

Optimisation d'un code de phase robuste aux phénomènes d'éclipse

Uy Hour TAN^{1,2,3,4}, Olivier RABASTE⁴, Claude ADNET³, Jean-Philippe OVARLEZ^{2,4}

¹ISAE-SUPAERO, Université de Toulouse, 10 avenue Édouard Belin, BP 54032, 31055 Toulouse Cedex 4

²SONDRA, CentraleSupélec, 3 rue Joliot Curie, 91190 Gif-sur-Yvette

³Thales Land & Air Systems, Voie Pierre-Gilles de Gennes, 91470 Limours-en-Hurepoix

⁴DEMR, ONERA, Université Paris-Saclay, Chemin de la Hunière, BP 80100, 91123 Palaiseau Cedex

uy-hour.tan@isae-supaero.fr, olivier.rabaste@onera.fr
claude.adnet@thalesgroup.com, jean-philippe.ovarlez@onera.fr

Résumé – Dans ce papier, on s'intéresse aux codes de phase, et plus particulièrement à leur robustesse aux phénomènes d'éclipse. Dans le contexte radar, une éclipse se traduit par une perte partielle d'informations, due à la réception d'un signal pendant la phase d'émission. Cela implique notamment une élévation du niveau des lobes secondaires après compression d'impulsion, et par conséquent une dégradation des performances de détection. En ce sens, ce papier propose une procédure d'optimisation permettant de définir des codes de phase robustes aux phénomènes d'éclipse. Quelques simulations soulignent l'intérêt de la méthodologie.

Abstract – This paper is interested in phase code design, and especially in their robustness to the eclipsing phenomenon. In a radar background, the term "eclipsing" describes a partial loss of data at the reception side. It implies an increase of pulse compression sidelobes, and thus a degradation of detection performance. In this regard, this paper describes an optimisation procedure which aims to provide waveforms (phase codes) that are quite robust to the eclipsing phenomenon. Some simulations are provided to highlight the usefulness of the procedure.

1 Introduction

La définition d'une éclipse dans un dictionnaire classique [5] nous offre : « Absence, disparition temporaire [...] de quel qu'un, d'une activité ». Quel est alors le lien avec les formes d'onde ? Pour cela, revenons à un principe sommaire d'un radar, illustré à la Figure 1. Un radar classique est aveugle lorsqu'il émet : en effet, soit l'émission et la réception sont effectuées par une seule et même antenne, soit l'antenne d'émission interfère avec son homologue. En se rappelant qu'un radar émet généralement de manière pulsée, quelles sont les situations temporelles qui s'offrent à nous ?

- Le cas idéal consiste à ce que l'écho du signal émis soit perçu pendant la période de répétition *correspondante*. La position de la cible peut être estimée convenablement.
- Lorsque la correspondance ne peut-être établie, il y a *ambiguïté distance*. Par exemple, sur la Figure 1, au centre, il est impossible de déterminer si l'écho provient de la première impulsion ou de la seconde...
- Enfin, il est possible que le signal réfléchi soit reçu au cours d'une émission, et donc qu'il y ait une intersection temporelle entre l'émission et la réception, comme le montre le bas de la Figure 1. Dans ce cas, le début de l'impulsion n'est pas enregistré par le radar. C'est ce qu'on appelle une « éclipse » [1]. Signalons qu'on ne considère que les éclipses partielles, puisqu'une éclipse totale correspondrait à une non-réception...

Finalement, le phénomène d'éclipse se définit donc par une perte partielle d'informations à la réception. Cette perte se manifeste sous différentes formes à l'étape de traitement, comme le montre la Figure 2. Sur celle-ci, on applique un filtre adapté sur le signal reçu, malgré le fait que ce dernier soit tronqué de moitié (une éclipse à 50%). Pour le *chirp*, on note une perte énergétique et un épaississement du lobe principal (lié à la diminution de la bande du signal intrinsèque à la troncature du signal) [2]. Pour un code polyphasé, on y ajoute une remontée des lobes secondaires, mais on n'observe pas nécessairement une augmentation de la largeur du lobe principal.

La perte énergétique est intrinsèque à la désadaptation. Elle est d'ailleurs identique pour toute séquence à module constant subissant la « même » éclipse. Cependant, on s'aperçoit que la modulation linéaire de fréquence conserve ses lobes secondaires, ce qui ne semble pas le cas pour les codes de phase. Si bien qu'on peut se demander s'il existe des codes de phase robustes aux éclipses. Ainsi, ce papier s'intéresse à la génération de codes de phase limitant cette dégradation. Pour cela, une modélisation sous la forme d'un problème d'optimisation est suggérée : la fonction objectif est une mesure des lobes secondaires après une compression d'impulsion « partielle ».

