

Code de Golay pour la mesure répartie par réflectométrie Brillouin utilisant un compteur de photon

Kien PHAN HUY¹, Thibault BOULANT¹, Maxime ROMANET², Sébastien LE FLOCH³,
Etienne ROCHAT⁴ et Jean-Charles BEUGNOT¹

¹ Institut FEMTO-ST, France Université Marie et Louis Pasteur, SUPMICROTECH, CNRS, institut FEMTO-ST, F-25000 Besançon, France

² Auréa Technology, 18 rue Alain Savary, Besançon, France

³ Haute Ecole Arc, Neuchâtel, Suisse

⁴ EOSS, Morges, Suisse

kphanhuy@supmicrotech.fr

RESUME

La réflectométrie Brillouin permet de fabriquer des capteurs distribués pour la surveillance d'infrastructures. L'utilisation d'un compteur de photon étend la portée de ces capteurs. Nous montrons expérimentalement que l'utilisation de codes de Golay augmente le rapport signal-sur-bruit avec un bon accord avec les prédictions théoriques.

MOTS-CLEFS : BOTDR, SPAD, capteurs distribués, Code de Golay

1. INTRODUCTION

Les réflectomètres optiques Brillouin dans le domaine temporel (BOTDR) sont couramment utilisés pour mesurer la température ou la contrainte sur des distances de plusieurs dizaines de kilomètres avec une résolution métrique, afin de surveiller les pipelines ou les câbles sous-marins [1]. Une impulsion est envoyée, qui est réfléchiée par les ondes acoustiques le long de la fibre. Le décalage de fréquence de la lumière rétrodiffusée fournit des informations sur la température ou la contrainte, tandis que la mesure du temps de vol permet de localiser la mesure. Cependant, la portée des appareils commerciaux est limitée à 100 km à cause du rapport signal-sur-bruit limité par les photodiodes classiques. Récemment, nous avons montré que l'utilisation d'un détecteur à avalanche à photon unique (SPAD) augmente cette portée à 150 km, au prix d'un temps d'acquisition plus long en raison du temps mort nécessaire entre deux détections de photon (typiquement 10 μ s) [1].

2. IMPLEMENTATION DES CODES DE GOLAY

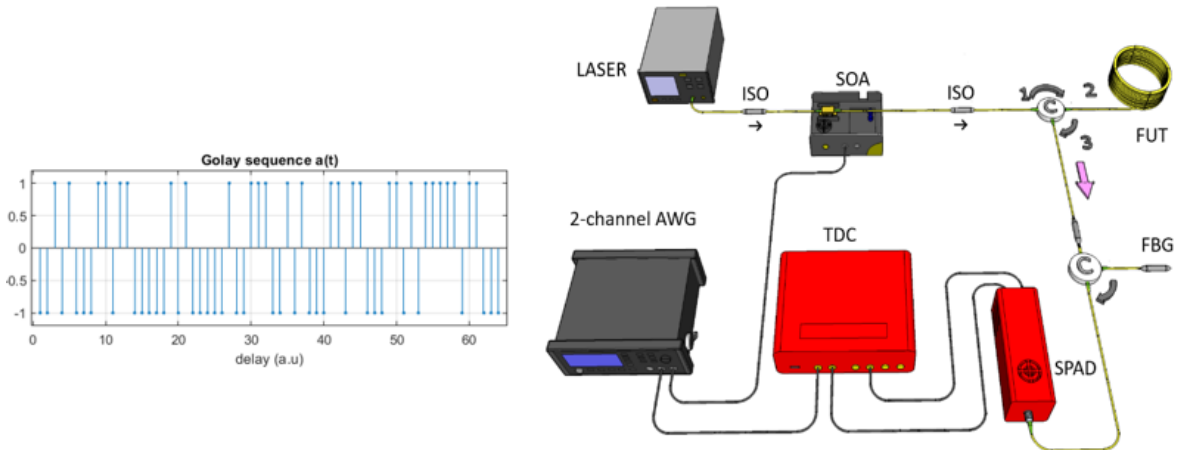
Une façon de réduire ce temps d'acquisition consiste à augmenter le nombre d'impulsions optiques dans la fibre en envoyant un train d'impulsions codées. La résolution spatiale est retrouvée grâce au décodage de ces impulsions. Dans le cas des codes Golay, deux séquences complémentaires $a(t)$ et $b(t)$ sont injectées dans la fibre. Ces séquences vérifient que la somme des corrélations croisées est un delta de Dirac [2],

$$a(t) \star a(t) + b(t) \star b(t) = 2N\delta(t), \quad (1)$$

où N est le nombre de bits des séquences. Cela permet de décoder les mesures et de restaurer la résolution spatiale. Cependant les séquences de Golay sont un enchaînement de valeurs

binaires (± 1), alors que le signal Brillouin est toujours positif. Pour s'affranchir de ce problème, on découpe les séquences en quatre séquences complémentaires d'impulsions positives (a_+, a_-, b_+, b_-). Les signes (-1) manquant sont rétablis lors du traitement numérique qui suit la détection, en utilisant :

$$(a_+ - a_-) * (a_+ - a_-) + (b_+ - b_-) * (b_+ - b_-) = 2N\delta(t), \quad (2) \text{Figure 1 : Exemple de séquence de Golay } a(t)$$



pour $N=64$ bits. Montage μ -BOTDR basé sur compteur de photon avec deux bobines de SMF pour un total de 145 km (FUT).

