

Evolució de la navegació per satèl·lit: Galileo i sistemes híbrids

José López Vicario
Gonzalo Seco Granados

PID_00185450



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	6
1. Sistemes d'augment	7
1.1. GPS diferencial	7
1.2. WAAS	14
1.3. EGNOS	18
2. El sistema Galileo	21
2.1. Descripció del sistema Galileo	21
2.1.1. Serveis Galileo	22
2.1.2. Bandes freqüencials	23
2.1.3. Arquitectura Galileo	24
2.2. Estructura del senyal Galileo	28
2.2.1. Senyal Galileo E1	29
2.2.2. Senyal Galileo E5	39
2.2.3. Senyal Galileo E6	44
2.3. Arquitectura del receptor	46
3. Sistemes multifreqüència/multiconstel·lació	51
4. Sistemes híbrids basats en sensors inercials	54
4.1. Sistemes INS	54
4.2. Filtre de Kalman	55
4.3. Esquemes d'hibridació	59
Resum	67
Exercicis d'autoavaluació	73
Solucionari	76
Abreviatures	77
Bibliografia	79
Annex	80

Introducció

Tal com s'ha presentat en el mòdul "El sistema GPS", un receptor convencional GPS és capaç d'oferir precisions millors de 10 m el 95% del temps. No obstant això, hi ha aplicacions que requereixen més prestacions, com són, per exemple, les aplicacions *safety-of-life*, i l'aviació civil és un dels casos més representatius, en què la seguretat és un aspecte crític i es requereixen nivells alts de precisió, integritat i una disponibilitat contínua del sistema. Per aquest motiu, han anat apareixent en els últims anys una sèrie de sistemes complementaris i alternatius a GPS.

Aquest mòdul té com a objectiu presentar aquests sistemes, i se centra en concret en els més importants. En primer lloc, en l'apartat 1 es descriuen els sistemes d'augment, els quals tenen com a objectiu millorar les prestacions de l'usuari GPS proveint-lo amb informació addicional sobre les mesures obtingudes amb els senyals dels diferents satèl·lits. D'una banda, es presenta el concepte de GPS diferencial (*differential GPS*, abreujat com a DGPS), basat en l'ús d'estacions terrestres i, seguidament, es presenten els sistemes SBAS (*satellite-based augmentation systems*), els quals segueixen el mateix concepte però són capaços d'augmentar la cobertura del sistema d'augment en utilitzar una constel·lació de satèl·lits.

En l'apartat 2 es presenta la solució de navegació per satèl·lit europea, coneguda amb el nom Galileo, que va néixer amb l'objectiu d'oferir prestacions millors que GPS, i inclou a més un mecanisme d'integritat per a poder satisfer els requisits de les aplicacions *safety-of-life*. Es descriuen detalladament els senyals que transmet Galileo en les tres bandes freqüencials que utilitza: E1, E5 i E6, i es dedica atenció especial als aspectes més nous, i també a l'impacte que tenen en el receptor. Amb referència al primer, es presenten els senyals BOC i també les dues maneres enginyoses que utilitza Galileo per a aconseguir senyals d'envolupant constant, que són les tècniques Interplex en E1 i E6, i AltBOC en E5. S'il·lustra també l'espectre dels diferents senyals. La utilització de senyals BOC té un impacte en el receptor perquè la correlació d'aquests senyals presenta màxims locals que poden generar punts d'enganxament falsos en el llaç de seguiment de codi. Es proporciona una classificació de les diferents tècniques que hi ha per a combatre l'ambigüitat causada per aquestes màximes locals i es descriu breument el principi de funcionament de les tècniques de cada família.

Finalment, s'introdueixen una sèrie de tècniques dissenyades per a la millora dels sistemes de navegació per satèl·lit basades en la utilització de receptors amb capacitat multifreqüència/multiconstel·lació (apartat 3) o en la hibridació dels senyals GNSS amb mesures de sensors inercials (apartat 4).

Objectius

Els objectius d'aquest mòdul són els següents:

- 1.** Presentar els sistemes d'augment, centrant-se en els casos de DGPS i SBAS.
- 2.** Descriure el sistema Galileo, presentant l'arquitectura del sistema, els serveis oferts.
- 3.** Exposar els paràmetres bàsics dels senyals de Galileo i explicar les modulacions i tècniques de multiplexació que adopta i que no estaven presents en el senyal bàsic de GPS. Analitzar l'impacte que té l'ús de senyals BOC en el receptor i esbossar les tècniques que hi ha per a combatre l'existència de punts d'enganxament falsos del llaç de codi.
- 4.** Introduir el principi de funcionament dels receptors amb capacitat multi-freqüència/multiconstel·lació.
- 5.** Presentar la tècnica d'hibridació de senyals GNSS amb mesures de sensors inercials.

1. Sistemes d'augment

Els sistemes d'augment són aquells sistemes que proporcionen als receptors GPS informació addicional perquè millorin el càlcul de la posició.

La informació que els sistemes d'augment proporcionen als receptors GPS pot ser des de dades sobre les fonts d'error del senyal, com el retard ionosfèric, derives en els rellotges o errors en les efemèrides, fins a l'estat del senyal mateix. En aquest apartat, es presenten alguns dels sistemes d'augment més importants: el GPS diferencial, el sistema WAAS i el sistema EGNOS.

1.1. GPS diferencial

El mètode GPS diferencial¹ consisteix en l'ús d'una o més estacions de referència, situades en posicions conegudes, per a millorar la solució de posició del receptor de l'usuari.

⁽¹⁾En anglès, *differential GPS* (DGPS).

Aquestes estacions estan equipades amb (almenys) un receptor GPS i transmeten a l'usuari diferents tipus d'informació mitjançant un enllaç de comunicacions, utilitzant o bé enllaços de ràdio (amb freqüències per sota dels 300 kHz o en la banda L) o mitjançant la connexió a Internet. Concretament, s'envien les dades següents a l'usuari:

- Mesures de correcció de les pseudodistàncies, del rellotge del satèl·lit i de les efemèrides. En alguns casos, s'envien dades del rellotge i efemèrides que substitueixen les transmeses pel satèl·lit mateix.
- Mesures obtingudes per l'estació de referència, com per exemple, les pseudodistàncies i la fase de la portadora.
- Dades de la integritat del senyal del satèl·lit, com per exemple, indicacions quant a l'ús dels satèl·lits visibles o dades estadístiques sobre la precisió de les correccions enviades.
- Dades addicionals com la localització, l'estat i els factors meteorològics de l'estació de referència mateixa.

Bàsicament, aquest mètode explota el fet que l'estació de referència es troba en una posició coneguda i, per tant, és capaç d'obtenir, amb exactitud alta, el biaix de les mesures obtingudes dels satèl·lits visibles. En el cas que el receptor

de l'usuari es trobi proper a aquesta estació, es poden reduir aquells errors que estiguin correlats amb els errors observats en l'estació de referència. Alguns d'aquests errors són els següents:

1) Errors del rellotge del satèl·lit. L'error provocat per la imprecisió del rellotge del satèl·lit provoca el mateix efecte en les mesures de pseudodistància i de la portadora independentment d'on es trobi el receptor de l'usuari. Per tant, és un dels errors més fàcils de corregir, a més tenint en compte que la variació dels errors observats en el rellotge varia molt lentament, i s'obtenen valors de desviació d'Allan entre 3×10^{-12} i 6×10^{-12} s/s. En termes de pseudodistància, això es tradueix en variacions entre 1 i 2 mm/s.

Desviació d'Allan

La desviació d'Allan és una mesura utilitzada normalment per a caracteritzar l'estabilitat d'un oscil·lador (o rellotge). Considerant-se un oscil·lador amb la sortida següent:

$$y(t) = \sin(2\pi f_n t + \phi(t)) \quad (1)$$

en què f_n és la freqüència nominal de l'oscil·lador i $\phi(t)$ és l'error present en l'oscil·lador, el qual és variant amb el temps, es defineix la desviació d'Allan com:

$$\sigma_A(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2} E[(v_{k+1}(\tau) - v_k(\tau))^2]}$$

(2)

en què τ és el temps d'observació utilitzat per a mesurar la fracció de desviació instantània de la freqüència de l'oscil·lador respecte a la freqüència nominal, expressada com:

$$\sigma_A(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2} E[(v_{k+1}(\tau) - v_k(\tau))^2]} \quad (2)$$

i t_k és l'instant de mesura d'aquesta desviació instantània.

Exemple

Considerem que un usuari GPS vol corregir l'error del rellotge corresponent a un dels satèl·lits visibles i, per a això, utilitza la mesura de correcció facilitada per una estació de referència DGPS. Tenint en compte que la desviació d'Allan de l'estabilitat del rellotge d'aquest satèl·lit és de 4×10^{-12} s/s i que la informació proveïda per DGPS no conté errors, es demana el següent:

a) Determineu la contribució d'error en distància introduïda per la deriva del rellotge en el cas que la mesura de correcció es correspongui amb l'instant t_0 i s'apliqui en el receptor de l'usuari en l'instant $t_1 = t_0 + 30$ s.

b) Considerem que es defineix f_c com la freqüència utilitzada per l'estació de DGPS per a senyalitzar les mesures instantànies de correcció del rellotge. Determineu llavors el valor de f_c mínim necessari perquè la contribució d'error en distància introduïda pel rellotge sigui més petita que 0,5 m.

Solució

a) Abans de calcular quina és la contribució de l'error introduïda per la deriva del rellotge, hem de determinar quina és la variació de l'error expressada en metres per segon. Per a això, determinem la variació de pseudodistància per segon d'un senyal GPS, el satèl·lit del qual té una variació en el rellotge de 4×10^{-12} s/s, com:

$$\dot{\rho} = c\sigma_A(\tau) = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \times 4 \cdot 10^{-12} \text{ s/s} = 1,2 \text{ mm/s} \quad (3)$$

Fet això, es pot calcular l'error comès en l'instant $t_1 = t_0 + 30 \text{ s}$ de la manera següent. En primer lloc es considera que la correcció aplicada a partir de la informació del DGPS no conté errors i, per tant, l'error comès en l'instant t_0 és igual a 0 m. No obstant això, la correcció no és vàlida en l'instant t_1 a causa de la variació de l'error del rellotge. Utilitzant llavors la variació en pseudodistància calculada a dalt i tenint en compte el temps transcorregut, es pot obtenir l'error obtingut de la manera següent:

$$e_\rho = \dot{\rho}\Delta t = \dot{\rho}(t_1 - t_0) = 1,2 \text{ mm/s} \times 30 \text{ s} = 36 \text{ mm} \quad (4)$$

b) En aquest apartat s'ha d'obtenir quin és el temps màxim que pot transcórrer entre dues correccions de rellotge. És a dir, tenint en compte que aquest temps es pot expressar com Δt i en l'apartat anterior es va observar que l'error en pseudodistància corresponent a la deriva del rellotge estava determinat per $e_\rho = \dot{\rho}\Delta t$, un ha d'obtenir el valor de Δt que compleix la relació següent:

$$e_\rho = \dot{\rho}\Delta t \leq 0,5 \text{ m} \Rightarrow \Delta t \leq \frac{0,5 \text{ m}}{\dot{\rho}} = \frac{500 \text{ m}}{1,2 \text{ mm/s}} = 416,6 \text{ s} = 416,6 \text{ s} \approx 7 \text{ min} \quad (5)$$

Una vegada obtingut el temps entre mesures, es pot calcular f_c com la inversa d'aquest temps:

$$f_c = \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{416,6 \text{ s}} = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ Hz} \quad (6)$$

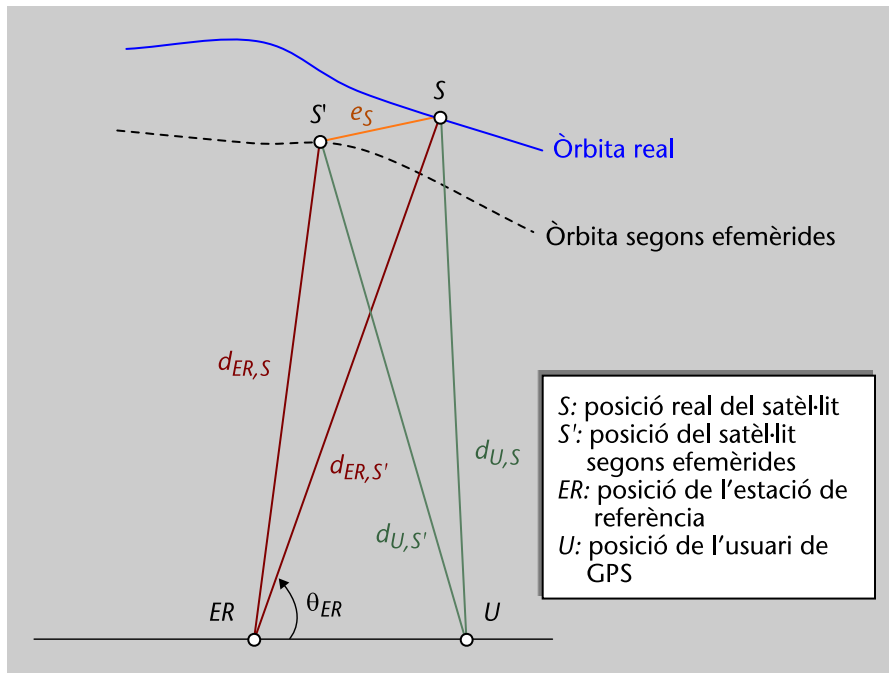
S'observa que la freqüència necessària per a senyalitzar la correcció de la deriva del rellotge és significativament baixa. Això és a causa que els errors observats en el rellotge varien molt lentament. No obstant això, tal com es veu a continuació en la part de teoria, aquest no és l'únic error que ha de ser corregit per DGPS.

2) Errors de predicció d'efemèrides. Les efemèrides que transmeten cada satèl·lit són en realitat prediccions calculades pel segment de control terrestre. Per tant, quan el receptor de l'usuari les utilitza per a calcular la posició del satèl·lit, aquesta pot patir un cert error. Tal com s'ha comentat anteriorment, l'estació de referència coneix amb exactitud la seva posició i pot fer una estimació de l'error induït per les efemèrides. No obstant això, aquest error sí que depèn de la posició del receptor en aquest cas (vegeu la figura 1). No obstant això, si l'usuari es troba proper a l'estació de referència, la diferència entre els errors observats és bastant baixa, ja que les línies de visió directa entre el satèl·lit i tots dos receptors són molt similars. Una aproximació per a la diferència d'errors existent, vàlida quan l'usuari i l'estació de referència es troben a menys de 1.000 km i l'angle d'elevació en què el satèl·lit es troba respecte a l'estació de referència, θ_{ER} , és més gran que 5° , és la donada per l'expressió següent (Kaplan, Hegarty; 2006):

$$e_{ER} - e_U \leq \frac{e_S}{d_{ER,S}} d_{ER,U} \sin^2 \theta_{ER} \quad (7)$$

en què $e_{ER} = d'_{ER,S} - d_{ER,S}$ i $e_U = d'_{U,S} - d_{U,S}$ són els errors entre les distàncies reals, $d_{ER,S}$ i $d_{U,S}$, i les estimades en l'estació de referència i l'usuari, $d'_{ER,S}$ i $d'_{U,S}$, respectivament; $d_{ER,U}$ és la distància existent entre l'estació de referència i l'usuari; i e_S és la distància existent entre la posició real del satèl·lit i la donada per les efemèrides. Quant a la variació temporal, sol estar entre 2 i 6 cm/min.

Figura 1. Variació de l'error de predicció d'efemèrides



Exemple

Calculeu una cota màxima per a la diferència d'errors existent entre l'error de predicció d'efemèrides observat en un receptor d'un usuari GPS i l'observat en una estació de referència DGPS. Per a això considereu el cas en què aquests errors es corresponen a un satèl·lit amb elevació més gran que 5° , si e_S és igual a 3 m i $d_{ER,U}$ igual a 100 km.

Solució

En primer lloc, s'ha de tenir en compte que el satèl·lit es trobarà a més de 20.000 km de l'estació de referència (és a dir, $d_{ER,U} > 20.000$ km), ja que l'òrbita d'un satèl·lit GPS té aproximadament 26.600 km de radi i el radi mitjà de la Terra és igual a 6.371 km. D'altra banda, de les dades del problema, se sap que $e_S = 3$ m, $d_{ER,U} = 100$ km i $\theta_{ER} > 5^\circ$. Per tant, es pot utilitzar la fórmula presentada en teoria, i s'obté que la diferència d'errors serà més petita que:

$$e_{ER} - e_U \leq \frac{e_S}{d_{ER,S}} d_{ER,U} \sin^2 \theta_{ER} \leq \frac{3 \text{ m}}{20.000 \text{ km}} 100 \text{ km} = 1,5 \text{ cm} \quad (8)$$

en el cas de considerar satèl·lits amb elevacions més grans que 5° . Noteu que per a obtenir la cota màxima s'ha tingut en compte que $\sin^2 \theta_{ER} \leq 1$.

3) Errors deguts a efectes troposfèrics. La velocitat de les ones electromagnètiques varia en travessar la troposfera depenent de la temperatura, pressió i humitat relativa. En aquest cas, la diferència d'errors observats en l'usuari i l'estació de referència també variarà amb la distància $d_{ER,U}$ en dependre aquests errors, entre altres paràmetres, de l'angle de la línia de visió directa existent entre el receptor GPS i el satèl·lit. En aquest cas en concret, l'error varia més ràpidament amb la distància que en el cas anterior, i s'han fet proves experimentals que mostren que es poden obtenir diferències d'errors de l'ordre de 40 cm en situacions amb $d_{ER,U}$ igual a 25 km i θ_{ER} més gran que 5° . En el cas que hi hagi una diferència d'altitud entre l'usuari i l'estació de referència, la diferència d'errors és encara més gran.

Exemple d'errors deguts a efectes troposfèrics

En el cas que l'usuari es trobi a 1 km per sobre de l'estació de referència (en el cas d'una aeronau, per exemple) la diferència d'errors pot ser de 2 m. La variació temporal en aquest cas depèn en gran mesura de l'angle d'elevació. Per a elevacions més grans que 10°, les variacions poden estar entorn de 64 cm/min, i poden arribar als 2 m/min en el cas d'elevacions iguals a 5°.

4) Errors per efectes ionosfèrics. La ionosfera és un mitjà dispersiu que introdueix retards en els senyals electromagnètics que la travessen a causa de l'alta densitat d'electrons lliures presents. En aquest cas, el retard introduït també depèn de la posició del receptor, ja que aquest retard depèn de l'angle d'elevació i del contingut d'electrons totals² existent en el camí del senyal. En aquest cas en concret, les diferències d'errors també depenen del valor del TEC, i augmenten en gran mesura si la ionosfera es troba altament carregada. Valors típics observats en les diferències d'errors són de l'ordre de 2 m per a valors d'igual $d_{ER,U}$ a 400 km el 95% del temps. Quant a la variació temporal, depèn en gran mesura de la zona geogràfica, i s'observen variacions normalment més petites que 8 cm/min en latituds mitjanes, però de fins a 65 cm/min en altres regions.

⁽²⁾En anglès, *total electron content* (TEC).

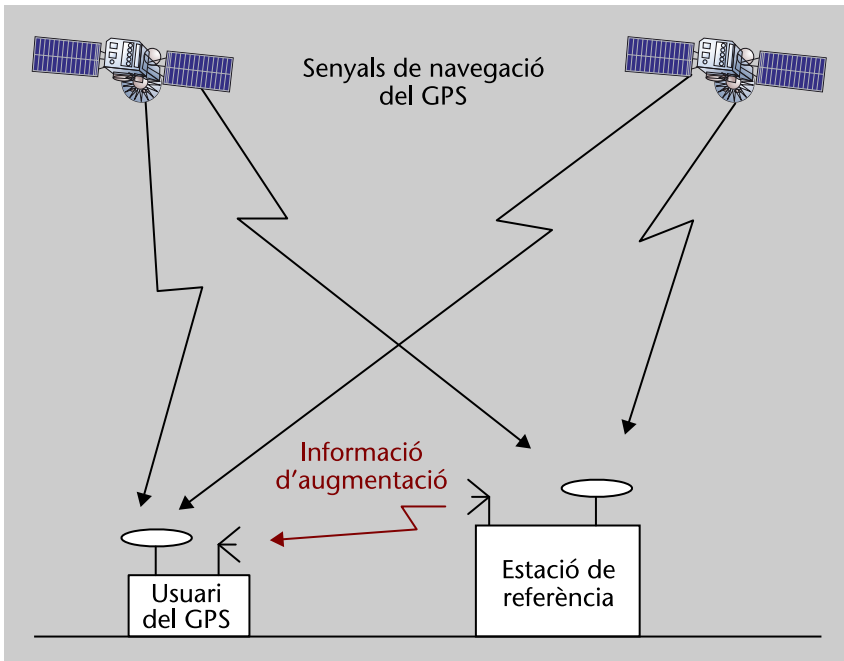
Els errors enumerats a dalt (excepte el primer) presenten un nivell de correlació més baixa a mesura que el receptor de l'usuari s'allunya de l'estació de referència. Altres errors, no obstant això, com aquells provocats pels components multicamí del senyal, la interferència i el soroll del receptor, no estan correlats amb els receptors de les estacions de referència per la seva naturalesa i, per tant, no es poden corregir mitjançant aquesta tècnica.

Quant al procés que du a terme la tècnica DGPS, hi ha dos conceptes segons la zona geogràfica que cobreix el sistema. D'una banda, el **DGPS d'àrea local** està dissenyat per a cobrir àrees entre 10 i 100 km amb una única estació de referència. Per a cobrir regions més grans s'utilitzen diverses estacions de referència i el sistema es denomina **DGPS d'àrea estesa**.

En la figura 2 es presenta el principi de funcionament de DGPS d'àrea local. Suposant el cas que s'estigui treballant a escala de pseudodistància, l'estació de referència distribueix mitjançant un enllaç de comunicacions les correccions de pseudodistàncies aplicades a cada satèl·lit visible. Com s'ha comentat abans, l'estació de referència coneix perfectament la seva posició. Per tant, aquestes correccions resulten de la comparació que fa l'estació de referència entre la pseudodistància estimada i la distància geomètrica existent entre aquesta estació i la posició del satèl·lit considerat. És a dir, l'estació de referència primer calcula la distància (geomètrica) que la separa del satèl·lit utilitzant el coneixement de les seves coordenades (x_{ER}, y_{ER}, z_{ER}) i les del satèl·lit (x_S, y_S, z_S) :

$$d_{ER,S} = \sqrt{(x_S - x_{ER})^2 + (y_S - y_{ER})^2 + (z_S - z_{ER})^2} \quad (9)$$

Figura 2. Principi de funcionament de DGPS d'àrea local



D'altra banda, fa una estimació de la pseudodistància utilitzant el senyal rebut del satèl·lit, i s'obté el següent:

$$\rho_{ER,S} = d_{ER,S} + c\delta t_{ER} + \varepsilon_{ER} \quad (10)$$

en què δt_{ER} és l'error introduït pel rellotge de l'estació de referència i ε_{ER} és l'error de l'estimació de la distància ocasionat pels efectes comentats anteriorment (tant els correlats com els incorrelats). Una vegada calculada la distància, l'estació de referència obté la correcció de la pseudodistància com:

$$\Delta\rho_{ER,S} = d_{ER,S} - \rho_{ER,S} = -c\delta t_{ER} - \varepsilon_{ER} \quad (11)$$

Aquesta correcció és transmesa en *broadcast* i l'usuari, en rebre-la, l'aplica per a corregir la seva mesura de pseudodistància, $\rho_{U,S}$. Considerant que $d_{U,S}$ és la distància entre l'usuari i el satèl·lit, $c\delta t_U$ és l'error introduït pel rellotge de l'usuari i ε_U és l'error de l'estimació observat en el receptor de l'usuari, s'obté la correcció següent:

$$\begin{aligned} \rho_{U,S}^{corr} &= \rho_{U,S} + \Delta\rho_{ER,S} = d_{U,S} + c\delta t_U + \varepsilon_U - c\delta t_{ER} - \varepsilon_{ER} \\ &= d_{U,S} + c\delta t_{U,M} + \varepsilon_{U,M} \end{aligned} \quad (12)$$

en què $c\delta t_{U,M}$ és la diferència entre els errors introduïts pels rellotges de l'usuari i l'estació de referència i $\varepsilon_{U,M}$ representa l'error residual de pseudodistància. Tenint en compte que aquest error residual és normalment més petit que l'error obtingut per l'usuari en fer l'estimació per si sol, s'obté una millora en l'estimació. Quant a l'error introduït pel rellotge de l'estació de referència, també pot ser estimat per l'estació quan calcula la seva posició, ja que en coneix la posició exacta. Per tant, aquesta estimació s'envia també en *broadcast* perquè els usuaris la puguin utilitzar en les seves correccions.

Vegeu també

El càlcul de la posició d'una estació es detalla en el mòdul "El sistema GPS".

Lògicament, la millora oferta per DGPS augmenta a mesura que l'usuari es troba més proper a l'estació de referència, i es poden obtenir millores de l'ordre d'un factor 2. D'altra banda, cal recordar que els errors de pseudodistància varien amb el temps, per tant, el benefici que aporta la correcció de l'estació de referència dependrà en gran mesura de l'instant en el qual es van prendre les mesures, t_{med} . Amb la finalitat de solucionar aquest fet, l'estació de referència també envia la variació d'aquest factor de correcció, $\Delta\rho_{ER,S}(t_{med})$, que utilitzarà l'usuari en l'instant d'aplicar la correcció, t , tal com es mostra a continuació:

$$\rho_{U,S}^{corr}(t) = \rho_{U,S}(t) + \Delta\rho_{ER,S}(t_{med}) + \dot{\Delta\rho}_{ER,S}(t_{med})(t - t_{med}) \quad (13)$$

El sistema DGPS d'àrea estesa, per la seva banda, es basa a estendre el concepte de DGPS d'àrea local mitjançant el desplegament d'una xarxa d'estacions de referència per a cobrir una zona determinada. En aquest cas, no obstant això, l'objectiu primordial és assegurar que les precisions que es poden obtenir en aquesta zona siguin més petites que un metre. Per a això, s'analitzen els components dels errors de les pseudodistàncies per separat i s'estimen les variacions d'aquestes a la regió sencera usant les mesures de la xarxa d'estacions de referència. Concretament, la xarxa es compon de diverses estacions de referència, encarregades de prendre les mesures dels diferents satèl·lits i distribuir les correccions als usuaris; i d'una estació de control mestra, encarregada de rebre les mesures de totes les estacions de referència, processar-les i determinar les correccions que s'han de distribuir a la zona d'influència (vegeu la figura 3).

Figura 3. Principi de funcionament de DGPS d'àrea estesa



1.2. WAAS

L'esquema presentat en el subapartat anterior és capaç d'oferir correccions a un receptor GPS, però una de les limitacions principals és la cobertura. En algunes aplicacions, especialment les relacionades amb l'aviació civil, és necessari proveir d'un sistema d'augment amb cobertures que assegurin la màxima disponibilitat del sistema. Amb aquesta motivació van ser dissenyats els sistemes d'augment basats en satèl·lits³.

⁽³⁾En anglès, *satellite-based augmentation systems (SBAS)*.

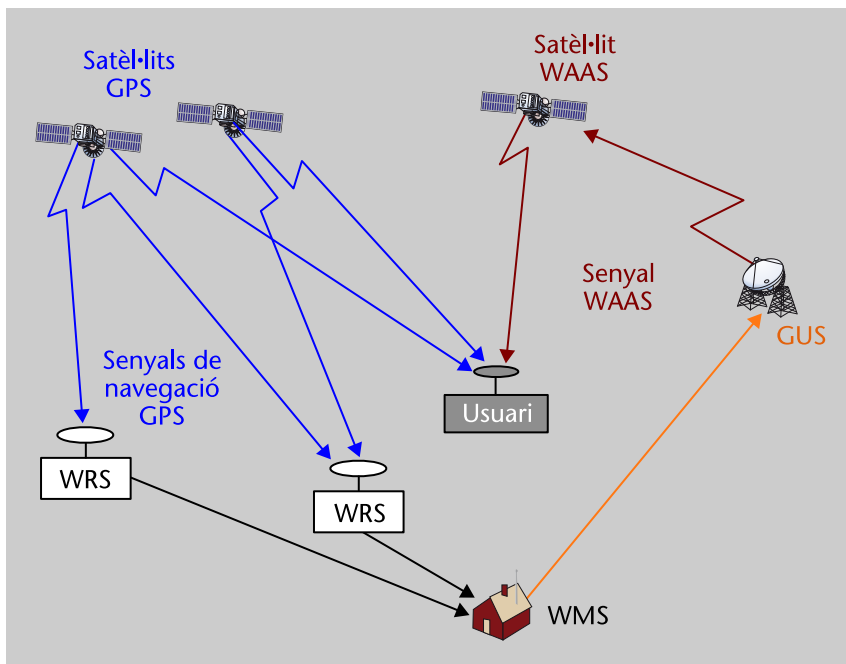
La versió nord-americana de SBAS es coneix amb el nom de WAAS⁴. Aquest sistema està format per tres segments (vegeu la figura 4):

⁽⁴⁾WAAS és la sigla de *wide area augmentation system*.

