

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN OUTAOUAIS

MÉMOIRE PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DU PROGRAMME DE MAÎTRISE EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE

L'INFORMATION

PAR

Franky Dakam Wappi

**Nouveau déphaseur reconfigurable basé sur un guide d'onde intégré
dans un substrat demi-mode**

Mémoire accepté le : 17 novembre 2023

COPOSITION DU JURY

Président du Jury : Pr. Michael Korwin-Pawlowski

Membre du Jury : Pr. Eftimov Tinko

Membre du Jury : Pr. Mourad Nedil

Directeur de recherche: Pr. Halim Boutayeb

Codirecteur de recherche : Pr. Larbi Talbi

REMERCIEMENTS

Je remercie mon Directeur de mémoire Pr. Halim Boutayeb qui est une grande source de motivation et qui a su me guider tant dans mon cursus académique que dans mon cursus professionnel et qui a énormément donné de son temps pour lire chacune des ébauches que je lui faisais parvenir et trouver du temps pour une rencontre en personne ou en virtuelle. Sans lui je n'aurais jamais pu avancer dans cette recherche.

J'aimerais aussi remercier Pr. Hettak Khelifa et mon codirecteur Pr. Talbi Larbi qui m'ont aidé dans l'apprentissage du processus de recherche et d'analyse des articles afin de développer quelques choses de nouveaux.

J'aimerais également remercier Dr. Alireza Ghayekhloo et Dr. Bilel Mnasri qui m'ont aidé à comparer mes résultats du simulateur HFSS et du simulateur CST à l'analyseur de spectre Keysight N9950B.

J'aimerais aussi remercier Louati Siwar pour m'avoir donné les bases sur la conception et l'utilisation du simulateur ANSOFT HFSS et ADS et me guider dans la conception de mon premier guide d'onde rectangulaire.

Un merci particulier à toute l'équipe du groupe de recherche avancé en RF pour leur disponibilité à relire chaque article que j'ai eu à produire. <https://lrtra.uqo.ca/>

Enfin un merci chaleureux à ma famille et à tous mes amis et collègues pour leurs encouragements et leurs conseils.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	10
Chapitre I. Les guides d'ondes intégrés aux substrats (GIS).....	10
I.1 Historique	10
I.2 Les différents types de GIS.....	11
Chapitre II. Les déphaseurs reconfigurables.....	12
II.1 Historique	12
II.2 Les déphaseurs à GIS reconfigurables.....	13
Chapitre III. Techniques de reconfiguration à l'aide de GIS dans la littérature.....	14
III.1 Déphaseur reconfigurable à commutateur double pôles	14
III.2 Déphaseurs reconfigurables à stub transversal.....	15
III.3 Conception d'un déphaseur reconfigurable pour les systèmes d'antennes à formation de faisceaux.....	17
Chapitre IV. Conception d'un GIS demi-mode.....	18
IV.1 Présentation des étapes de conception	18
IV.2 Conception du GIS demi-mode	18
Chapitre V. Conception d'un nouveau déphaseur reconfigurable	21
V.1 Présentation des étapes de conception	21
Chapitre VI. Fabrication et mesures expérimentales.....	25
VI.1 Fabrication de la structure	25
VI.2 Mesure expérimentale.....	27
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	31
Annexe A	32
I. Amélioration apportée au nouveau système conçu	32
Annexe B	35
I. Étude de la diode PIN.....	35
REFERENCES	38

Liste des figures

Figure 1 : Schéma d'un guide d'onde intégré au substrat.....	11
Figure 2: Schéma proposé du commutateur à double pôle	14
Figure 3 : Schéma d'un déphaseur à guide d'onde intégré au substrat reconfigurable.....	16
Figure 4 : Schéma d'un déphaseur à diode interne au guide d'onde intégré au substrat	17
Figure 5 : Schéma proposé du Guide d'onde intégré au substrat demi mode.....	19
Figure 6: Structure du déphaseur à GIS demi mode	21
Figure 7: Emplacement de la résistance d'isolation du signal DC et de la diode dans le module de commande de la reconfiguration du déphaseur.....	22
Figure 8 : Représentation du modèle équivalent d'une diode PIN pour deux états différents sous HFSS. En utilisant un arrangement parallèle pour les deux états, l'état ON est dérivé d'une transformation série à parallèle. ($L_n=0,209$ nH, $R_{on}=33,3 \Omega$, $R_{off}=30\Omega$)	23
Figure 9 : Lay out envoyé à polytechnique depuis le logiciel CST	26
Figure 10 : Déphaseur à GIS demi mode fabriqué qui peut être facilement intégré à d'autres composants micro-ondes grâce à ses caractéristiques compactes, modulaires et miniaturisées.....	26
Figure 11: Paramètres de diffusion en fonction de la fréquence pour deux états :(a) toutes les diodes éteintes, et (b) toutes les diodes allumées. Les coefficients de réflexion pour le port 1 (S11), le port 2 (S22) et le paramètre de couplage entre les	27
Figure 12: Les valeurs de déphasage obtenues sont présentées en utilisant la structure reconfigurable proposée avec trois diodes intégrées au GIS demi mode. Des comparaisons sont effectuées entre les résultats de deux simulations concrètes et les solutions.....	28
Figure 13: Proposition de structure en cascade du déphaseur avec le GIS Demi mode pour générer deux fois les déphasages primaires.....	32
Figure 14: Paramètres de diffusion en fonction de la fréquence pour deux états	33
Figure 15 : La valeur maximale de déphasage obtenue est présentée en utilisant une structure reconfigurable étendue avec six bornes de diodes intégrées à une ligne de transmission HMSIW.....	33
Figure 8 : Représentation du modèle équivalent d'une diode PIN pour deux états différents sous HFSS. En utilisant un arrangement parallèle pour les deux états, l'état ON est dérivé d'une transformation série à parallèle. ($L_n=0,209$ nH, $R_{on}=33,3 \Omega$, $R_{off}=30\Omega$)	35
Figure 16 : Paramètres de diffusion en fonction de la fréquence pour les études paramétriques lorsque toutes les diodes sont désactivées	36
Figure 17 : Variation de la phase de transmission en utilisant différents paramètres de capacité à l'état désactivé.....	37

RESUME

Dans ce travail, nous proposons un nouveau déphaseur électriquement reconfigurable, basé sur un guide d'ondes intégré au substrat à demi-mode (HMSIW). Le GIS demi mode est une topologie de ligne de transmission guidée à excitation par demi mode permettant de réduire pratiquement de moitié la taille du circuit à guide d'ondes intégré au substrat (GIS). Cependant, les déphaseurs sont des dispositifs électroniques qui modifient la phase du signal de transmission pour une large gamme d'applications.

La structure monocouche proposée, ne nécessite aucune couche de câblage pour le circuit de polarisation sur la carte de circuit imprimé. Son principe consiste à l'intégration dans le GIS demi-mode, trois lignes parallèles, chacune d'entre elles reliant le bord de la GIS qui, lui-même est relié à une diode PIN et à un stub radial. Nous présentons ici les résultats des mesures pour une bande de fréquence allant de 4,5 à 7 GHz, qui démontrent la concordance entre l'expérience théorique et les simulations.

La perte d'insertion étant inférieure à -10 dB et le couplage de port étant inférieur à -2 dB pour les solutions de simulation et de mesure. Avec la conception proposée, les sept états des diodes PIN peuvent être validés selon leur état (ON et OFF), avec une adaptation à une large bande et une différence de phase relativement constante sur une large gamme de fréquences. L'un des principaux avantages de la conception proposée pour un composant hyperfréquence est la réduction des couches de polarisation supplémentaires dans les diodes PIN, ainsi que la réduction de la taille de la ligne de transmission par rapport à un GIS commercial.

Dans la section en annexe, plusieurs logiciels de simulation sont utilisés pour une analyse plus complète impliquant davantage de valeurs de déphasage et d'études paramétriques.

Abstract:

In this work, we propose a new electrically reconfigurable phase shifter based on a half-wave substrate-integrated waveguide (HMSIW). HMSIW is a half-wave-excited guided transmission line topology that practically halves the size of the circuit (SIW). However, phase shifters are electronic devices that modify the phase of the transmission signal for a wide range of applications.

The proposed single-layer structure requires no wiring layer for the bias circuit on the proposed printed circuit board. The principle consists of integrating three parallel lines into the HMSIW, each of which connects to the edge of the HMSIW, which in turn connects to a PIN diode and a radial stub. Here we present the results of our measurements over a frequency range from 4.5 to 7 GHz, demonstrating the agreement between theoretical experiments and simulations.

Insertion loss was less than -10 dB and port coupling were less than -2 dB for both simulation and measurement solutions. With the proposed design, all seven PIN diode states can be validated (ON and OFF), with broadband matching and a relatively constant phase difference over a wide frequency range (44%). One of the main advantages of the proposed design for a microwave component is the reduction in additional bias layers in the PIN diodes, as well as the reduction in transmission line size compared with a commercial SIW.

In the appendix section, two simulation programs are used for a more comprehensive analysis involving more phase shift values and parametric studies.

