HAL
open science

Ligne à retard large-bande, compacte et réglable de 6,67 ns à 1,67 μs pour simulateur de cibles pour radar automobile 77 GHz

Fabien Arzur, Marc Le Roy, André Pérennec, Gérard Tanné, Nicolas Bordais

To cite this version:

Fabien Arzur, Marc Le Roy, André Pérennec, Gérard Tanné, Nicolas Bordais. Ligne à retard large-bande, compacte et réglable de 6,67 ns à 1,67 μs pour simulateur de cibles pour radar automobile 77 GHz. 20 èmes Journées Nationales Microondes, 16-19 Mai 2017, Saint-Malo, May 2017, Saint-Malo, France. pp.1-4. hal-01506969

HAL Id: hal-01506969

https://hal.univ-brest.fr/hal-01506969

Submitted on 12 Apr 2017

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.

Ligne à retard large-bande, compacte et réglable de 6.67 ns à 1,67 µs pour simulateur de cibles pour radar automobile 77 GHz

F. Arzur[1,2], M. Le Roy[2], A. Pérénnec[2], G. Tanné[2], N. Bordais[1]

[1]*ZF TRW Autocruise, Avenue du Technopôle, 29280 Plouzané*
[2]*Lab-STICC, UMR CNRS 6285, Université de Brest (UBO), 6 avenue Le Gorgeu, 29200 Brest*
fabien.arzur@zf.com

Résumé *– Cet article présente l'architecture hybride d'une ligne à retard variable, compacte, bas coût et compensée en gain. La ligne à retard permet la simulation de retards compris entre 6,67 ns (1 m) et 1,67µs (250 m) avec une faible résolution de 1,33 ns (0,2 m). Elle prend place dans un simulateur de cibles permettant de tester et calibrer des radars automobiles. Une hybridation de différentes technologies est présentée afin de couvrir la plage de retards dans son intégralité sur une bande de fréquence de 800 MHz. Le système permet également une égalisation du gain et une compensation des pertes d'insertion sur l'ensemble de la plage de fréquence ainsi que le contrôle de la Surface Equivalente Radar (SER). Des prototypes ont été réalisés, testés et caractérisés séparément pour chacune des technologies choisies et finalement une hybridation de ces trois technologies est proposée.*

1. Introduction

Afin de proposer des véhicules toujours plus sûrs, les constructeurs automobiles développent des systèmes avancés d'assistance à la conduite (ADAS : Advanced Driver Assistance Systems) de plus en plus performants. Des organismes comme l'EuroNCAP encouragent grandement les constructeurs automobiles à se doter de systèmes de sécurité actifs. Parmi ces systèmes, on assiste à la démocratisation des radars automobiles d'alerte à la collision et de régulation de distance. Les radars proposent des fonctions de régulation de distance adaptative (ACC : Adaptive Cruise Control) et de freinage d'urgence automatique (AEB : Automatic Emergency Braking). La généralisation de l'utilisation de tels systèmes sur la majorité des véhicules de série dans les années à venir va nécessiter le recours accru à des moyens de tests, tant chez les équipementiers et les constructeurs automobiles que dans les centres de contrôle technique.

Afin de pouvoir caractériser, tester et calibrer les radars dans des conditions répétables et fiables, il est nécessaire d'utiliser des simulateurs de cibles (RTS : Radar Target Simulator). Ces appareils permettent de simuler l'ensemble des scénarios rencontrés par le radar (détection urbaine et extra-urbaine, détection de piétons, de cyclistes …). Ces scénarios deviennent de plus en plus complexes notamment avec le développement des futures voitures autonomes. Une cible est définie par trois paramètres : une vitesse, une distance et une Surface Equivalente Radar (SER). Les systèmes existants capables de satisfaire les spécifications souhaitées ne correspondent pas aux besoins actuels, que ce soit en termes de coût, de compacité et de flexibilité. Le but étant de permettre un déploiement plus large de ces équipements de tests. Le synoptique général d'un RTS est proposé Figure 1.

