

Nouvelle méthode d'analyse des résonateurs annulaires en vue d'applications bio-photoniques

Yaneck Gottesman¹, Anne-Françoise Obaton³, Dominik Rabus⁴, Elchuri Rao², Badr-Eddine Benkelfat¹

¹GET-INT, CNRS UMR 5157, Département Eph, 9 rue Charles Fourier, 91011 Evry cedex

²CNRS-LPN, Route de Nozay, 91 Marcoussis

³Laboratoire National d'Essais, 29 avenue R. Hennequin, 78197 Trappes Cedex

⁴Université de Santa-Cruz, Etats-unis

yaneck.gottesman@int-evry.fr

Abrégé : Ce papier décrit une analyse originale des résonateurs annulaires reposant sur une étude spectrale. Son principal intérêt est qu'elle offre un accès direct aux propriétés du résonateur. Grâce à la réduction des contraintes d'échantillonnage du spectre de transmission qui lui est associée, elle favorise de plus des études dans le domaine temporel et spectral simultanées sur un large domaine de longueurs d'onde. Elle permet ainsi d'envisager un suivi approfondi des fines évolutions du résonateur, utilisé comme un capteur, sous des actions extérieures en vue d'applications bio-photoniques.

1. Introduction

Les résonateurs annulaires actifs ou passifs sont des composants incontournables du monde des télécommunications optiques. Du fait de leur facteur de qualité important, ils présentent théoriquement des résonances dans le spectre de transmission très marquées et périodiques utiles au filtrage WDM. En parallèle, ils commencent à démontrer de grandes potentialités lorsqu'ils sont utilisés en tant que capteurs chimiques. Par exemple, des démonstrations ont été apportées quant à leur faculté à détecter le degré de contamination de l'air par certains polluants tels que l'isopropanol, et ce avec des seuils inférieurs à 50ppm[1]. Actuellement de nombreuses équipes cherchent à les utiliser comme biocapteurs. Ils sont donc amenés à jouer un rôle clé pour la biophotonique.

On peut cependant remarquer que les mesures spectrales jusqu'alors couramment employées pour leur caractérisation n'exploitent qu'une information partielle (un intervalle spectral libre) du spectre. Elles imposent, de plus, un échantillonnage très fin de son spectre de transmission sur un composant préalablement traité antireflet. Ces contraintes pénalisent la caractérisation du composant et requièrent des temps d'analyses rédhibitoires sur un large domaine spectral.

Dans ce papier nous proposons une analyse des résonateurs originale, efficace et rapide, sur un large domaine spectral. Elle repose sur l'évaluation directe des paramètres κ (coefficient de couplage) et α (pertes dans l'anneau) à partir d'analyses dans le domaine temporel (ou spatial) obtenues grâce à la reconstruction de la phase du spectre. Cette reconstruction ne requiert qu'un échantillonnage faible. Elle permet dès lors une réduction du temps des mesures ainsi que des études simultanées dans le domaine spectral et temporel utiles à l'observation de fines évolutions du capteur sous diverses sollicitations extérieures. Dans une première partie nous détaillerons le principe de l'analyse dans le domaine temporel ainsi que la manière de les obtenir à partir du spectre de transmission. Dans une seconde partie les résultats expérimentaux seront comparés avec ceux obtenus par réflectométrie à faible cohérence (OLCR).

2. Analyses dans le domaine temporel

Nous décrivons dans cette section l'analyse dans le domaine temporel des résonateurs en anneau, la manière de reconstruire la phase de leur spectre de transmission, d'accéder à leur signature dans le domaine temporel. Une démonstration est également proposée à partir de quelques simulations.