INTRODUCTION GENERALE

Le déphaseur est un équipement important dans les systèmes de télécommunication modernes, en particulier pendant la conception d'un système à réseaux d'antennes phasés [1-4]. Ainsi, les déphaseurs sont principalement impliqués dans le contrôle électronique du faisceau d'une antenne dans un système à réseaux phasés [5-8]. Ceci afin d'améliorer la qualité de la zone de couverture en transmission ainsi qu'en réception à grande vitesse. D'autres applications sont les filtres à cavité, les diviseurs de puissance, les modulateurs de phase, les dispositifs à haute puissance et les radars [9].

Plusieurs chercheurs qui ont axé leurs travaux sur les déphaseurs proposent des approches différentes. Dans [1] par exemple, les auteurs proposent l'utilisation de deux lignes de transmission pour concevoir un réseau de déphasage à large bande différentiel. Par contre dans [2], les travaux portent sur un déphaseur à fente réglable à large bande utilisant deux fentes symétriques gravées sur la surface supérieure d'un guide d'ondes intégré au substrat (GIS). Les travaux du [3] quant à eux sont orientés sur un déphaseur multicouche basé sur une structure GIS à deux couches couplées par une fente transversale. Le [4] est lui tourné vers les déphaseurs utilisant des réseaux d'entrefers, enfin dans [5], les auteurs proposent des lignes coplanaires CPW (Coplanar Wave guide) gravées dans la direction transversale du GIS et couplées à des diodes PIN.

Ces méthodes génèrent une différence de phase fixe entre deux points de la composante micro-onde. Cependant en utilisant une diode et ses états connexes, il est possible de régler la structure du déphaseur constant, comme cela a été étudié dans [10 et 11]. Les diodes PIN peuvent interagir avec la ligne stub longitudinale et le GIS pour modifier la différence de phase requise pendant que le signal voyage à travers le GIS.

L'intégration des diodes dans un dispositif électromagnétique n'est pas simple et nécessite quelques aspects innovants concernant le changement d'état des diodes. Un exemple de technique présentée dans un brevet de 2018 consiste à éliminer le besoin de lignes de polarisation supplémentaires pour les diodes PIN utilisées dans les applications de commutation de faisceau [12 et 13]. Cependant, une diode PIN pourrait fournir une réponse plus stable et plus rapide à la polarisation et aux sources RF.

Outre le déphasage requis et la conception simple à une couche, il est nécessaire de réduire la surface totale d'un GIS. Par conséquent, nous proposons un GIS à demi mode pour la réalisation de notre nouveau dispositif électronique pratique. Le GIS à demi-monde (HMSIW) présente une taille plus petite et des performances similaires à celles d'un déphaseur à GIS simple. La structure proposée peut être appliquée à des circuits RF miniaturisés pour générer des déphasages souhaitables. En utilisant le concept de paroi magnétique.

Cet article propose les étapes de conception d'un nouveau guide d'ondes intégré au substrat à demi-monde (HMSIW), qui présente tous les avantages d'un GIS, mais avec une taille réduite de moitié [14 et 15]. Ainsi, trois lignes micro-rubans sont connectées à trois diodes PIN qui sont connectées à chaque extrémité d'un stub radial. Ce circuit génère un déphasage électriquement contrôlable entre les deux ports d'une HMSIW grâce aux huit états actifs ou inactifs des diodes associées aux stubs radiaux. Pour valider la conception proposée, nous utilisons plusieurs techniques de simulation et une étape de mesure concrète. La longueur et la largeur des lignes micro-ruban et leur emplacement sur la HMSIW sont optimisés pour obtenir un déphasage approximativement constant sur la gamme de fréquences considérée.

Le reste du document est organisé comme suit. Le chapitre 1 présente les généralités sur le guide d'onde intégré au substrat, au chapitre 2 nous parlerons des déphaseurs reconfigurables, puis au chapitre 3 nous parcourons les techniques de reconfiguration à guide d'onde vu dans la littérature. Par la suite au chapitre 4 nous verrons les différentes conceptions de GIS et au chapitre 5 la conception des déphaseurs reconfigurable. De plus au chapitre 6 nous présenterons le prototype avec la concordance entre les tests pratiques et les tests de simulations. Enfin nous présenterons les améliorations apportées après la réalisation de notre prototype en annexe A et B.

Chapitre I. Les guides d'ondes intégrés aux substrats (GIS)

I.1 Historique

Les guides d'ondes sont des lignes de transmission traditionnelle utilisée pour le guidage d'un signal électromagnétique par réflexion sur ses parois internes. Plusieurs composants ont vu le jour à base de cette technologie nous pouvons citer les filtres, les coupleurs ainsi que les déphaseurs. Bien qu'ils présentent l'avantage de produire de faibles pertes et une transmission quasi totale du signal, ils comportent des inconvénients majeurs comme le coût de fabrication élevé et la difficulté d'intégration avec d'autres composants à micro-ondes sur un même circuit.

Cependant dans le monde des télécommunications modernes, la conception des circuits facilement intégrables avec une taille et poids faible et un coût réduit est un défi majeur. C'est ainsi qu'en 1994 une équipe de chercheur japonais ont breveté un nouveau concept des guides d'ondes en forme plane utilisant deux rangées de trous métallisés traversant un substrat diélectrique et reliant deux plaques métalliques parallèles c'est la naissance du premier GIS.

Par la suite, des efforts ont été déployés par l'équipe du professeur Ke Wu au centre de la recherche de polygrammes de l'École polytechnique de Montréal pour introduire le concept des circuits intégrés au substrat (CIS) comme étant la nouvelle vision sur ce système. Cette technologie innovante permet de réaliser plusieurs composants tels que les filtres, les calculateurs, les coupleurs, les diviseurs de puissance, les réseaux d'antennes ainsi que les déphaseurs [16].

I.2 Les différents types de GIS

Il existe deux grandes familles des guides d'ondes, il s'agit des guides d'ondes à structure volumique permettant la fabrication des guides d'ondes rectangulaires et circulaires et des guides d'onde à structure planaire permettant la fabrication des lignes micro-ruban, les lignes coplanaires et les lignes tri-plaques. Le principe de la technologie GIS est de réaliser un guide d'onde volumique dans un substrat planaire dont la performance est étroitement liée au choix judicieux des dimensions intrinsèques suivantes :

- 1- Le diélectrique (hauteur, permittivité ...)
- 2- Le diamètre des cylindres d ;
- 3- La distance entre deux cylindres adjacents;
- 4- La distance entre les deux rangés des cylindres.

Ainsi cette technologie basée sur l'utilisation des circuits imprimés pour résoudre les problèmes des circuits traditionnels possède plusieurs avantages tels que :

- 1- Facteur de qualité élevé
- 2- Intégration facile
- 3- Taille réduite
- 4- Faible coût de fabrication
- 5- Faible perte
- 6- Bonne transmission de l'énergie

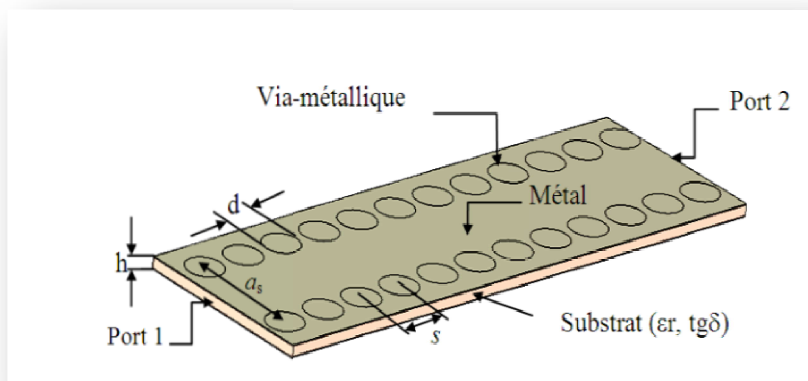


Figure 1 : Schéma d'un guide d'onde intégré au substrat

Chapitre II. Les déphaseurs reconfigurables

II.1 Historique

Au 19^e siècle, les physiciens Augustin-Jean Fresnel et François Arago ont réalisé des expériences sur l'interférence et la diffraction de la lumière, démontrant ainsi les propriétés de la lumière en tant qu'onde. Ce qui a permis plus tard la création des dispositifs tels que les plaques de verre et les lentilles pour le contrôle du déphasage bien qu'imprécis et limité de la lumière.

C'est à partir des années 1990 que des chercheurs ont commencé à exploiter les propriétés des guides d'onde pour introduire des déphasages contrôlés entre différents modes de propagation de l'onde électromagnétique [17].

Au fil des années, les recherches se sont concentrées sur l'amélioration des performances des déphaseurs en termes de rapidité, de linéarité, de compacité et de faible perte d'insertion. C'est ainsi que de nouvelles techniques de fabrication et de conception comme les déphaseurs à guides d'onde intégrée au substrat ont été développés, permettant d'atteindre des déphasages précis sur une large gamme de longueurs d'onde.

II.2 Les déphaseurs à GIS reconfigurables

Les déphaseurs à GIS reconfigurables sont des dispositifs de contrôle que l'on trouve dans de nombreuses architectures de télécommunication, radars, les dispositifs optoélectroniques, les réseaux optiques ainsi que les réseaux d'antennes. Dans le cas des réseaux d'antennes, Ils sont utilisés pour orienter le faisceau d'antennes dans différentes directions sans déplacer physiquement l'antenne ce qui est très utile pour les applications nécessitant une flexibilité et une rapide adaptation. Ils en existent plusieurs selon les techniques de fabrication.