- **Segment espacial.** Aquest segment està format per tres satèl·lits geostacionaris (Inmarsat 4F3, Galaxy 15 i Anik F1R) que ofereixen cobertura en territori nord-americà (incloent-hi Alaska). Aquests satèl·lits s'encarreguen d'enviar els senyals d'augment als usuaris.
- **Segment terrestre.** Segment format pels components següents:
 - **Estacions de monitoratge** (amb un total de 59 estacions), denominades *wide-area reference stations (WRS)*, repartides per tot el territori nord-americà. Aquestes estacions estan equipades amb receptors GPS de freqüència dual (L1 i L2) i sensors meteorològics. S'encarreguen de monitorar els senyals enviats pels satèl·lits GPS, més els dels satèl·lits WAAS mateixos, i d'adquirir dades de la condició meteorològica. Tota aquesta informació s'envia a les estacions mestres.

- **Estacions mestres** (2 estacions), denominades *wide-area master stations* (WMS), encarregades de processar les dades rebudes de les estacions de monitoratge i, a partir d'aquestes, generar les dades d'augment.
- **Estacions de transmissió de dades** (6 estacions), denominades *ground uplink stations* (GUS), encarregades d'enviar les dades generades per les WMS als satèl·lits del sistema WAAS.
- **Segment d'usuari.** Segment format pels receptors GPS equipats amb WAAS.

Figura 4. Arquitectura del sistema WAAS



Encara que el sistema disposa del seu segment espacial propi, WAAS està dissenyat per a millorar les prestacions de GPS, i aquest últim és el sistema de navegació primari. Les principals ajudes que proporciona WAAS són:

- Senyal de navegació addicional.
- Correccions DGPS.
- Monitoratge de la integritat.

El principi de funcionament de WAAS es pot resumir de la manera següent. Les estacions WRS recullen les dades dels diferents satèl·lits i les condicions meteorològiques per a transmetre-les a les estacions WMS, les quals processen les dades i generen les ajudes esmentades anteriorment. Aquestes ajudes s'envien als satèl·lits geostacionaris WAAS mitjançant les estacions de transmissions de dades, perquè les retransmetin als usuaris. Per a això, s'utilitza un senyal en la banda L1 amb unes característiques similars a les dels senyals GPS. Bàsicament, utilitza una modulació similar a la de GPS basada en l'ús de codis d'espectre eixamplat iguals que els codis Gold utilitzats en els codis C/A de GPS, seleccionats de manera que tinguin un nivell de correlació encreuada baix amb

aquests últims. Per tant, aquest senyal pot ser també utilitzat com a senyal de navegació, és a dir, per a estimar la pseudodistància existent entre l'usuari i el satèl·lit WAAS. A part, aquest senyal transporta la informació de correcció diferencial i de la integritat dels diferents satèl·lits de la constel·lació GPS i dels satèl·lits geostacionaris del sistema WAAS. La informació d'integritat es basa a indicar si les dades que proporcionen els satèl·lits visibles han de ser usades o no. A diferència del senyal basat en el codi C/A de GPS, en què les dades s'enviaven a 50 bps, les dades en aquest cas es transmeten a 500 bps.

La informació enviada pels satèl·lits WAAS, al costat dels senyals de navegació provinents dels satèl·lits addicionals geostacionaris, ofereixen una millora notable en les prestacions del receptor GPS, i assoleixen precisions entre els 0,5 i 2 m (en territori nord-americà).

Aplicacions agrícoles

Encara que el sistema WAAS va ser dissenyat principalment per a incorporar GPS en aplicacions aeronàutiques, s'utilitza també de manera bastant notòria en aplicacions relacionades amb l'agricultura. Principalment, per a poder oferir un servei de localització amb altes precisions i optimitzar les tasques de plantació i fertilització.

Exemple

Considereu el senyal de navegació del sistema WAAS i feu el que es demana en els apartats següents:

- a) Determineu el guany de processament del senyal de navegació del sistema WAAS.
- b) Compareu aquest guany amb el guany de processament que s'obté amb el senyal de navegació C/A de GPS.
- c) Considereu ara que al receptor arriba una interferent de banda estreta (és a dir, amb una amplada de banda B_I que satisfà la relació $B_I \ll B_C \approx 1/T_C$, si T_C és el període de xip del senyal WAAS), en què la densitat espectral d'aquesta interferent es troba centrada en la banda freqüencial del senyal de navegació WAAS. Obtingueu el màxim nivell de potència interferent que pot suportar el senyal de navegació WAAS. Per a això, tingueu en compte que la potència rebuda del senyal WAAS és igual a -160 dBW i que el receptor necessita una relació potència de senyal a interferent⁵ més gran que 10 dB per a poder desmodular els símbols del missatge de navegació amb una qualitat acceptable.
- d) Obtingueu ara el valor de potència interferent màxima que pot suportar un senyal de navegació C/A de GPS, suposant que la potència del senyal rebut és també igual a -160 dBW en aquest cas.

Solució

- a) El guany de processament d'un senyal de navegació es defineix com la relació existent entre el temps de bit del senyal mateix i el temps de xip del codi utilitzat per a eixamplar l'espectre del senyal. En aquest cas, el guany de processament expressat en dB es pot obtenir com:

$$G_{P,WAAS} = 10 \log_{10} \left(\frac{T_b}{T_c} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{1/500 \text{ s}}{1/1.023 \text{ ms}} \right) = 33,1 \text{ dB} \quad (14)$$

en què s'ha considerat $T_c = 1/1.023$ ms en utilitzar-se en WAAS un codi Gold amb les mateixes característiques que els codis C/A de GPS. Quant a T_b , el seu valor està determinat pel fet que el senyal de navegació WAAS es modula amb una informació transportada a una velocitat de 500 bps.

- b) En el cas del senyal de navegació C/A de GPS, les dades de navegació es transporten a 50 bps, i per tant, el guany de processament s'ha de calcular de la manera següent:

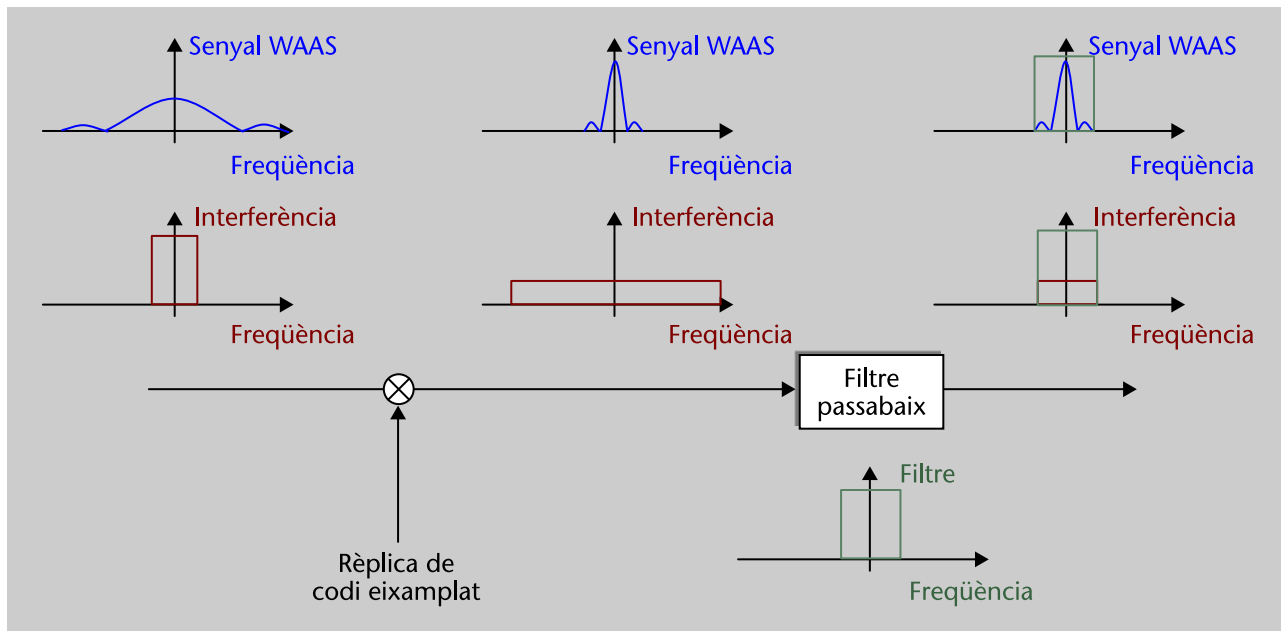
⁽⁵⁾En anglès, *signal-to-interference power ratio* (SIR).

$$G_{P, GPS} = 10 \log_{10} \left(\frac{T_b}{T_c} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{1/50 \text{ s}}{1/1.023 \text{ ms}} \right) = 43,1 \text{ dB} \quad (15)$$

és a dir, el senyal GPS té un guany de processament 10 dB més gran que l'obtingut en el cas de WAAS.

c) En primer lloc s'ha de calcular el valor de la SIR a la sortida del correlador del receptor. En aquest correlador, el senyal rebut es correla amb una rèplica del codi WAAS. Per tant, el senyal corresponent al satèl·lit WAAS pateix un procés de deseixamplament, i té com resultat un senyal amb amplada de banda $B_S \approx 1/T_b$, i, després d'això, s'aplica un procés de filtratge utilitzant una amplada de banda igual que la del senyal que volem, és a dir, igual a B_S . El senyal interferent, en canvi, pateix un procés d'eixamplament. Això és a causa que el senyal interferent està incorrelat amb el codi del receptor i, per tant, a la sortida del correlador s'obté un senyal interferent *codificat* amb amplada de banda igual a $B_I = B_c \approx 1/T_c$. Per tant, a l'hora d'aplicar el filtre amb amplada de banda B_S , aquest cancel·la la gran part del senyal interferent (vegeu la figura 5).

Figura 5. Esquema de correlació del receptor WAAS.



Tenint en compte l'espectre dels dos senyals a la sortida del correlador, un pot calcular la relació SIR com:

$$SIR = \frac{P_S}{P_I^{corr}} \quad (16)$$

en què P_S és igual a la potència rebuda del senyal WAAS, ja que el nivell de potència de senyal estimat a la sortida del correlador és igual al nivell que es té a l'entrada. Quant a P_I^{corr} , és la potència del senyal interferent a la sortida del correlador, la qual es calcula de la manera següent:

$$P_I^{corr} = P_I \frac{B_S}{B_c} = P_I \frac{T_c}{T_b} \quad (17)$$

en què P_I és la potència del senyal interferent a l'entrada del correlador. És a dir, tenint en compte que un pot calcular la densitat espectral de potència del senyal interferent a partir del senyal eixamplat com a P_I/B_c , és fàcil calcular la potència a la sortida del filtre passabaix com a densitat espectral de potència per amplada de banda de senyal interferent a la sortida del filtre, $P_I B_S/B_c$.

Introduint ara el resultat de dalt en l'expressió de SIR, s'obté el següent:

$$SIR = \frac{P_S T_b}{P_I T_c} \Rightarrow SIR(\text{dB}) = P_S(\text{dBW}) - P_I(\text{dBW}) + G_{P,WAAS}(\text{dB}) \quad (18)$$

Per tant, si el mínim nivell de SIR necessari és igual a 10 dB, la màxima potència de senyal interferent tolerada és igual a:

$$\begin{aligned} P_I(\text{dBW}) &\leq P_S(\text{dBW}) + G_{P,WAAS}(\text{dB}) - SIR(\text{dB}) = \\ &= -160 \text{ dBW} + 33,1 \text{ dB} - 10 \text{ dB} = -136,9 \text{ dBW} \end{aligned} \quad (19)$$

d) En aquest cas s'ha de fer el mateix procés que en l'apartat anterior però tenint en compte el valor del guany de processament del senyal GPS. Per tant, el màxim valor de potència interferent és en aquest cas:

$$\begin{aligned} P_I(\text{dBW}) &\leq P_S(\text{dBW}) + G_{P,GPS}(\text{dB}) - SIR(\text{dB}) = \\ &= -160 \text{ dBW} + 43,1 \text{ dB} - 10 \text{ dB} = -126,9 \text{ dBW} \end{aligned} \quad (20)$$

1.3. EGNOS

EGNOS⁶ és la solució SBAS europea fruit de l'activitat conjunta de la Comissió Europea, l'Agència Espacial Europea i Eurocontrol. Aquest sistema va ser esmentat per primera vegada l'any 1994, va començar a funcionar de manera operacional (estat inicial) el 2005 i, finalment, l'any 2009 es va declarar l'inici oficial d'operacions del sistema (*open service*). El març del 2011, es va declarar de manera oficial com a sistema utilitzable per a l'aviació civil (en tasques d'aproximació de poca precisió i aproximació amb guiatge vertical).

⁽⁶⁾ EGNOS és la sigla d'*European geostationary navigation overlay service*.

Projecte cooperatiu

El sistema EGNOS és fruit de la cooperació de la Comissió Europea, l'Agència Espacial Europea i Eurocontrol. La Comissió Europea du a terme la consolidació de requisits de tots els usuaris, la validació i el suport per a l'establiment del sistema. L'Agència Espacial Europea s'encarrega del desenvolupament tècnic. Finalment Eurocontrol està a càrrec dels requisits d'aviació civil i de validar-los.

L'objectiu principal d'EGNOS és oferir un servei d'augment a GPS, GLO-NASS i Galileo.

Per a dur a terme el seu objectiu EGNOS utilitza una arquitectura dividida en quatre segments:

1) **Segment espacial.** Aquest és un segment format per tres satèl·lits geostacionaris (dos satèl·lits Inmarsat-3 i el satèl·lit de l'Agència Espacial Europea Artemis), que ofereix cobertura a Europa, el Mediterrani i Àfrica.

2) **Segment terrestre.** Segment format pels elements següents:

a) **Estacions de monitoratge** (34 estacions), denominades *ranging and integrity monitoring stations* (RIMS), encarregades de monitorar els senyals de GPS, GLONASS i Galileo.

Distribució del segment terrestre d'EGNOS

El segment terrestre d'EGNOS està principalment distribuït al continent europeu, i hi ha algunes estacions RIMS localitzades als continents adjacents.

b) Centres de control de missió (4 centres), referits com a *mission control centers* (MCC), encarregats de processar les dades de les RIMS i generar els missatges transmesos pels satèl·lits. Aquests centres de control es troben a Torrejón (Espanya), Gatwick (Regne Unit), Langen (Alemanya) i Ciampino (Itàlia). Cal comentar que únicament un dels MCC es troba operacional, mentre que els altres tres actuen com a centres de reserva per a utilitzar-los en cas necessari.

c) Estacions de transmissió de dades (6 estacions), denominades NLES (*navigation land earth stations*), encarregades d'enviar els missatges generats per l'MCC als satèl·lits de la constel·lació EGNOS.

3) Segment de suport. Segment format per dues plataformes de suport:

a) Una plataforma destinada a la verificació i certificació d'aplicacions EGNOS, denominada *application specific qualification facility* (ASQF) i localitzada a Torrejón (Espanya).

b) Una plataforma destinada a fer tasques relacionades amb la coordinació tècnica, anàlisi de les prestacions del sistema i gestió de la configuració del sistema, coneguda com a *performance assessment and system checkout facility* (PACF) i localitzada a Tolosa de Llenguadoc (França).

4) Segment d'usuari. El segment d'usuari està format pels receptors equipats amb EGNOS i amb (almenys) algun dels sistemes de navegació GPS, GLONNAS i Galileo.

Com en el cas de WAAS, les ajudes d'augment d'EGNOS es basen en les correccions diferencials, la inclusió de senyals de navegació addicionals i el monitoratge de la integritat. Els senyals addicionals es basen també en una modulació similar a la de GPS. Concretament, s'utilitza un senyal en la banda L1 que utilitza un codi Gold de la mateixa família que la utilitzada en el codi C/A de GPS. No obstant això, en aquest cas les ajudes d'augment serveixen per a millorar les prestacions d'altres sistemes de navegació a part del GPS, i s'obtenen millors precisions (en general, per sota dels 2 m i, més concretament, properes a 1 m a Europa).

A part, EGNOS inclou un servei conegut com a SISNET⁷. La idea d'aquest servei és enviar la mateixa informació que s'envia pels satèl·lits geostacionaris mitjançant Internet perquè la puguin rebre més usuaris. Això està motivat pel fet que les elevacions dels satèl·lits geostacionaris són relativament baixes (entorn dels 30° per sobre de l'horitzó en el cas del centre d'Europa) i la visibilitat se'n pot veure afectada. Encara que els sistemes SBAS van ser principalment dissenyats per a usuaris aeronàutics, els quals no tenen problemes de visibilitat amb aquestes elevacions, és la utilització del sistema per part d'altres grups d'usuaris la que es veu limitada per aquestes característiques, especialment els usuaris de zones urbanes. Gràcies a SISNET, aquestes limitacions es veuen re-

⁽⁷⁾ SISNET és la sigla de *signal in space through the Internet*.

duïdes tenint en compte la proliferació d'Internet mòbil (gràcies als avanços en telefonia mòbil, com és el cas dels sistemes cel·lulars 3G i les tecnologies emergents).

2. El sistema Galileo

Galileo és el programa europeu de radionavegació per satèl·lit llançat per la Comissió Europea i desenvolupat juntament amb l'Agència Espacial Europea. Encara que la primera contribució europea a la radionavegació per satèl·lit, és a dir, la iniciativa EGNOS, és capaç d'oferir bones prestacions, depèn de sistemes externs com GPS i GLONASS. Galileo té, per tant, com a objectiu, proveir d'un sistema de radionavegació per satèl·lit propi que en permeti el control de la disponibilitat del sistema i de les prestacions.

En aquest apartat es descriuen les característiques del sistema Galileo (subapartat 2.1), i es presenten a més els senyals utilitzats (subapartat 2.2) i l'arquitectura dels receptors (subapartat 2.3). Cal comentar que aquest sistema no es troba encara operatiu. Concretament, encara està en fase de desenvolupament, i s'han llançat únicament, en la data de redacció d'aquest mòdul, dos satèl·lits de proves (GIOVE-A i GIOVE-B) i el primer parell de satèl·lits de validació IOV, els quals segueixen en òrbita.

Conflicte entre Galileo i GPS

Els Estats Units es van oposar des del primer moment al desenvolupament del sistema Galileo. Les seves argumentacions es basaven en possibles conflictes que podrien sorgir entre Galileo i GPS en el marc de l'OTAN. Finalment, els Estats Units i la Comissió Europea van signar un acord l'any 2004 en què reconeixien GPS i Galileo com a sistemes independents i complementaris per a la radionavegació per satèl·lit, que gaudeixen a més de les mateixes condicions per al desenvolupament i evolució.

2.1. Descripció del sistema Galileo

A l'inici de la dècada dels noranta, una vegada reconeguda la importància estratègica de la radionavegació per satèl·lit, la Comissió Europea va iniciar el seu propi programa GNSS⁸. El programa, en concret, es va dividir en dues etapes. En la primera etapa es va desenvolupar un sistema d'augment, el sistema EGNOS. La segona etapa, per la seva banda, era més ambiciosa, ja que es basava en el desenvolupament d'un sistema de radionavegació independent denominat Galileo. Aquest nou sistema entraria, al costat del bloc III de GPS (o GPS III), en el que es coneix com a *segona generació de sistemes de radionavegació per satèl·lit* o GNSS-2. L'objectiu inicial era que el sistema Galileo estigués operatiu el 2008, però pateix ja alguns anys de retard, en part a causa de contrarietats entre els països participants en el programa. Algunes previsions en situen l'operativitat per a l'any 2014.

⁽⁸⁾GNSS és la sigla de *global navigation satellite system*.

Vegeu també

El sistema EGNOS es descriu en l'apartat 1 d'aquest mòdul.

A continuació es descriuen les característiques principals del sistema, que són els serveis oferts per Galileo, les bandes freqüencials utilitzades i l'arquitectura del sistema.

2.1.1. Serveis Galileo

A diferència del sistema GPS, el sistema Galileo està dissenyat per a oferir, principalment, serveis d'ús civil. Concretament, els serveis oferts per Galileo són:

- **Open service (OS).** És un servei obert orientat a l'usuari general (conegut com a *mass-market*), especialment adequat per l'ús en navegadors de cotxes i per a la integració en dispositius de telefonia mòbil. El servei proveeix l'usuari d'informació de posició, velocitat i sincronització amb el sistema de temps Galileo. El servei està definit tant per a receptors amb monofreqüència com per a receptors multifreqüència. Aquest servei es transmet mitjançant els senyals Galileo en les bandes E5a, E5b i E1 (tal com es presenta en el subapartat 2.2).
- **Commercial service (CS).** És un servei orientat a les aplicacions professionals. Per a això ofereix la possibilitat que terceres parts distribueixin informació de valor afegit mitjançant els senyals Galileo, com alertes meteorològiques, alertes d'accidents, actualitzacions de mapes, informació de trànsit, etc. Aquest servei es transmet mitjançant els senyals de les bandes E5b, E6 i E1, amb les dades protegides amb xifratge. Aquest xifratge el gestionen les empreses prestadores del servei, i se'n restringeix l'ús als receptors amb accés.
- **Safety of life (SOL) service.** Aquest servei està orientat a aplicacions en què la seguretat dels usuaris és crítica, com són, per exemple, aplicacions relacionades amb el transport marítim, aeri o ferroviari, o operacions en què es requereixi un nivell de seguretat alt. Aquest servei s'envia sense xifrar mitjançant els senyals en les bandes E5a, E5b i E1, i disposa d'un mecanisme d'autenticació perquè l'usuari comprovi que els senyals rebuts realment són senyals Galileo. A més, s'incorpora un mecanisme de monitoratge i notificació de la integritat dels diferents senyals per a informar l'usuari si compleixen amb les especificacions necessàries.
- **Public regulated service (PRS).** Són serveis únicament oferts a usuaris autoritzats per entitats governamentals que requereixen un nivell de protecció alt davant interferència o *jamming* (utilitzant senyals amb espectre més eixamplat). Es transmeten mitjançant els senyals en les bandes E1 i E6, utilitzant xifratge de dades.
- **Search and rescue (SAR) service.** Els satèl·lits Galileo estan equipats amb un receptor SAR per a detectar balises de missatges de socors de manera global. Aquests mateixos senyals es retransmeten a estacions terrestres per

a alertar els serveis de rescat. Al seu torn, els satèl·lits actuen també com a canal de tornada, i transmeten un senyal ACK (*acknowledgment*) a l'usuari que emet la balisa, segons el qual el servei de rescat ha rebut l'alerta. A part, el sistema Galileo s'utilitza per a oferir servei de posicionament per a localitzar amb més precisió els usuaris.

Les característiques dels principals serveis es resumeixen en la taula 1.

Taula 1. Principals serveis de Galileo

Serveis Galileo	OS	CS	SOL	PRS
Precisió posicionament H (horitzontal) 95% V (vertical) 95%	24 m H – 35 m V (monofreqüència) 4 m H – 8 m V (multifreqüència)	24 m H – 35 m V (monofreqüència) 4 m H – 8 m V (multifreqüència)	4 m H - 8 m V (multifreqüència)	24 m H - 35 m V (monofreqüència) 6,5 m H - 12 m V (multifreqüència)
Precisió temporal	30 ns	30 ns	30 ns	30 ns
Integritat (distància màxima per a activar alarma, temps de recepció d'alarma en l'usuari)	Sense integritat	Sense integritat	12 m H - 20 m V 6 s	20 m H - 35 m V 10 s
Disponibilitat de servei	99,5%	99,5%	99,5%	99,5%
Control d'accés	Accés lliure	Accés controlat	Autenticació de la informació d'integritat	Accés controlat

2.1.2. Bandes freqüencials

Com s'ha anat comentant, els serveis Galileo es transmeten mitjançant la utilització de diferents senyals. Concretament, cada satèl·lit Galileo transmet 10 senyals diferents de navegació i un de SAR en les bandes següents:

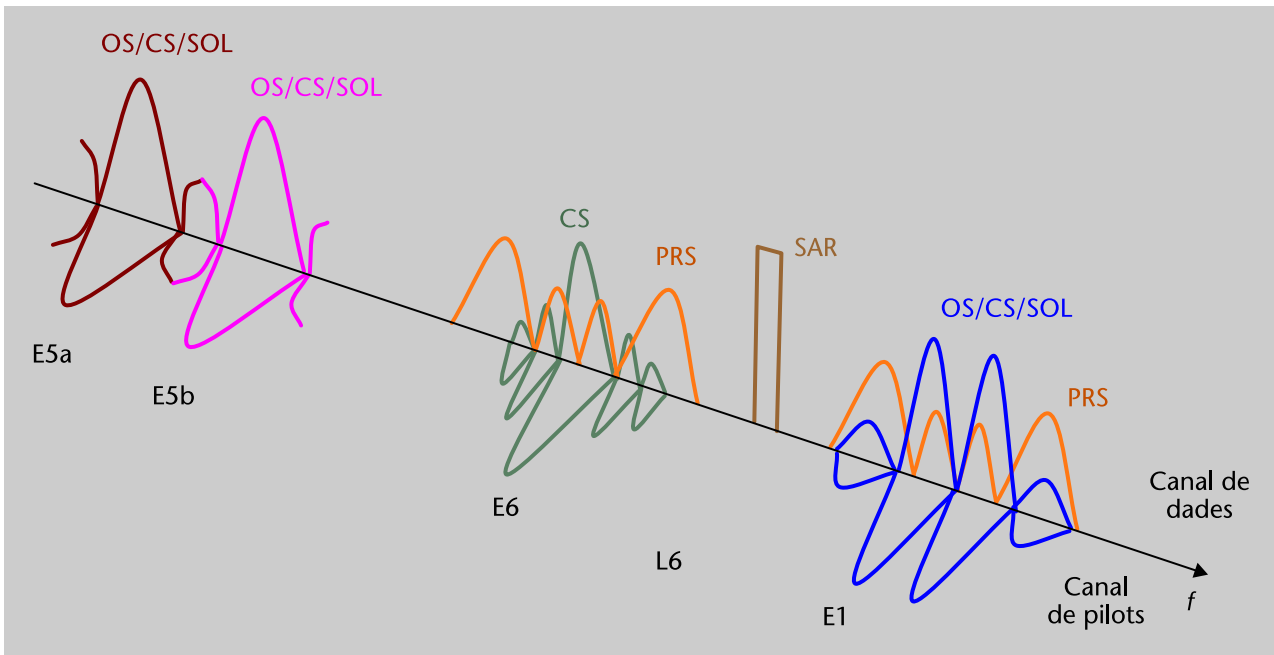
- E5a: centrada en 1.176,45 MHz, serveis OS, CS i SOL.
- E5b: centrada en 1.207,14 MHz, serveis: OS, CS i SOL.
- E6: centrada en 1.278,75 MHz, serveis CS i PRS.
- L6: centrada en 1.544,50 MHz, servei SAR.
- E1: centrada en 1.575,42 MHz, serveis OS, CS, SOL i PRS.

En la figura 6 es representa l'espectre dels diferents senyals.

Vegeu també

Els senyals de navegació E1, E5a, E5b i E6 s'estudien amb més detall en el subapartat 2.2 d'aquest mòdul.

Figura 6. Bandes freqüencials de Galileo



2.1.3. Arquitectura Galileo

Com en el cas d'altres sistemes de radionavegació per satèl·lit, l'arquitectura del sistema Galileo està dividida en tres segments: segment espacial, segment terrestre i segment d'usuari. A continuació, es descriuen els diferents segments.

