

# Combinaison linéaire et l'intérêt de la troisième fréquence pour le positionnement en double différence par GPS

■ Lahouaria TABTI - Kamel HASNI - Chadli Bendjedid KADRI - Sidahmed MJAHEB

*L'utilisation des combinaisons linéaires de phases, permet de créer à partir de trois observations de phase une seule observation. Les combinaisons traditionnelles du GPS bi-fréquences ont été focalisées sur Wide lane (WL), Narrow lane (NL) et la combinaison libre ionosphère, dont chacune d'elle souffre de nombreuses limitations. La précision obtenue par WL est mauvaise à cause de l'amplification de bruit de mesure/trajet multiple, la résolution d'ambiguïté est très difficile avec la combinaison NL. Cette ambiguïté n'est pas un nombre entier en présence de la combinaison libre de ionosphère.*

*Nous proposons à travers cet article l'intérêt des combinaisons linéaires en double différence par GPS, ces combinaisons peuvent être utilisées pour éliminer ou réduire les effets des erreurs affectant les mesures. Nous donnons une procédure qui nous amène à déterminer les meilleures combinaisons linéaires à partir des longueurs d'ondes en utilisant une nouvelle méthode basée sur la matrice de variance-covariance des mesures. Cette étude a montré que l'utilisation de trois fréquences permet d'obtenir plusieurs combinaisons qui ont les mêmes propriétés des combinaisons traditionnelles ou mieux.*

## MOTS-CLÉS

GPS, double différence, combinaison multi-fréquences, matrice de variance-covariance, précision de positionnement.

## Introduction

Le système GPS (Global Positioning System) est aujourd'hui l'outil le plus utilisé pour les applications de localisation et de positionnement, ce système génère de nombreuses applications de positionnement et de localisation à une précision de quelques mètres près dont le nombre devrait encore augmenter à l'avenir avec la modernisation du GPS.

Les anciens satellites GPS transmettent leurs informations sur deux ondes porteuses L1 et L2, et les utilisateurs civils ont accès à un seul code sur L1. Avec la modernisation du GPS, les nouvelles générations de satellites diffuseront un nouveau signal civil L2C, et transmettront de plus une nouvelle onde porteuse L5. La diffusion de signaux GPS sur cette fréquence permettra de faciliter le développement des applications précises utilisant les mesures de phases (en déterminant plus facilement et de manière plus précise les ambiguïtés entières). [3]

Après la modernisation du GPS, chaque satellite GPS diffusera trois signaux différents L1, L2 et L5 de fréquences  $f_1 = 1575,42$  Mhz  $f_2 = 1227,60$  Mhz et  $f_5 = 1176,45$  Mhz et de longueurs d'ondes  $\lambda_1 = 0.1903$  m,  $\lambda_2 = 0.2440$  m et  $\lambda_5 = 0.2540$  m respectivement; [2]

La précision du positionnement est affectée par plusieurs erreurs, telles que l'erreur temporelle des satellites et récep-

teurs, la position des satellites, les erreurs atmosphériques, l'erreur de bruit de mesure/trajet multiple. Pour s'affranchir de certaines erreurs, la double différence est adaptée, pour ce dernier on peut classer ces erreurs en deux types selon qu'elles sont ou non spatialement corrélées.

Les erreurs spatialement corrélées sont des erreurs qui dépendent de la distance entre les sites d'observation et des conditions atmosphériques ; ces erreurs sont l'orbite du satellite, l'erreur troposphérique et ionosphérique. En double différence, ces erreurs peuvent être éliminées, réduites ou augmentées en relation avec la ligne de base.

Les erreurs non spatialement corrélées sont des erreurs qui dépendent de chaque récepteur et leur environnement et ne peuvent pas être éliminées avec l'utilisation de la double différence ; ces erreurs sont le bruit de mesure et le trajet multiple. [7]

