

Caractérisation des signaux transitoires par l'analyse des récurrences de phase

Florin-Marian BIRLEANU¹, Cornel IOANA¹, Cédric GERVAISE², Alexandru SERBANESCU³, Jocelyn CHANUSSOT¹

¹GIPSA-Lab/DIS, Grenoble INP, France

²ENSTA Bretagne, Brest, France

³Académie Technique Militaire, Bucarest, Roumanie

florin-marian.birleanu@gipsa-lab.inpg.fr, cornel.ioana@gipsa-lab.inpg.fr,
cedric.gervaise@ensieta.fr, serbal@mta.ro, jocelyn.chanussot@gipsa-lab.inpg.fr

Résumé – Le présent article présente les potentialités de la méthode d'analyse des récurrences de phase (RPA – Recurrence Plot Analysis) dans le contexte de l'analyse des signaux transitoires. La formulation mathématique de la méthode est présentée, ainsi qu'une extension récente par l'introduction de la distance angulaire. Il est montré que cette extension conduit à un diagramme de récurrence qui est quasi-invariant à des modifications lentes de l'amplitude du signal. L'effet du bruit est étudié également. La méthode est ensuite appliquée dans le contexte de la caractérisation des signaux transitoires produits par des dauphins.

Abstract – This article aims to popularise the RPA (Recurrence Plot Analysis) method in the context of transient signal processing. The mathematical details of the method are presented, as well as a recent extension by the introduction of the angular metric. It is shown that this extension leads to a recurrence plot that is quasi-invariant to slow changes in the amplitude of the signal. The noise-behaviour is analyzed as well. The method is then applied to the characterization of transient signals generated by dolphins.

1 Introduction

A cause de leur durée très courte, l'analyse des signaux transitoires est une tâche difficile. Même si les outils d'analyse en temps-fréquence arrivent à offrir des informations concernant la localisation temporelle des transitoires (sauf quand les différences énergétiques entre eux sont importantes), la distinction entre des différents types de transitoires reste souvent un défi.

Il se pose, donc, d'une part, le problème de pouvoir détecter des transitoires ayant des formes, des durées et des énergies différentes. D'autre part, il se pose aussi le problème d'obtenir les caractéristiques discriminantes des transitoires, afin de pouvoir ensuite les classifier.

Comme mentionné dans [1], la méthode RPA (Recurrence Plot Analysis) commence à être étudiée en tant qu'outil générique d'analyse de signaux. Même si elle est apparue comme outil d'analyse de systèmes dynamiques, elle offre un cadre sur lequel on peut développer des outils de nature statistico-temporelle qui promettent des résultats intéressants dans la caractérisation des transitoires. Nous avons déjà montré [2] son utilité en ce qui concerne la détection des signaux transitoires. Nous avons également fait une étude sur son comportement face à des modifications de l'échelle de temps et d'amplitude, en introduisant aussi une métrique qui compense l'effet des modifications lentes d'amplitude [1].

Dans le présent papier nous continuons cette étude. D'abord,

on présente (dans la section 2) les détails mathématiques de la méthode d'analyse des récurrences de phase (RPA) et de son extension par la métrique angulaire. On continue par étudier (dans la section 3.1) le comportement de cette nouvelle métrique dans le cas d'un signal modulé en amplitude, bruité. Ensuite, (dans la section 3.2) on présente des résultats obtenus en matière de détection et classification pour une mesure réelle de sons sous-marins réalisée en milieu côtier en présence de dauphins *Tursiops truncatus* émettant des clics d'écholocation.

2 Méthode

2.1 L'analyse des récurrences

Les étapes génériques de la méthode d'analyse des récurrences [3] sont résumées dans la figure 1. Elles sont brièvement discutées dans les paragraphes suivants. [1]

◦ Représentation du signal comme une trajectoire dans un espace multi-dimensionnel (l'espace des phases). Cela se fait avec la méthode des retards. Si m est la dimension de l'espace de représentation et τ est le retard temporel, la trajectoire qui correspond au signal $s(t)$ est :

$$\vec{r}(t) = \sum_{k=1}^m s(t + (k-1)\tau) \cdot \vec{e}_k, \quad (1)$$

où \vec{e}_k sont les vecteurs normalisés des axes.

