

Etude de la qualité géométrique des images radar "flash" et de son amélioration dans un contexte aéroporté.

Lionel TEISSIER¹, Georges STAMON¹, Gilles GRENIER², Nicole CAMBOU²

1 : Laboratoire des SIP, Université Paris V,
UFR Mathématiques et Informatique
45 rue des Saints-Pères - 75006 PARIS - FRANCE
e-mail : teissier@math-info.univ-paris5.fr

2 : AEROSPATIALE, Service de traitement d'images
1, rue PABLO-PICASSO, 78470 MAGNY-LES-HAMEAUX
FRANCE

RÉSUMÉ

Le radar flash est un radar imageur aéroporté à visée latérale qui exploite un mode de synthèse d'ouverture spécifique. Ce mode, appelé flash, permet d'optimiser l'utilisation du signal radar et de réduire les temps de traitements. Pour la majorité des applications qui font appel à un capteur radar, il est nécessaire de disposer d'images corrigées des déformations liées aux écarts de trajectoire et aux effets du relief, c'est à dire des ortho-images. Cet article présente deux méthodes de réduction de ces déformations adaptées au radar flash et une étude comparative de la qualité obtenue sur des données réelles et simulées. L'erreur moyenne quadratique résiduelle atteinte est de l'ordre de 10 mètres, ce qui correspond à la précision des données cartographiques utilisées.

ABSTRACT

The "flash" radar is a side looking airborne radar used with a specific synthetic aperture treatment named "flash". The flash radar allow to optimize the use of the radar signal and to reduce the processing time. Most practical use of radar images need ortho-images, i.e. images that have been corrected from geometric distortions induced by relief and trajectory errors. We present two methods to reduce these distortions and a comparative study of geometric quality using real and simulated data. The residual error is about 10 meters, that is the accuracy of our cartographic data.

1. INTRODUCTION

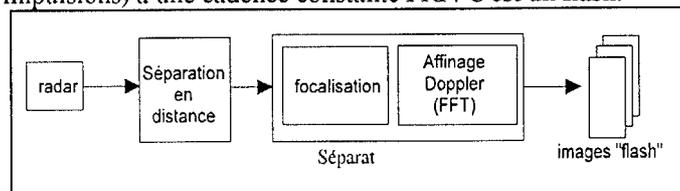
La formation d'images radar passe par des traitements complexes basés sur de nombreux paramètres mesurés et donc affectés d'erreurs. Il s'ensuit une qualité géométrique et radiométrique imparfaite qui limite l'utilisation de ces images dans des applications de mesure ou de fusion multi-capteurs, à des fins cartographiques par exemple¹.

Nous présentons dans cet article nos travaux sur l'étude de la qualité géométrique de l'ortho-image radar en fonction de la qualité des données et de l'amélioration de celle-ci par des méthodes de correction basées sur cette étude. Nous travaillons dans le contexte bien particulier d'un radar "flash" dans le domaine aéroporté. Ce radar présente des caractéristiques géométriques plus complexes qu'un RSO (radar à synthèse d'ouverture) classique, mais il permet d'utiliser au mieux le signal émis et de former très rapidement l'image.

La première partie de cette article présente le radar flash et les équations caractérisant la géométrie de ce radar. La seconde partie présentera les principales sources d'erreurs et les conséquences sur l'ortho-image. Enfin, dans la troisième partie, nous présenterons deux méthodes de réduction des déformations de l'ortho-image. Ces méthodes seront testées sur des données réelles et simulées afin de mettre en évidence les différences de comportement.