Ce papier décrit le design d'une nouvelle architecture de ligne à retard, hybride, compacte, bas coût et compensée en gain. La section 2 décrit les problématiques ainsi que la topologie du RTS. Une architecture hybride fusionnant différentes technologies est introduite section 3. Les technologies sont comparées en fonction de leurs plages de retards, leurs coûts et compacités. Un circuit permettant l'égalisation du gain est ensuite présenté. La section 4 décrit le contrôle de la SER.

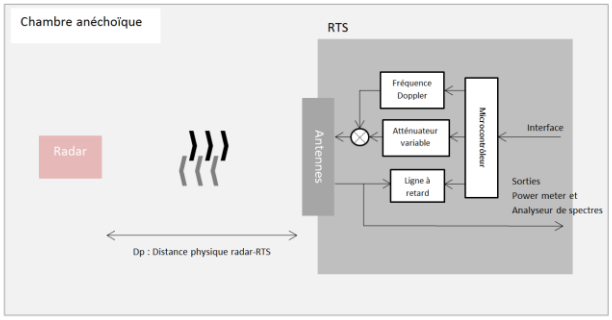


Figure 1. Synoptique d'un simulateur de cibles radar (RTS)

2. Problématiques

Afin de répondre à des exigences toujours plus drastiques, l'entreprise ZF TRW Autocruise développe ses propres RTS spécifiquement pour des bancs de test de production et de R&D. Les simulateurs doivent s'adapter à tout radar fonctionnant dans les bandes de fréquence 24 GHz et 76 - 81 GHz, avec différentes modulations et une bande de fréquence supérieure à 800 MHz. Le système doit être à bas coût, de faibles dimensions et suffisamment flexible pour être intégré dans différentes applications.

La vitesse d'une cible en mouvement est générée par un décalage en fréquence suivant l'effet Doppler. La plage de vitesse est comprise entre 0 et 250 km/h.

Lors du design d'un RTS, le principal verrou technologique est la réalisation d'une ligne à retard reconfigurable, capable de simuler des distances comprises entre 1 m et 250 m, avec une grande résolution (0,2 m) sur une large bande de fréquence. La distance est simulée par un retard temporel du signal. Un compromis doit être trouvé entre les performances souhaitées, le bas coût et les dimensions réduites (< 15 cm x 5 cm x 5 cm).

Une autre problématique concerne la génération de la SER d'une cible. La SER est ajustée avec un contrôle du gain en fonction de la taille de la cible à simuler.

Le front-end du simulateur permet de transposer la fréquence du radar en bande de base. La fréquence de travail de la ligne à retard ainsi que de la partie SER sera comprise entre 1 et 2 GHz (bande L), laquelle va permettre un choix plus large et plus varié de technologies possibles.

Il est important de noter qu'au final la distance minimale pouvant être simulée par le RTS sera de 10 m. Cela est dû aux paramètres intrinsèques des composants du RTS (hors ligne à retard).

3. Architecture hybride

Un état de l'art ainsi qu'une étude comparative de différentes lignes à retard ont été réalisés afin d'identifier les technologies possibles avec leurs avantages et inconvénients en fonction des distances à simuler. Des lignes à retard entièrement numériques utilisant des convertisseurs analogique-numérique ainsi que des techniques de traitement de signaux numériques existent et sont déjà utilisées dans certains simulateurs de cibles. Cependant, le coût élevé ne permet pas une large diffusion de l'appareil. Parmi les technologies analogiques, il a été montré l'impossibilité de générer la plage de retard dans son intégralité ainsi que la résolution souhaitée avec une seule technologie. Une hybridation de technologies est nécessaire afin de répondre aux spécifications visées, notamment en termes de coût et de dimensions.

3.a. Analyse comparative des technologies

En fonction du retard à simuler, il est possible de choisir entre différentes technologies. Parmi celles-ci, on trouve les technologies à bases de câbles coaxiaux, les technologies optiques, celles à ondes acoustiques de surface (SAW) [1], à ondes acoustiques de volume (BAW), la technologie LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics) [2] ou encore les technologies planaires, e.g. les déphaseurs "true time delay" [3], les déphaseurs de type réflectif (RTPS) [4], les lignes à méandres, parmi d'autres.