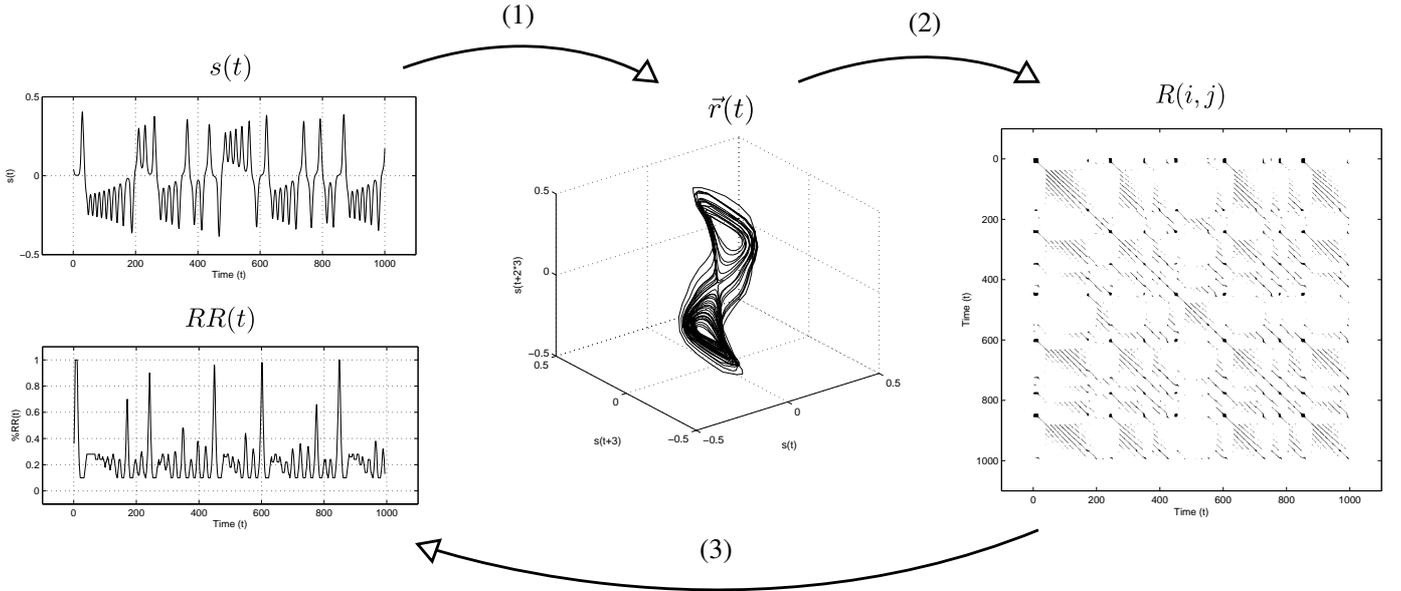


FIG. 1 – Les étapes de la méthode d’analyse des récurrences de phase [1] : (1) construction de la trajectoire, (2) calcul du diagramme des récurrences, (3) quantification des récurrences

○ Calcul du diagramme des récurrences [4], dans lequel on cherche à représenter si le signal possède dans son évolution temporelle des états qui se répètent. Une récurrence entre les points i et j de la trajectoire est définie comme :

$$R(i, j) = \Theta(\varepsilon(i) - D(\vec{r}(i), \vec{r}(j))), \quad (2)$$

où Θ est la fonction de Heaviside, et $D(\vec{r}(i), \vec{r}(j))$ signifie la distance entre les points i et j de la trajectoire. En effet, l’équation antérieure montre qu’une récurrence est identifiée entre les points i et j de la trajectoire si la distance entre eux est plus petite qu’un certain seuil ε , connu comme le rayon de récurrence. Le plus souvent on utilise un ε qui est constant, et la distance est calculé avec la métrique euclidienne. Cependant, il est parfois utile d’utiliser le diagramme des distances (i.e. la représentation graphique de D) à la place du diagramme des récurrences.

