



ÉLABORATION DE GABARITS FRÉQUENTIELS POUR MOUVEMENTS PERTURBATEURS DU PORTEUR À PARTIR DE CRITÈRES DE QUALITÉ IMAGE SAR

Stéphane MÉRIC*, Gérard CHASSAY* et Denis PERTHUIS**

- * : groupe Diffraction-SER-Détection; Laboratoire Composants et Systèmes pour Télécommunications, URA CNRS 834, Institut National des Sciences Appliquées, 20 avenue des Buttes de Coësmes, 35043 - RENNES CÉDEX
- ** : Filière Espace et Millimétrique, THOMSON CSF Division RCM, La Clef de Saint Pierre, 1 boulevard Jean Moulin, 78852 - ÉLANCOURT CÉDEX

RÉSUMÉ

Les systèmes embarqués d'imagerie radar haute résolution sont essentiellement confrontés aux problèmes de l'influence des mouvements perturbateurs du porteur. Le traitement SAR est ainsi désadapté par des écarts de phase dus à ces mouvements perturbateurs. Nous proposons, à partir de la décomposition des mouvements perturbateurs, une formulation de gabarits d'amplitude, vitesse et accélération en fonction de la fréquence du mouvement perturbateur. Chaque gabarit est lié à un critère de qualité image et représente les caractéristiques maximales du mouvement perturbateur pour respecter la qualité image demandée. Nous obtenons ainsi, pour chaque mouvement perturbateur, un niveau de correction à apporter à ces mouvements perturbateurs.

ABSTRACT

The embedded Synthetic Aperture Radar are very sensitive to the influence of the parasitic motion of the aircraft. The SAR processor is affected by some divergences of the phase evolution due to motion errors. Based on a decomposition of the global disturbing motion of the aircraft, we formulate a limitation of amplitude, speed and acceleration versus the frequency of the disturbing motion. Each limitation is relation to image SAR quality requirements and represents the maximum characteristics to satisfy these requirements. So, we can obtain, for each kind of the aircraft motions, a level of correction of these aircraft motions.

I-INTRODUCTION

La technique d'imagerie SAR ("Synthetic Aperture Radar") utilise l'information de phase des échos de sol pour former une carte radar haute résolution. La loi de phase nécessaire pour effectuer le traitement SAR adapté (établissement de la réplique) est déterminée à partir de la connaissance de la trajectoire et de la vitesse du porteur. Les systèmes d'imagerie radar embarqués utilisant la technique SAR sont donc confrontés, entre autres, au problème des mouvements perturbateurs du porteur et de leur correction. Si la trajectoire du centre de phase de l'antenne radar (référence de calcul) est affectée par un mouvement intempestif du porteur, la loi de phase subit aussi une perturbation et le traitement SAR est désadapté. La modification de la réponse impulsionnelle est alors fonction du type de la perturbation et affecte la qualité image SAR. Chaque type de dégradation de la réponse impulsionnelle du SAR peut être quantifiée par l'intermédiaire des critères de qualité image (flou, résolution, etc....). En se basant sur une méthode de correction des mouvements du porteur, nous établissons une décomposition de chacun de ces mouvements et ainsi nous quantifions l'écart de phase inhérent à chaque mouvement. Nous exprimons donc directement l'influence des différents types de mouvements sur la phase du signal radar. En associant alors à chaque perturbation un critère de qualité image, nous analysons les caractéristiques de cette perturbation (amplitude, vitesse et accélération) en fonction de la fréquence sur la qualité image SAR. En particulier, l'élaboration de gabarits fréquentiels au sens de la qualité image SAR représente l'amplitude maximale (ou vitesse ou accélération) qu'une perturbation est autorisée à avoir sans apporter de corrections aux mouvements du porteur.

II-LOI PERTURBÉE DE LA FRÉQUENCE DOPPLER

La configuration étudiée est celle correspondant à un radar à visée latérale. L'axe radioélectrique de l'antenne est donc orienté perpendiculairement à l'axe de la route idéale du porteur (figure 1).

