
Introducció als sistemes de radionavegació i radiodeterminació

PID_00185440

José A. López-Salcedo
Gonzalo Seco Granados

Temps mínim de dedicació recomanat: 2 hores





Els textos i imatges publicats en aquesta obra estan subjectes –llevat que s'indiqui el contrari– a una llicència de Reconeixement-NoComercial-SenseObraDerivada (BY-NC-ND) v.3.0 Espanya de Creative Commons. Podeu copiar-los, distribuir-los i transmetre'ls públicament sempre que en citeu l'autor i la font (FUOC. Fundació per a la Universitat Oberta de Catalunya), no en feu un ús comercial i no en feu obra derivada. La llicència completa es pot consultar a <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/legalcode.ca>

Índex

Introducció	5
Objectius	7
1. Fonaments de la radionavegació	9
2. Tipus de mesures	12
2.1. Potència	12
2.2. Temps d'arribada (TOA)	12
2.3. Diferència de temps d'arribada (TDOA)	13
2.4. Desviació de freqüència	14
2.5. Angle d'arribada (AOA)	14
2.6. Proximitat	14
2.7. Altres tipus d'observacions	15
3. Mètodes de posicionament	16
3.1. Mesures únicament de TOA o RSS	16
3.2. Mesures únicament de TDOA	16
3.3. Mesures únicament d'AOA	17
3.4. Mesures de TOA (o RSS) i AOA	18
3.5. Altres mètodes	18
4. Classificació dels sistemes de radionavegació	20
5. Sistemes de radiodeterminació	22
Resum	25
Abreviatures	27
Bibliografia	28

Introducció

Aquesta assignatura pretén descriure els sistemes de radionavegació i radiodeterminació més rellevants des d'un punt de vista general, al mateix temps que es fa èmfasi en els aspectes més relacionats amb l'enginyeria de telecomunicacions, com són el processament de senyal, el disseny de receptors, etc.

Com es veurà al llarg del curs, els sistemes de radionavegació (en què incloem també els de radiodeterminació, tot i que no s'indiqui explícitament per abreujar) són sistemes molt complexos, en què conflueixen aspectes avançats de física, matemàtiques, electrònica, telecomunicacions, etc. Una descripció completa d'aquests sistemes comportaria diversos cursos, per això hem decidit donar-hi un enfocament que permeti als estudiants tenir una visió general sobre els sistemes i que els permeti més endavant aprofundir en alguns dels seus aspectes.

En particular, els temes relacionats amb l'enginyeria de telecomunicació són els que es presenten amb més detall en l'assignatura. En definitiva, al final del curs l'estudiant serà capaç d'entendre el principi de funcionament de qualsevol sistema de posicionament i conèixer els detalls dels principals sistemes, i també les seves prestacions i limitacions. L'estudiant també coneixerà els algorismes principals que formen un receptor, per la qual cosa el curs també serveix d'introducció al desenvolupament de receptors de posicionament.

Aquest material ofereix una cobertura molt àmplia de tots els tipus de sistemes de posicionament, des dels que tenen més importància actualment fins als que han tingut un impacte en el desenvolupament tecnològic al llarg de la història. A més, es tracten els sistemes terrestres, sistemes basats en satèl·lit, radar, etc.

En el mòdul "Sistemes radar", es tracta un tipus particular de sistemes de posicionament que se solen denominar *sistemes de radiodeterminació* o simplement *radar*. La seva característica principal és que des d'un únic terminal es poden determinar les posicions dels objectes que hi ha al voltant seu. La resta de sistemes de posicionament normalment es basen en els senyals transmesos per, o rebuts en, diversos terminals. Quan únicament es fa servir infraestructura terrestre, els sistemes es denominen *sistemes de radionavegació terrestre*, als quals es dedica la primera meitat del mòdul "Fonaments dels sistemes de radionavegació". Al principi d'aquest mòdul es descriuen els aspectes més bàsics de sistemes de coordenades, que és un tema recurrent en tot el que està relacionat amb el posicionament. En la segona meitat del mòdul "Fonaments dels sistemes de radionavegació", s'introdueixen els aspectes més generals dels sistemes de radionavegació que es basen en senyals transmesos des de satèl·lits. Els dos sistemes més importants d'aquest tipus són GPS i Galileo, als quals es dediquen els mòduls "El sistema GPS" i "Evolució de la navegació per satèl·lit:

Galileo i sistemes híbrids", respectivament. Al final del mòdul "Evolució de la navegació per satèl·lit: Galileo i sistemes híbrids", s'aprofita per a discutir alguns aspectes més avançats, com són els sistemes de millora o augmentació de GPS i Galileo, i els mètodes de posicionament basats en diversos sistemes i en la hibridació amb sensors inercials.

En aquest mòdul es descriuen els aspectes fonamentals que hi ha darrere de tots els sistemes de radionavegació i radiodeterminació, amb l'objectiu primordial d'entendre com s'acaba passant d'un conjunt de senyals electromagnètics a la determinació d'una posició. Es presenten els diferents tipus de mesures que poden relacionar-se amb la posició i com es calcularia aquesta per a diferents combinacions de mesures. Això ens porta finalment a presentar diferents criteris de classificació a alt nivell dels sistemes de posicionament.

