



HAL
open science

Caractérisation et modélisation de l'impact sur les systèmes radio de la pluie sur un radôme aux ondes millimétriques

Paul Bouquin, Daniel Bourreau, Alain Peden

► **To cite this version:**

Paul Bouquin, Daniel Bourreau, Alain Peden. Caractérisation et modélisation de l'impact sur les systèmes radio de la pluie sur un radôme aux ondes millimétriques. Journées Nationales Microondes (JNM), Jun 2022, Limoges, France. hal-03721988

HAL Id: hal-03721988

<https://hal.science/hal-03721988>

Submitted on 13 Jul 2022

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.

Caractérisation et modélisation de l'impact sur les systèmes radio de la pluie sur un radôme aux ondes millimétriques

Paul Bouquin¹, Daniel Bourreau¹, Alain Peden¹

¹Lab-STICC, UMR 6285 CNRS, IMT Atlantique, technopôle Brest-Iroise, CS 83818, 29238 Brest Cedex 3
paul.bouquin@imt-atlantique.fr

Résumé — L'impact sur le signal radar d'une couche d'eau déposée sur un radôme est étudié dans la bande W. La permittivité de l'eau est mesurée sur cette bande. Puis sont comparés des paramètres S mesurés à l'aide d'un banc de caractérisation quasi-optique à des modèles analytiques. Le cas d'une couche d'eau composée de gouttes de différentes tailles et celui d'une couche d'eau uniforme sont étudiés. Pour un volume d'eau constant minimiser la surface totale mouillée va minimiser l'impact global de l'eau sur le signal.

1. Introduction

De nombreuses applications fonctionnent dans les gammes d'ondes millimétriques (> 30 GHz). On peut citer le radar d'aide à la conduite autour de 77 GHz et à court terme à 140 GHz, la 4G à 80 GHz et la 5G ou la 6G bien au-delà pour le backhaul [1]. L'étude des interactions des ondes avec l'environnement nécessite une connaissance fine des caractéristiques des milieux mis en jeu.

L'étude suivante se focalise sur l'impact de l'eau sur les systèmes radio lorsqu'elle se dépose sur la surface d'un radôme. Ce cas correspond par exemple à un radar automobile dont le signal est dégradé par la pluie s'écoulant sur pare-chocs d'un véhicule [2], ou encore à la dégradation de mesures radars météorologiques par de l'eau se déposant sur le radôme, qui a été étudiée pour de plus basses fréquences [3, 4]. Cette dégradation est due principalement à l'absorption au sein de la couche d'eau. Les mesures de météorologie ont montré que cette absorption est plus importante lorsque l'eau s'écoule de façon laminaire que sous forme de ruisseaux [3, 5]. Nous étudions sur ce même principe l'importance de la forme de l'eau. Pour ce faire nous allons comparer la dégradation du signal par un volume d'eau constant sous différentes formes : couche uniforme et gouttes de différentes tailles.

Nous présentons d'abord le banc quasi-optique utilisé ainsi que la façon dont on extrait les permittivités des matériaux et de l'eau. Puis nous discutons l'impact de la forme de l'eau à l'aide de mesures de paramètres S issues de ce même banc. Nous mesurons un diélectrique sec, couvert d'une couche uniforme d'eau, et couvert par le même volume d'eau sous la forme de petites ou de grosses gouttes. Enfin les résultats de ces mesures sont discutés à l'aide de modèles analytiques apportant une compréhens-

sion des observations expérimentales.

2. Banc quasi-optique et extraction des permittivités

Un banc quasi-optique en bande W est utilisé pour mesurer les paramètres S d'un échantillon et en extraire les permittivités relatives [6]. Des têtes millimétriques reliées à un analyseur de réseau produisent un signal entre 75 et 110 GHz. Ce signal se propage sous la forme d'un faisceau gaussien à la sortie de *Gaussian Optics Lens Antennas* (GOLAs). L'échantillon mesuré est placé au centre du *waist*, c'est à dire à 50 cm de chaque GOLA. Le rayon w_0 du faisceau gaussien au niveau de l'échantillon est de 3 cm.