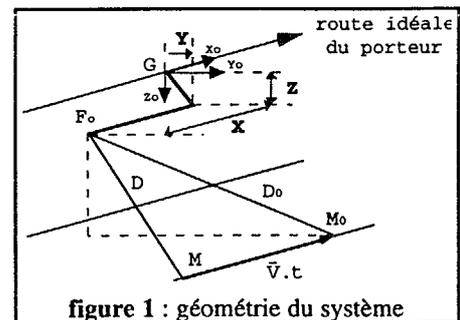


figure 1 : géométrie du système

Le point Mo est le point au sol visé par l'antenne et le point M est le point considéré pour l'obtention de la loi de phase. En nous intéressant à la loi de phase du point M [1] situé dans le lobe de l'antenne, nous écrivons qu'à partir du point Fo, centre de phase idéal de l'antenne, nous avons la phase du point M situé à une distance D du point Fo :

$$\phi(M) = 2.k \cdot \left| \vec{F_0 M} \right| = \frac{4.\pi}{\lambda} \cdot D.$$

Pour un porteur se déplaçant à la vitesse V, la distance D s'écrit au bout du temps t (origine des temps : au travers du porteur) :

$$D = D_0 \cdot \sqrt{1 + \frac{V^2 \cdot t^2}{D_0^2}}.$$

où D0 est la distance entre le point F0 et le point Mo. En utilisant un développement limité à l'ordre 2 (V²t² << D0²), nous obtenons, pour la phase, l'expression suivante :

$$\phi(M) \approx \frac{4.\pi.D_0}{\lambda} + \frac{2.\pi.V^2}{\lambda.D_0} \cdot t^2.$$

Un écart intempestif de position (δd) du centre de phase de l'antenne va se traduire au niveau de la phase par la modification de l'expression précédente :

$$\phi(M) \approx \frac{4.\pi.D_0}{\lambda} + \frac{2.\pi.V^2}{\lambda.D_0} \cdot t^2 + \frac{4.\pi.(δd)}{\lambda} \quad (1).$$



De même, la fréquence Doppler associée au point M va subir l'influence du mouvement et s'écrire :

$$f_d = \frac{2}{\lambda} \cdot \left[\frac{V^2}{D_o} \cdot t \pm \frac{\partial(\delta d)}{\partial t} \right] \quad (2).$$

II - CRITÈRES DE QUALITÉ IMAGE

Nous associons quelques critères de qualité image aux perturbations du porteur. Pour cela, nous distinguons [1] plusieurs classes de perturbations agissant sur la réponse impulsionnelle du traitement SAR :

- * mouvement linéaire basse fréquence (conformité géométrique),
- * mouvement quadratique basse fréquence (résolution géométrique),
- * mouvement haute fréquence (contraste, échos parasites).

II.1 - CONFORMITÉ GÉOMÉTRIQUE

La qualité concernant la conformité géométrique est influencée par un mouvement de perturbation linéaire basse fréquence. Son influence sur la réponse impulsionnelle se traduit par un déplacement en azimut du lobe principal de la réponse impulsionnelle. Le pic du lobe principal se déplace d'une certaine distance en fonction de la grandeur du déplacement due à la perturbation (δd) (voir (1) et (2)). En posant $x=V.t$, nous avons alors :

$$f_d = \frac{2}{\lambda} \cdot \left[\frac{V \cdot x}{D_o} \pm \frac{\partial(\delta d)}{\partial t} \right].$$

Si le mouvement du porteur est idéal alors la fréquence Doppler est bien nulle pour $x=0$ (point considéré au travers du porteur) sinon le décalage en azimut, x_o , s'exprime par :

$$x_o = \pm \frac{D_o}{V} \cdot \frac{\partial(\delta d)}{\partial t} \quad (3).$$