## Équations d'observations et variances de phase en double différence

Les relations ci-après décrivent les équations d'observation simplifiées associées au positionnement en double différence. Elles montrent que les termes dépendant uniquement du récepteur et du satellite sont mathématiquement éliminés. Leurs expressions pour les trois fréquences du système GPS sont données par :

$$\nabla\Delta\phi_{L1} - \frac{1}{\lambda_1}\nabla\Delta\rho + \nabla\Delta N_1 = \frac{1}{\lambda_1}(\nabla\Delta d\rho + \nabla\Delta T) - \frac{1}{\lambda_1}\nabla\Delta I_1 + \nabla\Delta\epsilon_1 \quad (1)$$

$$\nabla\Delta\phi_{L2} - \frac{1}{\lambda_2}\nabla\Delta\rho + \nabla\Delta N_2 = \frac{1}{\lambda_2}(\nabla\Delta d\rho + \nabla\Delta T) - \frac{\lambda_2}{\lambda_1^2}\nabla\Delta I_1 + \nabla\Delta\epsilon_2 \quad (2)$$

$$\nabla\Delta\phi_{L5} - \frac{1}{\lambda_5}\nabla\Delta\rho + \nabla\Delta N_5 = \frac{1}{\lambda_5}(\nabla\Delta d\rho + \nabla\Delta T) - \frac{\lambda_5}{\lambda_1^2}\nabla\Delta I_1 + \nabla\Delta\epsilon_5 \quad (3)$$

Telles que  $\phi_{L1}$ ,  $\phi_{L2}$  et  $\phi_{L5}$  représentent les phases observées respectivement sur les fréquences  $L1$ ,  $L2$  et  $L5$  en cycle, et les longueurs d'ondes associées  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  et  $\lambda_5$ ,  $\rho$  représente la distance géométrique (m) ;  $d\rho$  erreur d'orbite (m) ;  $T$  retard troposphérique (m) ;  $I$  retard ionosphérique (m) ;  $\epsilon$  bruit de mesure/trajet multiple (m),  $N$  ambiguïté entière.

La matrice de variance-covariance associée aux trois mesures est donnée par :

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{L1}^2 & \sigma_{L1L2}^2 & \sigma_{L1L5}^2 \\ \sigma_{L2L1}^2 & \sigma_{L2}^2 & \sigma_{L2L5}^2 \\ \sigma_{L5L1}^2 & \sigma_{L5L2}^2 & \sigma_{L5}^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Tel que les éléments de diagonal sont donnés par :

$$\begin{aligned} \sigma_{L1}^2 &= \frac{1}{\lambda_1^2}(\sigma_{\nabla\Delta T + \nabla\Delta d\rho}^2) + \frac{1}{\lambda_1^2}\nabla\Delta\sigma_{\nabla\Delta I}^2 + \sigma_{\nabla\Delta\epsilon_1}^2 \\ \sigma_{L2}^2 &= \frac{1}{\lambda_2^2}(\sigma_{\nabla\Delta T + \nabla\Delta d\rho}^2) + \frac{\lambda_2^2}{\lambda_1^4}\nabla\Delta\sigma_{\nabla\Delta I}^2 + \sigma_{\epsilon_2}^2 \\ \sigma_{L5}^2 &= \frac{1}{\lambda_5^2}(\sigma_{\nabla\Delta T + \nabla\Delta d\rho}^2) + \frac{\lambda_5^2}{\lambda_1^4}\nabla\Delta\sigma_{\nabla\Delta I}^2 + \sigma_{\nabla\Delta\epsilon_5}^2 \end{aligned}$$

Et les autres éléments sont donnés par :

$$\begin{aligned} \sigma_{L1L2}^2 &= \sigma_{L2L1}^2 = \frac{1}{\lambda_1\lambda_2}(\sigma_{\nabla\Delta T + \nabla\Delta d\rho}^2) + \frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1^4}\sigma_{\nabla\Delta I}^2 \\ \sigma_{L1L5}^2 &= \sigma_{L5L1}^2 = \frac{1}{\lambda_1\lambda_5}(\sigma_{\nabla\Delta T + \nabla\Delta d\rho}^2) + \frac{\lambda_1\lambda_5}{\lambda_1^4}\sigma_{\nabla\Delta I}^2 \\ \sigma_{L2L5}^2 &= \sigma_{L5L2}^2 = \frac{1}{\lambda_2\lambda_5}(\sigma_{\nabla\Delta T + \nabla\Delta d\rho}^2) + \frac{\lambda_2\lambda_5}{\lambda_1^4}\sigma_{\nabla\Delta I}^2 \end{aligned}$$

Le privilège d'avoir plusieurs fréquences est que les diverses erreurs réagissent d'une manière différente. Par exemple, la troposphère affecte toutes les fréquences au même degré tandis que l'ionosphère les affecte différemment. Ces propriétés d'erreurs entre les différentes mesures sont minimisées en utilisant les combinaisons linéaires, pour réduire les erreurs de mesures globales.