Si l'échantillon mesuré est un matériau diélectrique homogène, la permittivité diélectrique du matériau peut être extraite des paramètres S mesurés [6]. L'extraction se fait en comparant les paramètres S mesurés avec ceux issus d'un modèle analytique simple supposant un diélectrique homogène, une incidence normale, une onde incidente plane. La matrice **S** est alors donnée par [7] :

$$S_{21} = S_{12} = \frac{(1 - \rho^2)\exp(-j\Gamma h)}{1 - \rho^2\exp(-2j\Gamma h)} \quad (1)$$

$$S_{11} = S_{22} = \frac{\rho(1 - \exp(-2j\Gamma h))}{1 - \rho^2\exp(-2j\Gamma h)} \quad (2)$$

avec

$$\rho = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \sqrt{\epsilon_r}}, \quad \Gamma = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon_r} \quad (3)$$

Les 3 paramètres libres de ce modèle sont la permittivité relative complexe ϵ_r (partie réelle et imaginaire), ainsi que l'épaisseur de la plaque mesurée h . La permittivité complexe est obtenue en minimisant une fonction d'erreur qui compare les paramètres S en transmission calculés et mesurés (amplitude et phase). Ensuite une optimisation sur l'épaisseur entrée dans le modèle est faite en utilisant les paramètres S en réflexion. Pour comparer les mesures au modèle une correction des plans de références des paramètres S est effectuée, ce qui sera également le cas pour les mesures sur la forme de l'eau. Ceci est répété pour chaque point de mesure dans la bande W. Par une telle procédure, une plaque de PVC qui fera office de radome pour toute cette étude est caractérisée : de permittivité complexe relative $\epsilon_{r,PVC} = 2.965 - j0.0331$ et d'épaisseur

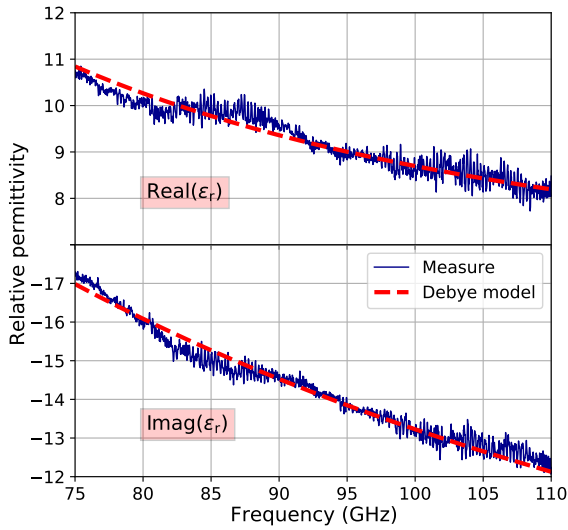


FIGURE 1. Permittivité relative complexe de l'eau en fonction de la fréquence dans la bande W.

$h_{\text{PVC}} = 5.02$ mm. Il s'agit d'une permittivité moyenne sur l'ensemble de la bande car ce matériau n'est pas dispersif.

Le même banc est utilisé pour caractériser la permittivité complexe de l'eau [8]. Comme une couche d'eau ne peut pas être placée seule au centre du faisceau, il est nécessaire d'utiliser une cuve (en PVC). Les deux plaques de la cuve sont caractérisées individuellement afin d'en extraire la permittivité complexe et l'épaisseur. Puis la contribution de chacune de ces deux faces est retirée de la matrice \mathbf{S} de l'ensemble "cuve avec eau" mesuré en utilisant les matrices de transferts calculées correspondantes. La matrice \mathbf{S} de la couche d'eau présente dans la cuve est obtenue, en fonction de la fréquence. Depuis cette matrice \mathbf{S} , sont extraites l'épaisseur de la couche d'eau (qui correspond bien à l'épaisseur mesurée indépendamment de la cuve), ainsi que sa permittivité complexe pour chaque point de fréquence. Toutefois l'eau étant dispersive, il convient de choisir un modèle pour représenter cette dépendance en fréquence de la permittivité complexe. On ajuste la permittivité de l'eau mesurée avec une forme de Debye :