Segment espacial del sistema Galileo

El segment espacial de Galileo està format per una constel·lació de 30 satèl·lits en tres plans orbitals. Cadascun d'aquests plans conté 10 satèl·lits amb òrbites que presenten una inclinació de 56° , una excentricitat de $e = 0,002$ i un valor de semieix més gran que $a = 29.600,318$ km. El període orbital és igual a 14 h i 22 min, i dona lloc a 10 òrbites completes en 17 dies.

La idea és que en cada òrbita hi hagi un satèl·lit no operatiu. Aquest satèl·lit s'usa com a reserva per a poder substituir de manera ràpida un satèl·lit que hagi fallat en el mateix pla. Aquest disseny de constel·lació assegura que es pugui tenir, amb una probabilitat més gran que el 90%, un mínim de 4 satèl·lits visibles en qualsevol posició del món en qualsevol instant. En gran part del planeta es poden arribar a tenir entre 6 i 8 satèl·lits visibles, i ofereix, per tant, unes prestacions del sistema excel·lents.

Com es pot observar, els paràmetres orbitals difereixen dels presentats en GPS. Com en el cas de GPS, no obstant això, els satèl·lits estan equipats amb rellotges d'àtòmics (en aquest cas de rubidi o hidrogen) per a poder assegurar un nivell alt de sincronització del sistema. A part del transponedor de navegació, els satèl·lits també estan equipats amb un transponedor SAR. Cal comentar també que els satèl·lits del sistema s'han dissenyat per a tenir una vida útil de 20 anys.

Com s'ha esmentat anteriorment, actualment hi ha únicament dos satèl·lits de proves en òrbita. El primer, el GIOVE-A, va ser construït per Surrey Satellite Technology Ltd i llançat l'any 2005 des del cosmòdrom de Baikonur (Kazakhstan). Els senyals enviats per aquest satèl·lit són totalment representatius dels senyals Galileo quant a modulacions, velocitats de xip i dades. No obstant això, aquest satèl·lit únicament pot transmetre alhora en dues bandes freqüencials. A part, els codis de *spreading* utilitzats són diferents dels codis de Galileo i les dades del missatge de navegació tampoc no es corresponen amb el format establert.

Quant al segon satèl·lit, el GIOVE-B, va ser assembletat per un consorci d'empreses encapçalat per Astrium i Thales Alenia Space i llançat el 2008 (també des de Kazakhstan). Un dels avenços d'aquest satèl·lit és la incorporació, a part dels rellotges atòmics de rubidi presents en GIOVE-A, d'un rellotge atòmic d'hidrogen. En concret, aquest rellotge és el rellotge més estable dels llocs en òrbita de manera permanent. En aquest cas, els senyals transmesos difereixen també dels senyals Galileo en alguns aspectes.

Com a continuació de les proves fetes amb els satèl·lits GIOVE, es posaran en òrbita quatre satèl·lits més, coneguts amb el nom de satèl·lits IOV⁹. Aquests satèl·lits presenten unes característiques molt properes als dissenys finals dels satèl·lits Galileo. El llançament del primer parell de satèl·lits IOV va ser dut a terme el 21 d'octubre del 2011. Una vegada desplegada la fase d'experimentació IOV, es començaran a posar en òrbita els satèl·lits FUC¹⁰ destinats a cobrir la constel·lació necessària per a declarar el sistema Galileo operatiu.

Segment terrestre del sistema Galileo

Les funcions principals del segment terrestre del sistema Galileo són el control de la constel·lació de satèl·lits i el control de la missió. Per a dur a terme aquestes funcionalitats, el segment terrestre està dividit, al seu torn, en dos segments:

1) **Ground control segment (GCS)**. És el segment encarregat de dur a terme totes les tasques de control de la constel·lació de satèl·lits Galileo. Les tasques principals són:

Vegeu també

Els paràmetres orbitals del sistema GPS es descriuen en el mòdul "El sistema GPS" d'aquesta assignatura.

⁽⁹⁾IOV és la sigla d'*in-orbit validation*.

⁽¹⁰⁾FUC és la sigla de *full operational capability*.

- Manteniment de la constel·lació de satèl·lits i definició d'estratègia de reposició.
- Tasques de recuperació davant errors de satèl·lits.
- Monitoratge, seguiment, telemetria i control de cada satèl·lit.
- Maniobrar els satèl·lits per a mantenir les òrbites.
- Suport del manteniment del programari de bord de cada satèl·lit.

Per a dur a terme aquestes tasques, el GCS disposa d'una xarxa nominal de 5 estacions terrestres, denominades estacions TTC (*telemetry, tracking and control*). Aquestes estacions es comuniquen amb els satèl·lits en la banda S mitjançant antenes de 13 m. Les comunicacions es duen a terme combinant un esquema de comunicacions regular amb un sistema de missatges de contingència.

2) **Ground mission segment (GMS)**. Segment encarregat de controlar el sistema de navegació i de proveir els principals serveis Galileo. Les funcions principals són:

- Monitorar els senyals de navegació dels satèl·lits Galileo.
- Determinar les òrbites i posicions dels diferents satèl·lits.
- Assegurar la sincronització del sistema Galileo.
- Generar els missatges de navegació.
- Distribuir la informació d'integritat dels senyals de navegació.

Aquest segment està format per una xarxa nominal entre 30 i 40 estacions GSS¹¹ distribuïdes per la superfície terrestre, les quals tenen com a tasca principal estar contínuament monitorant els senyals de navegació enviats pels satèl·lits Galileo. La utilització d'una xarxa tan gran, i el monitoratge continu de la integritat dels senyals, està motivada per la necessitat de satisfer els requisits del servei SOL. De fet, la gran complexitat del sistema Galileo, quant a arquitectura i estructura de senyals, es deu principalment als alts requisits d'aquest servei. La informació recollida per les estacions GSS (mesures de pseudodistància, missatge de navegació rebut, etc.), al costat d'informació meteorològica del lloc d'aquestes, s'envien al centre de control GCC¹². Cal comentar que en el sistema Galileo hi ha dos centres de control GCC redundants. El GCC, per la seva banda, processa la informació rebuda per a dur a terme dues tasques:

- Determinar les òrbites i el desfasament temporal del rellotge de cadascun dels satèl·lits.
- Determinar la integritat dels senyals dels diferents satèl·lits.

Amb aquesta informació es generen els missatges de navegació (incloent-hi la informació d'integritat) de cada satèl·lit i s'hi envien mitjançant nou estacions ULS¹³ repartides també per la superfície terrestre, les quals operen en la banda C (5 GHz) utilitzant antenes de 3 m.

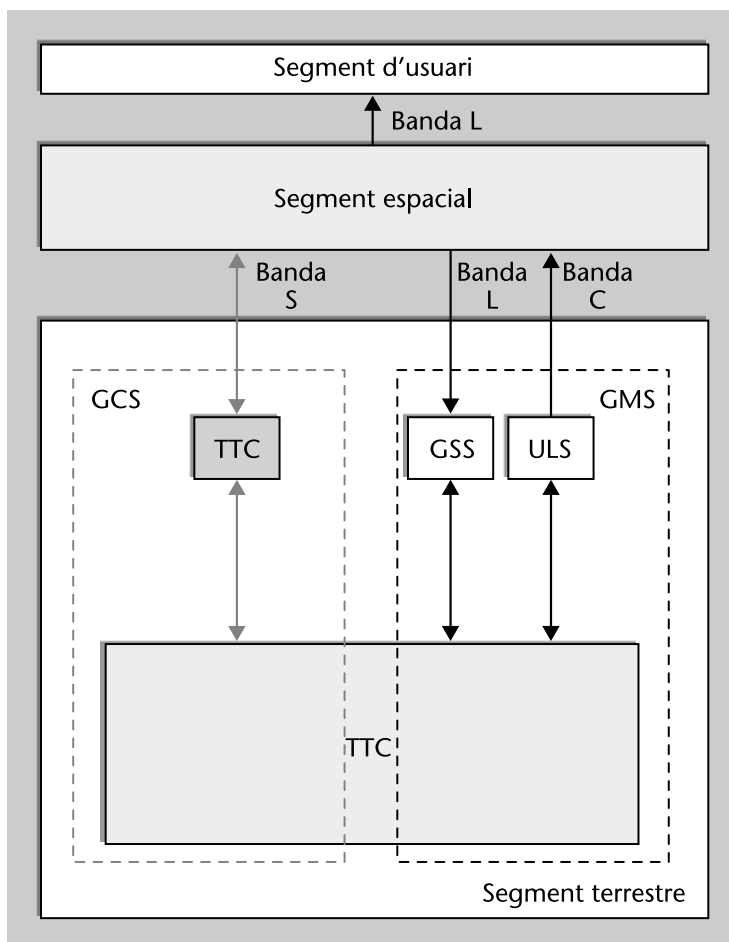
⁽¹¹⁾ GSS és la sigla de *Galileo sensor station*.

⁽¹²⁾ GCC és la sigla de *Galileo control center*.

⁽¹³⁾ ULS és la sigla de *up-link stations*.

En la figura 7, es presenta l'arquitectura del sistema Galileo, en què es pot observar l'organització del segment terrestre.

Figura 7. Arquitectura del sistema Galileo



Nota

Cal esmentar que, en el moment de redactar aquest mòdul, el segment terrestre del sistema Galileo es trobava encara en fase de desenvolupament.

Segment d'usuari del sistema Galileo

En el cas de Galileo, el segment d'usuari està principalment orientat als serveis del sistema. En concret, es defineix aquest segment com el que traduirà els senyals de Galileo als diferents serveis que utilitzaran els usuaris finals, i es compon del següent:

- Tecnologies.
- Serveis de valor afegit (combinació amb comunicacions, serveis de mapes, serveis de taxació, etc.).
- Aplicacions d'usuari.

El segment d'usuari està encara en fase de definició a causa que el sistema no es troba operatiu. Actualment hi ha els primers receptors de prova, que formen el que es coneix com a *test user segment* i que s'utilitzen per a validar el sistema i dur a terme tasques d'experimentació amb els senyals generats pels satèl·lits GIOVE-A i GIOVE-B.

2.2. Estructura del senyal Galileo

Abans d'entrar en la descripció concreta del senyal, analitzarem els principals canvis que hi ha hagut en els senyals GNSS modernitzats (que es refereix als senyals de GPS modernitzat o GPS III, Galileo i altres sistemes en desenvolupament, com Compass) i la lògica que hi ha al darrere.

Els senyals dels sistemes modernitzats inclouen diversos o la totalitat dels aspectes següents:

- **Codis pseudoaleatoris més llargs.** Aquests codis aporten una reducció de la interferència intra i intersistema. També augmenten la resistència del senyal a aquest efecte *near-far* i a les interferències externes. El principal inconvenient és que fa l'adquisició més complexa computacionalment.
- **Més velocitat de xip.** Fa el senyal més robust a aquest efecte multicamí i a les interferències.
- **Pilots.** L'existència de components que no transmeten dades permeten augmentar els intervals de correlació i millorar la sensibilitat. Això és especialment interessant per a la recepció dels senyals en entorns degradats. També fa possible utilitzar un discriminador millorat en el PLL, ja que no cal contrarestar els valors dels símbols.
- **Senyals en més bandes freqüencials.** Això millora en general la robustesa i flexibilitat del sistema. També fa possible que usuaris civils corregeixin el retard ionosfèric, i facilita la resolució de les ambigüitats de fase.
- **Senyals del tipus BOC.** Per a una mateixa amplada de banda total del senyal, s'aconsegueix augmentar l'amplada de banda efectiva i per tant, més precisió dels pseudorangs i menys influència del multicamí. No obstant això, el processament dels senyals BOC comporta algunes dificultats.
- **Protecció del missatge mitjançant codis de canal.** Permet augmentar la velocitat de transmissió del missatge i també reduir el llindar de recepció, de manera que sigui possible recuperar el missatge en entorns lleugerament degradats.

Galileo agrupa les prestacions que ofereix a l'usuari en quatre serveis:

- Open service (OS),
- Safety of life service (SOL),
- Commercial service (CS),
- Public regulated service (PRS)

Vegeu també

L'efecte *near-far* s'estudia en el mòdul "El sistema GPS" d'aquesta assignatura.

Vegeu també

Les dificultats del processament dels senyals BOC s'estudien en el subapartat 2.3 d'aquesta assignatura.

Vegeu també

Els quatre serveis del sistema Galileo s'estudien en el subapartat 2.1 d'aquest mòdul.

Hi ha molt poca informació pública sobre el servei PRS, per la qual cosa les descripcions que segueixen se centraran fonamentalment en els altres serveis, que són els que podrà utilitzar qualsevol usuari civil. Els serveis estan mapats a diferents tipus de missatges de navegació i a diferents components dels senyals, com s'indica en la taula 2.

Taula 2. Associació entre tipus de missatges, serveis i components dels senyals

Tipus de missatge	Serveis	Component del senyal
F/NAV	OS	E5a-I
I/NAV	OS/CS/SOL	E5b-I, E1-B
C/NAV	CS	E6-B

En cadascun dels tres subapartats següents explicarem els senyals que transmet Galileo en les tres bandes que utilitza. Concretament, el subapartat 2.2.1 tracta sobre el senyal E1, el subapartat 2.2.2, sobre el senyal E5, i finalment, el subapartat 2.2.3, sobre el senyal E6.

2.2.1. Senyal Galileo E1

El senyal Galileo E1 es transmet centrat en la freqüència 1.575,42 MHz i en la banda que va de 1.559 MHz a 1.591 MHz. Consta de tres components: dos d'ús civil i un d'ús regulat (PRS).

Els dos primers són:

- Un component de dades (e_{E1-B}) que transmet el missatge de navegació I/NAV mitjançant els símbols D_{E1-B} . Els xips del codi pseudoaleatori utilitzat es representen com a C_{E1-B} . Aquest component modula una combinació de les subportadores denominades $SC_{E1,a}$ i $SC_{E1,b}$.
- Un component pilot (e_{E1-C}) el codi pseudoaleatori del qual es representa com C_{E1-C} . Modula una combinació de les subportadores $SC_{E1,a}$ i $SC_{E1,b}$.

Terminologia

Utilitzarem indistintament els termes *codi pseudoaleatori*, *codi de spreading* i *codi de ranging*.

La formulació matemàtica d'aquests dos components és:

$$\begin{aligned}
 e_{E1-B}(t) &= \sum_{i=-\infty}^{+\infty} c_{E1-B}[i \bmod L_{E1-B}] D_{E1-B} \left[\text{floor} \left(i \frac{R_{s,E1-B}}{R_{c,E1-B}} \right) \right] \prod (R_{c,E1-B}t - i) \\
 e_{E1-C}(t) &= \sum_{i=-\infty}^{+\infty} c_{E1-C}[i \bmod L_{E1-C}] \prod (R_{c,E1-C}t - i)
 \end{aligned} \tag{21}$$

en què L_X és la longitud del codi pseudoaleatori del component X , "mod" fa l'operació mòdul, "floor" arrodoneix el nombre enter inferior més proper, $R_{c,E1-X}$ i $R_{s,E1-B}$ són la velocitat de xip i de símbol, respectivament, i $\prod(t)$ re-

presenta un pols rectangular de longitud unitat. La velocitat de símbol es representa mitjançant $R_{s,E1-B}$, per la qual cosa $R_{c,E1-B}/R_{s,E1-B}$ és el nombre de xips per símbol que hi ha en el component B.

Totes les subportadores es poden expressar com

$$sc(t) = \text{sign}(\sin(2\pi R_{sc}t)), \quad (22)$$

per a un valor determinat de la freqüència de la subportadora R_{sc} . Cadascuna és simplement una seqüència alternada d'uns i menys uns de durada $1/(2R_{sc})$, que serveix per a modificar la forma de cada xip.

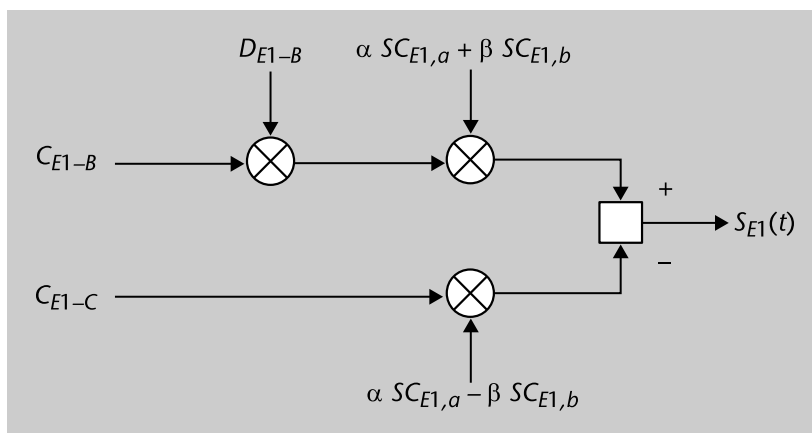
Els valors de tots aquests paràmetres estan recollits en la taula 3.

Taula 3. Paràmetres bàsics del senyal E1

Paràmetre	Valor
L_{E1-B}	4.092 xips
L_{E1-C}	102.300 xips
$R_{s,E1-B}$	250 símbols/s
$R_{c,E1-B}$	1,023 Mxips/s
$R_{c,E1-C}$	1,023 Mxips/s
$R_{sc,E1,a}$	1,023 Mxips/s
$R_{sc,E1,b}$	6,138 Mxips/s

El diagrama de blocs de generació del senyal incloent-hi les subportadores es mostra en la figura 8.

Figura 8. Esquema de generació del senyal Galileo E1



Alternativament mitjançant fórmules, es pot expressar el senyal Galileo E1 com

$$s_{E1}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(e_{E1-B}(t) (\alpha sc_{E1,a}(t) + \beta sc_{E1,b}(t)) - e_{E1-C}(t) (\alpha sc_{E1,a}(t) - \beta sc_{E1,b}(t)) \right) \quad (23)$$

en què α i β són unes constants determinades sobre les quals discutirem una mica més endavant.

Podem observar que les subportadores que s'utilitzen en tots dos components (per exemple, $\alpha sc_{E1,a}(t) \pm \beta sc_{E1,b}(t)$) estan formades per la combinació de les dues subportadores bàsiques ($sc_{E1,a}(t)$ i $sc_{E1,b}(t)$). Per aquesta raó es diu que tant el component B com el C utilitzen una modulació CBOC (*composite BOC*), que, com el seu nom indica, es pot entendre com la combinació de senyals BOC. Però ara ens preguntarem què són els senyals BOC. Es denominen senyals BOC¹⁴ aquells en què el pols conformador de xip és una seqüència de +1 i -1 alternats. Per tant, si tinguéssim els valors $\alpha = 1, \beta = 0$ o $\alpha = 0, \beta = 1$ (o sigui, si les subportadores fossin subportadores bàsiques de la forma donada per l'equació 23), llavors els components B i C serien senyals BOC. Els senyals BOC se solen identificar mitjançant la nomenclatura següent: BOC(f_s, f_c), en què el primer paràmetre és la freqüència de la subportadora i el segon és la freqüència de xip. És habitual donar aquests valors relatiu a la freqüència bàsica de 1.023 MHz, en lloc de fer-ho en termes absoluts. En el cas del senyal Galileo E1, la subportadora $sc_{E1,a}(t)$ és del tipus BOC(1,1), mentre que $sc_{E1,b}(t)$ és del tipus BOC(6,1).

⁽¹⁴⁾ BOC és la sigla de *binary offset carrier*.

Els formats presentats fins ara són BOC de tipus sinus (BOC_{sin}) perquè la subportadora de l'expressió 23 conté un sinus en la fórmula. També és possible definir la subportadora utilitzant un cosinus, i el senyal que resulta es representa com BOC_{cos}. En aquest cas, la subportadora comença valent 1 durant un quart de cicle en lloc de mig cicle, com en el cas de BOC_{sin}. En el cas d'utilitzar la nomenclatura BOC sense més, s'entén en l'àmbit de GNSS que es fa referència a un senyal del tipus sinus.

Els dos avantatges principals dels senyals BOC són:

- Per a una mateixa freqüència de xip o equivalentment per a una mateixa amplada de banda total, un senyal BOC té una amplada de banda efectiva (que se sol denominar també amplada de banda RMS o amplada de banda de Gabor) més gran que el senyal BPSK corresponent. Això fa que la sincronització de *timing* dels senyals BOC resulti una mica menys afectada per l'AWGN que la sincronització dels senyals BPSK, i per tant, els senyals BOC proporcionen unes mesures de retard més precises. En principi, el multicarri també causa errors una mica més petits en les mesures de codi amb senyals BOC que amb senyals BPSK.
- Proporcionen més flexibilitat per a situar l'energia del senyal en diferents zones de l'espectre variant els valors de f_s , i de f_c , i així es facilita la compar-

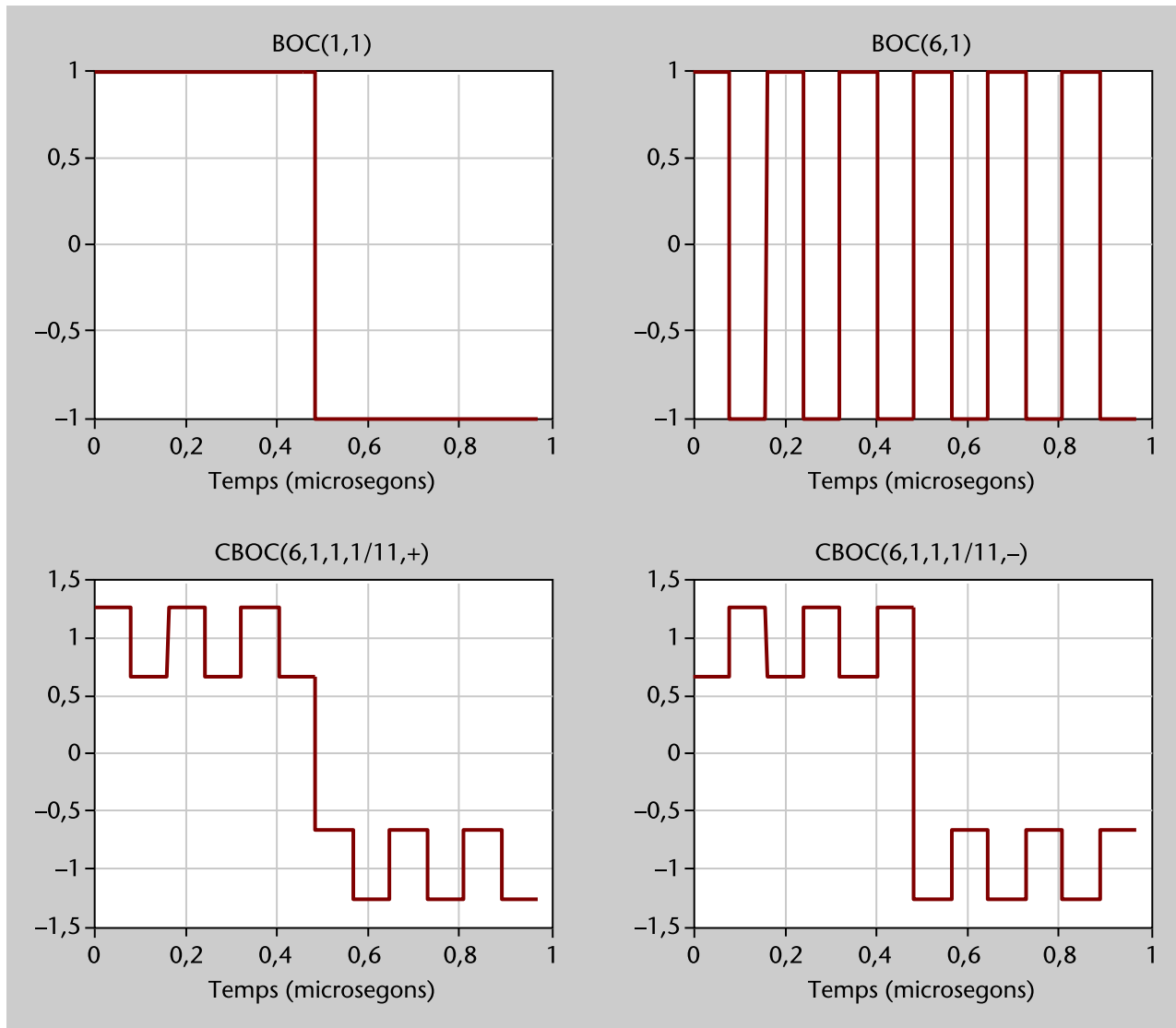
ció de l'espectre per part de diversos senyals del mateix sistema o d'altres sistemes.

En el cas de Galileo E1, els valors que s'han escollit són

$$\alpha = \sqrt{\frac{10}{11}}, \beta = \sqrt{\frac{1}{11}} \quad (24)$$

Un període de les subportadores compostes utilitzades en els components B i C es mostra en la figura 9. Realment només és necessari especificar el valor de α , perquè s'imposa la condició que $\alpha^2 + \beta^2 = 1$ perquè la potència de la subportadora sigui la unitat en tots els casos. Els senyals CBOC utilitzats en Galileo es denominen de manera abreujada CBOC(6,1,1,1/11 +) i (6,1,1,1/11,-) per als components B i C, respectivament. Els dos primers valors indiquen les freqüències de les subportadores (com ja hem comentat, relatives al valor de 1.023 MHz); el tercer valor correspon a la freqüència de xip; el quart valor és la fracció de potència assignada a la primera subportadora (la fracció de la segona està implícita en la relació que compleixen α i β); i el cinquè símbol indica si les subportadores se sumen amb el mateix signe o amb signe diferent.

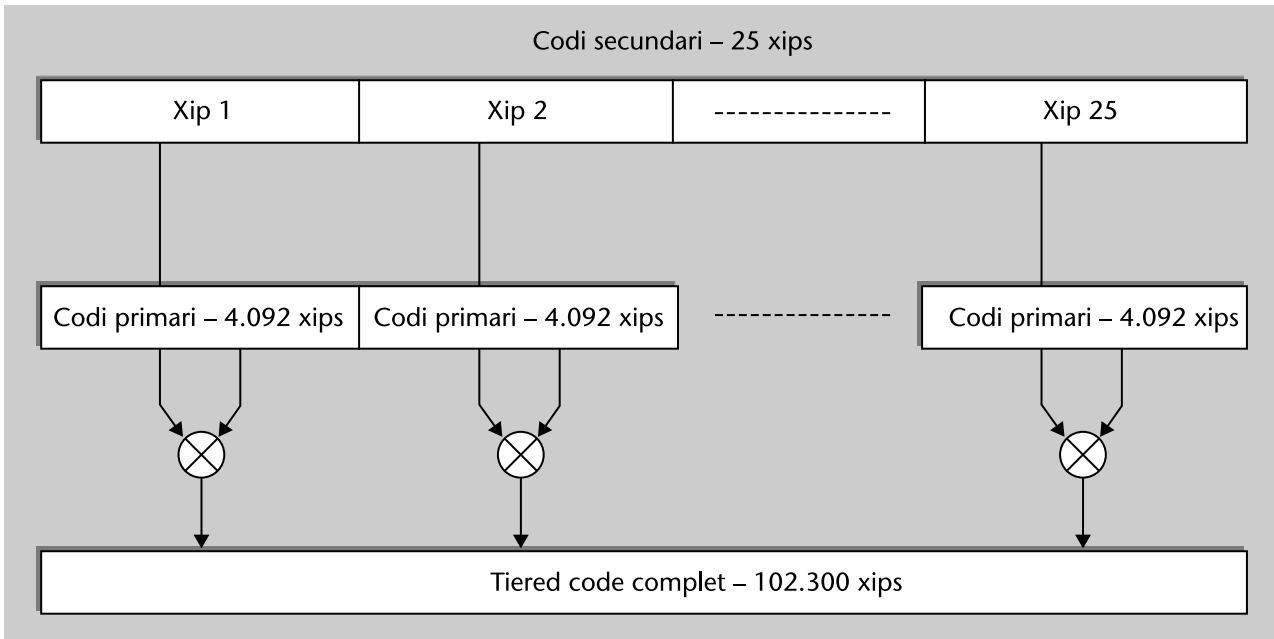
Figura 9. Subportadores CBOC utilitzades per als components B i C del senyal Galileo E1



Quant als codis pseudoaleatoris, s'utilitzen codis de memòria¹⁵. Es tracta de seqüències que no es generen mitjançant cap algorisme en particular, com per exemple els registres habituals de desplaçament amb realimentació lineal, sinó que són seqüències concretes els xips de les quals estan tabulats. Aquests codis es van obtenir en la fase de disseny del sistema mitjançant una cerca complexa de la millor combinació de +1 i -1, segons un conjunt de criteris relacionats amb l'optimització del nivell de lòbuls secundaris de l'autocorrelació i de la correlació encreuada en absència i en presència de diferències de freqüència Doppler, de la separació amb altres sistemes, etc. Els codis per al component B són directament seqüències de 4.092 xips, que és el que es denomina seqüència o codi primari. En canvi, per al component C no s'utilitzen directament seqüències de 102.300 xips perquè farien l'adquisició molt lenta en haver d'explorar moltes alternatives per a trobar el xip d'inici del senyal que està essent rebut. S'utilitzen els anomenats *tiered codes*, que es construeixen a partir de la concatenació de diversos codis primaris, el signe dels quals es va alternant segons un codi secundari, tal com s'il·lustra en la figura 10.