Les comparaisons suivantes traitent uniquement de lignes à retard analogiques commutables ou accordables. Afin de réduire les coûts, des composants sur étagère "Off-The-Shelf (COTS)" sont utilisés dans un premier temps.

Comme représenté sur la Figure 2a, le retard ainsi que le coût suivent globalement la même distribution par rapport à la taille relative des technologies. La Figure 2b illustre les pertes d'insertion par rapport à la taille relative.

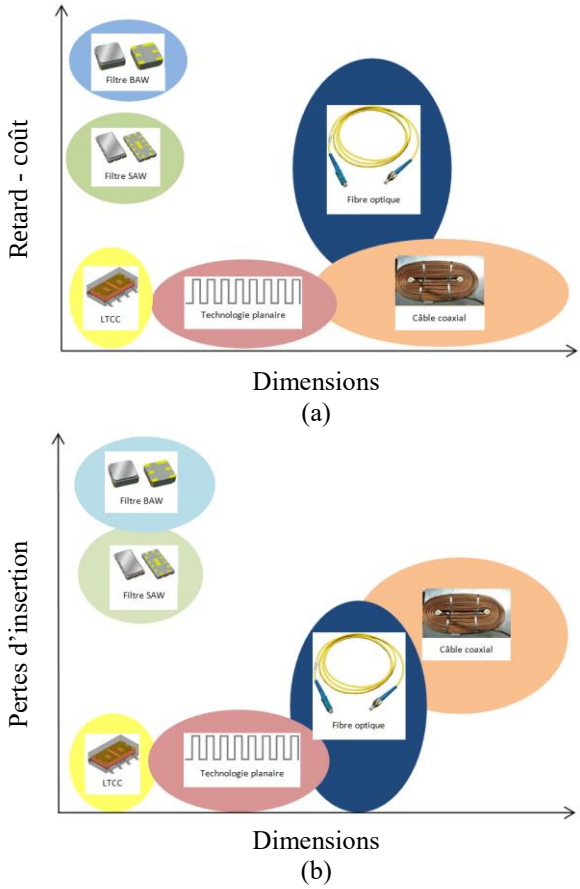


Figure 1. Etat de l'art des technologies : (a) retard et coût vs dimensions, (b) pertes d'insertion vs dimensions

Le tableau 1 résume les avantages et inconvénients des différentes technologies en fonction de leur plage de retards, bande de fréquence, pertes d'insertion, dimensions, complexité d'intégration et coût. Trois technologies sont particulièrement mises en avant : LTCC, optique et SAW. La technologie planaire offre la possibilité de concevoir des déphaseurs de type "true time delay" avec de bonnes performances mais avec une mauvaise platitude du temps de propagation de groupe (TPG) sur une large bande de fréquence en comparaison avec les autres technologies. Cette solution ne sera pas retenue.

Technologies	Retard	Largeur de bande	Pertes d'insertion	Dimensions	Simplicité	Coût	Total
Câble coaxial	ns	-	-	-	+	$	2
Fibre optique	ps - µs	+	+	+	+	$$	5
Filtre SAW	ns	+	-	+	-	$$	3
Filtre BAW	ns	+	-	+	-	$$$	2
Technologie planaire	ps - ns	-	-	-	+	$	2
Eléments localisés	ps	-	+	+	+	$	4

Tableau 1. Analyse comparative des technologies

Le tableau 2 détaille les relations entre les retards et les distances simulées correspondantes ainsi que la technologie optimale pour chaque plage de retard afin de couvrir toute la gamme de distances. Le système est composé de différents blocs retard compris entre 0,2 m et 128 m. Les filtres SAW assurent les longues distances. En effet, ces derniers proposent le ratio retard/dimensions le plus intéressant parmi les candidats

possibles, malgré des pertes d'insertion relativement élevées. Des filtres SAW commerciaux ont été testés puis ont été optimisés de manière à obtenir des retards spécifiques correspondant à des distances de 16 m à 128 m. Les délais intermédiaires, non réalisables avec les filtres à ondes acoustiques, sont générés à l'aide de fibres optiques. Elles permettent d'obtenir des retards correspondant à des distances de 4 m et 8 m avec de faibles pertes d'insertion sur une large bande de fréquence. Les faibles distances (< 4 m) ainsi que la résolution souhaitée sont réalisées à l'aide de composants LTCC. Des prototypes de chaque bloc retard ont été conçus, implémentés et mesurés séparément.