Objectius

Els objectius principals d'aquesta assignatura són:

- 1.** Presentar els principis bàsics de funcionament dels sistemes que serveixen per a determinar una posició i oferir-ne una classificació.
- 2.** Oferir una visió general sobre els diferents sistemes radar que hi ha, les seves aplicacions més comunes i la seva evolució històrica.
- 3.** Descriure els diferents elements que formen un sistema radar i els paràmetres bàsics que el descriuen, i també els fonaments teòrics que el sustenten.
- 4.** Comprendre els efectes de propagació que pateix el senyal radar i les seves implicacions des del punt de vista pràctic. Calcular la precisió que ofereixen els senyals de radar.
- 5.** Presentar els sistemes de coordenades i projeccions més utilitzats en radionavegació.
- 6.** Descriure els sistemes terrestres de radionavegació basats en radiofars i sistemes hiperbòlics. Mostrar els sistemes utilitzats en aeroports per al control d'aproximació i ajuda per a l'aterratge d'aeronaus.
- 7.** Introduir els conceptes bàsics dels sistemes de radionavegació per satèl·lit i de mecànica orbital. Presentar els sistemes de navegació per satèl·lit de cobertura global i regional més importants.
- 8.** Descriure les arquitectures dels sistemes GPS i Galileo, i també els senyals corresponents.
- 9.** Detallar les modulacions i tècniques de multiplexatge utilitzades en els senyals modernitzats i analitzar l'impacte que tenen en el receptor.
- 10.** Descriure l'arquitectura d'un receptor GNSS, el funcionament dels blocs que l'integren i els fonaments matemàtics que permeten calcular la posició de l'usuari a partir de la solució de navegació.
- 11.** Presentar els fonaments dels receptors GNSS d'alta sensibilitat, aquells que operen en condicions de treball per a les quals el sistema GNSS no va ser dissenyat inicialment.

- 12.** Conèixer les fonts d'error que afecten el càlcul del posicionament i comprendre els mètodes de processament de dades que permeten combatre els efectes no desitjats provocats per aquestes fonts d'error.
- 13.** Formular diferents tipus d'equacions de navegació i deduir algorismes per a solucionar-les. Entendre els fonaments del posicionament diferencial i amb fases de portadora.
- 14.** Presentar els sistemes d'augmentació, centrant-se en els casos de DGPS i SBAS.
- 15.** Introduir el principi de funcionament dels receptors amb capacitat multifreqüència/multiconstel·lació i la hibridació amb sensors inercials.

1. Fonaments de la radionavegació

La necessitat de determinar la posició de persones, animals o objectes ha estat present durant tota la història. La necessitat és tan important que els mateixos éssers humans i els animals disposen de mecanismes biològics interns que els permeten localitzar-se i orientar-se en moltes circumstàncies. La llista de mètodes desenvolupats per a obtenir informació de posició és nombrosa.

Ja fa alguns mil·lennis, el posicionament i l'orientació eren possibles utilitzant dispositius similars a les brúixoles, mapes de corrents marins i de vents, o tècniques de navegació celestial. Aquest últim tipus, basat en l'observació del Sol i dels estels, ha estat durant segles la manera principal d'obtenir informació de posició. Fins i tot avui dia s'utilitza quan no hi ha cap altra alternativa disponible. Encara que la navegació basada en l'observació del cel i en la brúixola ja s'havia utilitzat durant almenys dos mil anys, aquestes tècniques van avançar significativament durant l'exploració dels oceans als segles XV i XVI. Aquesta va ser una època important en la història dels sistemes de posicionament. Es van desenvolupar artefactes, com l'astrolabi (i ja als segles XVII i XVIII, el quadrant i el sextant), que van permetre als navegants llegir la posició dels estels i, a partir d'aquí, calcular la seva pròpia posició amb l'ajuda dels mapes incomplets de l'època. Juntament amb tot això, van aparèixer també tècniques per a predir posicions futures partint de l'anàlisi dels moviments passats. Aquestes tècniques es van utilitzar habitualment per a navegar quan, per exemple, el cel estava cobert, i es complementaven en general amb el coneixement de punts àncora, com certs accidents de la costa. Són les tècniques precursors dels mètodes actuals de *dead reckoning* que empren sensors inercials.

Al segle XVIII, va ser possible mesurar una altra magnitud que és fonamental en el posicionament: el temps. Es va inventar el cronòmetre, que es va utilitzar àmpliament en la navegació marítima.

Al segle XIX es van descobrir les ones electromagnètiques, que, com és ben sabut, són la base dels sistemes de comunicacions sense fil. Però les ones electromagnètiques no han servit només per a comunicar-se, sinó que també són la base dels sistemes de posicionament més precisos que s'han desenvolupat fins avui i que lògicament s'han englobat sota el terme de *sistemes de radionavegació* o *radioposicionament*. El primer d'aquests sistemes que es va inventar es va denominar *radio direction finder*. Era un dispositiu que permetia detectar la direcció de la qual provenia un senyal observant la potència rebuda amb una antena directiva. El mateix principi de funcionament se segueix aplicant avui dia en les radiobalises que s'empren, per exemple, per a localitzar animals.

Cronòmetre

Com veurem al llarg de l'assignatura, molts dels sistemes de navegació actuals, com el GPS, són en part cronòmetres molt precisos.

Va ser a mitjan segle XX quan es van inventar els primers radars. En aquesta època es van produir grans avenços en la tecnologia i les tècniques de posicionament, que es van materialitzar en una gran varietat de sistemes terrestres de posicionament. Potser un dels més representatius ha estat el sistema LORAN per l'excel·lent precisió que proporcionava, la qual cosa va fer que estigués actiu fins a l'any 2010. LORAN es basava en la transmissió de senyals de diverses estacions de manera síncrona, de tal manera que permetia al receptor mesurar la diferència de distàncies a parells d'estacions.

A partir de 1960 es van començar a desenvolupar els sistemes de navegació basats en la transmissió per satèl·lit, i al final dels noranta el sistema GPS es va declarar operacional. El sistema GPS és el millor exemple de sistema de posicionament basat en senyals electromagnètics transmesos des de llargues distàncies. El GPS ha representat la vertadera revolució dels sistemes de navegació perquè ha permès obtenir la posició en qualsevol lloc amb visibilitat del cel i en qualsevol moment utilitzant un receptor relativament barat. El GPS va generalitzar la disponibilitat d'informació de localització, i arran d'això van sorgir moltíssimes i molt diverses aplicacions que utilitzen informació de posició.

