

SOURCES OPTIQUES A 10 ET 20 GHz BASÉES SUR LA COMPENSATION SPECTRALE D'UNE PHASE TEMPORELLE SINUSOÏDALE

Ugo Andral, Bertrand Kibler, Julien Fatome et Christophe Finot

Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, UMR CNRS 6303, Université de Bourgogne-Franche-Comté, 9 avenue Alain Savary, BP 47870, 21078 Dijon Cedex, France

hugo.andral@u-bourgogne.fr

RÉSUMÉ

Nous introduisons théoriquement et démontrons expérimentalement une nouvelle approche à même de générer des trains impulsionnels de grande qualité et à haut-débit. Cette méthode repose sur une modulation temporelle par une phase sinusoïdale suivie de l'application d'une phase spectrale triangulaire.

MOTS-CLEFS : *source optique haut-débit, traitement tout optique du signal*

1. INTRODUCTION

La génération de trains d'impulsions de haute qualité à des taux de répétition de plusieurs dizaines de GHz reste une étape cruciale pour les applications de télécommunications optique, d'échantillonnage optique ou bien de test de composant. Pour aller plus loin que la modulation traditionnelle d'intensité résultant d'une excitation électrique sinusoïdale, de nombreuses techniques non-linéaires ont été développées exploitant notamment l'interaction distribuée entre la dispersion anormale et la non-linéarité Kerr d'une fibre optique [1-3]. Une autre famille de solutions repose sur l'action successive de deux éléments linéaires discrets. Ainsi, une onde continue est tout d'abord modulée en phase par une excitation temporelle sinusoïdale. Le signal résultant est ensuite affecté par une phase spectrale quadratique introduite par un élément dispersif. Des impulsions picosecondes ont ainsi pu être générées à des débits de 10 GHz [4, 5] et une analogie avec le comportement d'une lentille lenticulaire a pu être établie [6].

Néanmoins, cette technique souffre d'un taux d'extinction limité pour le train généré avec la présence éventuelle de rebonds fortement pénalisants. Nous montrons qu'en appliquant une phase spectrale triangulaire en lieu et place de la phase parabolique habituellement impliquée dans le second étage, nous pouvons efficacement remédier à ce souci et obtenir des trains d'impulsions avec un très bon taux d'extinction et un rapport de cycle de 1/4. Les résultats numériques sont confirmés expérimentalement avec des réalisations à 10 et 20 GHz.

2. PRINCIPE DE LA TECHNIQUE UTILISÉE

Pour illustrer notre approche, considérons une onde continue ψ_0 dont la phase est modulée temporellement par une onde sinusoïdale :

$$\psi(t) = \psi_0 e^{i A_m \cos(2\pi f_m t)},$$

où A_m représente la profondeur de modulation et f_m la fréquence de modulation. La figure 1 représente les profils d'intensité et de phase d'une telle onde, aussi bien dans le domaine temporel que spectral pour $A_m = 1.1$ rad et $f_m = 20$ GHz. La phase sinusoïdale conduit à un spectre de raies régulièrement séparées de f_m dont l'amplitude peut être déduite grâce à une expansion de Jacobi-Anger [7]:

$$\psi(t) = \psi_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} i^n J_n(A_m) e^{i 2\pi n f_m t}$$

Ainsi, la $n^{ième}$ composante spectrale a une intensité donnée par J_n^2 , avec J_n la fonction de Bessel de première espèce d'ordre n . Un point important qui n'a pas été remarqué dans les précédents travaux est l'existence d'un déphasage de $\pi/2$ entre chacune des composantes spectrales (Fig. 1(b1)). Ces déphasages régulièrement espacés peuvent être assimilés à une phase spectrale triangulaire. L'application d'un effet dispersif, i.e. une phase spectrale quadratique, ne permet pas de compenser un tel profil de phase spectral, expliquant ainsi le fond résiduel pénalisant. Avec les progrès du façonnage optique spectral, il devient désormais possible d'envisager une phase triangulaire de signe opposé, conduisant donc à une impulsion de phase spectrale plate, i.e. en limite de Fourier. Cela se traduit dans le domaine temporel par la transformation de l'onde initialement continue en un train d'impulsions clairement séparées, de durée 12 ps, avec un taux d'extinction supérieur à 30 dB.