Le principe de fonctionnement des résonateurs repose sur des interférences à ondes multiples liées aux différents passages dans l'anneau. On peut donc naturellement s'attendre à ce que ces filtres présentent une réponse impulsionnelle (RI) constituée de différents Dirac régulièrement espacés. Dès lors leur analyse dans le domaine temporel constitue une base naturelle à privilégier pour l'étude de leur signature. Plus exactement, on peut établir à l'aide de considérations électromagnétiques simples [2], que la fonction de transfert d'un résonateur tel que celui présenté en encart figure 1 est de la forme :

$$h(\nu) = \frac{-\alpha + te^{-i\theta}}{-\alpha t^* + e^{-i\theta}} = t + \frac{(t^2 - 1)}{t^*} \sum_{p=1}^{+\infty} (\alpha \cdot t^* \cdot e^{i\theta})^p \quad (1) \text{ avec } \nu \text{ la fréquence, } t \text{ le coefficient de}$$

transmission du coupleur et $\theta = 2\pi D \cdot \lambda^{-1}$ ou D représente la longueur optique de l'anneau.

Grace à la seconde formulation de l'éq. 1, il est aisé de déduire analytiquement après calcul de sa transformée de Fourier la RI recherchée. La puissance P_i associée au $i^{\text{ème}}$ Dirac vaut

$$\begin{cases} P_0 = 1 - \kappa \\ P_i = k^2 \alpha^j (1 - \kappa)^{j-1} \end{cases} \quad (2)$$

et les paramètres κ et α s'avèrent déductibles, de façon directe, des trois premiers pics. Ainsi l'enregistrement de la RI du filtre constitue un moyen direct de leur caractérisation. A ce propos, nous avons récemment validé expérimentalement le principe grâce à des mesures OLCR large spectre [3]. Toutefois une confrontation des valeurs obtenues avec celles déduites des mesures de transmission sur un domaine spectral important n'a jamais été proposée. C'est ce que nous présentons à présent grâce à la reconstruction de la phase du spectre de transmission.

Plus précisément, le filtre étant physique, sa RI est forcément causale. Dès lors, les parties réelle et imaginaire de $h(\nu)$ sont liées par transformée de Hilbert. En réécrivant h sous la forme,

$$h(\nu) = e^{-\gamma(\nu) - i\xi(\nu)} \quad \gamma, \xi \text{ étant deux fonctions à valeurs réelles} \quad (3)$$

ce lien reste également valable entre $\gamma(\nu)$ et $\xi(\nu)$ si la fonction $-\ln(h(\nu))$ est également analytique. Or il est établi, de façon classique, que cette condition est effectivement vérifiée dès lors que les zéros de la transformée de Laplace associée au filtre considéré n'a aucun zéro dans le demi-plan $\text{Re}(p) > 0$ [3], p représentant la variable de Laplace. D'après l'équation (1) cette condition est toujours vérifiée. La fonction de filtrage réalisée par un résonateur en anneau appartient donc bien à la classe des fonctions dites « à phase minimale ». Cette particularité autorise la détermination de $\xi(\nu)$ dès lors que $\gamma(\nu)$ est connu (et vice-versa). Or par construction, γ peut facilement être déduit du spectre de transmission puisque $|h(\nu)| = e^{-\gamma(\nu)}$. D'un point de vue numérique, nous utiliserons la transformée de Wiener-Lee (dont les détails pourront être trouvés dans [4]) pour calculer la transformée de Hilbert de $-\ln(|h(\nu)|)$ et donc la phase du spectre. La transformée de Fourier du spectre complexe obtenu fournit alors la RI recherchée.

Dans ce type de démarche les données exploitées ne peuvent plus être localisées spectralement. En effet la résolution temporelle ne permettrait pas la séparation des pics P_i (par application des relations d'incertitudes liées à la transformée de Fourier). Toutefois il n'est pas utile d'échantillonner finement le spectre. Un exemple est présenté figure 1.