Aplicacions dels sistemes de posicionament

Avui dia els sistemes de posicionament es fan servir en un gran nombre de sectors: transport, oci, turisme, geodèsia, aplicacions científiques (des de l'estudi de l'atmosfera fins a la mesura de la velocitat de propagació de partícules subatòmiques), seguretat (generació de barreres virtuals o *geofencing*), datació d'operacions financeres, sincronització de la xarxa elèctrica, publicitat, optimització de sistemes de telecomunicacions, etc.

El GPS és un sistema americà, i el sistema rus equivalent es denomina GLO-NASS. Tots dos són els dos representants actuals del concepte més general que s'ha denominat *sistema de navegació global per satèl·lit* o *global navigation satellite systems* (GNSS). Atès el nombre ingent d'activitats esmentades a dalt que depenen de l'existència d'un sistema GNSS, aquests sistemes es consideren avui dia una infraestructura bàsica dels països, gairebé tan bàsica com podrien ser les autopistes o els aeroports. Per tant, molts països estan desenvolupant els seus sistemes GNSS propis, com és el cas de Galileo a Europa.

Els sistemes GNSS són avui dia els sistemes de posicionament per antonomàsia, però per la gran importància que té disposar d'informació de localització, s'observa la tendència a incloure en els sistemes de comunicacions funcionalitats de posicionament com a complement d'algunes de les limitacions que tenen els sistemes GNSS, bàsicament pel que fa a la recepció del senyal en entorns urbans o interiors.

En els dos apartats següents presentarem els fonaments en què es basen d'una manera o altra tots els sistemes de posicionament. Seguidament, proporcionarem alguns criteris per a classificar els sistemes i intentar posar cert ordre en la gran varietat de sistemes que s'han desenvolupat al llarg de la història.

Nota

Vista la importància dels sistemes GNSS, aproximadament la meitat d'aquesta assignatura estarà dedicada a estudiar aquests sistemes, en particular el GPS i el Galileo.

D'una manera qualitativa, es pot pensar que la funció d'un sistema de radionavegació és generar uns senyals electromagnètics, dels quals es pot extreure informació sobre la posició d'alguns dels equips involucrats en la generació o recepció dels senyals. Per tant, conceptualment, en el procés d'obtenció de la posició s'ha de passar de senyals electromagnètics a unes coordenades. Aquesta transformació, que en certa manera pot semblar sorprenent, es pot visualitzar en dos passos. El primer consisteix a mesurar certs paràmetres del senyal electromagnètic. En el segon s'explota la relació que tenen aquests paràmetres amb les coordenades per a estimar aquestes últimes. Hi ha múltiples opcions per a ambdós passos, i les presentarem en els apartats següents.

Nota

A mesura que es vagi avançant en els mòduls següents, podeu intentar recordar el que s'explica aquí i reflexionar sobre com cadascun dels sistemes concrets que s'explicaran correspon a una combinació de determinades opcions per a cadascun dels passos.

2. Tipus de mesures

En aquest apartat descriurem els diferents paràmetres físics dels senyals que després podran ser relacionats amb la posició. Malgrat la gran varietat de sistemes de posicionament, la majoria acaba utilitzant mesures que poden ser d'uns quants tipus, els quals es presenten a continuació.

2.1. Potència

És habitual referir-se a aquest tipus de mesures com a *RSS* (*received signal strength*). Aquesta mesura és útil perquè està relacionada amb la distància entre transmissor i receptor.

De manera senzilla, es pot dir que la dependència entre l'*RSS* en dBW i la distància d és:

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

en què α és una constant que depèn, entre altres coses, de la potència transmesa i dels guanys de les antenes del transmissor i receptor, i γ és conegut com a *path loss exponent* i depèn de les condicions de propagació.

Constant γ

La constant γ és igual a 2 en l'espai lliure, però pot prendre valors en un rang [1, 5] o fins i tot major que 5 si els senyals es propaguen a l'interior d'edificis o en qualsevol altre entorn complex.

L'expressió anterior pretén únicament il·lustrar de manera simple la relació entre la magnitud física (*RSS*) i una magnitud més relacionada amb la geometria o la posició (la distància). En la pràctica hi pot haver molts efectes (esvaïments de gran i petita escala, propagació multicamí, bloqueig del senyal directe, soroll de mitjana, etc.) que fan que l'expressió 1 sigui en general merament aproximada.

2.2. Temps d'arribada (TOA)

El temps d'arribada¹ és una mesura que permet obtenir el temps (o retard) de propagació del senyal entre el transmissor i el receptor. Si aquest retard es multiplica per la velocitat de propagació del senyal, s'obté una mesura de la distància entre ambdós dispositius (d), com indica l'expressió 2.

⁽¹⁾En anglès, *time of arrival* (TOA).

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

en què t_{tx} representa l'instant en què es va transmetre el senyal, el qual es rep en l'instant TOA, i c és la velocitat de propagació.

Com s'observa en l'expressió anterior, perquè el temps d'arribada del senyal sigui realment útil i permeti obtenir el retard de propagació (és a dir, $\text{TOA} - t_{tx}$) és necessari, d'una banda, conèixer l'instant de transmissió del senyal, i de l'altra, que les escales de temps del transmissor i del receptor siguin les mateixes (o si són diferents, que ho siguin d'una manera coneguda).

Aquestes condicions no són fàcils d'aconseguir, i això fa que els sistemes basats en TOA tinguin una complexitat afegida. Sovint es presenten els sistemes GNSS com a sistemes que utilitzen mesures TOA. No obstant això, les mesures de TOA utilitzades en GNSS no proporcionen directament la distància, sinó que inclouen un terme addicional que s'ha de determinar. A causa de la complexitat afegida que sol dur associada l'ús de les mesures de TOA, hi ha bàsicament dues alternatives per a obtenir estimacions de distància a partir dels retards de propagació. Una són les mesures de TDOA, que veurem a continuació, i una altra són les mesures del retard d'anada i tornada del senyal entre dos objectes. En aquesta última alternativa es basen els sistemes radar (en la qual els dos objectes involucrats són el radar i el blanc). En la mesura del retard d'anada i tornada, un mateix equip fa de transmissor i receptor, i d'aquesta manera s'elimina automàticament el problema de la sincronització de les dues escales de temps que s'ha comentat prèviament.