- a) Déphaseurs à lignes de transmission : Ce type de déphaseur utilise des lignes de transmission intégrées au substrat pour modifier la phase du signal. Ils sont utilisés pour leur simplicité, leur efficacité et la reconfiguration s'obtient par le chargement d'une longueur de ligne à partir d'un mécanisme de commutation.
- b) Déphaseurs à Stubs radiaux et linéaires : Dans ces types de déphaseurs, les stubs radiaux ou linéaires sont utilisés avec des commutateurs pour ajuster l'impédance dans le circuit RF et ainsi générer un déphasage réglable
- c) Déphaseurs à fentes : Ces déphaseurs utilisent une fente dans un conducteur pour générer un déphasage.
- d) Déphaseurs à commutations à Diodes : Ces déphaseurs utilisent l'état actif ou inactif des diodes associées pour générer un déphasage électriquement contrôlable.

Chapitre III. Techniques de reconfiguration à l'aide de GIS dans la littérature

III.1 Déphaseur reconfigurable à commutateur double pôles

Dans cet article publié le 16 février 2017, les auteurs présentent un concept innovant de commutateur à double pôle. Pour la conception, ils ont commencé par travailler sur un circuit à guide d'onde rectangulaire intégré au substrat (GIS). Puis ils ont créé à la sortie du GIS rectangulaire deux GIS demi-mondes reliés à des stubs linéaires combinés à des diodes et polarisé périodiquement afin de faire varier l'impédance interne du GIS pour en ressortir une fonction de commutation unipolaire à deux positions et un diviseur de puissance.

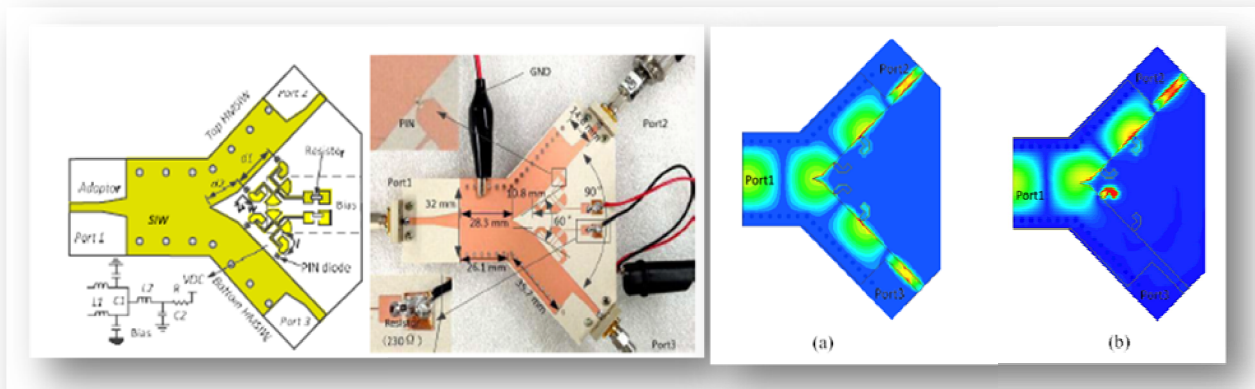


Figure 2: Schéma proposé du commutateur à double pôle

Techniques de reconfiguration à l'aide de GIS dans la littérature

Les avantages du circuit présentés sont essentiels pour les applications à haute fréquence où des performances élevées et une conception compacte sont recherchées. Nous pouvons citer comme avantages :

- 1- Une meilleure isolation entre les ports de sortie
- 2- Une faible perte d'insertion
- 3- Une large bande passante
- 4- Une intégration facile dans les circuits RF.

Ces résultats sont pertinents car ils ouvrent la voie à de nouvelles possibilités de conception et d'optimisation des systèmes de communication en 5G.

Notre objectif est d'utiliser ce principe pour créer un nouveau déphaseur reconfigurable.

III.2 Déphaseurs reconfigurables à stub transversal

Dans cet article publié en juillet 2022 dans le cadre du Symposium international IEEE sur les antennes et la propagation et la réunion de la science radio USNC-URSI intitulé "New reconfigurable SIW phase shifter with transverse CPW-based stubs and PIN Diodes".

Les auteurs présentent une nouvelle conception de déphaseur à guide d'onde intégré au substrat (GIS) reconfigurable utilisant des stubs transversaux basées sur des lignes coplanaires (CPW) qui offre une flexibilité accrue dans la conception du déphaseur mais aussi permettent de manipuler efficacement la phase du signal grâce à son couplage avec des diodes PIN reconfigurables permettant ainsi une variation de la phase par l'activation ou la désactivation des diodes PIN.

Techniques de reconfiguration à l'aide de GIS dans la littérature

Ce circuit présente plusieurs avantages tels que :

- 1- Une faible perte d'insertion
- 2- Une bande passante large
- 3- Une capacité de reconfiguration.

Ces caractéristiques sont importantes pour les applications nécessitant un contrôle précis de la phase, tels que les systèmes de communication sans fil et les radars à formation de faisceau.

Nous utiliserons partiellement ce procédé dans l'élaboration de notre nouveau GIS reconfigurable.

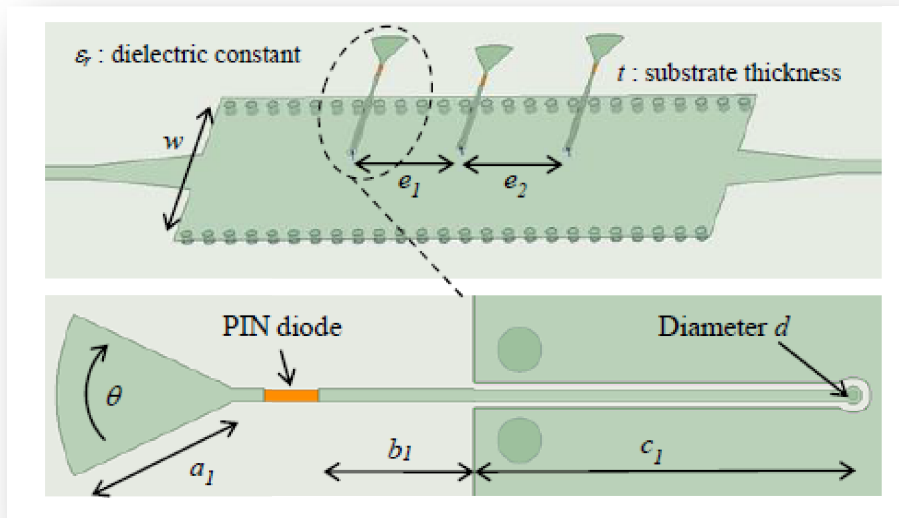


Figure 3 : Schéma d'un déphaseur à guide d'onde intégré au substrat reconfigurable

III.3 Conception d'un déphaseur reconfigurable pour les systèmes d'antennes à formation de faisceaux

Dans cet article publié en août 2021 lors de la 19e édition du Symposium international IEEE sur la technologie des antennes et les électromagnétiques appliquées (ANTEM) "Design of a SIW Variable Phase Shifter for Beamforming Antenna Systems" les auteurs présentent une approche novatrice de conception d'un déphaseur variable à guide d'onde intégré au substrat (GIS) sur du substrat ROGERS RO3300 dont le rôle est de contrôler électriquement l'état de quatre diode PIN enfouies dans le substrat et pouvant générer un déphasage maximal de 136 degrés. Cet article détaille de façon précise les circuits équivalents RLC des diodes selon sont états hauts et bas que nous exploiterons dans la conception du nouveau GIS reconfigurable.

Ce circuit offre des avantages tels que :

- 1- Une intégration facile,
- 2- Une faible perte d'insertion
- 3- Une bonne isolation

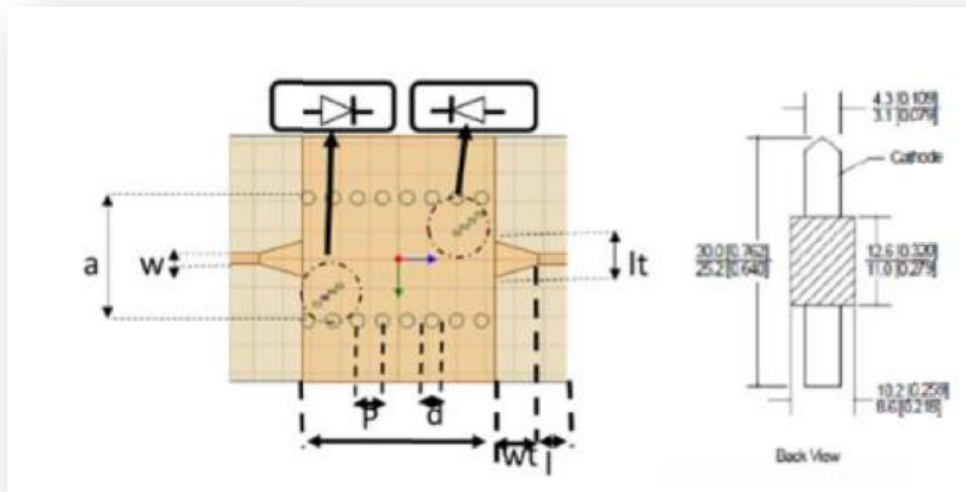


Figure 4 : Schéma d'un déphaseur à diode interne au guide d'onde intégré au substrat

Chapitre IV. Conception d'un GIS demi-mode

IV.1 Présentation des étapes de conception

Le guide d'onde intégré au substrat proposé est constitué d'un substrat de type Rogers RT/duroïde 5880 à une couche dont le plan de masse est recouvert de cuivre.