La suite du papier se décompose en deux paragraphes : le premier s'intéresse aux éclipses à gauche (*i.e.* en début de portée). Le deuxième traite à la fois les éclipses gauche et droite. Signalons qu'un travail similaire a été effectué dans le cas de modulations non-linéaires [1, 3].

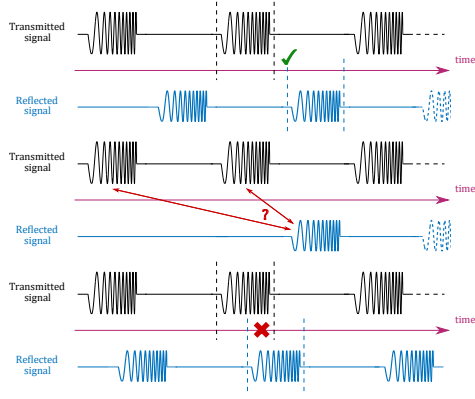


FIGURE 1 – Illustration d'un phénomène d'éclipse
En haut : un cas idéal. Au centre : une ambiguïté distance. En bas, une éclipse : l'émission et la réception se superposent, partiellement.

2 À gauche...

2.1 Définitions

Soit $\mathbf{s} = [s_1, \dots, s_N]^T$ une séquence de longueur N . Dans la suite, on supposera que \mathbf{s} est sous la contrainte de module constant. En d'autres termes, \mathbf{s} est un élément de l'hypertore \mathbf{T}^N de dimension N , un espace non convexe. En outre, chaque élément s_n est déterminé par sa phase $\varphi_n \in [-\pi, \pi]$, i.e. :

$$s_n = \begin{cases} 1/\sqrt{N} \exp(j\varphi_n) & \text{si } n \in \llbracket 1, N \rrbracket, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (1)$$

La compression d'impulsion consiste sur le papier à étudier la corrélation entre le signal reçu et le signal émis \mathbf{s} . Cela revient donc à générer une autre séquence \mathbf{y} , de longueur $2N - 1$ cette fois, telle que :

$$\mathbf{y} = \mathbf{\Lambda}_N(\mathbf{s})\mathbf{s}^*, \quad (2)$$

où $\mathbf{\Lambda}_N(\mathbf{s})$ est une matrice de taille $2N - 1 \times N$ contenant des versions décalées de la séquence \mathbf{s} , comme suit :

$$\mathbf{\Lambda}_N(\mathbf{s}) = \begin{bmatrix} s_N & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ s_1 & \cdots & \cdots & s_N \\ 0 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & s_1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Afin d'évaluer le niveau des lobes secondaires de la séquence de corrélation induite, on considère le critère suivant, basé sur la norme ℓ_p , avec $p \in \mathbb{N}^*$:

$$\begin{aligned} \mathbb{C}^N &\rightarrow \mathbb{R}^+ \\ \mathbf{s} &\mapsto f_p(\mathbf{s}) := \|\mathbf{F}\mathbf{y}\|_p^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Ici, \mathbf{F} est une matrice diagonale de taille $2N - 1$, spécifiée par le vecteur $[1, \dots, 1, 0, 1, \dots, 1]^T$ (un vecteur composé uniquement de 1, excepté le 0 en n -ième position, pour ignorer le lobe

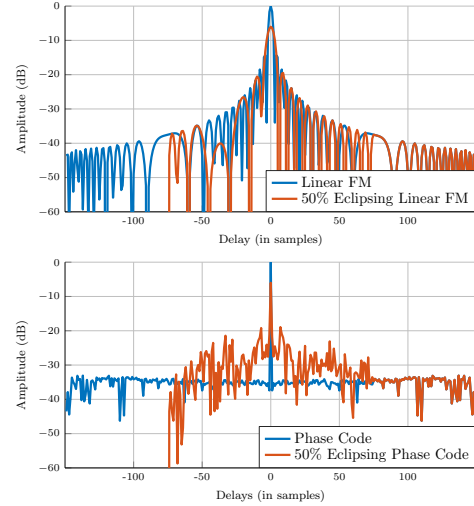


FIGURE 2 – Séquence de corrélation pour un signal éclipsé
En haut : un chirp. En bas : un code de phase. Notez l'épaississement du lobe principal pour le chirp, la remontée des lobes secondaires pour le code de phase, et la perte due à la désadaptation.

principal). Remarquez que f_p rappelle d'autres critères connus selon le choix p , comme l'ISL (*Integrated Sidelobe Level*) avec $p = 2$, ou le PSLR (*Peak-to-Sidelobe-Level Ratio*) avec $p = \infty$. Dans une optique de détection, on choisira à prendre un p le plus élevé possible.

