

Una visió general del sistema de posicionament global (GPS)

M. Martínez-García*

Departament de Matemàtica Aplicada i Telemàtica

Introducció

El *Global Positioning System* GPS és un sistema de posicionament espacial que, a través dels radiosenyals emesos pels satèl·lits NAVSTAR, permet d'obtenir informació tridimensional sobre la posició, la velocitat i la mesura de temps durant les 24 hores del dia, a qualsevol usuari adequadament equipat que es trobi en qualsevol punt a sobre o a prop de la superfície terrestre.

Efectivament, l'emissió continuada del senyal via satèl·lit permet a l'usuari el lliure accés a la informació sobre posicionament en qualsevol instant del dia amb una precisió de l'ordre de pocs metres, depenent de l'observable GPS i de la tècnica emprada en el seu processament.

Encara que el GPS va néixer amb una finalitat eminentment militar (proveir les Forces Armades dels Estats Units d'un sistema de navegació des de l'espai que complís uns certs requisits de precisió, integritat i cobertura), actualment, i a causa del gran desenvolupament de les seves aplicacions civils, el GPS ha esdevingut una eina quotidiana de gran utilitat en nombrosos camps científics i professionals.

Paral·lelament al desenvolupament del GPS per part dels Estats Units, l'antiga Unió Soviètica també va posar en marxa un sistema de radionavegació espacial de fonaments i característiques similars, anomenat GLONASS que, actualment s'està compatibilitzant amb el GPS. De fet, existeixen receptors comercials amb capacitat de rebre senyals GPS i GLONASS alhora. El funcionament conjunt dels dos sistemes amb l'ús d'ambdues constel·lacions permetrà de millorar les prestacions de cobertura, integritat i precisió dels usuaris potencials del nou sistema.

Principis bàsics del GPS

El principi bàsic del posicionament GPS consisteix en la mesura de la distància relativa entre un satèl·lit j i un receptor i .

A partir del senyal continu emès amb unes certes *marques* al llarg de la seva transmissió, un receptor sincronitzat pot mesurar el temps de viatge del senyal. La

* Marina Martínez-García (Barcelona, 1972) és llicenciada en Física per la Universitat de Barcelona i actualment és professora associada del Departament de Matemàtica Aplicada i Telemàtica de la Universitat Politècnica de Catalunya.

mesura d'aquest temps es fa mitjançant la correlació del senyal rebut amb una rèplica del mateix senyal generada en el receptor tal com s'explica més endavant (vegeu la figura 9), és a dir, correlant les *marques* del senyal del satèl·lit amb les *marques* del senyal generat. Multiplicant-ho per la velocitat de la llum, s'obté la distància relativa entre el satèl·lit j i el receptor i , P_i^j .

Una altra manera d'obtenir aquesta distància és a partir de la mesura de la fase de l'ona portadora, és a dir, a partir de la mesura del nombre de cicles transcorreguts entre els instants d'emissió i recepció. Multiplicant aquest nombre de cicles per la longitud d'ona portadora del senyal, s'obté la distància relativa L_i^j . El comptatge del nombre de cicles es podria resumir de forma intuïtiva com un procés semblant al de la correlació del codi, encara que amb detalls més complexos (vegeu la figura 1).

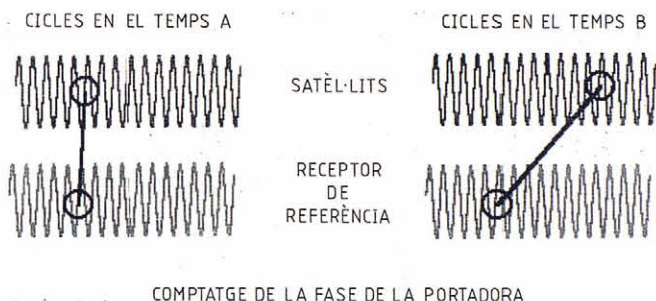


Figura 1: Idea intuïtiva de la mesura del nombre de cicles de l'ona portadora del senyal GPS entre l'instant d'emissió i el de recepció

Finalment, coneguda la posició del satèl·lit j en un sistema geocèntric (x^j, y^j, z^j) , és possible resoldre el problema de triangulació en el qual la incògnita és la posició del receptor (x_i, y_i, z_i) .

Malauradament, tant el rellotge del receptor com el del satèl·lit no es troben mai perfectament sincronitzats. Això fa que la distància mesurada difereixi de la distància geomètrica en una quantitat $c\Delta T$, i és per aquest motiu que P_i^j és anomenada *distància aparent* o *pseudodistància* (*pseudorange*).

Com veurem en la descripció d'algunes característiques dels satèl·lits NAVSTAR, es pot considerar

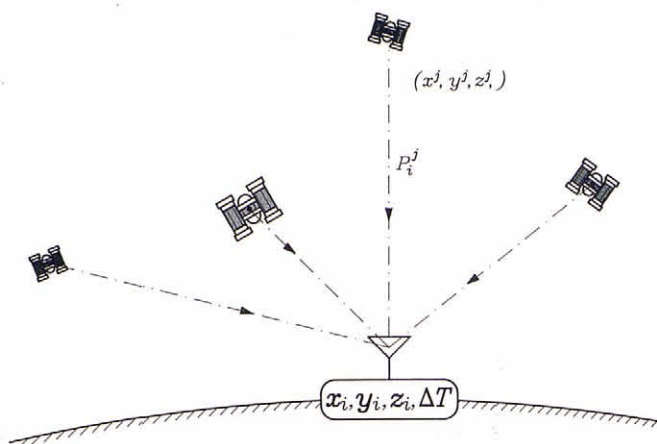


Figura 2: Problema del posicionament del receptor. Les mesures dels temps d'arribada amb la fase codificada d'almenys quatre satèl·lits s'utilitzen per determinar quatre quantitats, la posició en tres dimensions (x_i, y_i, z_i) i la diferència de temps del rellotge del receptor ΔT_i , amb el temps GPS

que els rellotges de bord s'ajusten amb gran precisió a l'escala de temps GPS (aquest òfset es pot calcular a partir del missatge de navegació emès pel satèl·lit), per tant, l'error de sincronització ΔT es pot entendre únicament com l'òfset del rellotge del receptor i respecte d'aquesta escala de temps, és a dir, $\Delta T = \Delta T_i$.