○ Quantification du diagramme des récurrences [5]. Elle consiste à effectuer des calculs sur le diagramme des récurrences, afin d’obtenir des informations sur le signal analysé. La mesure la plus populaire c’est le taux des récurrences, RR . Il est calculé comme le rapport entre la surface totale occupée par des points noirs (récurrences) dans le diagramme des récurrences et la surface totale du diagramme des récurrences. Le taux des récurrences, aussi que d’autres mesures de quantification, peuvent être calculé soit globalement, pour tout le diagramme des récurrences, soit localement, sur des fenêtres de temps qui sont décalées au long de la diagonale principale du diagramme des récurrences.

2.2 L’écart angulaire

La représentation d’un signal dans l’espace des phases étant une opération linéaire, la modification de l’échelle d’amplitude du signal aura comme effet une modification similaire de

l’échelle de la trajectoire. Si pour le signal $s(t)$ on a la trajectoire $\vec{r}(t)$, pour le signal $s'(t) = \alpha \cdot s(t)$ on aura :

$$\vec{r}'(t) = \sum_{k=1}^m \alpha \cdot s(t + (k-1)\tau) \cdot \vec{e}_k = \alpha \cdot \vec{r}(t). \quad (3)$$

Si le diagramme des récurrences qui correspond au signal $s(t)$ est $R(i, j)$, le diagramme des récurrences qui correspond au $s'(t)$ sera :

$$R'(i, j) = \Theta(\varepsilon'(i) - D(\alpha \cdot \vec{r}(i), \alpha \cdot \vec{r}(j))). \quad (4)$$

La distance D est habituellement calculée avec une certaine métrique, c’est-à-dire :

$$D(\vec{r}(i), \vec{r}(j)) = \|\vec{r}(i) - \vec{r}(j)\|. \quad (5)$$

Dans ce cas, pour que $R'(i, j)$ soit identique au $R(i, j)$, $\varepsilon'(i)$ doit être choisi tel que :

$$\varepsilon'(i) = \alpha \cdot \varepsilon(i). \quad (6)$$

Cependant, cette mise à l’échelle du rayon de récurrence, très difficile à mettre en œuvre dans un contexte opérationnel quand le modèle physique n’est pas connu, n’est plus nécessaire quand on utilise l’écart angulaire, défini comme suit :

$$D(\vec{r}(i), \vec{r}(j)) = \arccos\left(\frac{\vec{r}(i) \cdot \vec{r}(j)}{\|\vec{r}(i)\| \cdot \|\vec{r}(j)\|}\right), \quad (7)$$

pour les vecteurs non-nuls (sinon, les vecteurs peuvent être considérés parallèles, i.e. la distance angulaire entre eux sera nulle). Cette définition conduit à un diagramme de récurrence qui est invariant à des modifications de l’échelle d’amplitude du signal analysé (comme on pourra voir dans la section qui suit), mais qui met en avant la récurrence des évolutions temporelles locales du signal.

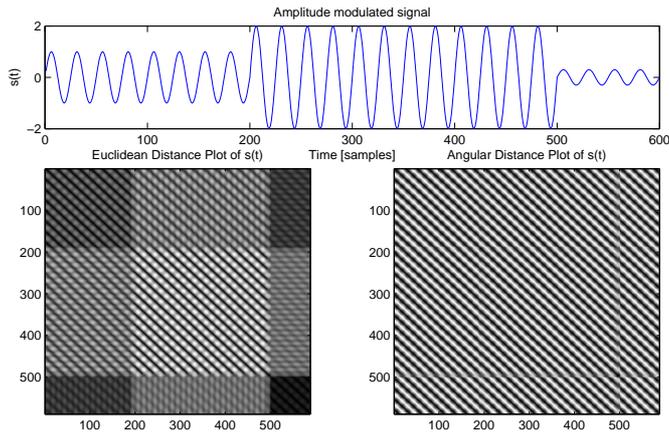


FIG. 2 – Le DDE et le DDA pour un signal modulé en amplitude ($m = 3, \tau = 6$)