2. LE RADAR FLASH

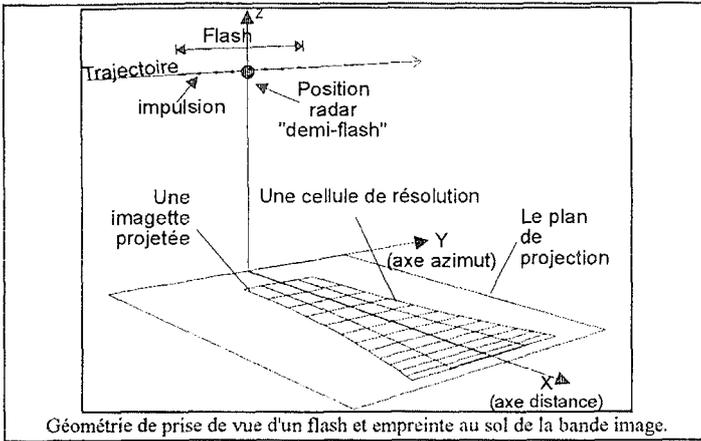
Le radar flash est un radar à synthèse d'ouverture qui réalise l'acquisition d'une image du terrain bande par bande (figure 1), chaque bande étant elle-même une imagerie. Pour chaque bande, le radar émet une courte série d'impulsions (N_p impulsions) à une cadence constante PRF. C'est un flash.



Formation des bandes images

L'ensemble des signaux reçus est séparé en distance selon le retard de l'écho, fonction du trajet radar-cible, et en azimuth selon la fréquence Doppler, fonction de la vitesse relative radar-cible.

La séparation en distance étant réalisée selon les distances radiales, la résolution au sol est donc dépendante de la position. La séparation en azimuth (séparation fréquentielle, c'est la technique de l'affinage Doppler) est réalisée par transformée de Fourier des échos reçus pour une distance donnée. On obtient ainsi simultanément plusieurs colonnes de la bande analysée. Le nombre d'échantillons étant fixe, la résolution fréquentielle est elle aussi constante (N_p/PRF), ce qui implique une résolution au sol variable.



Les principales différences par rapport à un radar classique (glissant) sont donc les suivantes : La résolution azimutale est variable, et le terrain est balayé bande par bande, plutôt que ligne par ligne.

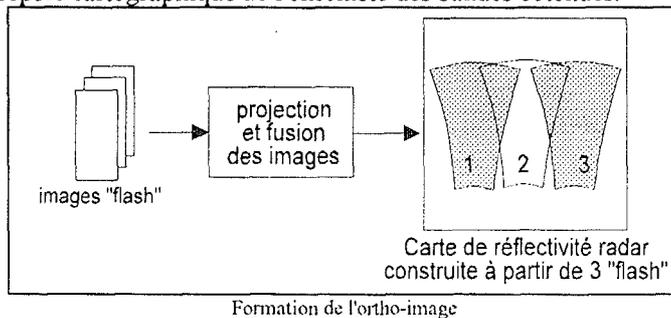
Chaque bande obtenue à la sortie du traitement de synthèse d'ouverture est donc une image associée à un repère fréquence-distance (fréquence Doppler pour l'azimut et distance radiale pour l'autre axe).

Les équations permettant de passer de la position d'une cible au sol à une position (f,d) dans la bande sont les suivantes :

$$\begin{cases} f = \frac{N_p}{PRF} \left(\frac{2}{\lambda R_0} \vec{R}_0 \cdot \vec{V}_0 - F_c \right) \\ d = \frac{\delta\tau}{c} \left(\frac{c\tau}{2} - D^0 \right) \end{cases}$$

Avec R_0 le vecteur radar-cible, V_0 la vitesse du porteur, F_c la fréquence Doppler centrale qui conditionne la direction visée, c la vitesse de l'impulsion, τ le retard de l'écho, D^0 la première ligne distance analysée, $\delta\tau$ la résolution temporelle de la bande.

L'ortho-image est formée par projection et fusion dans un repère cartographique de l'ensemble des bandes obtenues.



3. SOURCES D'ERREURS

On distingue trois sources d'erreurs :

- Les erreurs dues au relief [3],
- Les imprécisions sur les paramètres radar (bases de temps, fréquences,...),
- Les erreurs trajectographiques (position, vitesse).