⁽¹⁵⁾En anglès, *memory codes*.

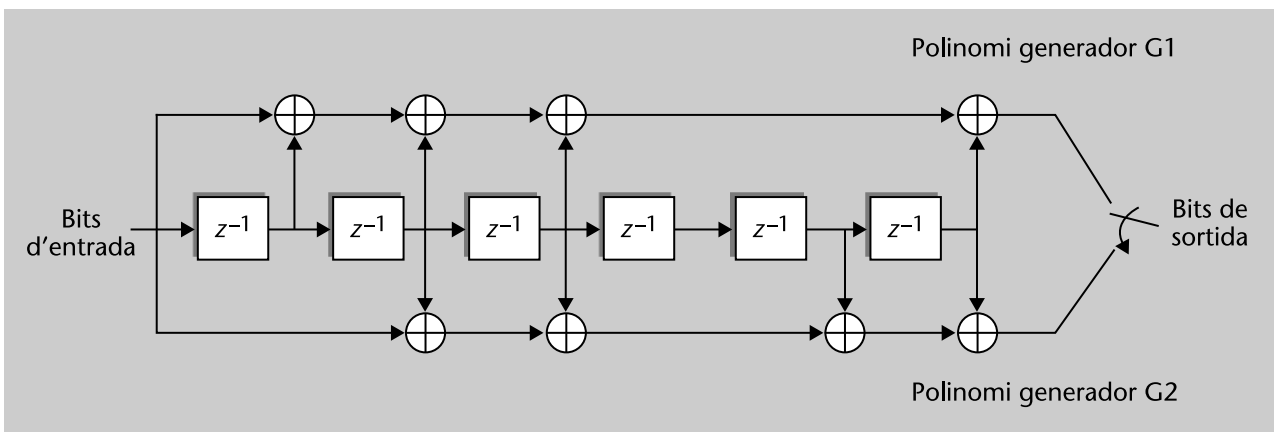
Figura 10. Construcció dels *tiered codes* del senyal E1-C a partir d'un codi primari i un altre de secundari



En el cas del pilot (per exemple, component C) del senyal Galileo E1, els codis primaris tenen longitud de 4.092 xips i els secundaris de 25 xips, generen un codi complet de $4.092 \times 25 = 102.300$ xips. Els satèl·lits utilitzen diferents codis primaris, però el mateix codi secundari en el cas del senyal E1-C.

Galileo incorpora protecció enfront d'errors en el missatge de navegació en la forma de codificació convolucional i entrellaçament. Els bits d'entrada es codifiquen mitjançant l'esquema de la figura 11 i els principals paràmetres es detallen en la taula 4. Aquest mateix codi s'utilitza també en tots els missatges de navegació de la resta de senyals Galileo.

Figura 11. Codificador convolucional utilitzat en els missatges de navegació de Galileo



Taula 4. Paràmetres bàsics del codi corrector d'errors

Paràmetre	Valor
Taxa del codi	1/2
Longitud de restricció (<i>constraint length</i>)	7

Paràmetre	Valor
Polinomis generadors	G1 = 171o G2 = 133o
Ordre de sortida	Primer G1 i després G2

Atès que la velocitat de símbol del senyal és de 250 símbols per segon i la senyalització és binària, la velocitat de la informació a l'entrada del descodificador és més petita que 125 bps (realment 114 bps), en què s'ha tingut en compte que el codi dobla el nombre de bits i a més s'han d'afegir patrons de sincronització.

Òbviament, no hi ha informació detallada sobre el component PRS, però sí que s'han publicat alguns aspectes. Per la naturalesa mateixa del senyal, la correcció d'aquests aspectes no està garantida, ja que en qualsevol moment es poden produir canvis sense que siguin notificats. El senyal PRS utilitza una modulació $\text{BOC}_{\cos}(15, 2,5)$ i segurament es transmet en quadratura respecte als altres dos components. Si introduïm el component PRS, obtenim l'expressió següent del senyal Galileo E1 en lloc de l'expressió 24,

$$s_{E1}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(e_{E1-B}(t) (\alpha sc_{E1,a}(t) + \beta sc_{E1,b}(t)) - e_{E1-C}(t) (\alpha sc_{E1,a}(t) - \beta sc_{E1,b}(t)) \right) + j\gamma e_{E1-A}(t) sc_{E1,c}(t) \quad (25)$$

en què $e_{E1-A}(t)$ conté les dades i el codi pseudoaleatori (tots dos xifrats) del component PRS (també identificat com a component A) i $sc_{E1,c}(t)$ és la subportadora corresponent al format $\text{BOC}_{\cos}(15, 2,5)$. El factor γ controla l'amplitud del senyal PRS en relació amb els components oberts del senyal. La potència de cadascun dels tres components és

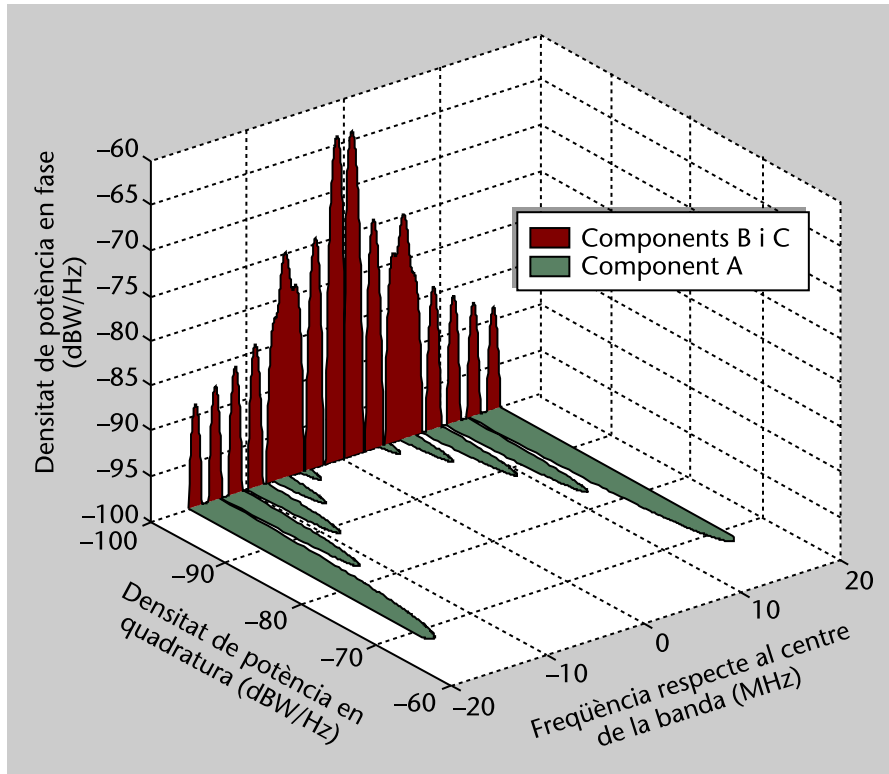
$$\begin{aligned} P_B = P_C &= \frac{1}{2}(\alpha^2 + \beta^2) = \frac{1}{2} \\ P_A &= \gamma^2 \end{aligned} \quad (26)$$

Per a obtenir aquestes expressions hem utilitzat que tant els senyals $e_{E1-X}(t)$ com les subportadores $sc_{E1,x}(t)$ són senyals binaris, que només prenen valors +1 i -1, que els senyals $e_{E1-X}(t)$ estan incorrelats entre si (que és lògic, atès que es basen en seqüències pseudoaleatòries diferents), i que les subportadores $sc_{E1,a}(t)$ i $sc_{E1,b}(t)$ són ortogonals entre si. Respecte a això últim, és fàcil comprovar que

$$\int_0^{R_{c,E1,b}^{-1}} sc_{E1,a}(t) sc_{E1,b}(t) dt = 0 \quad (27)$$

en què la integral es fa durant un període de xip. En la informació publicada s'indica que el senyal PRS tindrà la mateixa potència que els altres dos components conjuntament. Això implica que s'ha d'escollir $\gamma = 1$. L'espectre del senyal es mostra en la figura 12.

Figura 12. Espectre del senyal Galileo E1



El senyal de l'expressió 26 tindria tots els elements necessaris per a ser un senyal apropiat per a navegació. No obstant això, hi ha un problema amb el senyal tal com està plantejat perquè no té amplitud constant. De fet, l'amplitud al quadrat del senyal està determinada per

$$\begin{aligned}
 A^2(t) &= \frac{1}{2}(\alpha sc_{E1,a}(t) + \beta sc_{E1,b}(t))^2 + \frac{1}{2}(\alpha sc_{E1,a}(t) - \beta sc_{E1,b}(t))^2 \\
 &- e_{E1-B}(t)e_{E1-C}(t)(\alpha sc_{E1,a}(t) + \beta sc_{E1,b}(t))(\alpha sc_{E1,a}(t) - \beta sc_{E1,b}(t)) + \gamma^2 \\
 &= (\alpha^2 + \beta^2) - e_{E1-B}(t)e_{E1-C}(t)(\alpha^2 - \beta^2) + \gamma^2 \\
 &= 1 - e_{E1-B}(t)e_{E1-C}(t)(\alpha^2 - \beta^2) + \gamma^2
 \end{aligned} \tag{28}$$

L'amplitud només seria constant si es complís que $\alpha^2 = \beta^2$, però aquest no és el cas d'acord amb els valors que s'utilitzen en el senyal de Galileo E1 (observeu l'expressió 25).

El problema causat per la falta d'una envolupant constant s'origina per una qüestió tecnològica; concretament està ocasionat per les no-linealitats dels amplificadors d'alta potència que s'utilitzen a bord dels satèl·lits. A la zona de funcionament eficient quant a potència aquests amplificadors no són lineals i es caracteritzen per les seves corbes AM-AM i AM-PM, que indiquen com canvien l'amplitud i fase de sortida en funció de l'amplitud d'entrada. Si l'amplitud

del senyal d'entrada no és constant, es produeixen distorsions d'amplitud i fase en la sortida que degraden les prestacions del senyal i també poden crear interferències en altres bandes properes.

Efecte *spectral re-growth*

La interferència en altres bandes està causada normalment per l'efecte conegut com a *spectral re-growth*. Consisteix que les distorsions AM-AM i AM-PM fan que els components espectrals del senyal d'entrada de valor petit i situats al voltant dels extrems de la banda augmentin de magnitud, per la qual cosa el senyal de sortida acaba tenint uns components espectrals importants on l'entrada no en tenia.

Evidentment, es pot reduir el nivell d'entrada a l'amplificador (el que es denomina *back-off*) perquè aquest treballi en règim lineal, però això no interessa perquè es perden diversos dB de potència de sortida, i en GNSS (com en la majoria de sistemes de transmissió per satèl·lit) les pèrdues de propagació són elevades i els satèl·lits tenen una capacitat limitada de generar energia, per la qual cosa la potència és un recurs escàs, de manera que l'objectiu és sempre buscar alternatives per a augmentar la potència rebuda a la Terra. Hi ha moltes alternatives en la bibliografia per a compensar o combatre els efectes de la no-linealitat de l'amplificador, però no hi ha realment cap solució definitiva al problema. Tant si s'aplica alguna tècnica de compensació com si no, i independentment de quina s'apliqui, el problema es redueix si s'intenta que el senyal d'entrada tingui una amplitud tan constant com sigui possible. En els senyals de Galileo això s'ha tingut en compte i s'han adoptat diferents estratègies per a aconseguir senyals d'amplitud constant. Per al senyal de la banda E1, s'han utilitzat les tècniques anomenades *coherent adaptive subcarrier modulation* (CASM) i *interplex modulation*.

CASM

CASM també rep el nom de *modified tri-code hexaphase modulation*.

CASM està recollit en la patent en P. A. Dafesh (2002) i va ser presentat en P. A. Dafesh; S. Lazar; T. Nguyen (1999) i en P. A. Dafesh (1999), mentre que Interplex ja va ser proposat en S. Butman; O. Timor (1971) i S. Butman; O. Timor (1972). Totes dues tècniques condueixen essencialment al mateix tipus de senyal, i el que les diferencia és la manera com es deriven i la implementació a la qual condueixen. Interplex es basa únicament a sumar diferents components per a aconseguir una envolupant constant, mentre que CASM combina la suma de senyals amb modulacions angulars. L'explicació que donarem a continuació és més propera a la derivació de l'Interplex. Cal fer notar que tant Interplex com CASM són aplicables quan els components individuals són binaris, i aquest seria el cas de Galileo E1 si incloguéssim només senyals BOC (aquesta era la situació en la proposta de senyal Galileo de l'any 2004). Els senyals CBOC prenen quatre valors possibles (vegeu la figura 9), la qual cosa fa necessaris alguns canvis en la tècnica Interplex i CASM, i condueix al que s'ha denominat *modified interplex* o *modified CASM*. No obstant això, els canvis són mínims i les tècniques CASM/Interplex i les seves versions modificades són essencialment el mateix perquè la idea del desenvolupament que explicarem a continuació és vàlida tant per a senyals BOC, CBOC, BPSK, etc.; solament en l'últim pas s'ha de particularitzar al valor que prenen els senyals concrets involucrats.

L'element clau en totes aquestes tècniques és sempre el mateix; es tracta d'afegir un quarta component al senyal. Aquest terme és funció de les tres anteriors i es denomina *terme o component d'intermodulació*. No és per si mateix un terme desitjat perquè cal assignar-li una part de la potència i no aporta informació útil (encara que hi ha algunes publicacions que indiquen com es pot aprofitar el terme d'intermodulació de CASM per a transmetre informació addicional), però és convenient perquè fa que l'amplitud del senyal en el seu conjunt sigui constant.

La nova expressió del senyal en aplicar les tècniques *modified interplex* o *modified CASM* és

$$s_{E1}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(e_{E1-B}(t) (\alpha s_{E1,a}(t) + \beta s_{E1,b}(t)) - e_{E1-C}(t) (\alpha s_{E1,a}(t) - \beta s_{E1,b}(t)) \right) + j \left(\gamma e_{E1-A}(t) s_{E1,c}(t) + s_{IM}(t) \right) \quad (29)$$

en què $s_{IM}(t)$ és el nou component d'intermodulació. L'amplitud al quadrat d'aquest senyal és

$$A^2(t) = 1 - e_{E1-B}(t) e_{E1-C}(t) (\alpha^2 - \beta^2) + \gamma^2 + s_{IM}^2(t) + 2\gamma e_{E1-A}(t) s_{E1,c}(t) s_{IM}(t) \quad (30)$$

Observem que $s_{IM}^2(t)$ és constant si $s_{IM}(t)$ és binària. Llavors, perquè $A(t)$ sigui constant, el segon i cinquè termes de l'expressió 31 s'han d'anul·lar entre ells, la qual cosa implica que

$$\begin{aligned} -e_{E1-B}(t) e_{E1-C}(t) (\alpha^2 - \beta^2) &= 2\gamma e_{E1-A}(t) s_{E1,c}(t) s_{IM}(t) \\ \Downarrow \\ s_{IM}(t) &= -\frac{1}{2\gamma} \frac{e_{E1-B}(t) e_{E1-C}(t) (\alpha^2 - \beta^2)}{e_{E1-A}(t) s_{E1,c}(t)} \end{aligned} \quad (31)$$

Si a més tenim en compte que $e_{E1-A}(t) s_{E1,c}(t)$ és un terme binari, i en conseqüència és indiferent dividir o multiplicar per aquest, l'expressió final del terme d'intermodulació és

$$\begin{aligned} -e_{E1-B}(t) e_{E1-C}(t) (\alpha^2 - \beta^2) &= 2\gamma e_{E1-A}(t) s_{E1,c}(t) s_{IM}(t) \\ \Downarrow \\ s_{IM}(t) &= -\frac{1}{2\gamma} (\alpha^2 - \beta^2) e_{E1-B}(t) e_{E1-C}(t) e_{E1-A}(t) s_{E1,c}(t) \end{aligned} \quad (32)$$

Podem concloure que l'expressió definitiva de senyal Galileo E1 és

$$\begin{aligned}
s_{E1}(t) &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left(e_{E1-B}(t) (\alpha s_{E1,a}(t) + \beta s_{E1,b}(t)) - e_{E1-C}(t) (\alpha s_{E1,a}(t) - \beta s_{E1,b}(t)) \right) \\
&+ j \left(\gamma e_{E1-A}(t) s_{E1,c}(t) - \frac{1}{2\gamma} (\alpha^2 - \beta^2) e_{E1-B}(t) e_{E1-C}(t) e_{E1-A}(t) s_{E1,c}(t) \right) \\
&= \frac{1}{\sqrt{2}} e_{E1-B}(t) \left(\sqrt{\frac{10}{11}} s_{E1,a}(t) + \sqrt{\frac{1}{11}} s_{E1,b}(t) \right) \\
&- \frac{1}{\sqrt{2}} e_{E1-C}(t) \left(\sqrt{\frac{10}{11}} s_{E1,a}(t) - \sqrt{\frac{1}{11}} s_{E1,b}(t) \right) \\
&+ j \left(e_{E1-A}(t) s_{E1,c}(t) - \frac{9}{22} e_{E1-B}(t) e_{E1-C}(t) e_{E1-A}(t) s_{E1,c}(t) \right)
\end{aligned} \tag{33}$$

en què hem introduït en l'última igualtat els valors concrets que prenen α , β i γ . El preu que hem de pagar per tenir un senyal d'amplitud constant és la potència que es dedica al terme $s_{IM}(t)$, que concretament és un 7,7%. La fracció de la potència corresponent a cada component es detalla en la taula 5.

Taula 5. Distribució de potències en el senyal Galileo E1

Component	Fracció de la potència
Component A (PRS)	46,14%
Component B (dades)	23,07%
Component C (pilot)	23,07%
Component d'intermodulació	7,72%

2.2.2. Senyal Galileo E5

El Galileo E5 ocupa la banda que va d'1,164 MHz a 1,215 MHz. Presenta un disseny molt interessant perquè permet interpretar-lo com un únic senyal centrat en 1.195,795 MHz que ocupa tota la banda E5 o com la combinació dels senyals transmesos en les bandes E5a i E5b.

Les bandes E5a i E5b tenen un amplada de banda de 20,46 MHz cadascuna, i estan centrades en 1.176,45 MHz i 1.207,140 MHz, respectivament. Però no es tracta només d'una interpretació, sinó que això determina també les diferents maneres en què es pot processar el senyal i té un efecte pràctic immediat. Si es processa com un únic senyal, llavors el receptor està utilitzant un senyal d'una gran amplada de banda (51 MHz aproximadament), que té, per tant, una gran precisió en la mesura de *timing*. El principal avantatge de processar una gran amplada de banda és la reducció del *jitter* en els pseudorangs causat pel soroll i dels errors causats pel multicamí. D'altra banda, la complexitat del receptor augmenta i també el seu consum d'energia, principalment a causa de l'ús de freqüències de mostreig més grans, en haver de rebre un senyal de banda ampla. Atès que el processament de senyal E5 completa pot no resultar apropiat per a receptors del *mass-market*, ja que n'incrementaria excessivament el cost, és convenient tenir la possibilitat de processar cadascuna de les subbandes de manera independent.

El senyal Galileo E5 es genera realment com un únic senyal a partir de quatre components. El que ocorre és que el disseny s'ha fet de manera que si es filtra i es deixa passar només una de les subbandes, llavors no es distorsiona el senyal de manera arbitrària, sinó que s'eliminen dos dels quatre components i es deixen passar els altres dos gairebé sense distorsió. Els quatre components que inclou el senyal són:

- Un component de dades (e_{E5a-I}) en la banda E5a que transmet el missatge de navegació F/NAV mitjançant els símbols D_{E5a-I} . La seqüència pseudoaleatòria associada a aquest component és C_{E5a-I}
- Un component pilot (e_{E5a-Q}) en la banda E5a, el codi pseudoaleatori de la qual és C_{E5a-Q} .
- Un component de dades (e_{E5b-I}) en la banda E5b que transmet el missatge de navegació I/NAV mitjançant els símbols D_{E5b-I} . La seqüència pseudoaleatòria associada a aquest component és C_{E5b-I} .
- Un component pilot (e_{E5b-Q}) en la banda E5b, el codi pseudoaleatori de la qual és C_{E5b-Q} .

La formulació matemàtica d'aquests quatre components és:

$$\begin{aligned}
 e_{E5a-I}(t) &= \sum_{i=-\infty}^{+\infty} c_{E5a-I} [i \bmod L_{E5a-I}] D_{E5a-I} \left[\text{floor} \left(i \frac{R_{s,E5a-I}}{R_{c,E5a-I}} \right) \right] \prod (R_{c,E5a-I} t - i) \\
 e_{E5a-Q}(t) &= \sum_{i=-\infty}^{+\infty} c_{E5a-Q} [i \bmod L_{E5a-Q}] \prod (R_{c,E5a-Q} t - i) \\
 e_{E5b-I}(t) &= \sum_{i=-\infty}^{+\infty} c_{E5b-I} [i \bmod L_{E5b-I}] D_{E5b-I} \left[\text{floor} \left(i \frac{R_{s,E5b-I}}{R_{c,E5b-I}} \right) \right] \prod (R_{c,E5b-I} t - i) \\
 e_{E5b-Q}(t) &= \sum_{i=-\infty}^{+\infty} c_{E5b-Q} [i \bmod L_{E5b-Q}] \prod (R_{c,E5b-Q} t - i)
 \end{aligned} \tag{34}$$

en què els valors dels paràmetres que apareixen en les expressions anteriors s'especifiquen en la taula 6.

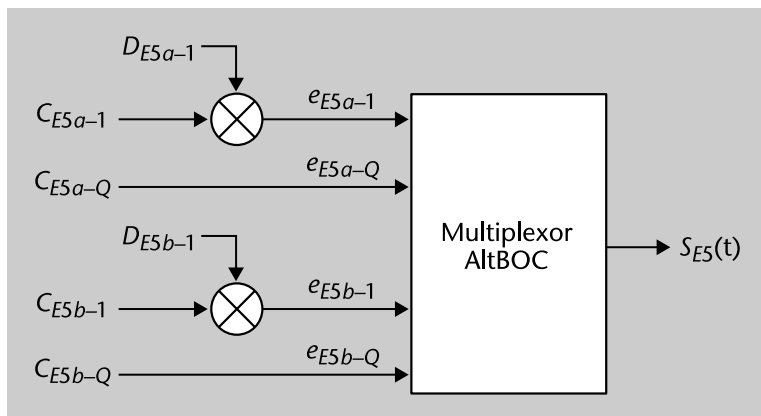
Taula 6. Paràmetres bàsics del senyal E5

Paràmetre	Valor
L_{E5a-I}	204.600 xips
L_{E5a-Q}	1.023.000 xips
L_{E5b-I}	4.092 xips
L_{E5b-Q}	1.023.000 xips
$R_{s,E5a-I}$	50 símbols/s

Paràmetre	Valor
$R_{s,E5b-I}$	250 símbols/s
$R_{c,E5a-I}$	10,23 Mxips/s
$R_{c,E5a-Q}$	10,23 Mxips/s
$R_{c,E5b-I}$	10,23 Mxips/s
$R_{c,E5b-Q}$	10,23 Mxips/s

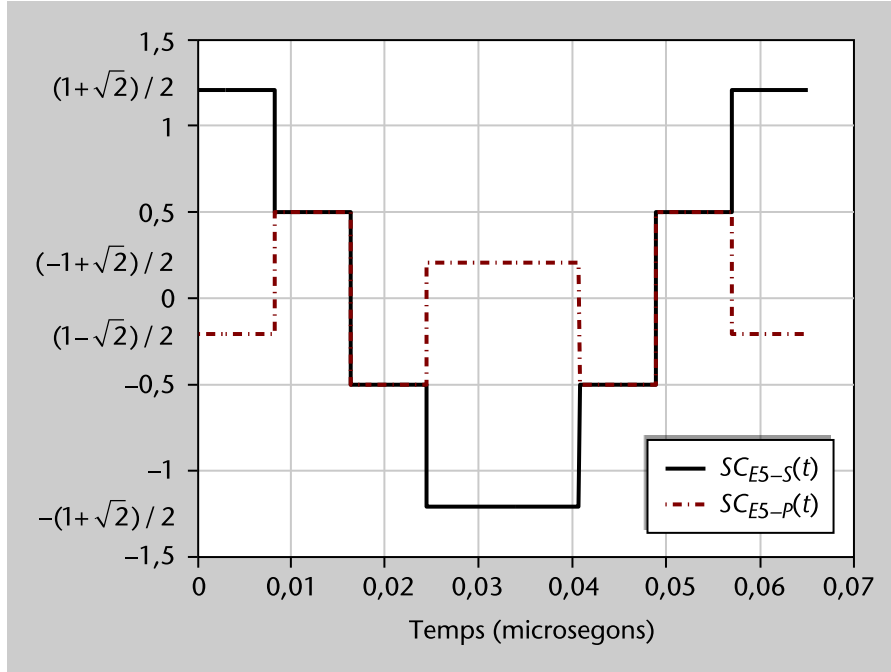
Els quatre components del senyal es multiplexen d'una manera especial generant el que es denomina un senyal AltBOC (*alternative BOC*). Això es representa de manera molt esquemàtica en la figura 13. Com veurem a continuació, el format AltBOC és simultàniament una tècnica de multiplexació i una manera de fer que el senyal resultant tingui envolupant constant. Per expressar matemàticament la funció del bloc multiplexor AltBOC, hem de definir en primer lloc dos senyals periòdics denominats $sc_{E5-S}(t)$ i $sc_{E5-P}(t)$. Un període de cadascun d'aquests senyals es mostra en la figura 14 i té una durada ($T_{sc,E5}$), que és l'invers de $R_{sc,E5} = 15 \times 1.023\text{MHz} = 15.345\text{MHz}$. Aquests senyals es diuen de vegades subportadores, però això representa un cert abús del llenguatge, ja que l'única que realment té el paper de subportadora és $sc_{E5-S}(t)$, com veurem a continuació. És convenient observar que un xip conté un període i mig dels senyals $sc_{E5-S}(t)$ i $sc_{E5-P}(t)$ atès que $R_{sc,E5}/R_{c,E5x-Y} = 1,5$.

Figura 13. Components que formen el senyal AltBOC



Concretament, el format de senyal en la banda E5 es denomina AltBOC(15,10) perquè 15 i 10 són els factors que defineixen la freqüència de les subportadores i la freqüència de xip, respectivament.