També es pot obtenir el retard de propagació del senyal a partir de mesures de la fase d'aquest, que es poden denominar POA (fase d'arribada o *phase of arrival*), encara que no és un terme tan habitual com TOA, que de vegades engloba també les mesures de fase. Les mesures POA, a més de dur associats els mateixos requeriments de sincronització de les escales de temps, tenen la dificultat afegida de l'ambigüitat intrínseca de les mesures de fase, encara que com a contrapartida són en general més precises.

2.3. Diferència de temps d'arribada (TDOA)

Una mesura de la diferència de temps d'arribada² és la diferència dels instants d'arribada a un receptor de dos senyals emesos cadascun d'ells per un transmissor diferent. També es pot generar a partir d'un únic senyal enviat per un transmissor i rebut en dos receptors. Conceptualment, ambdós casos són similars, encara que considerarem en els comentaris que segueixen únicament el primer cas per claredat. La TDOA, escalada adequadament per la velocitat de propagació, proporciona la diferència de les distàncies del receptor als dos

Vegeu també

Per saber més sobre les mesures de TOA utilitzades en GNSS podeu veure el mòdul "El sistema GPS".

Vegeu també

En el mòdul "El sistema GPS" veureu que les mesures POA són en general més precises.

⁽²⁾En anglès, *time difference of arrival* (TDOA).

transmissors. Perquè això sigui així, és necessari que els dos transmissors transmetin els senyals de manera sincronitzada, però almenys s'evita el requisit que els transmissors i el receptor estiguin sincronitzats com passava amb els TOA.

2.4. Desviació de freqüència

El receptor també pot mesurar la freqüència Doppler del senyal rebut o la diferència de freqüències Doppler de dos senyals. Tot i que tecnològicament la mesura de freqüències o d'instants d'arribada té implicacions molt diferents, conceptualment és similar al TOA o TDOA. La freqüència Doppler es pot interpretar com la variació del TOA amb el temps. Així com el TOA indica la distància entre transmissor i receptor, la freqüència Doppler indica com varia la distància entre tots dos o, el que és el mateix, la velocitat relativa entre transmissor i receptor.

2.5. Angle d'arribada (AOA)

A diferència dels casos anteriors, de l'angle d'arribada no es dedueix un valor de distància, sinó que el receptor obté la direcció en què és el transmissor. Aquesta direcció es pot calcular comparant els retards o desfasaments del senyal rebut en diverses antenes de què disposi el receptor. O bé, si aquestes antenes tenen diagrames de radiació diferents i dependents de l'angle, es poden comparar les potències rebudes en cadascuna d'elles. De tota manera, hi ha altres maneres molt diferents d'obtenir l'AOA, i algunes d'elles són autèntics exemples paradigmàtics d'enginyeria, com ara el sistema VOR o l'MLS.

La mesura del valor absolut de l'AOA pressuposa que el receptor que el mesura té accés a alguna referència que li indiqui l'orientació del sistema de coordenades. És a dir, si el receptor determina que l'AOA d'un senyal és 30° , ha de saber respecte a quina direcció es mesuren aquests 30° .

Hi ha ocasions en les quals no es disposa d'aquesta referència, en aquest cas únicament té utilitat fer mesures diferencials d'angle d'arribada. En aquesta situació se sol parlar d'ADOA (*angle difference of arrival*), que correspon a la diferència entre els angles d'arribada de dos senyals i és evidentment una mesura independent de l'orientació del sistema de coordenades.

2.6. Proximitat

Les mesures que acabem de comentar (TOA, POA, TDOA, freqüència Doppler, AOA, ADOA) són la base de qualsevol sistema de posicionament que utilitzi mesures de distància, velocitat o angle. No obstant això, es pot parlar així mateix d'altres tipus d'observacions que també estan relacionats amb la posició, encara que no estiguin directament relacionats amb paràmetres concrets dels senyals electromagnètics. La proximitat és un exemple. Per això s'entén la recepció d'un determinat senyal (per exemple, d'una estació base de telefonia mòbil o d'un punt d'accés Wi-Fi), que serveix per a delimitar la regió en què

DOA

L'angle d'arribada (*angle of arrival*, AOA) també és conegut per les sigles en anglès de *direction of arrival* (DOA).

Vegeu també

Els sistemes VOR i MLS es descriuen en el mòdul "Sistemes de radionavegació" d'aquesta assignatura.

RFID

El posicionament mitjançant RFID també es basa en aquest concepte senzill, ja que atès el curt abast de RFID, la recepció d'un senyal de RFID indica de manera automàtica que el lector i la targeta RFID són molt a prop.

és el receptor. Això sembla un mecanisme massa simple, però realment s'ha utilitzat en la pràctica de xarxes cel·lulars (s'ha denominat el *mètode del cell ID*) i és la base del posicionament amb Wi-Fi del reeixit sistema de Skyhook.

2.7. Altres tipus d'observacions

Altres tipus d'observacions que no estan relacionades ni amb la distància ni amb l'orientació també poden ser útils per al posicionament. Alguns exemples són la resposta impulsional del canal o la potència rebuda (simplement el valor com a tal, sense relacionar-ho amb la distància). La forma d'obtenir informació de posició a partir d'aquestes observacions es denomina *fingerprinting*.

Vegeu també

El *fingerprinting* es tracta en l'apartat 3 d'aquest mòdul.