La conception du dispositif se fait en plusieurs étapes dont la première étape consiste à créer guide d'onde intégrée au substrat approprié qui transfère les signaux dans la bande de fréquence définie et avec un faible taux de dissipation. La seconde étape consiste à définir la longueur et la largeur de la ligne afin d'obtenir une bonne adaptation sur toute la largeur du GIS. Enfin grâce au logiciel ADS et au module d'optimisation du logiciel Ansoft HFSS nous avons trouvé des dimensions de départ qui se rapproche des dimensions optimales.

IV.2 Conception du GIS demi-mode

Le GIS demi mode de la figure 5 qui est proposée après le résultat de calcul et d'optimisation à partir du simulateur HFSS. Nous vous présentons ici les paramètres géométriques d'une structure utilisant le substrat ROGERS RT/duroïde 5880 (tm) avec une permittivité relative $\epsilon_r = 2,2$, Le diamètre des trous d'interconnexion est $d = 1,016$ mm, la distance entre deux centres d'interconnexion est $p = 1,5$ mm. La largeur $W_g = 15$ mm, et la hauteur du substrat $h = 0.508$ mm qui sont considérées. Les paramètres de la transition optimisée entre la ligne micro-ruban et le HMSIW sont les suivants : $W_2 = 1.5898$ mm qui représente la largeur de la ligne de transmission

50 Ohms, $W_3=4.7\text{mm}$ la largeur de la ligne micro-ruban conique d'adaptation à la ligne 50 Ohms, $L_3=11\text{mm}$ et $L_2=5\text{mm}$.

La largeur effective et la fréquence de coupure du GIS demi mode sont calculées en utilisant les équations (1) et (2).

- $W_{\text{eff}} = w_g - 1.08 \frac{d^2}{p} + 0.1 \frac{d^2}{w_g}$ Avec $0.05 \lambda < W_{\text{eff}} < 0.25 \lambda$ et $\lambda = \frac{C_0}{f \sqrt{\epsilon_r}}$ (1)
- $L_{\text{eff}} = L - 1.08 \frac{d^2}{p} + 0.1 \frac{d^2}{L}$ (2)

Où C_0 , λ_g , L_{eff} et W_{eff} sont, respectivement, la vitesse de la lumière, la longueur d'onde guidée, la longueur et la largeur effective.

Autres conditions à considérer pour le fonctionnement du GIS avec d étant le diamètre de via et p la distance entre les vias.

- $p < 2d$ Pour réduire les pertes de rayonnement (3)
- $d < \frac{\lambda_g}{5}$ (4)

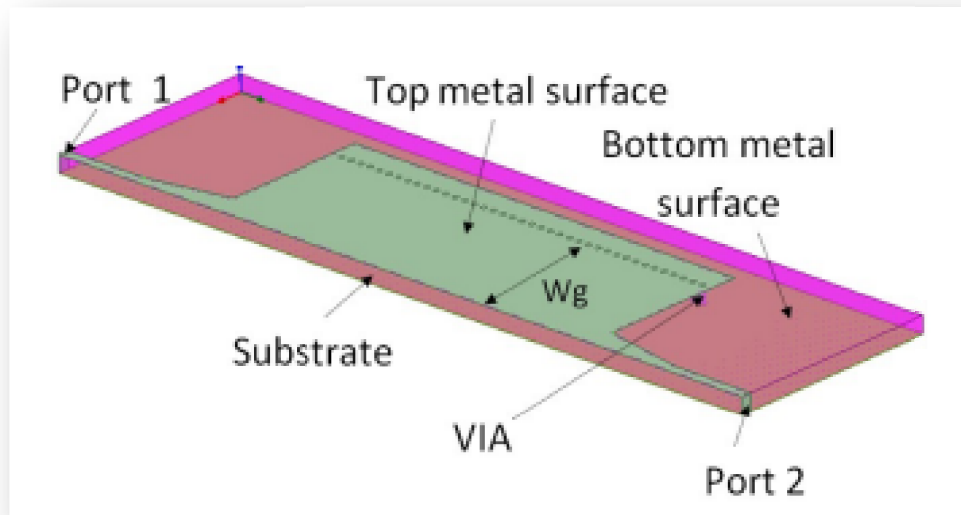
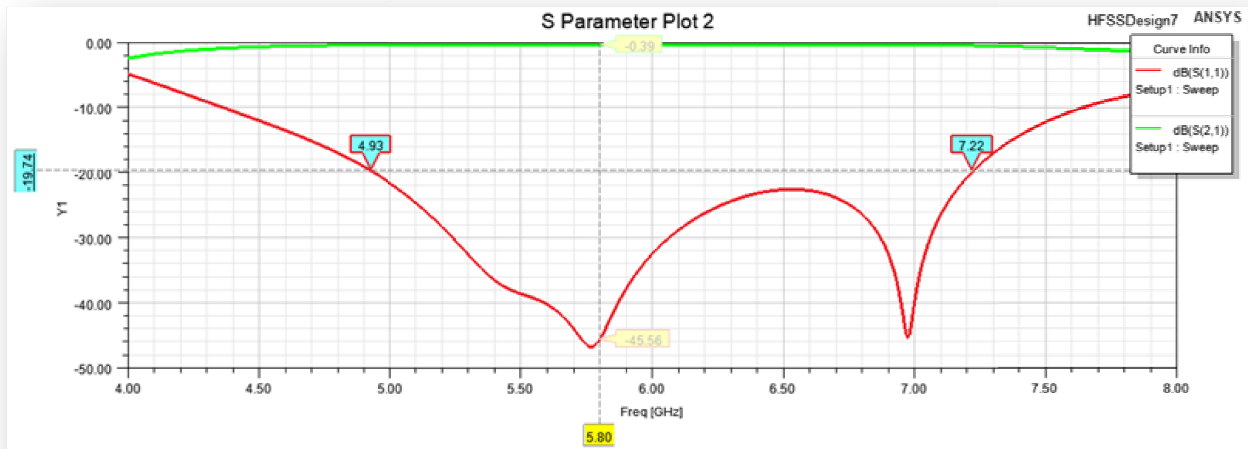


Figure 5 : Schéma proposé du Guide d'onde intégré au substrat demi mode

Le choix des dimensions du GIS demi mode doit être judicieux pour obtenir un système performant. Le ratio entre le rayon des cylindres et la distance entre deux cylindres consécutifs est le paramètre le plus important pour contrôler les pertes. D'après Deslandes [16], si $p = 2*d$, les pertes par radiation sont alors négligeables par rapport aux autres pertes.

Grace à l'étude paramétrique sous HFSS nous avons approché la bonne valeur recherche pour la conception de notre guide d'onde comme présenté à la Courbe ci-dessous



Courbe1 : Résultat de simulation des paramètres S sous HFSS

Chapitre V. Conception d'un nouveau déphaseur reconfigurable

V.1 Présentation des étapes de conception

La figure 6 présente le GIS demi mode associé au module de déphasage comprenant des diodes et un système de blocage DC. Le module comprend un guide d'onde intégré au substrat associé à trois lignes micro-ruban de longueur $P1$, $P2$, $P3$ connectées à trois diodes PIN de référence MA4GP907 matérialisées en simulation par des associations RL et RC ayant à leurs extrémités des résistances de 115Ω et donc l'extrémité se termine par des stubs de rayon $L5$ et d'angle θ permettant la modification de la phase du signal transmis. De plus le stub radial après la diode PIN fonctionne avec la résistance comme un blocage du signal DC. Cette technique d'isolation est réalisée sur la même couche que le déphaseur RF et les paramètres de simulation $T1$, $T2$, $L2$, $L3$, $W2$, $W3$, Wg , L , $P1$, $P2$ et $P3$ sont, respectivement de valeurs en millimètre, 6,9, 16,5, 1.5898, 5, 4.7, 77, 2.5, 1.5 et 2.5.

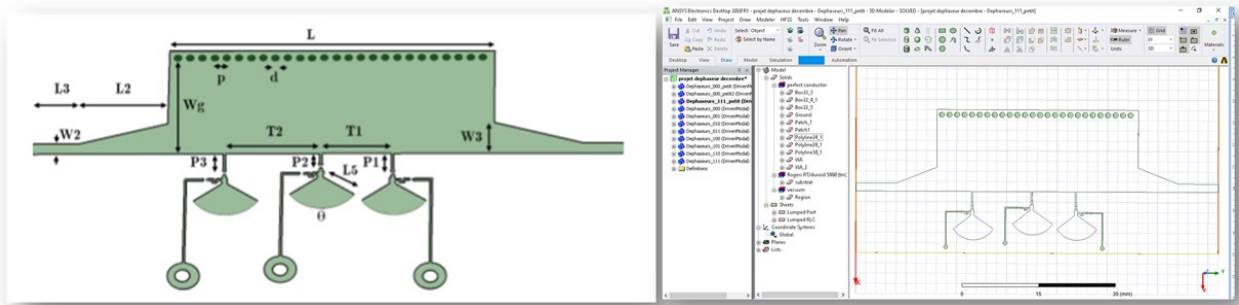


Figure 6: Structure du déphaseur à GIS demi mode

V.2 Principe de fonctionnement du module déphaseur

Nous suggérons l'utilisation d'une tension supérieure à 0,8V selon la documentation du constructeur pour l'activation de nos diodes en mode commutation. Aussi, Pour bloquer les interférences entre les deux sources, la technique d'isolation DC est mise en œuvre. La figure 7 illustre cette technique. Pour générer un large court-circuit RF résonant, un stub radial est utilisé ($L_5=4,61$ mm, et $\theta \approx 110^\circ$). Il peut constituer un réseau de découplage entre une source et d'autres composants.

