

la douzième réunion technique internationale de la division des satellites de l'institut de navigation (ION-GPS 99)



nashville
tenessee
septembre
1999

Claude Million

Comme chaque année, mais cette fois-ci avec un numéro de retard, on voudrait rendre compte des communications présentées lors de la réunion de l'Institut International de Navigation (ION) consacrée plus spécialement à GPS et aux autres systèmes de radio-localisation comparables tels que GLO-NASS et GNSS.

Les avant-propos des années précédentes restent toujours valables. Le choix des communications présentées est celui du traducteur, qui les a, de plus, résumées de son mieux.

Pour des questions de place ce choix est assez limité. On a notamment évité de reproduire tous les articles dont les lecteurs de XYZ auraient déjà pu avoir la primeur en cours d'année, directement de la part de leur auteur, particulièrement celui du Dr Pascal Willis concernant les expériences IGEX 98, dans XYZ n° 81 - 4^e trimestre 1999, et l'article de M.W. Lewandowski concernant la transmission du temps par GPS et GLONASS.

En gros, il s'agissait de déterminer les coordonnées des stations de base, et des trajectoires des satellites Russes dans le système de coordonnées y compris le temps propre à GPS, et, réciproquement, de connaître les coordonnées des stations et des trajectoires des satellites GPS dans le système de coordonnées, et du temps Russes avec des « répétabilité » de l'ordre de 0,11 m à 1,00 m sur plusieurs trajectoires.

On notera que l'inépuisable sujet de la résolution des ambiguïtés entières est encore présent dans notre compte rendu, que comme la deuxième partie de l'année 2000 présentera un

pic de très forte activité solaire les problèmes liés à la connaissance de l'ionosphère ont encore une place significative, que la mise en place progressive, au moins dans les intentions, de la constellation GNSS, laisse la part belle à ces projets et aux anticipations qui leur sont liées.

GPS n'est pas en reste avec la troisième fréquence civile qui ouvre des horizons très prometteurs. On a noté, aussi, l'utilisation de GPS comme jauge permanente des niveaux des rivières et de la mer, et le suivi des déformations des grands ouvrages d'art, enfin l'utilisation de GPS en aéro-photogrammétrie, pour les implantations, et quelques informations concernant les horloges des futurs satellites de GNSS.

Enfin, on a pu donner, en cours d'année, dans la Revue, des informations générales concernant les systèmes GPS, GLO-NASS ou GNSS qui ont souvent été reprises lors de cette réunion, on ne les a donc pas répétées.

On ne saurait trop recommander aux lecteurs intéressés par un des sujets rapportés de se tourner vers les textes originaux pour en avoir un exposé bien plus complet que celui qu'on a pu donner, qui les trahit doublement, par la traduction et par le résumé.

L'ordre dans lequel les articles ont été rapportés correspond à celui des Comptes Rendus sans que cela représente, comme on pourra en juger, une logique très claire. Enfin, on remarquera que les communications de certains auteurs reviennent plus que les autres : il s'agit d'un phénomène tout à fait fortuit.

La détermination du niveau moyen des mers par GPS embarqué sur un bateau

R.M. Alkan et H.M. Palancioglu

Le niveau moyen des mers est déterminé par des marégraphes, des marémètres ou des médi-marémètres, qui sont soit des échelles rigides ou des tubes à flotteurs, avec ou sans enregistrements. L'idée développée est d'utiliser DGPS très précis pour enregistrer les mouvements d'un bateau portant un récepteur par rapport à une station de base fixe au sol. Cela par des mesures sur la phase qui permettent des précisions altimétriques meilleures que le décimètre, de l'ordre du centimètre. L'avantage principal tient à ce que la détermination des ambiguïtés entières une fois réalisée la réception continue permet une grande précision.

Dans cette étude ont été comparées les mesures faites par DGPS et celles réalisées au moyen des procédés traditionnels dans le site de la Corne d'Or en Turquie.

Les mesures DGPS ont d'abord été faites à la cadence d'une mesure par seconde, pendant six minutes, période de mesure allongée ensuite à trente minutes, le bateau étant placé dans une zone d'eau calme. Les mesures faites par les deux méthodes ont été ajustées sur un modèle quadratique de variation du niveau avec le temps.

$$h = a_0 + a_1.t + a_2.t^2$$

Les écarts enregistrés sont de l'ordre de 4 à 5 centimètres. Il semble qu'un des éléments limitant la précision soit la mesure de la hauteur du récepteur sur le bateau par rapport au niveau de l'eau et le maintien de l'équilibre réalisé sur le bateau au moment de cette mesure. En outre, la distance entre le bateau et la station à terre est limitée par la précision attendue, elle ne peut pas dépasser une certaine limite. On a ainsi montré que de simples bateaux peuvent servir de marémètres.

Préparation optimisée de la mesure GPS sur des points à visibilité limitée

F. J. Lohmar

De nos jours le principal obstacle à la réalisation de mesures sur des satellites provient du manque de visibilité en certains points défavorisés. La détermination de la zone du ciel visible en ces points critiques est rarement correctement réalisée car elle demande trop de temps de préparation.

L'auteur a réalisé un appareil dont les éléments essentiels sont un capteur CCD et un objectif en œil de poisson (fish eye) à axe vertical qui enregistre directement et immédiatement l'image du ciel visible sur le point où on le met en station. Le calcul de la visibilité des satellites en un point et à une heure donnés est ensuite automatique. On peut aussi proposer une ou des périodes d'observation favorables en fonction de la visibilité des satellites sur le point en cause.

Une technique des moindres carrés optimisée améliorant la résolution des ambiguïtés

D. Kim et R. B. Langley

Dans les méthodes de recherche des ambiguïtés de la phase de la porteuse le nombre des solutions candidates à trouver et à vérifier est un facteur important fixant la performance des méthodes proposées. La question clef à poser pour apprécier ces méthodes est : comment réduire ce nombre le plus vite possible sans éliminer le bon candidat avant d'arriver au stade de la vérification ? La méthode OMEGA proposée emploie deux stades et deux espaces de réduction : par mise à l'échelle et par filtrage. Cette méthode est comparable essentiellement à celle que Hatch a proposée elle est basée sur une approche par les moindres carrés, mais en utilisant des moyens bien plus efficaces.