2.2 Modélisation

Comme mentionné précédemment, une éclipse en début de portée (à gauche) se traduit par une absence partielle d'informations en début de signal ; le signal reçu \mathbf{s}_{gau} est donc sous la forme :

$$\mathbf{s}_{\text{gau}}^i = [0, \dots, 0, s_{i+1}, \dots, s_N]^T \in \mathbb{C}^N. \quad (5)$$

L'indice i compte ainsi le nombre d'éléments manquants, par rapport à la séquence \mathbf{s} . On dénommera le ratio i/N le coefficient d'éclipse.

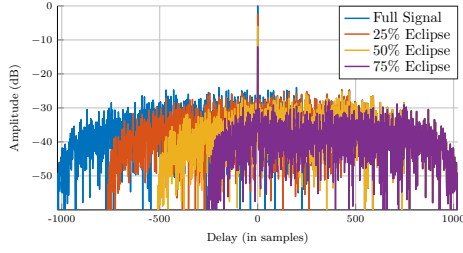
Remarque : Un code de phase correspond à une certaine discrétisation temporelle. En pratique, il est évidemment peu probable que la coupure due à une éclipse tombe parfaitement entre deux échantillons. Ce phénomène peut être corrigé par un jeu d'échantillonnage et sera donc ignoré par la suite, par simplicité.

Le traitement à la réception s'effectue comme si le signal $\mathbf{s}_{\text{gau}}^i$ est plein. La séquence en sortie, appelée \mathbf{y}^i et de longueur $2N - 1$, s'écrit :

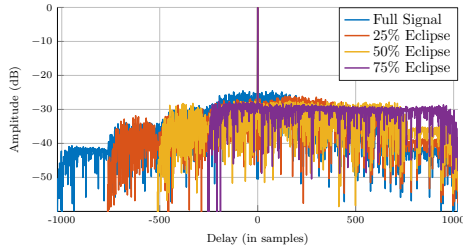
$$\mathbf{y}^i := \mathbf{\Lambda}_N(\mathbf{s}) (\mathbf{s}_{\text{gau}}^i)^*. \quad (6)$$

L'expression (6) ci-dessus permet de démontrer la constance (selon le coefficient d'éclipse) du lobe principal, indépendamment de la séquence. Il suffit de poser :

$$y_N^i = \sum_{n=i+1}^N s_n s_n^* = \frac{N-i}{N}. \quad (7)$$



Initialisation aléatoire. Les courbes ne sont pas normalisées afin d'illustrer la perte sur le lobe principal.



Séquence optimisée. Les courbes sont cette fois normalisées.

FIGURE 3 – Corrélation pour plusieurs coefficients d'éclipse

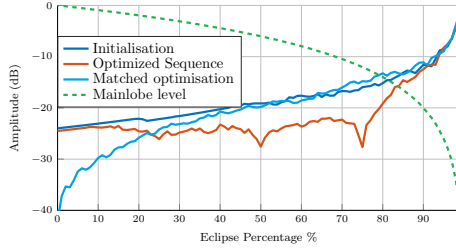


FIGURE 4 – PSLR selon le coefficient d'éclipse

La robustesse au phénomène d'éclipse est également dessinée pour une séquence optimisée au sens du filtre adapté.

Une mesure des lobes secondaires induite, prenant en compte cette normalisation, est :

$$\min_{\mathbf{s}} f_p^i(\mathbf{s}) := \left\| (1/y_N^i) \mathbf{F} \mathbf{y}^i \right\|_p^2 \quad \text{t.q. } \mathbf{s} \in \mathbf{T}^N. \quad (8)$$

Il nous faut cependant y ajouter notre petit grain de sel. En effet, le coefficient d'éclipse est inhérent de la position de la cible, et donc variable en pratique. Optimiser une séquence pour un seul coefficient n'a donc aucun sens ! Il vaut mieux considérer plusieurs cas de figure simultanément. Soit I un ensemble d'indices i — l'indice i porte sur le nombre d'éléments manquants. On a alors :

$$\min_{\mathbf{s}} \{f_p^i(\mathbf{s})\}_{i \in I} \quad \text{t.q. } \mathbf{s} \in \mathbf{T}^N. \quad (9)$$

Le problème (9) est certes un problème d'optimisation multi-objectif, mais il n'est pas nécessaire ici de se compliquer la tâche. Chaque fonction coût mesure une même quantité, à savoir un niveau des lobes secondaires. De ce fait, la norme ℓ_p de l'ensemble de ces lobes suffit à notre bonheur :

$$\min_{\mathbf{s}} \left(\sum_{i \in I} (f_p^i(\mathbf{s}))^p \right)^{1/p} \quad \text{t.q. } \mathbf{s} \in \mathbf{T}^N. \quad (10)$$

La résolution de ce problème est évoquée dans le paragraphe suivant, par le biais de simulations.