Les erreurs dues au relief sont essentiellement un problème de données. L'effet d'une erreur sur l'altitude d'un point est du même type que l'effet produit par une erreur sur l'altitude du radar.

Les erreurs sur les paramètres radar sont dues essentiellement à des incertitudes de mesure et à des dérives dans le temps des caractéristiques de certains composants. Dans le contexte

aéroporté dans lequel nous travaillons, l'étalonnage du système permet de corriger ces erreurs.

Les erreurs trajectographiques proviennent :

- Des erreurs d'initialisation de la Centrale Inertielle (CI) (position, altitude zéro, cap).
- De la dérive temporelle des mesures: La CI procède par intégration d'accélération après mesure d'attitude par des gyroscopes. Ces deux mesures sont entachées d'erreurs, et la référence donnée par les gyroscopes dérive dans le temps. On considérera donc que l'erreur qui affecte les mesures de position et de vitesse possède une composante basse fréquence (par rapport à la durée d'acquisition d'une image) et une composante haute fréquence.

L'influence de ces différentes sources d'erreurs a été étudiée dans [4] et [6]. Il est apparu que seules les paramètres trajectographiques (position et vitesse) et le paramètre du traitement en distance conduisent à des erreurs supérieures à la taille du pixel.

4. REDUCTION DES ERREURS

Il y a deux types d'approches à la réduction des déformations d'une image : Les méthodes "paramétriques", et les méthodes "interpolatrices". Les premières utilisent la connaissance des mécanismes qui sont à la base des déformations. Il s'agit principalement, dans le contexte considéré ici, des biais sur les paramètres de la chaîne de formation de l'image, et en particulier des paramètres identifiés comme étant les plus sensibles. Ces méthodes travaillent donc dans l'espace des paramètres, à partir d'une mesure d'erreur réalisée dans l'espace image. Les méthodes interpolatrices sont basées sur l'hypothèse que les déformations induites par les sources d'erreurs présentées précédemment peuvent être modélisées par une fonction polynomiale dans l'espace image. Cette méthode ne prend pas directement en compte le processus de formation de l'image. La première catégorie de méthode est donc théoriquement préférable, mais elle nécessite un développement spécifique à chaque capteur. La seconde catégorie est beaucoup plus générale, et plus simple.

4.1. Méthode paramétrique

L'hypothèse de base est que l'ortho-image serait correctement formée par l'utilisation des équations de localisation du radar flash, si les paramètres des équations de localisation n'étaient pas entachés d'erreurs. Il est donc possible de réduire les déformations de l'image en ajustant la valeur de ces paramètres. Deux types d'informations permettent de faciliter cette recherche : la mesure des déformations de l'image, par comparaisons sur des éléments bien identifiés de la position obtenue par rapport à la position cartographique, et une estimation du type des erreurs sur les paramètres, de l'amplitude maximale, et de la sensibilité de l'image aux erreurs sur ces paramètres.

Nous avons fait les hypothèses suivantes :

- L'altitude de chaque point est connue avec une précision suffisante. Si ce n'est pas le cas, chaque point est considéré comme entaché d'une erreur de position aléatoire gaussienne.
- Les informations d'erreurs de positions, procurées par les points d'appuis et la carte, sont entachées d'une erreur gaussienne dépendant de la résolution de l'image, de la qualité radiométrique de l'image, et de la qualité de la carte.



- La position $P'(t)$ mesurée par la C.I. est affectée par un biais constant ΔP . Ce biais est la somme des erreurs d'initialisation de la C.I. et de la dérive jusqu'au début de l'acquisition.
- La vitesse mesurée $V'(t)$ est entachée d'une erreur $\Delta V(t)$ qui peut être approchée par une fonction polynomiale du temps. Par suite du faible nombre de points d'appuis identifiables sur les images, nous limitons le degré du polynôme à l'unité : $\Delta V(t) = \Delta V_0 + \Delta V_1 t$. Le temps t est nul au niveau du premier flash.