Le critère de qualité image associé à la perturbation linéaire basse fréquence correspond au décalage maximal autorisé, exprimé en nombre de case résolution. Cela se traduit par :

$$x_o \leq k \cdot r_a$$

où r_a est la taille de la cellule de résolution en azimut et k appartient à l'ensemble des réels. À partir de la relation (3), nous obtenons le critère final :

$$\left| \frac{\partial(\delta d)}{\partial t} \right| - k \cdot r_a \cdot \frac{V}{D_o} = 0 \quad (4).$$

II.2 - RÉOLUTION GÉOMÉTRIQUE

La résolution géométrique est touchée par une perturbation quadratique basse fréquence. Sur la réponse impulsionnelle, nous observons un élargissement du lobe principal qui se traduit sur une image SAR par une augmentation de la taille de la cellule de résolution donc une perte du pouvoir discriminatoire. La dégradation de la résolution induite pendant le temps d'ouverture du traitement SAR, T_c , est donnée par une formule empirique [2] :

$$r_{a, \text{dégadée}} \approx r_{a, \text{initiale}} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta\phi}{180} \right)^2}$$

où $\Delta\phi$ est l'écart de phase non compensé, exprimé en degré.

Un écart de phase non compensé se traduit par un écart sur la fréquence Doppler :

$$\Delta f_d = \pm \frac{2}{\lambda} \cdot \frac{\partial(\delta d)}{\partial t} \text{ et } \Delta f_d = \pm \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\partial(\Delta\phi)}{\partial t}.$$

En considérant le mouvement perturbateur (δd) sur une durée de $T_c/2$ (voir paragraphe IV), nous intégrons donc :

$$\Delta\phi = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \int_0^{T_c/2} \pm \frac{\partial(\delta d)}{\partial t} \cdot dt$$

$$\Delta\phi = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot [\pm \delta d]_0^{T_c/2} \quad (5).$$

T_c est le temps d'intégration du traitement SAR et s'exprime par :

$$T_c = \frac{\lambda \cdot D_o}{2 \cdot V \cdot r_a}.$$

Il faut remarquer que le signe affecté à la grandeur (δd) dépend de la géométrie du système et du mouvement considéré. Nous abordons cet aspect des choses lors de la décomposition des mouvements perturbateurs (paragraphe III).

Le critère concernant la perte de résolution est aussi appelé le critère de Rayleigh. Il propose une qualité image paramétrée par une grandeur K qui correspond à la fraction de π autorisée pour une perte maximale de la résolution. Nous limitons donc l'excursion de la phase avec :

$$\Delta\phi \leq \frac{\pi}{K}$$

ce qui donne pour limite du critère par la relation (5) :

$$\frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot [\pm \delta d]_0^{T_c/2} - \frac{\pi}{K} = 0 \quad (6).$$

II.3 - CONTRASTE-ÉCHOS PARASITES

Les problèmes, dus aux mouvements haute fréquence, alors visualisés sur les images SAR se manifeste par l'apparition d'échos parasites et une perte de contraste.

II.3.a - niveau de PSLR

La qualité image est alors liée au niveau du PSLR (Peak SideLobe Ratio) qui mesure le rapport entre le niveau maximal du lobe secondaire le plus énergétique sur le niveau maximal du lobe principal de la réponse impulsionnelle. En écrivant la perturbation sous la forme $\delta d(t) = \Delta D_{\max} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot t)$, il est possible d'exprimer la réponse impulsionnelle du SAR sous forme d'une série de coefficients de Bessel [3]. En posant :

$$z = \frac{4 \cdot \pi \cdot \Delta D_{\max}}{\lambda}$$

le coefficient du PSLR peut alors s'écrire en faisant le rapport des premiers coefficients de Bessel (en admettant que z est petit) :

$$\text{PSLR} = \frac{\left| \frac{z^2}{4} \right|}{\left| 1 - \frac{z^2}{2} \right|} \approx \frac{|z|^2}{2}.$$

Si le niveau de PSLR est donné en dB alors nous avons :

$$\left| \Delta D_{\max} \right| - \frac{\lambda \cdot 10^{\frac{\text{PSLR}}{20}}}{2 \cdot \pi} = 0 \quad (7).$$