Les notations :

On a $\nabla \Delta l = A \cdot \nabla \Delta x + \nabla \Delta N + e$ notation classique des moindres carrés où x représente les inconnues de position, et N les ambiguïtés, enfin l le vecteur observation des moindres carrés doubles différences observées - doubles différences calculées.

Les indices p et s représentent les groupes primaires et secondaires des satellites.

A^- est l'inverse intrinsèque de A .

Différents échelons	Équations utilisés
Solutions potentielles	$\nabla \Delta \bar{x} = -\nabla \Delta N_p \cdot A_p^{-1}$, avec $N_p \in Z^3$
Ambiguïtés secondaires	$\nabla \Delta N_p = \text{arrondi} \left[\nabla \Delta l_s - A_s \cdot A_p^{-1} \cdot (\nabla \Delta l_p - \nabla \Delta N_p) \right]$
Vecteur d'innovation	$\nabla \Delta l'_p = \nabla \Delta l_p$
	$\nabla \Delta l'_s = \nabla \Delta l_s + A_s \cdot A_p^{-1} \cdot \nabla \Delta N_p - \nabla \Delta N_s$
Résidus	$A^- = (A^T \cdot Q^{-1} \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot Q^{-1}$
	$\nabla \Delta l' = \begin{bmatrix} \nabla \Delta l'_p \\ \nabla \Delta l'_s \end{bmatrix}$
	$v = (I - A \cdot A^-) \cdot \nabla \Delta l'$

Comment résoudre les ambiguïtés au vol lorsque le point de mesure est à plus de 100 km du point de référence avec l'aide de la tomographie ionosphérique

O.L. Colombo, M. Hernandez-Pajarès, J.M. Juan, J. Sanz, J. Talaya

On essaie de résoudre les ambiguïtés entières rapidement et avec précision, quand le récepteur mobile est à plus de 100 km du site de référence le plus proche, en sorte d'obtenir une précision meilleure que le décimètre, et cela en temps réel et, bien évidemment, en post-traitement. Pour obtenir un tel résultat il faut connaître les corrections de réfraction ionosphérique avec beaucoup de précision. Pour des distances de quelques centaines de kilomètres des données sur les deux fréquences provenant des stations fixes doivent être utilisées pour obtenir une information complète sur la réfraction ionosphérique. La ionosphère au-dessus de

ces stations doit être « cartographiée » sur plusieurs niveaux (trois) en utilisant les données des porteuses en temps réel. Les données de ces « cartographies » sont transmises aux utilisateurs en même temps que les corrections de temps et de distance. L'utilisateur doit ensuite calculer des corrections ionosphériques précises.

Pour calculer les corrections ionosphériques du récepteur mobile deux possibilités s'offrent aux opérateurs-calculateurs :

- Faire une interpolation linéaire entre les corrections ionosphériques non-ambiguës.
- Faire une interpolation dictée par le modèle ionosphérique lui-même, puis interpoler linéairement.

Comparaison des déformations mesurées par GPS et calculées par une modélisation par les éléments finis sur le pont Humber

G.W. Roberts, A.H. Dodson, V. Ashkenazi, C.J. Brown, R. Karuna, R.A. Evans

Les auteurs ont mesuré à l'aide de GPS (RTK) les déformations du pont Humber sous une charge mobile composée de cinq gros camions pesant, au total, 160 tonnes. Ce pont suspendu a, pendant plusieurs années, détenu le record du monde avec une portée centrale libre de 1,41 km.

Les recherches entreprises avaient, notamment, pour but de vérifier que les calculs des déformations correspondaient bien à la réalité, autant pour ce pont lui-même que pour vérifier, de façon plus générale, que les méthodes de calcul de ces types d'ouvrages sont représentatives et proches de la réalité. Enfin, il était envisagé d'installer, à demeure, les récepteurs GPS afin d'assurer un suivi des déformations de l'ouvrage.

La déformation maximum mesurée, au milieu de la grande portée, a été de 530 mm au lieu de 519 mm calculés, en outre la continuité de l'ouvrage, en dehors de celle du tablier, prévue par laquelle lorsque la travée centrale s'affaisse, les travées latérales sont soulevées par la réaction du câble porteur a été très nettement enregistrée.

En définitive, le modèle par éléments finis du pont Humber est validé, les très hautes cadences d'acquisition en deux fréquences possibles : 5, puis 10 et maintenant 20 Hz qualifie définitivement ce procédé de suivi des déformations, y compris de façon permanente.

Les levers GPS n'utilisant que trois satellites

C.D. Hill

Traditionnellement les levers GPS au sol se font en utilisant, au moins, quatre, ou plus, satellites visibles à la fois de la station de base et du récepteur mobile, pendant un minimum de deux époques de mesures. Ces quatre satellites sont nécessaires pour résoudre simultanément les trois inconnues de position et la différence des erreurs des horloges des deux récepteurs. Mais il existe de nombreuses circonstances au cours desquelles on ne peut disposer que de trois satellites reçus simultanément, il faut bien, pourtant, que le lever continue. Ce nouvel appareillage et cette nouvelle méthode devraient permettre de surmonter cette difficulté.

Outre les deux récepteurs GPS, le matériel est composé d'un théodolite et de son réflecteur. Le récepteur fixe est placé sur le théodolite, et le récepteur mobile sur la canne du réflecteur.

L'auteur donne les relations des différences secondes de GPS liant les inconnues de position aux mesures, lesquelles sont bien connues, et les relations des mesures terrestres qui sont celles qu'on a données dans notre article : Les tendances actuelles en matière de calcul des canevas de base XYZ n°78 – 1^{er} trimestre 1999. On ne les répètera donc pas ici.

