

Comparaison d'estimateurs de fréquence instantanée et de formes d'ondes pour la vibrométrie laser impulsionnelle

JULIEN TOTEMS¹, VERONIQUE JOLIVET¹, JEAN-PHILIPPE OVARLEZ¹, NADINE MARTIN²

¹ ONERA The French Aerospace Lab
Chemin de la Hunière, 91761 Palaiseau Cedex, France

² Gipsa-Lab
961 rue de la Houille Blanche, Domaine Universitaire BP 46, F-38402 Saint-Martin d'Hères, France

¹julien.totems@onera.fr, veronique.jolivet@onera.fr, jean-philippe.ovarlez@onera.fr
²nadine.martin@gipsa-lab.inpg.fr

Travaux financés par DGA/MRIS, suivis par B. Desruelles

Résumé – La mesure de vibrations à longue portée par lidar cohérent hétérodyne suppose une démodulation de fréquence en présence de bruit additif et de bruit multiplicatif complexe. Nous comparons plusieurs modes d'émission laser adaptés à cette mesure ainsi que des méthodes de traitement du signal, voulues robustes aux bruits rencontrés. Nous avons simulé les performances de différents estimateurs de fréquence instantanée pour la démodulation du signal reçu, en prenant pour la première fois en compte une émission impulsionnelle à multiplets, que nous comparons aux modes d'émission classiques, continu et à doublets d'impulsions. Nous proposons un estimateur basé sur le maximum de vraisemblance ainsi qu'une pseudo représentation temps-fréquence pour le mode à multiplets, qui, associés, constituent une démodulation performante et robuste vis-à-vis des bruits, comme le montre la simulation. A puissance moyenne émise égale, le mode impulsionnel par multiplets avec le traitement proposé obtient des performances équivalentes à celles des modes classiques, continu ou à doublets, dans des conditions de fort bruit additif, et supérieures au mode à doublets lorsque le bruit multiplicatif complexe domine. Il peut même présenter un avantage par rapport au mode continu, dans les conditions de bruits forts et de large bande d'analyse rencontrées dans la réalité.

Abstract – Long range vibration sensing using a coherent heterodyne laser radar implies a frequency demodulation in presence of additive and complex multiplicative noise. We compare various waveforms suited to this measurement as well as signal processing methods, looking for the most robust to these noise conditions. We have simulated the performance of various instantaneous frequency estimators for the demodulation of the received signal, taking into account poly-pulse emission for the first time, and comparing it to classical Continuous Wave (CW) and pulse-pair waveforms. We propose a maximum likelihood-based estimator and a pseudo time frequency representation for poly-pulse mode, which, when associated, constitute an efficient and robust demodulation method, as shown by our simulations. With the same mean laser power, poly-pulse mode gets the same performance as classical CW and pulse-pair modes when additive noise is strong, and clearly overcomes pulse-pair mode in case of dominant complex multiplicative noise. It can even be advantageous over CW mode in the strong noise and large analysis bandwidth conditions encountered in practice.

1 Position du problème

La mesure de vibrations par lidar cohérent hétérodyne consiste à faire interférer l'onde laser rétrodiffusée par une cible avec l'onde laser émise, afin d'obtenir un signal d'interférence dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse de la cible (de par l'effet Doppler). Cette technique est appliquée, par exemple, au diagnostic structurel de bâtiments [1] ou à l'identification de cibles à des fins militaires [2]. Dans les deux cas, il s'agit d'identifier les modes de vibration de la surface visée, après une démodulation de fréquence du signal.