## Intérêt des combinaisons linéaires de fréquences

La combinaison linéaire se forme par l'addition ou la soustraction de mesures sur deux ou trois fréquences [figure 1], elle permet de :

- Créer une seule observation ; ou on rassemble toutes les trois observations de phase en une seule observation.
- Eliminer ou réduire les effets des erreurs dans l'équation de la combinaison linéaire de la double différence [6].
- Réduire la corrélation entre les observations dans le modèle mathématique.
- Réduire le nombre des inconnus ; notamment dans la recherche des ambiguïtés entières.
- Créer des fréquences dont les longueurs d'ondes sont relativement grandes et qui sont utiles pour la résolution des ambiguïtés.
- Créer des fréquences dont les longueurs d'ondes sont courtes et qui sont nécessaires pour avoir une haute précision.

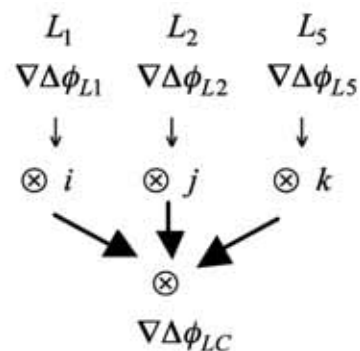


Figure 1 : Combinaison linéaire de phases.

Soient  $i$ ,  $j$  et  $k$  trois entiers relatifs, la combinaison linéaire est donnée par :

$$\nabla\Delta\phi_{LC} = [i \quad j \quad k] \begin{bmatrix} \nabla\Delta\phi_{L1} \\ \nabla\Delta\phi_{L2} \\ \nabla\Delta\phi_{L5} \end{bmatrix} \quad (i, j, k) \in \mathbb{Z}^3 \quad (5)$$

A partir des équations d'observations (1), (2), (3) et (5) ; la combinaison linéaire de la double différence est donnée par :

$$\begin{aligned} \nabla\Delta\phi_{LC} - \frac{1}{\lambda_{LC}}\nabla\Delta\rho + N_{LC} &= \frac{1}{\lambda_{LC}}(\nabla\Delta d\rho + \nabla\Delta T) \\ &- \left( i \frac{1}{\lambda_1} + j \frac{\lambda_2}{\lambda_1^2} + k \frac{\lambda_5}{\lambda_1^2} \right) \nabla\Delta I_1 \\ &+ (i\epsilon_1 + j\epsilon_2 + k\epsilon_5) \end{aligned} \quad (6)$$

Tel que  $N_{LC}$  représente la combinaison linéaire des ambiguïtés et elle est formulée comme suit :  $N_{LC} = i \times N_1 + j \times N_2 + k \times N_5$ , et représente la longueur d'onde de la combinaison et elle est donnée par :

$$\lambda_{LC} = \left( \frac{i}{\lambda_1} + \frac{j}{\lambda_2} + \frac{k}{\lambda_5} \right)^{-1} \quad \text{Tel que } \frac{i}{\lambda_1} + \frac{j}{\lambda_2} + \frac{k}{\lambda_5} \neq 0$$

## Détermination des combinaisons optimales

L'utilisation de multiples fréquences aura l'avantage d'améliorer la fiabilité et la consistance du système, car il devient possible d'avoir plusieurs combinaisons qui peuvent à la fois avoir une grande longueur d'onde et réduire l'effet des erreurs atmosphériques et de bruit mesure/trajet multiple [1].

Supposons que  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  et  $\varepsilon_5$  sont indépendants et ont la même variance  $\varepsilon$ , d'après les lois de la propagation des erreurs et la matrice de variance-covariance, la variance de la combinaison est donnée par :

$$\nabla\Delta\sigma_{LC}^2 = [i \ j \ k] \Sigma [i \ j \ k]^T \quad (7)$$

On remplace  $\Sigma$  par leur expression, la variance de la combinaison en cycle<sup>2</sup> est donnée par :

$$\nabla\Delta\sigma_{LC}^2 = [\nabla\Delta\sigma_{T+dp}^2 \ \nabla\Delta\sigma_{f_1}^2 \ \nabla\Delta\sigma_f^2] \begin{bmatrix} \frac{1}{\lambda_{LC}^2} \\ \frac{1}{\lambda_1^2} \left( i + j \frac{\lambda_2}{\lambda_1} + k \frac{\lambda_5}{\lambda_1} \right) \\ (i^2 + j^2 + k^2) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Et en mètre<sup>2</sup> elle est donnée par :