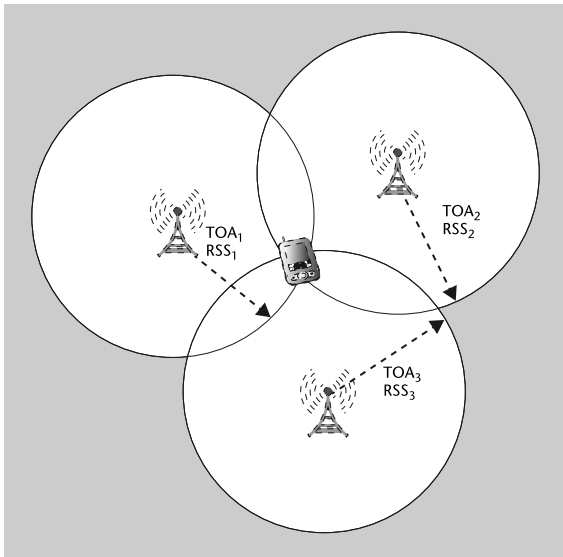
3. Mètodes de posicionament

El segon pas en el procés de càlcul de la posició consisteix a relacionar un conjunt de mesures d'un o més dels tipus que acabem de descriure en l'apartat anterior amb la posició mateixa, que és la incògnita del nostre problema. Les relacions entre les mesures i la posició són les que ens permetran obtenir els valors de les coordenades, i condueixen habitualment a problemes geomètrics. És impossible descriure totes les opcions possibles, ja que n'hi ha tantes com combinacions possibles dels tipus de mesures. No obstant això, descriurem a continuació les més rellevants.

3.1. Mesures únicament de TOA o RSS

Aquesta alternativa es denomina també *mètode rho-rho* o *lateration*. Cadascuna de les mesures de TOA determina una circumferència (en posicionament en 2D) o una superfície esfèrica (en 3D). La posició serà donada pel punt d'intersecció de diverses circumferències o superfícies esfèriques (figura 1). Pot entendre's que GPS utilitza aquest mètode de posicionament (amb alguna excepció que veurem) o també el següent.

Figura 1. Posicionament mitjançant mesures de distància



3.2. Mesures únicament de TDOA

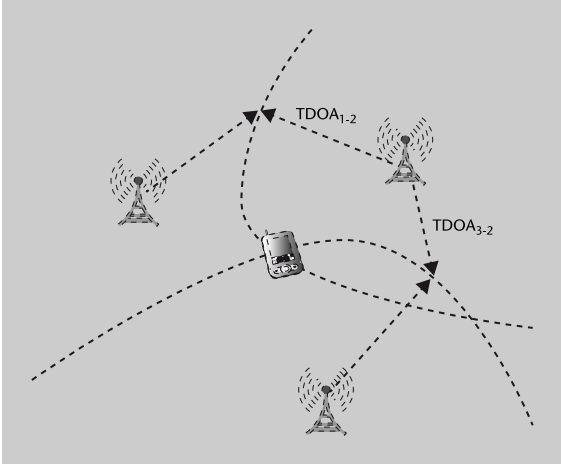
En aquest cas, una mesura de TDOA, també conegut com a *posicionament hipèrbolic*, es tradueix en el fet que la posició que s'ha de calcular està sobre una determinada hipèrbola (en 2D) o superfície hiperbòlica (en 3D), els focus de la qual són les dues estacions transmissores (o receptors si el que s'ha de posicionar és el transmissor).

Hipèrbola

Recordeu que una hipèrbola és el lloc geomètric dels punts dels quals les distàncies a dos punts fixos difereixen en un cert valor.

En aquest cas, la determinació de la posició consistirà a calcular la intersecció de diverses hipèrboles (figura 2). Els sistemes Omega i LORAN són sistemes de posicionament hiperbòlic.

Figura 2. Posicionament mitjançant mesures de diferència de distància

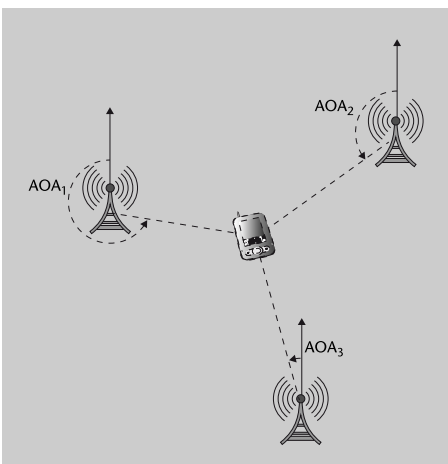


3.3. Mesures únicament d'AOA

En les mesures únicament d'AOA, conegut també com a *mètode tetha-tetha* o *angulation*, cada mesura d'angle determina una recta sobre la qual és el terminal, la posició del qual serà donada per tant per la intersecció de diverses rectes (això s'il·lustra en la figura 3).

El terme habitual de triangularització (*triangulation*) es refereix a qualsevol mètode de *lateration*, *angulation*, posicionament hiperbòlic o combinacions entre ells.

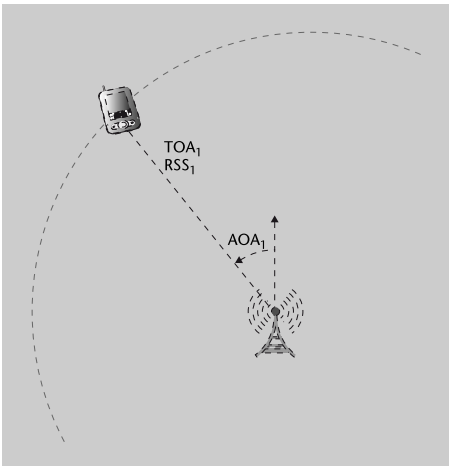
Figura 3. Posicionament mitjançant mesures d'AOA



3.4. Mesures de TOA (o RSS) i AOA

En les mesures de TOA (o RSS) i AOA (conegut com a *mètode rho-tetha* o *hybrid angulation and lateration*), és clar que la posició serà donada per la intersecció de circumferències i rectes. És interessant observar que una única mesura de TOA i una d'AOA preses des d'un únic punt són suficients per a posicionar-se (figura 4). L'AOA determina la direcció en la qual està situat l'objecte que s'ha de posicionar i el TOA en determina la distància. Sabent la direcció i la distància, s'obté la posició. És el mètode de posicionament més intuïtiu que hi ha, i és la base dels sistemes radar. També seria el que s'obtindria en combinar mesures dels sistemes VOR i DME. Geomètricament correspon a la intersecció d'una superfície esfèrica amb una recta. De manera similar es poden combinar mesures de TDOA i AOA (el que es denominaria *hybrid angulation and hyperbolic locatization*).