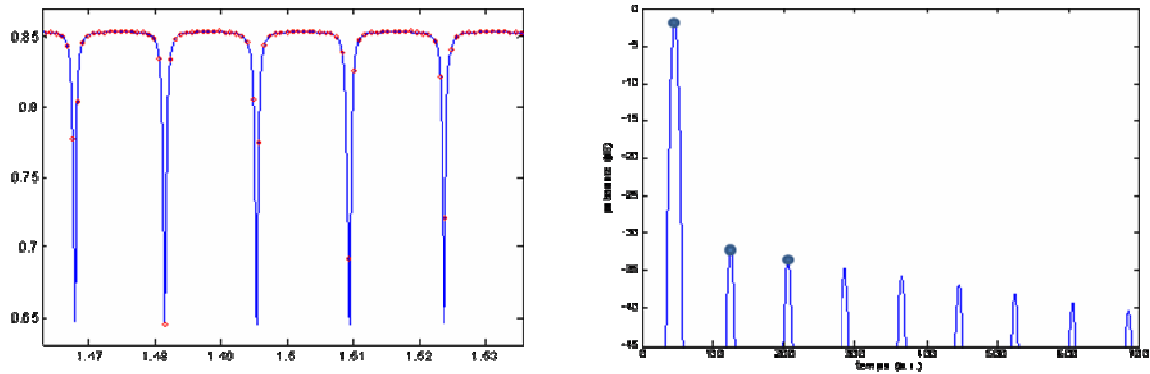


Fig. 1 : Simulations a) spectre calculé et reconstruit b) RI du filtre déduit du spectre complexe reconstruit à partir de (a)

La courbe en trait continu de la figure 1(a) est relative au spectre de transmission calculé pour un résonateur ayant un facteur de qualité important du fait des valeurs choisies de $\alpha = -1$ dB et $\kappa = -15$ dB. Les points sont relatifs aux échantillons réellement exploités (seulement 20 par période) pour reconstruire la phase de spectre (non présentée ici). La RI alors calculée par TF (figure 1b) présente bien les pics régulièrement espacés recherchés. Leur séparation est uniquement liée à la longueur optique D du résonateur qui peut ainsi être évaluée. Par ailleurs l'exploitation des trois premiers pics, en utilisant l'équation 2 permet d'évaluer des paramètres $\alpha = -1.000$ dB et $\kappa = -14.998$ dB très proches de ceux utilisés pour ces simulations. Cet exemple démontre clairement le bien fondé de la méthode employée.

3. Résultats et discussion

La méthode proposée au paragraphe précédent a été appliquée au spectre de transmission mesuré expérimentalement. Il est à noter que ces mesures ont été obtenues grâce à un banc de mesure consistant en un

laser accordable et un simple mesureur de puissance. Du fait du matériel utilisé, le spectre a été échantillonné avec un pas régulier dans l'espace des λ obligeant à un ré-échantillonnage numérique des données en ν . La RI déduite des données est visible figure 2a). On peut constater que les pics P_1 à P_n présentent une décroissance linéaire similaire à celle constatée sur la figure 1b et comme attendu d'après l'équation 2. Cette signature est un élément permettant de repérer d'éventuelles anomalies dans les données enregistrées ou dans le comportement du composant étudié. Les valeurs déduites de l'ensemble du spectre (de $1.52\mu\text{m}$ à $1.58\mu\text{m}$) sont $\alpha=-4.7\text{dB}$ et $\kappa=-6.9\text{dB}$. En effectuant une transformée de Fourier à fenêtre glissante, il est également possible d'étudier la dépendance de ces paramètres en fonction de λ .

Pour confirmer ces valeurs, des mesures OLCR ont également été effectuées sur ce composant. Le spectre réfléchi a été utilisé. Le réflectogramme enregistré est présenté figure 2b). Le premier pic correspond à la réflexion sur la facette d'entrée sur le composant, le deuxième à la réflexion sur la facette de sortie et les pics suivants aux différents passages dans le résonateur en anneau. Bien entendu, cette signature correspond à la RI du résonateur (transmission) convoluée par elle-même du fait de la réflexion sur la facette de sortie et donc du double passage dans le résonateur (passage aller et retour). Bien que cette signature soit celle associée au spectre réfléchi par le composant, il est tout de même possible de trouver un système d'équations analogue à l'équation 2 permettant là encore de déduire les valeurs de α et κ en utilisant uniquement trois pics indiqués figure 2b. Les valeurs obtenues ($\alpha=-4.4$ $\kappa=-6.3$) sont très proches de celles déduites du spectre.

