza esta información para su propio uso.

Dentro de los sistemas de radiodeterminación, el ejemplo más conocido es el de los sistemas de radio *detection and ranging* (radar), los cuales se basan en la transmisión y recepción de señales electromagnéticas con la finalidad de detectar y localizar la presencia de objetivos dentro de una cierta zona de cobertura.

El principio de operación de los sistemas radar es bien sencillo y se basa en medir ciertos parámetros de la señal reflejada en el objetivo, como por ejemplo el tiempo de llegada o la frecuencia Doppler.

El procesado de la señal recibida varía en función del tipo de sistema radar, distinguiéndose principalmente entre radares de onda continua y radares pulsados (Skolnik, 2001).

Las primeras implementaciones de sistemas radar, desarrolladas durante el primer tercio del siglo XX, estaban basadas en arquitecturas de transmisión continua. En este caso, tanto la señal transmitida como la señal recibida coexisten en tiempo, y la manera habitual de distinguir una de la otra es aprovechar el hecho de que la señal recibida posee una frecuencia diferente a la transmitida, como consecuencia del efecto Doppler, debido al movimiento relativo del objetivo respecto al radar.

### Ved también

Los sistemas de radio se estudian en el módulo "Sistemas radar".

Los sistemas de radar continuo son pues sistemas que explotan el efecto Doppler para determinar la distancia y velocidad del objetivo.

La evolución de los radares continuos desembocó en el desarrollo de radares pulsados, que utilizan un esquema de transmisión más eficiente a partir de la emisión de fracciones de energía durante un tiempo de duración limitada, y repitiendo estas emisiones de manera periódica. De esta forma no es necesario utilizar una antena para transmisión y otra para recepción, como en el caso de radares de onda continua, sino que una misma antena puede operar como transmisora durante la emisión del pulso, y como receptora mientras espera a que llegue el instante para transmitir el siguiente pulso.

Como contrapartida de los sistemas de radar pulsados, aparece el concepto de ambigüedad en distancia y ambigüedad en velocidad.

Si bien en el caso de los sistemas radar el objetivo actúa como un elemento pasivo, simplemente reflejando la señal transmitida por el radar, existen sistemas de radiodeterminación en los que el objetivo se convierte en elemento activo. Este es el caso de los sistemas de radiodeterminación para el control de tráfico marítimo, como el *automatic identification system* (AIS), con el que los navíos emiten señales para alertar de su presencia en una cierta posición junto con información de identificación para ser reconocidos (Tetreault, 2005). Debido a las condiciones de transmisión en mar abierto, el alcance de los sistemas AIS suele ser inferior a 100 km en el plano horizontal, sin embargo, pueden llegar a alcanzar los 400 km de cobertura en el plano vertical. Ello permite que las señales AIS puedan ser interceptadas por satélites de órbita baja (LEO, *low-earth orbit*) los cuales se encargan de redistribuirlas a un centro de control, en donde se procede a representar gráficamente los diferentes navíos que hay en una cierta zona geográfica. Si bien la información disponible no es utilizada propiamente con fines de navegación, sí que es útil para evitar colisiones, identificar a los navíos y servir en tareas de búsqueda y rescate.

Un principio de operación similar al del sistema de radiodeterminación AIS es utilizado también por el sistema de salvamento Cospas-Sarsat, el cual está basado en una red de satélites que se encargan de recibir la señal emitida por radiobalizas de emergencia (Cospas-Sarsat Secretariat, 2009). Cuando esta radiobaliza es activada por un usuario, la señal captada por el satélite más cercano se distribuye hacia las estaciones de control terrestre, donde se envía un mensaje a un centro de control encargado de verificar la veracidad de la alarma, y activar los protocolos de salvamento según la posición y nacionalidad de la radiobaliza.

#### Ved también

Los conceptos de ambigüedad en distancia y ambigüedad en velocidad se estudian en el módulo "Sistemas radar" de esta asignatura.