$$\nabla\Delta\sigma_{LC}^2 = [\nabla\Delta\sigma_{T+dp}^2 \ \nabla\Delta\sigma_{f_1}^2 \ \nabla\Delta\sigma_f^2] \begin{bmatrix} \frac{1}{\lambda_{LC}^2} \left( i + j \frac{\lambda_1}{\lambda_2} + k \frac{\lambda_1}{\lambda_5} \right) \\ \frac{1}{\lambda_{LC}^2} (i^2 + j^2 + k^2) \end{bmatrix} \quad (9)$$

On remarque que  $\nabla\Delta\sigma_{LC}^2$  dépend des observations  $[\sigma_{T+dp}^2 \ \sigma_{f_1}^2 \ \sigma_f^2]$  et le choix des entiers relatifs  $i, j$  et  $k$ . De ce fait, il est possible de trouver un groupe de valeurs  $(i, j, k)$  qui permet de minimiser cette variance en cycle<sup>2</sup> ou en mètre<sup>2</sup>, et par conséquent améliorer la précision de positionnement [8]. On appelle ce groupe de valeur combinaison optimale ; c'est celle qui permet de minimiser l'erreur totale de la variance en mètre<sup>2</sup> ; alors qu'elle peut conserver cette erreur en cycle<sup>2</sup> au moins inférieure ou égal à L1. [4]

Trois types de combinaisons sont possibles :

- Des combinaisons qui permettent de réduire l'erreur de l'ionosphère ou la troposphère/orbite.
- Des combinaisons qui permettent d'éliminer l'effet de l'ionosphère ou de la troposphère.
- Des combinaisons qui permettent de réduire l'effet de bruit de mesure/trajet multiple.

### ■ Variance des erreurs géométriques

La variance des erreurs géométriques (erreur troposphérique/orbital) est donnée par :

$$\nabla\Delta\sigma_{LC}^2(dp + T) = \left( \frac{i}{\lambda_1} + \frac{j}{\lambda_2} + \frac{k}{\lambda_5} \right)^2 \nabla\Delta\sigma_{dp+T}^2 \quad (10)$$

Quand  $\frac{i}{\lambda_1} + \frac{j}{\lambda_2} + \frac{k}{\lambda_5} = 0$  ; alors  $\nabla\Delta\sigma_{LC}^2(dp + T)$  est nul, cette équation représente une équation d'un plan ; elle admet une infinité de solutions, on appelle cette combinaison libre géométrie (Geometry-Free). Elle est caractérisée par une longueur d'onde infinie, donc elle n'a pas physiquement de sens. L'effet des erreurs géométriques en cycle est nul, par contre en mètre cet effet est constant et vaut un.

### ■ Variance de l'erreur ionosphérique

Cette variance est définie par :

$$\nabla\Delta\sigma_{LC}^2(i) = \left( i + j \frac{\lambda_2}{\lambda_1} + k \frac{\lambda_5}{\lambda_1} \right)^2 \nabla\Delta\sigma_{f_1}^2 \quad (11)$$

Lorsque  $(i, j, k)$  vérifie l'équation  $i \times \lambda_1 + j \times \lambda_2 + k \times \lambda_5 = 0$ , la variance ionosphérique est nulle ; donc c'est le minimum en unité de cycle<sup>2</sup>. Cette combinaison de mesures est appelée combinaison indépendante de retard ionosphérique (libre ionosphère).

### ■ Variance de l'erreur de bruit de mesure/trajet multiple

Elle est donnée par :

$$\nabla\Delta\sigma_{LC}^2(\varepsilon) = (i^2 + j^2 + k^2) \nabla\Delta\sigma_f^2 \quad (12)$$

En unité de cycle<sup>2</sup>, quels que soient les coefficients  $i, j$  et  $k$  de  $Z - \{0\}$ , l'équation (12) est toujours supérieure ou égale à 1, de ce fait il n'existe aucune combinaison qui permet de minimiser cette variance. Par contre en unité de mètre<sup>2</sup>, on peut trouver des combinaisons qui permettent de minimiser cette erreur. Les relations entre ces différentes catégories de combinaisons sont présentées géométriquement par les deux figures ci-dessous :