Un model senzill d'observació pot resumir el problema de la manera següent:

$$P_i^j = \sqrt{(x_i - x^j)^2 + (y_i - y^j)^2 + (z_i - z^j)^2} + c\Delta T_i \quad (1)$$

on $j = 1, 2, 3, 4$ indica el satèl·lit corresponent. En efecte, com es desprèn de l'equació 1, per tal de resoldre el problema de posicionament del receptor i (*point positioning* en la figura 2), i l'òfset del seu rellotge, ΔT_i , són necessàries, com a mínim, quatre equacions d'observació, és a dir, quatre satèl·lits observats simultàniament des de i .

Com s'apunta més endavant, l'ona portadora del senyal GPS està modulada per un missatge de navegació que conté les efemèrides del satèl·lit observat. Conegudes les posicions dels satèl·lits, podem conèixer la posició absoluta del receptor. Si, per simplificar, ens oblidem de l'error de sincronització dels rellotges (és a dir, suposem $\Delta T = 0$), gràficament, l'equació 1 defineix una esfera centrada en la posició del satèl·lit $((x^j, y^j, z^j))$ amb radi igual a la pseudodistància P_i^j estimada pel receptor. El punt d'intersecció de les esferes corresponents als diferents satèl·lits determina la posició del receptor i (vegeu la figura 3) amb la qual cosa el quart satèl·lit permetria calcular el desfasament ΔT del rellotge i respecte de l'escala de temps GPS.

A partir de l'equació 1 es pot deduir que la precisió del resultat final (posició) per a un usuari proveït

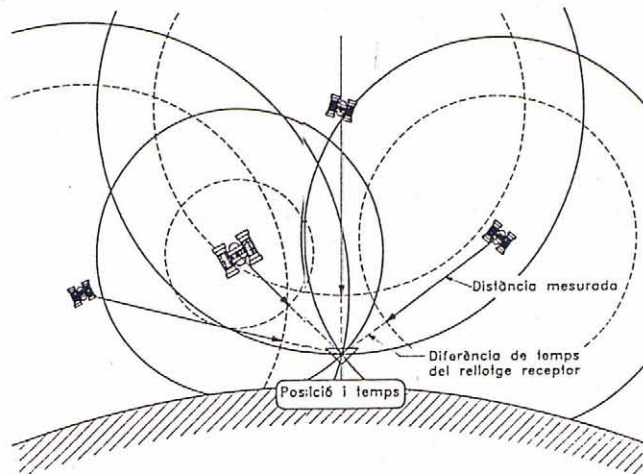


Figura 3: Resolució gràfica del sistema d'equacions 1

d'un receptor unifreqüència depèn en una primera aproximació de:

- la precisió de les efemèrides dels satèl·lits i de l'òfset dels rellotges de bord respecte de l'escala de temps GPS,
- la geometria o disposició dels satèl·lits observats a l'espai,
- la precisió en la mesura de l'observable,
- i altres efectes, com ara les perturbacions que el senyal GPS pateix en travessar l'atmosfera (efectes atmosfèrics), la desviació de la trajectòria del senyal a causa de la reflexió en superfícies que actuen com a *miralls* (efecte multitrajectòria o *multipath*) i efectes relativistes sobre els satèl·lits, sobre el senyal i sobre el receptor, entre altres.

La posició del satèl·lit calculada a partir de les efemèrides transmèses en el missatge de navegació pot arribar actualment a tenir una precisió de l'ordre de 5 m, quantitat que es transmet al càlcul de la posició del receptor en el cas de *point positioning*, però que, en el cas del posicionament d'un punt A respecte d'un altre punt B (posicionament relatiu diferencial), pot ser en bona part reduït. Efectivament, l'error en la posició d'un satèl·lit j afecta de la mateixa manera les mesures que dos observadors propers estiguin fent de forma simultània; per tant, aquest error es cancel·laria en restar els *pseudoranges* mesurats des de A i des de B del satèl·lit j .

D'altra banda, el factor que parametriza la geometria dels satèl·lits respecte del punt d'observació és la dilució geomètrica de precisió (*geometrical dilution of precision*, GDOP), que té un valor aproximat inversament proporcional al quadrat del volum de la figura definida pels punts d'intersecció dels radis vectors (que uneixen

els satèl·lits amb el receptor) amb les esferes de radi unitat centrades en els satèl·lits. Com més separats estiguin els satèl·lits entre si (disposició geomètrica més ampla a l'espai observat des de i , figura 4), més petit serà el factor GDOP i millor condicionat estarà el sistema d'equacions del tipus 1. Per contra, com més compacta sigui la disposició dels satèl·lits a l'espai observat des de i , més gran serà el factor GDOP i pitjor condicionada estarà la resolució del sistema d'equacions 1 (vegeu la figura 5).