$$\epsilon_{r,\text{eau}} = \epsilon_{r,\infty} + \frac{\epsilon_{r,0} - \epsilon_{r,\infty}}{1 + j2\pi f\tau} \quad (4)$$

où f est la fréquence ; $\epsilon_{r,\infty}$, $\epsilon_{r,0}$ et τ sont les trois paramètres libres du modèle de Debye. L'ajustement de ce modèle avec la permittivité de l'eau mesurée est présenté sur la figure 1 : $\epsilon_{r,\infty} = 5.68$, $\epsilon_{r,0} = 66.7$ et $\tau = 6.98$ ps. L'eau est de l'eau du robinet à température ambiante qui sera ensuite utilisée pour les différentes formes de l'eau des mesures suivantes.

3. Mesures sur la forme de l'eau

L'objectif de cette mesure est de montrer l'impact sur la matrice \mathbf{S} de la forme qu'adopte une couche d'eau dé-

posée sur un diélectrique. Le PVC est d'abord mesuré sec. Puis le PVC est mesuré après que de l'eau soit vaporisée dessus uniformément sur une des faces, obtenant la forme *petites gouttes* (voir photo sur la figure 2). Ces petites gouttes sont réparties aléatoirement sur une surface de 84.5 cm^2 délimité par du scotch. Le diamètre des gouttes est mesuré au microscope entre 0.05 et 3 mm. Est estimée également au microscope la fraction de surface sèche (c'est à dire la part du PVC dans le faisceau qui n'est pas couverte d'eau), notée α_0 : 50 ± 10 %. Cette mesure de la surface totale mouillée est imprécise du fait de la distribution aléatoire des gouttes, elle servira dans les modèles de la section 4. Ensuite l'intégralité de l'eau présente sur la surface de PVC délimitée est recueillie et son volume est mesuré : 0.74 mL. Ce même volume d'eau est placé de nouveau sous la forme de *grosses gouttes* manuellement à l'aide d'une seringue (seconde photo). On assure une équipartition des gouttes sur la surface délimitée. Ces gouttes font en moyenne 3.5 mm de diamètre et sont 92 au total, soit une fraction de surface sèche de $\alpha_0 = 89.5$ %. On mesure alors la matrice \mathbf{S} de l'ensemble PVC et *grosses gouttes*. Enfin pour obtenir la dernière forme de l'eau qui est une couche uniforme, une plaque de plastique fine va servir à répartir ce même volume d'eau uniformément sur la surface délimitée. Du scotch double face est utilisé pour coller cette plaque au PVC en maintenant l'eau au centre, il sert alors de joint étanche. La contribution de la plaque en plastique sera retirée à la matrice \mathbf{S} de l'ensemble PVC / eau uniforme / plaque mesurée, en utilisant les matrices de transfert. La plaque de plastique doit donc être elle aussi caractérisée pour pouvoir retirer sa contribution : $\epsilon_{r,\text{plaque}} = 2.968 - j0.0213$ sa permittivité complexe relative et $h_{\text{plaque}} = 0.97$ mm son épaisseur. On suppose que l'eau est répartie uniformément entre le PVC et la plaque, ce qui permet de connaître l'épaisseur de la couche d'eau uniforme : 0.0875 mm, toujours dans le cas de la mesure présentée sur la figure 2.

Les amplitudes des 4 paramètres \mathbf{S} obtenus sont présentés sur la figure 2. S_{11} correspond au côté sec du PVC et S_{22} au côté mouillé. Les principales observations expérimentales sont les suivantes : (i) Pour l'amplitude moyenne transmise (S_{21}), l'absorption due à l'eau est maximale pour la couche d'eau uniforme et plus forte pour les *petites gouttes* que les *grosses gouttes*. L'amplitude moyenne dans le cas *grosses gouttes* est restée proche de celle du cas PVC sec. (ii) En réflexion, la présence d'eau va différencier S_{11} et S_{22} , en particulier pour la couche uniforme. Pour le côté mouillé S_{22} on observe un effet miroir de l'eau qui augmente le signal réfléchi. Cette effet est maximum lorsque la couche est uniforme et le moins important dans la forme *grosses gouttes*. Notons que la présence des *grosses gouttes* a réduit l'amplitude moyenne réfléchie côté mouillé par rapport au cas du PVC sec, ce qui est contre-intuitif au premier abord. (iii) On observe des ondulations du signal en fonction de la fréquence pour le PVC sec et toutes les formes de l'eau. Elles sont fortement réduites pour la forme *petites gouttes* en particulier sur S_{11} et S_{21} .