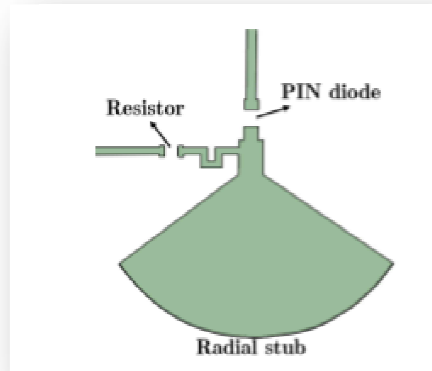


Figure 7: Emplacement de la résistance d'isolation du signal DC et de la diode dans le module de commande de la reconfiguration du déphaseur

Par ailleurs, les diodes PIN doivent être modélisées afin d'être exploitées dans des logiciels numériques. Le modèle de circuit électronique d'une diode PIN est illustré à la figure 8. Un circuit RLC parallèle est appliqué à la place d'un élément de diode PIN pour le GIS demi mode, y compris les deux états de la diode. À l'état passant, il peut s'agir d'une résistance parallèle à une inductance. D'autre part, il s'agit d'un condensateur et d'une résistance en parallèles à l'état désactivé. La diode est modélisée comme une résistance de faible valeur à l'état passant. En revanche, il s'agit d'une résistance de grande valeur lorsqu'elle est désactivée. Un modèle de circuit RLC parallèle est exploité car certains logiciels de simulation comme ANSYS HFSS ne peuvent prendre en compte que des éléments RLC parallèles.

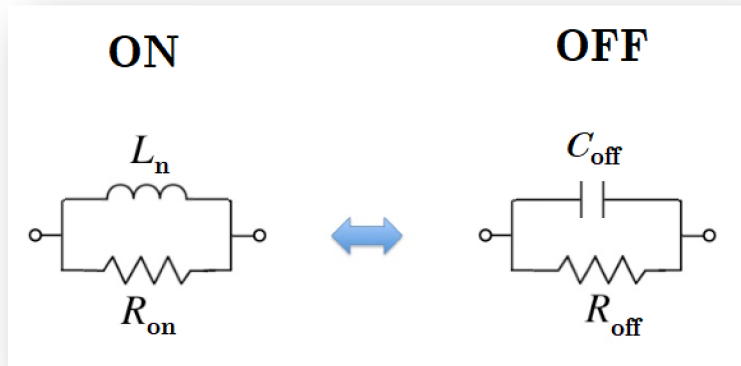
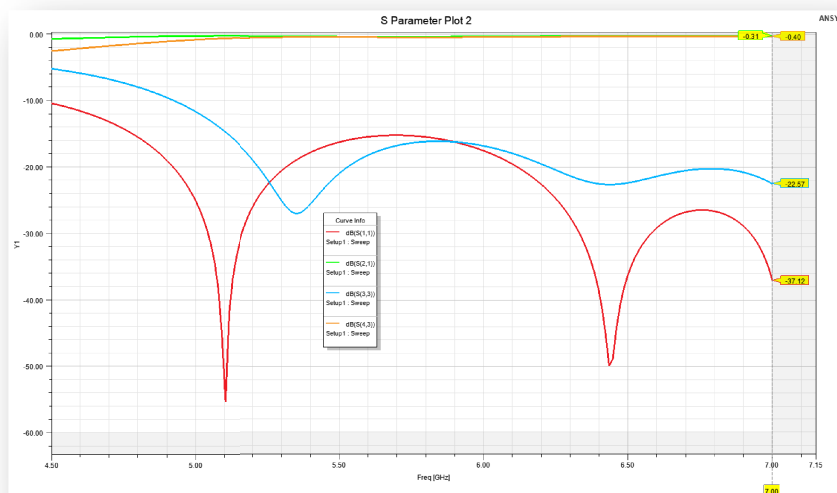


Figure 8 : Représentation du modèle équivalent d'une diode PIN pour deux états différents sous HFSS. En utilisant un arrangement parallèle pour les deux états, l'état ON est dérivé d'une transformation série à parallèle. ($L_n=0,209$ nH, $R_{on}=33,3$ Ω , $R_{off}=30$ Ω)

La diode PIN est le modèle MPP4201 de Microsemi, et la résistance provient de KOA Speer Electronics. La tension requise pour faire passer la diode à l'état ON est de 0,8 V. Pour une performance linéaire de la diode, une source de tension continue stable avec un commutateur désiré est utilisée.

V.3 Résultat de simulation sous Ansoft HFSS.



Courbe 2 : Résultat de simulation des paramètres S du déphaseur sous HFSS

Chapitre VI. Fabrication et mesures expérimentales

VI.1 Fabrication de la structure

La structure proposée a été conçue dans un logiciel de simulation numérique d'ondes complètes selon la géométrie de la figure 9. À la lumière des paramètres de diffusion, la géométrie a été ajustée pour fournir des performances appropriées sur toute la gamme de fréquences. La surface d'arrière-plan est appliquée avec un conducteur électrique parfait comme condition limite. Deux ports de guide d'ondes idéaux avec des surfaces plus grandes sont ajoutés aux deux lignes de micro-ruban aux coins. La fréquence d'analyse dans le logiciel de simulation est comprise entre 2 et 9 GHz. Divers logiciels de simulation, dont CST, HFSS et un analyseur de circuits (ADS), sont utilisés pour vérifier la structure avant de procéder à une étude de mesure concrète.

Pour vérifier les résultats de simulation de notre GIS demi-monde, la structure proposée est fabriquée comme le montre la figure 9. Deux connecteurs SMA sont soudés aux ports d'entrée et de sortie. La surface métallique du GIS demi mode est recouverte de cuivre et de pâte à souder dans la figure. Un analyseur de réseau portable de Keysight (N9950B) est connecté pour étudier les paramètres de diffusion pour deux ports, y compris les valeurs de réflexion et de couplage en dB et en unités de phase. Avant d'effectuer les mesures des paramètres de diffusion, un étalonnage mécanique à deux ports est effectué (sur la base d'un kit SOLT à large bande). Des diodes PIN et des résistances sont soudées sur la carte. Ensuite, une source de courant continu est utilisée pour simuler les différents états des diodes à l'aide de trois interrupteurs.

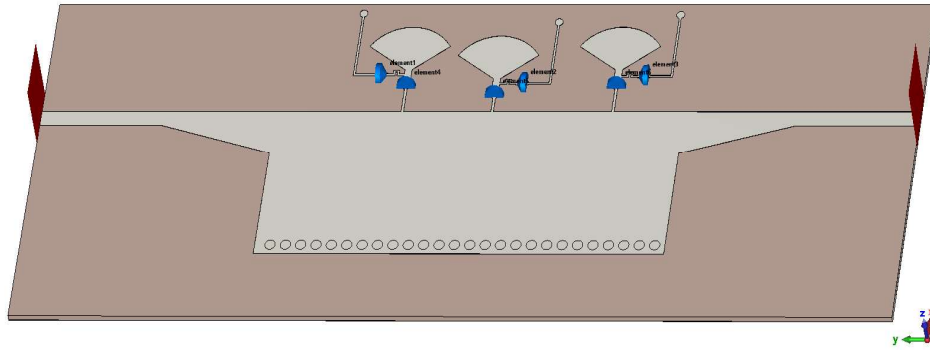


Figure 9 : Lay out envoyé à polytechnique depuis le logiciel CST

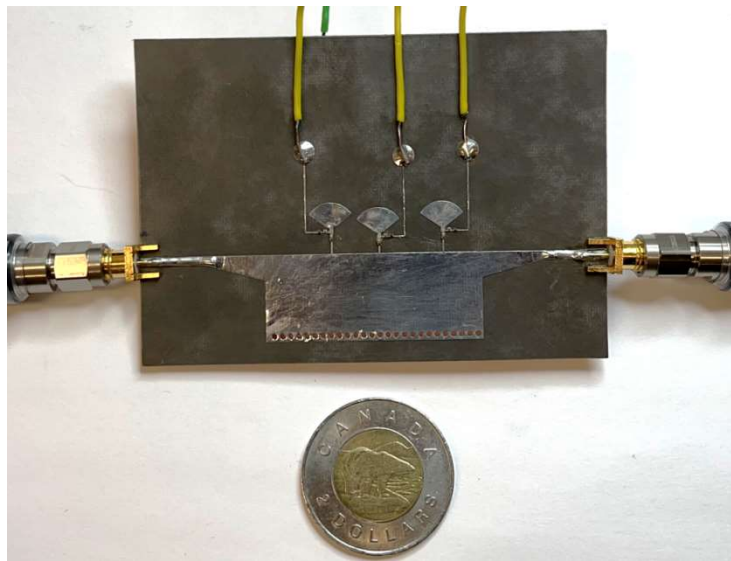


Figure 10 : Déphaseur à GIS demi mode fabriqué qui peut être facilement intégré à d'autres composants micro-ondes grâce à ses caractéristiques compactes, modulaires et miniaturisées.

