



HAL
open science

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

Julien Totems, Véronique Jolivet, Jean-Philippe Ovarlez, Nadine Martin

► **To cite this version:**

Julien Totems, Véronique Jolivet, Jean-Philippe Ovarlez, Nadine Martin. Comparaison d'estimateurs de fréquence instantanée et de formes d'ondes pour la vibrométrie laser impulsionnelle. GRETSI 2009 - XXIIème Colloque francophone de traitement du signal et des images, Sep 2009, Dijon, France. hal-00385652

HAL Id: hal-00385652

<https://hal.science/hal-00385652v1>

Submitted on 19 May 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

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

Thèmes – Applications, Analyse spectrale / temps-fréquence, Radar et Sonar, Contrôle non-destructif / Surveillance

Problème traité – 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 recherchons conjointement les formes d'onde optimales pour cette mesure et un traitement du signal robuste aux bruits rencontrés.

Originalité – Nous avons évalué par simulation les performances de différents estimateurs de fréquence instantanée existants pour la démodulation du signal vibrométrique. Pour la première fois, nous prenons en compte une émission impulsionnelle à multiplets, que nous comparons aux autres modes d'émission. Nous avons développé un estimateur basé sur une pseudo représentation temps-fréquence de la vraisemblance, qui constitue, pour les multiplets, une démodulation performante et plus robuste vis-à-vis des bruits que les traitements de la littérature.

Résultats – Les simulations menées montrent qu'à puissance moyenne émise égale, le mode impulsionnel par multiplets avec notre traitement a des performances équivalentes à celles des modes classiques, à émission continue ou à doublets d'impulsions, dans des conditions de fort bruit additif. Lorsque le bruit multiplicatif complexe domine, ce mode est plus performant qu'en émission à doublets, car moins sensible au bruit de phase. Grâce à sa plus grande robustesse au bruit additif, 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, lorsqu'il est couplé avec le traitement que nous avons développé.

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 structural 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. 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. Mais jusqu'ici, les performances du mode impulsionnel, actuellement par doublets d'impulsions, sont limitées par sa 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]. Gatt et al. [4] ont montré le potentiel des multiplets d'impulsions pour pallier ces problèmes, sans décrire le traitement du signal associé. Nous comparons différentes stratégies de traitement (non paramétriques) 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.

Le signal peut s'exprimer de la manière suivante, en notation complexe :

$$i_s(t) = \mu(t) \cdot [i_{het}(t) + i_b(t)] = \mu(t) \cdot [i_0 \cdot m(t) \cdot \exp(j\varphi_{vib}(t)) + i_b(t)] \quad (1)$$

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 $\langle |i_{het}|^2 \rangle / \sigma_b^2 = i_0^2 / \sigma_b^2$. 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. Nous cherchons à déterminer $v_{\text{vib}}(t) = dx_{\text{vib}}(t)/dt$, proportionnelle à la fréquence instantanée du signal. Il s'agit donc d'une estimation de fréquence instantanée en présence de bruits additif et multiplicatif complexe.

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, multiplets) supposent en particulier une puissance laser moyenne émise identique. L'amplitude crête du signal est donc augmentée en mode impulsionnel ($\mu(t) = \sqrt{1/(N_p t_p \text{ PRF})}$ ou 0).

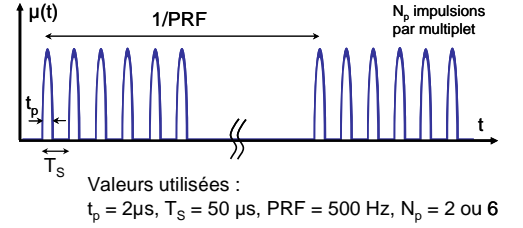


Figure 1 : Paramètres de la modulation d'amplitude en mode impulsionnel

2 Estimateurs de fréquence instantanée adaptés à la vibrométrie

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

Tab 1 : Récapitulatif des estimateurs étudiés

| | | |
|-----------------|---------------------------|---|
| Mode continu | Autocorrelation First Lag | $\hat{f}_{\text{inst}}(t) = \frac{1}{2\pi\Delta t} \arg\left(\sum_{k=1}^K i_s(t+k\Delta t) i_s^*(t+(k-1)\Delta t)\right)$ |
| | SpectroGram Centroid | $\hat{f}_{\text{inst}}(t) = \frac{B}{2\pi} \arg\left(\int_B SG(t, f) \cdot \exp\left(j2\pi \frac{f}{B}\right) df\right)$ (B : bande d'analyse) |
| | Lee's Spectral Matching | $\hat{f}_{\text{inst}}(t) = \arg \max_f (S_{\text{ref}}(f) * SG(t, f))$ (S_{ref} : spectre de référence) |
| Mode doublets | Pulse-Pair | $\hat{f}_{\text{inst}}(t = k / \text{PRF}) = \frac{1}{2\pi T_s} \arg(\langle i_s \rangle_{k,2} \langle i_s \rangle_{k,1}^*)$ ($\langle i_s \rangle_{k,l}$: signal moy. sur l'imp. l du multiplet k) |
| Mode multiplets | Poly Pulse-Pair | $\hat{f}_{\text{inst}}(t = k / \text{PRF}) = \frac{1}{2\pi T_s} \arg\left(\sum_{l=2}^{N_p} \langle i_s \rangle_{k,l} \langle i_s \rangle_{k,l-1}^*\right)$ |
| | Correlation FT | $\hat{f}_{\text{inst}}(t = k / \text{PRF}) = \arg \max_f \left(\left \int \Gamma_{i_s,k}(\tau) \cdot f(\tau) \cdot \exp(-j2\pi f \tau) d\tau \right \right)$ |
| | Poly Pulse Spectrum | $\hat{f}_{\text{inst}}(t = k / \text{PRF}) = \arg \max_f \left(\left \int_{\text{Multiplet } k} i_s(t) \cdot \mu(t) \cdot \exp(-j2\pi f t) dt \right \right)$ |
| | Inst. Freq. Likelihood | $\hat{f}_{\text{inst}}(t = k / \text{PRF}) = \arg \max_f \left(-\text{Re}(i_{s,k} e^{-j2\pi f t})^H \cdot Q \cdot \text{Re}(i_{s,k} e^{-j2\pi f t}) - \text{Im}(i_{s,k} e^{-j2\pi f t})^H \cdot Q \cdot \text{Im}(i_{s,k} e^{-j2\pi f t}) \right)$ (Q = $Q_m + Q_{\text{ib}}$, somme des matrices de covariance des bruits additif et multiplicatif) |

