

Modélisation et estimation des instabilités des émetteurs radars à l'état solide

Christophe SALMER¹, Yves DELIGNON² et Philippe EUDELIN¹

¹ Thomson-CSF Airsys, centre électronique de Rouen Ymare, ZI du Mont Jarret, 76520 YMARE, France

²Ecole Nouvelle d'Ingénieurs en Communication
rue Guglielmo Marconi, 59658 Villeneuve d'Ascq Cedex, France

Christophe.C.S.SALMER@AIRSYS.thomson.fr, Yves.Delignon@enic.fr

Résumé – La stabilité pulse à pulse est une caractéristique primordiale d'un émetteur radar de surface à impulsions car elle limite la détection des cibles dont en particulier celles de faible Surface Equivalente Radar (SER) dans un contexte contraignant (clutter important). L'amélioration des performances des radar passe par une analyse fine des sources possibles de perturbations tels que les variations thermiques des composants de puissance et la fluctuation de l'alimentation. La modélisation statistique est un outil puissant pour exploiter ce type de données radar. Un modèle statistique de signal émis est proposé, il comporte outre l'impulsion dont la forme est variable en fonction de la température et de la fréquence d'émission, un processus multiplicatif qui traduit le comportement basse fréquence de l'alimentation et un bruit additif. Nous proposons ensuite trois coefficients de stabilité de phase de l'alimentation, de l'impulsion en régime transitoire et en régime stationnaire. Nous finirons par analyser les résultats de leurs estimations au regard des conditions thermique de l'expérimentation et de la fréquence à l'émission.

Abstract – The pulse to pulse stability is a major characteristic of a surface radar transmitter because it determines directly the detection limit of the targets with very low radar cross section in presence of sub-clutter. In order to improve their performances, we have to analyse the disturbance origins such as the thermal variations of the radar power components and the fluctuation of the switching power supply. The statistical modelisation is a powerful tool to analyse this kind of data. In this paper, we suggest a statistical model for the transmitted signal which takes into account the pulse, the additive noise and a multiplicative process which modelizes the low frequency variation of the electricity. We introduce also three phase stability parameters for the electrical source and the pulse in stationary and transient steps. At the end, the stability parameters are analysed in regard to the temperature and frequency of the experimentation.

1. Introduction

La stabilité pulse à pulse est une caractéristique primordiale d'un émetteur radar de surface à impulsions [1-3]. Elle représente la variation de phase et d'amplitude du signal hyperfréquence d'émission en mode pulsé entre impulsions similaires et successives d'une même rafale. Cette caractéristique est importante pour un radar car elle limite la détection des cibles en particulier celles de faible Surface Equivalente Radar (SER) dans un contexte contraignant (clutter important).

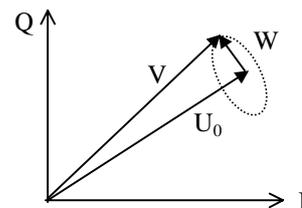
Pour les émetteurs à l'état solide Hanczor et Kumar [1,2] ont proposé une mesure de stabilité globale de l'émetteur radar qui ne différencie pas les sources d'instabilité. Pourtant, l'amélioration des performances des radar passe par une analyse fine des sources possibles de perturbations tels que les variations thermiques des composants et la fluctuation de l'alimentation. La modélisation statistique est un outil puissant pour exploiter les données radar [4,5]. Dans cet article, un modèle statistique de signal émis est proposé, il comporte outre l'impulsion dont la forme est variable en fonction de la température et de la fréquence d'émission, un processus multiplicatif qui traduit le comportement basse fréquence de l'alimentation et un bruit additif. Nous proposons ensuite trois coefficients de stabilité de la phase de l'alimentation, de l'impulsion en régime transitoire et

stationnaire. Le calcul des coefficients d'instabilité est finalement appliqué à l'analyse d'un émetteur à l'état solide.

2. La stabilité d'impulsion pulse à pulse

2.1 Définition

La stabilité d'impulsion à impulsion exprime une variation de phase et d'amplitude du signal hyperfréquence entre impulsions successives d'une même rafale. Elle peut être représentée à l'aide d'une représentation de FRESNEL :



U_0 Signal pur
 V Signal résultant
 W Perturbation

FIG 1 : Représentation de Fresnel de l'instabilité

La stabilité, exprimée en dB, est donnée par le rapport : $S = 10 \cdot \log(P(U_0)/P(W))$, où :

- $P(U_0)$ représente la puissance du signal pur (pratiquement identique à $P(V)$).