On regrettera qu'il n'ait pas adopté nos relations GPS aux différences premières ce qui aurait grandement simplifié ses équations pour cette application. Il « linéarise » ces relations et les résout simultanément en utilisant un des moyens classiques de détermination des ambiguïtés entières la méthode LAMBDA.

L'implantation rapide de pieux de fondations utilisant GPS cinématique et une application de DAO

T. Sada, S. Othsu, T. Takada, K. Watakabe

Les auteurs ont mis au point une méthode d'utilisation simultanée de GPS cinématique en temps réel (NdT : presque réel) et des données de la DAO du projet. Ils extraient les coordonnées des pieux de fondation directement des données de la DAO. Le résultat est que le temps nécessaire pour identifier les coordonnées a été grandement réduit. Il est possible de sortir de la DAO près de 500 points par jour, et d'implanter sur place 30 points à l'heure soit environ 250 points par jour. L'implantation est accélérée par le fait que le suivi du porte réflecteur se fait directement sur l'écran du NPC. On a noté un écart type d'implantation de 7 mm en X et en Y pour une erreur maximale quadratique moyenne de 20 mm.

Travail de préparation

Les coordonnées des points du projet sont extraites en DAO et transformées en coordonnées du terrain.

Les coordonnées GPS géocentriques XYZ du récepteur mobile obtenues à partir du récepteur fixe stationnant un point de coordonnées connues, sont transformées en coordonnées géographiques sur l'ellipsoïde local en appliquant seulement trois translations connues, et valables seulement localement, c'est-à-dire sans rotations ni mises à l'échelle, pour se centrer sur cet ellipsoïde. Ces

coordonnées : latitude et longitude sont transformées ensuite en coordonnées planes rectangulaires de la projection utilisée. Une translation est appliquée indépendamment aux hauteurs au-dessus de l'ellipsoïde tirées des coordonnées GPS pour les transformer en altitudes dans le système local. Enfin, ces coordonnées sont transformées pour les adapter au système de la DAO, par un changement de base dans le plan. Elles peuvent ainsi être affichées sur l'écran d'un NPC portable

Implantation

La position du récepteur mobile sur le terrain est calculée dans le système de la DAO et apparaît donc directement sur l'écran du NPC portable, il est donc facile de se rapprocher du point qui doit être implanté. Il est de plus en plus fréquent de dessiner des murs courbes, circulaires ou quadratiques, pour lesquels les méthodes classiques d'implantation sont très lourdes alors que la méthode proposée est plus facile et nettement plus rapide.

Galilée, la contribution européenne à la nouvelle génération de GNSS

J. Wolfrum, M. Healey, J.P. Provanzano, T. Sassorossi

En 1999 la Commission Européenne a recommandé que soit mis en place un système de navigation par satellites.

L'approche Européenne est celle d'un système ouvert c'est-à-dire non dominé par des considérations militaires, et un système d'accès contrôlé ou réservé garantissant les résultats, il n'est pas dit s'il sera gratuit pour les topographes, donc il ne le sera probablement pas.

Le système sera totalement compatible avec GPS, les performances seront celles de GPS II F.

La constellation sera probablement de 24 satellites répartis en trois plans à 24 126 km d'altitude avec une inclinaison de 52°5 par rapport à l'équateur et de 9 satellites géostationnaires groupés en trois satellites par région séparée en longitude, dans chaque région, de 45°. Il existe un projet variante de 30 satellites sans satellites géostationnaires.

Le projet Galilée est divisé en cinq phases :

1°/ Phase de définition de 10/1999 à 12/2000.

2°/ Phase de développement de 01/2001 à 12/2001.

3°/ Phase de validation de 01/2002 à 12/2004 – Trois satellites seront construits et lancés et les équipements d'observation permanente des satellites au sol seront construits, c'est vers la fin de 2003 que le premier satellite sera lancé.

4°/ Phase de déploiement de 01/2005 à 12/2007. Les équipements au sol des stations de suivi et de calcul seront terminés en 2004.

La constellation sera complétée et les premiers satellites géostationnaires seront construits et lancés.

5° Le système sera opérationnel dès 2008, on considère que sa durée de vie sera de vingt ans.

Le système prévoit trois catégories d'utilisateurs, et deux de précisions :

- Pour les loisirs avec une précision de 10 mètres, libre mais sans garantie de résultats.
- Pour les transports avec une précision de 10 mètres mais avec garantie de résultat.
- Pour la topographie, la géodésie et les transferts de temps avec, une précision du centimètre ou 10 nsec (NdT ce qui fait 3 cm !), et garantie de résultat.

La détermination précise de l'ionosphère et son application à la résolution des ambiguïtés entières en temps réel

M. Hernandez-Pajarès, J.M. Juan, J. Sanz, O. L. Colombo

Les électrons libres distribués dans l'atmosphère entre une centaine et un millier de kilomètres d'altitude dans la région nommée ionosphère produisent des effets sur les ondes radio-électriques qui sont fonction de leur fréquence, un retard sur les pseudo-distances et une avance de la phase de la porteuse. La distribution spatio-temporelle du phénomène dépend de la principale source d'ionisation : le soleil, et de sa position par rapport aux émetteurs et aux récepteurs, c'est-à-dire de leur longitude solaire. Elle dépend, aussi, des événements solaires et de son activité, et en général du « temps spatial » qu'il fait. Par conséquent, la distribution des électrons libres dans l'ionosphère affecte lourdement le bilan des résultats des localisations de précision qui sont faites par GPS, tout dépend de la distance que ce soit globalement sur l'ensemble du globe ou régional ou seulement local.

Le modèle tomographique adopté comporte trois niveaux : 60 km, 740 km, 1420 km au lieu de un seul dans le modèle classique. Le modèle mathématique de densité des électrons est considéré comme un processus aléatoire stationnaire à chaque niveau dans un référentiel où le soleil reste fixe. Sur le parcours de l'onde on considère le contenu total en électrons sur le parcours incliné (CTEPI).