2.3 Résultats

Avant de présenter les résultats de quelques simulations, notons que le problème d'optimisation (10)...

- ... est non convexe, à cause de la contrainte de module constant. Cela signifie qu'il est assez difficile de déterminer le minimum global de la fonction objectif.
- ... est doté de nombreuses variables (la longueur de \mathbf{s}) non séparables. Cela peut dégrader les performances de certaines méthodes d'optimisation.

En clair, aucune méthode d'optimisation ne peut garantir la convergence globale à notre connaissance. Dans la suite, nous appliquerons un algorithme évolutionnaire nommé CMA-ES, pour *Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy*. C'est un algorithme dit « boîte noire » [4] : il ne nécessite seulement des sorties de la fonction objectif pour rechercher le minimum. L'algorithme CMA-ES présente dans de nombreux cas une complexité linéaire [6].

Une optimisation a été effectuée pour une séquence de longueur $N = 1023$ et ce, pour quatre coefficients d'éclipse : 0% (ce qui revient à la séquence complète), 25%, 50% et 75%. La Figure 3 présente les séquences de corrélation, et la Figure 4 dépeint le PSLR selon différents coefficients d'éclipse. En ce qui concerne l'initialisation, le niveau des lobes secondaires présente la même fluctuation que le coefficient d'éclipse : si l'un augmente, l'autre aussi. Dans le cas de la séquence optimisée, les lobes secondaires présentent une étonnante uniformité — sauf dans les cas où la perte énergétique devient trop importante. Cela étant, la procédure que nous proposons apporte une certaine différence, de 4 à 11 dB, selon les optimisations, ce qui nous rassure sur son utilité éventuelle. Notons que le lobe secondaire le plus élevé (pour la séquence complète) est aux alentours des -25 dB, soit environ 18 dB d'écart par rapport à une séquence optimisée pour l'autocorrélation seule. Compromis quand tu nous tiens.

3 ... et à droite

3.1 Extension du modèle

Dans le paragraphe précédent, nous n'avons considéré qu'un seul type d'éclipse, que l'on peut décrire à l'aide du substantif « à gauche ». En effet, il existe également une éclipse à droite (*i.e.* en fin de portée), comme l'illustre la Figure 5. De ce fait, il est préférable que le signal émis soit robuste dans les deux sens. Pour cela, on procède à une méthodologie similaire. Le signal reçu s'écrit — i et j dérivant du coefficient d'éclipse — :

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_{\text{gau.}}^i &= [0, \dots, 0, s_{i+1}, \dots, s_N]^T \in \mathbb{C}^N, & (\text{à gauche}) \\ \mathbf{s}_{\text{dr.}}^j &= [s_1, \dots, s_{N-j}, 0, \dots, 0]^T \in \mathbb{C}^N. & (\text{à droite}) \end{aligned}$$

Soient J un ensemble d'indices et g_p^j la fonction objectif associée à la séquence $\mathbf{s}_{\text{ecl.dr.}}^j$. Le problème d'optimisation qui nous intéresse est le suivant :

$$\min_{\mathbf{s}} \left(\sum_{i \in I} (f_p^i(\mathbf{s}))^p + \sum_{j \in J} (g_p^j(\mathbf{s}))^p \right)^{1/p} \quad \text{t.q. } \mathbf{s} \in \mathbf{T}^N. \quad (11)$$

Il n'y a bien sûr pas de pondération à ajouter : il n'y a aucune raison pour qu'une éclipse soit plus importante qu'une autre.

3.2 Résultats

Dans ce paragraphe, on se propose de comparer les deux méthodologies. On effectue ainsi deux optimisations de séquences de longueur $N = 127$, une sans (une éclipse à gauche seule, Figure 6), une avec (Figure 7). Les résultats ne sont guère surprenants. Sur l'éclipse à gauche, l'optimisation « unique » prend l'avantage, avec une différence de l'ordre de 3 dB. Mais, en se spécialisant, le problème (10) ne contrôle en rien les lobes secondaires pour les éclipses à droite, qui s'affolent complètement. Ce n'est pas le cas de l'optimisation pour les deux types d'éclipses (11). Toutefois, comme mentionné, cela entraîne une légère hausse du niveau moyen des lobes secondaires.