VI.2 Mesure expérimentale

Il y a trois diodes dans la conception, donc huit formations différentes d'états de diode peuvent être explorées. Le premier état, 000, indique que les trois diodes sont éteintes. En outre, 111 indique que les trois diodes sont à l'état ON. L'ampleur des paramètres de diffusion en dB est obtenue dans ces deux situations à partir de solutions variées. Dans la figure 10 les coefficients de diffusion pour les deux ports sont acceptables entre 4,5 et 7 GHz pour les deux scénarios. Sur la base des différentes solutions, les coefficients de réflexion des deux ports étaient inférieurs à -10 dB et le paramètre de couplage était inférieur à -2 dB compte tenu de la bande de fréquence attribuée. Le paramètre de couplage n'était pas acceptable pour fonctionner à des fréquences supérieures à 7 GHz dans l'expérience en raison de la perte importante dans les connecteurs.

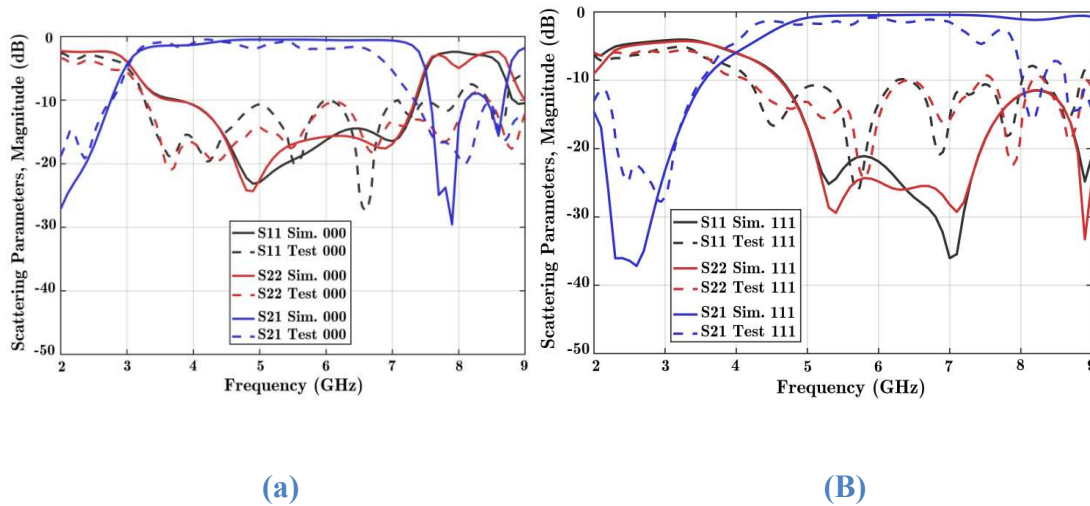


Figure 11: Paramètres de diffusion en fonction de la fréquence pour deux états :(a) toutes les diodes éteintes, et (b) toutes les diodes allumées. Les coefficients de réflexion pour le port 1 (S11), le port 2 (S22) et le paramètre de couplage entre les

Une fois que la transmission de l'onde a été effectuée dans la bande de fréquence attribuée, les deux solutions sont examinées pour déterminer la phase de la transmission. Étant donné que trois diodes PIN sont intégrées dans la ligne de transmission, il y aurait 8 situations différentes de diodes. 000 attribue la première situation et la situation de référence. Ensuite, en changeant l'état des diodes une à une, la variation de la phase de transmission est analysée. La variation de phase peut être contrôlée numériquement avec ce déphaseur reconfigurable. La figure 11 présente la différence de phase résultant de la normalisation des différents états des diodes par rapport à la formation de référence 000.

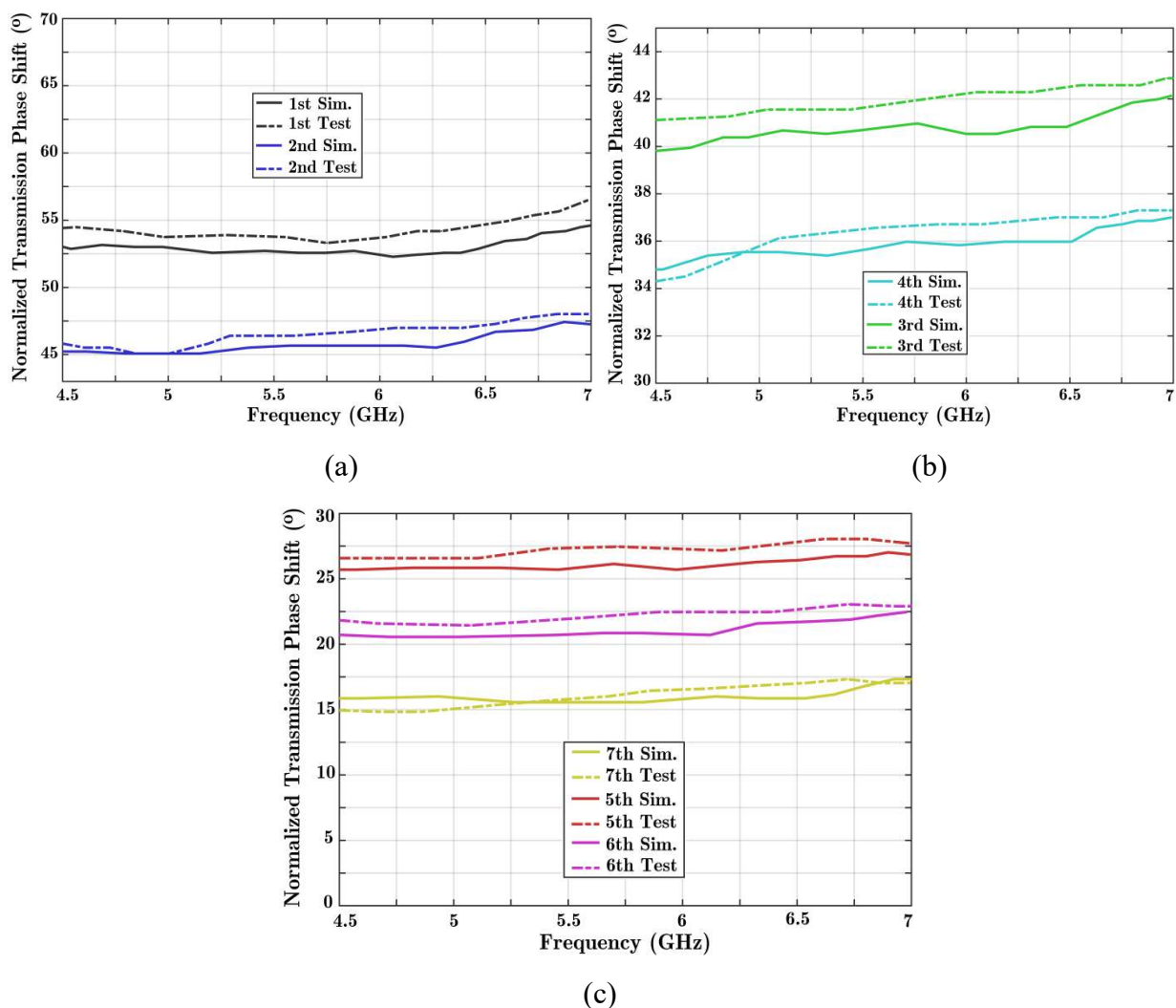


Figure 12: Les valeurs de déphasage obtenues sont présentées en utilisant la structure reconfigurable proposée avec trois diodes intégrées au GIS demi mode. Des comparaisons sont effectuées entre les résultats de deux simulations concrètes et les solutions

Un déphasage maximal de 55° est obtenu lorsque toutes les diodes sont activées (comme le montre la figure 11 (a)). Pour l'ensemble de la gamme de fréquences, on obtient une réponse pratiquement stable. Seules les performances de déphasage dans la gamme de fréquences de 4,5 à 7 GHz sont indiquées dans les graphiques. De plus, Le paramètre de couplage du signal de la figure 10 montre une transmission d'ondes de haute qualité. En outre, une différence de phase presque constante est obtenue sur la base de l'analyse de la figure 11 en considérant chaque point de fréquence.

La structure proposée présente une configuration prometteuse par rapport aux conceptions récentes de déphaseurs dans la littérature. Outre les états accordables (sept modes normalisés), la polarisation en courant continu des diodes PIN est intégrée dans une couche similaire à celle du signal RF cette caractéristique élimine la nécessité d'une couche de polarisation supplémentaire. En outre, la conception en demi-monde réduit la largeur du déphaseur GIS, ce qui en fait un dispositif idéal pour les systèmes modulaires et intégrés.