Figura 14. Un període de les dues funcions bàsiques involucrades en el senyal AltBOC



També hem de definir els productes d'intermodulació següents d'una manera que recorda el que es va fer per al senyal Interplex en E1:

$$\begin{aligned} \tilde{e}_{E5a-I}(t) &= e_{E5a-Q}(t)e_{E5b-I}(t)e_{E5b-Q}(t) & \tilde{e}_{E5b-I}(t) &= e_{E5b-Q}(t)e_{E5a-I}(t)e_{E5a-Q}(t) \\ \tilde{e}_{E5a-Q}(t) &= e_{E5a-I}(t)e_{E5b-I}(t)e_{E5b-Q}(t) & \tilde{e}_{E5b-Q}(t) &= e_{E5b-I}(t)e_{E5a-I}(t)e_{E5a-Q}(t) \end{aligned} \quad (35)$$

Ara ja estem en disposició d'expressar el senyal Galileo E5 com

$$\begin{aligned} S_{E5} &= \frac{1}{2\sqrt{2}}(e_{E5a-I}(t) + je_{E5a-Q}(t))(sc_{E5-S}(t) - jsc_{E5-S}(t - T_{sc,E5}/4)) \\ &+ \frac{1}{2\sqrt{2}}(e_{E5b-I}(t) + je_{E5b-Q}(t))(sc_{E5-S}(t) - jsc_{E5-S}(t - T_{sc,E5}/4)) \\ &+ \frac{1}{2\sqrt{2}}(\tilde{e}_{E5a-I}(t) + j\tilde{e}_{E5a-Q}(t))(sc_{E5-P}(t) - jsc_{E5-P}(t - T_{sc,E5}/4)) \\ &+ \frac{1}{2\sqrt{2}}(\tilde{e}_{E5a-I}(t) + j\tilde{e}_{E5a-Q}(t))(sc_{E5-P}(t) - jsc_{E5-P}(t - T_{sc,E5}/4)) \end{aligned} \quad (36)$$

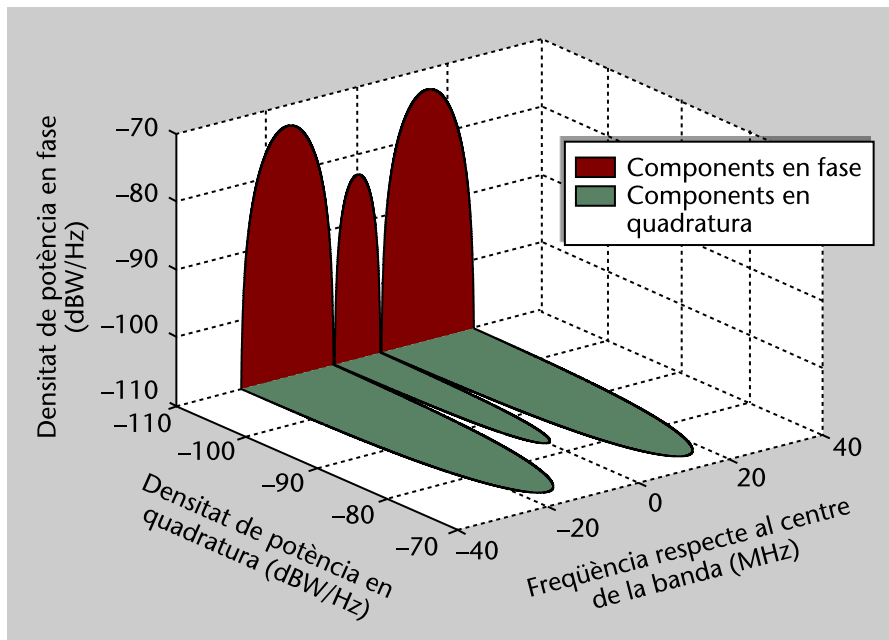
Interpretarem el significat de cadascun dels termes d'aquesta expressió. La subportadora $sc_{E5-S}(t)$ és un cosinus quantificat amb quatre nivells, i si es retarda un quart del període es converteix en un sinus. Per tant, a l'hora d'analitzar l'expressió 37 qualitativament podem fer l'associació

$$sc_{E5-S}(t) \pm jsc_{E5-S}(t - T_{sc,E5}/4) \approx e^{\pm j2\pi R_{sc,E5}t} \quad (37)$$

Llavors, el factor que apareix en el primer terme de l'expressió 37, o sigui, $(sc_{E5-S}(t) - jsc_{E5-S}(t - T_{sc,E5}/4))$, simplement trasllada 15.345 MHz cap a l'esquerra el senyal que està multiplicant, i aquesta és la meitat de separació que hi ha entre els centres de les bandes E5a i E5b. El terme $(e_{E5a-I}(t) + je_{E5a-Q}(t))$ solament pren els valors $\pm 1 \pm j$, per la qual cosa es pot veure com una modula-

ció QPSK. En definitiva, el primer terme de l'expressió 37 és aproximadament un senyal convencional *spread-spectrum* QPSK (per exemple, com el codi C/A de GPS, que és un senyal *spread-spectrum* BPSK, però estès als components en fase i en quadratura) traslladat a -15.345 MHz en freqüència. El mateix es pot dir del segon terme, però traslladat a $+15.345$ MHz. La figura 15 mostra l'espectre del senyal E5. Podem comprovar que té l'energia concentrada entorn de -15.345 MHz i $+15.345$ MHz, que correspon a les dues modulacions aproximadament QPSK que formen el senyal. Per exemple, el lòbul centrat en -15.345 MHz i que està en l'eix vertical correspon fonamentalment al final de l'expressió $e_{E5a-I}(t)(s_{cE5-S}(t) - j s_{c}(t - T_{sc,E5}/4))$ 37. Partint d'aquest exemple és fàcil identificar la contribució de la resta de termes de l'expressió 37 en aquesta figura. Arribats a aquest punt és clar per què un receptor que filtri el senyal d'entrada i es quedi amb una de les subbandes obté un dels primers termes de l'expressió 37 gairebé sense distorsió (segons si agafa la part inferior o superior de la banda E5).

Figura 15. Espectre del senyal Galileo E5



El tercer i quart termes de $s_{E5}(t)$ no tenen una justificació intuïtiva clara, sinó que són termes que s'afegeixen perquè el senyal tingui amplitud constant, i que representen aproximadament el 15% de la potència total del senyal. No és difícil, encara que sí laboriós, deduir a partir de l'expressió 37 que efectivament l'amplitud sigui constant.

Les característiques dels codis pseudoaleatoris utilitzats en el senyal E5 es detallen en la taula 7. Igual que en el component E1-C, s'utilitzen *tiered codes*, però la diferència és que els codis primaris no són codis de memòria, sinó que es poden obtenir mitjançant registres lineals de desplaçament de longitud 14 (això és molt similar a com s'obtenia el codi C/A de GPS, encara que en aquest cas la longitud era 10). Per a cada component del senyal s'utilitzen dos registres de desplaçament, en què cadascun genera una seqüència m , que sumades

donen lloc a una seqüència de Gold. No obstant això, atès que la longitud de la seqüència seria 16.383 xips, es trunca a 10.230. Quant als codis secundaris, els components E5a-I i E5b-I utilitzen el mateix per a tots els satèl·lits, mentre que en els components E5a-Q i E5b-Q el codi és diferent per a cada satèl·lit.

Taula 7. Codis pseudoaleatoris del senyal E5

Component	Longitud del codi primari (xips)	Longitud del codi secundari (xips)	Longitud del codi tiered (ms)
E5a-I	10.230	20	20
E5a-Q	10.230	100	100
E5b-I	10.230	4	4
E5b-Q	10.230	100	100

La codificació de canal és exactament la mateixa que la descrita per al senyal E1-B. L'única diferència entre el tractament que rep el missatge F/NAV (en el component E5a-I) i del missatge I/NAV (en els components E5b-I i E1-B) és que per al primer s'utilitza un entrellaçat més gran que per al segon.

2.2.3. Senyal Galileo E6

El senyal E6 de Galileo es transmet en una banda que va de 1.260 MHz a 1.300 MHz, amb una freqüència portadora de 1.278,75 MHz. Té una estructura molt similar al senyal E1, i la principal diferència a escala de modulació és que utilitza senyals BPSK (per exemple, polsos rectangulars) en lloc de CBOC.

El senyal E6 consta de dos components d'ús civil:

- Un component de dades (e_{E6-B}) que transmet el missatge de navegació C/NAV, amb una velocitat de símbol de $R_{s,E6-B} = 1.000$ símbols/segon, i amb una seqüència pseudoaleatòria que denominem c_{E6-B} .
- Un component pilot (e_{E6-C}), la seqüència aleatòria del qual és c_{E6-C} .

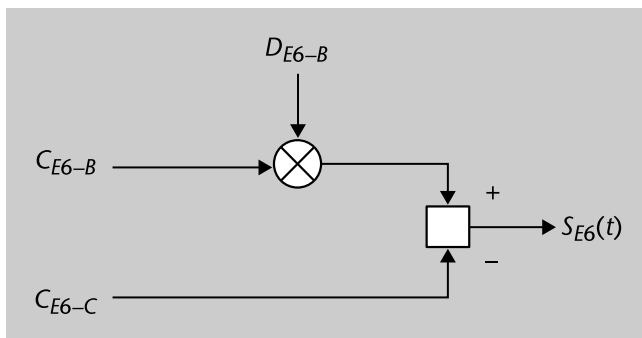
Aquests components es poden expressar com

$$\begin{aligned}
 e_{E6-B}(t) &= \sum_{i=-\infty}^{+\infty} c_{E6-B} [i \bmod L_{E6-B}] D_{E6-B} \left[\text{floor} \left(i \frac{R_{s,E6-B}}{R_{c,E6-B}} \right) \right] \prod (R_{c,E6-B} t - i) \\
 e_{E6-C}(t) &= \sum_{i=-\infty}^{+\infty} c_{E6-C} [i \bmod L_{E6-C}] \prod (R_{c,E6-C} t - i)
 \end{aligned} \tag{38}$$

en què la longitud dels codis L_{E6-B} i L_{E6-C} no està definida en l'especificació actual de Galileo en *European GNSS (Galileo) Open Service Signal In Space Interface Control Document*, i la velocitat de xip de tots dos components és $R_{c,E6-B} = R_{c,E6-C} = 5.115$ Mchips/s. L'única informació que apareix sobre els codis en *European GNSS (Galileo) Open Service Signal In Space Interface Control Document* és que en el component E6-B no hi haurà cap codi secundari, mentre que en el component E6-C hi haurà un codi secundari, específic per satèl·lit, de longitud igual a 100 xips. La falta d'informació sobre el senyal E6 és un clar reflex que el servei comercial de Galileo és el menys desenvolupat de moment i el que es considera ara mateix menys prioritari per al desplegament de Galileo.

L'esquema que il·lustra la generació del senyal es mostra en la figura 16. Hi podem observar que, a diferència del senyal E1, no s'utilitza cap tipus subportadora. Això és així perquè el senyal E6 utilitza polsos rectangulars per a conformar els xips, és a dir, no utilitza cap modulació del tipus CBOC. En la nomenclatura habitual de GNSS, es diu que el senyal E6 és del tipus BPSK(5), en què el terme 5 indica que la taxa de xip és cinc vegades la freqüència base de 1.023 MHz.

Figura 16. Esquema de generació del senyal Galileo E6

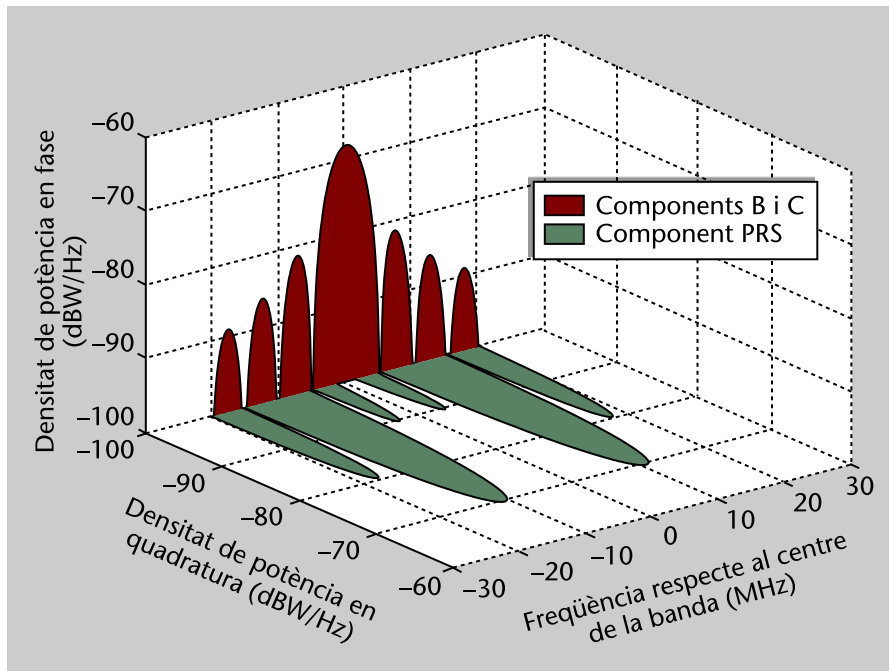


La descripció que acabem de proporcionar del senyal $s_{E6}(t)$ realment es refereix als components d'ús civil que hi haurà en la banda E6. Tots dos components formaran el component en fase del senyal total E6, mentre que en el component en quadratura es transmetrà un senyal d'ús regulat (per exemple, PRS). La manera d'incloure el component PRS i d'aconseguir que l'envolupant sigui constant és igual a com es va explicar per al senyal E1, per la qual cosa no repetirem aquí els detalls. Bàsicament, s'utilitzen les tècniques CASM o *interplex modulation*, i el resultat es pot interpretar com s'afegeix un terme addicional (anomenat *producte d'intermodulació*) en el component en quadratura. La manera de calcular aquest terme és immediata a partir del desenvolupament fet per al senyal E1; i simplement cal particularitzar-lo per a $\alpha = 1$ i $\beta = 0$. L'espectre del senyal E6 es mostra en la figura 17.

Referència bibliogràfica

European GNSS (Galileo) Open Service Signal In Space Interface Control Document (US SIS ICD) (núm. 1, febr., 2010). European Union.

Figura 17. Espectre del senyal Galileo E6



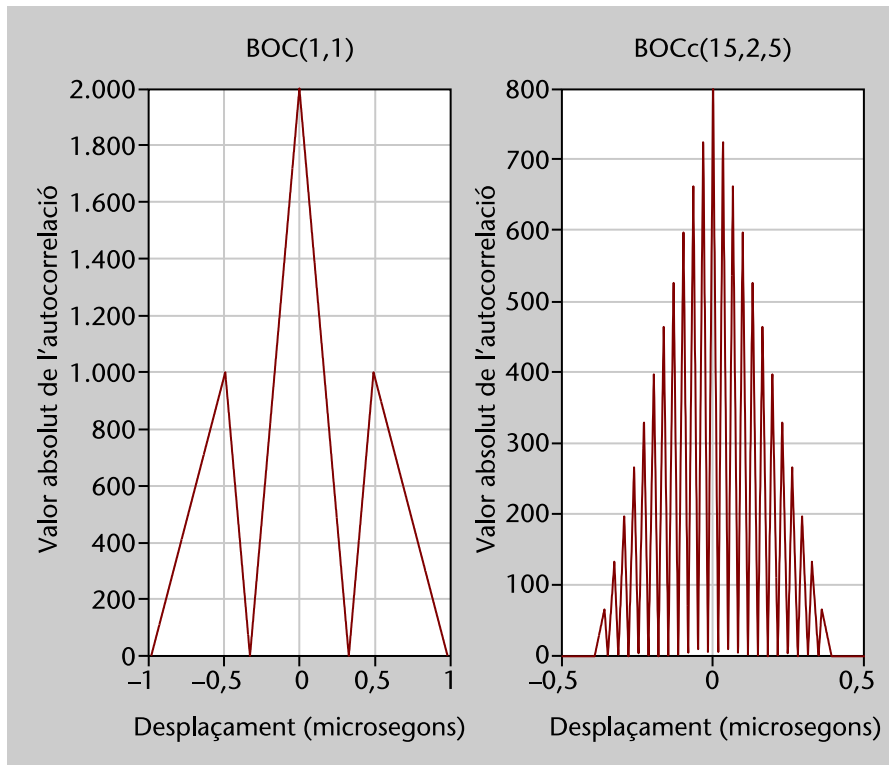
2.3. Arquitectura del receptor

Un receptor de Galileo té exactament la mateixa arquitectura que un receptor de GPS, atès que tots dos sistemes comparteixen els mateixos fonaments en els senyals i en el principi de càlcul de la posició. Com acabem de veure, Galileo transmet en cadascuna de les seves bandes senyals que contenen diversos components, i cadascun dels components pot tenir dades o no, estar en el component en fase o en quadratura, etc., però cada component no deixa de ser un senyal *direct-sequence spread-spectrum* (DS-SS). I la manera de mesurar el retard i la fase d'un senyal DS-SS, i també de detectar les possibles dades que envia, és la que es va explicar en el mòdul "El sistema GPS", amb relació fonamentalment al senyal C/A de GPS. Per tant, un receptor Galileo no difereix qualitativament d'un receptor GPS, sinó que les diferències són quantitatives en el sentit que un receptor Galileo pot tenir més canals per a processar més components que contenen els senyals, però cada canal continua tenint la mateixa estructura que l'explicada en el mòdul "El sistema GPS". No obstant això, hi ha un aspecte distintiu pel que fa al processament del senyal GPS C/A que convé esmentar, i fa referència al fet que en Galileo s'utilitzin senyals BOC. La correlació dels senyals BPSK (en particular del senyal GPS C/A, que és del tipus BPSK(1)) té forma triangular, però els senyals BOC tenen una correlació amb oscil·lacions dins de l'envolupant triangular, com s'observa en els dos exemples de la figura 18. I el nombre d'oscil·lacions augmenta amb l'ordre (definit com el quocient entre la freqüència subportadora i la freqüència de xip) del senyal BOC. Per tant, la correlació dels senyals BOC presenta màxims locals.

Vegeu també

L'arquitectura d'un receptor de GPS es descriu en el mòdul "El sistema GPS" d'aquesta assignatura.

Figura 18. Exemples de l'autocorrelació de dos senyals BOC



Si ara recordem el funcionament del DLL, veurem que aquestes màximes locals poden causar seriosos problemes en l'etapa de seguiment o *tracking*. El motiu és que el DLL mesura el retard del senyal a partir de la posició dels encreuaments per zero de la corba S o corba de discriminació. Utilitzant un discriminador estàndard, aquesta corba té encreuaments per zero en les posicions dels màxims locals de la correlació. Quan la correlació és triangular, aquest comportament és l'adequat perquè l'encreuament per zero de la corba S coincidirà amb el màxim de la correlació, la posició de la qual ens informa del retard del senyal. Però quan la correlació té màxims locals, la corba S tindrà diversos encreuaments per zero i el DLL es pot quedar enganxat en qualsevol d'aquests encreuaments per zero, i causar un biaix en la mesura del retard (i per tant, també de la distància). Els encreuaments per zero al voltant dels quals el DLL és estable i que no corresponen amb la posició del màxim de la correlació es denominen *falsos punts d'enganxament*. Si la fase d'adquisició proporciona un valor del retard que està més a prop d'un determinat punt d'enganxament fals que del màxim de la correlació, és molt probable que el DLL acabi convergint a aquest punt d'enganxament fals. Però fins i tot si durant la fase de *tracking* el DLL està seguint l'encreuament per zero correcte, pot ocórrer que a causa del soroll, interferències o multicamí, el DLL "salti" a un fals punt i es quedi al voltant d'aquest valor i proporcioni unes mesures de retard esbiaixades. Noteu que el biaix pot prendre un valor molt gran en metres, atès que la distància entre els màxims locals i el màxim absolut de la correlació és una fracció significativa del temps de xip (vegeu la figura 18).

Vegeu també

El funcionament del DLL s'explica en el mòdul "El sistema GPS" d'aquesta assignatura.

En definitiva, de la discussió del paràgraf anterior es dedueix que per a mesurar el retard utilitzant senyals BOC és necessari prendre mesures perquè el DLL segueixi la posició del màxim de la correlació i no la posició d'algun dels màxims locals. S'han proposat diversos tipus de tècniques per a aconseguir això, que repassarem a continuació. La necessitat d'incloure aquestes tècniques en el llaç de seguiment del retard és una de les diferències fonamentals entre un canal per a un senyal BOC i l'arquitectura bàsica explicada per al senyal GPS C/A. En particular, això afecta en Galileo el senyal E1, el component PRS en E6 i el senyal E5 si es processa aquest últim com un únic senyal i no com dos senyals: E5a i E5b, per separat.

Les tècniques la missió de les quals és evitar que el DLL acabi mesurant el retard corresponent a la posició d'un màxim local se solen recollir sota el títol de tècniques per a adquisició/*tracking* no ambigu de senyals BOC.

Quant a les tècniques que ens ocupen, es poden agrupar en les categories següents:

- **Full BOC with bump jumping.** En aquestes tècniques s'utilitza com a senyal de referència en el receptor el senyal BOC mateix; per això s'anomena *full BOC*. I per tant, el receptor obté una corba de correlació amb màxims locals, com les mostrades en les figures anteriors. Per a detectar si el DLL està enganxat a un màxim local s'afegeixen dos correladors més, anomenats *very early (VE)* i *very late (VL)*, que estan més separats que els correladors habituals *early* i *late* presents en el DLL. Els correladors VE i VL se situen de manera que caiguin sobre dos màxims locals si s'està seguint el màxim de la correlació, i per tant, la seva amplitud serà en aquest cas molt més petita que la del correlador *prompt (P)*. Si no s'està seguint el màxim de la correlació, sinó un màxim local, l'amplitud de P no serà gaire més gran que l'amplitud de tant VE com VL, i així, d'aquesta manera, es té un criteri per a decidir si el DLL ha caigut en un punt d'enganxament fals o no. Si ha caigut en un punt d'enganxament fals, es corregeix el retard obtingut pel DLL i es torna a comprovar. L'avantatge d'aquestes tècniques és que aprofiten la precisió més gran en la mesura del retard proporcionada pels senyals BOC perquè es fa una correlació *full BOC*, i per tant, s'obté una correlació abrupta a la zona corresponent al màxim absolut (per exemple, més abrupta que per a un senyal BPSK de la mateixa taxa de xip). El desavantatge és que el funcionament no és satisfactori en escenaris hostils, com per exemple, quan es reben components multicamí potents o quan l'SNR és baixa.
- **Dual side-band processing.** Aquestes tècniques aprofiten el fet que l'espectre dels senyals BOC se centra en dues zones que corresponen a més/ menys la freqüència de la subportadora. Si s'agafa només una de les dues zones, s'obté un espectre molt similar al d'un senyal BPSK, la correlació del qual és aproximadament triangular i, per tant, no presenta ambigüitat en el *tracking*. Aquestes tècniques tracten per separat cadascuna de les

Vegeu també

Noteu que l'ambigüitat a la qual ens referim té un origen completament diferent de l'ambigüitat en els observables; les seves tècniques de resolució s'estudien en el mòdul "El sistema GPS" d'aquesta assignatura.

subbandes dels senyals BOC. Seguidament, o bé combinen les correlacions obtingudes de cadascuna de les subbandes de manera no coherent o bé combinen les estimacions de retard obtingudes en cadascuna de les subbandes. L'avantatge d'aquestes tècniques és la senzillesa, perquè els senyals de cadascuna de les subbandes es poden processar amb les tècniques estàndard dels senyals BPSK, però l'inconvenient és que es perd la precisió més gran que aportaria l'amplada de banda efectiva més gran dels senyals BOC (perquè es processen dos senyals de menys amplada de banda).

- **Virtual subcarrier BPSK tracking / Double estimation techniques.** Aquesta categoria inclou un gran nombre de tècniques proposades bastant diferents en aparença. No obstant això, la idea que subjeu en totes consisteix a fer dues estimacions del retard, una a partir de la subportadora i una altra a partir de l'envolupant de la correlació. La mesura de retard de la subportadora es pot obtenir comparant la fase del senyal en les dues subbandes. La mesura del retard de l'envolupant es pot obtenir amb la tècnica *dual side-band processing* o amb una altra tècnica que en definitiva desplaça en el receptor la forma d'ona dels xips amb els quals es fa la correlació però deixi la subportadora fixa. La qüestió és que la mesura de retard de la subportadora és més precisa però té una ambigüïtat igual a la meitat del període de la portadora, mentre que la mesura del retard de l'envolupant és menys precisa però no ambigua. Suposant que el nivell de soroll o errors en aquesta última és suficientment baix, es pot utilitzar per a resoldre l'ambigüïtat de la mesura basada en la subportadora.
- **Modificació del senyal de referència o de la funció de correlació.** L'objectiu d'aquestes tècniques és buscar una nova corba S o una nova corba de correlació entre el senyal rebut i el senyal de referència que no presenti ambigüïtat. Això es pot aconseguir de diverses maneres, que consisteixen a utilitzar senyals de referència modificats (per exemple, que no són iguals al senyal transmès), o calculant diverses correlacions parcials amb diferents senyals de referència i combinant a continuació aquestes correlacions de manera adequada. El preu que es paga en totes aquestes tècniques (i de fet, en certa manera també en categories anteriors) per a eliminar l'ambigüïtat és un augment de l'efecte del soroll en la nova corba S o nova corba de correlació obtinguda.

Conclusió

D'una banda, en el subapartat 2.2 s'han presentat els senyals que transmet Galileo en les bandes E1, E5 i E6, els principals aspectes dels quals són la inclusió de components pilot, de diferents variacions de modulacions BOC i de tècniques de multiplexació amb envolupant constant. A més de conèixer l'estructura general dels senyals, punts clau per recordar són la definició i propietats dels senyals CBOC i de les tècniques de multiplexació CASM i AltBOC. La interpretació del senyal E5 com un únic senyal o com dos senyals en dues subbandes adjacents és un altre element important.

D'altra banda, en el subapartat 2.3 s'han destacat les implicacions que té en el receptor el processament de senyals BOC en lloc dels senyals BPSK convencionals. Bàsicament, la implicació més important és que s'han de fer modificacions en les tècniques de mesura

del retard del codi per a compensar els errors que poden causar els lòbuls secundaris de la funció de correlació.

3. Sistemes multifreqüència/multiconstel·lació

Un dels problemes que poden trobar els receptors dels sistemes de radionavegació per satèl·lit és el de no disposar del nombre suficient de satèl·lits visibles per a calcular la posició. Amb la finalitat d'augmentar aquest nombre, una solució és habilitar el receptor amb la capacitat de poder processar senyals de diferents sistemes, és a dir, que pugui rebre i processar senyals de dos (o més) constel·lacions de satèl·lits alhora, i, d'aquesta manera, incrementar el nombre de satèl·lits visibles. Un altre avantatge d'utilitzar diverses constel·lacions és que depenen de segments de control independents i, per tant, la vulnerabilitat del sistema és molt més petita. D'altra banda, hi ha alguns efectes adversos que poden ser cancel·lats en el receptor si es treballa amb senyals corresponents a diferents bandes freqüencials, com és el cas del retard ionosfèric. Per tant, incloure capacitat multifreqüencial en un receptor és una altra manera de millorar-ne substancialment les prestacions i, si aquesta capacitat multifreqüencial es combina amb la capacitat multiconstel·lació comentada, el comportament d'aquest quant a robustesa, precisió i continuïtat de la solució pot augmentar considerablement. No obstant això, la complexitat del receptor també es veu afectada de manera notable.

Centrant-nos en aquest apartat en el cas multiconstel·lació, cal dir que, en el moment en què un mateix receptor opera amb diferents sistemes GNSS, hi ha diferents graus d'interoperabilitat. És a dir, el receptor pot:

- **Alternar** l'ús dels diferents sistemes en funció de les prestacions que ofereix cadascun quant a la localització de l'usuari. Bàsicament, el receptor integra diferents cadenes de recepció independents en paral·lel, i aquestes cadenes corresponen a les diferents constel·lacions considerades pel sistema, i la solució es basa a seleccionar la sortida del millor. D'igual manera, es poden usar les diferents cadenes de recepció de manera simultània en el mateix receptor i l'usuari s'encarrega d'escollir el resultat o servei que més li convingui.
- **Combinar** els sistemes de radionavegació. En aquest cas el receptor integra les funcionalitats dels diferents sistemes i l'usuari rep un servei resultant d'aquesta integració.

Certament, el primer mètode es pot aplicar de manera senzilla utilitzant qualsevol combinació entre els sistemes de radionavegació per satèl·lit més importants: GPS, GLONASS i Galileo (quan estigui disponible). Per exemple, al mercat hi ha multitud de receptors GPS/GLONASS que es basen en el mètode de selecció comentat a dalt. És a dir, el receptor s'encarrega d'alternar l'ús de les dues tecnologies.

Vegeu també

L'existència d'efectes adversos que poden ser cancel·lats en el receptor s'estudia en el mòdul "El sistema GPS" d'aquesta assignatura.