Tanto el sistema AIS como el sistema Cospas-Sarsat están pensados para la radiodeterminación de objetivos fijos o de baja velocidad. En el caso de objetivos a gran velocidad, como el caso de aeronaves, existen también sistemas de radiodeterminación que permiten, en este caso, evitar la colisión entre aeronaves a media y baja altura. Este sistema, conocido como ACAS por sus siglas en inglés de *airborne collision avoidance system*, se basa en el uso de radares secundarios que envían señales de interrogación a las aeronaves para su identificación (Law, 1999). A partir de la señal de respuesta recibida desde la aeronave, el radar secundario es capaz de identificar a la misma y de determinar su distancia y velocidad, utilizando el mismo principio de operación que el de un sistema radar tradicional. Una vez analizada esta información, el sistema puede avisar al piloto sobre posibles conflictos con otras aeronaves cercanas para que así este pueda llevar a cabo las medidas correctoras que sean precisas.

**TCAS**

Comercialmente, el sistema ACAS está disponible únicamente a través del sistema TCAS (*traffic alert and collision avoidance system*), el cual es obligatorio que se implemente en todas las aeronaves civiles que sobrevuelan el espacio aéreo de los Estados miembros de la Conferencia Europea de Aviación Civil (CEAC).



## Resumen

En este módulo se han presentado los fundamentos más generales y básicos de los sistemas cuyo objetivo es determinar una posición. Se ha visto que el cálculo de la posición se puede dividir en dos fases. Una primera fase, que consiste en medir ciertos parámetros de las señales electromagnéticas, y una segunda fase, en la que se relacionan dichos parámetros con las coordenadas a determinar. Se han presentado las medidas más habituales como TOA, AOA, RSS, etc., así como otras, como la proximidad, que tienen un significado algo menos concreto. Seguidamente se ha relacionado cada una de estas medidas con una magnitud geométrica, como puede ser la distancia, el ángulo, etc., y a continuación se ha esbozado la forma como se puede obtener la posición cuando se dispone de diferentes combinaciones de estas magnitudes geométricas. Finalmente, se ha presentado una clasificación de los diferentes sistemas de radionavegación. De forma similar a como se ha realizado con los sistemas de radionavegación, en el último apartado del módulo se han planteando los fundamentos de los sistemas de radiodeterminación (o radar) y la clasificación de los mismos.



## Abreviaturas

- ACAS** Airborne Collision Avoidance System
- A-GNSS** Assisted - Global Navigation Satellite System
- AIS** Automatic Identification System
- ADOA** Angle Difference Of Arrival
- AOA** Angle Of Arrival
- CEAC** Conferencia Europea de Aviación Civil
- DOA** Direction Of Arrival
- EGNOS** European Geostationary Navigation Overlay Service
- GNSS** Global Navigation Satellite System
- GPS** Global Positioning System
- ID** Identification
- LEO** Low-Earth Orbit
- LORAN** Long Range Navigation
- POA** Phase of Arrival
- RFID** Radio Frequency Identification
- RSS** Received Signal Strength
- TCAS** Traffic alert and Collision Avoidance System
- TDOA** Time Difference of Arrival
- TOA** Time of Arrival
- VOR** VHF Omnidirectional Range
- WAAS** Wide Area Augmentation System

## Bibliografía

- Bensky, A.** (2008). *Wireless Positioning: Technologies and Applications*. Artech House.
- Cospas-Sarsat Secretariat** (oct., 2009). "Introduction to the Cospas-Sarsat System". *C/S G.003* (núm. 6).
- Figueiras, J.; Frattasi, S.** (2010). *Mobile Positioning and Tracking: From Conventional to Cooperative Techniques*. Wiley.
- Grewal, M. S.; Weill, L. W.; Andrews, A. P.** (2007). *Global Positioning Systems, Inertial Navigation* (2.<sup>a</sup> ed.). Wiley.
- Kayton, M.** (1990). *Navigation: Land, Sea, Air, and Space*. IEEE Press Selected Reprint Series.
- Launer, D.** (2009). *Navigation Through the Ages*. Shreindan House.
- Law, J.** (enero, 1999). "ACAS II Programme". *ACASA WP6.1*.
- Skolnik, M. I.** (2001). *Introduction to RADAR Systems* (3.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill.
- Tetreault, B. J.** (2005). "Use of the Automatic Identification System (AIS) for Maritime domain awareness (MDA), *Proc. IEEE OCEANS Conference* (vol. 2, págs. 17-23).