4 Conclusion

Dans ce papier, une méthodologie a été présentée afin de générer des codes polyphases robustes aux éclipses. Cette méthodologie est basée sur un problème d'optimisation, qui se doit de considérer simultanément les éclipses en début et en fin de portée. Des simulations ont montré des améliorations dans le contexte des éclipses. Mais, dans le cas « usuel », une forte dégradation est à noter.

Par la suite, on souhaiterait étendre la procédure...

- ... en prenant en compte le Doppler, essentiel en radar ;
- ... en incluant des filtres désadaptés, comme dans [7] ;
- ... en l'appliquant à un ensemble de séquences (MIMO).

Ces travaux ont été financés en partie par Thales Land & Air Systems, et par une bourse DGA-MRIS.

References

[1] S. Blunt, K. Gerlach et E. Mokole. *Pulse Compression Eclipsing-Repair*. 2008 IEEE Radar Conference, 2008.

[2] B. Zrnica, A. Zejak et I. Simic. *The Eclipsing Zone Problem in the Chirp Radar*. Eurocon, 2001.

[3] C. Alabaster et E. Hughes. *Generating Pulse Compression Waveforms Robust to Eclipsing*. International Conference on Radar Systems (Radar 2017), 2017.

[4] N. Hansen. *The CMA Evolution Strategy: A Tutorial*. <http://arxiv.org/abs/1604.00772>, 2017.

[5] *Le grand Larousse illustré*. <https://www.larousse.fr>, 2015.

[6] N. Hansen, S. Müller et P. Koumoutsakos. *Reducing the Time Complexity of the Derandomized Evolution Strategy with Covariance Matrix Adaptation (CMA-ES)*. Evolutionary Computation, 2003.

[7] R. Lane. *The Effects of Doppler and Pulse Eclipsing on Sidelobe Reduction Techniques*. IEEE Radar Conf., 2006.

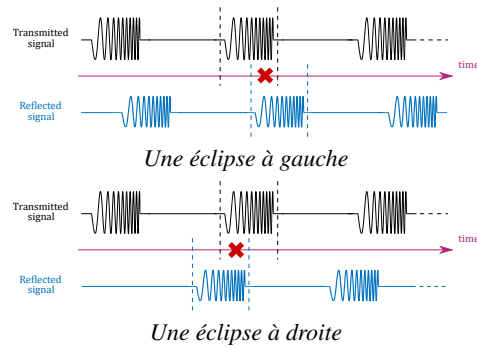


Figure 5 – Différents types d'éclipse
La perte d'information n'est pas située au même endroit...

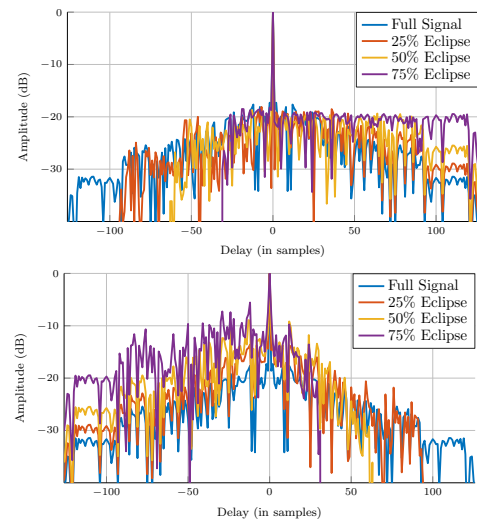


Figure 6 – Optimisation pour une éclipse à gauche seule
En haut : éclipse à gauche. En bas : éclipse à droite.

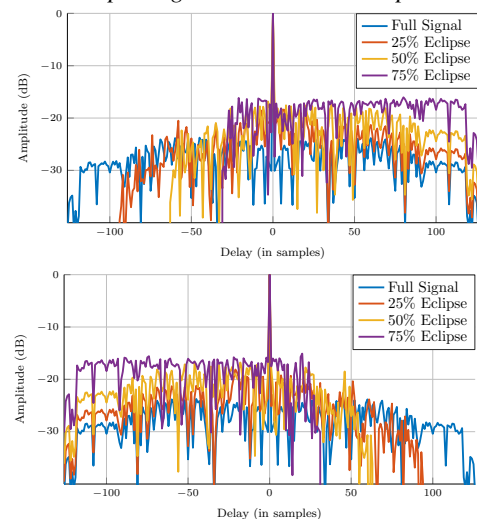


Figure 7 – Optimisation pour des éclipses gauche et droite
En haut : éclipse à gauche. En bas : éclipse à droite.