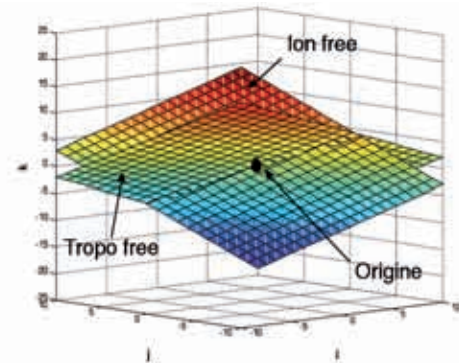


Figure 2. Minimisation de la variance en cycle<sup>2</sup>

En unité de cycle<sup>2</sup> la variance totale des erreurs est minimisée si les coefficients de la combinaison présente un point proche du :

- Plan de l'ionosphère libre qui est défini par l'équation :  $i + \frac{77}{60} \times j + \frac{154}{115} \times k = 0$
- Plan de la troposphère libre qui est défini par l'équation :  $i + \frac{60}{77} \times j + \frac{115}{154} \times k = 0$
- De l'origine (0, 0, 0)

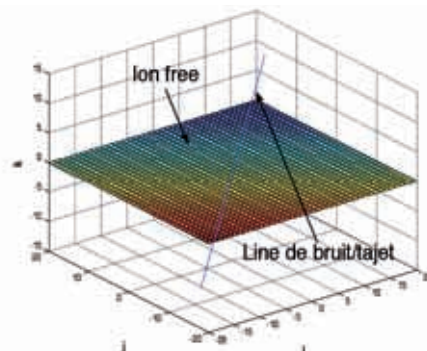


Figure 3. Minimisation de la variance en mètre<sup>2</sup>.

► En unité de mètre<sup>2</sup> la variance totale des erreurs est minimisée si les coefficients de la combinaison présentent un point proche du :

- Plan de l'ionosphère libre qui est défini par :

$$i + \frac{77}{60} \times j + \frac{154}{115} \times k = 0$$

- La ligne de plus grande réduction du bruit de mesure/trajet multiple ( $i = 154 \times t, j = 120 \times t, k = 115 \times t$ ) [6]

## Calcul des coefficients des erreurs

La combinaison linéaire de trois fréquences en double différence dépend des erreurs atmosphériques et de bruit de mesure/trajet multiple. Chacune de ces erreurs est difficile à modéliser et dépend de plusieurs facteurs. Par exemple, la variance de l'erreur ionosphérique dépend de l'activité ionosphérique et de la longueur de la ligne de base, la variance de l'erreur troposphérique dépend de la précision de modèle utilisé et de la distance entre les récepteurs, et la variance de bruit de mesure/trajet multiple dépend du récepteur et de leur environnement. Toutes ces variances dépendent de l'élévation des satellites et de leurs géométries dans l'espace.

La réduction ou l'élimination de ces erreurs dépendent du choix des coefficients  $i, j, k$  et les longueurs d'ondes utilisées dans chaque combinaison [tableaux 1 et 2].

### ■ Effet des erreurs en cycle

Les effets des erreurs en unité de cycle sont importants parce qu'ils sont directement liés à la résolution des ambiguïtés, spécifiquement, si les erreurs en cycle sont réduites alors la résolution des ambiguïtés sera facilitée et réciproquement s'ils sont augmentés, la résolution des ambiguïtés sera difficile.

Le tableau (1) récapitule les valeurs des coefficients entières  $i, j$  et  $k$  utilisant les fréquences L1, L2 et L5.

$i$	$j$	$k$	$\lambda_{LC}$	$\sigma_{T+dp}$	$\sigma_1$	$\sigma_e$
1	0	0	0.1903	27.613	27.613	27.613
1	-1	0	0.8622	1.345	2.215	55.227
1	0	-1	0.7588	1.7366	3.094	55.227
0	1	-1	6.3293	0.025	0.073	55.227
1	-4	3	1.4580	0.470	0.457	717.9
1	-3	2	1.1850	0.712	0.712	386.5

**Tableau 1.** Coefficients de variance des erreurs (géométrique, ionosphérique et bruit de mesure/trajet multiple) en cycle<sup>2</sup>.