3 Résultats

3.1 Le comportement de l’outil RPA utilisant l’écart angulaire pour un signal modulé en amplitude

On montre que la distance angulaire donne une représentation du signal qui est invariante à des modulations d’amplitude. On utilise pour ce test le signal illustré sur la figure 2. Le diagramme des distances euclidiennes, DDE, ainsi que le diagramme des distances (écarts) angulaires, DDA, sont calculés pour ce signal. On remarque que contrairement au DDE, le DDA produit des textures uniformes pour toute la durée du signal, même si les différences d’amplitude sont bien évidentes dans la représentation temporelle du signal.

En conditions bruitées, pour un rapport signal sur bruit (RSB) de 10 dB, la zone du DDA qui correspond à la partie finale du signal (où l’amplitude est la plus petite) est considérablement affectée par le bruit, tandis que le reste du DDA (qui correspond aux parties du signal où l’amplitude est plus grande) semble moins affecté. Une analyse visuelle de la figure 3 montre aussi que le DDA garde les caractéristiques de variation du DDE, en renonçant au différences de « luminosité ». Autrement dit, le DDA fait dans ce cas une mise à niveau automatique du DDE.

3.2 Application dans l’analyse de signaux sous-marins

Nous avons le signal de la figure 4, qui contient une séquence de clics d’écholocation produits par des dauphins *Tursiops truncatus*, mesuré dans le Cotentin (Normandie, France) en milieu très côtier par un hydrophone déployé à partir d’un zodiac à proximité de 10 individus. Deux trains de clics sont présents. Deux exemples pour chacun de ces trains sont montrés sur la figure. Il se pose d’abord le problème de détecter de manière automatique ces clics, et ensuite de les caractériser.

Le problème générique de la localisation temporelle des transitoires a été abordé en [2]. La figure 5 montre que la méthode

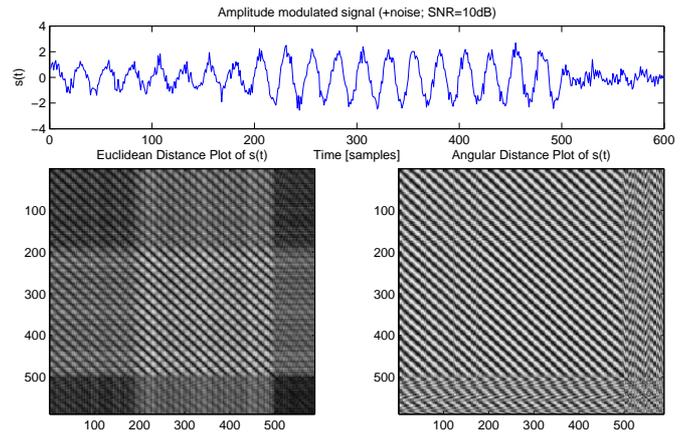


FIG. 3 – Le DDE et le DDA pour un signal modulé en amplitude, bruité (RSB = 10 dB, $m = 3, \tau = 6$)