Ce modèle plus compliqué que le modèle traditionnel à un seul niveau situé à 400 km d'altitude donne des résultats améliorés de 30 à 50 % sur les simples et les doubles différences des corrections ionosphériques : en particulier les erreurs moyennes sont toujours inférieures à 10 cm, pour un écart type de 5 cm et pour un écart quadratique moyen de 6 cm et un biais de 3 cm, ces résultats sont courants sur de grandes distances (200 à 300 km) et on peut résoudre les jeux des ambiguïtés, notamment sur L1.

Pour résoudre au vol les ambiguïtés entières, dans des conditions d'activité solaire très fortes, on considère la combinaison linéaire des deux longueurs d'ondes dite de « large voie » :

$$L_{\delta} = \frac{f_1 \cdot L_1 - f_2 \cdot L_2}{f_1 - f_2}$$

$$f_1 = 154 \cdot f_0, f_2 = 120 \cdot f_0, (f_0 = 10, 23 \text{ MHz})$$

Et les doubles différences entre les stations fixe et mobile et le satellite de base et les autres satellites :

$$\nabla \Delta L_s = \nabla \Delta \rho + \nabla \Delta T + \nabla \Delta I_s + \lambda_s \cdot \nabla \Delta N_s$$

ρ est la distance satellite récepteur, T le retard troposphérique, I_s la correction ionosphérique en « large voie », N_s étant l'entier des ambiguïtés qu'on veut fixer à sa correcte valeur. En temps presque réel les trois autres termes ont une erreur totale inférieure à $\frac{\lambda_s}{2}$ soit 0,40 m, si on utilise les éphémérides précises on obtient une erreur sur la distance de l'ordre de 0,10 m, il faut aussi utiliser des corrections troposphériques précises pour conserver un bilan correct.

L'étude montre dans quelles conditions il est possible d'atteindre ces objectifs :

- 1- Activité solaire de modérée à forte, distances allant de 300 à 1 100 km et de 450 à 1 300 km, on a constaté un écart quadratique moyen sur les doubles différences des corrections ionosphériques de $L_1 - L_2$ de 9 cm, les ambiguïtés entières peuvent être résolues dans 95 % des cas pour une activité solaire modérée, dans le second cas, activité forte, la modélisation de l'ionosphère en trois niveaux, au lieu d'un, permet seule d'atteindre ce résultat.
- 2- Orages magnétiques dus à une activité solaire exceptionnelle, l'écart quadratique moyen monte à 16 cm, le pourcentage de réussite descend à 60 % malgré l'utilisation des données ionosphériques post-traitées de l'IGS et du modèle à trois niveaux.

Les performances des stations virtuelles dans les réseaux géodésiques actifs, en période d'activité solaire

L. Wanninger

De façon à permettre l'utilisation des méthodes statiques rapides et cinématique en temps réel (NdT presque réel) et des localisations des points mesurés de l'ordre du centimètre sur de grandes distances, des stations GPS actives ont été installées sur tout le territoire Allemand avec des espacements inférieurs à 30 ou 50 km. À l'intérieur de ces mailles, les sources d'erreurs dépendant de la distance, comme celles provenant de l'ionosphère, de la troposphère et les erreurs sur les orbites diffusées sont « modélisées » satellite par satellite avec une résolution temporelle très élevée, c'est-à-dire très rapidement.

Cette manière de faire constitue la base des concepts des stations de références virtuelles localisées très près de la position du récepteur mobile, pour lesquelles les « observations » sont calculées par interpolation d'après les données des stations réelles qui les entourent.

Si le modèle des erreurs dépendant de la distance a une longueur d'onde est supérieure à la distance entre les stations fixes on utilise une interpolation bilinéaire. Pour les perturbations qui ont une longueur d'onde inférieure à quelques centaines de kilomètres et pour un maillage plus lâche cela n'est plus possible. Ces perturbations qui étaient très rares dans la période de faible activité solaire 1994-1998, sont devenues courantes en période d'augmentation de l'activité solaire d'octobre 1998 à mars 1999, ce sera pire en 2000.

Dans la plupart des cas le maillage Allemand paraît suffisant pour corriger ces erreurs exceptionnelles, car dans la majorité de ces cas il est inférieur à la longueur d'onde des perturbations.

Les résultats présentés indiquent très nettement qu'en cas de grandes perturbations ionosphériques on tire un avantage certain à utiliser les stations virtuelles interpolées surtout si on n'utilise qu'une seule fréquence et si les stations de références réelles sont éloignées.

Les qualités des corrections utilisées décroissent très rapidement avec les dimensions du réseau et avec une activité solaire croissante.

Une technique de recherche des ambiguïtés sur la porteuse de L1 pour la localisation de précision

Y.J. Lee, Y.D. Won, G-I Jee, C.G. Park

Cet article relate les essais d'une méthode de recherche, au vol, des ambiguïtés entières en n'utilisant que les observations faites sur la porteuse de L1. Cette nouvelle méthode, appelée FAST, a été développée en combinant les avantages de plusieurs autres qui sont décrites et comparées : La méthode LAMBDA cherche à « presque diagonaliser » la matrice des variances-covariances afin d'arrondir les ambiguïtés à l'entier le plus proche sans trop rétroagir sur les ambiguïtés voisines car les termes de covariance sont très faibles et statistiquement négligeables. La méthode LSA est basée sur une compensation séquentielle qui utilise les observations brutes pour obtenir un premier lot de solutions approchées initialisant le processus, et un lot de solutions dites secondaires pour affiner la solution (NdT cette procédure est fortement inspirée par les algorithmes du filtre de Kalman) de telle sorte que l'espace de recherche des solutions s'en trouve réduit.