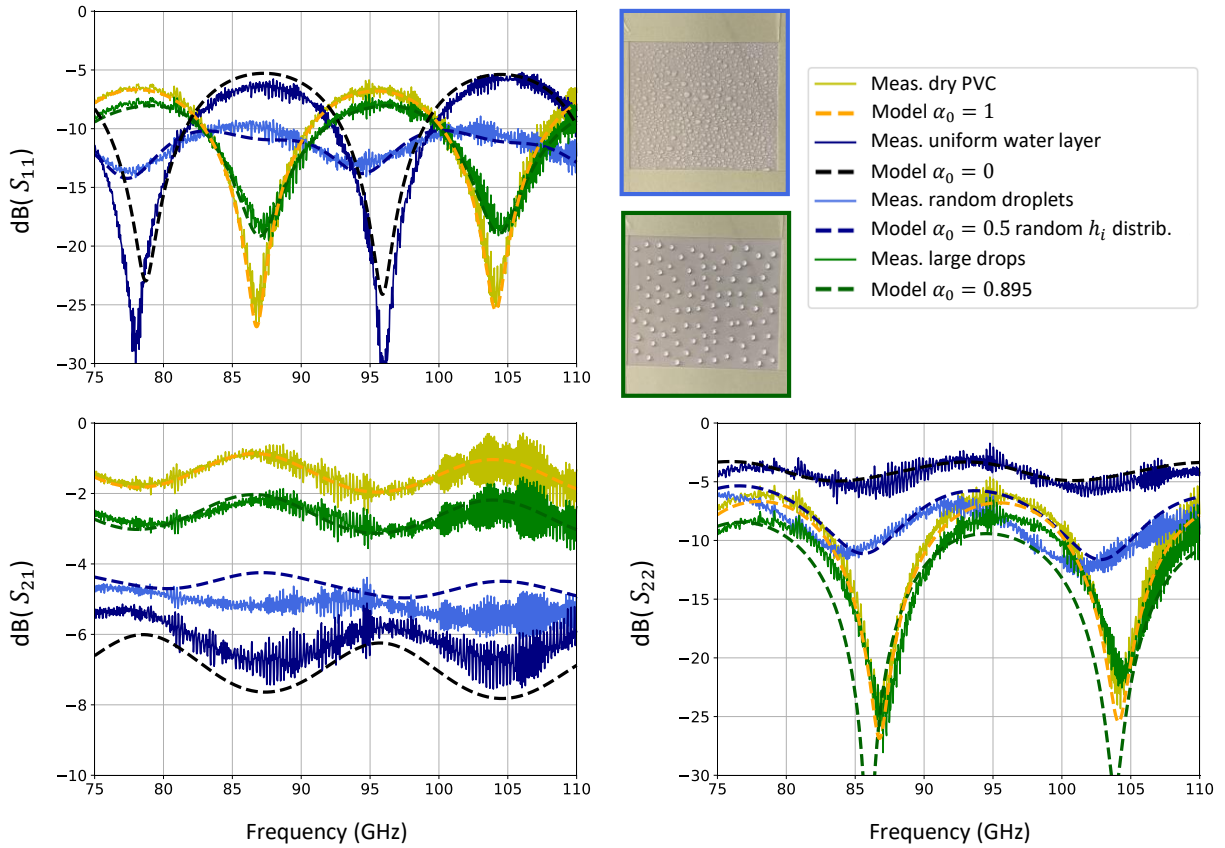


FIGURE 2. Amplitudes des paramètres S mesurés dans la bande W pour le PVC sec et le PVC couvert d'eau sous 3 différentes formes. Le paramètre S_{12} est identique à S_{21} . En pointillés : amplitudes issues des différents modèles. Les photos représentent les formes de l'eau *petites gouttes* et *grosses gouttes*.