L'un des enjeux actuels de la vibrométrie est d'accroître la portée des instruments, tout en restant compact et portable. A cette fin, on peut envisager, au lieu de l'émission laser continue classique, une émission impulsionnelle, qui permet d'augmenter la puissance

crête du signal, pour une même puissance moyenne émise, et d'utiliser des instruments pourvus d'une même optique pour l'émission et la réception. Mais jusqu'ici, les performances du mode impulsionnel, actuellement par doublets d'impulsions, sont limitées par la sensibilité au bruit de phase et par les ambiguïtés sur la vitesse, ambiguïtés qui apparaissent si la séparation entre les impulsions est mal choisie [3]. Entre mode continu et impulsionnel à doublets, à puissance moyenne égale, la question est : vaut-il mieux disposer de beaucoup d'échantillons à signal faible, ou de peu d'échantillons à signal fort ? Gatt et al. [4] ont évoqué le potentiel des multiplets d'impulsions pour réaliser un compromis et pallier ces problèmes, sans discuter du traitement du signal associé. Dans cet article, nous comparons différentes stratégies de traitement sur ces formes d'ondes, et évaluons leurs performances par rapport aux modes d'émission classiques, le mode

continu et le mode par doublets d'impulsions, dans des conditions de bruit multiplicatif fort (ie rapidement variable), *a priori* défavorables au mode impulsionnel.

Le signal peut s'exprimer, en notation complexe :

$$\begin{aligned} i_s(t) &= \mu(t) \cdot i_{het}(t) + i_b(t) \\ &= \mu(t) \cdot i_0 \cdot m(t) \cdot \exp(j\varphi_{vib}(t)) + i_b(t) \end{aligned} \quad (1)$$

où $\mu(t)$ est la modulation d'amplitude à l'émission ($\mu(t) = 1$ en mode continu), $i_{het}(t)$ est le courant hétérodyne, d'amplitude moyenne i_0 , $m(t)$ est un bruit multiplicatif complexe, gaussien centré et circulaire, de variance unité, $\varphi_{vib}(t) = 4\pi \cdot x_{vib}(t)/\lambda$ est la modulation de phase causée par la vibration $x_{vib}(t)$ de la surface visée, à la longueur d'onde λ , et $i_b(t)$ est un bruit additif complexe, gaussien centré circulaire et blanc, de variance σ_b^2 . Nous notons B_m l'inverse du temps de cohérence du bruit multiplicatif, tel que sa fonction d'autocorrélation s'écrit : $\Gamma_m(\tau) = \exp(-B_m^2 \tau^2)$, et CNR (Carrier to Noise Ratio, ie rapport porteuse à bruit) la valeur $\langle |\mu_{max} \cdot i_{het}|^2 \rangle / \sigma_b^2 = \mu^2 i_0^2 / \sigma_b^2$. La bande de bruit multiplicatif B_m de plusieurs kiloHertz, est du même ordre de grandeur que celle de la modulation de fréquence liée à la vibration à estimer (vitesses de l'ordre du mm/s). Nous cherchons à déterminer $v_{vib}(t) = dx_{vib}(t)/dt$, proportionnelle à la fréquence du signal. Il s'agit donc d'une estimation de fréquence instantanée en présence de bruits additif et multiplicatif complexe.

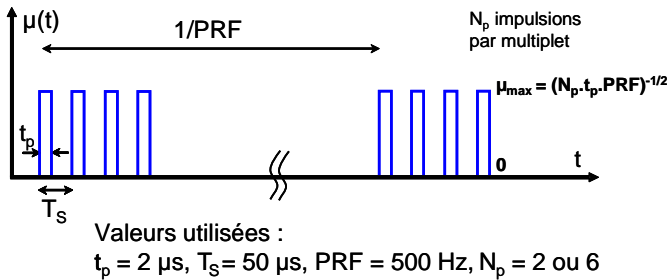


Figure 1 : Paramètres de la modulation d'amplitude en mode impulsionnel

Les modulations en amplitude de l'émission effectuées en mode impulsionnel sont simulées par un découpage $\mu(t)$, dont les paramètres sont spécifiés en figure 1. Nos hypothèses de comparaison entre les différentes formes d'onde (continu, doublets, multiplets) supposent en particulier une puissance laser moyenne émise identique. L'amplitude crête $\mu_{max} i_0$ du signal est donc augmentée en mode impulsionnel.

2 Estimateurs de fréquence instantanée adaptés à la vibrométrie

Le traitement du signal a pour but, dans un premier temps, d'estimer la fréquence instantanée du signal ($f_{inst}(t) = 2v_{vib}(t)/\lambda$). Nous présentons ici différents estimateurs de fréquence instantanée tirés de la littérature ou que nous avons développés.