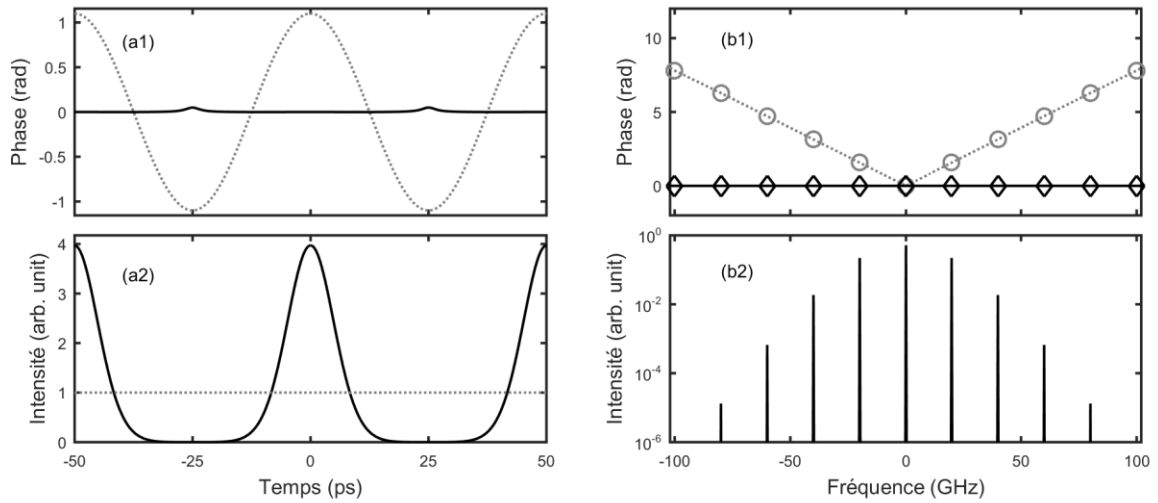


Fig. 1 : Principe de la méthode mise en œuvre : propriétés temporelles (a) et spectrales (b) du signal modulé en phase temporellement (lignes grises pointillées) et du signal après façonnage de sa phase spectrale (ligne continue noire). Les panneaux 1 et 2 représentent respectivement les profils de phase et d'intensité obtenus pour une modulation à $f_m = 20$ GHz et $A_m = 1.1$ rad.

3. ETUDE EXPÉRIMENTALE

La Erreur ! Source du renvoi introuvable. présente le dispositif expérimental mis en œuvre pour valider notre approche et basé sur des éléments disponibles commercialement. Le laser continu émet à 1550 nm, puis l'onde est modulée en phase par un modulateur en LiNbO₃ alimenté par un générateur de signal électrique sinusoïdal. Un façonneur spectral (Finisar Waveshaper) est ensuite inséré pour appliquer la phase spectrale triangulaire retenue. Le signal résultant est enregistré par un oscilloscope à échantillonnage optique (résolution 1 ps) et par un analyseur de spectre optique à haute résolution.

L'évolution du profil d'intensité temporel en fonction de la puissance électrique de la modulation à 10 GHz appliquée est représentée Fig. 2(b) et montre que l'obtention du meilleur taux d'extinction nécessite une profondeur de modulation judicieusement choisie. Ainsi, comme également visible Fig. 2(c1), pour une modulation de phase trop faible, les profils impulsionnels ne sont pas clairement définis. Par contre, pour une profondeur trop élevée, la durée temporelle s'affine mais le taux d'extinction se dégrade avec un rebond prononcé entre deux impulsions successives. Au point de compression optimale, le profil expérimental enregistré à 10 GHz présente une durée impulsionnelle de 21 ps.

Les résultats obtenus pour une fréquence de 20 GHz sont représentés Fig. 2(c2). Là encore, des impulsions présentant un excellent taux d'extinction se sont formées avec une durée temporelle de 12 ps en parfait accord avec les simulations numériques et conduisant à un rapport de cycle légèrement supérieur à 4. Le profil d'intensité temporel de cette impulsion peut être parfaitement

ajusté par une forme gaussienne. Les spectres enregistrés (Fig. 2(d)) soulignent la très grande qualité optique du signal résultant avec un rapport signal sur bruit dépassant 20 dB. A 10 ou 20 GHz, les spectres obtenus sont en limite de Fourier.