Le résultat présenté dans la figure 2 a été reproduit plusieurs fois pour des épaisseurs d'eau uniforme jusqu'à 0.11 mm, conduisant à des résultats qualitativement similaires.

4. Discussion et modèles

La matrice S du PVC sec est modélisée par les équations 1 et 2. Le modèle utilisé pour le PVC recouvert de la couche uniforme d'eau est la matrice S obtenue à partir du produit de la matrice de transfert du PVC sec et de celle d'une couche d'eau d'une épaisseur de 0.0875 mm et d'une permittivité complexe décrite par le modèle de Debye mesuré indépendamment avec la cuve (équation 4). Pour modéliser les gouttes, nous faisons l'hypothèse qu'elles sont des parallélépipèdes couvrant une surface totale donnée par le α_0 mesuré et dont la hauteur est choisie telle que le volume d'eau total reste constant. La diffusion au bord de ces gouttes est négligée. Ainsi la matrice S calculée de l'ensemble "PVC et grosses gouttes" est la somme des matrices S du PVC sec et de celle du PVC recouvert par une couche d'eau uniforme d'une épaisseur correspondant à la hauteur du parallélépipède, pondérée

par α_0 :

$$\mathbf{S}_{\text{grosses gouttes}} = \alpha_0 \mathbf{S}_{\text{PVC sec}} + (1 - \alpha_0) \mathbf{S}_{\text{PVC+eau uni}} \quad (5)$$

Sommer les matrices S de la sorte revient à sommer les champs issus des parties sèches et mouillées du PVC, dans l'expérience ces ondes se combinent à la sortie des GO-LAs puis dans le guide d'onde.

Ce modèle est satisfaisant pour traiter le cas des *grosses gouttes* en prenant $\alpha_0 = 0.895$ mesuré car elles sont toutes de dimensions similaires. Mais dans le cas des *petites gouttes* il convient de prendre en compte le caractère aléatoire de la taille des gouttes. Pour ce faire, les *petites gouttes* sont toujours considérées comme des parallélépipèdes mais cette fois leur hauteur est donnée par une distribution normale h_i . La distribution est choisie telle que le volume total reste constant. La distribution exacte utilisée dans le modèle a peu d'impact sur la matrice S obtenue pourvu que le nombre total de hauteurs considérées N soit suffisamment grand. Le PVC couvert de *petites gouttes* est donc modélisé par l'équation :

$$\mathbf{S}_{\text{petites gouttes}} = \alpha_0 \mathbf{S}_{\text{PVC sec}} + \sum_i^N \frac{1 - \alpha_0}{N} \mathbf{S}_{\text{PVC+eau uni}}(h_i) \quad (6)$$

On prendra pour cette équation $\alpha_0 = 0.5$ estimé au microscope et $N = 100$.

La figure 2 présente la comparaison des amplitudes mesurées et simulées par ces différents modèles. Pour le PVC sec il y a un parfait accord entre le modèle et la mesure, ce qui était attendu car la permittivité complexe et l'épaisseur ont servi de paramètres libres pour ajuster le même modèle sur une mesure précédente avec le même PVC.

Pour la couche uniforme, le modèle rend bien compte de la réduction de la transmission ainsi que de la forte réflexion du côté mouillé (S_{22}) malgré l'absence de paramètre libre. La réduction de la transmission est due à l'absorption par la couche d'eau (forte partie imaginaire de la permittivité relative mesurée sur la figure 1). La réflexion importante côté mouillé est due à l'indice élevé de l'eau par rapport à l'air ou au PVC, assurant une amplitude plus grande dans l'équation 2. Les ondulations du signal sont également prédites de manière satisfaisante par le modèle. Elles correspondent à des interférences entre les ondes directement transmises ou réfléchies avec celles effectuant un ou des aller-retours dans les différentes couches.