Nous avons mis en œuvre, en mode continu, trois estimateurs classiques :

- le barycentre des colonnes d'un spectrogramme, amélioré pour éliminer le biais créé par le bruit de fond en circularisant la moyenne (SpectroGram Centroid, SGC) [5] :

$$\hat{f}_{inst}(t) = \frac{B}{2\pi} \arg \left(\int_B SG(t, f) \cdot \exp \left(j 2\pi \frac{f}{B} \right) df \right) \quad (2)$$

où $SG(t, f)$ désigne le spectrogramme et B la bande d'analyse, à adapter à celle occupée par le signal.

- l'ajustement du spectre à court terme (Lee's Spectral Matching, LSM) [6], calculable également sur le spectrogramme, sous forme d'une corrélation :

$$\hat{f}_{inst}(t) = \arg \max_f (S_{ref}(f) \otimes SG(t, f)) \quad (3)$$

où $S_{ref}(f)$ est un spectre de référence établi grâce à la connaissance de B_m , que l'on peut évaluer à partir des fluctuations de l'amplitude du signal.

- le moyennage à court terme de la différence de phase entre échantillons consécutifs (Autocorrelation First Lag, AFL) [3] :

$$\hat{f}_{inst}(t) = \frac{1}{2\pi\Delta t} \arg \left(\sum_{k=1}^K i_s(t+k\Delta t) i_s^*(t+(k-1)\Delta t) \right) \quad (4)$$

où Δt est la période d'échantillonnage.

Les doublets d'impulsions sont traités par différence de phase entre les impulsions reçues (Pulse-Pair, noté PP). Il est à noter que l'on suppose connaître le moment d'arrivée des impulsions (ie la distance de la cible) afin de les fenêtrer temporellement :

$$\hat{f}_{inst}(t = k / PRF) = \frac{1}{2\pi T_s} \arg \left(\langle i_s \rangle_{k,2} \langle i_s \rangle_{k,1}^* \right) \quad (5)$$

où k entier positif est le « numéro » du doublet et $\langle i_s \rangle_{k,l}$ est la moyenne du signal sur l'impulsion l du doublet k .

L'estimateur le plus directement applicable aux multiplets consiste à moyennner la différence de phase entre impulsions consécutives (Poly Pulse-Pair, PPP) :

$$\hat{f}_{inst}(t = k / PRF) = \frac{1}{2\pi T_s} \arg \left(\sum_{l=2}^{N_p} \langle i_s \rangle_{k,l} \langle i_s \rangle_{k,l-1}^* \right) \quad (6)$$

Différents travaux comme [6] insistent sur l'intérêt de différencier aussi la phase entre échantillons non consécutifs ; cela revient à une régression linéaire de la phase de l'autocorrélation, soit à la recherche du maximum de sa transformée de Fourier (T.F.).

Nous avons donc étudié une seconde classe d'estimateurs, dits spectraux, le premier étant tout simplement basé sur le maximum de la T.F. de l'autocorrélation (Correlation Fourier Transform, CFT) :

$$\hat{f}_{inst}(t = k / PRF) = \arg \max_f \left(\left| \int \Gamma_{i_s,k}(\tau) \cdot h(\tau) \cdot \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \right| \right) \quad (7)$$

où $\Gamma_{i_s,k}(\tau)$ est la fonction d'autocorrélation du multiplet k , et $h(\tau)$ une fenêtre appliquée sur celle-ci pour sélectionner et pondérer les retards significatifs.

Nous mettons aussi en œuvre l'estimateur consistant à rechercher le maximum du spectre du multiplet reçu, multiplié par le multiplet émis, et qui correspond, en présence de bruit additif blanc, à l'estimateur du maximum de vraisemblance (MV) et au filtrage adapté des radars (Poly Pulse Spectrum, PPS) :

$$\hat{f}_{inst}(t = k / PRF) = \arg \max_f \left(\left| \int_{\text{Multiplet } k} i_s(t) \cdot \mu(t) \cdot \exp(-j2\pi ft) dt \right|^2 \right) \quad (8)$$

où la T.F. est restreinte au multiplet k .

