

Nouveaux développements pour la surveillance médicale cardio-pulmonaire par radar Doppler

I. Contexte, positionnement et objectifs

Description des objectifs

Le projet s'articule autour de trois objectifs principaux. Le premier consiste en une étude algorithmique de la séparation aveugle de sources pour des signaux "pseudo-périodiques", en utilisant des recalages temporels distincts (ré-échantillonnage) pour chaque source, grâce à un ou plusieurs capteurs.

Le deuxième objectif vise à mettre en évidence un modèle théorique du phénomène de recalage temporel (ou échantillonnage non-uniforme), en explorant les conditions d'unicité de ce modèle à travers une étude théorique approfondie.

Enfin, le troisième objectif est de réaliser une validation expérimentale en étudiant un système de surveillance non invasive du rythme cardiaque et de la respiration d'un patient, en utilisant une chaîne de transmission à 2,4 GHz.

Mots clés : Non-uniform sampling, underdetermined blind source separation (UBSS), Doppler radar, Cardiopulmonary detection and sensing.

Hypothèses de recherche

Verrous technologiques : Les radars Doppler cardio-pulmonaire présentent plusieurs défis :

- D'un point de vue biologique, la variabilité inter-patient est considérable, rendant la tâche d'autant plus complexe.
- Sur le plan expérimental, on observe que les signaux cardiaques et pulmonaires proviennent quasiment du même espace géométrique, ce qui complique leur séparation.
- De plus, ces deux signaux présentent un recouvrement temporel total. Comme le montrent les mesures, le chevauchement fréquentiel entre eux atteint environ 90%.
- Pour les fréquences cardiaques exemptes de ce recouvrement, le niveau de bruit excède le signal de 20 dB.
- Le signal cardiaque, d'intérêt, se situe en moyenne à -20 dB par rapport au signal pulmonaire.
- Ces signaux sont "quasi"-périodiques, avec des fréquences et des rapports qui varient dans le temps. *Ce qui pourrait sembler être un défi supplémentaire s'avère en réalité être l'angle d'approche ayant permis de développer un algorithme ad hoc dans [4].*

Nous avons l'intention de résoudre tous ces verrous.

Hypothèse forte : le signal cardiaque et le signal respiratoire sont formé par un motif $p(t)$ pseudo-périodique dont la période et la fréquence dépend du temps :

$$r(t) = p(2\pi f(t)t)$$

Cette hypothèse est acceptée et vérifiable sur la base de données réelles PHYSIONET [16], et la modélisation la plus utilisée [12]. En décomposant en série de Fourier le motif temporel $p(t)$, et en modifiant l'axe temporel pour suivre les fluctuations cardiaques, on obtient :

$$r(t) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k \cos(2\pi f(t)t) + b_k \sin(2\pi f(t)t)$$

On remarque que le premier phasor, $k = 1$, a la même fréquence instantanée que le battement cardiaque, et effectuera une rotation complète pendant l'intervalle RR du battement cardiaque. La surveillance de cette première harmonique permet donc de connaître le rythme cardiaque ; Elle peut

aussi être obtenue par une mesure auxiliaire (senseur de doigt). Notre hypothèse de travail est que la connaissance du rythme cardiaque ou pulmonaire permet leur séparation même avec un seul capteur.

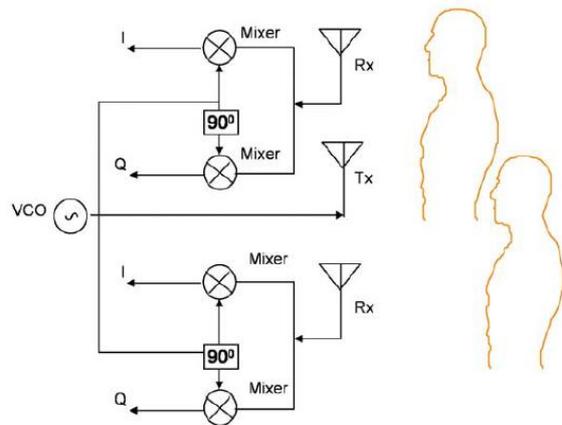
Positionnement du projet par rapport à l'état de l'art

Des radars Doppler pour la surveillance cardiaque [1,17] ont été proposés dans la littérature depuis plusieurs années et des start-up infructueuses ont été créés et ont donc disparues.

Les applications vont de la surveillance médicale [1] (grands brûlés, nourrissons, personnes âgées, apnée du sommeil, syndrome de mort subite du nourrisson), à la recherche de survivant après un tremblement de terre [2], ou la recherche de criminels par « see-through-the-wall » [6]. Actuellement, la détection du signal pulmonaire constitue une limite [18], et l'application du rééchantillonnage aux données cardio-pulmonaires n'as plus été mentionnée depuis [4]. Cependant le champ de l'échantillonnage non-uniforme a beaucoup évolué depuis [13] et a été utilisé à de multiple occasions pour diverses applications : surveillance sonore d'asthme [14], stabilisation de système non-linéaires [15], etc.