Le système proposé peut être appliqué à une antenne de détection pour la section d'ingénierie de phase. Les systèmes d'orientation des faisceaux nécessitent des déphaseurs compacts. Avec un déphaseur, il est possible de réaliser un système de détection à haute résolution pour des applications telles que les capteurs radar automatiques. Une autre application de ce déphaseur innovant est la production de surfaces variables dans le temps.

Aussi, un modèle révisé est simulé à l'aide du logiciel de simulation de l'annexe A afin d'illustrer les capacités de la structure GIS proposée. Il est possible de mettre en cascade deux déphaseurs ou plus pour générer des valeurs de déphasage plus élevées. Étant donné que la perte de signal se produit au niveau des connexions et des transitions des ports, la mise en cascade d'un plus grand nombre de composants déphaseurs ne génère pas plus de perte. Cette conception élargie est incluse dans l'annexe A du logiciel de simulation. La taille totale du modèle remanié augmentera de 41 %.

En outre, une étude paramétrique est fournie à l'annexe B. L'étude paramétrique couvre la non-linéarité et la variation des caractéristiques des diodes PIN, y compris les modèles de circuits parallèles équivalents. Dans ce cas, les paramètres de la diode tels que la résistance, l'inductance

Fabrication et mesures expérimentales

et la capacité ont été réglés afin d'étudier plus en détail leurs effets sur les paramètres de diffusion de la GIS.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Un tout nouveau déphaseur demi-mode à guide d'ondes intégré au substrat est proposé ici pour couvrir les fréquences de 4,5 à 7 GHz. La structure est optimisée pour obtenir de faibles pertes d'insertion et de réflexion. La structure est conçue de manière innovante sur une seule couche de substrat, ce qui la rend compacte, à faible perte et à profil bas, et permet de la combiner facilement avec d'autres dispositifs micro-ondes modulaires. Elle est basée sur des lignes micro-ruban intégrées dans un GIS demi-mode, des diodes PIN et des stubs radiaux. Il ne nécessite pas l'utilisation de fils supplémentaires pour la polarisation de l'élément accordable, ce qui le rend intéressant pour les fréquences d'ondes millimétriques et les applications telles que la détection et la formation de faisceaux d'antenne. En outre, l'exploitation d'un GIS en demi-monde permet d'obtenir une taille plus petite que celle d'une formation GIS typique. Cette étude paramétrique permet d'obtenir des performances élevées en termes de déphasages multiples, de paramètres de diffusion et de conception modulaire miniaturisée.

Annexe A

I. Amélioration apportée au nouveau système conçu

Il convient de noter que tous les états des diodes peuvent préparer un déphasage de 15° à 55° . Un déphasage plus important est possible en cascasant les structures sans perte supplémentaire dans la transition d'onde. La principale dissipation dans le signal provient de la transition entre la micro-ruban et le GIS, y compris le mécanisme d'adaptation du port. Cette annexe présente une structure en cascade similaire à la conception proposée. Pour cette étude, le logiciel de simulation n'est utilisé que pour évaluer les capacités d'un déphaseur HMSIW. La structure mise à jour a une longueur de $L^*=73$ mm, comme le montre la figure 13.

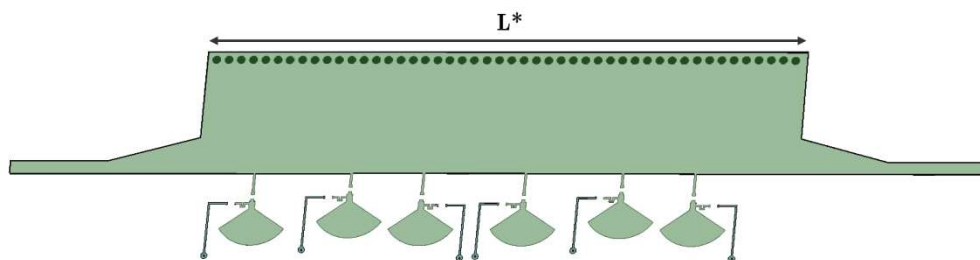


Figure 13: Proposition de structure en cascade du déphaseur avec le GIS Demi-mode pour générer deux fois les déphasages primaires.

La fréquence de fonctionnement de ce déphaseur cascadié est comprise entre 4,8 et 7,4 GHz pour la conception étendue. C'est le résultat d'une simple propriété de transformation de la conception de la structure sans optimisation géométrique supplémentaire dans le mécanisme de simulation. Dans le logiciel CST, seule une opération de transfert de copie est utilisée pour créer une simple fonction étendue à cette fin. Avec un réglage approprié de la structure en cascade, il est possible d'obtenir une bande de fréquence similaire. Les paramètres de diffusion sont présentés à la figure 14 pour les coefficients de réflexion et de couplage. Par souci de concision, seuls deux scénarios,

toutes diodes éteintes et toutes diodes allumées, sont examinés ici. Dans la largeur de bande assignée, la valeur de couplage était inférieure à -2 dB et le coefficient de réflexion des deux ports était inférieur à -10 dB.

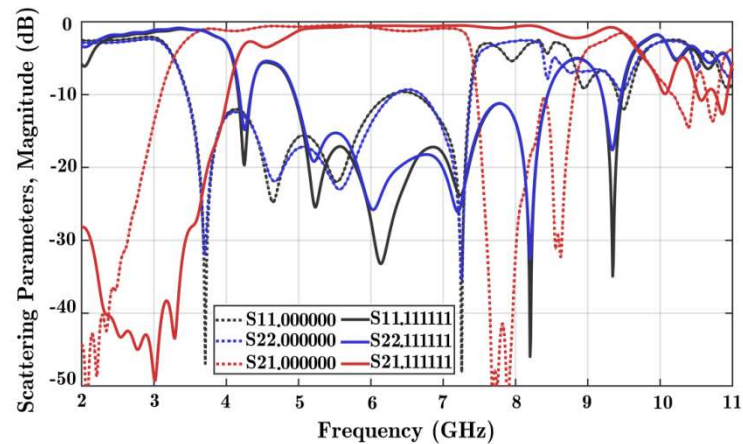


Figure 14: Paramètres de diffusion en fonction de la fréquence pour deux états

Toutes les diodes éteintes et toutes les diodes allumées. Les coefficients de réflexion pour le port 1 (S11), le port 2 (S22) et le paramètre de couplage entre les ports (S21) sont obtenus. Seul le logiciel de simulation est exécuté pour cet élément de déphasage en cascade. L'état 000000 correspond à la situation où toutes les diodes sont éteintes (lignes pointillées), tandis que l'état 111111 représente six diodes allumées en même temps (lignes pleines).

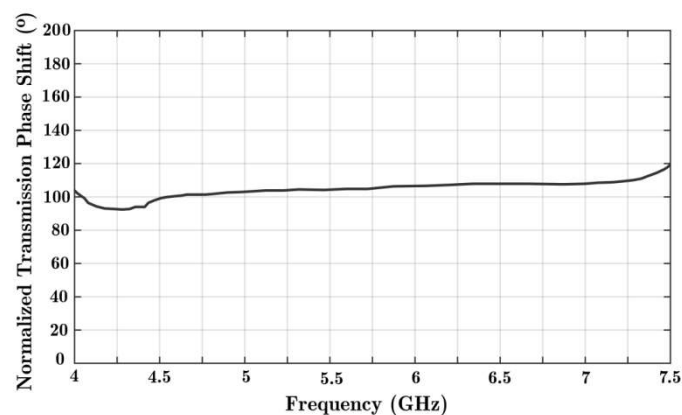


Figure 15 : La valeur maximale de déphasage obtenue est présentée en utilisant une structure reconfigurable étendue avec six bornes de diodes intégrées à une ligne de transmission HMSIW.

Des diodes similaires sont ajoutées à la conception. En outre, le nombre de diodes est passé à six dans cette conception étendue. L'objectif d'un déphaseur en cascade basé sur le HMSIW proposé est de montrer la capacité du dispositif hyperfréquence à atteindre des déphasages plus élevés. L'augmentation du nombre de diodes permet également d'obtenir un plus grand nombre de déphasages. Comme le montre la figure 14, la structure étendue a atteint la valeur maximale de déphasage. Il est désormais possible d'obtenir jusqu'à 120° de déphasage. En cascade de trois déphaseurs, la valeur ultime de déphasage de la transmission serait de 180° .

Annexe B

I. Étude de la diode PIN

Les diodes PIN étant des éléments non linéaires, leurs modèles de circuits équivalents peuvent être modifiés en changeant la tension d'alimentation et la source de polarisation [18]. Il est possible d'utiliser une source de courant continu précise pour modifier l'état d'une diode PIN. Une autre option consiste à appliquer le déphaseur proposé dans une section de réception en utilisant un signal de puissance RF plus faible (petit signal). Cela améliorera la stabilité de la diode.

Une analyse paramétrique a été effectuée ici dans le but d'obtenir une variation de 20 % de certains circuits équivalents de la diode PIN appliquée dans le logiciel de simulation. Les composants à étudier sont les valeurs de résistance et d'inductance à l'état ON et la capacité à l'état OFF (Coeff=0,10704, 0,1338, et 0,16056 PF).