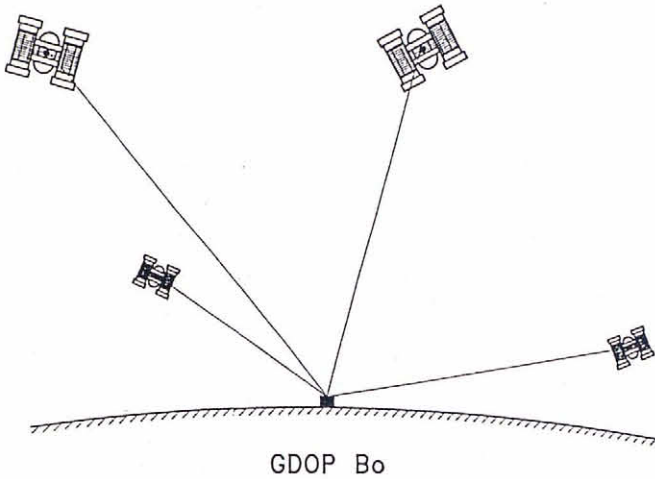


Figura 4: Disposició geomètrica favorable

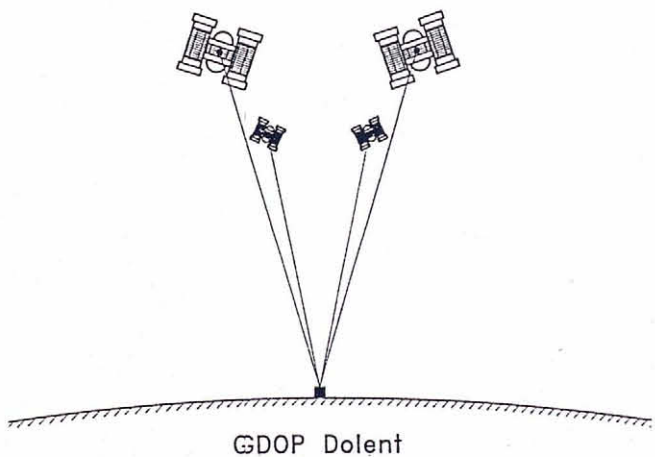


Figura 5: Disposició geomètrica desfavorable

La precisió en la mesura de la pseudodistància està directament relacionada amb l'observable emprat. Els observables GPS són bàsicament el codi (o *pseudorange*), P_i^j , i la fase de l'ona portadora L_i^j . Les mesures de *pseudorange* són més sorolloses (menys precises) que les mesures de la fase. S'entén com a soroll de la mesura de l'observable l'error amb què podem determinar P_i^j o L_i^j a partir de la correlació de les *marques* del senyal rebut amb les *marques* de la rèplica generada en el receptor. En el cas del codi, el soroll en la mesura és d'uns

50 cm amb els receptors actuals (codi suavitzat amb la fase), mentre que en el cas de la fase de l'ona portadora és de l'ordre dels 2 mm.

Per contra, la fase de l'ona portadora presenta els problemes de la indeterminació inicial del nombre de cicles i dels salts de cicle dintre del mateix arc d'observació (vegeu la figura 6), resolubles mitjançant un acurat processament posterior de les dades. Aquest fet impideix l'ús directe de la fase per a la navegació, encara que actualment es desenvolupen diferents tècniques i algorismes per permetre l'ús a temps real de la fase de l'ona portadora, tant per a la navegació com en el camp purament científic.

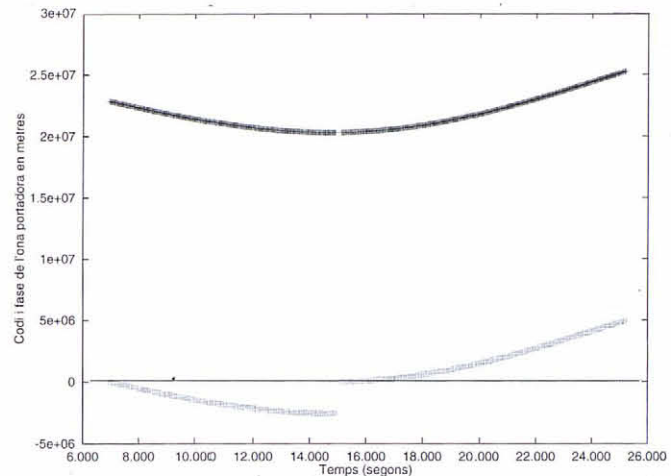


Figura 6: Observables GPS (codi continu i fase discontinua)

Des del punt de vista del senyal GPS, l'efecte de l'atmosfera es podria classificar en dos tipus de perturbacions: l'efecte dels electrons lliures de la ionosfera i l'efecte de la troposfera (component *seca* i vapor d'aigua). En una situació òptima, la ionosfera introdueix errors de desenes de metres mentre que la troposfera contribueix amb errors decimètrics en la mesura de la pseudodistància.

En general, podem parlar de dos tipus de posicionament: el posicionament absolut i el posicionament diferencial (relatiu de cossos respecte d'un punt principal de referència amb coordenades conegudes). Les grans precisions assolides amb el GPS han estat en aquesta darrera modalitat. També es poden distingir altres modalitats de posicionament depenent de si el cos secundari està en moviment o no. Aquestes són el posicionament estàtic i el posicionament cinemàtic.

En el posicionament relatiu remarquem la tècnica del GPS diferencial (*differential GPS*, DGPS), que permet la navegació a temps real per cossos secundaris la distància dels quals respecte al punt de referència no sigui excessivament gran (≤ 100 km). Efectivament, com que es tracta de punts propers, algunes de les correccions a les mesures de les pseudodistàncies estimades al punt de

referència són extrapolables als punts secundaris a posicionar (vegeu esquema de la figura 7).