Figura 4. Posicionament mitjançant mesures d'angle i distància



3.5. Altres mètodes

Els mètodes anteriors es basen a explotar la relació entre les mesures dels paràmetres dels senyals, les distàncies o angles, i les coordenades de la posició. Però els mètodes de posicionament no es limiten a problemes geomètrics, sinó que poden tenir un enfocament molt més ampli.

Un clar exemple és la tècnica de *fingerprinting*³, que a grans trets funciona de la manera següent, i que s'il·lustra en la figura 5. Prèviament s'ha generat una base de dades en què es guarden les observacions que es fan en un conjunt de posicions conegudes. Aquestes observacions poden ser gairebé de qualsevol tipus:

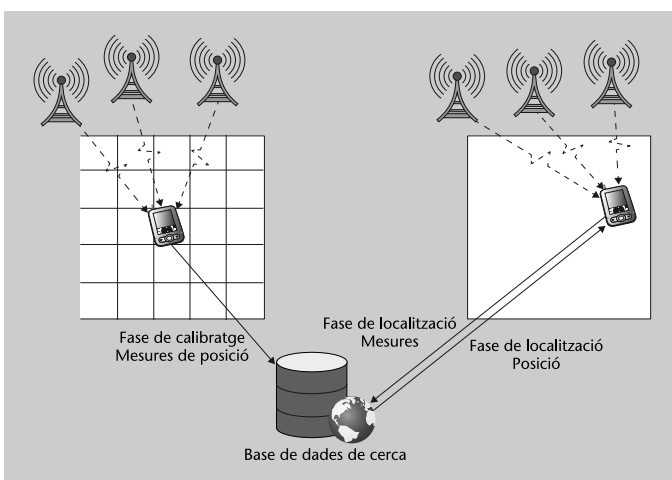
- Les RSS mesurades a diversos punts d'accés de Wi-Fi.
- Les respostes impulsional dels canals que afecten els senyals provinents de diverses estacions base.
- Les imatges captades per una càmera.

⁽³⁾ *Fingerprinting* es pot traduir com a anàlisi d'empremtes digitals.

- Etc.

A l'hora de calcular la posició d'un terminal, aquest fa les observacions que s'utilitzin en el sistema en qüestió i es comparen amb les que hi ha a la base de dades. Les posicions corresponents a les entrades de la base de dades que continguin les "petjades" més similars a les observacions que està prenent el terminal s'utilitzaran per a calcular-ne la posició. De nou, aquí hi ha múltiples alternatives, des de la més simple, consistent a triar l'entrada més propera, a calcular una mitjana ponderada de les posicions corresponents a diferents entrades, on els pesos estan inversament relacionats amb la diferència entre les mesures i les petjades de la base de dades.

Figura 5. Posicionament mitjançant *fingerprinting*



Per concloure aquest apartat plantejarem un exemple molt il·lustratiu de la diferència que hi ha entre les mesures (el que es va presentar en l'apartat 2) i els mètodes de posicionament (presentats en aquest apartat), i del fet que ambdós elements són necessaris per a obtenir finalment la posició.

Exemple

Imaginem un receptor que fa mesures de RSS amb els senyals de diversos transmissors. Hi ha diverses maneres d'utilitzar aquestes mateixes mesures per a obtenir la posició. Una opció és plantejar un esquema *rho-rho* o de *lateration*, en què s'aprofiti la relació que hi ha entre cada RSS i la distància transmissor-receptor. En l'altre extrem hi ha l'opció més senzilla possible, consistent a prendre com a posició del receptor la de transmissor associat a una RSS més gran. Una alternativa menys radical seria ponderar les posicions dels transmissors en funció de l'RSS (es denomina *tècnica del centroide*). I finalment, es podrien utilitzar les RSS mesurades en un mètode de *fingerprinting* si es disposa d'una base de dades adequada.

4. Classificació dels sistemes de radionavegació

Atesa la gran varietat de sistemes de radionavegació que hi ha, és difícil trobar una classificació que els englobi a tots d'una manera totalment coherent. No obstant això, presentarem diferents criteris que permeten almenys identificar grans grups i que, al mateix temps, són útils per a posar en context els diferents mòduls de l'assignatura.

Una gran primera divisió dels sistemes de radionavegació es pot dur a terme tenint en compte si utilitzen senyals de radiofreqüència transmesos des d'equips terrestres o bé des de satèl·lits.

Un altre criteri de classificació és la cobertura, que pot ser global (per exemple, que el sistema es pugui utilitzar en qualsevol lloc de la Terra) o bé local (per exemple, limitat a una regió, país, continent, etc.).

Vegeu també

Els sistemes de radionavegació basats en equips terrestres s'estudien en els mòduls "Sistemes radar" i "Sistemes de radionavegació". En aquest últim mòdul s'introduiran els sistemes basats en satèl·lit, que després s'estudiaran detalladament en els mòduls "El sistema GPS" i "Evolució de la navegació per satèl·lit: Galileo i sistemes híbrids".

Per l'arquitectura mateixa del sistema, és més factible que els sistemes terrestres siguin locals i els sistemes per satèl·lit siguin globals, però no es tracta d'una relació biunívoca ni molt menys.

