

Du WDM au CDMA : Performances d'un coupleur à interférences multimodes comme codeur d'un système CDMA optique

Guillaume PILLE¹ et ², Yves MOREAU¹, Jérôme GALY²

¹Groupe Photonique - CEM2, UMR CNRS 5507

Université Montpellier II, 34095 Montpellier cedex 5

²LIRMM, UMR CNRS 5506

161 rue Ada 34392 Montpellier Cedex 5

Email: pille@cem2.univ-montp2.fr

Résumé

La technique organique-inorganique développée dans notre laboratoire permet, par polymérisation d'un substrat obtenu par voie sol-gel, la réalisation de circuits à démultiplexage en longueur d'onde (Wavelength Division Multiplexing). Outre l'application directe à l'accès multiple, le circuit WDM peut être utilisé comme codeur CDMA (accès multiple à répartition par codes) spectral. Nous présentons ici des résultats de simulations réalisées sur des logiciels développés en interne, illustrant le mode de fonctionnement et les performances d'un composant du système CDMA optique.

1. Introduction

Les limites actuelles des composants électroniques pour les télécommunications (multiplexage, brassage) ne permettent pas d'utiliser directement la bande passante offerte par la fibre optique (40 nm ou 5 THz pour chacune des bandes télécommunication S, L et C). Une technique consiste à découper cette bande passante en plusieurs canaux de 0.8 nm (100 GHz) par exemple, et de les multiplexer/démultiplexer en longueur d'onde à l'aide de composants tout optiques (WDM).

Parmi les dispositifs de démultiplexage [1], nous nous proposons d'étudier des composants d'optique intégrée, qui présentent une bonne compatibilité avec les fibres optiques et qui peuvent déboucher sur une production de masse. Le Centre d'Electronique et de Micro-Optoélectronique et le Laboratoire Des Verres de l'université de Montpellier, en partenariat avec la société Kloe, développent un procédé fondé sur la photo-polymérisation d'un matériau hybride organique-inorganique synthétisé par voie Sol-Gel [2]. L'insolation du matériau se fait par focalisation d'un laser qui «dessine» littéralement le circuit. Il est ainsi possible de réaliser des guides d'onde carrés avec une précision inégalée par les procédés de masquage.

Deux types de composants destinés au démultiplexage en longueur d'onde sont développés dans notre laboratoire: WDM à coupleurs en étoile et PHASAR (réseau de guides d'ondes déphaseurs) et WDM à MMI (coupleur à

interférences multimodes) et PHASAR. Dans le second cas, les performances requises pour atteindre les normes d'un démultiplexeur commercialisable ne sont pas atteintes, pour des raisons de pertes et de diaphotie trop importantes. C'est une autre propriété du composant que l'on souhaite mettre à profit pour l'utiliser comme codeur et décodeur spectral dans un système CDMA optique (OCDMA). Le CDMA est le mode de communication utilisé, par exemple, dans la norme de téléphonie de troisième génération (UMTS). Son principe réside dans l'émission simultanée de codes orthogonaux, un code étant propre à un utilisateur, sur un médium commun et dans une même bande de fréquences. Les propriétés d'orthogonalité des codes vont permettre, en réception, d'extraire la donnée transmise identifiée par son code.

Plusieurs solutions de CDMA optique ont été proposées et notre projet original s'inscrit dans une approche par codage spectral, réalisé à l'aide de multiplexeurs à MMI [3] dont nous présentons les premiers résultats simulés, avant réalisation du composant.

2. Circuits WDM

Le WDM se compose de trois parties : un coupleur en étoile, considéré comme une zone de propagation en espace libre, reçoit en entrée un faisceau lumineux polychromatique.

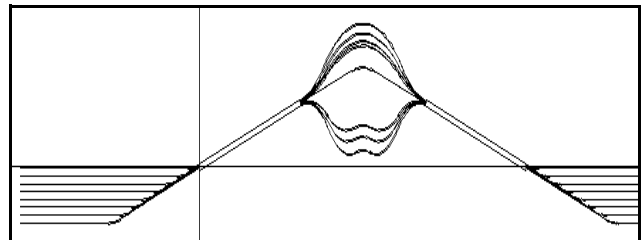


Figure 1: WDM à MMI et PHASAR.