Puisque le PPS ne peut plus être l'estimateur du MV étant donnée la présence de bruit multiplicatif complexe, nous proposons un nouvel estimateur basé sur le MV de la fréquence instantanée du multiplet, noté IFL (Instantaneous Frequency Likelihood), qui prend en compte le bruit multiplicatif :

$$\hat{f}_{inst}(t = k / PRF) = \arg \max_f \left(- (i_{s,k} e^{-j2\pi ft})^H \cdot Q_S^{-1} \cdot (i_{s,k} e^{-j2\pi ft}) \right) \quad (9)$$

où Q_S est la somme des matrices de covariance des bruits ($Q_S(i,j) = \text{CNR} \exp(-B_m^2(i-j)^2 \Delta t^2) + \delta(i-j)$), et $i_{s,k}$ est le signal restreint au multiplet k . Un changement de variable proposé par Ghogho et al. [7] nous permet cette écriture de la vraisemblance. Le principe de cet estimateur est de chercher la fréquence f pour laquelle, en décalant le signal en fréquence d'une valeur $-f$, le résultat a une matrice de covariance la plus proche possible de celle des bruits seuls. Cela nécessite la connaissance des paramètres des bruits, mais ceux-ci peuvent être évalués à partir de l'amplitude du signal.

Pour les trois estimateurs spectraux sur multiplets, nous proposons par ailleurs de revenir à une pseudo représentation temps-fréquence (RTF), en juxtaposant en colonnes les fonctions à maximiser pour chaque multiplet. Une telle représentation présente l'avantage de conserver l'information sur le signal. Par exemple, en cas de fort bruit additif, le suivi de maxima d'une colonne à l'autre (d'un multiplet à l'autre), peut discriminer le pic à la fréquence instantanée du signal, des pics transitoires dus au bruit qui peuvent temporairement être plus forts. Nous avons mis en œuvre une technique de lissage temporel pour montrer le potentiel de ces traitements (alors notés PPS-s, CFT-s, IFL-s). Cette amélioration est aussi appliquée au spectrogramme en continu (SGC-s).

3 Simulations

3.1 Etude des performances locales de IFL

Pour vérifier l'intérêt de l'estimateur IFL, nous testons ses performances pour la mesure de vitesse à partir d'un multiplet reçu, et les comparons à l'optimum théorique et à celles des estimateurs classiques PP et PPP. La borne de Cramér-Rao sur l'erreur d'une mesure de vitesse est évaluée numériquement à partir de l'expression suivante :

$$\sigma_v \geq [\text{tr} \left(\left(\frac{\partial Q}{\partial f} Q^{-1} \right)^2 \right)]^{-1/2} \quad (10)$$

$$\text{avec } Q: Q(i, j) = \mu^2 i_0 e^{-B_m^2(i-j)^2 \Delta t^2} \cdot e^{j2\pi f(i-j)\Delta t} + \sigma_b^2 I \quad (11)$$

où Q , matrice de covariance du signal, est restreinte à ses éléments non-nuls. L'effet des variations de puissance du signal au cours du temps ("fading") a dû être simulé pour mieux prédire l'erreur sur la vitesse.

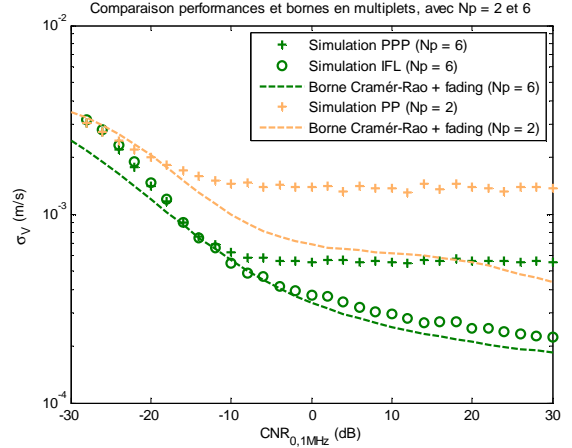


Figure 2 : Comparaison des performances simulées et des bornes théoriques de précision de vitesse sur une forme d'onde reçue (bruit multiplicatif fort : $B_m = 5$ kHz)