Le bénéfice de ces combinaisons étant clair, toutes ces combinaisons sont caractérisées par une grande longueur d'onde, permettant ainsi la réduction des erreurs géométriques et ionosphériques comparativement à L1 (1, 0, 0), simplifiant ainsi la résolution des ambiguïtés particulièrement pour les grandes lignes de base.

On remarque bien que l'ajout de la troisième fréquence L5 engendre une combinaison avec L2 ; (0, 1, -1) qui est déterminée par une grande longueur d'onde 6,3293 m et permet

de mieux réduire les erreurs géométriques et ionosphériques relativement à la combinaison traditionnelle du GPS actuel (1, -1, 0), car ces erreurs sont respectivement multipliées par 0,025 et 0,0730. De ce fait l'addition de la troisième fréquence permet certainement de prolonger la ligne de base.

Les deux dernières combinaisons sont caractérisées aussi par une grande longueur d'onde et la réduction des erreurs géométriques et ionosphériques, néanmoins l'erreur de bruit de mesure/trajet multiple est amplifiée par rapport aux combinaisons précédentes ; l'erreur est multipliée par 717,9 et 386,5 respectivement.

### ■ Effet des erreurs en mètre

On peut obtenir les effets des erreurs en unité de mètre en multipliant les erreurs en cycle par la longueur d'onde, les effets des erreurs par cette unité, sont importants pour le positionnement, car la réduction de ces erreurs en mètre ramène à une meilleure position.

Le tableau (2) résume les valeurs des coefficients entières  $i, j$  et  $k$  utilisant les fréquences L1, L2 et L5.

$i$	$j$	$k$	$\lambda_{LC}$	$\sigma_{T+dp}$	$\sigma_1$	$\sigma_e$
1	0	0	0.1903	1	1	1
1	1	0	0.1070	1	1.646	0.631
1	0	1	0.1088	1	1.781	0.653
0	1	1	0.1245	1	2.933	0.856
1	1	-1	0.1847	1	0.847	2.827

**Tableau 2.** Coefficients de variance des erreurs (géométrique, ionosphérique et bruit de mesure/trajet multiple) en mètre<sup>2</sup>.

L'utilisation de deux fréquences permet de créer la combinaison Narrow Lane qui est déterminée par le facteur (1, 1) et une petite longueur d'onde ( $\lambda_{LC} = 0,107$  m) affaiblissant ainsi l'erreur de bruit de mesure/trajet multiple et amplifiant l'erreur de l'ionosphère. L'utilisation de trois fréquences permet aussi de produire deux autres combinaisons Narrow Lane qui sont définies par les coefficients (1, 0, 1) et (0, 1, 1) et de longueur d'onde respectivement 0,108 m et 0,124 m. L'erreur de bruit de mesure/trajet multiple par ces combinaisons est diminuée, donc ces combinaisons sont plus appropriées pour les courtes lignes de base, à condition que les erreurs atmosphériques soient négligeables, sinon la combinaison (1, 1, 1) est adaptée parce que l'erreur ionosphérique est multipliée par 0.8479.

### ■ Combinaisons libres ionosphères

La combinaison libre ionosphère élimine complètement l'erreur ionosphérique, l'importance de cette combinaison apparaît mieux dans les grandes lignes de base, et quand l'activité solaire est maximale.

L'utilisation de deux fréquences permet d'avoir une seule combinaison IF<sub>12</sub>, qui permet d'éliminer l'erreur ionosphérique et d'augmenter l'erreur due aux bruits de mesure/trajet multiple. Une fois que la troisième fréquence





LC	i	j	k	$\lambda_{LC}$ (m)	$\sigma_e$
IF12	1	$-\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$	0	0.484	1.607
IF13	1	0	$-\frac{\lambda_1}{\lambda_5}$	0.433	1.561
IF23	0	1	$-\frac{\lambda_2}{\lambda_5}$	3.226	1.924

**Tableau 3.** Combinaisons libres ionosphères.

L5 est disponible, on peut avoir trois combinaisons libres ionosphères, et il sera donc plus intéressant d'éliminer l'erreur ionosphérique en combinant L1 et L5 (l'erreur de bruit de mesure/trajet multiple est multipliée par 1,561), au lieu de combiner L1 et L2 (l'erreur de bruit de mesure/trajet multiple est multipliée par 1,607). Cependant pour les grandes lignes de base et pour résoudre les ambiguïtés, on utilise la combinaison L2 et L5 parce qu'elle est caractérisée par une grande longueur d'onde ( $\lambda_{LC} = 3,322$  m), mais l'erreur de bruit de mesure/trajet multiple est amplifiée car il est multiplié par 1,924.