Le montage expérimental est représenté sur la figure 1. Un laser à 1550 nm envoie de la lumière dans un isolateur. Un amplificateur optique à semiconducteur (SOA) module des impulsions optiques suivant une séquence de Golay programmée dans le générateur de signaux arbitraires (AWG), les impulsions optiques traversent un second isolateur avant de rejoindre le port (1) d'un circulateur. Les impulsions rejoignent alors la fibre de test d'environ 145 km (FUT) le long de laquelle la lumière est rétrodiffusée par des ondes acoustiques. A cause de l'effet Doppler, la lumière rétrodiffusée est décalée en fréquence. Lorsqu'elle ressort par le port (3) un filtre de Bragg en réflexion (FBG) permet de l'isoler et de la mesurer avec le compteur de photon rouge (SPAD). Le compteur de photon est piloté par le second canal de l'AWG via le corrélateur temporel (TDC). On utilise ici une méthode de *multigating* décrite dans [1]. Lorsqu'un photon est détecté, une impulsion électrique est envoyée au corrélateur temporel qui situe cette détection dans le temps grâce à l'acquisition simultanée du signal provenant de l'AWG. L'expérience est reproduite quatre fois car nous avons deux séquences de Golay complémentaires et deux expériences sont nécessaires pour reconstituer le signe des bits (± 1). Une fois tous les événements enregistrés, on procède au décodage en utilisant l'eq. [1].

3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les résultats expérimentaux sont présentés sur la figure 2. Sur la figure 2(a) on montre le signal mesuré entre 120 et 175 km en échelle logarithmique.

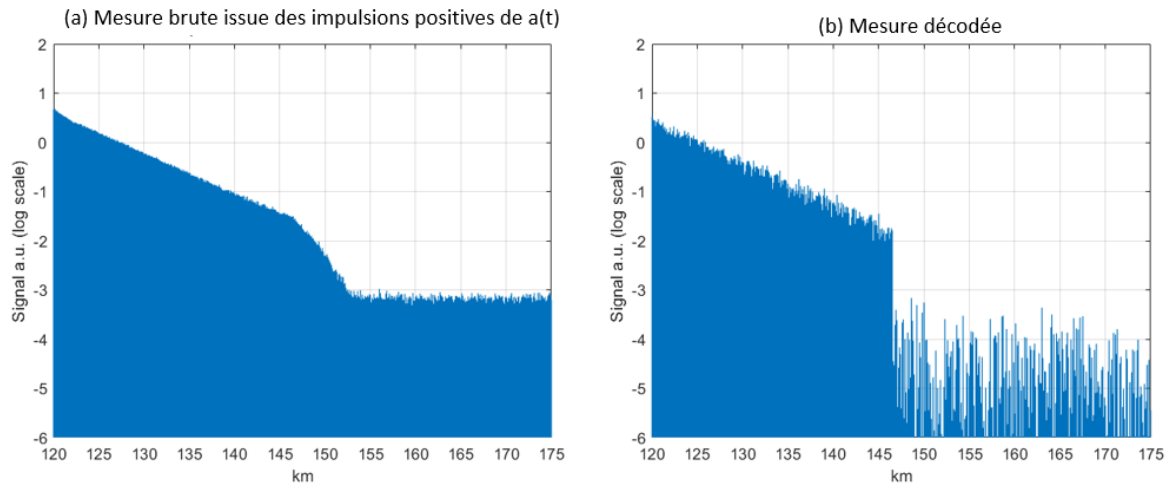


Figure 2 : (a) signal brut obtenu avec les $N/2$ impulsions positives de $a(t)$. (b) Signal décodé. $N=64$ bits.

On observe bien à gauche une décroissance linéaire, traduisant les pertes de la fibre optique. On constate également la perte d'information spatiale de la fin de fibre : ceci est dû à la superposition des réponses du système à toutes les impulsions positives ($\sim N/2$) contenues dans le code $a(t)$ (cf. Figure 1). On voit cependant sur la figure 1(b) que la résolution est restaurée dès lors que le décodage par déconvolution est réalisé. On constate que le niveau de bruit est moyenné à cause des (± 1) et que la variance augmente comme attendu [2]. Nos mesures confirment une évolution du rapport signal-sur-bruit par rapport à l'expérience sans codage en $\sqrt{N}/2$ comme le permet de calculer la théorie [2].

CONCLUSION

Nous avons démontré l'utilité des codes complémentaires de Golay pour les capteurs distribués à base de compteur de photon. Ceci permet de réduire drastiquement le temps d'acquisition avec un exemple donné ici pour $N=64$ bits. On montre également **un gain du rapport signal-sur-bruit** qui pourrait nous faire gagner en portée avec des paramètres optimisés. Cette technique n'est pas limitée à la mesure répartie et pourrait être utilisée dans de nombreuses expériences utilisant des compteurs de photons (par exemple l'imagerie par fluorescence).

REFERENCES

- ¹Maxime Romanet, Etienne Rochat, Jean-Charles. Beugnot, Kien Phan Huy, "Extended-range and faster photon-counting Brillouin optical time domain reflectometer," OPTICA 12, pp. 564-569, 2025.
- ²Michael D. Jones, "Using Simplex Codes to Improve OTDR sensitivity," IEEE PTL 15, pp. 822-824, 1993.