- $P(W)$ représente la puissance de la perturbation d'instabilité.

En pratique, on parle souvent de stabilité de phase car la variation liée à l'amplitude est faible par rapport à celle liée à la phase.

La stabilité d'impulsion à impulsion se compose de :

- Une composante déterministe : La variation pulse à pulse moyenne de la phase et de l'amplitude durant une rafale. Elle représente la composante qui est facilement traduite par un modèle mathématique.

- Une composante aléatoire : Elle a un comportement temporel imprévisible. Son évolution en fonction du temps obéit uniquement à des lois statistiques.

- Des signaux parasites de type raies, par exemple 50Hz de l'alimentation électrique, fréquence de découpage d'alimentations à découpage.

2.2 Les causes d'instabilités d'impulsion à impulsion

Les causes d'instabilité d'impulsion à impulsion au niveau d'un module amplificateur état solide d'un émetteur radar sont d'origines très diverses. On peut cependant les regrouper en deux parties : les causes extérieures et les causes intrinsèques.

Les causes extérieures :

- Les caractéristiques en phase et en amplitude du signal hyperfréquence de faible amplitude issu du sous-ensemble générateur (partie ayant pour rôle de générer le signal en mode pulsé qui sera amplifié par les modules état solide). La source d'instabilité est située au niveau des différents oscillateurs ([7] et [8]), des multiplicateurs et des mélangeurs.

- Les perturbations électromagnétiques entre modules ou au niveau d'un module.

Les causes intrinsèques au module état solide :

- Les variations thermiques des composants de puissance [9] : variations rapides de la température de jonction des composantes hyperfréquences de puissance en régime impulsif de rafales complexes. Elles sont fonction du type de séquençage (largeur d'impulsion, temps de silence entre deux impulsions) et des caractéristiques thermiques du composant.

- La fluctuation de l'alimentation électrique ([1], [9-11]). Ces instabilités sont dues soit aux ondulations parasites des tensions d'alimentation pendant une rafale, soit aux variations lentes des tensions d'alimentation pendant une rafale ou sous l'effet de l'évolution de leur charge de rafale à rafale.

- La conversion modulation d'amplitude / modulation de phase au niveau des amplificateurs saturés.

- La désadaptation en sortie des amplificateurs de puissance.

Ces différentes causes intrinsèques à un module amplificateur état solide sont présentées par ordre d'importance.

3. Modèle, coefficients d'instabilité et estimation

3.1 Introduction

La caractéristique de variation de phase et d'amplitude entre impulsions successives d'une même rafale, appelée stabilité d'impulsion à impulsion, est étudiée pour un module état solide, en général pour deux phases : durant la phase de conception du module et lors de son développement. Durant la phase de conception, l'objectif est de prévoir une performance en stabilité du module en étude. Lors du développement, on recherche à atténuer les phénomènes d'instabilité, s'ils existent. Pour ces deux phases, il nous semble important de développer des modèles mathématiques de ces variations.

3.2 Le modèle

En analysant l'évolution de la variation de phase et d'amplitude d'impulsion à impulsion du signal radar issu d'un module amplificateur état solide, on constate la superposition de plusieurs phénomènes :

- Signal basse fréquence généré par l'alimentation électrique, résidus du 50Hz.

- Instabilité déterministe au cours de l'impulsion due aux effets thermiques .

- Bruit additif représentant l'ensemble des signaux parasites dus à la conversion AM / PM, à la désadaptation en sortie des amplificateurs de puissance, aux perturbations électromagnétiques et à des fluctuations aléatoires de l'alimentation électrique.

Pour un rapport cyclique donné, les variations thermiques des composants de puissance conditionnent la forme des impulsions de la rafale.

$$X(t) = A(t) \cdot \sum_{k=-\infty}^{+\infty} p_{\theta}(t - kT) + B(t)$$

$X(t)$ processus aléatoire, mesure de la rafale (figure 1)

$A(t)$ processus aléatoire, modulation de l'amplitude des rafales dues aux variations lentes du 50Hz. En régime stationnaire, on prend $E[A(t)] = 1$.

$p_{\theta}(t)$ Fonction du temps, impulsion dont la forme dépend de la température θ .

$B(t)$ Bruit additif centré dû aux autres causes d'instabilité, négligeable par rapport aux fluctuations de l'alimentation électrique et aux variations thermiques des composants. Les processus $A(t)$ et $B(t)$ sont donc supposés statistiquement indépendants.