On a deux équations pour calculer les ambiguïtés représentées par un nombre quelconque, non entier :

$$\begin{aligned} \nabla \Delta \rho &= A \cdot dx + v; \quad \overline{dx} = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot \nabla \Delta \rho \\ \nabla \Delta \varphi &= A \cdot dx + \lambda \cdot \nabla \Delta N + w(1); \quad \nabla \Delta \overline{N} = \frac{\nabla \Delta \varphi - A \cdot \overline{dx}}{\lambda} \end{aligned}$$

avec les notations habituelles, ρ étant la pseudo-distance et φ la phase, N les ambiguïtés, dx les corrections aux valeurs approchées des différences de coordonnées du vecteur et $\nabla\Delta$ représentant les doubles différences des valeurs qui suivent. Enfin A est la matrice Jacobienne des observations et v et w les erreurs d'observation.

$$\bar{v} = \nabla\Delta\varphi - A \cdot \bar{dx}$$

$$\overline{\sigma^2} = \frac{\bar{v}^T \cdot Q_{\nabla\Delta\varphi} \cdot \bar{v}}{n - i}$$

$$Q_{dx} = {}^2\overline{\sigma^2} \left(A^T \cdot Q_{\nabla\Delta\varphi}^{-1} \cdot A \right)^{-1} \text{ on doit trouver une matrice de rotation } Z \text{ telle que devienne diagonale selon de rotation } Z \text{ telle que}$$

$$Q_{\bar{N}} = \frac{I}{\lambda^2} \left(A \cdot Q_{dx} \cdot A^T \right) + Q_{\nabla\Delta\varphi}$$

$Q_{\bar{N}}$ devienne diagonale selon l'expression : $Q_Z = Z^T \cdot Q_{\bar{N}} \cdot Z$ on transforme l'ambiguïté \bar{N} en $\bar{Z} = Z^T \cdot \bar{N}$ par la matrice de rotation Z .

Pour éliminer dx de l'équation (1), E l'espace nul de A^T est recherché. L'espace nul E est composé des solutions particulières de $A^T \cdot dx = 0$.

Pour ne pas entrer dans des notions inutilement compliquées, disons tout de suite que dans le lot, qui doit être surabondant, des observations, on choisit celles strictement nécessaires qui viennent des satellites les mieux placés pour donner des solutions dites primaires. Les solutions sont la somme d'une solution particulière et d'une solution homogène ce qui réduit le domaine des recherches. Il est montré que la méthode proposée est plus rapide que ses concurrentes.

L'utilisation de GPS aéroporté pour la photogrammétrie aérienne

M. Hussain, R. Munjy, J. Appleton

L'aérottriangulation utilise de nombreux points d'appui au sol dispersés sur les chantiers pour lesquels on veut établir des plans ou des cartes topographiques. L'utilisation de la position de la chambre déterminée par un récepteur GPS embarqué dans l'avion qui prend les photographies aériennes peut réduire de façon assez considérable le nombre des points d'appui nécessaires au sol.

La position de la chambre de prise de vues aériennes, liée géométriquement à l'antenne de réception de GPS, est déterminée, par rapport à une station de référence fixe, par un traitement cinématique différentiel différé (NdT La photogrammétrie aérienne est essentiellement une technique différée).

La précision attendue est de l'ordre de 0,10 m pour les chantiers à grande échelle.

De manière à résoudre correctement les ambiguïtés entières la collecte des données GPS devait commencer alors que l'appareil est encore posé au sol. La nécessité de maintenir une réception continue sur cinq satellites, ou plus, pendant toute la mission imposait de nombreuses contraintes aux pilotes dans les manœuvres des virages. En définitive, les avancées récentes en matière de détermination des ambiguïtés au vol ont assoupli toutes les restrictions et les contraintes de vol. Mais il reste toujours la possibilité que les ambiguïtés entières ne puissent pas être déterminées. Pour pallier à cette difficulté on introduit des paramètres supplémentaires dans les calculs de compensation par faisceaux. La possibilité d'appliquer ces paramètres sur chaque bande ou sur le chantier dans sa totalité est envisagée dans l'étude présentée.

Pour parvenir à déterminer les ambiguïtés entières on doit pouvoir disposer d'une réception continue de 10 à 15 minutes sur cinq satellites ou plus. Les risques de perte de réception partielle restent pourtant très grands dans les virages. Il est souvent nécessaire de déterminer un nouveau jeu d'ambiguïtés par nouvelle bande de vol. On doit se souvenir qu'il suffit de perdre un seul cycle d'ambiguïté pour biaiser la distance de 0,19 m, à multiplier par P DOP.

L'utilisation de paramètres de translation corrigés de taux de dérive de ces paramètres dans le temps permet de tenir compte des défauts de fixation d'ambiguïtés, ce sont les seules erreurs systématiques qui ne peuvent pas être éliminées par différence.

Les essais montrent un net avantage en matière de précision en utilisant ces paramètres par bandes, et non pour les chantiers dans leur totalité, et encore plus par rapport à l'utilisation des paramètres de translation seuls, sans leurs dérives, notamment, et surtout, en altimétrie.

(NdT : Le même sujet sera ou est déjà traité dans la Revue de la SFPT).

Amélioration des images satellites par GPS

M.H.B. Jensen, M.F. Tighe

On a introduit cette communication surtout en raison de son caractère curieux et anecdotique.

Les sociétés pétrolières opérant dans la toundra Sibérienne ne disposent d'aucune carte utilisable des lieux. Les cartes existantes sont toutes faussées pour des raisons de Sécurité Nationale, elles sont donc inutilisables, mais de plus il est illégal d'en disposer et de les utiliser. Les compagnies pétrolières doivent déterminer la position des puits exploités par le passé et très souvent secs ou asséchés et disposer d'une carte pour circuler sur ce territoire désertique et exploiter de nouveaux puits.

Mais, pour y parvenir, il est interdit d'employer la photogrammétrie, car le survol, et l'usage de cartes, même fausses et à petite échelle, du territoire, sont interdits, en outre, l'autorisation d'usage des récepteurs GPS est limitée, et encore par simple tolérance, aux appareils portables des randonneurs.