II.3.b - niveau d'ISLR

La mesure du niveau d'ISLR (rapport entre l'énergie contenue dans le lobe principal et celle contenue dans les lobes secondaires) est significative de la qualité image SAR pour des mouvements perturbateurs haute fréquence. Haslam [4] nous donne une estimation de la grandeur de l'ISLR avec la relation :

$$\text{ISLR} \approx \int_{1/T_c}^{\infty} G_{\phi}(f) \cdot df$$

où $G_{\phi}(f)$ est la densité spectrale de puissance de l'erreur de phase. Cette densité spectrale de puissance de l'erreur de phase est aussi reliée à celle :

- * du mouvement avec

$$G_{\phi}(f) = \left(\frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \right)^2 \cdot G_D(f),$$

- * de la vitesse avec

$$G_D(f) = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f} \right)^2 \cdot G_V(f),$$

- * de l'accélération avec



$$G_v(f) = \left(\frac{1}{2\pi f} \right)^2 \cdot G_A(f).$$

Nous reviendrons sur l'évaluation de l'ISLR à partir du gabarit fréquentiel.

III - INFLUENCE DES PERTURBATIONS

Une étude géométrique du système radar nous permet de formuler l'écart de phase généré par chaque mouvement perturbateur. Nous présentons deux types de mouvements perturbateurs pour expliciter la décomposition des mouvements du porteur utilisée pour une méthode de correction de phase [3].

III.1 - MOUVEMENT DE HAUTEUR

Sur la figure 2, les développements géométriques permettent d'écrire que :

$$\delta d = \delta H \cdot \sin(\text{site}) + \frac{(\delta H)^2}{2 \cdot D_0} \quad (8).$$

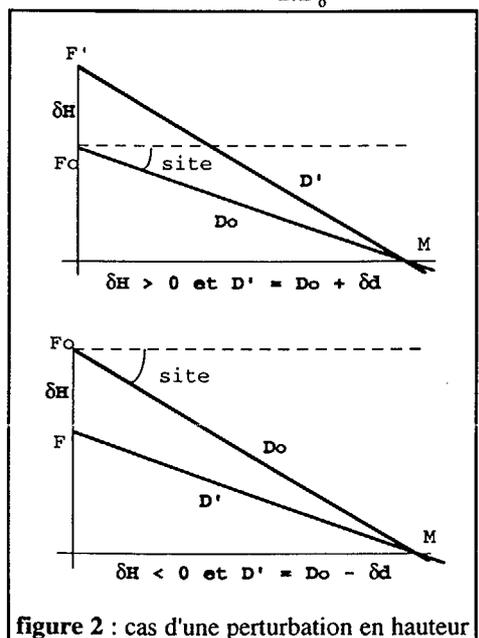


figure 2 : cas d'une perturbation en hauteur

La fonction dérivée découlant de cette équation est alors :

$$\frac{\partial(\delta d)}{\partial t} = \frac{\partial(\delta H)}{\partial t} \cdot \left(\frac{\delta H}{D_0} + \sin(\text{site}) \right) \quad (9).$$

delta H est une fonction du temps et de delta H_max, amplitude maximale du mouvement de perturbation de hauteur.

III.2 - MOUVEMENT DE ROULIS

Le développement géométrique présenté dans [3] et basé sur la figure 3 nous donne :

$$\delta d = A \cdot \cos(\text{site} + \alpha) + \frac{A^2}{2 \cdot D_0} \quad (10).$$

avec

$$\begin{cases} A^2 = 2 \cdot (Y^2 + Z^2) \cdot [1 - \cos(\delta\phi)] \\ \alpha = \arctg \left(\frac{Z \cdot [\cos(\delta\phi) - 1] + Y \cdot \sin(\delta\phi)}{Y \cdot [\cos(\delta\phi) - 1] - Z \cdot \sin(\delta\phi)} \right) \end{cases}$$