Les vraies valeurs des paramètres trajectographiques mesurés, à un instant t de l'acquisition, sont alors données par :

$$P(t) = P'(t) + \Delta P + \int_0^t \Delta V(t) dt$$

$$V(t) = V'(t) + \Delta V(t)$$

Il y a donc 11 paramètres (9 pour la trajectoire, 2 pour les paramètres distance) à ajuster pour réduire les déformations de l'ortho-image. Pour cela nous utilisons une méthode d'ajustement de modèle non linéaire basée sur une minimisation itérative de l'erreur mesurée par :

$$\chi_{\Theta}^2 = \sum_{f=1}^{f=NF} \sum_{i=1}^{N_f} \left(\frac{MCP_{if} - Loc(FICP_{if}, h_{if}, \Theta(t_f))}{\sigma_{if}} \right)^2$$

Avec NF le nombre de flashes (10 à 20), Θ le vecteur paramètre, t_f l'instant d'acquisition associé au flash f , MCP les points de contrôle (associés à la carte), Loc la fonction de localisation, $FICP$ les points liés à l'image radar. Ceux-ci sont positionnés dans les bandes avant projection au sol (repères fréquence-distance). Ce dernier point permet d'éviter que les erreurs de recouvrement et de juxtaposition des bandes réduise la qualité des points d'appuis. De plus, un élément visible dans deux bandes (il y a recouvrement partiel entre bandes) permet de définir deux relations image-carte. Enfin h , l'altitude des points est obtenu par un MNT à partir de la position du point de contrôle correspondant.

4.2. Méthode Interpolatrice

On considère que les déformations de l'ortho-image sont le fait d'une transformation biunivoque permettant de passer de la carte à l'ortho-image déformée. Cette transformation est modélisée par un polynôme de faible degré à deux variables (la position du point). Les coefficients de ce polynôme sont choisis par la méthode classique des moindres carrés. L'objectif de cette méthode n'est pas de donner les meilleurs résultats possibles, mais de permettre d'évaluer les résultats de la méthode paramétrique, beaucoup plus complexe.

5. RESULTATS

Les deux méthodes présentées ci-dessus ont été testées dans le contexte de la station RAMSES de l'ONERA (altitude 3000 m). La résolution de l'image est de 3 à 10 mètres, pour une empreinte de l'ordre de 2,5 km x 2,5 km (10 bandes). Trois types de données ont été utilisées afin de différencier l'influence des erreurs trajectographiques, des erreurs de pointés, et du type de méthode : des points d'appuis simulés, des images simulées, et des images réelles.

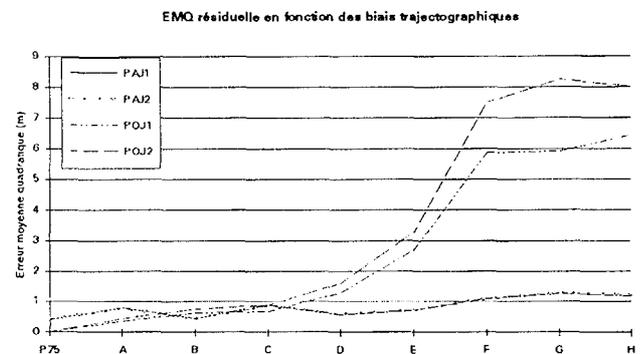
5.1. Points simulés

Deux groupes de 30 points sont positionnés aléatoirement sur l'image et sur la carte en tenant compte des déformations théoriques induites au niveau de l'ortho-image par les biais trajectographiques donnés dans le tableau ci-dessous. Le bon

fonctionnement des méthodes, et les différences de comportement entre méthode interpolatrice et méthodes paramétriques ont pu être vérifiés.