Méthodologie

Un radar doppler consiste en une antenne émettant une fréquence pure (ici choisit à 2.4 GHz pour des considérations pratiques) qui rebondit sur le ou les sujet(s) et revient vers un ou plusieurs récepteurs. Après conversion en bande de base, on obtient donc une ou plusieurs séries temporelles.



Un algorithme ad-hoc a déjà été proposé [4] en servant de données auxiliaires comme un senseur de pression sur le doigt du patient. Il n'est pas aveugle et est donc lié à un contexte très spécifique.

L'algorithme utilise l'hypothèse que la fréquence varie lentement autour d'une fréquence moyenne : $f(t) = f_0 + \delta f(t)$, d'où $2\pi f(t)t = 2\pi f_0(t + \delta(t))$, $\delta(t)$ étant une variable aléatoire centrée de faible amplitude qui correspond à un décalage temporel.

La première étape consiste à estimer $\delta(t)$ à partir du signal de référence.

En considérant ce décalage temporel comme un échantillonnage non-uniforme, il devient alors possible de recaler le signal dans le temps. Ce recalage révèle l'apparition d'un peigne de fréquences correspondant à la fréquence fondamentale et à ses harmoniques, voir Figure (1).

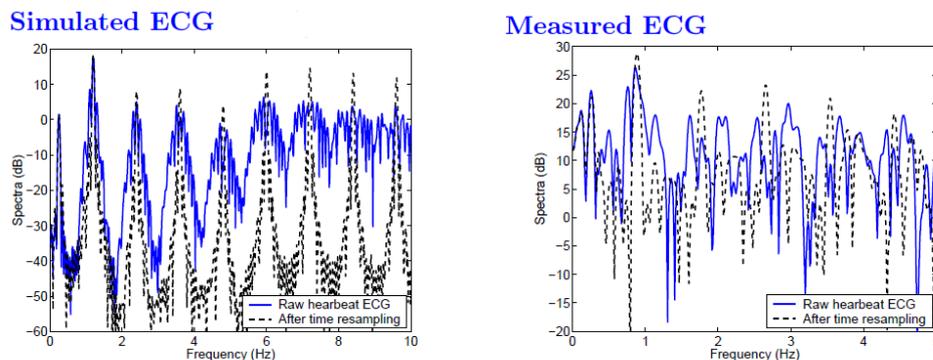


Figure 1 : montre sur deux exemples comment le re-échantillonnage de la série temporelle permet de mettre en évidence les harmoniques du battement cardiaque pour des données simulées et réelles. On obtient ainsi un SNR de 50dB pour l'un et 20dB pour l'autre.

Si l'on filtre ensuite précisément ces fréquences, puis que l'on annule le recalage pour revenir au domaine temporel initial, on sépare alors les deux signaux ; voir la Figure (2) où les deux signaux sont correctement séparés.

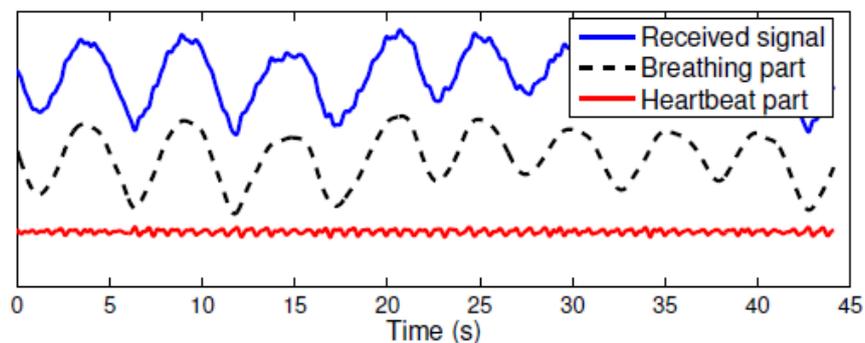


Figure 2 : Test avec séparation du signal cardiaque du signal de respiration.

L'échantillonnage non-uniforme est une méthode où les données sont échantillonnées à des intervalles de temps ou des points irréguliers. Cela permet de capturer plus de détails dans certaines zones d'intérêt (où les variations sont importantes) et moins dans d'autres (où les changements sont minimales). Cette technique est souvent utilisée pour réduire la quantité de données tout en conservant les informations les plus pertinentes. Ici, nous nous proposons de réfléchir à une démarche inverse où par la mesure de données, nous revenons à la détermination du tempo échantillonnage.

Plus-value du projet

Après la conception d'un algorithme fonctionnant en aveugle, permettant de séparer des signaux présentant des recouvrements temporels et fréquentiels et provenant de la même direction, ce projet fournira également une justification théorique. Les conditions d'unicité obtenues permettront alors de définir les limites d'utilisation de cette méthode et, potentiellement, d'envisager des applications dans d'autres domaines, comme celui des machines tournantes.