## Conclusion

Le GPS actuel est un système bi-fréquences (L1/L2) n'utilisant un code civil que sur L1. Durant sa phase de modernisation, le GPS sera complété par un second code civil sur L2 et une troisième fréquence L5.

L'apparition de cette fréquence sur les satellites GPS permettra de créer de nouvelles combinaisons entre les fréquences, qui ne sont pas actuellement disponibles, telles que : la combinaison L2 - L5, qui admet une grande longueur d'onde et permet de mieux réduire les effets atmosphériques en cycle, et en mètre, on peut avoir les combinaisons L1 + L5 et L2 + L5 qui ont les mêmes caractéristiques de la combinaison traditionnelle L1 + L2. Ces combinaisons pourront être utilisées pour prolonger la ligne de base et faciliter la résolution des ambiguïtés entières.

L'intérêt d'utiliser les combinaisons linéaires de trois fréquences apparaîtrait bien dans l'élimination ou la réduction de certaines erreurs, pour améliorer la précision et pour faciliter la résolution des ambiguïtés. ●

## Contacts

Division de géodésie spatiale  
Centre des techniques spatiales.

Arzew - Algérie

**Lahouaria TABTI**

thouaria@yahoo.fr

**Kamel HASNI**

Hasni\_kamel@maktoob.com

**Chadli Bendjedid KADRI**

K\_chadli@yahoo.fr

**Sidahmed MJAHED**

## Bibliographie

- [1] **S.Han, C.Rizos [1999]** "The Impact of Two Additional Civilian GPS Frequencies on Ambiguity Resolution Strategies". School of Geomatic Engineering - University of New South Wales Sydney, NSW 2052, Australia.
- [2] **D. Odijk [2002]** *Fast precise GPS positioning in the presence of ionospheric delays, Mathematical Geodesy and Positioning*, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology
- [3] **S. Phalke [2006]** *GPS and Galileo Performance Evaluations for Multiple Reference Station Network Positioning*. Ph.D. Thesis Geomatics Engineering, the University OF Calgary.
- [4] **R. Radovanovic, N. El-Sheimy[2002]** *Using Optimal GNSS Multi-Frequency Carrier Phase Combinations for Precise Kinematic Positioning*. Department of Geomatics Engineering, University of Calgary.
- [5] **T. Richert, R. Radovanovic, Naser El-Sheimy [2002]** *Application of Optimal GNSS Multi-FrequencyCarrier Phase Combinations to Kinematic Positioning*. Mobile Multi-Sensor Research Group Geomatics Engineering Department University of Calgary Calgary, Canada
- [6] **T. Richert [2005]** *The Impact of Future Global Navigation Satellite Systems on Precise Carrier Phase Positioning*. Ph.D. Thesis Geomatics Engineering, the University OF Calgary
- [7] **Thi Hong Diep Dao[2005]** *Performance Evaluation of Multiple Reference Station GPS RTK for a Medium Scale Network*. UCGE Report 20214, Geomatics Engineering. The University of Calgary.
- [8] **WU Yue PAN Yong FAN Yimin WANG Xiaojun [2007]** *Positioning Precision Analysis of GNSS Multi-frequency Carrier Phase Combinations*. Geo - spatial Information Science 10(4):245-249.

## ABSTRACT

**Keywords:** GPS, double difference, multi-frequency combination; variance-covariance matrix; positioning accuracy.

The use of phase linear combinations allows to create a single observation from three phase observations. Classical dual-frequency GPS combinations have produced solutions known as Wide Lane (WL), Narrow Lane (NL) and ionosphere-free.

However, limitations are attached to each of them. In the case of WL, positioning accuracy is bad due to measurement noise amplification / multipath.

For NL, ambiguity resolution is a very difficult task and the ionosphere-free combination produces non integer values for the ambiguity.

In this article, we show the interest of GPS double difference linear combinations which can be used to eliminate or reduce the effects of errors affecting measurements. We indicate a procedure giving the best linear combinations from wavelengths by using a new method based on the measurement variance-covariance matrix.

This study has showed that the use of three frequencies leads to several linear combinations with properties at least equivalent to those of classical combinations.