Quant à la dérivée, nous avons :

$$\frac{\partial(\delta d)}{\partial t} = \frac{\partial(A)}{\partial t} \cdot \left(\cos(\text{site} + \alpha) + \frac{A}{D_0} \right) + A \cdot \frac{\partial(\cos(\text{site} + \alpha))}{\partial t} \quad (11)$$

avec

$$\begin{cases} \frac{\partial(A)}{\partial t} = \frac{Y^2 + Z^2}{A} \cdot \sin(\delta\phi) \cdot \frac{\partial(\delta\phi)}{\partial t} \\ \frac{\partial(\cos(\text{site} + \alpha))}{\partial t} = \frac{\sin(\text{site} + \alpha)}{A^2} \cdot \Delta_1(\Delta\phi_{\max}, f_c, t) \end{cases}$$

et

$$\Delta_1(\Delta\phi_{\max}, f_c, t) = (Y^2 + Z^2) \cdot (1 - \cos(\delta\phi)) \cdot \frac{\partial(\delta\phi)}{\partial t}$$

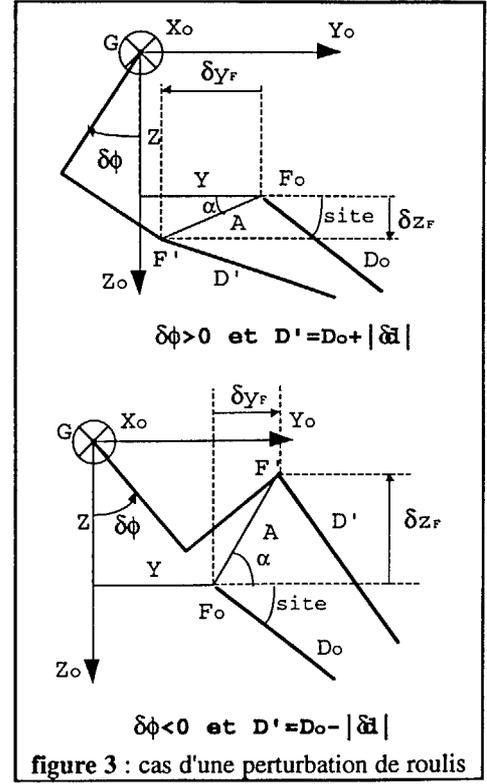


figure 3 : cas d'une perturbation de roulis

Nous rappelons que les grandeurs A et alpha sont des fonctions du temps et de delta phi_max, amplitude maximale du roulis, puisqu'elles sont fonction de delta phi.

Pour les deux mouvements présentés, chacune des grandeurs (delta d) ou (partial(delta d)/partial t) est donc directement intégrée aux équations établies dans le chapitre précédent pour des critères de qualité image.

IV - SIMULATION DES PERTURBATIONS

Afin de pouvoir quantifier définitivement la grandeur (delta d), chaque évolution du paramètre est décrit de manière à présenter les caractéristiques pour le critère de qualité image demandé. Ces caractéristiques sont fonction de la fréquence du mouvement perturbateur :

- * en basse fréquence, le mouvement perturbateur doit se comporter comme un mouvement linéaire (critère de déplacement du pic de corrélation) ou un mouvement quadratique (critère de perte de résolution),
- * en haute fréquence, nous devons avoir un comportement sinusoïdal ou cosinusoidal (critère du niveau du PSNR).

De plus, nous simulons la perturbation pour avoir une fonction impaire et nulle pour t=0. Le mouvement est simulé pendant l'intervalle de temps du traitement SAR (figure 4).

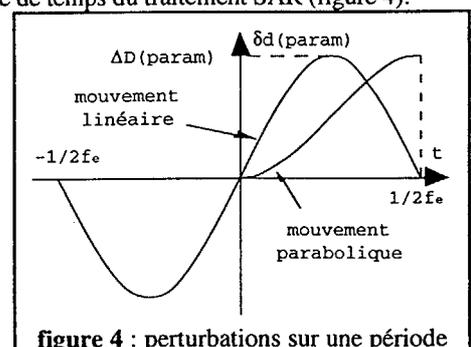


figure 4 : perturbations sur une période

Les mouvements s'expriment donc par les formulations suivantes :

- * delta d(param) = delta D(param) . sin(2 . pi . fc . t) pour le mouvement sinusoïdal,
- * delta d(param) = delta D(param) . (cos(2 . pi . fc . t) - 1) si t < 0



$\delta(\text{param}) = \Delta D(\text{param}) \cdot (1 - \cos(2\pi \cdot f_c \cdot t))$ si $t > 0$
pour le mouvement cosinusoidal.

