

AVANÇOS NOS MÉTODOS LTT E LTE
DE ONDA COMPLETA NA ANÁLISE DE
LINHAS DE LÂMINAS MAIS COMPLEXAS

HUMBERTO CÉSAR CHAVES FERNANDES
Departamento de Engenharia Elétrica
Centro de Tecnologia
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)
59.000 - Natal - RN - BRASIL

ATTÍLIO JOSÉ GIAROLA
RUI FRAGASSI SOUZA
Departamento de Microondas e Óptica
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
13.081 - Campinas - SP - BRASIL

RESUMO

Usando dois eficientes métodos exatos de análises, a constante dielétrica efetiva e a impedância característica de novas estruturas de linhas de lâminas unilaterais, bilaterais e trilaterais são obtidas. Os métodos consistem em usar as teorias da Linha de Transmissão Equivalente, no domínio espectral com o método dos momentos. As análises são gerais podendo serem aplicadas a qualquer estrutura planar. Resultados numéricos são apresentados para os parâmetros da dispersão característica de linhas de lâminas unilaterais tridielétricas, bilaterais e trilaterais, com os dielétricos localizados simétrico e assimetricamente no plano-E do guia de ondas.

I. INTRODUÇÃO

Tem sido rápido o avanço das pesquisas em dispositivos e circuitos de ondas milimétricas nestes últimos anos [1] - [2]. Em particular as linhas de lâminas, são estruturas de fundamental importância nas aplicações destes dispositivos.

Com o objetivo de ampliar a flexibilidade de integração e aumentar as aplicações possíveis em dispositivos tais como filtros, acopladores, etc., novas estruturas de linhas de lâminas foram desenvolvidas neste trabalho, incluindo linhas de lâminas unilaterais tridielétricas, bilaterais e trilaterais gerais e arbitrarias. Na Fig. 1.a é mostrada a seção transversal de uma linha de fenda geral onde as fendas w_i são simétricas ou assimétricas nas lâminas, e os dielétricos são localizados arbitrariamente no plano-E do guia de ondas milimétricas.

Dois eficientes métodos de análises são desenvolvidos. Um deles, o novo método da Linha Transmissão Transversa - LTT, desenvolve as equações de Maxwell para a obtenção dos campos elétricos e magnéticos nas estruturas, em termos dos campos transversais E_y e H_y no domínio da transformada de Fourier [3], com posterior aplicação das condições de contorno. São considerados os desenvolvimentos da constante dielétrica efetiva e da impedância característica para os quais resultados numéricos são apresentados para uma linha de lâmina unilateral tridielétrica. Este método é bastante direto e conciso. O outro método, semelhantemente conciso, o da Linha de Transmissão Equivalente - LTE [4] - [5], é estendido aqui para a obtenção de resultados da constante dielétrica efetiva de novas estruturas bilaterais uni- e bi-dielétricas e trilaterais, simétrica e assimetricamente localizadas no plano-E.

II. TEORIA

No procedimento do método LTT, obtêm-se das equações de Maxwell os seguintes campos transversais a y , para as diversas regiões dielétricas da Fig. 1.a:

$$\vec{E}_t = \frac{1}{K^2 + K_y^2} [-\alpha \frac{\partial}{\partial y} (\nabla_t E_t) - j \omega \mu (\nabla_t \times H_y)] \quad (1.1)$$

$$\vec{H}_t = \frac{1}{K^2 + K_y^2} [-\alpha \frac{\partial}{\partial y} (\nabla_t H_y) + j \omega \epsilon (\nabla_t \times E_y)] \quad (1.2)$$

Estes campos são desenvolvidos no FTD fornecendo

$$E_x = \frac{1}{K^2 + \gamma^2} (-j \alpha \frac{\partial}{\partial y} E_y + \omega \mu \beta H_y) \quad (2.1)$$

$$H_x = \frac{-1}{K^2 + \gamma^2} (j \alpha \frac{\partial}{\partial y} H_y + \omega \epsilon \beta E_y) \quad (2.2)$$

$$E_z = \frac{-1}{K^2 + \gamma^2} (j \beta \frac{\partial}{\partial y} E_y + \omega \mu \alpha H_y) \quad (2.3)$$

$$H_z = \frac{1}{K^2 + \gamma^2} (j \beta \frac{\partial}{\partial y} H_y + \omega \epsilon \alpha E_y) \quad (2.4)$$

onde os campos são proporcionais a $\exp[j(\alpha z - \beta t)]$,

$$\gamma^2 + K^2 = \alpha^2 + \beta^2 \quad (3)$$

e α é a variável espectral.

As condições do contorno são então aplicadas para cada estrutura considerada após soluções gerais do tipo trigonométrica-hiperbólicas serem fornecidas às equações de ondas resultantes dos campos E_y e H_y . Com isto, obtêm-se por uma das formas mais concisas e diretas entre os métodos de onda completa, relações entre voltagens e campos elétricos nas fendas.