3.3 Coefficients d'instabilité

L'instabilité pulse à pulse existe sous deux formes, phase et amplitude. L'instabilité de phase étant prépondérante par rapport à celle d'amplitude, les paramètres étudiés ici dépendent uniquement de la phase.

Instabilité propre à l'alimentation électrique. Celle-ci se traduit par une dérive de la phase de la rafale au cours du temps (figure 4) :

$$S\phi_A = \max_t Arg(A(t)) - \min_t Arg(A(t))$$

L'instabilité de l'argument de l'impulsion $p(t)$ se traduit par un changement de la forme de l'impulsion. Sa phase transitoire $[0, t_0]$ est paramétrée par la pente et sa phase stationnaire par sa moyenne $[t_0, T]$.

$$S\phi_p^T = \frac{dArg(p_\theta(t))}{dt} (t=0)$$

$$S\phi_p^S = \frac{1}{T-t_0} \int_{t_0}^T Arg(p_\theta(t)) dt$$

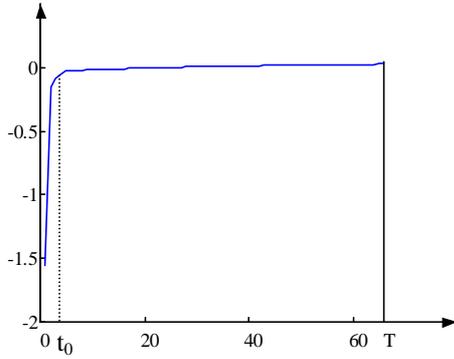


FIG 2 : Argument de l'impulsion régime transitoire $[0, t_0]$ et stationnaire $[t_0, T]$.

3.4 Estimation

Pour estimer les coefficients d'instabilité, nous devons dans une première étape extraire du signal observé l'impulsion, l'instabilité basse fréquence et le bruit résiduel.

Sur la partie cyclostationnaire de $X(t)$, nous tirons profit des n observations de l'impulsion et des hypothèses précédentes pour l'estimer.

$$\hat{p}_\theta(t) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X(kT + t)$$

Le processus $A(t)$ estimé en deux étapes.

Sur chaque impulsion i , le processus moyen A_i est approché par le rapport entre la moyenne temporelle du processus observé $X(t)$ et la moyenne temporelle de l'impulsion estimée précédemment.

$$\hat{A}_i = \int_0^T X(iT + t) dt / \int_0^T \hat{p}(t) dt$$

$\hat{A}(t)$ est alors interpolé par la méthode des splines à l'aide des \hat{A}_i .

Le bruit se déduit alors aisément de $X(t)$.

$$\hat{B}(t) = X(t) - \hat{A}(t) \hat{p}_\theta(t)$$

4. Résultats

Pour la validation de notre méthode, nous disposons d'un ensemble de 6 expérimentations obtenues à des fréquences de 2,7GHz et 2,9GHz et à des températures de 30°C, 40°C et 50°C sur un amplificateur de puissance utilisé dans nos matériels. Les résultats ont été obtenus à partir d'un banc de mesure approprié. Le séquençement de test comprend différents types d'impulsions et de temps de répétition (séquençement radar type).

Sur l'ensemble des expérimentations, le rapport impulsion sur bruit estimé est de 70 ± 0.1 dB indépendamment des fréquences d'émission et de la température.

Les résultats des estimations des instabilités de phase de l'impulsion en régime transitoire et en régime stationnaire sont donnés dans les tableaux 1 et 2.

Notons d'une part que l'instabilité de phase de l'impulsion en régime stationnaire dépend de la fréquence d'émission de la rafale. La stabilité dépend aussi dans une moindre mesure de la température ; plus la température croît, plus la phase est instable. Ce résultat se retrouve aussi en régime transitoire. La pente de la phase est en effet d'autant plus importante que sa moyenne en régime stabilisé est grande.

TAB 1 : Instabilité de phase de l'impulsion en régime transitoire en fonction des fréquences (2,7GHz et 2,9GHz) et de la température

$S\Phi_p^T$	30°C	40°C	50°C
2,7	0.01677	0.01695	0.01709
2,9	0.00044	0.00073	0.00096

TAB 2 : Instabilité de phase de l'impulsion en régime stationnaire en fonction des fréquences (2,7GHz et 2,9GHz) et de la température