Pour les mouvements hautes fréquences, nous préférons la formulation : $\delta(\text{param}) = \Delta D(\text{param}) \cdot \cos(2\pi \cdot f_c \cdot t)$.

V - OBTENTION DES GABARITS-RÉSULTATS

Nous avons établi des équations liées à certains paramètres de qualité image (déplacement du pic de corrélation, perte de résolution, niveau de PSLR). Ces équations font intervenir l'expression des mouvements perturbateurs en fonction de leur fréquence de perturbation et de leur amplitude maximale. L'obtention des gabarits en fonction de la fréquence revient à résoudre les différentes équations des critères de qualité image avec pour inconnue l'amplitude maximale du mouvement perturbateur $\Delta D(\text{param})$. La résolution est donc effectuée pour chaque fréquence de perturbation. Le gabarit obtenu est l'amplitude maximale tolérée, $\Delta D(\text{param})_{\text{max}}$, pour le mouvement considéré en fonction d'un certain critère de qualité image et de la valeur de ce critère. Nous pouvons alors simplement établir un gabarit des vitesses et des accélérations maximales en fonction de la fréquence en dérivant les grandeurs du mouvement :

$$\begin{cases} \Delta V(\text{param})_{\text{max}} = 2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot \Delta D(\text{param})_{\text{max}} \\ \Delta A(\text{param})_{\text{max}} = (2 \cdot \pi \cdot f_c)^2 \cdot \Delta D(\text{param})_{\text{max}} \end{cases}$$

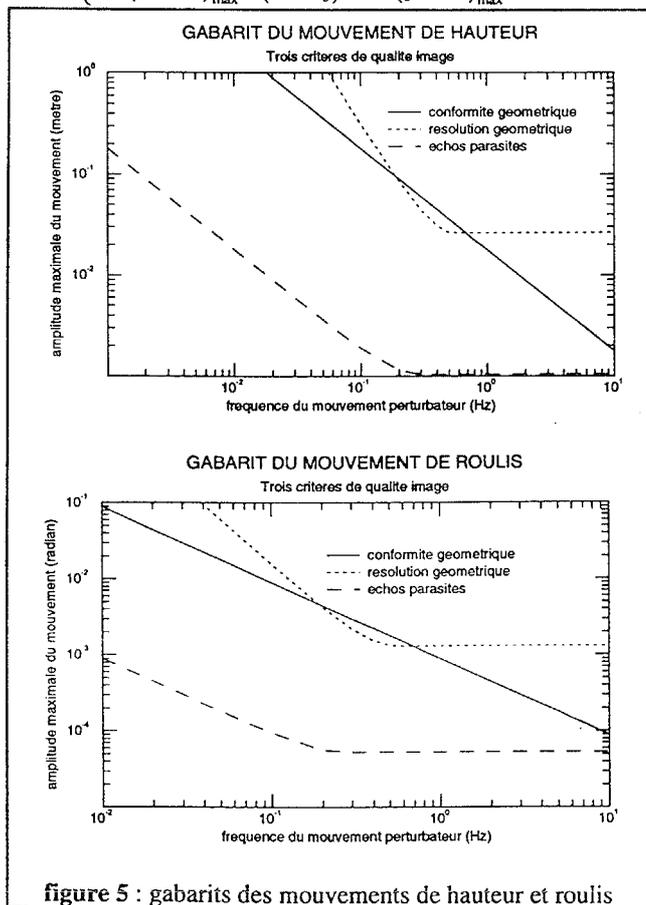


figure 5 : gabarits des mouvements de hauteur et de roulis

Pour la résolution des équations, nous utilisons une méthode numérique (méthode du gradient) et résolvons donc les équations des critères pour chaque fréquence de perturbation. Nous présentons les résultats associés aux mouvements présentés : hauteur et roulis. Dans les exemples, nous choisissons pour niveau de qualité image :