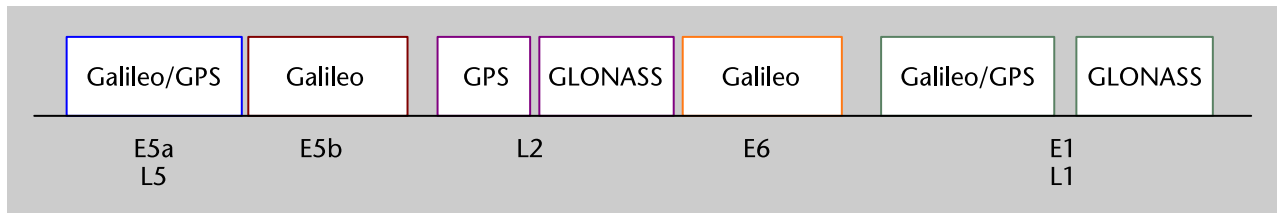
Vegeu també

En aquest apartat ens centrarem en el cas multiconstel·lació, ja que el cas multifreqüència s'estudia en el mòdul "El sistema GPS".

Quant al segon mètode, és més fàcil d'implementar en el cas GPS-Galileo. Tal com s'observa en la figura 19, aquests sistemes comparteixen algunes bandes freqüencials. Concretament, els senyals següents comparteixen banda i posseeixen similituds en la distribució de l'espectre:

- GPS i Galileo en L1/E1.
- GPS en L5 i Galileo en E5a.

Figura 19. Representació espectral dels senyals de navegació dels sistemes GPS, GLONASS i Galileo



Per tant, per a cadascuna de les combinacions de senyals esmentats a dalt, es pot dur a terme un disseny de receptor en què, amb una única antena i cadena d'RF, es puguin rebre els senyals GPS i Galileo simultàniament. Una vegada rebuts, la part de processament digital del processador s'encarrega de correlar els diferents senyals dels diferents satèl·lits amb les rèpliques locals per a:

- 1) dur a terme les estimacions de pseudodistància i
- 2) extreure els missatges de navegació.

Amb aquesta informació es du a terme el càlcul de la posició. Tenint en compte que tots dos sistemes (GPS i Galileo) treballen amb escales de temps (GPST en el cas de GPS i GST en el cas de Galileo) i sistemes de coordenades (WGS84 en el cas de GPS i GTRF en el cas de Galileo) diferents, s'ha de dur a terme un procés de transformació per a posar-los en comú. Cal comentar que el sistema Galileo està dissenyat per a transmetre informació sobre el desfasament entre el sistema de temps Galileo i el sistema de temps GPS, la qual cosa facilita la tasca. Una vegada feta la transformació, es du a terme la combinació de la solució de posició, i es poden seguir dos mètodes diferents:

- 1) hibridació de les solucions de posició GPS i Galileo,
- 2) hibridació de les pseudodistàncies dels senyals GPS i Galileo (per a la utilització conjunta de tots en el càlcul de la posició).

Alguns estudis revelen que, en termes de precisió, totes dues opcions són similars. No obstant això, l'opció 2 permet que es pugui calcular la posició amb més senyals de satèl·lits visibles. És a dir, en combinar les mesures de pseudodistància de senyals de totes dues constel·lacions, el pas de càlcul de posició es du a terme amb més satèl·lits visibles.

Finalment, cal esmentar que l'opció de combinar senyals no es troba restringida al cas dels senyals que comparteixen banda de GPS i Galileo. Aquest procés es pot fer també combinant senyals d'altres bandes, però lògicament la complexitat del sistema creix en gran mesura en necessitar-se maquinari addicional.

Exemple

Reprenent el cas GPS-GLONASS, abans s'ha esmentat que la majoria de receptors d'aquest tipus es basen a alternar la sortida de tots dos sistemes, però en aquest cas, també hi ha hagut solucions basades a combinar els diferents senyals. Bàsicament, el principi de funcionament és el comentat a dalt, és a dir, es treballa amb les mesures de pseudodistàncies obtingudes de les diferents constel·lacions per a calcular la posició final tenint en compte les conversions de coordenades i de temps (GLONASS usa el sistema de coordenades PZ-90 i l'escala de temps UTC(SU)).

No obstant això, en aquest cas hi ha una incògnita addicional, que és la desviació entre les escales de temps GPS i GLONASS, ja que no es té un mecanisme com l'existent en Galileo per a transmetre aquesta informació. Curiosament, aquests receptors oferien uns resultats notablement millors que els obtinguts amb els receptors basats en un únic sistema. No obstant això, en el moment en què es va desactivar la disponibilitat selectiva del sistema GPS, la millora oferta per un receptor GPS/GLONASS enfront d'un receptor GPS convencional va passar a ser bastant modesta, i va arribar al punt de no compensar pràcticament l'obtenció d'aquesta millora si es tenia en compte la complexitat més gran del dispositiu.

Disponibilitat selectiva

La disponibilitat selectiva, denominada S/A (*selective availability*), era una degradació introduïda de manera intencionada en el senyal civil de GPS per a reduir la precisió dels receptors no militars. Aquesta degradació va ser eliminada pel president dels Estats Units Bill Clinton el maig del 2000 a causa de la gran dependència que estava creant el sistema en la població civil.

4. Sistemes híbrids basats en sensors inercials

La integració d'un sistema de radionavegació per satèl·lit amb sensors inercials és un altre dels mecanismes utilitzats per a assegurar la continuïtat de la solució de navegació en situacions de visibilitat baixa o nul·la. Aquesta integració també pot resultar útil per a millorar la precisió del sistema, encara que aquest es trobi en bones condicions de cobertura, especialment en aplicacions en què l'usuari presenta una alta mobilitat. Cal destacar que la manera emprada normalment per a combinar un sistema de navegació per satèl·lit amb un sensor inercial és mitjançant un filtre de Kalman. Per aquest motiu, s'inicia l'apartat presentant aquest tipus de filtre en el subapartat 4.1. En el subapartat 4.2 es passa a descriure com es du a terme aquest tipus d'hibridació basada en filtre de Kalman i, finalment, es presenten alguns exemples d'implementació en el subapartat 4.3.

4.1. Sistemes INS

Els sensors inercials són un tipus de sensors encarregats de mesurar acceleració i velocitat angular. Per a això, s'utilitzen giròscops, que mesuren la velocitat angular, i acceleròmetres, que mesuren l'acceleració lineal.

Aquests sensors s'utilitzen en moltes aplicacions de navegació, i formen el que es coneix com a INS¹⁶. Concretament, un sistema INS està format pel següent:

- **Unitat de mesura inercial**¹⁷. Està format per un conjunt de sensors, normalment 3 acceleròmetres (el mínim han de ser 2) i 3 giròscops (mínim de 3 en aquest cas). Aquesta configuració de 3 acceleròmetres i 3 giròscops és el que es coneix com a IMU triaxial, ja que permet mesurar les acceleracions lineals i velocitats angulars en els tres eixos espacials.
- **Processador de navegació**. S'encarrega d'estimar la posició del vehicle mitjançant la doble integració de l'acceleració neta obtinguda per la unitat de mesura inercial (la integral de l'acceleració és la velocitat i la integral de la velocitat és la posició).

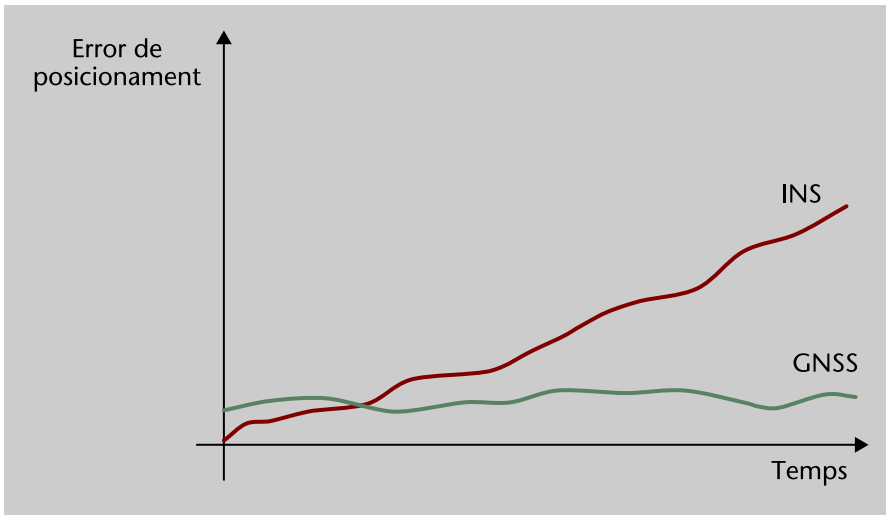
Els sistemes INS ofereixen precisions molt bones a curt termini, però, a mesura que avança el temps, l'error del sistema va creixent. Això és a causa, d'una banda, de les derives pròpies dels sensors que formen l'IMU i, d'altra banda, a l'acumulació dels errors en el temps ocasionada per la doble integració duta a terme per a obtenir la posició del vehicle. Justament aquest és el comportament contrari observat en els sistemes de posicionament per satèl·lit, els quals presenten un error fitat i amb una evolució pràcticament constant en el temps

⁽¹⁶⁾INS són les sigles en anglès d'*inertial navigation system*.

⁽¹⁷⁾En anglès *inertial measurement unit* (IMU).

(sempre que es mantinguin les característiques de l'escenari de mesura en termes de satèl·lits visibles i qualitat dels senyals). En la figura 20 es presenta un exemple de l'evolució temporal dels errors observats en tots dos sistemes.

Figura 20. Evolució temporal dels errors dels sistemes GNSS i INS



Per tant, INS i GNSS presenten un bon nivell de complementarietat per a explotar la combinació de tots dos sistemes. D'una banda, es poden utilitzar les mesures de posició del sistema GNSS per a anar calibrant el sistema INS, i d'aquesta manera es controla l'error acumulat. D'altra banda, el sistema INS, que no depèn de sistemes externs i ofereix bones precisions a curt termini, es pot utilitzar per a oferir continuïtat a la solució de GNSS quan no es tingui cobertura i també per a facilitar-ne les tasques de readquisició utilitzant les mesures de l'IMU per a estimar la freqüència Doppler.

Vegeu també

En els subapartats següents es presenten exemples d'hibridació dels sistemes INS i GNSS i la tècnica utilitzada normalment, és a dir, el filtre de Kalman.

4.2. Filtre de Kalman

El filtre de Kalman és una eina utilitzada en estadística, la gran popularitat de la qual es deu al fet que és molt útil per a combinar mesures sorolloses de diferents sensors i estimar l'estat d'un sistema amb certes dinàmiques desconegudes.

En el cas d'hibridació GNSS-INS, l'estat del sistema es correspon amb la posició del vehicle de l'usuari (encara que normalment s'inclouen paràmetres addicionals com la velocitat i l'acceleració); les mesures sorolloses dels sensors es correspondrien a les pròpies proporcionades pels receptors GNSS i els sensors inercials; i les dinàmiques desconegudes provindrien de perturbacions desconegudes de les dinàmiques del vehicle, produïdes tant per accions de l'usuari com per efectes externs (com per exemple, el vent, canvis de terreny) o pel fet de no haver-se modelitzat la dinàmica correctament per falta d'informació.

Lectures recomanades

El filtre de Kalman ha estat àmpliament estudiat i se'n poden trobar bones descripcions i anàlisis en diferents referències; per exemple, en les obres de Grewal, Weill i Andrews (2001) i de Kaplan i Hegarty (2006). Aquest apartat, no obstant això, se centra a presentar els passos de l'algorisme utilitzat en aquest filtre sense aprofundir en tota la teoria que té al darrere. Si hi esteu interessats podeu consultar les referències esmentades per a obtenir-ne més detalls.

Tal com s'ha esmentat a l'inici del subapartat, el filtre de Kalman s'utilitza per a predir l'estat d'un sistema. Concretament, aquest sistema es pot modelitzar matemàticament com:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_k \quad (39)$$

en què s'ha considerat que es treballa en temps discret, és a dir, es va mostrejant l'estat del sistema periòdicament d'acord amb una freqüència de mostreig definida.

Per tant, \mathbf{x}_k es correspon amb el vector $M \times 1$ de l'estat del sistema en l'instant de mostreig k -èsim (és a dir, en l'instant temporal $t = kT_s$ amb T_s igual al període de mostreig), en què M és el nombre de paràmetres considerats en el sistema (per exemple, posició, velocitat, etc.). Quant a \mathbf{A} , és la matriu $M \times M$ que modelitza la transició de l'estat del sistema de l'instant de mostreig $k-1$ a l'instant k , referida normalment com a matriu d'estat. D'altra banda, \mathbf{w}_k és un vector $M \times 1$ de variables aleatòries que representa el soroll de modelització; és a dir, és el vector que recull les pertorbacions desconegudes de les dinàmiques del sistema comentades anteriorment. La matriu de covariància d'aquest vector està expressada per la matriu $E[\mathbf{w}_k\mathbf{w}_k^T] = \mathbf{Q}$.

Del sistema, es té únicament accés a una sèrie de mesures modelitzades amb el vector següent $L \times 1$:

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (40)$$

en què \mathbf{H} és la matriu $L \times M$ que modelitza la relació entre el vector d'estat, \mathbf{x}_k , i el vector de mesures, coneguda com a matriu de mesura. D'altra banda, \mathbf{v}_k és el vector de variables aleatòries amb matriu de covariància $E[\mathbf{v}_k\mathbf{v}_k^T] = \mathbf{R}$ que representen el soroll de mesura; és a dir, conté les pertorbacions associades a les imprecisions dels sensors. En el cas que ens ocupa, el vector \mathbf{z}_k contindria les mesures ofertes pel receptor GNSS i els sensors inercials.

En conclusió, el problema existent es basa a estimar quin és l'estat del sistema, \mathbf{x}_k , tenint únicament accés a les mesures proporcionades per \mathbf{z}_k . Per a això, es té cert coneixement sobre la dinàmica del procés i de la relació de les mesures amb l'estat del procés descrit per les matrius \mathbf{A} i \mathbf{H} en les equacions 40 i 41. Per tant, tot el desconeixement del sistema prové de les pertorbacions i sorolls de mesura descrits pels vectors de variables aleatoris \mathbf{w}_k i \mathbf{v}_k . Cal esmentar que el filtre de Kalman és l'estimador òptim quan aquests vectors són vectors de variables aleatòries gaussianes amb mitjana nul·la.

L'estimació de l'estat \mathbf{x}_k es calcula de manera iterativa de la manera següent. Suposant que l'algorisme es troba fent la seva iteració k -èsima, el que calcula en primer lloc és el que es coneix com a estimació *a priori* del vector d'estat. Aquesta estimació es representa com $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ i es calcula com:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{k-1} \quad (41)$$

en què $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ és l'estimació *a posteriori* del vector estat calculat en la iteració anterior (la manera de calcular-lo es veurà en les properes línies). Bàsicament, l'algorisme està predient quin serà el valor del vector d'estat tenint en compte el que coneix de la dinàmica del sistema (matriu \mathbf{A}) i l'estimació feta en la iteració de l'algorisme.

Abans de continuar descrivint l'algorisme, és necessari introduir dues matrius de covariància relacionades amb l'error d'estimació. Aquestes matrius són la matriu de covariància de l'error d'estimació *a priori* expressada com:

$$\mathbf{P}_k^- = E[\mathbf{e}_k^- \mathbf{e}_k^{-T}] \quad (42)$$

en què $\mathbf{e}_k^- = \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k^-$ és el vector $M \times 1$ d'error d'estimació *a priori*, i la matriu de covariància de l'error d'estimació *a posteriori* expressada com:

$$\mathbf{P}_k = E[\mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^T] \quad (43)$$

amb $\mathbf{e}_k = \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k$ és l'error d'estimació *a posteriori*. Aquestes matrius són també calculades de manera iterativa per l'algorisme. La primera a calcular-se és la matriu $\alpha=0, \beta=1$ i aquesta es calcula just després d'haver fet el càlcul de l'equació 42 de la manera següent:

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{A}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \quad (44)$$

en què \mathbf{P}_{k-1} s'ha calculat en la iteració prèvia de l'algorisme, tal com es veurà també més endavant. Lògicament, en l'instant $k=0$ no es disposa dels valors de $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ i \mathbf{P}_{k-1} . Per tant, el que es fa és proposar valors inicials, que es poden basar

en el coneixement que es tingui sobre el sistema. En alguns casos, es proposa $\hat{\mathbf{x}}_{k-1} = \mathbf{0}$ (vector tot zeros), mentre que per a \mathbf{P}_{k-1} es proposa la matriu identitat multiplicada per un escalar de valor gran, que denota que l'error inicial serà gran.

Fins a aquest punt s'ha calculat l'estimació *a priori* del vector d'estat i la matriu de covariància de l'error corresponent. Amb la finalitat de corregir aquesta estimació *a priori*, o predicció del valor del vector d'estat, l'algorisme du a terme un procés de correcció. Concretament, corregeix l'estimació $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ per a obtenir l'estimació *a posteriori* $\hat{\mathbf{x}}_k$ de la manera següent:

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k(\mathbf{z}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_k^-) \quad (45)$$

en què \mathbf{K}_k és una matriu de guany calculat de la manera següent:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (47)$$

Per tant, s'observa que l'algorisme corregeix l'estimació *a priori* del vector d'estat tenint en compte el residual $\mathbf{z}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_k^-$. Aquest residual és l'error que es comet en predir la mesura en l'instant k -èsim, \mathbf{z}_{kk} , utilitzant una estimació d'aquest a partir de l'expressió 42 i centrant-se en els valors coneguts en aquest moment, és a dir, \mathbf{H} i $\hat{\mathbf{x}}_k^-$. Noteu que la matriu de guany \mathbf{K}_k depèn de la inversa d'una matriu que conté la matriu de covariància de l'error de mesura \mathbf{R} . És a dir, en el cas que el soroll de mesura sigui gran, la matriu de guany aplicarà, en corregir $\hat{\mathbf{x}}_k^-$, un factor petit, ja que el nivell de credibilitat en les mesures preses serà baix i viceversa. D'igual manera, la matriu \mathbf{K}_k depèn també de la matriu \mathbf{P}_k^- , que al seu torn depèn de la covariància del soroll de modelització \mathbf{Q} . En aquest cas, la matriu de guany donarà més pes a la correcció aplicada a $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ si el soroll de modelització és gran. Això es fa per a emfatitzar que la correcció que s'ha d'aplicar ha de ser més gran en partir-se d'una predicció resultant d'un sistema modelitzat incorrectament. En resum, el guany que aplicarà el filtre de Kalman serà més gran (més credibilitat a mesures) o petit (més credibilitat a la modelització del sistema) tenint en compte la relació existent entre l'error de modelització i el soroll de mesura.

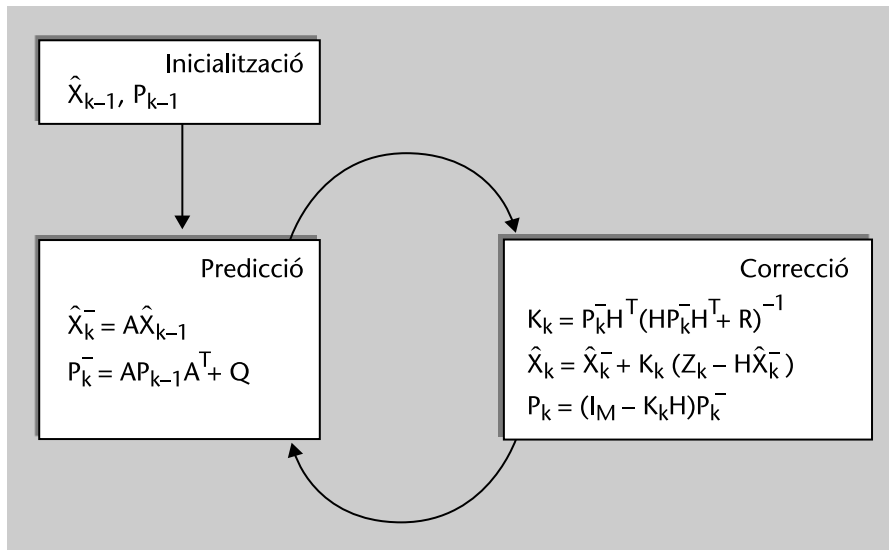
El procés de correcció finalitza actualitzant la matriu de covariància de l'error d'estimació *a posteriori* com es mostra a continuació:

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I}_M - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_k^- \quad (46)$$

Fet això, la iteració completa de l'algorisme finalitza i es passa a fer el procés de predicció de la iteració següent. Concretament, se segueix l'esquema iteratiu presentat en la figura 21, en què l'algorisme arrenca inicialitzant els valors de

$\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ i \mathbf{P}_{k-1} i, en cada iteració, la solució del filtre de Kalman està determinada pel valor corregit $\hat{\mathbf{x}}_k$. Els valors de les matrius \mathbf{R} i \mathbf{Q} estan determinats pel coneixement que es tingui sobre el possible error de modelització i els errors dels sensors. En el cas que no se'n tingui cap, se'n poden fer estimacions.

Figura 21. Esquema de funcionament del filtre de Kalman



Vegeu també

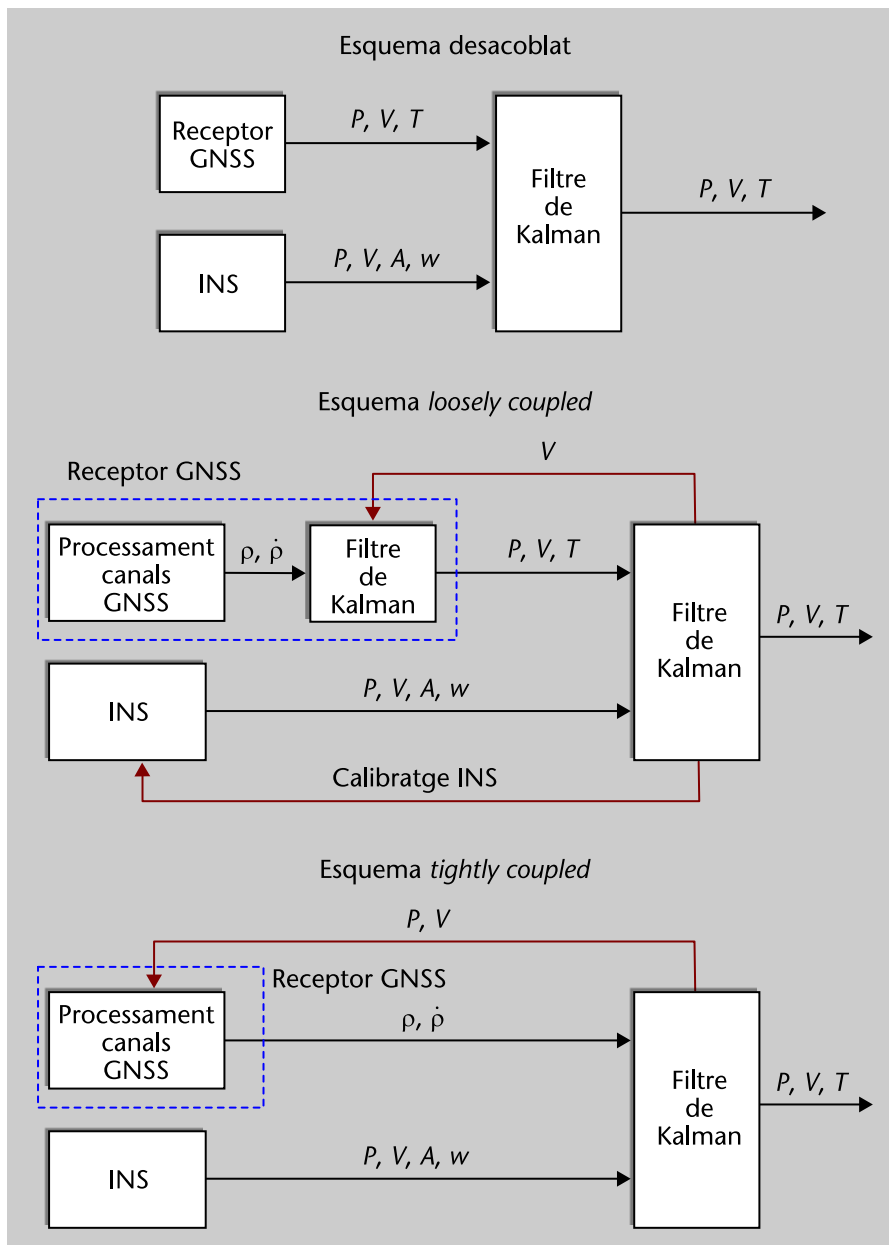
Amb l'objectiu d'oferir-vos un exemple d'aplicació del filtre de Kalman, es presenta en el subapartat 4.3 un problema resolt basat en un exemple d'hibridació GPS/INS. Cal comentar també que, en l'apèndix d'aquest mòdul, també s'inclou el codi de programari generat en Matlab per a simular el comportament del filtre de Kalman considerat.

4.3. Esquemes d'hibridació

Les solucions basades a integrar GNSS amb INS mitjançant filtratge Kalman utilitzen normalment un dels tres esquemes següents:

1) **Esquema desacoblat.** En aquest esquema, es combinen les sortides del receptor GPS amb les sortides del sistema INS mitjançant el filtre de Kalman. Tal com es pot observar en la figura 22, els dos sistemes operen de manera totalment independent i és el filtre de Kalman el que s'encarrega de combinar les sortides de tots dos sistemes. Per tant, si un dels dos sistemes falla, l'esquema pot continuar operant oferint la solució del sistema en funcionament. Aquesta solució és, per tant, la solució més senzilla i de més baix cost de les presentades.

Figura 22. Esquema d'hibridació GNSS-INS en el qual es representa posició (P), velocitat (V), acceleració (A), velocitat angular (w)



2) **Esquema d'acoblament feble**¹⁸. És l'esquema també presentat en la figura 22. Com en el cas anterior, es combinen les sortides dels dos sistemes però, tal com es pot observar, en aquest cas no operen de manera independent, ja que les sortides del filtre de Kalman s'utilitzen per a realimentar tots dos sistemes. D'una banda, s'utilitza la informació de velocitat generada pel filtre de Kalman del processador de navegació per a alimentar un altre filtre de Kalman inclòs en el receptor GNSS. Aquesta informació és utilitzada pel receptor GNSS per a reduir la incertesa de la dinàmica de l'usuari. D'altra banda, la sortida del filtre de Kalman s'utilitza també per a anar calibrant el sistema INS. D'aquesta manera s'evita la propagació d'errors característica dels sistemes inercials. Un dels problemes que presenta aquesta solució és la possible inestabilitat del sistema

⁽¹⁸⁾En anglès, *loosely coupled*.

deguda a la realimentació entre els dos filtres de Kalman. Per aquest motiu, els escenaris solen simular *a priori* el comportament del sistema en què operarà per a assegurar-ne l'estabilitat.

3) **Esquema d'acoblament fort**¹⁹. Aquesta és la configuració més utilitzada en aquest tipus d'hibridació, representada en la figura 22. En aquest cas, s'elimina el filtre de Kalman del receptor GNSS i les estimacions de pseudodistància, ρ , i variació de pseudodistància, $\dot{\rho}$, passen a alimentar directament el filtre de Kalman del processador de navegació. És a dir, en comptes de calcular el receptor GNSS la seva pròpia solució de posicionament, és el processador de navegació el que la calcula directament utilitzant les estimacions de pseudodistància i les mesures inercials proporcionades pel sistema INS. Concretament, en aquest cas el filtre de Kalman s'encarrega de determinar quin és l'error comès pel sistema INS, en comptes de determinar quina és la posició del blanc. Amb aquest error, es corregeix la solució proporcionada per l'INS. Quant als llaços de realimentació del sistema, en aquest cas únicament es manté el llaç envers el receptor GNSS, ja que la realimentació envers el sistema INS ja no resulta necessària, en ser directament la sortida del filtre de Kalman la solució INS corregida. Aquesta realimentació al receptor GNSS s'utilitza per a millorar el comportament de l'adquisició i per a adaptar els llaços de seguiment a la dinàmica de l'usuari. Aquesta solució més integrada ofereix diversos avantatges respecte a l'esquema del punt anterior tant a escala de precisió oferta com de robustesa del sistema. D'una banda, se soluciona la inestabilitat comentada en el cas anterior en treballar amb un únic filtre de Kalman. D'altra banda, el sistema no necessita quatre satèl·lits visibles per a tenir solució de navegació, ja que pot combinar les mesures de pseudodistància amb les mesures de l'INS per a estimar la seva pròpia solució.

⁽¹⁹⁾En anglès, *tightly coupled*.