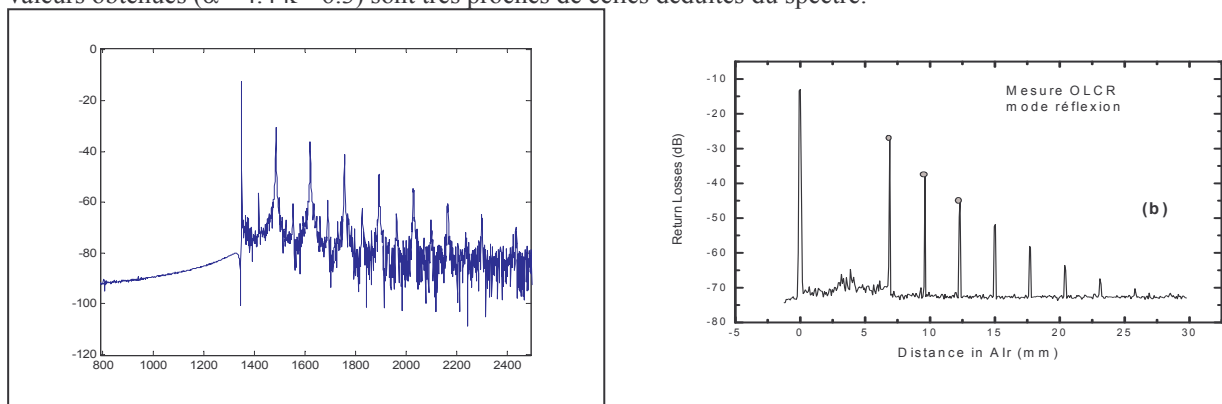


Fig. 2 : a) RI en transmission reconstruite b) Mesure OLCR enregistrée en mode réflexion

Des comparaisons directes entre le spectre mesuré et celui simulé avec les paramètres déduits précédemment et grâce à la mesure de la distance optique obtenue sur le réflectogramme concordent également. Le lien ainsi proposé entre les mesures temporelles (ou spatiales) et les mesures spectrales nous semble utile à l'étude fine du résonateur et plus particulièrement pour les applications bio-photoniques que nous visons. En effet, les modifications des propriétés du résonateur sont connues pour être visibles sur le spectre. Le fait de pouvoir suivre l'évolution du spectre et simultanément son analogue dans le domaine spatial peut aider à localiser les informations pertinentes dans la richesse des réflectogrammes.

4. Conclusion et perspectives

Nous avons proposé une méthode d'analyse originale du spectre de transmission permettant d'évaluer directement les paramètres du résonateur étudié. Elle s'avère très complémentaire des mesures OLCR. Grâce à une réduction des contraintes d'échantillonnage du spectre qui lui est associée, elle autorise un suivi simultané de l'évolution des propriétés du résonateur dans le domaine spectral et temporel sur un large domaine de longueur d'onde. Cette méthode pourrait tout particulièrement être profitable à l'analyse des biocapteurs à l'origine de ce travail.

Remerciements : Les auteurs tiennent à remercier Anne Talneau pour sa précieuse aide relative aux mesures spectrales.

Références :

- [1] A. Ksendzov et al., IEE Electronics letters, vol 40, n°1, Janvier 2004
- [2] A. Yariv, IEE Electronics Letters., vol. 36, pp 321-322, Feb. 2000
- [3] Y. Gottesman et al., IEEE J. Lighthwave Technol., Vol. 22, n° 6, Juin 2004
- [4] A. Papoulis, "The Fourier integral and its applications", Mc Graw-Hill