Identification	Position	Vitesse
A	75, 75, 25	0,25, 0,0, 0,0
B	75, 75, 25	0, 0,25, 0,0
C	75, 75, 25	0,25, 0,25, 0,0
D	150, 150, 50	0,25, 0,5, 0,0
E	300, 300, 100	0,5, 1,0, 0,1
F	600, 600, 200	1,0, 2,0, 0,25
G	600, 600, 200	2, 2, 0,5
H	600, 600, 200	2 + 0,01 t, 2 + 0,01 t, 0,5

Le premier groupe de points (J1) est utilisé pour réduire l'erreur. Le second (J2) ne sert que comme témoin pour juger du caractère local ou global de la correction. L'erreur quadratique résiduelle est donnée dans la figure ci-dessous en fonction du groupe de point et de la méthode (PA : paramétrique, PO : polynomiale (méthode interpolatrice)) :



Erreur résiduelle en fonction de la méthode et du groupe de points.

La méthode paramétrique donne une erreur inférieure au mètre quelque soit l'écart trajectographique. De plus, l'erreur est la même pour les deux groupes de points, ce qui signifie que la correction est valable pour toute la surface de l'image. Ce dernier point n'est pas vérifié par la méthode polynomiale, mais on peut remarquer que pour les erreurs les plus courantes (cas A à D) la correction est encore suffisante pour la plupart des applications.

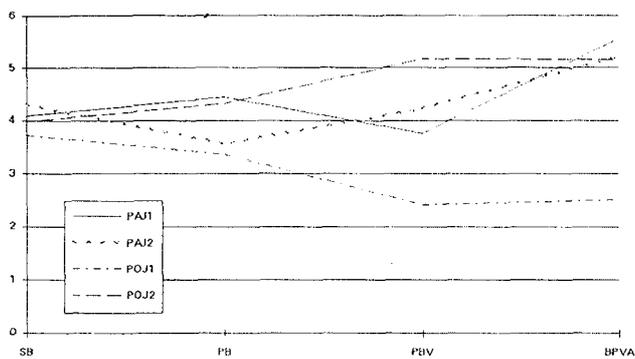
5.2. Images simulées

Des images sont synthétisées avec des déformations caractéristiques du radar flash, générées avec le simulateur GEOSIM [5] développé pour cette étude. Il est ainsi possible de tester toute la chaîne de formation de l'ortho-image et de correction et de faire fonctionner les méthodes d'améliorations sur des pointés limités en précision.

Les écarts sur la trajectoire utilisés sont les suivants (SB : sans biais, BP : Biais position, BPV : Biais position et vitesse, BPVA : BPV + accélération) :

Biais Référence	Position (m)	Vitesse (m.s ⁻¹)	Accélération (m.s ⁻²)
SB	0 0 0	0 0 0	0 0 0
BP	250 250 200	0 0 0	0 0 0
BPV	250 250 200	1 1 0,5	0 0 0
BPVA	250 250 200	1 1 0,5	0,02 0,02 0

Deux groupes de 20 points ont été placés sur les quatre images ainsi obtenues. L'erreur quadratique résiduelle est donnée dans la figure ci-dessous. L'utilisation des deux groupes de points et les notations sont les mêmes que précédemment.



Erreur résiduelle en fonction de la méthode et de l'écart de trajectoire.

En l'absence de biais, l'erreur résiduelle mesurée est légèrement inférieure à la taille moyenne des pixels de l'image synthétisée (5 mètres). En présence de biais trajectographiques, la méthode paramétrique permet d'obtenir une erreur résiduelle comparable à la taille du pixel, et ceci sur l'ensemble de l'image (PAJ1 et PAJ2 comparables), ce qui laisse supposer que les déformations sont correctement gérées. Par contre, la méthode interpolatrice réduit essentiellement l'erreur au niveau des points d'appuis (POJ1), mais la correction n'est pas valable pour l'ensemble de l'image (POJ2).

5.3. Image réelle

L'image présentée ici (figure ci-dessous) correspond à la zone des Andelys. Elle est constituée de 10 bandes obtenues en bande X qui couvrent environ 2,5 km x 2,5 km. Elle est issue de la station RAMSES de l'ONERA.