En figure 2, nous voyons que théorie et simulation s'accordent sur une meilleure précision de mesure avec des multiplets, plus étendus dans le temps, qu'avec les doublets, comme l'on s'y attendait. Par ailleurs, en simulant 30 000 réalisations de formes d'ondes reçues, nous remarquons que l'estimateur IFL suit la borne à haut CNR, alors que les démodulations PP ou PPP sont limités par le bruit multiplicatif complexe fort ($B_m = 5$ kHz). Dans ces conditions, l'estimateur IFL proposé, qui tient compte du bruit multiplicatif, permet un gain important.

3.2 Simulations comparatives des performances globales

La borne de Cramér-Rao n'étant pas significative en présence de bruits forts, nous comparons au final nos formes d'ondes par la simulation de leurs performances sur la mesure complète d'une vibration au cours du temps, en appliquant les différents traitements présentés.

Nous utilisons comme critère le rapport signal à bruit final (SNR), évalué sur le spectre de vibration mesuré comme le rapport de puissance entre les pics dus aux modes de vibration et le plancher de bruit. La vibration contient 5 modes à des fréquences non multiples de 0 à 120 Hz, avec des vitesses de l'ordre du mm/s. La valeur de SNR retenue correspond à la moyenne des SNR des 5 modes ($\text{SNR} = \sum_i \text{DSP}_{\text{pic},i} / 5 \text{DSP}_{\text{bruit}}$). La bande de bruit multiplicatif B_m est fixée à 5 kHz. La bande d'analyse est adaptée à la vibration étudiée. Pour chaque résultat donné, nous moyennons 200 réalisations.

En mode impulsif, à bruit additif fort (CNR de -25 dB dans 1 MHz, voir figure 3), l'estimateur IFL avec lissage temporel de la RTF est légèrement meilleur que

les autres traitements sur multiplets ou doublets d'impulsions. Le mode continu obtient un SNR équivalent, voir supérieur de 5 dB aux autres traitements lorsque qu'un lissage du spectrogramme est effectué (suppression du bruit de fond du spectrogramme). Lorsque le bruit multiplicatif domine (CNR de 20 dB dans 1 MHz, voir figure 4), la supériorité du mode continu est évidente (moyennage efficace du bruit de phase sur de nombreuses mesures), mais le SNR obtenu par l'estimateur IFL, qui prend en compte ce bruit, gagne 5 dB par rapport aux traitements adaptés au seul bruit additif, et près de 10 dB par rapport au mode doublets. Nous avons diminué la sensibilité du mode impulsif au bruit de phase, avec un temps de calcul comparable à celui du traitement en mode continu.