Nous avons mis en œuvre, en mode continu, trois estimateurs classiques : le moyennage à court terme de la différence de phase entre échantillons consécutifs (Autocorrelation First Lag, AFL) [3], 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], et l'ajustement du spectre à court terme (Lee's Spectral Matching, LSM) [6].

Les doublets d'impulsions sont traités par différence de phase entre les impulsions reçues (Pulse-Pair, noté PP).

L'estimateur le plus directement applicable aux multiplets consiste à moyenniser la différence de phase entre impulsions consécutives (Poly Pulse-Pair, PPP). Différents travaux comme [6] insistent sur l'intérêt de différencier aussi la phase entre échantillons non consécutifs ; ce problème revient à une régression linéaire de la phase de l'autocorrélation, c'est-à-dire 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). Nous avons aussi mis 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, au filtrage adapté des radars (Poly Pulse Spectrum, PPS). Puisque le PPS ne peut être optimal étant donnée la nature des bruits, nous proposons, à partir de [7], un nouvel estimateur basé sur le maximum de vraisemblance de la fréquence instantanée du multiplet, noté IFL (Instantaneous Frequency Likelihood), qui prend en compte le bruit multiplicatif.

Pour ces trois estimateurs sur multiplets, nous construisons une pseudo représentation temps-fréquence (RTF), en juxtaposant en colonnes les fonctions à maximiser de chaque multiplet. 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. Nous avons mis en œuvre une technique simple, 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 Résultats des simulations

Grâce à un simulateur du signal hétérodyne, nous avons qualifié les estimateurs présentés, sur le critère du 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. La bande de bruit multiplicatif est fixée à $B_m = 5$ kHz. La bande d'analyse est adaptée à la vibration étudiée. Pour chaque résultat donné, nous moyennons 200 réalisations de SNR.

En mode impulsionnel, à bruit additif fort (CNR de -25 dB dans 1 MHz, voir figure 2), 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 3), 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 bien diminué la sensibilité du mode impulsionnel au bruit de phase.

En pratique, sans connaissance *a priori* des vitesses de vibration, il faudra choisir une bande d'analyse large. Nous 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 (voir figure 4). Le mode continu reste meilleur, mais en augmentant la fréquence de répétition des multiplets pour mieux moyenner le bruit de phase, le mode impulsionnel à multiplets peut avoir un avantage malgré la perte en puissance crête des impulsions.

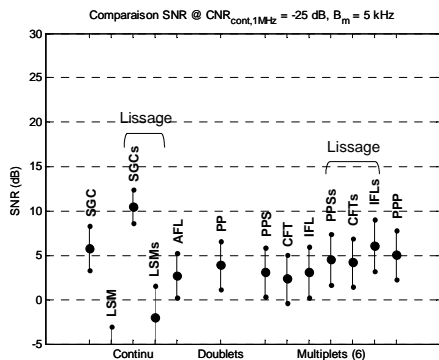


Figure 2 : Performances des estimateurs sous fort bruit additif

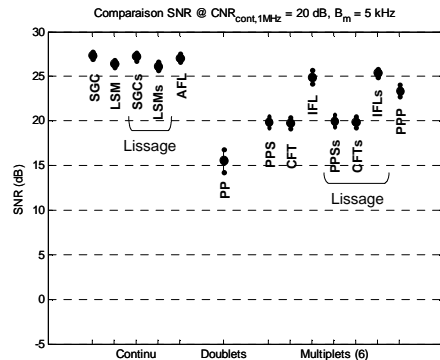


Figure 3 : Performances des estimateurs à bruit multiplicatif dominant

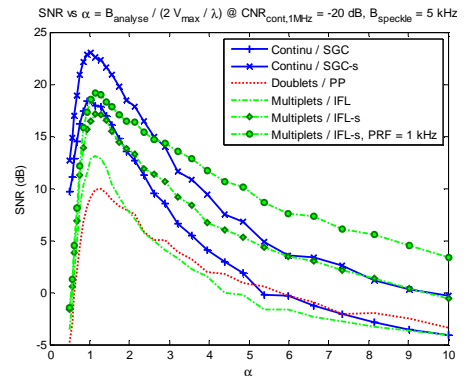


Figure 4 : Tenue des meilleurs traitements à l'élargissement de la bande d'analyse

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. Les résultats indiquent que l'estimateur proposé basé sur une pseudo représentation temps-fréquence de la vraisemblance surpasse les autres estimateurs pour le mode impulsionnel 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 impulsionnel, 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 de la 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 continuous 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. Kachemyer and 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)