II. Bibliographie

- [1] Li, C., Lubecke, V. M., Boric-Lubecke, O., & Lin, J. (2013). A review on recent advances in Doppler radar sensors for noncontact healthcare monitoring. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 61(5), 2046-2060.
- [2] Boric-Lubecke, O., Host-Madsen, A., & Lubecke, V. (2007). "Determining presence and/or physiological motion of one or more subjects within a doppler radar system." *USPO No. 11/803,653*.
- [3] **Petrochilos, N.**, Rezk, M., Host-Madsen, A., Lubecke, V., & Boric-Lubecke, O. (2007, April). Blind separation of human heartbeats and breathing by the use of a Doppler radar remote sensing. In *Acoustics, Speech and Signal Processing, 2007. ICASSP 2007.* (Vol. 1, pp. I-333). IEEE.
- [4] Mostafanezhad, I., Massagram, W., Hafner, **N.**, **Petrochilos, N.**, Boric-Lubecke, O., Høst-Madsen, A., & Lubecke, V. (2007, August). Comparison of heart rate estimators for Doppler radar monitoring. In *IASTED Int. Conference on Signal and Image Processing* (pp. 443-447). ACTA Press.

III. Bibliographie supplémentaire

- [5] Høst-Madsen, A., **Petrochilos, N.**, Boric-Lubecke, O., Lubecke, V.M., Park, BK., Zhou, Q. (2008). Signal Processing Methods for Doppler Radar Heart Rate Monitoring. In: Mandic, D. (eds) *Signal Processing Techniques for Knowledge Extraction and Information Fusion*. Springer, Boston, MA.

- [6] D. P. Nguyen, **N. Petrochilos**, A. Høst-Madsen, V. Lubecke, and O. Borić-Lubecke, "A versatile through-the-wall doppler radar using bss algorithms," in *Proc. of APS 2007*, (Honolulu, Hawai'i), 10-15 June 2007.
- [7] L. de Guenin, P. Rosson, **N. Petrochilos**, E. Moreau, "Single receiver LTE Passive radar system using signal reconstruction for UAV detection", IET Radar, Sonar, and Navigation, special edition on Multistatics and Passive radar. Accepted with minor revision on 01/10/2024.
- [8] S. Zaghloul, **N. Petrochilos**, and M. Mboup, "An efficient gradient descent approach to separate a mixture of secondary surveillance radar replies based on disjoint component analysis," IET Radar, Sonar and Navigation, pp 1-11, 2024.
- [9] **E. Moreau** and T. Adali, Blind Identification and Separation of Complex-valued Signals, FOCUS Digital Signal and Image Processing Series, Wiley-ISTE, 2013.
- [10] G. Chabriel, M. Kleinstaubler, **E. Moreau**, H. Shen, P. Tichavsky and A. Yeredor, "Joint Matrices Decompositions and Blind Source Separation. A Survey of Methods, Identification and Applications ", IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 31, No. 3, pp 34-43, May 2014.
- [11] M. Castella and **E. Moreau**, "New kurtosis optimization schemes for MISO equalization", IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 60, No. 3, pp 1319-1330, March 2012.
- [12] P. E. McSharry, G. D. Clifford, L. Tarassenko, and L. Smith, "A dynamical model for generating synthetic electrocardiogram signals," IEEE Trans. Biomedical Engineering, vol. 50(3), pp. 289–294, March 2003.
- [13] Marvasti, Farokh, ed. *Nonuniform sampling: theory and practice*. Springer Science, 2012.
- [14] D. Oletic and V. Bilas, "Energy-Efficient Respiratory Sounds Sensing for Personal Mobile Asthma Monitoring," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 23, pp. 8295-8303, Dec.1, 2016.
- [15] M. D. Ferdinando, B. Castillo-Toledo, S. D. Gennaro and P. Pepe, "Robust Quantized Sampled-Data Stabilization for a Class of Lipschitz Nonlinear Systems With Time-Varying Uncertainties," in *IEEE Control Systems Letters*, vol. 6, pp. 1256-1261, 2022.
- [16] A. L. Goldberger, L. A. N. Amaral, L. Glass, J. M. Hausdorff, P. Ch. Ivanov, R. G. Mark, J. E. Mietus, G. B. Moody, C.-K. Peng, and H. E. Stanley, "PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a new research resource for complex physiologic signals," *Circulation*, vol. 101, no. 23, pp. e215– e220, 2000 (June 13).
- [17] A. Droitcour, B. K. Park, C. El Hourani, T. Shing, A. Vergara, "SYSTEMS AND METHODS FOR POINT IN TIME MEASUREMENT OF PHYSIOLOGIC MOTION", U.S. Patent 2010/0240999 A1, 2010.
- [18] Beltrão, Gabriel and Alaei-Kerahroodi, Mohammad and Schroeder, Udo and Tatarinov, Dimitri and R., Bhavani Shankar M, "Nonlinear Least Squares Estimation for Breathing Monitoring Using FMCW Radars," 05-07 April 2022, pp. 241-244, in EURAD, London (UK).