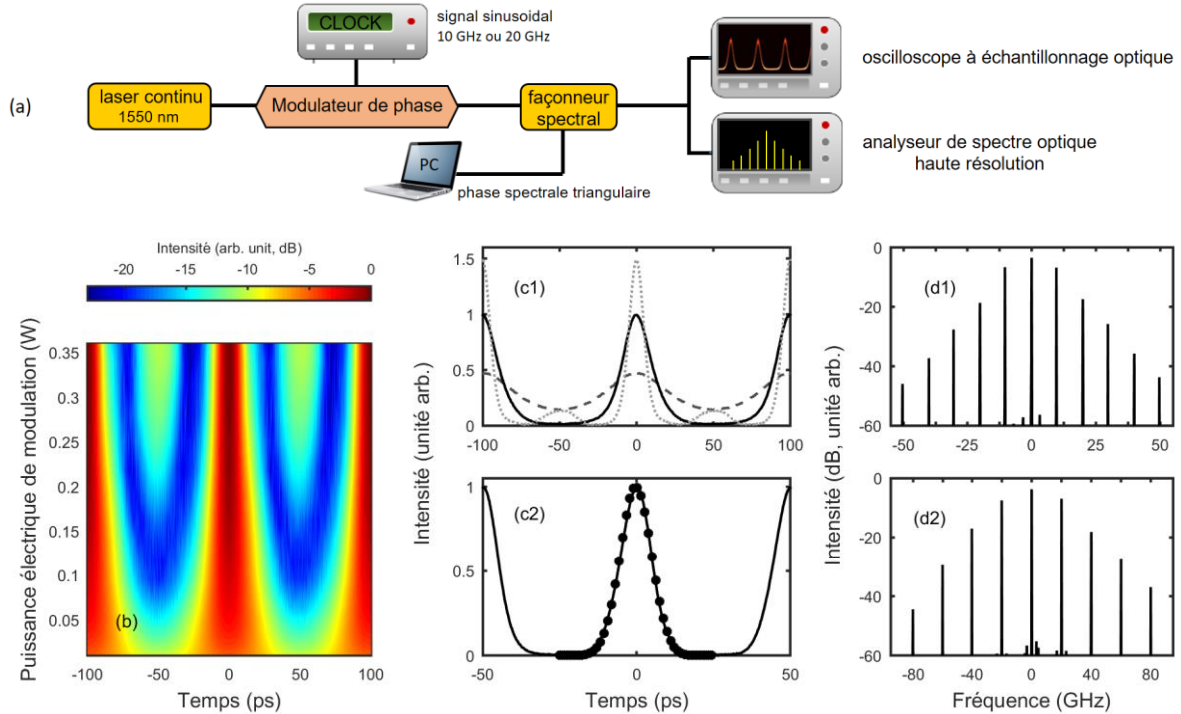


Fig. 2 : (a) Montage expérimental. (b) Évolution du profil temporel obtenu après façonnage en fonction de la modulation appliquée à une fréquence de 10 GHz. (c) Profil temporel obtenu après façonnage optimal (ligne noire continue) pour un débit de 10 et 20 GHz (panneau 1 et 2). Les profils en pointillé gris et tiret gris représentent les résultats pour une modulation initiale excessive ou insuffisante à 10 GHz. Les cercles noirs correspondent à un ajustement par un profil gaussien. (d) Profils d'intensité temporels à 10 et 20 GHz.

Ces résultats démontrent que l'association astucieuse de la modulation de phase temporelle sinusoïdale suivie d'une simple phase spectrale triangulaire permet de générer efficacement des trains d'impulsions à haut-débit, avec un taux d'extinction important, de forme gaussienne et en limite de Fourier. Nous discuterons également l'utilisation de cette technique pour atteindre des débits supérieurs (typiquement 40 GHz). Enfin, associé à des techniques non-linéaires additionnelles, le rapport de cycle pourra être réduit [2, 3].

RÉFÉRENCES

- [1]. J. Fatome *et al*, "Multiple four-wave mixing in optical fibers : 1.5-3.4-THz femtosecond pulse sources and real-time monitoring of a 20-GHz picosecond source," *Opt. Commun.* **283**, 2425-2429 (2010).
- [2]. C. Finot, J. Fatome, S. Pitois, and G. Millot, "All-Fibered High-Quality Low Duty-Cycle 20-GHz and 40-GHz Picosecond Pulse Sources," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **19**, 1711-1713 (2007).
- [3]. T. Inoue and S. Namiki, "Pulse compression techniques using highly nonlinear fibers," *Laser Photonics Rev.* **2**, 83-99 (2008).
- [4]. T. Komukai, Y. Yamamoto, and S. Kawanishi, "Optical pulse generator using phase modulator and linearly chirped fiber Bragg gratings," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17**, 1746-1748 (2005).
- [5]. T. Kobayashi, H. Yao, K. Amano, Y. Fukushima, A. Morimoto, and T. Sueta, "Optical pulse compression using high-frequency electrooptic phase modulation," *IEEE J. Quantum Electron.* **24**, 382-387 (1988).
- [6]. J. Nuno, C. Finot, and J. Fatome, "Linear Sampling and Magnification Technique Based on Phase Modulators and Dispersive Elements: the Temporal Lenticular Lens," *Opt. Fiber Technol.* **36**, 125-129 (2017).

[7]. K. Hammani, J. Fatome, and C. Finot, "Applications of sinusoidal phase modulation in temporal optics to highlight some properties of the Fourier transform," arXiv:1811.05331.