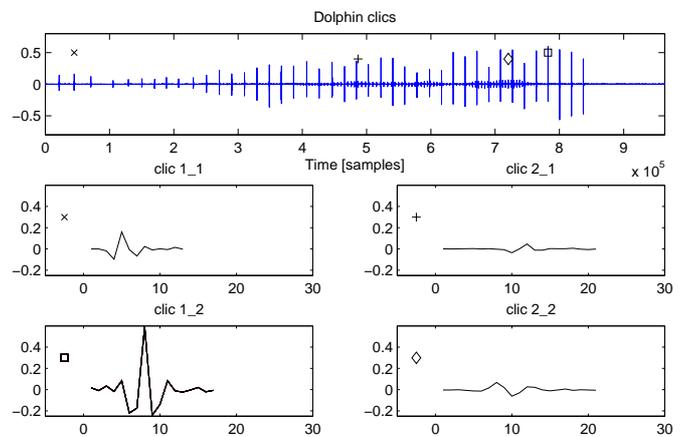


FIG. 4 – Des clics d’écholocation produits par des dauphins : les détails montrés à gauche appartiennent au premier train de clics, et ceux de droite appartiennent au deuxième train

de détection basée sur l’histogramme de l’espace des phases distribué en temps (TDPSH – time-distributed phase space histogram) est capable de détecter les clics des dauphins. Une implémentation efficace (en termes de ressources informatiques utilisées) de la méthode doit, bien sûr, envisager de l’appliquer sur des fenêtres d’échantillons. La dimension de ces fenêtres, aussi que le taux de recouvrement entre les fenêtres successives, doivent être choisis en prenant en compte la durée maximale attendue pour les clics.

Une fois les clics détectés, nous étudions la possibilité d’obtenir avec la méthode RPA des mesures qui pourraient nous aider à différencier de façon automatique les clics qui appartiennent à des trains différents. On utilise des versions interpolées des clics montrés sur la figure 4.

Une première idée qui a été testée consiste à traiter directement la trajectoire dans l’espace des phases, en analysant la variation de la distance entre des points successifs. On obtient ainsi la vitesse de variation de la trajectoire. La figure 6 montre les vitesses moyennes, V_{med} , obtenues pour les 4 clics de la

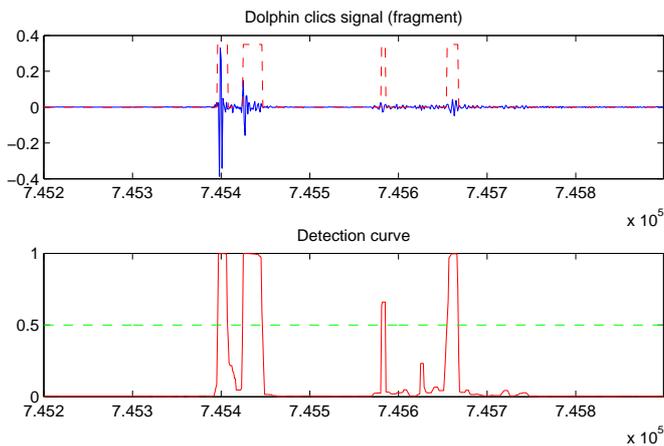


FIG. 5 – Détection automatique des clics basée sur le TDPSH

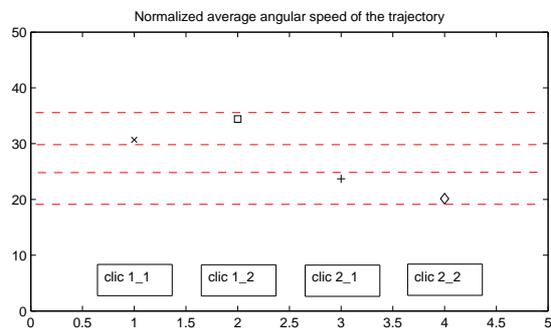


FIG. 6 – Séparation des trains de clics avec V_{med}

figure 4, en utilisant l'écart angulaire défini dans la section 2. (Cette vitesse moyenne a été, en plus, normalisée en la multipliant avec la longueur du clic analysé, afin d'obtenir une invariance à l'échelle temporelle.) On peut noter que pour les clics étudiés ce test statistique nous permet de faire la distinction entre les deux trains de clics.