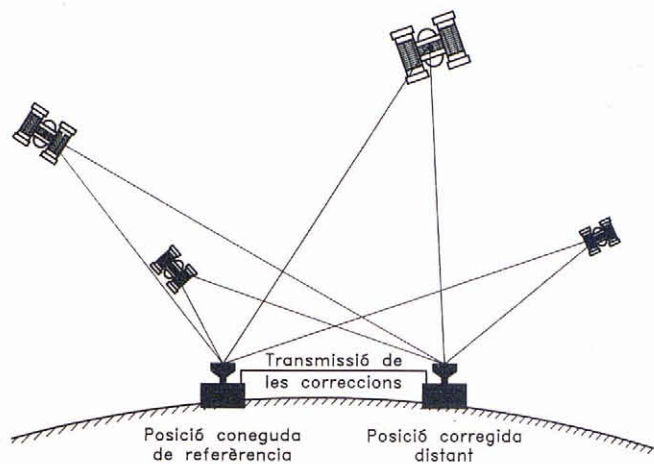


Figura 7: Esquema de funcionament del GPS diferencial (DGPS)

La transmissió d'aquesta informació als receptors mòbils simplifica tant el procés del senyal GPS que és possible fer navegació en temps real amb precisions inferiors a les del posicionament absolut (amb DGPS obtenim unes precisions de l'ordre del metre en posicionament amb codi i, amb línies de base més petites, de l'ordre del centímetre en posicionament amb fase).

Descripció del sistema de posicionament global

El sistema GPS està constituït o es pot diferenciar en el que anomenarem tres segments: *el segment espacial*, format pels satèl·lits de la constel·lació NAVSTAR; *el segment de control*, format per cinc estacions monitores distribuïdes al llarg del planeta; i *el segment usuari*, constituït pels receptors o usuaris dels senyals provinents dels satèl·lits.

Segment espacial

Està constituït pels 27 satèl·lits operatius de la constel·lació NAVSTAR. El disseny d'aquesta constel·lació té com a objectiu garantir que, des de qualsevol punt de la Terra, siguin visibles a qualsevol hora del dia, com a mínim, quatre satèl·lits amb una bona geometria (vegeu la figura 8).

La constel·lació està repartida en 6 plans orbitals (4 satèl·lits per pla separats 60°) d'inclinació 55° respecte de l'equador terrestre amb òrbita quasicircular amb una alçada d'uns 20.200 km sobre la superfície i un període de revolució aproximat de mig dia sideri (≈ 12 hores). Amb aquest disseny i depenent de l'angle d'elevació mínima seleccionat per a l'observació ($> 10^\circ$), sovint podem disposar de més de 4 satèl·lits amb un bon GDOP.

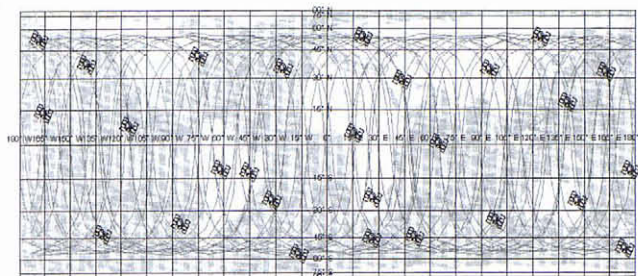


Figura 8: Cobertura de la constel·lació NAVSTAR. Trajectòries durant 24 hores per a 27 satèl·lits operatius el 29 de setembre de 1998

L'objectiu principal dels satèl·lits consisteix en l'emissió de radiosenyals i d'un missatge de navegació. Amb aquesta finalitat, disposen de rellotges de bord d'alta precisió que generen una freqüència fonamental $f_0 = 10,23$ MHz de la qual es deriven L1 i L2 multiplcant per 154 i per 120 respectivament ($f_{L1} = 1575,42$ MHz i $f_{L2} = 1227,6$ MHz).

Aquests rellotges d'alta precisió són oscil·ladors atòmics de cesi i de rubidi que presenten derives relatives de 10^{-13} i 10^{-14} segons en un dia i en els darrers vehicles espacials, màsers d'hidrogen amb derives de 10^{-14} a 10^{-15} segons en un dia.

Cada portadora L1 i L2 està modulada pel missatge de navegació i per uns codis. El missatge de navegació, modulats només sobre L1, transmet els elements keplerians de les òrbites dels satèl·lits, les correccions als seus rellotges respecte de l'escala de temps GPS (l'òfset dels rellotges dels satèl·lits) i altres paràmetres sobre l'estatus del sistema.

Existeixen dos codis que modulen les portadores GPS: el codi P *precise* i el codi C/A *coarse/acquisition*. Aquests codis estan formats per una seqüència binària amb característiques de soroll pseudoaleatori (*pseudorandom noise*, PRN). Com ja s'ha apuntat en seccions anteriors, la mesura de la pseudodistància a partir dels codis es fa mitjançant la correlació del codi modulats sobre el senyal rebut amb un codi generat pel receptor (vegeu la figura 9).

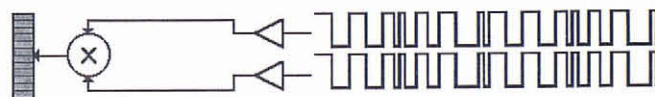


Figura 9: Simulació de la correlació del codi rebut (a dalt) amb el codi generat al receptor (a baix). A la dreta, grau de correlació/superposició entre ambdues cadenes de bits (en l'exemple, el grau de correlació és màxim)

La precisió en posicionament absolut a què es pot arribar mitjançant el codi P és de l'ordre de 20 m, mentre que en el cas del codi C/A és de l'ordre de 100 m. Per aquest motiu, el codi precís és d'ús autoritzat només per

a certs usuaris com ara els serveis militars dels Estats Units, l'OTAN, les Australian Defense Forces i alguns organismes civils com ara el Defense Mapping Agency i la National Geodetic Survey, mentre que el codi C/A no presenta cap restricció i és de lliure accés.