Technologies	LTCC				Fibre optique		Filtre SAW			
Retard (ns)	1.3	3.34	6.67	13.3	26.7	53.3	107	213	427	853
Distance (m)	0.2	0.5	1	2	4	8	16	32	64	128

Tableau 2. Relations entre distances simulées et retards pour les technologies retenues.

3.b. Architecture globale de la ligne à retard

La Figure 3 montre le principe et l'architecture globale de la ligne à retard. La compensation des pertes d'insertion mesurées a été étudiée, optimisée puis intégrée dans chaque bloc retard. Elle se compose d'un amplificateur faible bruit combiné avec un circuit d'égalisation permettant de compenser et d'égaliser à la fois la valeur du paramètre S_{21} et la pente afin d'obtenir en sortie de chaque bloc un gain de 0 dB.

De plus, un amplificateur et un atténuateur variable sont combinés avec un circuit d'égalisation en fin de ligne à retard afin de compenser les pertes d'insertion de la chaîne globale, c'est-à-dire compenser l'ensemble de toutes les contributions résiduelles dues aux commutateurs et connexions entre blocs. Des commutateurs SPDT (Single-Pole-Double-Throw) sont utilisés pour commuter les différents blocs retard afin de couvrir la plage de retard dans son intégralité. Un microcontrôleur commande ces commutateurs afin d'obtenir la distance souhaitée et assurer le contrôle de l'atténuation/amplification pour le réglage de la SER.

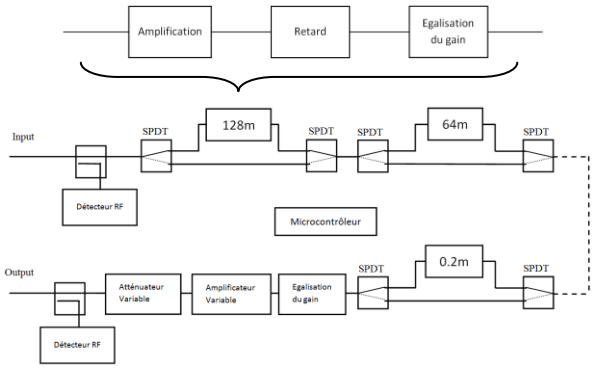


Figure 3. Bloc retard et architecture de la ligne à retard

3.c. Compensation et égalisation du gain

Chaque élément de retard introduit des pertes d'insertion qui augmente en fonction de la fréquence. Afin de garder l'intégrité du signal, il est nécessaire d'utiliser des amplificateurs faible bruit afin de ne pas dégrader de manière significative le facteur de bruit. Un circuit d'égalisation est ensuite inséré et optimisé pour chaque bloc retard de manière à obtenir en premier lieu une bonne planéité du gain tout en gardant une planéité correcte du TPG.

Plusieurs topologies d'égaliseurs ont été testées. Les principaux critères sont la plage de variation du gain ainsi qu'une grande flexibilité. Le circuit d'égalisation présenté Figure 4 est réalisé avec un filtre de type non-réflectif conçu avec des éléments localisés [5]. Il permet une grande flexibilité dans la variation de la pente (Figure 5b), une bonne adaptation (< -20 dB) et une bonne compacité. Différentes versions du circuit d'égalisation ont été réalisés en fonction des paramètres-S mesurés des prototypes des blocs retard.