Outre la vitesse moyenne de la trajectoire de phase, des autres tests statistiques ont été testés aussi :

- $RR(\varepsilon)$ – le taux des récurrences, calculé à partir d'une matrice des distances binarisée avec plusieurs seuils distribués à des écarts égaux, entre 0 et la valeur maximale de la matrice.
- $SC(t)$ – la somme normalisée des colonnes de la matrice (des distances ; des récurrences (\Rightarrow le taux des récurrences locales, i.e. le TDPSH)).
- $SD(t)$ – la somme normalisée des diagonales de la matrice (des distances ; des récurrences (\Rightarrow le taux des récurrences en fonction du retard)).

Les résultats obtenus pour ces mesures n'ont pas été trop concluants. On observe, toutefois, sur la figure 7 que le $SC(t)$ calculé pour la matrice des récurrences angulaires (ayant comme rayon de recurrence la vitesse moyenne de la trajectoire) nous permet de faire une discrimination au moins visuelle entre les clics. (La mesure ainsi obtenue est une extension – par l'utilisation de la métrique angulaire – de la TDPSH introduite en [2].)

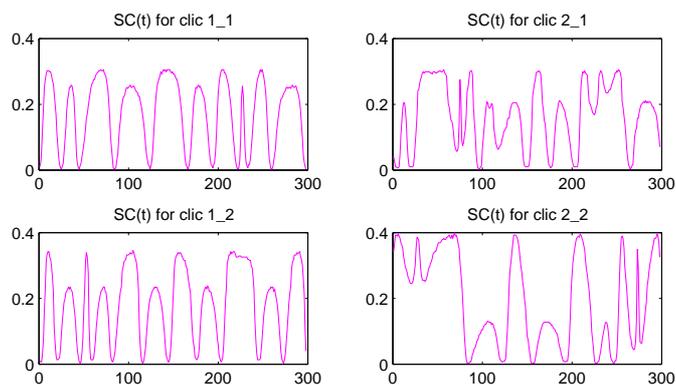


FIG. 7 – Séparation des trains de clics avec $SC(t)$

Ainsi, on observe que pour les clics du deuxième train tous les minima locaux de $SC(t)$ sont proches de zéro, tandis que pour les clics du premier train cette observation n'est plus valable.

4 Conclusion

La méthode RPA se révèle être très intéressante en tant que solution potentielle du problème de l'analyse des signaux transitoires. Ce papier a montré que cette méthode peut s'appliquer avec succès dans la détection de transitoires biologiques (comme les clics produits par des dauphins) et il propose, également, des mesures de quantification qui sont capables de différencier les transitoires. Les résultats obtenus encouragent une étude approfondie du problème de la caractérisation des transitoires à l'aide des distances dans l'espace des phases.

Références

- [1] F.-M. Birleanu, C. Ioana, C. Gervaise, J. Chanussot, A. Serbanescu, G. Serban. « On the recurrence plot analysis method behaviour under scaling transform », Proceedings of IEEE Statistical Signal Processing Workshop (SSP), pp. 793–796, Nice, June 2011.
- [2] F.-M. Birleanu, C. Ioana, A. Serbanescu, J. Chanussot. « A time-distributed phase space histogram for detecting transient signals », Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp. 3844–3847, Prague, May 2011.
- [3] N. Marwan, M. Carmen Romano, M. Thiel, J. Kurths. « Recurrence plots for the analysis of complex systems », *Physics Reports*, vol. 438, pp. 237–329, January 2007.
- [4] J.-P. Eckmann, S. Oliffson Kamphorst, D. Ruelle. « Recurrence plots of dynamical systems », *Europhysics Letters*, vol. 4, no. 9, pp. 973–977, November 1987.
- [5] J.P. Zbilut, A. Giuliani, C.L. Webber Jr. « Recurrence quantification analysis as an empirical test to distinguish relatively short deterministic versus random number series », *Physics Letters A*, vol. 267, pp. 174–178, 2000.