En el mòdul "Sistemes de radionavegació" es veurà que la majoria de sistemes terrestres tenen cobertura local, com els radiofars i els sistemes d'aproximació i aterratge, però que també hi ha sistemes de cobertura potencialment global com l'Omega o LORAN. En el mòdul "El sistema GPS" es presentarà detalladament el sistema GPS, que té com una dels seus grans avantatges el fet de ser un sistema global (com el seu nom indica). Galileo, que s'estudiarà en el mòdul "Evolució de la navegació per satèl·lit: Galileo i sistemes híbrids", també està destinat a ser un sistema global. Però en aquest últim mòdul s'estudien també altres sistemes, EGNOS i WAAS, que tot i estar basats en satèl·lit són sistemes regionals perquè estan destinats a ser un complement a GPS en certes regions de la Terra. Un altre tipus de complement que poden tenir els sistemes GNSS prové dels sistemes de comunicacions que hi ha a la zona en la qual és el receptor. Aquest és el concepte d'A-GNSS (*assisted GNSS*). Un receptor GNSS pot ajudar-se d'un sistema de comunicacions per obtenir informació més precisa que la que envia el sistema GNSS mateix, per conèixer l'estat de la constel·lació GNSS i facilitar així el processament dels senyals GNSS, per rebre correccions de les mesures, etc.

Fins ara hem abordat únicament sistemes de posicionament no cooperatius, que són l'objecte d'aquesta assignatura. En aquests sistemes, si hi ha diversos terminals que s'han de posicionar, el càlcul es fa de manera independent per a cadascun d'ells. Per tant, el problema de posicionar un terminal és independent del problema de posicionar un altre terminal que estigui a la zona. No obstant això, també seria possible que els terminals a posicionar cooperessin d'alguna manera. Quan això ocorre es diu que es tracta d'un sistema de posicionament cooperatiu.

En un sistema de posicionament cooperatiu, els sensors (utilitzem ara aquest nom en lloc de *terminal* perquè és més habitual en aquest context) no es posicionen de manera independent entre ells, utilitzant únicament mesures fetes sobre senyals transmesos per sensors la posició dels quals és coneguda (anomenats *sensors àncora*), sinó que també utilitzen mesures sobre els senyals transmesos per altres sensors la posició dels quals també s'ha de calcular. D'aquesta manera, es té un conjunt de mesures entre sensors que s'han de posicionar amb altres sensors que s'han de posicionar i amb sensors àncora, i les incògnites són el conjunt de coordenades dels sensors que s'han de posicionar, que es calculen de manera conjunta. El fet que les incògnites es calculin conjuntament és el que permet que els sensors cooperin, i que un sensor utilitzi senyals transmesos per un altre sensor les coordenades del qual també són part del problema.

En definitiva, el problema de posicionament cooperatiu es pot entendre com el càlcul simultani de la posició de tots els sensors d'una xarxa, en lloc de fer-ho per cada sensor individualment.

Si el càlcul del conjunt de coordenades es fa a terme per una única entitat que recull les mesures fetes per tots els sensors, el sistema és cooperatiu centralitzat. Quan cada sensor calcula les seves pròpies coordenades, però no de manera aïllada (perquè en aquest cas seria un sistema no cooperatiu), sinó intercanviant informació amb la resta de sensors, el sistema es denomina *cooperatiu distribuït*, i pot aconseguir en circumstàncies determinades la mateixa solució que la versió centralitzada, però evita que tot el càlcul es faci en una entitat central.

Nota

Els sistemes de posicionament cooperatiu han suscitat bastant interès últimament, en paral·lel amb el desenvolupament de les xarxes sense fil de sensors, però el seu estudi excedeix els objectius de l'assignatura.

5. Sistemes de radiodeterminació

L'objectiu principal dels sistemes de radiodeterminació és proporcionar informació sobre la localització d'un determinat objectiu, ja sigui fix o mòbil. Es tracta, per tant, de sistemes que actuen de manera externa a l'objectiu, i que sovint, més que la posició exacta d'aquest, proporcionen informació sobre la distància, velocitat o direcció en la qual està situat l'objectiu respecte de les coordenades del sistema de radiodeterminació.

Aquesta informació de localització és utilitzada habitualment en aplicacions de monitoratge, control i vigilància d'objectius, la qual cosa distingeix els sistemes de radiodeterminació dels de radionavegació. En efecte, els sistemes de radionavegació tenen com a finalitat proporcionar informació de localització a l'objectiu o terminal mòbil mateix, el qual passa a ser l'element central del sistema, i utilitza aquesta informació per al seu ús propi.

Dins dels sistemes de radiodeterminació, l'exemple més conegut és el dels sistemes de *radio detection and ranging* (radar), els quals es basen en la transmissió i recepció de senyals electromagnètics amb la finalitat de detectar i localitzar la presència d'objectius dins d'una certa zona de cobertura.

El principi d'operació dels sistemes radar és ben senzill i es basa a mesurar certs paràmetres del senyal reflectit en l'objectiu, com, per exemple, el temps d'arribada o la freqüència Doppler.

El processament del senyal rebut varia en funció del tipus de sistema radar. Es distingeix principalment entre radars d'ona contínua i radars polsants (Skolnik, 2001).

Les primeres implementacions de sistemes radar, desenvolupades durant el primer terç del segle XX, estaven basades en arquitectures de transmissió contínua. En aquest cas, tant el senyal transmès com el senyal rebut coexisteixen en temps, i la manera habitual de distingir l'una de l'altra és aprofitar el fet que el senyal rebut posseeix una freqüència diferent de la transmesa, com a conseqüència de l'efecte Doppler, a causa del moviment relatiu de l'objectiu respecte al radar.

Els sistemes de radar continu són, doncs, sistemes que exploten l'efecte Doppler per a determinar la distància i velocitat de l'objectiu.