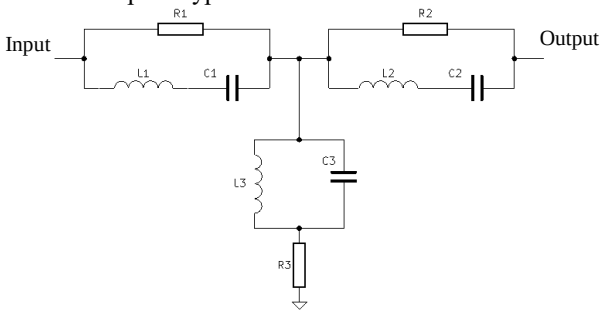


Figure 4. Topologie d'un filtre non-réflectif

Les simulations illustrées sur la Figure 5 illustrent le comportement du paramètre S_{21} pour un bloc retard. La courbe initiale représente les pertes d'insertion induites par les composants LTCC utilisés pour simuler une distance de 2 m. Les pertes d'insertion se situent entre -10,5 et -7 dB. Les paramètres S_{21} de l'égaliseur optimisé seul et du bloc compensé et égalisé sont également représentés.

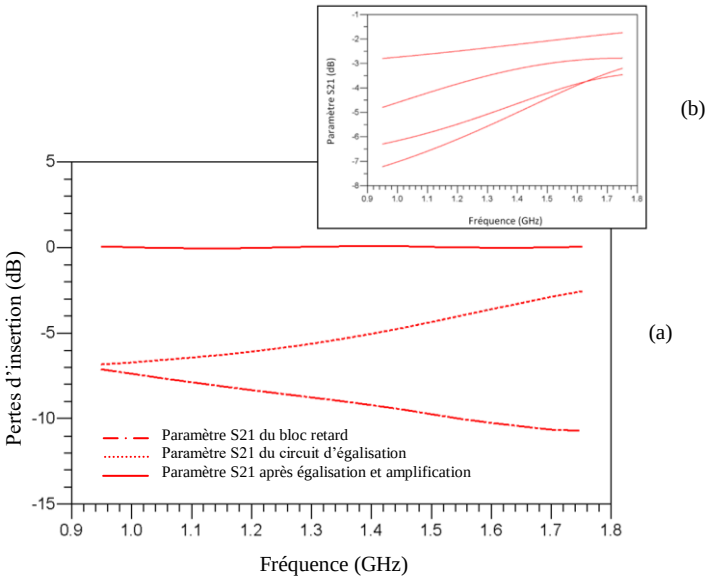
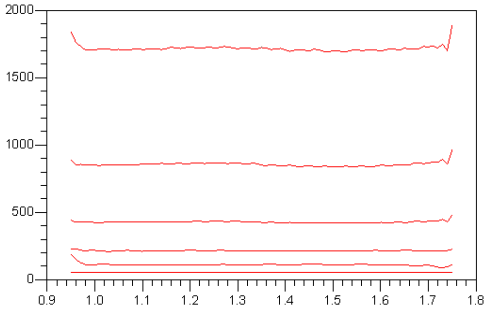


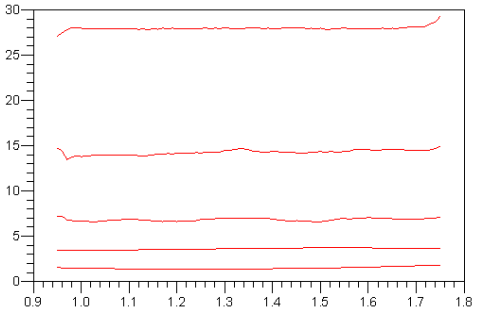
Figure 5. (a) Simulation des paramètres S_{21} d'un bloc retard avant/après égalisation et amplification, (b) Illustration des différentes pentes du gain du circuit d'égalisation proposé

La figure 6 montre les différentes possibilités du TPG (simulations) de la ligne à retard. Les simulations prennent en compte les paramètres S des commutateurs SPDT fourni par le fabricant et les délais mesurés des différents blocs retard réalisés.



Fréquence (GHz)

(a)



Fréquence (GHz)

(b)

Figure 6. Simulation du TPG du système entier, (a) de 53,3 ns à 1,67 µs, (b) de 1,3 ns à 26,7 ns

Les 800 MHz de largeur de bande ne sont pas pleinement atteints. En effet, les filtres SAW introduisent des remontées du TPG en bout de bande de fréquence.