A sa sortie, le faisceau, en phase, s'étale en arc de cercle. Un réseau de n guides de différentes longueurs (PHASAR) récolte l'énergie et crée n faisceaux déphasés qui seront injectés à l'entrée du second coupleur en étoile. Le

faisceau du départ voit ainsi ses différentes composantes discriminées en longueur d'onde, le PHASAR permettant de choisir l'endroit où se focalisent ces faisceaux séparés.

Des composants de ce type, conformes aux normes CWDM (coarse WDM) et DWDM (Dense WDM), fonctionnant à la longueur d'onde 1.31 μm , ont pu être réalisés par la société Kloe.

Il est possible de remplacer dans ces composants les coupleurs en étoile par un guide droit très large, multimode [4], comme on peut le voir sur la Figure 1. Comme pour le coupleur en étoile, le faisceau lumineux se propage en espace libre sur une courte distance. Puis apparaît un phénomène de réflexion sur les bords du MMI et des nombreux modes de propagation en concurrence dans cette zone résulte une alternance d'interférences constructives et destructives qui produisent, à une longueur multiple de 2π déterminée, une série d'images de la source (phénomène de self-imaging) : l'énergie totale se trouve divisée en un multiple entier d'images de l'entrée dont la phase s'exprime en $k\frac{\pi}{n}$. On cherche, pour un composant possédant n entrées/sorties, la longueur correspondant à une division par n de notre faisceau d'entrée. On récolte cette énergie focalisée dans les n guides du PHASAR, dont on a calculé la longueur nécessaire, pour injecter les faisceaux déphasés dans le MMI de sortie, induisant des phénomènes interférentiels qui produisent une unique focalisation en sortie.

La concentration de toute l'énergie sur n points en sortie du MMI d'entrée, contrairement aux WDM à coupleur en étoile où l'énergie est distribuée uniformément en sortie, nous permet d'espérer sensiblement moins de pertes d'insertion à l'entrée du PHASAR, et donc une augmentation des performances du système. Toutefois, le petit nombre de guides, fixé par le self-imaging, implique une nette augmentation de la diaphotie, rendant le composant impropre à une utilisation WDM conforme aux normes en vigueur. En effet, selon nos premières réalisations et d'après simulations, il semble difficile de dépasser 15 à 18 dB de diaphotie. On peut voir sur la Figure 2 le spectre obtenu pour chacune des sorties d'un MMI WDM alimenté par une source large bande centrée sur 1.31 μm .

Une propriété intéressante différencie pourtant les dispositifs à MMI des traditionnels WDM à coupleurs en étoile.

Dans le cas des coupleurs en étoile, la répartition des longueurs d'onde en sortie suit un ordre croissant des valeurs de longueurs d'onde (si une longueur d'onde λ démultiplexée se trouve focalisée sur la sortie 1 du composant, la longueur d'onde $\lambda + \Delta\lambda$, $\Delta\lambda$ étant l'écart entre deux longueurs d'ondes discriminées, se trouve focalisée sur la sortie 2, avec une permutation circulaire de cet ordonnancement en fonction de l'entrée illuminée).

Dans le cas des MMI, la focalisation se fait dans un désordre apparent, causé par les différentes phases issues du self-imaging, propres à une longueur d'onde, ajoutées au déphasage apporté par le PHASAR. Ainsi, λ_1 peut être présent sur la sortie 5 et λ_2 se trouver sur la sortie 2, ce que l'on peut observer sur la Figure 2, ce spectre de sortie étant obtenu à l'aide d'un nouvel outil de simulation développé au laboratoire, utilisant une méthode de propagation de champ 2D (BPM) Ce type de représentation permet

d'estimer la quantité d'énergie d'une longueur d'onde donnée en fonction de la sortie regardée.