Exemple d'hibridació

En aquest problema es planteja un exemple d'hibridació basat en l'esquema desacoblat presentat en teoria. Per a això, considereu la simplificació del problema en un cas bidimensional (coordinades espacials x - y) i que es disposa d'un receptor proveït d'un sistema GPS i d'un sistema INS. El receptor GPS proveeix el sistema amb mesures de posició x i y , i aquestes mesures estan pertorbades per un soroll de mesura. Aquest soroll de mesura es pot modelitzar com a soroll additiu gaussià amb mitjana 0 i variància σ_{GPS}^2 (tant en la coordenada x com en la coordenada y). Quant al sistema INS, aquest proveeix mesures d'acceleració en les coordenades x i y , i es considera en aquest problema que aquestes mesures també estan pertorbades amb un soroll de mesura que es pot modelitzar, com en el cas anterior, amb soroll additiu gaussià de mitjana 0 i variància σ_{INS}^2 . En el receptor considerat, tots dos sistemes es combinen mitjançant un filtre de Kalman, seguint l'esquema desacoblat comentat a dalt. Per a aquesta implementació, se suposa que el moviment de l'usuari presenta un moviment rectilini uniformement accelerat; és a dir, es desplaça en línia recta amb acceleració constant tant en el component x com en el component y . En la realitat, aquest usuari segueix aquest model de desplaçament suposant, per tant, que el soroll de modelització és nul. Tenint en compte aquest escenari, es demana el següent:

1) En primer lloc, considereu que es disposa únicament del sistema GPS. L'objectiu, per tant, és veure quina millora introdueix el filtre de Kalman a les mesures proveïdes per aquest sistema:

a) Escriviu l'equació d'estat considerada pel filtre de Kalman per a modelitzar la dinàmica del sistema.

b) Escriviu ara l'equació d'estat que realment modelitza el sistema i l'equació de mesura.

c) Implementeu una iteració completa del filtre de Kalman.

d) Considereu ara que el filtre de Kalman comença a funcionar quan l'usuari es troba en les coordenades $x = y = 0$, amb velocitat en totes dues coordenades igual a $v_x = v_y = 1$ m/s i acceleració igual a $a_x = a_y = 0,1$ m/s². D'altra banda, les pertorbacions de les mesures del receptor GPS estan caracteritzades per un valor de desviació típica igual a $\sigma_{GPS} = 10$ m. Amb aquest escenari, implementeu un codi de programari que emuli el comportament del moviment de l'usuari i la resposta del filtre de Kalman. Per a això, considereu que es fan 50 iteracions del filtre amb $T_s = 1$ s. Representeu a més gràficament la posició de l'usuari en cada iteració, al costat de les mesures del receptor GPS i la solució del filtre de Kalman. A més, representeu de manera gràfica l'evolució de l'error, expressat en metres, obtingut en comparar la posició real amb l'estimada.

2) Considereu ara que es combinen el sistema GPS i l'INS mitjançant l'esquema desacoblant. És a dir, s'introdueixen en el filtre de Kalman les mesures d'acceleració de l'INS:

a) Escriviu l'equació d'estat considerada pel filtre de Kalman per a modelitzar la dinàmica del sistema.

b) Escriviu ara l'equació d'estat que realment modelitza el sistema i l'equació de mesura.

c) Implementeu una iteració completa del filtre de Kalman.

d) Considereu els paràmetres de l'apartat 1d i torneu a repetir el procés dut a terme allà, però tenint en compte la introducció de les mesures del sistema inercial i que $\sigma_{INS} = 0,01$ m/s².

Solució

1) La primera part del problema se centra a aplicar el filtre de Kalman tenint únicament en compte les mesures del receptor GPS:

a) Tal com s'ha comentat en l'enunciat del problema, el filtre de Kalman suposa que l'usuari segueix un moviment rectilini uniformement accelerat. Per tant, els components espacials x i y seguiran el comportament següent:

$$\begin{aligned} x(t) &= x(t_0) + v_x t + \frac{1}{2} a_x t^2 \\ y(t) &= y(t_0) + v_y t + \frac{1}{2} a_y t^2 \end{aligned} \quad (47)$$

Tenint en compte aquest model de propagació, l'equació d'estat presentarà, per tant, l'aspecte següent:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} \quad (48)$$

en què el vector i la matriu d'estat es modelitzen com:

$$\mathbf{x}_k = \begin{pmatrix} x_k \\ v_{x,k} \\ a_{x,k} \\ y_k \\ v_{y,k} \\ a_{y,k} \end{pmatrix} \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & T_s & T_s^2/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & T_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & T_s & T_s^2/2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T_s \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (49)$$

En l'equació de dalt $x_k, v_{x,k}, a_{x,k}, y_k, v_{y,k}, a_{y,k}$ són les coordenades espacials, de velocitat i acceleració (en les coordenades x i y), respectivament, preses en l'instant k -èsim utilitzant un període de mostreig igual a T_s .

b) L'equació que realment modelitza el moviment de l'usuari és la donada per l'expressió següent:

$$(52) \\ \mathbf{x}_k = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_{k,k}$$

però tenint en compte que el soroll de modelització és nul en l'escenari considerat en el problema, l'equació es redueix a l'expressió següent:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} \quad (50)$$

en què el vector i la matriu d'estat presenten el mateix aspecte que en l'apartat anterior.

Quant a l'equació de mesura, aquesta està determinada per l'expressió següent:

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (51)$$

en què els vectors i matrius involucrats en aquesta expressió presenten aquest aspecte:

$$\mathbf{z}_k = \begin{pmatrix} x_{GPS,k} \\ y_{GPS,k} \end{pmatrix} \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{v}_k = \begin{pmatrix} n_{GPSx,k} \\ n_{GPSy,k} \end{pmatrix} \quad (52)$$

En aquest cas, $x_{GPS,k}$ i $y_{GPS,k}$ són les mesures de posició proporcionades pel receptor GPS i $n_{GPSx,k}$ i $n_{GPSy,k}$ són els components de soroll d'aquestes mesures. En concret, aquests components es modelitzen com a variables aleatòries gaussianes independents i idènticament distribuïdes de mitjana zero i variància σ_{GPS}^2 .

c) En aquest apartat es demana implementar una iteració completa del filtre de Kalman. Per a això s'escriuen de nou les equacions presentades en teoria, particularitzant-les, no obstant això, al cas concret del problema.

En primer lloc, s'inicialitzen els paràmetres d'inici de l'algorisme de la manera següent:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k-1} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{P}_{k-1} = 10^5 \mathbf{I}_6 \quad (53)$$

en què \mathbf{I}_6 és la matriu identitat de 6×6 elements. En aquesta inicialització s'ha tingut en compte el cas que el receptor no sap exactament en quina posició inicial es troba l'usuari; per tant, es prenen els valors $x = y = 0$, i que tampoc no se'n coneix la velocitat i acceleració, de manera que es deixen també a zero. Cal comentar que es podrien haver proposat altres valors de manera arbitrària, però s'ha optat pel vector d'estat tot zeros. D'altra banda, se suposa que les estimacions inicials del filtre seran altament errònies i, per aquest motiu, es parteix d'un valor tan alt a l'hora de generar els elements de la primera iteració de la matriu de covariància de l'error d'estimació *a posteriori*. A més, s'ha utilitzat la matriu d'identitat per a indicar que se suposa que els diferents components d'error estan incorrelats entre si.

Una vegada inicialitzats els diferents paràmetres, es du a terme el procés de predicció. Bàsicament, es calculen les dues expressions següents:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_k^- &= \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{k-1} \\ \mathbf{P}_k^- &= \mathbf{A}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} = \mathbf{A}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{A}^T \end{aligned} \quad (54)$$

en què la matriu \mathbf{A} és la matriu presentada en l'apartat 1a i \mathbf{Q} és en aquest cas igual a la matriu tot zeros a causa que se suposa que el soroll de modelització és nul. Noteu que en aquest problema se suposa que les matrius \mathbf{Q} i \mathbf{R} disponibles en el filtre de Kalman presenten el mateix valor que el que reflecteix el comportament de les perturbacions. Això s'ha fet amb la finalitat de simplificar el problema, però això no sol ser així en la pràctica.

Una vegada calculada la predicció del vector d'estat, es du a terme el procés de correcció. Per a això es calculen les expressions següents:

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{x}}_k &= \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k(\mathbf{z}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_k^-) \\ \mathbf{K}_k &= \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \\ \mathbf{P}_k &= (\mathbf{I}_6 - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_k^-\end{aligned}\quad (55)$$

en què la matriu \mathbf{H} és la matriu obtinguda en l'apartat 1b i la matriu \mathbf{R} presenta l'aspecte següent en tenir en compte que els components de soroll de mesura són independents entre si:

$$\mathbf{Q} = \sigma_{GPS}^2 \mathbf{I}_2 \quad (56)$$

d) En l'apèndix d'aquest mòdul s'inclou el codi de programari generat en el Matlab per a emular el comportament del sistema considerat. Quant a la representació de l'evolució d'aquest, en la figura 23 es presenta la trajectòria real de l'usuari (en blau), la trajectòria estimada pel filtre de Kalman (en vermell) i les mesures del receptor GPS (símbol o). Tal com s'observa, excepte certs errors, el filtre de Kalman millora l'estimació de posició oferta pel receptor GPS en introduir coneixement sobre el tipus de trajectòria que segueix l'usuari (moviment rectilini uniformement accelerat). En la figura 24, es presenta l'evolució de l'error en funció de les iteracions de l'algorisme, i s'observa com el comportament d'aquest és establir-se una vegada el filtre comença a filtrar les mesures del receptor GPS mitjançant l'ús del coneixement del model de trajectòria.

Figura 23. Comparació de trajectòria real de l'usuari, trajectòria estimada pel filtre de Kalman i mesures del sistema GPS (únicament sistema GPS)

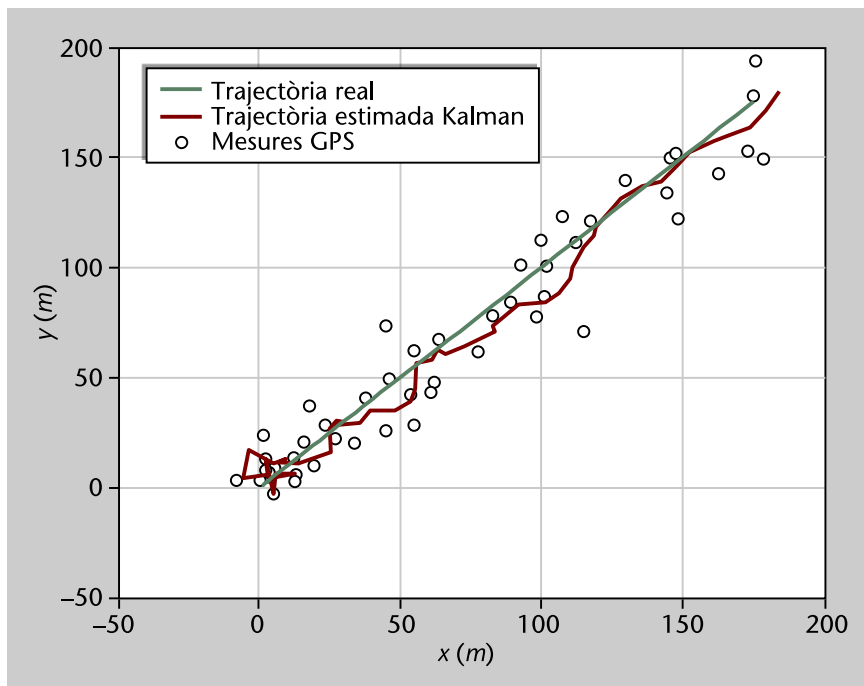
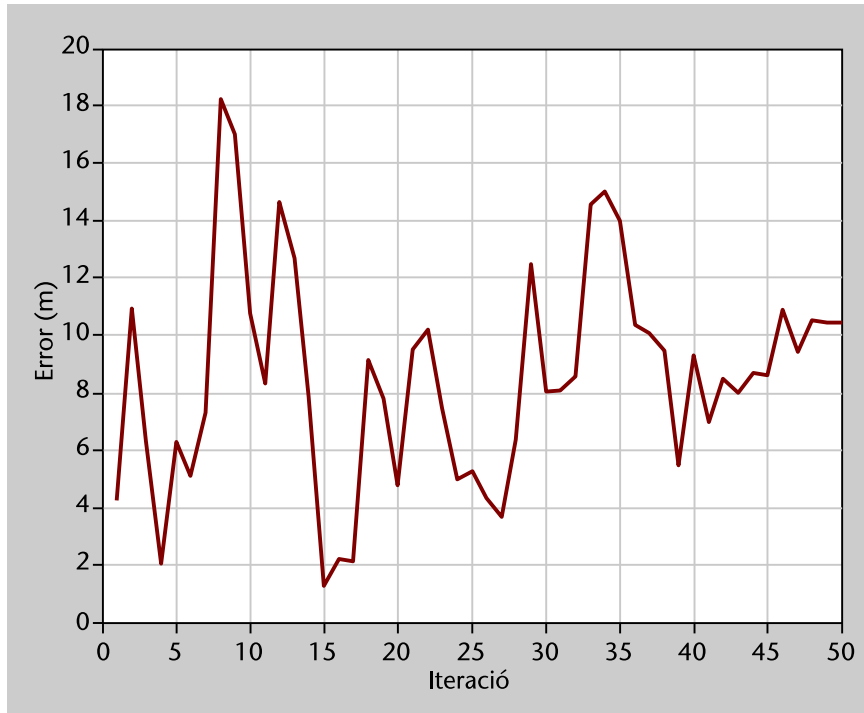


Figura 24. Evolució temporal de l'error de posicionament (únicament sistema GPS)



2) En la segona part del problema es pretén observar quin és el guany obtingut en introduir les mesures d'acceleració del sistema inercial:

a) En aquest cas, el filtre de Kalman continua suposant que l'usuari presenta un moviment rectilini uniformement accelerat. Per tant, l'equació d'estat presenta el mateix aspecte que el presentat en l'apartat 1a.

b) En aquest cas, l'equació que realment modelitza el moviment de l'usuari és la mateixa que la presentada en l'apartat 2b en no variar el comportament de l'usuari en aquest cas. Quant a l'equació d'estat, se n'ha de reescriure l'expressió en haver-se d'introduir les mesures dels sensors d'acceleració del sistema inercial. És a dir, l'equació:

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (57)$$

estarà determinada pels vectors i matriu següents:

$$\mathbf{z}_k = \begin{pmatrix} x_{GPS,k} \\ y_{GPS,k} \\ a_{INSx,k} \\ a_{INSy,k} \end{pmatrix} \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \mathbf{v}_k = \begin{pmatrix} n_{GPSx,k} \\ n_{GPSy,k} \\ n_{INSx,k} \\ n_{INSy,k} \end{pmatrix} \quad (58)$$

en què $a_{INSx,k}$ i $a_{INSy,k}$ són les mesures d'acceleració proporcionades pel sistema inercial. Aquestes mesures presenten un soroll de mesura modelitzat per les variables aleatòries independents i idènticament distribuïdes $n_{INSx,k}$ i $n_{INSy,k}$, les quals segueixen una distribució gaussiana de mitjana zero i variància σ_{INS}^2 .

c) En aquest cas, la iteració completa del procés de filtratge del filtre de Kalman seria idèntica a la iteració mostrada en l'apartat 1c. No obstant això, s'ha de tenir en compte que la matriu \mathbf{Q} estarà determinada per l'expressió següent:

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \sigma_{GPS}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{GPS}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{INS}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{INS}^2 \end{pmatrix} \quad (59)$$

Per tant, es posa clarament de manifest la gran utilitat del filtre de Kalman quant a sistema que simplifica enormement el procés de combinació de mesures de diferents sensors.

d) En l'apèndix d'aquest mòdul es pot trobar també el codi del programari associat a la implementació del sistema considerat en aquest apartat. D'altra banda, en la figura 25 es presenten els resultats obtinguts amb el sistema que integra les mesures GPS amb les mesures INS. Tal com s'observa, el comportament de la trajectòria estimada pel filtre de Kalman millora considerablement quan s'introdueixen les mesures d'acceleració del sistema INS. Aquesta millora del comportament es reflecteix també en la figura 26, en què s'observa que l'error que s'obté en el moment en què el filtre comença a convergir és més petit que l'obtingut en el cas d'utilitzar les mesures del sistema GPS únicament.

Figura 25. Comparació de trajectòria real de l'usuari, trajectòria estimada pel filtre de Kalman i mesures del sistema GPS (sistema GPS-INS)

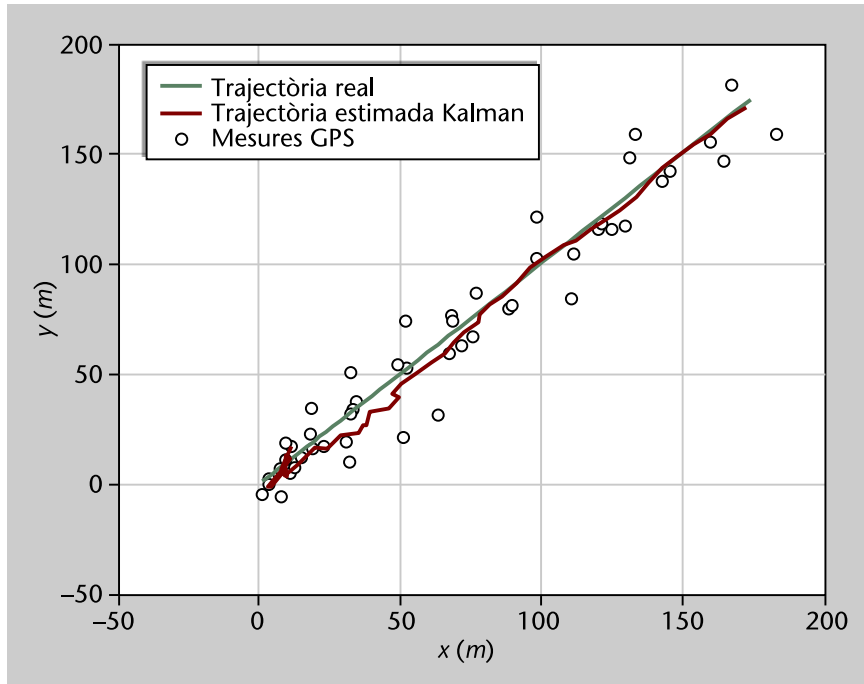
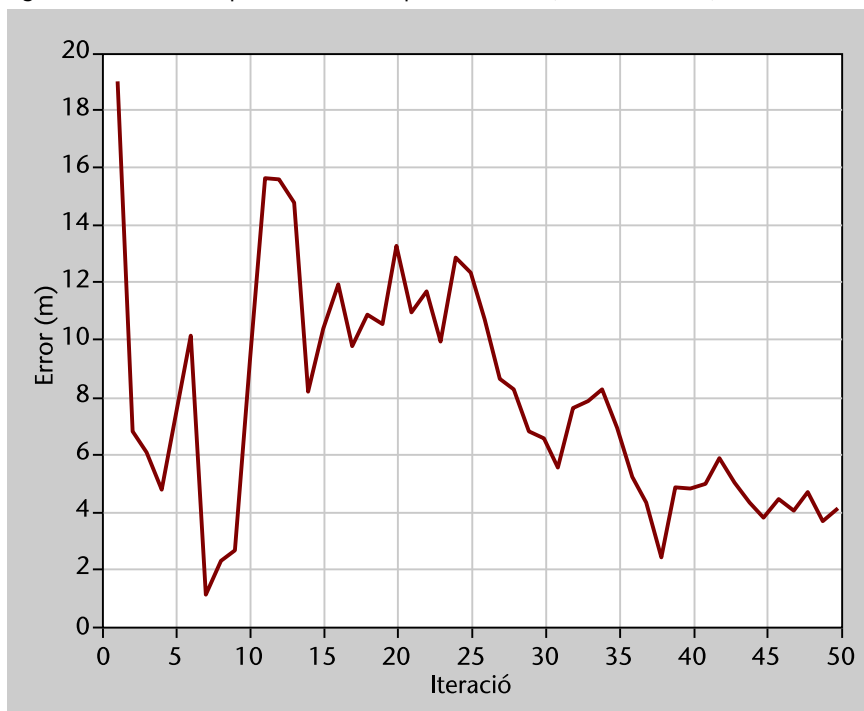


Figura 26. Evolució temporal de l'error de posicionament (sistema GPS-INS)



Resum

En aquest mòdul s'ha presentat l'evolució de navegació per satèl·lit basada en l'aparició de sistemes complementaris i alternatius a GPS. Aquests sistemes neixen amb l'objectiu d'oferir millors prestacions que les ofertes per un receptor GPS convencional amb la finalitat de poder satisfer els alts requisits demandats per aplicacions *safety-of-life*, en què la seguretat és un aspecte crític i es requereixen alts nivells de precisió, integritat i una disponibilitat contínua del sistema.

En primer lloc, s'han presentat els sistemes d'augment, que tenen com a objectiu oferir als usuaris de GPS informació addicional sobre les mesures dels senyals dels satèl·lits. Aquesta informació addicional s'utilitza per a millorar el càlcul de posició del receptor i pot ser des de dades sobre les fonts d'error del senyal (com el retard ionosfèric, derives en els rellotges o errors en les efemèrides) fins a l'estat del senyal mateix.

El primer cas descrit és el basat en GPS diferencial (DGPS). Aquest sistema es basa en l'ús d'una o més estacions de referència terrestres, les quals es troben en posicions conegudes, equipades amb un receptor de GPS i amb la capacitat de transmetre a l'usuari informació sobre els senyals dels diferents satèl·lits de la constel·lació GPS (integritat, mesures de correcció de les pseudodistàncies, del rellotge del satèl·lit i de les efemèrides) a part de les mesures pròpies obtingudes per l'estació de referència i informació addicional sobre la base mateixa (localització, estat, factors meteorològics, etc.). Aquesta informació la utilitza el receptor de l'usuari per a millorar l'estimació de posició. Bàsicament, el principi de funcionament es basa en el fet que l'estació de referència es troba en una posició coneguda i, per tant, és capaç d'obtenir, amb alta exactitud, el biaix de les mesures obtingudes dels satèl·lits visibles. Lògicament, la millora oferta per DGPS augmenta a mesura que l'usuari es troba més proper a l'estació de referència, i es poden obtenir millores de l'ordre d'un factor 2.

Quant al procés que du a terme la tècnica DGPS, hi ha dos conceptes segons la zona geogràfica que cobreix el sistema. D'una banda, el DGPS d'àrea local està dissenyat per a cobrir àrees entre 10-100 km amb una única estació de referència. Per a cobrir regions més grans s'utilitzen diverses estacions de referència i el sistema es denomina DGPS d'àrea estesa.

El GPS diferencial és capaç de millorar les prestacions d'un receptor GPS de manera substancial, però una de les limitacions principals és el caràcter regional. En algunes aplicacions, especialment les relacionades amb l'aviació civil, és necessari proveir d'un sistema d'augment global. Amb aquesta motivació van ser dissenyats els sistemes SBAS basats en l'ús de satèl·lits per a transmetre la informació d'augment. En aquest mòdul s'han presentat els dos sistemes

SBAS més importants: WAAS i EGNOS. WAAS és la solució nord-americana d'augment per satèl·lit i presenta una arquitectura formada per tres segments: espacial, terrestre i d'usuari. No obstant això, l'objectiu d'aquest sistema és enviar informació als usuaris per a millorar les prestacions de GPS, i aquest últim és el sistema de navegació primari. A part de la informació de correcció i d'integritat, enviada també pels sistemes DGPS terrestres, WAAS envia un senyal de navegació addicional per oferir a l'usuari una mesura de pseudo-distància extra. El sistema EGNOS, d'altra banda, és el sistema d'augment per satèl·lit europeu i, en aquest cas, la seva arquitectura està formada per quatre segments: segment espacial, segment terrestre, segment de suport i segment d'usuari. L'objectiu d'aquest sistema d'augment és oferir servei d'augment de GPS, GLONASS i Galileo en territori europeu, part del Mediterrani i Àfrica. No obstant això, les millors prestacions es concentren a Europa, on es poden aconseguir precisions properes a un metre.

Després de presentar els sistemes d'augment, s'ha passat a descriure el sistema Galileo. Galileo és el sistema de radionavegació per satèl·lit europeu, el qual va néixer amb l'objectiu de proveir una solució de radionavegació pròpia. A part, va ser dissenyat amb l'objectiu de complir els alts requisits demanats per les aplicacions *safety-of-life* entrant, al costat del bloc III de GPS, en el que es coneix com a segona generació de sistemes de radionavegació per satèl·lit.

El sistema encara està en fase de desenvolupament i, a diferència de GPS, Galileo està dissenyat per a oferir principalment serveis d'ús civil. Concretament els serveis oferts són els que es coneixen com a *open service* (servei obert orientat a l'usuari general), *commercial service* (orientat a les aplicacions professionals), *safety of life service* (servei orientat a aplicacions en què la seguretat dels usuaris és crítica), *public regulated service* (serveis d'altres prestacions únicament oferts a usuaris autoritzats) i *search and rescue service* (servei orientat a la detecció de balises de missatges de socors). Tots aquests serveis es transmeten utilitzant un total de 10 senyals de navegació distribuïts en 5 bandes (E5a, E5b, E6, L6 i E1).

L'arquitectura de Galileo es divideix en tres segments: espacial, terrestre i d'usuari. El segment espacial està format per una constel·lació de 30 satèl·lits en tres plans orbitals, i hi ha únicament 9 satèl·lits operatius en cada òrbita, ja que la resta es deixa com a satèl·lit redundat. Actualment, hi ha únicament dos satèl·lits d'experimentació en òrbita (GIOVE-A i GIOVE-B), els quals envien senyals de proves que presenten unes característiques representatives dels senyals Galileo. Es preveu, no obstant això, que al llarg de l'any 2011 es comencin a llançar els satèl·lits IOV, els quals presenten unes característiques molt properes als dissenys finals dels satèl·lits Galileo i, una vegada desplegada la fase d'experimentació IOV, es donarà pas al llançament dels primers satèl·lits FUC destinats a cobrir la constel·lació necessària per a declarar el sistema Galileo operatiu. El segment terrestre de Galileo té com a funció el control de la constel·lació de satèl·lits i el control de la missió. Està format al seu torn per dos segments, el GCS i el GMS. El segment GCS du a terme totes les tasques de control de la constel·lació de satèl·lits Galileo i per a això utilitza 5 estaci-

ons terrestres TTC, les quals s'encarreguen d'enviar les ordres de control als diferents satèl·lits. El segment GMS controla el sistema de navegació i proveeix els principals serveis Galileo. Per a això utilitza una configuració basada en una xarxa entre 30 i 40 estacions GSS (duen a terme el monitoratge dels senyals de navegació), un centre de control GCC (encarregat de processar la informació de les GCC i generar els missatges de navegació) i 9 estacions ULS (duen a terme la tasca d'enviar als satèl·lits els missatges generats per la GCC). Quant al segment d'usuari de Galileo, està principalment orientat als serveis del sistema. No obstant això, es troba encara en fase de definició i únicament hi ha els primers receptors de prova, els quals formen el que es coneix com a *test user segment*.

Galileo transmet senyals en tres bandes freqüencials: E1, E5 i E6. En totes les bandes es multiplexen diferents senyals per a cobrir els diferents serveis del sistema i s'inclouen components de dades i components pilot. L'objectiu de transmetre aquestes últimes és permetre utilitzar en el receptor temps d'integració més llargs per a augmentar la sensibilitat i estendre l'ús de Galileo a entorns en què la recepció està més degradada.

El senyal E1 transmet un component de dades i un component pilot al canal en fase i un senyal PRS al canal en quadratura. Els dos primers components, d'ús obert, utilitzen la modulació CBOC, que combina un senyal BOC(1,1) amb un senyal BOC(6,1) amb una potència 10 vegades més petita. La potència del senyal BOC(1,1) es concentra en les freqüències properes a la portadora, mentre que el senyal BOC(6,1) fa augmentar la densitat espectral de potència en una zona allunyada aproximadament ± 6 MHz de la portadora. D'aquesta manera, el senyal CBOC aporta avantatges tant a receptors de gamma baixa com de gamma alta. Els primers tenen una amplada de banda reduïda, per la qual cosa reben bàsicament un senyal BOC(1,1), el processament del qual és relativament senzill, i només perden la petita part d'energia assignada al component BOC(6,1). Aquest component és justament el rebut pels receptors de més amplada de banda (normalment, són els de gamma alta), que d'aquesta manera tenen accés a un senyal amb components espectrals allunyats de la portadora, la qual cosa els permet tenir més precisió en la mesura del pseudorang. Si el senyal E1 constés únicament dels tres components esmentats al principi del paràgraf, no tindria envolupant constant, que és una característica desitjable perquè els amplificadors de potència a bord del satèl·lit puguin treballar de manera eficient sense distorsionar el senyal. S'utilitza una manera enginyosa d'aconseguir que el senyal global tingui envolupant constant, denominada *coherent adaptive subcarrier modulation (CASM)* i *interplex modulation*. S'afegeix un quart component al canal en quadratura, que és funció dels tres altres components. Dedicant menys del 8% de la potència (cosa que implica una pèrdua de potència inferior a 0,4 dB) a aquest nou component s'aconsegueix que el senyal total tingui envolupant constant.

