

Avant-propos

La procédure itérative basée sur le concept d'ondes WCIP (*Wave Concept Initiative Procedure*) a été publiée pour la première fois dans les années 1990 pour modéliser les circuits et les antennes. La méthode la plus proche de la méthode WCIP est historiquement l'*Harmonic Balance* (1975) qui a introduit successivement la transformée de Fourier et son inverse. La balance entre les deux états (espace, fréquence) liés par la transformée de Fourier est maintenant fondamentale pour élaborer un modèle de problèmes électromagnétiques non linéaires et qualifier des circuits en hyperfréquences.

Après un chapitre introductif, qui donne les principes et l'histoire de la méthode WCIP, les structures étudiées sont décomposées en éléments qui lient les ondes incidentes et les ondes réfléchies, comme dans la méthode TLM (*Transmission Line Matrix*). La méthode WCIP est similaire à la forme intégrale de la méthode TLM. En premier lieu, il est possible de montrer que la méthode WCIP est toujours convergente. Ses principes généraux et ses applications sont bien adaptés pour la simulation des métamatériaux, les circuits à substrats intégrés SIC (*Substrate Integrated Circuits*) et plus généralement les circuits presque périodiques. Par conséquent, les quantités duales doivent être définies (par exemple E et H , V et I , E et J) et deux domaines complémentaires (intérieur et extérieur, spatial et spectral) doivent être présentés tout comme dans la balance harmonique. Enfin, l'étude des nano transistors est également abordée avec cette méthode.

Dans le deuxième chapitre, la méthode WCIP est étendue aux structures multicouches. De nouvelles relations entre les ondes sont introduites pour la transformation entre des interfaces adjacentes. Cette formulation est obtenue à partir de la matrice d'impédance d'une ligne de transmission. Cette formulation peut être

utilisée pour modéliser un polariseur réel et idéal dans une structure planaire. Il peut être démontré que l'interface d'un polariseur idéal peut être exprimée directement dans le domaine modal et réduire nettement le temps de calcul. Une des applications d'une structure multicouche à polariseur idéal est l'amplificateur micro-ondes compact. La méthode WCIP a permis de caractériser l'amplificateur composé d'éléments passifs et actifs. Chaque couche comporte une fonction électronique, successivement source/polariseur/élément, actif/polariseur/charge.

Dans le troisième chapitre, les surfaces sélectives en fréquences (FSS) utilisées largement comme filtres passe-bas, filtres passe-haut, filtres coupe-bande et filtres passe-bande sont présentées. Les FSS chargées d'éléments passifs permettent une flexibilité dans l'ajustement de leurs caractéristiques de transmission. Néanmoins, les FSS électroniquement ajustées, appelées aussi les « FSS actives », sont très importantes dans la compensation des erreurs de fabrication et de l'adaptation des filtres FSS dans les systèmes de communication sans fils. L'utilisation de court-circuit dans les FSS à anneaux diélectriques assure la possibilité de réaliser une FSS à une fréquence de résonance donnée seulement par une simple variation de la position des courts-circuits sur les anneaux diélectriques. Outre les applications multibandes, les FSS à anneaux concentriques et les FSS à plusieurs niveaux peuvent être utilisées. Un choix judicieux du circuit FSS peut offrir la possibilité d'exploiter les deux polarisations perpendiculaires avec des multibandes distinctes. Pour des FSS à large bande, ayant des caractéristiques de filtrage meilleures lors de commutation de la bande passante à la bande atténuée, les FSS à plusieurs niveaux de métallisation peuvent être utilisées. Dans les circuits intégrés, le cas des substrats inhomogènes correspond à une réalité physique. Les FSS anisotropes offrent un comportement de filtrage avec moins de pertes, par conséquent leur étude est d'une grande importance. Les FSS quasi périodiques chargées de court-circuit, d'éléments passifs ou actifs sont considérées comme des FSS périodiques, mais avec des défauts dont le couplage entre tous les éléments composants le FSS est considéré.

Dans le quatrième chapitre, les circuits en technologie SIC (*Substrate Integrated Circuits*) sont étudiés avec la WCIP. Ces circuits présentent l'avantage d'être intégrables avec d'autres technologies, telles que les circuits planaires ou les guides d'ondes. Pour concevoir de tels circuits, les techniques numériques habituelles ne seront pas souvent adéquates : la méthode des « éléments finis » (EF) implique une mémoire de stockage importante, alors que la méthode intégrale n'est pas capable de résoudre les intégrations à via diélectrique. La méthode WCIP est donc une méthode efficace pour caractériser les circuits SIC lorsque les vias sont placés périodiquement sous forme de forêt de vias dans les deux cas, métallique

et diélectrique. Plusieurs exemples de circuits sont analysés dans ce chapitre et le temps de calcul est à chaque fois très réduit.

Dans le cinquième chapitre, la convergence de la méthode est confirmée. La convergence est assurée dans le cas où les valeurs propres des opérateurs WCIP sont limitées par un, cependant la convergence peut être atteinte très lentement. Cette méthode, bien adaptée à plusieurs configurations de circuits, est améliorée en termes de temps de calcul de deux façons : la modification des paramètres physiques et le développement mathématique. Les paramètres physiques tels que l'impédance de référence dans l'expression des ondes et l'insertion des pertes métalliques aident la convergence. Cependant, les performances ne sont pas considérablement changées. Les développements mathématiques sont bien connus pour les autres méthodes numériques telles que la solution Krylov à la place de la solution à point fixe, les préconditionneurs physiques sont implémentés et leur efficacité est prouvée. Grâce à ces améliorations, le temps de calcul obtenu dans ce chapitre est amélioré de presque 95 % comparativement à la solution habituelle avec la même tolérance dans la solution.

Dans le chapitre six, les ondes électromagnétiques diffractées par des objets métalliques inhomogènes sont étudiées avec la WCIP. On note un intérêt dans plusieurs applications telles que les radars, la CEM, etc. La méthode WCIP formulée en coordonnées cylindriques est utilisée pour étudier ces problèmes de diffraction et la pénétration des ondes électromagnétiques dans les structures cylindriques multicouches. Dans ce chapitre, les opérateurs internes et externes au cylindre, et l'opérateur assurant la transmission de l'onde entre deux cylindres coaxiaux définis dans le domaine spectral sont utilisés pour calculer les ondes incidentes et réfléchies au niveau de chaque interface de la structure cylindrique multicouche. Finalement, la méthode WCIP est étendue à la modélisation de la diffraction d'une structure de forme arbitraire dans un environnement ouvert. L'opérateur de diffraction est développé dans la base modale cylindrique pour le domaine spectral. En réalité, les fonctions de base doivent être créées dans le système de coordonnées le plus approprié à la géométrie locale de la structure à diffraction arbitraire. Pour une structure planaire, le problème de diffraction est facilement résolu par la méthode WCIP dans le système de coordonnées cartésiennes. Cependant, le système de coordonnées cartésiennes devient inefficace lorsqu'il s'agit d'objets de forme irrégulière. La formulation en coordonnées cylindriques est présentée dans ce chapitre comme solution pour étendre la méthode WCIP à la diffraction par des structures de forme arbitraire.

Cette méthode ouvre des perspectives nouvelles dans un domaine large d'applications qui pourront être présentées dans un ouvrage futur. Il s'agit des structures presque périodiques, milieux non linéaires et impédances non linéaires, exploitation du domaine temporel avec la multitransformée de Fourier et la 3-D WCIP directement déduite des équations de Maxwell.

Henri BAUDRAND
Mohammed TITAOUINE
Nathalie RAVEU