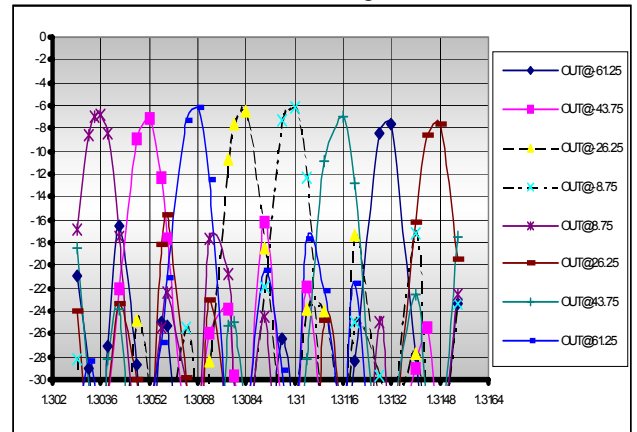


Figure 2: Spectre simulé : énergie en dB recueillie sur chaque sortie (position en μm par rapport à l'axe central du MMI) en fonction de la longueur d'onde.

C'est cette propriété de répartition désordonnée que nous exploitons à des fins de codage/décodage dans notre système CDMA.

3. Accès multiple par code

L'accès multiple par code consiste à remplacer une donnée par un code correspondant aux «0» et aux «1», ce qui va élargir sa bande de transmission. En lui ajoutant d'autres données codées sur la même bande, le signal multiplexé ressemble à un bruit blanc gaussien, ce qui lui confère une propriété de confidentialité de transmission. L'utilisation de codes orthogonaux, à intercorrélation nulle, nous permet de décoder le signal multiplexé reçu en le corrélant avec un des codes d'origine pour extraire la donnée utile. Le destinataire de la donnée ne possède qu'une clé de décodage, le reste du signal est considéré comme du bruit et rejeté.

L'accès multiple par code devrait permettre d'obtenir une plus grande capacité spectrale que le WDM. Toutefois l'interférence inter-symboles et surtout inter-utilisateurs est telle qu'à implémentation comparables, les performances du CDMA et du WDM sont, d'un point de vue théorique, très proches. nous retiendrons comme avantage du CDMA la souplesse dans l'attribution des canaux, le maintien d'une bonne qualité de service en cas d'interférence et un routage évitant de coûteux changements de longueur d'onde entre deux noeuds de réseau.

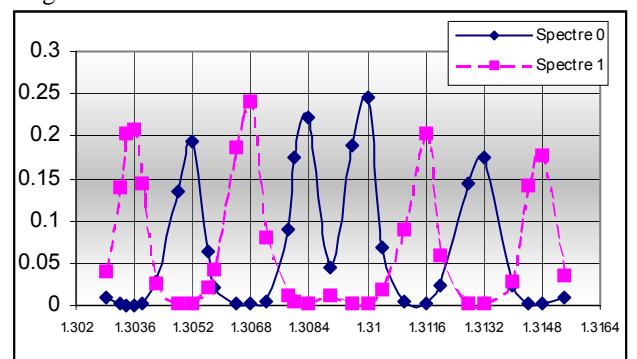


Figure 3: Spectres équivalents «0» (01011010) et «1» (10100101)

Plusieurs techniques de CDMA Optique concurrentes existent [5], comme l'utilisation de codes temporels. Notre système, destiné à une réalisation à bas coût pour le réseau local, repose sur un codage spectral où chaque bit émis est remplacé par un spectre caractéristique, propre à l'émetteur (cf Figure 3).

La génération de ces codes est confiée aux dispositifs à MMI décrits plus haut, dont les sorties voisines seront regroupées. Ainsi, pour une entrée donnée et dans un dispositif 8x8 comme celui de la Figure 1, on relie entre elles les sorties 1 à 4 et 5 à 8. Les quatre premières composent le code spectral pour 1, et les quatre autres le code complémentaire pour 0. En changeant l'entrée alimentée, on obtient une composition différente en sortie, et un autre couple de codes complémentaires. On cherche ensuite, parmi ces codes, les codes orthogonaux essentiels à un décodage performant.

Nous avons conçu et simulé plusieurs WDM à MMI afin d'extraire leurs caractéristiques et leur capacité à générer des codes utilisables. Nous présentons ici les résultats obtenus pour un dispositif 8x8.