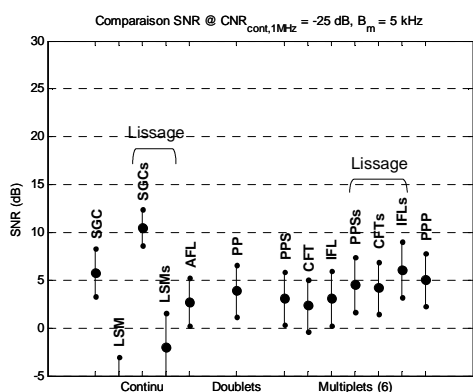


Figure 3 : Performances des estimateurs sous fort bruit additif

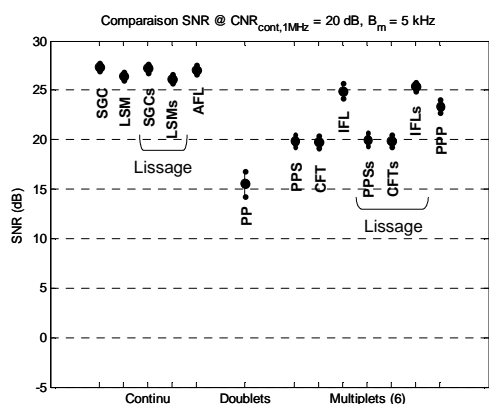


Figure 4 : Performances des estimateurs à bruit multiplicatif dominant

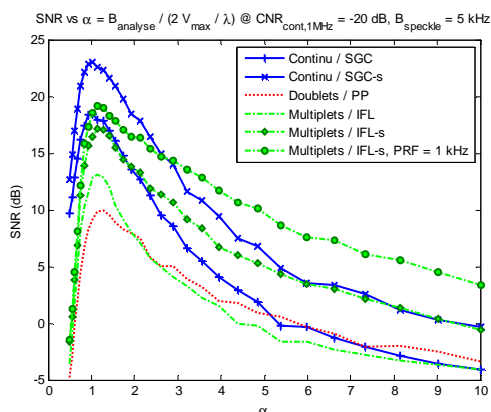


Figure 5 : Tenue des meilleurs traitements à l'élargissement de la bande d'analyse ($\alpha = B_{\text{ana}}/B_{\text{signal}}$, paramètre d'adaptation)

En pratique, sans connaissance *a priori* des vitesses de vibration, il faudra choisir une bande d'analyse large. Alors qu'elle était parfaitement adaptée dans les simulations précédentes, nous l'avons fait varier en figure 5, et montrons qu'à bruit additif fort, le lissage temporel permet d'augmenter la robustesse des traitements sur RTF, qui deviennent moins sensibles à l'élargissement de la bande. Le mode continu reste meilleur, mais en augmentant la fréquence de répétition des multiplets pour mieux moyennner le bruit de phase, le mode impulsif à multiplets peut avoir un avantage malgré la perte en puissance crête des impulsions.

De manière générale, l'utilisation d'une RTF et de méthodes conjuguant l'information de plusieurs colonnes pour en extraire la vibration semble une piste prometteuse pour plus de robustesse au bruit et augmenter la portée de la vibrométrie laser, que ce soit en mode continu ou impulsif.

4 Conclusion

Nous avons simulé et comparé les performances de différents estimateurs de fréquence instantanée pour le traitement du signal en vibrométrie par lidar cohérent, dans des conditions de bruit multiplicatif complexe fort. Les résultats indiquent que l'estimateur proposé basé sur une pseudo représentation temps-fréquence de la vraisemblance surpasse les autres estimateurs étudiés pour le mode impulsif à multiplets. Nous confirmons l'avantage de ce mode d'émission par rapport au mode classique à doublets d'impulsions, particulièrement en robustesse au bruit multiplicatif complexe rencontré. Le mode continu reste en général le plus performant dans le cas de vibrations large bande avec un bruit multiplicatif de largeur comparable, mais le mode impulsif, tel que nous l'avons amélioré, est plus robuste pour la mesure de vibrations sans *a priori*. Nos travaux ultérieurs se concentreront sur l'extraction optimale de la vibration à partir d'une RTF.

5 Références

- [1] V. Jolivet, P. Gueguen et al, *On the full scale dynamic behaviour of RC-buildings using coherent laser radar vibrometer*, 14th World Conf. on Earthquake Engineering., Beijing (2008)
- [2] W. Kranz, *Target Classification by Laser Vibration Sensing*, SPIE **1181** (1989)
- [3] C. Hill, M. Harris et al, *Fiber-based 1.5 μm lidar vibrometer in pulsed and CW modes*, App. Opt. **46** (2007)
- [4] P. Gatt, S. W. Henderson et al, *Poly-pulse Waveforms for Coherent Lidar Measurements*, Coh. Opt. Techno. & App. Conf., Whistler, Canada (2006)
- [5] A. L. Kachelmyer & K. I. Schultz, *Spectrogram Processing of Laser Vibration Data*, SPIE **1936**, (1993)
- [6] D. G. Youmans, *Target Spectral Estimation using Direct Detection and Coherent Detection Ladar*, SPIE **5791** (2005)
- [7] M. Ghogho, A. K. Nandi et al, *Cramér-Rao Bounds and Maximum Likelihood Estimation for Random Amplitude Phase-Modulated signals*, IEEE Trans. on Sig. Proc. **49** (2001)