El codi P, modulad sobre ambdues ones portadores L1 i L2 té una freqüència igual a f_0 i una longitud d'ona de 30 m. Està constituït per una llarga seqüència de bits que es repeteix cada 266,4 dies. Aquesta seqüència es divideix en 38 segments de duració d'una setmana i cada setmana és assignada a un determinat satèl·lit. Això permet la identificació de cada satèl·lit amb un número que correspon a la setmana de codi P assignat (PRN number). El codi C/A està únicament modulad sobre la portadora L1 a una freqüència de $f_0/10$, una longitud d'ona de 30 m i la seva seqüència de 1.023 bits es repeteix cada mil·lisegon. Un esquema simple de les portadores L1 i L2 modulades fóra:

$$L1(t) = A_1 P(t) D(t) \cos(f_1 t) + A_1 C/A(t) D(t) \cos(f_1 t)$$

$$L2(t) = A_2 P(t) D(t) \cos(f_2 t) \quad (2)$$

on A_1 i A_2 són les amplituds de les ones portadores ($L_k(t) = A_k \cos(f_k t)$) amb $k = 1, 2$ i $P(t)$, $D(t)$ i $C/A(t)$ són els codis P, C/A i el missatge de navegació respectivament, modulats sobre L1 i L2.

Per motius eminentment militars, la precisió en el posicionament precís amb el codi P pot ser degradada de forma intencionada pel Departament de Defensa dels Estats Units. Les tècniques emprades són l'*anti-spoofing*, que consisteix en l'encriptació del codi P en l'anomenat codi Y, i la *selective availability*, que consisteix en la degradació intencionada de les efemèrides i/o la introducció d'errors en els rellotges de bord. Com que l'*anti-spoofing* impedeix l'ús del codi P encriptat, l'usuari ha de fer servir únicament el codi C/A menys precís; per tant, la precisió en posicionament en aquesta situació serà de l'ordre dels 100 m abans esmentats. En el cas de la *selective availability*, la precisió en posicionament amb el codi P disminueix també fins a valors de 90 m.

Segment de control

Està constituït per una estació principal de control (*Master Control Station*, MCS), situada a Colorado Spring (EUA), i una sèrie d'estacions de seguiment i d'antenes de comunicació distribuïdes per tot el món (Colorado Springs, Hawaii, illes Ascensió, Diego Garcia i Kwajalein, vegeu la figura 11).

El seu objectiu és el seguiment de les òrbites dels satèl·lits i l'actualització i predicció de les efemèrides i dels paràmetres dels rellotges de bord que mantenen la sincronització amb l'escala de temps GPS (l'organisme encarregat de la determinació de l'escala de temps GPS és US Naval Observatory, que també forma part de l'MCS).

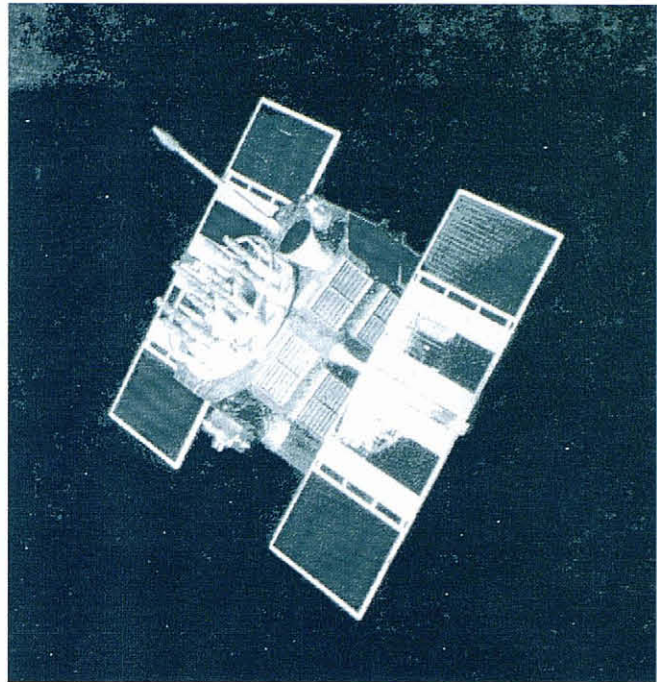


Figura 10: Satèl·lit de la constel·lació NAVSTAR

El funcionament és el següent: a partir de les dades recollides per les estacions de seguiment, l'MCS recalcula les òrbites dels satèl·lits i les correccions al seus rellotges. Un cop actualitzat el missatge de navegació, l'estació principal transmet les noves efemèrides i els paràmetres temporals a les antenes terrestres situades a les estacions d'illa Ascensió, Diego Garcia i Kwajalein, que envien als satèl·lits el nou missatge de navegació actualitzat.