La référence cartographique utilisée est la carte IGN au 1/25000^e (précision de 8 mètres), et le MNT est au pas de 40 mètres avec une précision altimétrique de l'ordre de 10 mètres. Contrairement aux essais précédents, un seul groupe de points a pu être saisi, en particulier à cause de la taille réduite des images et le fort speckle caractéristique des images radar une vue.



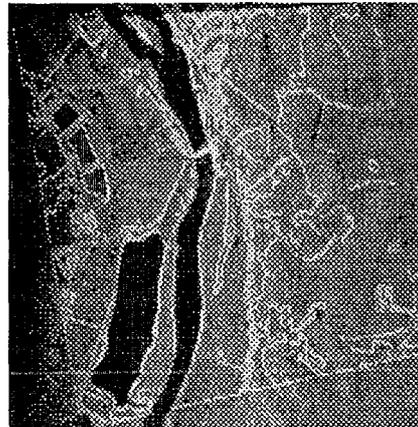
Bandes images de la zone des Andelys.

Les erreurs initiales et résiduelles mesurées sont données dans le tableau ci-dessous (M : écart moyen, E : écart type, X : distance, Y : azimut). Ces mesures incluent les déformations de l'image, mais aussi les erreurs des données cartographiques (carte et MNT) par rapport à la vérité terrain.

Erreur	EMQ	M _x	M _y	E _x	E _y
Initiale	184	173	61.6	20.6	8.4
PA	9.72	-0.22	-0.25	7.88	7.20
PO	8.66	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	6.90	7.00

L'erreur moyenne quadratique (EMQ) est donc comparable pour les deux méthodes (inférieure à 10 mètres) et de l'ordre de

2 fois la résolution moyenne. La méthode interpolatrice (PO) donne une mesure d'erreur légèrement inférieure, mais les essais précédents sur des données simulées ont montré que cela ne correspondait pas à une meilleure qualité de l'image en terme de distorsions. L'image ci-dessous représente l'ortho-image formée à partir de la trajectoire corrigée par la méthode paramétrique. Les lignes claires correspondent aux lignes principales de la carte IGN.



Lignes d'éléments cartographiques superposées à l'ortho-image rectifiée.

6. CONCLUSION

Les essais sur des données simulées ont souligné la nature différente de la correction effectuée par les méthodes paramétriques et interpolatrices, en accord avec la théorie. L'analyse des résultats a montré que les deux types de méthodes permettent d'obtenir des erreurs résiduelles comparables, inférieures à 10 mètres pour des données réelles. Ce résultat est satisfaisant car il est comparable à l'incertitude sur les données cartographiques de référence utilisées. Pour ce type de données, il constitue probablement une limite.

Ce travail a été effectué à l'Université René Descartes, UFR de Mathématiques et d'Informatique, en collaboration avec le service de traitement d'image de l'Aérospatiale, Magny-les-Hameaux, France.

7. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Remote sensing and geographic information system data integration: error sources and research issues; Lunetta, Congalton, Fenstermaker, Jensen, McGwire, Tinney; PERS V 57 Iss 6 June 1991
- [2] Radargrammetric image processing; Leberl; Artech House 1990
- [3] Evaluation of terrain models for the geocoding and terrain correction, of synthetic aperture radar (SAR) images; Wivell, Steinwand, Kelly, Meyer; IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Vol: 30 Iss: 6 p. 1137-44 Date: Nov. 1992
- [4] Motion errors in an airborne synthetic aperture radar system; Bukreuss; European Trans. on Telecom. and Related Technologies Vol: 2 Iss: 6 p. 655-64 Date: Nov.-Dec. 1991
- [5] Flash radar geometric simulator; L. Teissier, G. Stamon, G. Grenier, N. Cambou; Applications of Digital Image Processing XVI; SPIE 1993, San Diego, Cal, USA.
- [6] Etude de la qualité géométrique des images radar flash et de son influence dans des systèmes de vision automatique ; L. Teissier, G. Stamon ; AGI'94, Poitiers - Futuroscope, 2-3 Juin 1994