Les topographes de la Société Shell, laquelle a obtenu une concession ont décidé d'utiliser des vues provenant des satellites SPOT ou Topographic Mapper, à la fois pour se diriger dans ce désert sans détails, et pour créer des plans topographiques indispensables pour l'exploration et l'exploitation des gisements.

La position des puits existants étant difficile à interpréter sur ces vues des satellites en raison de leur trop petite échelle, les topographes ont utilisé de vues prises par hélicoptères des puits prises par les Autorités Soviétiques, du temps de leur exploitation, pour les rapprocher des vues prises par les satellites. Ils sont ainsi parvenus à identifier la plus grande part des puits existants sur les photos des satellites.

Les coordonnées numériques, dans le système des clichés, (ligne-colonne) des puits identifiés sur les vues satellites ont été relevées pour être ultérieurement « géocodées ».

Le travail de terrain a permis, ensuite, de déterminer les coordonnées d'amers visibles sur les vues et des puits accessibles en ski avec un récepteur GPS de randonneur, par rapport à une station de référence fixe, seulement équipée, elle aussi, d'un même récepteur portable, mais capable d'enregistrer les signaux en continu. La précision interne obtenue est estimée à 5 m. Pour obtenir des coordonnées absolues de la station de base, à environ 2 m près, les auteurs ont utilisé les données enregistrées de l'IGS. Les deux stations interrogées étaient à environ 2 600 km du point de base en Sibérie.

Des cartes au 1/25 000 et au 1/50.000^e, en projection UTM, sur l'ellipsoïde WGS 84, ont été dressées à partir de vues des satellites, et les vues de SPOT-4 ont permis de définir, en outre des données topographiques permettant l'accès aux forages et aux puits du territoire, des données écologiques pour la protection de l'environnement et des cultures.

Le suivi du niveau d'une rivière en temps réel par GPS

T. Moore, G.W. Roberts, K. Zhang, V. Ashkenazy, G. Close, R. Moore

Jusqu'à présent, on suit le niveau des rivières en seulement quelques points, et à des intervalles de temps assez grands, ce qui fait que les données recueillies ne permettent pas de créer des modèles pertinents menant à des prévisions fiables.

Le principe du suivi permanent du niveau des rivières est fort simple : il s'agit d'utiliser des bouées équipées de façon permanente d'un récepteur bi-fréquences GPS/GLONASS et de capteurs destinés à connaître son **attitude** et la pression. Afin d'assurer une alimentation continue en courant électrique, il est envisagé, plus tard, d'utiliser des capteurs solaires pour alimenter la bouée et ses appareils.

Un moyen de liaison radio à double voie, une station fixe de référence avec un récepteur GPS/GLONASS bi-fréquence, enfin une station centrale d'intégration et de collecte de toutes les données hydrologiques et SIG complètent le dispositif.

Les récepteurs GPS fonctionnaient à une cadence de 1 Hz. Les essais menés sur la Tamise ont montré une excellente concordance, meilleure que le centimètre en altitude, avec les mesures traditionnelles.

Une variante précise de la localisation avec GPS

O. Ovstedal

Il s'agit d'éliminer les erreurs inhérentes au SPS –système de localisation standard– par opposition au système de localisation précis, accessible aux seuls militaires et aux membres des Administrations publiques Américaines, les premières étant une localisation, dans 95 % des cas, à 100 m près horizontalement et 140 m près verticalement.

Même si on a pu montrer récemment que ces valeurs sont fort pessimistes le résultat n'est pas satisfaisant.

Les essais menés comportaient quatre stratégies à comparer :

- A - localisation absolue **mono**-fréquence en utilisant les éphémérides radio-diffusées par les satellites eux-mêmes.
- B - localisation absolue **mono**-fréquence en utilisant les éphémérides précises, et les corrections d'horloge des satellites.
- C - localisation absolue **bi**-fréquence en utilisant les éphémérides précises, et les corrections d'horloge des satellites.
- D - localisation relative (DGPS) en utilisant une station de référence permanente située à 24 km.

Les effets des marées terrestres ont été négligés.

Stratégies		A	B	C	D
Erreurs moyennes	Nord	-6,66	-0,27	-0,05	0,19
	Est	-0,77	-1,11	-0,10	0,02
	Vertical	-5,98	5,95	-0,19	-0,24
Ecart-types à des valeurs moyennes	Nord	12,41	0,43	0,35	0,44
	Est	18,73	0,36	0,16	0,23
	Vertical	54,21	1,10	0,73	1,02
Ecart-types aux valeurs vraies	Nord	21,09	0,50	0,35	0,47
	Est	18,39	1,17	0,19	0,22
	Vertical	53,49	6,05	0,74	1,03

On notera :

- 1- l'énorme augmentation de la précision quand on utilise des éphémérides précises et les corrections d'horloge des satellites, ceci en raison de l'augmentation considérable de la qualité des données de l'IGS.
- 2- l'augmentation de la précision en altimétrie entre les stratégies B et C par l'effet du passage de la mono-fréquence à la bi-fréquence, pour l'appréciation des effets de l'ionosphère.

La nouvelle fréquence civile à 1 176 45 MHz

J.J. Spilker, A.J. VanDierendonck

Les objectifs, à terme, qui ont amené à la mise en place d'une nouvelle fréquence pour les civils sont les suivants :

- Un accès amélioré de la corrélation du signal reçu avec le signal du récepteur malgré l'effet Fizeau-Doppler.
- Amélioration de la correction de « l'avance-retard » ionosphérique.
- Amélioration de la protection contre les interférences et sur la fiabilité.
- Calcul instantané de l'ambiguïté entière de la phase de la porteuse au niveau du centimètre.
- Amélioration sur les multitrajets.

C'est le mérite des codes PN d'améliorer à la fois :

- 1- la précision de la localisation
- 2- la récupération des données en cas d'interférences, multitrajets
- 3- Les corrections ionosphériques.

On attend des performances meilleures en raison de la longueur du code 10230 périodes et les canaux séparés en quadrature et en polarisation pour les codes, les données, et la porteuse.