4. Contrôle de la SER

La SER est une propriété physique qui représente la capacité d'un objet à réfléchir une onde électromagnétique à une fréquence donnée. L'équation de la SER (1), l'équation du radar et de l'atténuation en espace libre (2) permettent de déterminer l'équation de la SER en fonction du gain du RTS et de la distance simulée.

$$RCS = Pr + 10.log_{10}\left(\frac{(4.\pi)^3.Ds^4}{\lambda^2}\right) - Pe - 2.Ge \quad (1)$$

$$Pr = Pe + 2.Ge + 40.log_{10}\left(\frac{\lambda}{4.\pi.Dp}\right) + 2.Ga + G_{RTS} \quad (2)$$

$$RCS = G_{RTS} + 10.log_{10}\left(\frac{\lambda^2}{4.\pi}\right) + 40.log_{10}\left(\frac{Ds}{Dp}\right) + 2.Ga \quad (3)$$

G_{RTS} représente le gain du RTS, P_e la puissance d'émission et G_e le gain de l'antenne du radar. P_r représente la puissance reçue par le radar, D_s la distance simulée, D_p la distance physique entre le radar et le RTS et G_a le gain de l'antenne du RTS. Le gain du RTS est ajusté en fonction de la taille de la cible à simuler.

Le tableau 3 montre la correspondance entre la taille de la cible et la SER. Le calcul de la SER prend également en compte la distance radar-RTS lorsque ce dernier est utilisé dans un banc de test.

Objets	SER (dBm²)
Piéton	-5 à -3
Moto	3 à 5
Voiture	10 à 20
Camion	20 à 45

Tableau 3. Valeurs de SER à 77 GHz

Des détecteurs RF sont utilisés en entrée et en sortie de la ligne à retard, permettant de régler la valeur du gain du RTS pour simuler la SER souhaitée en fonction du scénario à tester, en atténuant ou amplifiant le signal. Le tableau 4 récapitule les différentes valeurs d'atténuation / amplification en fonction du scénario à réaliser, i.e. G_{RTS} = 0 dB.

SER / Distance simulée (m)	Piéton		Moto		Voiture		Camion	
	-5	-3	3	5	10	20	20	45
10	-30.9		-22.9		-11.9		5.12	
50	-58.8		-50.8		-39.8		-22.8	
100	-70.9		-62.9		-51.9		-34.9	
150	-77.9		-69.9		-58.9		-41.9	
200	-82.9		-74.9		-63.9		-46.9	
250	-86.8		-78.8		-67.8		-50.8	

Tableau 4. Atténuation/amplification en fonction de la cible et de la distance simulée

5. Conclusion

Cette étude a montré la possibilité d'un nouveau design de ligne à retard large bande, reconfigurable, utilisant une architecture hybride, permettant de simuler des distances comprises entre 1 m et 250 m. L'innovation intervient à un niveau système, avec une architecture spécifiquement développée incluant le contrôle de la distance ainsi que le réglage de la SER. Le prototype complet est actuellement en conception et devrait respecter les critères attendus de coût (< 2000 €) et de dimensions (< 15 cm x 5 cm x 5 cm).

Références

[1] A. A. Shirakawa, « Etude, synthèse et réalisation de filtres Baw pour applications mobiles », Ph.D Thesis, Université de Bordeaux I, 2006.

[2] H. Jiang et R.-M. Xu, « 9.5 GHz 16 lambda G.Delay Line Using Multilayer LTCC », *Prog. Electromagn. Res. Lett.*, vol. 6, p. 175–182, 2009.

[3] G.-L. Tan, R. E. Mihailovich, J. B. Hacker, J. F. DeNatale, et G. M. Rebeiz, « Low-loss 2- and 4-bit TTD MEMS phase shifters based on SP4T switches », *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 51, n° 1, p. 297-304, janv. 2003.

[4] G. Chaudhary, H. Choi, Y. Joeng, J. Lim, et C. D. Kim, « Design of Group Delay Time Controller Based on a Reflective Parallel Resonator », *ETRI J.*, vol. 34, n° 2, p. 210-215, avr. 2012.

[5] A. Fejzuli, R. Kaarsberg, et N. Roldan, « Broadband amplifier gain slope equalization with a single passive component », *High Freq. Electron.*, vol. 5, n° 6, p. 22–26, 2006.