Figura 11: Segment de control. Estació principal a Colorado Spring i estacions de seguiment arreu

Segment usuari

Està constituït pel conjunt d'usuaris que, adequadament equipats, poden rebre els senyals GPS. És factible d'establir diferents classificacions segons si es tracta d'usuaris civils o militars, o també segons el receptor emprat:

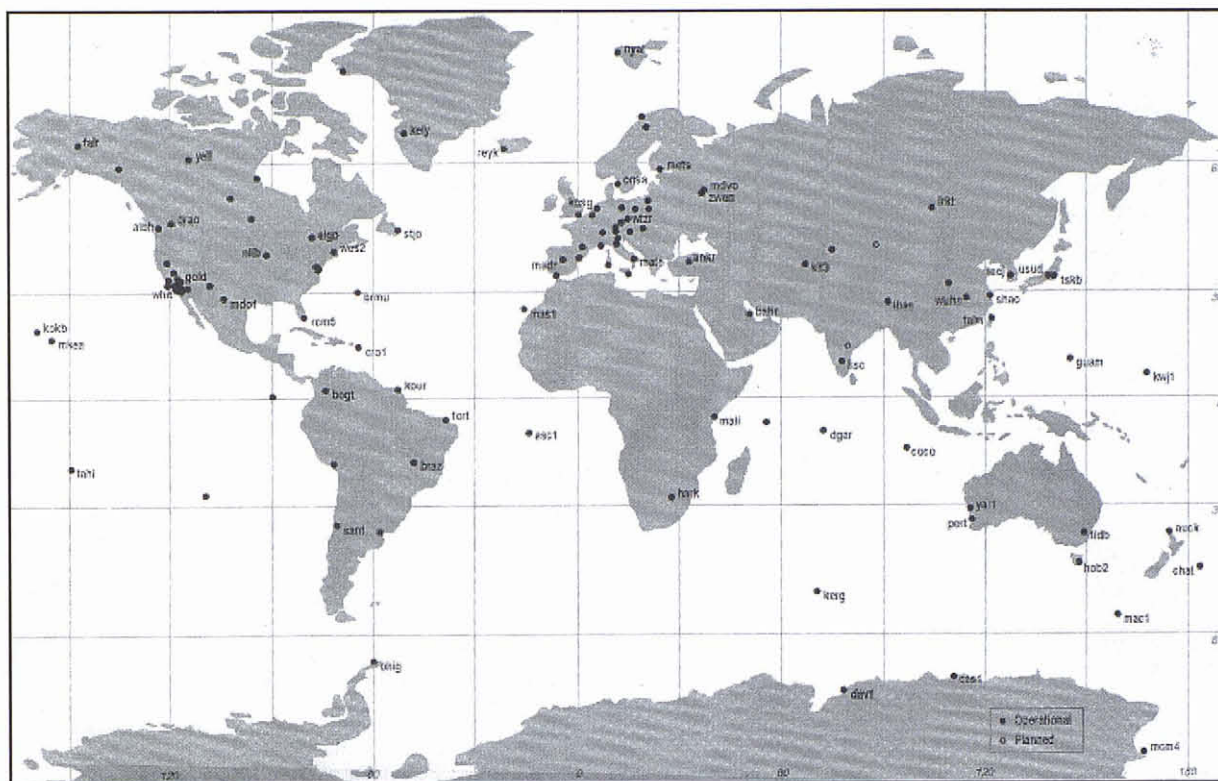


Figura 12: Xarxa global permanent de receptors GPS, la *International GPS Service for Geodynamics IGS*. Juliol de 1997. ● en funcionament i ○ previstes

receptors monofreqüència o duals, receptors de fase i codi o receptors sense codi, etc. Existeix una xarxa global permanent de receptors GPS, la *International GPS Service for Geodynamics* també anomenada xarxa d'estacions permanents (IGS), que posa a disposició de qualsevol usuari informació sobre el sistema GPS. Aquesta xarxa, a més de proporcionar fitxers de mesures dels observables recollits des de més de 300 estacions distribuïdes al llarg del món (vegeu la figura 12), ofereix a través d'Internet altres productes relacionats amb el GPS i les seves aplicacions.

Algunes aplicacions interessants del GPS

Tectònica de plaques amb GPS

Una aplicació directa del GPS fóra l'estudi de les variacions de la superfície terrestre, concretament, del moviment de les plaques tectòniques que la formen (geotectònica). En aquest sentit són interessants els estudis que el Jet Propulsion Laboratory (JPL, Pasadena) està elaborant, tant al sud de Califòrnia com en un àmbit global, en el monitoratge dels desplaçaments de plaques tectòniques a partir de les velocitats horitzontals mesurades que experimenten determinats punts de control definits sobre la superfície del terra.

La zona de Califòrnia és un indret d'interès pel que fa a la dinàmica tectònica, ja que es tracta d'una zona de lliscament paral·lel a la línia que delimita la placa de

l'oceà Pacífic i la placa nord-americana (la placa oceànica es desplaça cap al nord mentre que la continental es mou cap al sud). Aquesta regió és especialment activa. Segons l'US Geological Survey (USGS, circular núm. 1.053) la probabilitat d'un terratrèmol de magnitud 7 en el propers trenta anys és d'un 67 % a causa de la tensió/estrès a què la part superficial de l'escorça terrestre està sotmesa en aquest indret.

S'ha estudiat el moviment relatiu d'una sèrie de punts al voltant de la falla transformant de San Andreas respecte d'un punt principal situat a l'estació CAT1 a la figura 13. La velocitat relativa d'aquests punts està representada a la figura 13 amb vectors que indiquen la magnitud i la direcció d'aquest desplaçament. Com es pot observar, els valors de les velocitats relatives de desplaçament poden superar els 2 cm/any en els punts més allunyats de l'estació de referència. Com a exemple, la figura 14 mostra les variacions en latitud, longitud i alçada en la posició de l'estació CASA des de mitjan 1991 fins a l'actualitat, és a dir, la seva sèrie temporal.