Pour les mêmes raisons on attend la suppression des ambiguïtés de 180° entre la porteuse et le signal modulé.

Enfin le signal sera plus facile à émettre et à recevoir dans les boucles de corrélation.

Les avantages que présente l'usage de trois fréquences civiles pour la résolution des ambiguïtés

C. Bonillo-Martinez, M. Tolédo-Lopez, M. Romay-Mérino

Trois scénarios sont étudiés :

- Mesures relatives sur des vecteurs courts.
- Mesures relatives sur des vecteurs longs.
- Mesures avec un seul récepteur.

La méthode de Harris prend avantage de la proximité de deux fréquences pour créer une combinaison linéaire des fréquences à « très large voie » d'une longueur d'onde $f_2 - f_3$ de 5,861 m, et d'avoir trois fréquences pour mieux apprécier la réfraction ionosphérique, on pourra en trouver le principe dans le précédent compte-rendu (ION 1998).

On commence par une solution non-ambiguë mais imprécise à toutes les fréquences.

Différences des phases sur les deux fréquences les plus proches : très large voie, $f_2 - f_3$, soit $L_5 = 5,861$ m

Différences des phases entre les porteuses espacées : large voie, $f_1 - f_2$ et $f_1 - f_3$ respectivement $L_3 = 0,862$ m et $L_4 = 0,751$ m.

Ambiguïté de f_3 .

Les écart-types estimés en erreurs sur l'ambiguïté sont pour les vecteurs courts et pas de multitrajets

Très large voie	$= 0,17 * L_5$
Large voie 1	$= 0,11 * L_3$
Large voie 2	$= 0,006 * L_4$

Les écart-types estimés en erreurs sur l'ambiguïté sont pour les vecteurs courts et de forts multitrajets

Très large voie	$= 1,7 * L_5$
Large voie 1	$= 0,9 * L_3$
Large voie 2	$= 0,49 * L_4$

Les écart-types mesurés en erreurs sur l'ambiguïté sont pour les vecteurs longs et pas de multitrajets

Très large voie	$= 0,83 * L_5$
Large voie 1	$= 2,35 * L_3$
Large voie 2	$= 3,01 * L_4$

Les auteurs envisagent d'autres combinaisons linéaires :

Les écart-types mesurés en erreurs sur l'ambiguïté sont pour les vecteurs courts et pas de multitrajets

Très large voie	$= 3.f_1 - 4.f_3,$	$L = 14,65$ m	$0,07 \times 14,65$ m
Large voie 1	$= 3.f_1 - f_2 - 3.f_3$	$(L < 0 \text{ sic})$	0,07
Large voie 2	$= 4.f_1 - 8.f_2 + 3.f_3,$	$(L < 0)$	0,11

Les écart-types mesurés en erreurs sur l'ambiguïté sont pour les vecteurs courts et avec des multitrajets

Très large voie	= 3.f1-4.f3 0,55
Large voie 1	= 3.f1-f2-3.f3 0,64
Large voie 2	= 4.f1-8.f2 + 3.f3 0,95

Ils proposent d'autres combinaisons pour les longs vecteurs.

Ils concluent que dans des conditions normales, c'est-à-dire sans multitrajets on pourrait résoudre les ambiguïtés entières dans 99 % des cas, en revanche, en présence de multitrajets, la solution est très compromise et on ne peut pas compter résoudre les ambiguïtés entières.

(NdT : Dans ce cas il faudrait absolument y renoncer et se contenter des ambiguïtés quelconques.)

La fin de l'article, bien que très intéressante, n'est pas très convaincante, on a du mal à imaginer travailler avec des longueurs d'ondes négatives.

Un altimètre utilisant la réflexion de GPS au dessus de l'eau

S.J. Katzberg, C.T. Howell

On a noté cette communication pour sa curiosité, mais aussi parce que les topographes peuvent, eux aussi, par mégarde, capter des réflexions spéculaires, c'est-à-dire des reflets de l'onde aussi puissants que le signal direct, sur des obstacles de verre ou métalliques, de façades ou de toits.

Pour mesurer l'altitude de vol d'un avion au-dessus de l'eau les auteurs utilisent un phénomène redouté : un multi-trajet – et un seul – par réflexion des ondes de GPS au-dessus de l'eau.

Bien entendu il ne s'agit pas d'utiliser les réflexions diffuses courantes mais la réflexion spéculaire, en d'autres termes « le reflet dans l'eau de l'émetteur GPS ». Dans l'expérience relatée GPS devait déterminer la trajectoire d'un avion au-dessus de l'eau. Ce sont des expérimentateurs Français qui avaient remarqué qu'un récepteur placé sur un avion pouvait capter le reflet d'un satellite émetteur au lieu de l'onde directe. Les expérimentateurs se posaient la question d'utiliser ce phénomène pour mesurer l'altitude d'un avion.

Ils ont constaté que le signal réfléchi est fort, robuste, facile à détecter, et fiable, il s'est révélé possible d'obtenir des altitudes avec la précision du mètre à très grande hauteur, là où les autres procédés tombent en défaut. Mais on peut, aussi, utiliser cette méthode à toute altitude.

La résolution combinée des ambiguïtés par doubles différences de la phase de GLONASS et de GPS

H. Habrich, G. Beutler, W. Gutner, M. Rothacher

Les constellations GLONASS et GPS représentent à elles deux 41 satellites en service. Les observations faites sur les satellites de GLONASS peuvent être traitées comme le sont celles de GPS compte tenu de plusieurs considérations :

- 1- Les référentiels géodésiques et les bases de temps ne sont pas les mêmes. Ce qui implique de référencer les orbites et les temps dans le même système.
- 2- Chaque satellite de GLONASS émet sur une fréquence spécifique, ce qui fait apparaître, dans les relations entre les observations et les inconnues, un terme supplémentaire dans les doubles différences entre les deux termes de la base et entre les satellites et le satellite de base.