4. MMI PHASAR 8x8

Notre composant est utilisé à la fois en codeur et décodeur. En effet, il génère la signature spectrale d'un utilisateur à l'émission et un composant identique réalise, en réception, la fonction de multiplication du signal multiplexé par le code d'origine, déterminé par l'entrée illuminée. En réception, dans le cas où la signature «1» est détectée, les quatre sorties couplées correspondant au «1» présentent un maximum d'énergie, et un minimum dans tous les autres cas. Il en va de même pour les quatre autres sorties dans le cas d'un «0» émis. En pratique, une simple détection différentielle par photo-diodes doit pouvoir différencier le «1» du «0», et ces deux valeurs du reste des signaux. Dans cette configuration, aucune synchronisation n'est nécessaire. Une condition est toutefois requise pour une détection correcte : l'orthogonalité des codes spectraux.

Si le MMI PHASAR peut générer des codes spectraux «désordonnés», il n'en existe pas moins un rapport de symétrie dû à la géométrie du composant qui a des répercussions sur la focalisation en sortie du système codeur. On pourrait interpréter les 8 entrées comme 8 codes complémentaires possible, mais on s'aperçoit que le code «0» de l'entrée 1 est identique au code «1» de l'entrée 8. Il en va de même pour les codes 2 et 7, 3 et 6, 4 et 5. Par conséquent, le code «1» de l'entrée 1 est le complémentaire du code «1» de l'entrée 8 (cf Tableau 1).

Entrée	Spectre équivalent «1»	Spectre équivalent «0»
1	00101101	11010010
2	10100101	01011010
3	01101001	01101001
4	10110100	01001011
5	01001011	10110100
6	01101001	01101001
7	01011010	10100101
8	11010010	00101101

Tableau 1: Spectres émis correspondants aux «1» et «0» en fonction de l'entrée.

Il serait donc impossible de distinguer ces codes émis simultanément. On ne trouve que quatre paires de codes parfaitement orthogonaux dans cette configuration, ce qui limite en théorie notre système à deux utilisateurs simultanés. Nos calculs indiquent que le décodage est encore possible avec deux codes orthogonaux et un quelconque, étendant le système à 3 utilisateurs maximum.

Des améliorations du système sont envisagées : l'utilisation de codes redondants (turbo-codes...) en amont du système, avec un décodage approprié, devrait permettre d'améliorer le taux d'erreur admissible dans le cas où la diaphotie réelle serait trop importante. L'augmentation du nombre d'utilisateurs peut passer par un travail sur les phases, par exemple en étudiant des structures non symétriques pour générer plus de codes orthogonaux.

5. Conclusion

La maîtrise de la conception et de la réalisation pratique de WDM conventionnels nous permet de détourner un circuit à faibles performances de son utilisation habituelle pour le codage/décodage dans un système CDMA. Par l'étude d'un circuit spécifique 8x8 nous mettons en évidence les capacités de notre système pour le codage spectral. La phase de fabrication du composant permettra de déterminer les améliorations à apporter tant au niveau de la diaphotie que des méthodes de correction d'erreur à utiliser.

6. Références

- [1] R. T. Chen, L. S. Lome, «Wavelength Division Multiplexing,» Critical Review 71, SPIE Optical Engineering Press, Washington USA, 1999.
- [2] K. Kribich, Y. Moreau, P. Coudray, P. Etienne, «Circuits Mux/demux Fabriqués Par Écriture Laser Dans Un Matériau Hybride,» communication invitée, Proc. JNOG'02, pp119-121, Dijon, septembre 2002.
- [3] Y. Moreau, P. Coudray, K. Kribich, P. Etienne «Système d'Accès Multiple Par Code En Technologie Organique-minérale,» JNOG 2000, pp.365-367, novembre 2000.
- [4] Mohammad R. Païam and Robert I. MacDonald «Design Of Phased-array Wavelength Division Multiplexers Using Multimode Interference Couplers,» Applied Optics Vol. 36, No. 21, juillet 1997
- [5] K. Iversen, D. Hampicke, «Comparison and Classification of All Optical CDMA Systems for Future Telecommunications Networks,» SPIE Proc., Vol 2614, pp.110-121, octobre 1995.