El sistema RASANT: el DGPS a Catalunya

Des de mitjan 1996 (de forma oficial) l'Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC), el Centre de Telecomunicacions de la Generalitat de Catalunya (CTGC) i la Direcció General de Transports (DGT) ofereixen el servei RASANT (*radio aided satellite navigation technique*) de correccions diferencials GPS per a usuaris adequada-

ment equipats.

Com s'havia apuntat en la descripció del DGPS, les correccions a la mesura del codi estimades en una estació de referència poden extrapolar-se a les mesures de codi fetes per un receptor que s'hi trobi a prop. En el cas de Catalunya, aquestes correccions estimades per una estació principal situada a Bellmunt de Segarra, són radiades a través de la xarxa d'emissores d'FM (Catalunya Música) utilitzant el sistema RDS (*Radio Data System*) de radiotransmissió de dades, homòleg al teletext de què disposen alguns aparells de televisió. Aquest sistema de transmissió de correccions diferencials abasta tot Catalunya (l'àrea de cobertura és la de Catalunya Música).

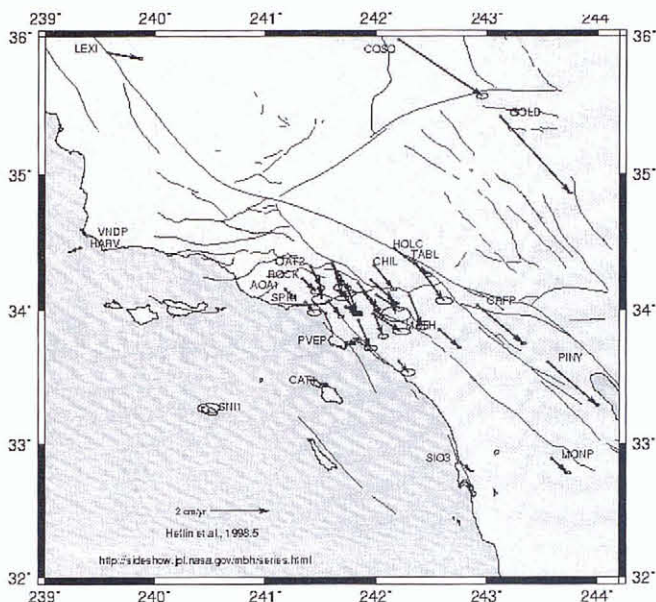


Figura 13: Moviments relatius al voltant de la falla de San Andreas

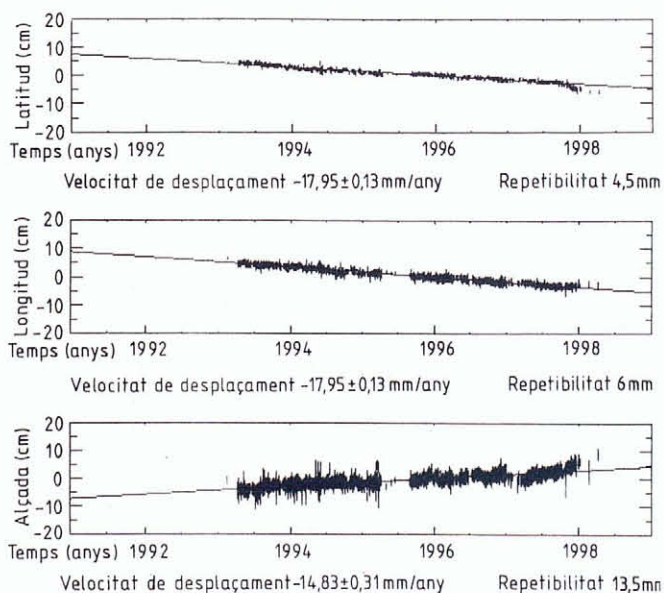


Figura 14: Sèries temporals per a l'estació CASA, a la part superior del mapa de la figura 13

Amb el sistema GPS-RASANT s'han obtingut precisions horitzontals submètriques i de l'ordre del metre d'alçària. A partir de diferents experiments s'ha constatat que la precisió es degrada de l'ordre de 20 a 40 cm sobre línies de base d'uns 100 km (línia que uneix l'estació de referència i l'usuari). Com que l'estació de referència està més o menys situada cap al centre de Catalunya, els errors en el posicionament deguts a la degradació (les correccions estimades en el punt de referència són extrapolades a l'usuari) són, com a màxim, de l'ordre de 30 a 60 cm.

Una de les aplicacions d'aquest sistema diferencial fóra la ubicació de flotes de transport terrestre (o de qualsevol element mòbil o estàtic) a Catalunya amb precisions inferiors o al voltant del metre. En concret, l'ICC va fer una sèrie de proves per testar el sistema en un àmbit urbà. L'experiment va consistir en el posicionament d'un vehicle en diferents indrets de Barcelona (figura 15 i 16) amb la qual cosa es van obtenir precisions per sota del metre (figura 17).