- * un déplacement maximal du pic de corrélation limité à une cellule de résolution donc $n=1$ (relation 4),
- * une perte de résolution limitée à 10% ce qui nous donne une excursion maximale de la phase égale à $\pi/2$ donc $N=2$ (relation 6),

* une différence de niveau entre le lobe principal et le lobe secondaire le plus élevé limité à (-30 dB) donc $\text{PSLR} = -30$ (relation 7).

Nous pouvons délimiter plusieurs zones (figures 5 et 6) dans l'élaboration des gabarits : en basse fréquence de perturbation ($f < 1/T_e$) sont les critères de déplacement du pic de corrélation et du critère de la perte de résolution. En haute fréquence ($f > 1/T_e$), le critère du niveau de PSLR est préféré. Nous remarquons que, lorsque la fréquence du mouvement perturbateur tend vers 0, l'amplitude maximale du mouvement perturbateur tend vers l'infini ce qui est intuitivement correct. À l'inverse, si la fréquence de perturbation tend à augmenter, l'amplitude tolérée pour le mouvement perturbateur diminue.

CALCUL DE L'ISLR

À chaque établissement de gabarit, nous obtenons donc une grandeur (déplacement, vitesse, accélération) du gabarit. Pour le calcul de l'ISLR, nous utilisons les grandeurs obtenues pour le gabarit du PSLR en les élevant au carré. Nous obtenons ainsi le gabarit (déplacement, vitesse et accélération) de la densité spectrale de puissance du mouvement considéré [3][5]. Nous choisissons les données liées au PSLR puisque l'ISLR est une grandeur significative pour les hautes fréquences de perturbation. Les conditions exposées ci-dessus nous donnent alors un niveau d'ISLR de 15,53 dB (ce qui représente une bonne qualité image SAR).

VI - CONCLUSION

Pour chaque paramètre perturbant la phase du signal SAR, nous avons résolu l'équation résultant de différents paramètres de qualité image (déplacement du pic de corrélation, perte de résolution, niveau de PSLR et donc niveau d'ISLR). L'amplitude maximale du mouvement considéré pour que le critère de qualité image soit respecté est l'inconnue de chacune des équations des critères.

Chaque mouvement perturbateur est autorisé à avoir une grande amplitude pour des fréquences très basses mais ces amplitudes deviennent petites pour des fréquences augmentant. Le niveau de correction est alors plus important. Les gabarits fréquentiels montrent, pour un mouvement, l'évolution des amplitudes par rapport à un critère donné et donc le niveau de correction. Si le critère du PSLR semble plus contraignant, celui-ci n'a réellement de signification que pour les hautes fréquences. À l'inverse, les critères de déplacement du pic et de la résolution sont à prendre en compte pour les mouvements perturbateurs basse fréquence.

L'élaboration de gabarits a été étendue à d'autres mouvements perturbateurs [3]. Ainsi, les mouvements de tangage, lacet et d'erreur de route sont aussi répertoriés comme des mouvements perturbateurs et donnent lieu à un gabarit fréquentiel.

VII - RÉFÉRENCES

- [1] : PIKE T.P., "Image Quality", SAR Seminar, CCG, Munich, (1989);
- [2] : KIRK J.C., "Motion Compensation For Synthetic Aperture Radar", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, May 1985;
- [3] : MÉRIC S., CHASSAY G., "Études et influences des mouvements du porteur pour imagerie radar haute résolution", Rapport d'activités, LCST-THOMSON RCM, janvier 1995;
- [4] : HASLAM G.E., REID B., "Motion Sensing Requirements for Synthetic Aperture Radar", IEEECE'83, Toronto, Sept. 1983;
- [5] : HOUNAM D., "Motion errors and compensation possibilities", Conference AGARD, août 1992.