L'équation 5 décrit bien la mesure de la forme *grosses gouttes*, en particulier pour S_{11} et S_{21} . Pour S_{22} de façon contre-intuitive l'amplitude moyenne réfléchie avait été réduite par l'ajout des grosses gouttes d'eau par rapport au cas sec dans la mesure. Cet effet est bien pris en compte par le modèle (et même sur-estimé) : les amplitudes de $0.895S_{22,PVC\ sec}$ et de $0.105S_{22,PVC+eau\ uni}$ sont comparables, donc si ces deux ondes interfèrent de façon destructrice le S_{22} obtenu peut avoir une amplitude plus faible que chaque matrice prise individuellement. C'est ce qui arrive dans notre mesure car les ondes issues des parties sèches et mouillées se retrouvent en opposition de phase pour cette épaisseur d'eau.

Pour les *petites gouttes* l'accord entre la mesure et l'équation 6 est satisfaisant, bien que moins bon pour S_{21} . Il est intéressant de noter qu'on a pu expliquer la réduction des ondulations dans la forme *petites gouttes* en termes d'interférences entre ces multiples couches d'eau aléatoires, et sans avoir besoin d'introduire une diffusion par les gouttes qui perturberait elle aussi les oscillations.

5. Conclusion

L'impact de l'eau sur la matrice \mathbf{S} dans bande W a été mesuré en fonction de la forme qu'elle adopte pour un volume constant. L'eau a un effet absorbant sur la transmission et un effet miroir sur la réflexion côté mouillé. Ces effets sont d'autant plus importants que la surface totale mouillée est forte pour un même volume d'eau. Pour limiter l'impact de la pluie pour des applications radars météorologiques ou automobiles, il convient donc d'empêcher un écoulement laminaire (qui correspond à la forme eau uniforme) et de favoriser un écoulement en ruisseaux (qui correspond à la forme *grosses gouttes*). L'emploi de peintures hydrophobiques ou de radômes avec des formes moins lisses pourrait obtenir cet effet.

Des modèles simples rendent compte de la majorité

des observations expérimentales. Notamment les gouttes sont bien approchées par une couche d'eau uniforme si elles sont de dimensions peu variables. Pour un ensemble de gouttes plus varié, il convient d'introduire une distribution aléatoire des épaisseurs d'eau. L'onde issue de la partie sèche du diélectrique et celles issues des parties mouillées peuvent alors interférer. Des effets plus complexes tels que la diffusion ou l'incidence oblique n'ont pas encore été introduits. Notons que ces effets d'interférences sont observables car le chemin optique typique à travers une couche d'eau (uniforme ou gouttes) n'est ni très petit, ni très grand devant la longueur d'onde en bande W. Pour des fréquences ou des épaisseurs d'eau sensiblement différentes, de tels effets ne sont pas attendus.

Références

- [1] S. A. A. Shah *et al.*, "5G for Vehicular Communications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 1, pp. 111–117, Jan. 2018. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/document/8255748/>
- [2] N. Chen *et al.*, "The influence of the water-covered dielectric radome on 77GHz automotive radar signals," in *2017 European Radar Conference (EURAD)*. Nuremberg : IEEE, Oct. 2017, pp. 139–142. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/document/8249166/>
- [3] I. Anderson, "Measurements of 20-GHz transmission through a radome in rain," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 23, no. 5, pp. 619–622, Sep. 1975. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/document/1141134/>
- [4] R. Bechini *et al.*, "Radome attenuation at X-band radar operations," *Proc. Sixth European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology*, p. 6, 2010.
- [5] M. Kurri and A. Huuskonen, "Measurements of the Transmission Loss of a Radome at Different Rain Intensities," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 25, no. 9, pp. 1590–1599, Sep. 2008. [Online]. Available : <http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/2008JTECHA1056.1>
- [6] D. Bourreau *et al.*, "A Quasi-Optical Free-Space Measurement Setup Without Time-Domain Gating for Material Characterization in the $\$W\$-Band,"$ *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 55, no. 6, pp. 2022–2028, Dec. 2006. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/document/4014686/>
- [7] C. A. Balanis, *Advanced engineering electromagnetics*. John Wiley & Sons, 1999.
- [8] D. Bourreau and A. Peden, "Solid and Non-Solid Dielectric Material Characterization for Millimeter and Sub-Millimeter Wave Applications," in *2020 50th European Microwave Conference (EuMC)*. Utrecht, Netherlands : IEEE, Jan. 2021, pp. 909–912. [Online]. Available : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9338045/>