L'importance de ce terme supplémentaire dépend de la différence de longueur d'onde d'émission entre les satellites et le satellite de base, et de la connaissance que nous avons des simples différences entre les ambiguïtés entre les deux stations. La différence des ambiguïtés « a priori » est habituellement déterminée à l'aide d'une localisation indépendante en point isolé faite à l'aide des mesures de code, ce qui représenterait, dans le pire des cas, sur une simple différence des ambiguïtés, une erreur de l'ordre de 200 cycles (NdT environ 40 m). Dans ce cas, pour la différence maximum de longueur d'onde entre deux satellites GLONASS, le terme systématique s'accroîtra de 1,6 cycle, et il ne sera pas possible de résoudre la double différence des ambiguïtés. Ce biais affectera, aussi, la détection des sauts de cycle.

En revanche, la variante itérative proposée, tient compte que l'erreur supposée de 200 cycles sur les simples différences des ambiguïtés provoque un systématisme de 0,07 cycle sur les doubles différences pour le **minimum** de différence entre les longueurs d'onde d'émission des satellites GLONASS, ce qui permet de résoudre les valeurs entières des doubles différences des ambiguïtés. Selon ce schéma, toutes les doubles différences des ambiguïtés entières peuvent être résolues, mais une simple différence reste en définitive non résolue. Comme les erreurs moyennes quadratiques sur les simples différences des ambiguïtés décroissent à chaque itération, il devient possible de déterminer la dernière simple différence des ambiguïtés entières en reprenant le calcul jusqu'à obtention du résultat désiré, si on n'y parvient pas on se contente de lui donner une valeur non-entière.

La variante proposée peut être à la fois proposée pour GLONASS, pour GPS ou pour les observations combinées de GLONASS/GPS, les ambiguïtés entières peuvent être résolues pour de longs ou de courts vecteurs. Pour les longs vecteurs on résout d'abord les ambiguïtés sur une combinaison linéaire des fréquences appelée « large voie », parce que la longueur d'onde résultante est la plus grande possible, les valeurs obtenues sont, ensuite, introduites dans une autre combinaison linéaire des fréquences dite « sans ionosphère » afin de résoudre les ambiguïtés entières en « voie étroite ». Il existe d'autres variantes utilisant les simples différences des observations (NdT : probablement des simples différences entre les satellites et un satellite de base). Dans ce cas un terme de différences d'horloges des récepteurs doit être introduit et estimé pour tenir compte des fréquences spécifiques des satellites.

Dans le cas d'observations combinées entre GLONASS et GPS, si les doubles différences des ambiguïtés des observations GLONASS/GPS sont résolues, les ambiguïtés de GPS peuvent être résolues au niveau des simples différences, ceci n'est pas possible dans le cas d'observations GPS seules. Cependant on se trouvera en présence de systématismes provenant des récepteurs dans les résultats. Une fois les ambiguïtés résolues par simples différences les observations sur la porteuse peuvent être utilisées pour des transferts de temps, puis être utilisées comme des mesures de code.

GALILÉE - Architecture et contraintes du système

R. Lucas, D. Ludwig

Le Conseil Européen des Ministres des Transports a adopté une stratégie concernant le système de navigation global par satellites nommé Galilée. Cette stratégie prévoit la définition complète du système en 2000, puis la première mise en orbite et la validation du système en 2003, enfin que vers 2008 le système sera totalement opérationnel. La partie spatiale comprendra 24 satellites orbitant à environ 24000 km avec une inclinaison de 55° et pour l'Europe trois satellites régionaux géostationnaires supplémentaires. Deux types d'accès sont prévus : un accès libre non sécurisé avec une précision de 10 m, et un accès contrôlé plus précis s'il en est besoin, et sécurisé.

Il est prévu d'émettre sur quatre fréquences, deux fréquences 1 et 2 dans la partie supérieure de la bande L à respectivement 1590 et 1565 MHz, et deux autres fréquences 4 et 5 dans la partie basse de la bande L à, respectivement, 1272 et 1195 MHz. (NdT Ces valeurs doivent probablement être prises avec des réserves car les allocations des fréquences sont loin d'être acquises).

L'emploi des seize stations fixes de suivi est prévu et de trois stations de transmission des données vers les satellites est prévu.

Galilée est définitivement dédié aux usages civils et évoluera en fonction des besoins des utilisateurs civils, il représentera, à terme, un élément important du Réseau de Transport Trans-Européen.

NDLR : Le CD Rom de l'intégralité des communications est consultable à l'AFT (en anglais).

Olivier Reis

Ingénieur géomètre-topographe ENSAI Strasbourg

Diplômé de l'Institut de traducteurs et d'interprètes (ITI) de Strasbourg

9, rue des Champs F-57200 SARREGUEMINES

Téléphone : 03 87 98 57 04 Télécopie : 03 87 98 57 04 E-mail : o.reis@infonie.fr

**Pour toutes vos traductions d'allemand et d'anglais en français en
topographie - géodésie - photogrammétrie - SIG - cartographie - GPS**

Reinhart Stölzel

Ingénieur géomètre-topographe

Interprète diplômé de la Chambre de commerce et d'industrie de Berlin

9, rue de l'Europe - F-67560 ROSHEIM

Téléphone : 00 33 3 88 49 24 14 E-mail : Stoelzel@t-online.de

**Pour toutes vos traductions de français et d'anglais en allemand en
topographie - géodésie - chemin de fer - routes**

Paul Newby

Membre de la Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS)

Diplômé des universités de Cambridge (géographie) et de Londres (photogrammétrie)

9 Merrytree Close, West Wellow, Romsey, Hants SO51 6RB GB

Téléphone : 00 44 1794 322 993 Télécopie : 00 44 1794 324 354 E-mail : xav40@dial.pipex.com

**Pour toutes vos traductions de français en anglais en
topographie - géodésie - GPS - SIG - cartographie - photogrammétrie - télédétection**

Des topographes traducteurs à votre service