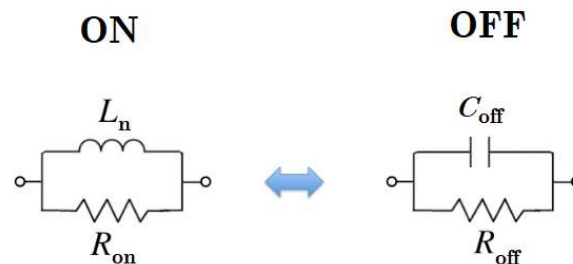


Figure 16 : Représentation du modèle équivalent d'une diode PIN pour deux états différents sous HFSS. En utilisant un arrangement parallèle pour les deux états, l'état ON est dérivé d'une transformation série à parallèle. ($L_n=0,209$ nH, $R_{on}=33,3$ Ω , $R_{off}=30$ Ω)

Pour réaliser des études paramétriques, il est préférable d'utiliser un logiciel de circuit, tel qu'ADS ou AWR, plutôt que de travailler avec CST ou HFSS à ondes pleines. En effet, les logiciels de circuit permettent de régler les éléments de circuit équivalents. Tout d'abord, la structure est simulée sans diodes PIN dans CST. Pour remplacer le composant diode, des ports discrets sont ajoutés qui se connectent à la couche de masse. Il y aurait donc 8 ports différents, y compris les deux ports d'entrée et de sortie principaux dans le cas de la structure fabriquée

proposée. Dans l'étape suivante, les paramètres de diffusion peuvent être exportés au format s8p avec une impédance normalisée de 50 Ω . Ensuite, un fichier s8p peut être appliqué à un module de diffusion à 8 ports dans le logiciel ADS. Enfin, il s'agit d'un moyen simple et rapide de régler les paramètres équivalents de la diode dans le logiciel de circuit afin d'obtenir les paramètres de diffusion souhaités.

La figure 16 est l'étude paramétrique de l'état OFF sur les paramètres de diffusion. De même, la figure 17 présente la variation de la capacité à l'état OFF dans la phase de transmission. La modification des paramètres de l'état ON n'affecte pas de manière significative l'amplitude ou la phase des paramètres de diffusion.

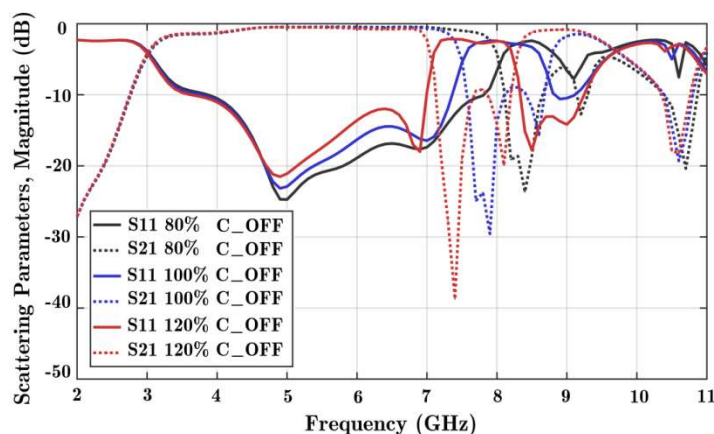


Figure 17 : Paramètres de diffusion en fonction de la fréquence pour les études paramétriques lorsque toutes les diodes sont désactivées

Les coefficients de réflexion pour le port 1 (S11) et le paramètre de couplage entre les ports (S21) sont obtenus. Seul le logiciel de simulation a été utilisé pour ces études paramétriques. Les lignes pointillées indiquent le couplage, tandis que les lignes pleines représentent les coefficients de réflexion (80% C=0.10704, 100% C=0.1338, 120% C=0.16056 PF).

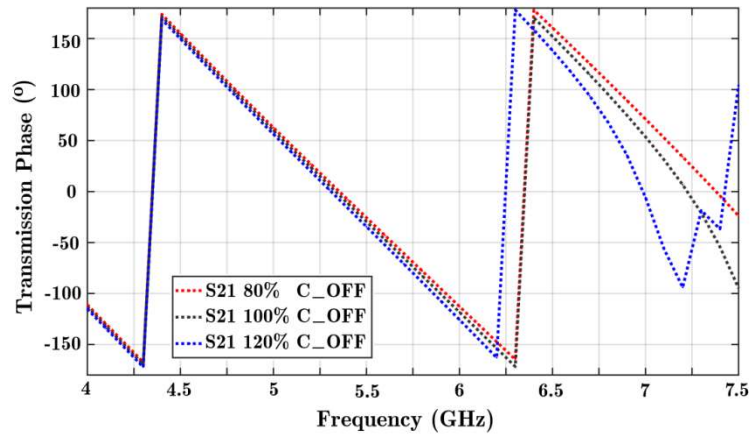


Figure 18 : Variation de la phase de transmission en utilisant différents paramètres de capacité à l'état désactivé

Les changements dans la phase de transmission sont perceptibles à des fréquences plus élevées. Une gamme de fréquences de 4 à 7,5 GHz est considérée ici.

REFERENCES

- [1] B.M Schiffman, "A New Class of Broad-Band Microwave 90-Degree Phase Shifters," 6 *Ire Transactions on Microwave Theory and Techniques* (1958).
- [2] W. Zhang, Z. Shen, K. Xu, & J. Shi, "A compact wideband phase shifter using slotted substrate integrated waveguide," 2019 *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 29(12), 767-770.
- [3] B. Muneer, Z. Qi and X. Shanjia, "A Broadband Tunable Multilayer Substrate Integrated Waveguide Phase Shifter," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 25, no. 4, pp. 220-222, April 2015, doi: 10.1109/LMWC.2015.2400923.
- [4] I. Boudreau, K. Wu and D. Deslandes, "Broadband phase shifter using air holes in Substrate Integrated Waveguide," 2011 *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 2011, pp. 1-4, doi: 10.1109/MWSYM.2011.5972871.
- [5] S. Louati, H. Boutayeb, K. Hettak and L. Talbi, "New reconfigurable SIW phase shifter with transverse CPW-based stubs and PIN Diodes," 2022 *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI)*, 2022, pp. 850-851, doi: 10.1109/AP-S/USNC-URSI47032.2022.9886787.
- [6] Alireza Ghayekhloo, Halim Boutayeb, and Larbi Talbi. Developing an Electromagnetic Vortex Beam Structure Based on Advanced Plasma Transmit-array. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI)*, Denver USA, pp. 740-741, July 2022, doi: 10.1109/AP-S/USNC-URSI47032.2022.9886515.
- [7] M. Khodae, M. Akbari, and S. Zarbakhsh. A Novel Antenna With Dual Band-Notched Characteristics using Shorting Pin and Z-Shaped Slot on Conductor Backed. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, vol. 28, no. 9, pp. 809-814, September 2013.
- [8] Mohammad Akbari, MeghdadKhodae, SamanZarbakhsh, and Reza Gholami. A simple UWB antenna with dual stop-band performance using rectangular slot and strip line ended up shorting pin. *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 42, pp. 83-94, July 2013, doi: 10.2528/PIERC13060204.
- [9] Frédéric Parment, Anthony Ghiotto, Tan-PhuVuong, Jean-Marc Duchamp, and Ke Wu. Double dielectric slab-loaded air-filled SIW phase shifters for high-performance millimeter-wave integration. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 64, no. 9, pp. 2833-2842, July 2016, doi: 10.1109/TMTT.2016.2590544.
- [10] K. Sellal, L. Talbi, and M. Nedil. Design and implementation of a controllable phase shifter using substrate integrated waveguide. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 6, no. 9, pp. 1090-1094, Jun 2012, doi: 10.1049/iet-map.2011.0380.
- [11] SiwarLouati, Halim Boutayeb, KhelifaHettak, and Larbi Talbi. New reconfigurable SIW phase shifter with transverse CPW-based stubs and PIN Diodes. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI)*, Denver USA, pp. 850-851, July 2022, doi: 10.1109/AP-S/USNC-URSI47032.2022.9886787.
- [12] Halim Boutayeb. Substrate integrated waveguide switch. U.S. Patent 9,985,331, issued May, 2018.
- [13] Halim Boutayeb, WenyaoZhai, and Morris Repeta. Switchable lens antenna with integrated frequency selective structure. U.S. Patent 11,515,653, issued November, 2022.
- [14] Yujian Cheng, Wei Hong, and Ke Wu. Half mode substrate integrated waveguide (HMSIW) directional filter. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 17, no. 7, pp. 504-506, July 2007, doi: 10.1109/LMWC.2007.899309.
- [15] Nghia Nguyen-Trong, and Christophe Fumeaux. Half-mode substrate-integrated waveguides and their applications for antenna technology: A review of the possibilities for antenna design. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 60, no. 6, pp. 20-31, October 2018, doi: 10.1109/MAP.2018.2870587.
- [16] <https://www.mcours.net/fra14/ommyfra14aim593.pdf>
- [17] https://www.researchgate.net/profile/R-Lababidi/publication/278381323_Dephaseur_360_compact_large-bande/links/56016a3308aeafc8ac8c9e9a/Dephaseur-360-compact-large-bande.pdf?origin=publication_detail

- [18] Hossein AsilianBidgoli, MeghdadKhodaei, and Majid Tayarani. Multioctave Power Amplifier Design Using 9:1 Planar Impedance Transformer. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 31, no. 1, pp. 45-48, **2020**, doi: 10.1109/LMWC.2020.3034389