$S\Phi_p^S$	30°C	40°C	50°C
2,7	1.0243	1.0340	1.0409
2,9	0.00610	0.02311	0.03541

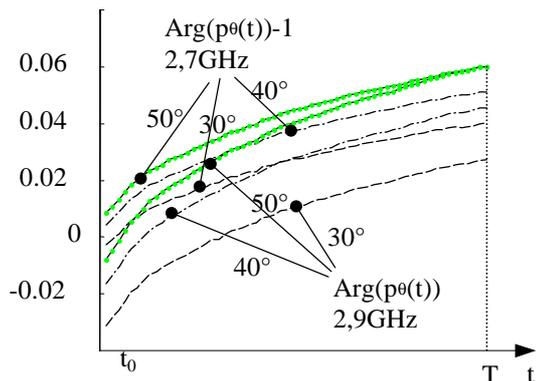


FIG 3 : Régime stationnaire de la phase des impulsions

Concernant l'instabilité de l'alimentation électrique, celle-ci est négligeable. Aucune tendance de cette instabilité n'est remarquable dans le tableau 3. Seule la fréquence d'émission semble affecter la stabilité en phase de l'alimentation.

Tab 3 : Instabilité de phase de l'alimentation électrique en fonction des fréquences (2,7GHz et 2,9GHz) et de la température

$S\Phi_A$	30°C	40°C	50°C
2,7	0.00128	0.00187	0.0019
2,9	0.00462	0.00440	0.00476

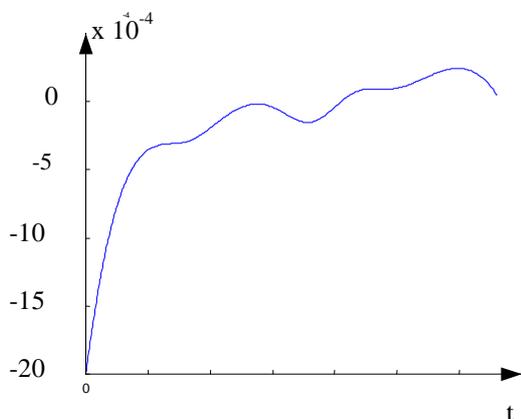


Fig 4 : Instabilité de phase de l'alimentation électrique

Ces résultats montrent une évolution des différents paramètres de l'instabilité d'impulsion à impulsion en fonction de la température.

5. Conclusion

Sur plusieurs rafales de même rapport cyclique et pour différentes températures, nous avons étudié l'instabilité en phase de l'impulsion, et de l'alimentation électrique. Le modèle proposé ainsi que la méthode d'estimation ont permis d'extraire les différentes composantes du signal émis. Au

regard des résultats, le modèle et la méthode d'estimation sont adaptés pour notre étude.

Les résultats ont donné une première analyse de l'évolution de la stabilité globale de l'élément testé en fonction de la température de semelle. Il est cependant nécessaire de réaliser d'autres mesures pour confirmer les résultats obtenus.

Références

- [1] M. Hanczor and M. Kumar, '12 kW S-band solid state transmitter for modern radar system', *IEEE MTT-s*, december 1993.
- [2] M. Kumar and as, '22 kW next generation low cost S-band solid state transmitter for surveillance and air traffic control radars', 1995 IEEE MTT-S Digest.
- [3] C. Salmer et Ph. Eudeline, 'Mesure de la stabilité pulse à pulse des émetteurs état solide pour radars à impulsions', *Journées Nationales Microondes 97*.
- [4] Y. Delignon, A. Marzouki and W. Pieczynski, "Estimation of generalised mixture and unsupervised statistical radar image segmentation", *IEEE Transactions on Image Processing*, vol 6, n°10, pp 1364-1375, october 1997.
- [5] Y. Delignon, R. Garello and A. Hillion, "Statistical modelling of ocean SAR images", *IEE radar, sonar and navigation*, Vol 144, n°6, décembre 1997.
- [6] M. Skolnik, 'RADAR handbook', Second edition, Mc Graw-Hill, Chapter 4.
- [7] M. Ducrotoy, 'Bruit de phase d'un oscillateur', *Revue Technique THOMSON-CSF*, décembre 1973.
- [8] C.L. Everett, 'Phase noise contamination to Doppler spectra', *Microwave Journal*, september 96.
- [9] R. Barron and M. Schultheis, 'The ASRR-4 high fidelity solid state transmitter', *IEEE MTT-S Digest 94*.
- [10] M. Skolnik, 'RADAR handbook', Second edition, Mc Graw-Hill, Chapter 4.
- [11] A Corson and S. Ginsberg, '750 kW power system for a solid state pulsed RF transmitter', 1982 IEEE.
- [12] C. Salmer, Ph. Eudeline et P.A. Rolland, 'Pulse to pulse instability causes of solid state transmitter module for radars', *International Radar Symposium 98*.