Vegeu també

Els sistemes de ràdio s'estudien en el mòdul "Sistemes radar".

L'evolució dels radars continus va desembocar en el desenvolupament de radars polsants, que utilitzen un esquema de transmissió més eficient a partir de l'emissió de fraccions d'energia durant un temps de durada limitada, i repetint aquestes emissions de manera periòdica. Així, doncs, no és necessari utilitzar una antena per a transmissió i una altra per a recepció, com en el cas de radars d'ona contínua, sinó que una mateixa antena pot operar com a transmissora durant l'emissió del pols, i com a receptora mentre espera al fet que arribi l'instant per a transmetre el pols següent.

Com a contrapartida dels sistemes de radar polsants, apareix el concepte d'*ambigüïtat en distància* i *ambigüïtat en velocitat*.

Si bé en el cas dels sistemes radar l'objectiu actua com un element passiu, simplement reflectint el senyal transmès pel radar, hi ha sistemes de radiodeterminació en què l'objectiu es converteix en element actiu. Aquest és el cas dels sistemes de radiodeterminació per al control de trànsit marítim, com l'*automatic identification system* (AIS), amb el qual els vaixells emeten senyals per a alertar de la seva presència en una certa posició juntament amb informació d'identificació per a ser reconeguts (Tetreault, 2005). A causa de les condicions de transmissió en mar obert, l'abast dels sistemes AIS sol ser inferior a 100 km en el pla horitzontal, no obstant això, poden arribar a aconseguir els 400 km de cobertura en el pla vertical. Això permet que els senyals AIS puguin ser interceptats per satèl·lits d'òrbita baixa (LEO, *low-earth orbit*) que s'encarreguen de redistribuir-les a un centre de control, on es procedeix a representar gràficament els diferents vaixells que hi ha en una zona geogràfica determinada. Tot i que la informació disponible no és utilitzada pròpiament amb finalitats de navegació, sí que és útil per a evitar col·lisions, identificar els vaixells i per a fer-la servir en tasques de recerca i rescat.

Un principi d'operació similar al del sistema de radiodeterminació AIS és utilitzat també pel sistema de salvament Cospas-Sarsat, el qual està basat en una xarxa de satèl·lits que s'encarreguen de rebre el senyal emès per radiobalises d'emergència (Cospas-Sarsat Secretariat, 2009). Quan aquesta radiobalisa és activada per un usuari, el senyal captat pel satèl·lit més proper es distribueix cap a les estacions de control terrestre, on s'envia un missatge a un centre de control encarregat de verificar la veracitat de l'alarma, i activar els protocols de salvament segons la posició i nacionalitat de la radiobalisa.

Vegeu també

Els conceptes d'*ambigüïtat en distància* i *ambigüïtat en velocitat* s'estudien en el mòdul "Sistemes radar" d'aquesta assignatura.

Tant el sistema AIS com el sistema Cospas-Sarsat estan pensats per a la radiodeterminació d'objectius fixos o de baixa velocitat. En el cas d'objectius a gran velocitat, com el cas d'aeronaus, hi ha també sistemes de radiodeterminació que permeten, en aquest cas, evitar la col·lisió entre aeronaus a mitjana i baixa altura. Aquest sistema, conegut com a *ACAS* per les sigles en anglès d'*airborne collision avoidance system*, es basa en l'ús de radars secundaris que envien senyals d'interrogació a les aeronaus per a la seva identificació (Law, 1999). A partir del senyal de resposta rebut des de l'aeronau, el radar secundari és capaç d'identificar-la i de determinar-ne la distància i la velocitat, utilitzant el mateix principi d'operació que el d'un sistema radar tradicional. Una vegada analitzada aquesta informació, el sistema pot avisar el pilot sobre possibles conflictes amb altres aeronaus properes perquè així aquest pugui dur a terme les mesures correctores que siguin precises.

TCAS

Comercialment, el sistema ACAS està disponible únicament per mitjà del sistema TCAS (*traffic alert and collision avoidance system*), que és obligatori que s'implementi en totes les aeronaus civils que sobrevolen l'espai aeri dels estats membres de la Conferència Europea d'Aviació Civil (CEAC).

Resum

En aquest mòdul s'han presentat els fonaments més generals i bàsics dels sistemes l'objectiu dels quals és determinar una posició. S'ha vist que el càlcul de la posició es pot dividir en dues fases. Una primera fase, que consisteix a mesurar certs paràmetres dels senyals electromagnètics, i una segona fase, en què es relacionen aquests paràmetres amb les coordenades que s'han de determinar. S'han presentat les mesures més habituals com TOA, AOA, RSS, etc., i també d'altres, com la proximitat, que tenen un significat una mica menys concret. Seguidament s'ha relacionat cadascuna d'aquestes mesures amb una magnitud geomètrica, com pot ser la distància, l'angle, etc., i a continuació s'ha esbossat la manera com es pot obtenir la posició quan es disposa de diferents combinacions d'aquestes magnituds geomètriques. Finalment, s'ha presentat una classificació dels diferents sistemes de radionavegació. De manera similar a com s'ha fet amb els sistemes de radionavegació, en l'últim apartat del mòdul s'han plantejat els fonaments dels sistemes de radiodeterminació (o radar) i la seva classificació.

Abreviatures

- 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** Conferència Europea d'Aviació Civil
- DOA** Direction Of Arrival
- EGNOS** European Geostationary Navigation Overlay Service
- GNSS** Global Navigation Satellite System
- GPS** Global Positioning System
- ANEU** 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

Bibliografia

- Bensky, A.** (2008). *Wireless Positioning: Technologies and Applications*. Artech House.
- Cospas-Sarsat Secretariat** (2009, octubre). "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* (2a. 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.** (1999, gener). "ACAS II Programme". *ACASA WP6.1*.
- Skolnik, M. I.** (2001). *Introduction to RADAR Systems* (3a. 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, pàg. 17-23).