Les dades del senyal E1, i també de la resta de senyals, utilitzen una codificació de canal senzilla, però que ja representa un avenç pel que fa al missatge de navegació de GPS C/A, que no està codificat de cap manera. Concretament, s'utilitza un codi convolucional amb taxa 1/2. Un altre aspecte distintiu dels senyals Galileo és que utilitzen codis pseudoaleatoris molt més llargs que els 1.023 xips habituals del codi C/A. Això aporta avantatges quant a la reducció de la interferència intra i intersistema. No obstant això, si l'ús de codis més llargs impliqués que s'han de verificar més hipòtesis en la fase d'adquisició, aquesta fase es faria més llarga i més complicada. És per això que aquests codis llargs no es dissenyen de manera que no tinguin cap estructura sinó que es construeixen de manera jeràrquica (se solen denominar *tiered codes*), encadenant diversos codis més curts, anomenats primaris, el signe dels quals es va alternant d'acord amb un codi secundari. Depenent del senyal, els codis primaris poden ser codis de memòria (per exemple, simplement una seqüència binària determinada obtinguda a partir d'un procediment d'optimització de les característiques del senyal) o bé es poden generar mitjançant un registre de desplaçament.

El senyal E6 s'assembla al senyal E1 en el nombre i tipus de components que inclou i també en el mecanisme per a tenir envolupant constant. La principal diferència és que no s'utilitzen polsos BOC en els dos components del canal en fase sinó que s'utilitzen simplement polsos rectangulars. No obstant això, la freqüència de xip d'aquests components és 5×1.023 Mxips/s, que és un factor 5 superior al del senyal GPS C/A, la qual cosa el converteix en un senyal amb una amplada de banda bastant gran i, per tant, amb la capacitat de proporcionar mesures de pseudorang amb gran precisió. No obstant això, molts altres aspectes del senyal E6 romanen indefinits, ja que estava dedicat al servei comercial de Galileo, que actualment no és prioritari.

La banda E5 comprèn realment dues subbandes contigües de freqüència, denominades E5a i E5b. Aprofitant aquest fet, s'ha dissenyat un senyal molt interessant perquè es pot interpretar (i, és clar, també rebre) com si fos un únic senyal que ocupa tota la banda E5, o bé com dos senyals diferents: un en la subbanda E5a i un altre en la subbanda E5b. Processar el senyal E5 complet només està a l'abast dels receptors amb gran amplada de banda (o sigui, receptors més cars i de més altes prestacions), però el fet de tenir un senyal de més de 50 MHz d'amplada de banda permetrà obtenir mesures de retard de molt alta precisió (recordeu que el senyal GPS C/A té una amplada de banda d'uns pocs MHz). No obstant això, per a no impedir l'accés a aquesta banda als usuaris amb receptors més modestos, el senyal és tal que si un usuari es queda únicament amb una de les dues subbandes i elimina el senyal en l'altra subbanda (filtrant, per exemple), el senyal resultant és aproximadament un senyal BPSK(10) amb dades en el canal en fase i un senyal BPSK(10) pilot en el canal en quadratura. Podem observar que, de qualsevol manera, fins i tot quedant-se únicament amb una subbanda, s'obté un senyal amb una taxa de xip 10 vegades superior al senyal GPS C/A; és a dir, amb la mateixa taxa de bit que el senyal militar GPS P. A més dels 4 components útils que formen

el senyal E5 (per exemple, el component de dades i el pilot en cadascuna de les dues subbandes), s'afegeixen uns termes als quals es dedica el 15% aproximadament de la potència i, gràcies a això, s'aconsegueix que el senyal tingui envolupant constant.

L'estructura d'un receptor Galileo no difereix de l'estructura d'un receptor GPS. Les diferències són més quantitatives que qualitatives, ja que en poder processar molts components en cada banda, el receptor pot necessitar més canals i hi ha més combinacions sobre quins components cal triar. No obstant això, la manera d'extreure les mesures de retard, fase i, si correspon, les dades del senyal, és essencialment la mateixa en qualsevol senyal DS-SS. Per tant, el processament dels senyals Galileo segueix les mateixes fases d'adquisició i seguiment; i el seguiment es fa amb els llaços de codi i de fase, tal com es va explicar per a GPS. No obstant això, sí que hi ha un efecte que cal tenir en compte quan es processen senyals BOC, que no ocorria amb els senyals BPSK. Això afecta Galileo en la mesura en què alguns dels seus components utilitzen el format BOC, i qualsevol altre sistema (com el GPS modernitzat) que pugui utilitzar també modulacions BOC. L'efecte es deu al fet que la correlació dels senyals BOC presenta màxims locals, i cada màxim local és susceptible de convertir-se en un punt d'enganxament estable del DLL. Si el DLL es queda enganxat en un d'aquests punts, proporciona mesures de retard amb un biaix molt important. En els últims anys s'han dedicat molts esforços a investigar tècniques per a mitigar aquest efecte. S'ha presentat una classificació de les diferents tècniques. A pesar que n'hi ha una gran varietat, bàsicament per a identificar si s'està seguint el màxim correcte (o sigui, central) de la correlació, s'utilitzen alguna de les dues idees bàsiques següents: una és el fet que l'envolupant de la correlació dels senyals BOC és un triangle, i que, per tant proporciona una mesura no ambigua encara que de menys precisió, i l'altra es basa en el fet que l'amplitud dels màxims adjacents que s'estan seguint proporciona informació sobre si s'està en el màxim absolut o en un màxim local.

Finalment, s'han presentat dues estratègies per a millorar el comportament dels receptors GNSS. D'una banda, s'ha descrit la tècnica basada a incloure capacitat multifreqüencial/multiconstel·lació en el receptor mateix. És a dir, permetre treballar amb senyals procedents de diferents bandes freqüencials i de diferents constel·lacions de satèl·lits (GPS, Galileo i GLONASS). Tal com s'ha comentat, es poden millorar notablement les característiques del sistema, ja que, d'una banda, es poden cancel·lar efectes adversos mitjançant la utilització de senyals de diferents bandes (com el cas de l'efecte ionosfèric) i, d'altra banda, es pot augmentar el nombre de satèl·lits visibles en incorporar satèl·lits de diferents constel·lacions. No obstant això, la complexitat del sistema s'incrementa de manera considerable excepte en casos excepcionals com els casos basats en senyals dels sistemes Galileo i GPS, que comparteixen banda freqüencial i presenten característiques similars (com els senyals en les bandes L1/E1 i L5/E5a).

Després d'això, s'ha presentat un altre mètode de millora de les prestacions dels receptors GNSS que es basa a hibridar-ne les mesures amb mesures de sistemes inercials INS, la qual cosa es coneix com a hibridació GNSS-INS. Els sistemes INS ofereixen unes precisions molt bones a curt termini, però, a mesura que avança el temps, l'error del sistema va creixent. D'altra banda, els sistemes de posicionament per satèl·lit presenten un error fitat i amb una evolució pràcticament constant en el temps. Per tant, les mesures de tots dos sistemes presenten un bon nivell de complementarietat per a explotar-ne la combinació. La manera emprada normalment per a combinar tots dos sistemes és un filtre de Kalman, i per aquest motiu se n'ha presentat el principi de funcionament. Fet això, s'han presentat els esquemes d'hibridació més utilitzats, que són l'esquema desacoblat, l'esquema *loosely coupled* i l'esquema *tightly coupled*; l'últim és el més utilitzat, ja que presenta els millors resultats.

Exercicis d'autoavaluació

1. El sistema d'augment GPS diferencial...

- a) es basa en l'ús d'una constel·lació de satèl·lits pròpia.
- b) ofereix millors resultats a mesura que l'usuari es troba més allunyat de les estacions de referència del sistema.
- c) se limita a enviar a l'usuari GPS les mesures de pseudodistància obtingudes en les estacions de referència perquè aquest millori la seva estimació de posició.
- d) pot enviar la informació de correcció mitjançant Internet.

2. Indiqueu quina de les asseveracions següents és falsa:

- a) Els errors en l'estimació de la pseudodistància deguts a efectes troposfèrics depenen de l'angle de la línia de visió directa existent entre el receptor GPS i el satèl·lit.
- b) La diferència existent entre l'error de pseudodistància a causa d'efectes troposfèrics obtingut en el receptor GPS d'un usuari i l'obtingut en el receptor d'una estació de referència DGPS augmenta a mesura que la diferència d'altitud de tots dos receptors disminueix.
- c) La diferència existent entre l'error de pseudodistància a causa d'efectes ionosfèrics obtingut en el receptor GPS d'un usuari i l'obtingut en el receptor d'una estació de referència DGPS augmenta a mesura que la ionosfera es troba més carregada.
- d) Els errors en l'estimació de la pseudodistància deguts a efectes ionosfèrics depenen de l'angle de la línia de visió directa existent entre el receptor GPS i el satèl·lit.

3. Indiqueu quina afirmació és correcta:

- a) El sistema DGPS d'àrea estesa pot oferir cobertura d'àrea global.
- b) El sistema DGPS d'àrea local es basa en el desplegament d'una xarxa d'estacions de referència per a cobrir una zona determinada.
- c) El sistema DGPS d'àrea estesa està dissenyat per a cobrir àrees entre 10 i 100 km.
- d) El sistema DGPS d'àrea local es basa en l'ús d'una única estació de referència per a cobrir una zona determinada.

4. El sistema WAAS...

- a) envia, entre altres coses, informació a l'usuari sobre l'estat dels satèl·lits GPS i de la integritat dels satèl·lits geostacionaris del sistema WAAS.
- b) pot aconseguir precisions entre els 0,5 i 2 m en territori europeu.
- c) ofereix un senyal de navegació addicional de manera que un usuari es pot posicionar sense la necessitat de rebre senyals dels satèl·lits GPS.
- d) ofereix un senyal de navegació addicional que utilitza una modulació similar a la de GPS amb una velocitat de transmissió de dades igual a 50 bps.

5. Indiqueu quina afirmació és correcta:

- a) El sistema EGNOS és la solució europea a la navegació per satèl·lit.
- b) El sistema EGNOS envia únicament informació de correcció mitjançant Internet per mitjà de SISNET.
- c) El sistema EGNOS ofereix un senyal de navegació addicional que utilitza una modulació similar a la de GPS.
- d) El sistema EGNOS ofereix servei d'augment a Europa i Àfrica, i ofereix un nivell de precisió homogeni en tot el territori.

6. Indiqueu quina de les asseveracions següents és falsa:

- a) El sistema EGNOS està format per una arquitectura de tres segments: espacial, terrestre i d'usuari.
- b) El sistema EGNOS va començar a funcionar de manera operacional l'any 2005.
- c) El sistema EGNOS és la solució SBAS europea fruit de l'activitat conjunta de la Comissió Europea, l'Agència Espacial Europea i Eurocontrol.
- d) El sistema EGNOS té com a objectiu principal oferir un servei d'augment a GPS, GLONASS i Galileo.

7. Els serveis del sistema Galileo...

- a) estan principalment enfocats a l'usuari civil, i utilitzen un conjunt de senyals mancats de mecanismes de xifratge.

- b) de caràcter civil es transmeten en la mateixa banda freqüencial, i deixen la resta de bandes per a la transmissió de serveis regulats per entitats governamentals.
- c) coneguts amb el nom de PRS es transmeten mitjançant senyals en les bandes E1 i E6 utilitzant un espectre més eixamplat per a millorar el nivell de protecció.
- d) PRS i SOL utilitzen xifratge per a assegurar l'autenticació dels senyals utilitzats.

8. Indiqueu quina de les asseveracions següents és falsa:

- a) La constel·lació de satèl·lits Galileo està basada en la utilització de tres plans orbitals, i cadascun d'aquests plans està format per 10 satèl·lits operatius.
- b) La constel·lació Galileo està dissenyada per a poder tenir un mínim de 4 satèl·lits visibles en qualsevol posició del món en qualsevol instant de temps amb una probabilitat més gran que el 90%.
- c) El rellotge d'hidrogen embarcat en el satèl·lit GIOVE-B és el rellotge més estable dels llocs en òrbita de manera permanent.
- d) Els satèl·lits Galileo estan dissenyats per a estar també equipats amb un transponedor SAR.

9. El segment terrestre de Galileo...

- a) està al seu torn dividit per dos segments, i el segment GCS és l'encarregat de controlar el sistema de navegació i de proveir els principals serveis Galileo.
- b) està al seu torn dividit per dos segments, i el segment GMS és l'encarregat de dur a terme totes les tasques de control de la constel·lació de satèl·lits Galileo.
- c) està format per 5 estacions TTC, entre 30 i 40 estacions GSS, un centre de control GCC (més un de redundat) i 9 estacions ULS.
- d) està al seu torn dividit per dos segments, i el segment GCC és l'encarregat de controlar el sistema de navegació i de proveir els principals serveis Galileo.

10. El fet d'introduir els productes d'intermodulació en el senyal AltBOC perquè tingui envoltant constant causa una pèrdua de potència en els components útils. El valor d'aquesta pèrdua és...

- a) 15 dB.
- b) 85 dB.
- c) 0,7 dB.
- d) 8,2 dB.

11. Imaginem que tenim un receptor que processarà únicament la part BOC(1,1) del pilot del senyal Galileo E1. Quin percentatge de la potència total del senyal Galileo E1 és útil per a aquest receptor?

- a) 23,07%.
- b) 20,97%.
- c) 46,14%.
- d) 2,09%.

12. Continuem amb la suposició que el receptor està interessat únicament en la part BOC(1,1) del pilot del senyal Galileo E1. L'any 2004, el format de senyal proposat per a Galileo era simplement BOC (no CBOC), la qual cosa equival a suposar que $\alpha = 1$ i $\beta = 0$ en el model de senyal CBOC. En aquest cas, ocorren dos efectes contraposats. D'una banda, tota la potència del pilot correspon a la modulació BOC(1,1), sense dedicar 1/11 per a la BOC(6,1). Però d'altra banda, es veu intuïtivament que es necessita més potència en el component d'intermodulació perquè el component en fase del senyal s'anul·la quan $e_{E1-B}(t)$ i $e_{E1-C}(t)$ tenen el mateix signe (cosa que no ocorre quan s'utilitzen realment senyals CBOC). Tenint en compte tots dos efectes (per exemple, la desaparició dels termes BOC(6,1) i l'augment del component d'intermodulació), quin percentatge de la potència total és ara útil per al receptor?

- a) 22,2%
- b) 15%
- c) 23,07%
- d) 20,97%

13. Per què s'utilitzen els *tiered codes* en lloc de codis amb la mateixa longitud total però completament aleatoris?

- a) Perquè no es poden generar codis de memòria tan llargs.
- b) Perquè així es poden generar mitjançant registres de desplaçament.
- c) Perquè d'aquesta manera els codis primaris es poden utilitzar en diversos satèl·lits.

d) Perquè és una manera pràctica d'aconseguir codis llargs sense complicar en excés el procés d'adquisició.

14. Quina de les afirmacions següents és certa? En augmentar la freqüència de la subportadora dels senyals BOC...

- a) s'allarga el codi.
- b) es redueix la interferència intrasistema.
- c) augmenta el nombre d'oscil·lacions de la corba de correlació.
- d) es redueix la precisió de les mesures de retard.

15. Quin dels tipus de senyals següents té una amplada de banda més gran?

- a) BOC(1,1)
- b) BOC(5,1)
- c) CBOC(5,1,1/11,+)
- d) BPSK(5)

16. Quina de les afirmacions següents és falsa?

- a) El senyal en la banda inferior d'un senyal AltBOC(15,10) és aproximadament un senyal BOC(15,10).
- b) El senyal en la banda inferior d'un senyal AltBOC(15,10) és aproximadament un senyal BPSK(10) o QPSK(10).
- c) Un senyal AltBOC(15,10) permet multiplexar 4 components útils.
- d) Un senyal AltBOC(20,1) té menys amplada de banda que un senyal AltBOC(15,10).

17. Quina de les afirmacions següents sobre l'ambigüitat associada de la correlació dels senyals BOC és certa?

- a) S'alleuja treballant amb codis més curts.
- b) S'agreuja en reduir l'ordre de la modulació BOC.
- c) No és preocupant si es treballa amb un DLL no coherent.
- d) Es pot combatre processant cadascuna de les subbandes del senyal BOC per separat i combinant-les de manera no coherent.

18. Indiqueu quina de les asseveracions següents és falsa:

- a) Habilitar la capacitat freqüencial en un receptor permet reduir errors deguts a efectes ionosfèrics.
- b) Actualment, la millora oferta per un receptor GPS/GLONASS enfront d'un receptor GPS convencional és bastant modesta.
- c) La posició d'un usuari amb un receptor multiconstel·lació es pot calcular combinant directament les mesures de pseudodistància de senyals GPS i Galileo de la banda L1/E1.
- d) El sistema Galileo transmet informació sobre el desfasament entre el sistema de temps GST i el sistema GPST.

19. Indiqueu quina afirmació és correcta:

- a) La hibridació GNSS-INS basada en l'esquema *loosely coupled* utilitza dos filtres de Kalman, i un està integrat en el receptor GNSS.
- b) Els sistemes INS presenten un error fitat i amb una evolució pràcticament constant en el temps.
- c) Els receptors GNSS ofereixen unes precisions molt bones a curt termini, però, a mesura que avança el temps, l'error del sistema va creixent a causa de l'error acumulatiu introduït per l'efecte Doppler.
- d) La hibridació GNSS-INS se sol dur a terme mitjançant l'esquema *loosely coupled* a causa de la baixa complexitat que presenta la implementació d'aquest esquema.

Solucionari

Exercicis d'autoavaluació

1. d

2. b

3. d

4. a

5. c

6. a

7. c

8. a

9. c

10. c

11. b

12. a

13. d

14. c

15. b

16. a

17. d

18. d

19. a

Abreviatures

- 3G** Tercera Generació o 3rd Generation
- ACK** ACKnowledgment
- AltBOC** Alternative Binary Offset Carrier
- ASQF** Application Specific Qualification Facility
- AWGN** Additive White Gaussian Noise
- BOC** Binary Offset Carrier
- BPSK** Binary Phase Shift Keying
- CASM** Coherent Adaptive Subcarrier Modulation
- CBOC** Composite Binary Offset Carrier
- CS** Commercial Service
- DGPS** Differential GPS
- EGNOS** European Geostationary Navigation Overlay Service
- FUC** Full Operational Capability
- GCS** Ground Control Segment
- GMS** Ground Mission Segment
- GNSS** Global Navigation Satellite System
- GPST** GPS Time
- GSS** Galileo Sensor Station
- GST** Galileo System Time
- GUS** Ground Uplink Stations
- GPS** Global Positioning System
- GTRF** Galileo Terrestrial Reference Frame
- IMU** Inertial Measurement Unit
- INS** Inertial Navigation System
- IOV** In-Orbit Validation
- MCC** Mission Control Centers
- NLES** Navigation Land Earth Stations
- OS** Open Service
- OTAN** Organització del Tractat de l'Atlàntico Nord
- PACF** Performance Assessment and System Checkout Facility
- PRS** Public Regulated Service
- PZ-90** Parametry Zemli 1990
- QPSK** Quadrature Phase Shift Keying
- RIMS** Ranging and Integrity Monitoring Stations

- S/A** Selective Availability
- SAR** Search And Rescue
- SBAS** Satellite-Based Augmentation Systems
- SIR** Signal-to-Interference power Ratio
- SISNET** Signal In Space through the InterNET
- SNR** Signal to Noise Ratio
- SOL** Safety of Life
- TEC** Total Electron Content
- TTC** Telemetry, Tracking and Control
- ULS** Up-Link Stations
- UTC (SU)** Universal Time Coordinated (Soviet Union)
- WAAS** Wide Area Augmentation System
- WGS84** World Geodetic System 1984
- WMS** Wide-area Master Stations
- WRS** Wide-area Reference Stations

Bibliografia

Butman, S.; Timor, U. (1971, abril). "Interplex Modulation". *JPL Quaterly Technical Review*.

Butman, S.; Timor, U. (1972, juny). "Interplex - An Efficient Multichannel PSK/PM Telemetry System". *IEEE Transactions on Communications*.

Dafesh, P. A.; Lazar, S.; Nguyen, T. (gener, 1999). *Coherent Adaptive Sub-carrier Modulation (CASM) for GPS Modernization*. Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation, ION-NTM 1999. San Diego, Califòrnia, EUA.

Dafesh, P. A. (1999, març). *Quadrature Product Sub-carrier Modulation (QPSM)*. IEEE Aerospace Conference Record.

Dafesh, P. A. (2002, agost). *Coherent Adaptive Sub-carrier Modulation Method*. Patent US 6,430,213, Granted 6.

European GNSS (Galileo) Open Service Signal In Space Interface Control Document (OS SIS ICD) (núm. 1, febr., 2010). European Union.

Grewal, M. S.; Weill, L. R.; Andrews, A. P. (2001). *Global Positioning Systems, Inertial Navigation and Integration*. John Wiley & Sons.

Kaplan, E. D.; Hegarty, C. J. (2006). *Understanding GPS Principles and Applications*. Artech House.

Misra, P.; Enge, P. (2006). *Global Positioning System: Signals, Measurements and Performance*. Ganga-Jamuna Press.

Prasad, R.; Ruggieri, M. (2005). *Applied Satellite Navigation: Using GPS, Galileo and Augmentation Systems*. Artech House.

Annex

En aquest annex es presenta el codi de programari generat en el Matlab per a emular el comportament del sistema considerat en l'exemple presentat en la secció 4.3.

1) Cas GPS (apartat 1d)

```
x0=0;
vx=1;
ax=0.1;
y0=0;
vy=1;
ay=0.1;

sigma_w=0;
sigma_GPS=10;
Ts=1;
Nmuestras=50;

A=[1, Ts, Ts^2/2, 0, 0, 0;...
   0, 1, Ts, 0, 0, 0;...
   0, 0, 1, 0, 0, 0;...
   0, 0, 0, 1, Ts, Ts^2/2;...
   0, 0, 0, 0, 1, Ts;...
   0, 0, 0, 0, 0, 1];

H=[1, 0, 0, 0, 0, 0;...
   0, 0, 0, 1, 0, 0];

M=6;
L=2;

x_k_menos_1=[x0, vx, ax, y0, vy, ay].';

Q=sigma_w^2*eye(M);
R=sigma_GPS^2*eye(L);

x_est_post_k_menos_1=zeros(M,1);
P_k_menos_1=1e5*eye(M);

for k=1:Nmuestras
```



```

%%%% ACTUALITZACIÓ VECTOR ESTAT REAL
w_k= sigma_w*randn(M,1);
x_k= A*x_k_menos_1 + w_k;

%%%% MESURES GPS
v_k= sigma_GPS*randn(2,1);
z_k= H*x_k + v_k;

%%%% PREDICCIÓ KALMAN
x_est_prior_k= A*x_est_post_k_menos_1;
P_prior_k= A*P_k_menos_1*A.' + Q;

%%%% CORRECCIÓ KALMAN
K_k= P_prior_k*H.'*inv(H*P_prior_k*H.' + R);
x_est_post_k= x_est_prior_k + K_k*(z_k - H*x_est_prior_k);
P_k= (eye(M)-K_k*H)*P_prior_k;

%%%% ACTUALITZACIÓ PER A PROPERA ITERACIÓ
x_est_post_k_menos_1= x_est_post_k;
P_k_menos_1= P_k;
x_k_menos_1= x_k;

%%%% DADES GRÀFIQUES
pos_x_real(k)= x_k(1);
pos_y_real(k)= x_k(4);

pos_x_est(k)= x_est_post_k(1);
pos_y_est(k)= x_est_post_k(4);

pos_x_med(k)= z_k(1);
pos_y_med(k)= z_k(2);

error_pos(k)=norm([pos_x_real(k),pos_y_real(k)]-
[pos_x_est(k),pos_y_est(k)]);

end

figure(1);
plot(pos_x_real,pos_y_real,'b-','LineWidth',2);
hold on;
grid on;
plot(pos_x_est,pos_y_est,'r-','LineWidth',2);
hold on;
plot(pos_x_med,pos_y_med,'ko','Markersize',9);
legend('Trajectoria Real','Trajectoria Estimada Kalman','Medidas GPS');
xlabel('x (m)');
ylabel('y (m)');

```

```
figure(2);
plot(error_pos);
grid on;
xlabel('Iteracion');
ylabel('Error (m)');
```

2) Cas GPS-INS (apartat 2d)

```
x0=0;
vx=1;
ax=0.1;
y0=0;
vy=1;
ay=0.1;

sigma_w=0;
sigma_GPS=10;
sigma_INS=0.01;
Ts=1;
Nmuestras=50;

M=6;
L=4;

A=[1, Ts, Ts^2/2, 0, 0, 0;...
   0, 1, Ts, 0, 0, 0;...
   0, 0, 1, 0, 0, 0;...
   0, 0, 0, 1, Ts, Ts^2/2;...
   0, 0, 0, 0, 1, Ts;...
   0, 0, 0, 0, 0, 1];

H=[1, 0, 0, 0, 0, 0;...
   0, 0, 0, 1, 0, 0;...
   0, 0, 1, 0, 0, 0;...
   0, 0, 0, 0, 0, 1];

x_k_menos_1=[x0, vx, ax, y0, vy, ay].';

Q=sigma_w^2*eye(M);
R_parte1=sigma_GPS^2*eye(2);
R_parte2=sigma_INS^2*eye(2);
R=zeros(L, L);
R(1:2, 1:2)=R_parte1;
```

```
R(3:4,3:4)=R_parte2;

x_est_post_k_menos_1=zeros(M,1);
P_k_menos_1=1e5*eye(M);

for k=1:Nmuestras

    %%% ACTUALITZACIÓ VECTOR ESTAT REAL
    w_k= sigma_w*randn(M,1);
    x_k= A*x_k_menos_1 + w_k;

    %%% MESURES GPS + INS
    v_k_parte1= sigma_GPS*randn(2,1);
    v_k_parte2= sigma_INS*randn(2,1);
    v_k=[v_k_parte1;v_k_parte2];

    z_k= H*x_k + v_k;

    %%% PREDICCIÓ KALMAN
    x_est_prior_k= A*x_est_post_k_menos_1;
    P_prior_k= A*P_k_menos_1*A.' + Q;

    %%% CORRECCIÓ KALMAN
    K_k= P_prior_k*H.'*inv(H*P_prior_k*H.' + R);
    x_est_post_k= x_est_prior_k + K_k*(z_k - H*x_est_prior_k);
    P_k= (eye(M)-K_k*H)*P_prior_k;

    %%% ACTUALITZACIÓ PER A PROPERA ITERACIÓ
    x_est_post_k_menos_1= x_est_post_k;
    P_k_menos_1= P_k;
    x_k_menos_1= x_k;

    %%% DADES GRÀFIQUES
    pos_x_real(k)= x_k(1);
    pos_y_real(k)= x_k(4);

    pos_x_est(k)= x_est_post_k(1);
    pos_y_est(k)= x_est_post_k(4);

    pos_x_med(k)= z_k(1);
    pos_y_med(k)= z_k(2);
```

```
    error_pos(k)=norm([pos_x_real(k),pos_y_real(k)]-  
[pos_x_est(k),pos_y_est(k)]);  
  
end  
  
figure(1);  
plot(pos_x_real,pos_y_real,'b-','LineWidth',2);  
hold on;  
grid on;  
plot(pos_x_est,pos_y_est,'r-','LineWidth',2);  
hold on;  
plot(pos_x_med,pos_y_med,'ko','Markersize',9);  
legend('Trayectoria Real','Trayectoria Estimada Kalman','Medidas GPS');  
xlabel('x (m)');  
ylabel('y (m)');  
  
figure(2);  
plot(error_pos);  
grid on;  
xlabel('Iteracion');  
ylabel('Error (m)');
```