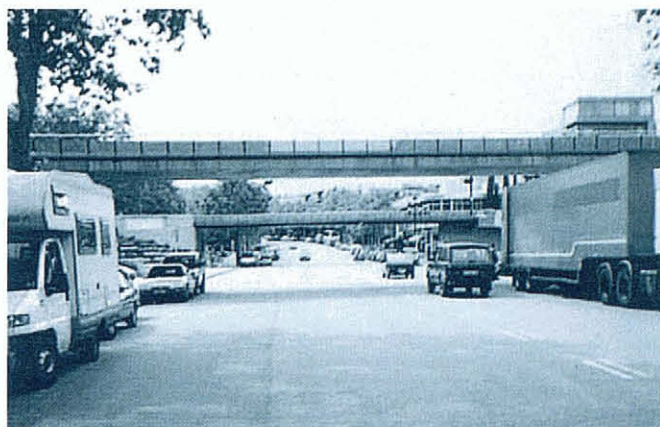


Figura 15: Escenari de l'experiment RASANT a Barcelona (Av. Rius i Taulet, Montjuïc). Imatge cedida per l'ICC

Altres aplicacions

Existeixen altres aplicacions d'interès en diferents camps tecnològics i científics. Podríem esmentar l'ús del GPS com a eina de suport als sistemes globals d'informació (GIS). També les darreres experiències portades a terme per la Scripps Institution of Oceanography que, juntament amb el JPL i el Geological Survey of Canada monitoritzen el moviment del sòl oceànic combinant mesures acústiques (sota l'aigua) amb mesures GPS (sobre la superfície).

Altres aplicacions no tan lligades als coneixements científics foren l'ús del GPS en l'agricultura o en la localització de jaciments arqueològics.

En general, la tendència és a comercialitzar receptors i antenes cada cop més petits, més precisos en les

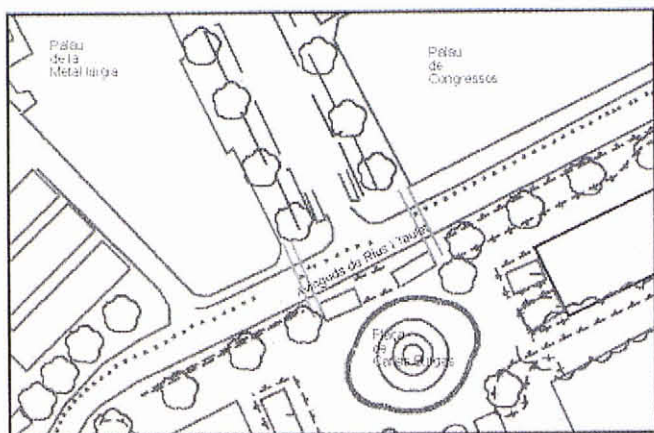


Figura 16: Resultat de la prova: els punts indiquen la posició del vehicle. El senyal es perd en passar per sota dels ponts i es torna a recuperar posteriorment. Imatge cedida per l'ICC

mesures dels observables, de còmoda utilització i a un preu accessible que faran del GPS una eina habitual i quotidiana en qualsevol part del món.

Agraïments

L'autora vol expressar el seu agraïment per les imatges il·lustratives proporcionades via Internet que complementen el text al Sr. Peter H. Dana del Departament de Geografia de la Universitat de Texas (Austin), al International GPS Service for Geodynamics, IGS network i a l'Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC).

Referències

- HOFMANN-WELLENHOF, B., LICHTENER, H. i COLINS, J., *GPS, Theory and Practice*, Springer-Verlag (1994).
- WELLS, D. *et al.*, *Guide to GPS Positioning*, Canadian GPS Associates, Fredericton NB (1987).
- KRAKIWSKY, E. J., *ITS Navigation Systems Seminar*, Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) (Barcelona, 6-7 abril 1997).
- SEEBER, G., *Satellite Geodesy*, de Gruyter (1995).
- TALAYA, J., MESA, J., SEGARRA, J. i COLOMINA, I., *El sistema DGPS RASANT en Catalunya*, III Setmana Geomàtica de Barcelona, 8-11 abril 1997.
- CHADWELL, D. *et al.*, GPS world. News and applications of the Global Positioning System, *Avanstar Communications*, **9**, 44-55, (setembre, 1998).
- BLEWITT, G. *et al.*, Absolute far-field displacements from the 28 June 1992 Landers earthquake sequence, *Nature*, **361**, (gener, 1993).

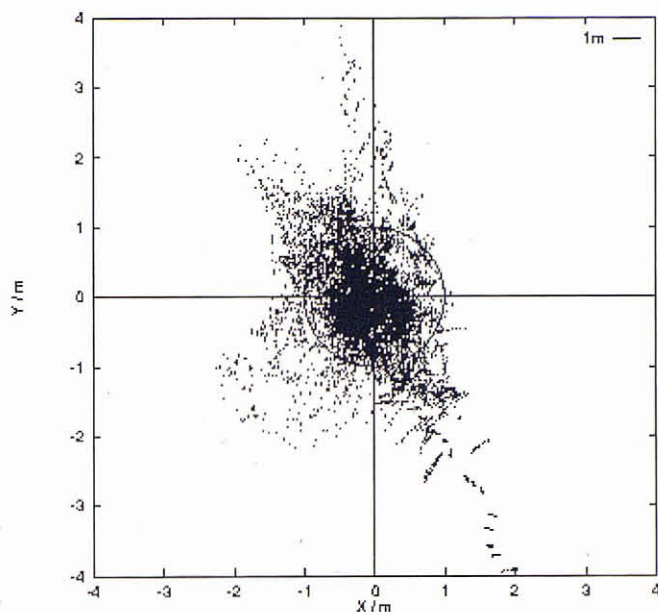


Figura 17: Dispersió o error en posicionament horitzontal (10.160 observacions). Eixos X i Y en m. Imatge cedida per l'ICC

De la mateixa manera, voldria agrair al Sr. Julià Talaya, de la Unitat de Geodèsia de l'Institut Cartogràfic de Catalunya, els seus comentaris i suggeriments pel que fa a la descripció del sistema RASANT-GPS, així com als companys del Departament de Física Aplicada i del Departament de Matemàtica Aplicada i Telemàtica de la Universitat Politècnica de Catalunya, pels suggeriments i crítiques constructives sobre el contingut global de l'article.