Para uma estrutura de linha de lâminas unilateral preenchida completamente com dielétricos arbitrários obtêm-se como exemplo, para o campo elétrico E_{x2} na região (2) da Fig. 1.b,

$$E_{x2} = \frac{1}{K_2^2 + \gamma_2^2} \left[\left(\frac{\alpha_2^2 \gamma_2 c_1}{a} + \frac{\beta^2 a_1}{b} \right) \cosh_2(y-s) + \left(\frac{\alpha^2 \gamma_2 e_1}{a} + \frac{\beta^2 d_1}{b} \right) \sinh \gamma_2(y-s) E_{xt} + \alpha \beta \left[\left(\frac{\gamma_2 c_1}{a} - \frac{a_1}{b} \right) \cosh \gamma_2(y-s) + \left(\frac{\gamma_2 e_1}{a} - \frac{d_1}{b} \right) \sinh \gamma_2(y-s) \right] E_{zt} \right] \quad (4)$$

onde,

$$a = \gamma_1 a_1 b_2 + \gamma_2 e_1 a_2 \quad (5.1)$$

$$b = a_1 b_2 + d_1 a_2 \quad (5.2)$$

$$c_1 = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} a_1; \quad d_1 = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} b_1; \quad e_1 = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} b_1 \quad (5.3)$$

$$a_1 = \sinh \gamma_1 s; \quad b_1 = \cos \gamma_1 s; \quad a_2 = \sinh \gamma_2 g; \\ b_2 = \cosh \gamma_2 g \quad (5.4)$$

Determinados todos os campos e aplicadas as condições de contorno, o procedimento seguinte consiste em se aplicar o método dos momentos usando o teorema de Parseval e seguindo a mesma sequência do método da linha de transmissão equivalente - LTE, por nós já desenvolvido [5], para o cálculo da constante dielétrica efetiva, ϵ_{ef} . A extensão do método LTE para a aplicação às linhas de lâminas bilaterais e trilaterais arbitrarias são etapas mais complexas do que o desenvolvimento das linhas unilaterais, porém segue o mesmo procedimento destas [5], e por isso apresentamos somente os resultados numéricos.

Conhecido o valor de ϵ_{ef} , a impedância característica, Z_c , é determinada através da relação voltagem e potência nas fendas, sendo esta calculada no FTD, através da integração em y nas diversas regiões dielétricas dos campos transversais E_x , H_y , E_y e H_x .

III. RESULTADOS NUMÉRICOS

Resultados numéricos foram obtidos por meio de programas computacionais, apresentando uma rápida convergência para ambos os métodos LTT e LTE. Os resultados serão apresentados para linhas de lâminas em guias de onda WR-28, podendo serem escolhidos outros guias também.

Nas Figs. 2 e 3 os resultados são para o método LTT e nas Figs. 4 e 5 são para o método LTE.

Na Fig. 2 são mostradas curvas da constante dielétrica efetiva, ϵ_{ef} , e da impedância característica, Z_c , em função da largura da fenda w_1 , para a frequência de 33.0 GHz, e diferentes permissividades nas regiões dielétricas. Verifica-se nesta figura que quando as regiões dielétricas (1) e (3) são preenchidas com um dielétrico com permissividade diferente do ar, o valor de ϵ_{ef} aumenta consideravelmente enquanto Z_c diminui.

Para fins de comparação entre os dois distintos e igualmente eficientes e diretos métodos, por exemplo, para a impedância característica, a 30.0 GHz, $\epsilon_{r1} = 1.0$ e $\epsilon_{r2} = 2.2$, foram obtidos pelo método LTT idênticos resultados para várias larguras da fenda aos da Fig. 2 da Ref. [4], que considera somente um dielétrico diferente do ar, para uma linha de lâmina unilateral analisada pelo método LTE.

Curvas da constante dielétrica e impedância característica em função da frequência para uma linha de lâmina unilateral arbitraria, são mostradas na Fig. 3, em que o dielétrico de espessura $g = 0.125$ mm da região (2) está deslocado no guia de onda para $s = 1.778$ mm e as permissividades iguais das regiões (1) e (3) são mudadas de $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r3} = 1.0$ para $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r3} = 1.2$, aumentando o valor de ϵ_{ef} e diminuindo o valor de Z_c , respectivamente.

Na Fig. 4 são mostradas curvas da constante dielétrica efetiva, ϵ_{ef} , para o modo básico

em função da largura da fenda, w_1 , de uma nova estrutura bilateral dielétrica arbitraria com os dielétricos tendo espessuras iguais, $p = g = 0.125$ mm. Dois pares diferentes de regiões dielétricas são considerados. No caso em que $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r3} = 2.2$, a figura mostra a concordância com os resultados obtidos por Schmidt e Itoh [6], que considera somente uma região dielétrica simétrica no guia. Observa-se um considerável aumento no valor de ϵ_{ef} ao se aumentar o valor de ϵ_{r3} de 2.2 para 3.0. Como esperado, resultados idênticos foram obtidos ao se substituir ϵ_{r1} por ϵ_{r2} e w_1 por w_2 ; e vice-versa.

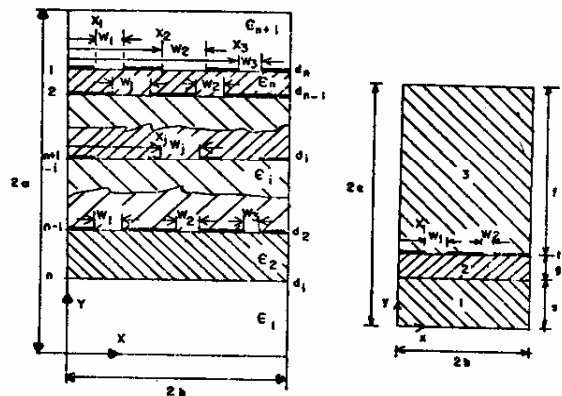


Fig. 1 - Seção transversal de uma estrutura de linha de lâminas, a) geral, com tendo n interfaces com ou sem lâminas condutoras, com n+1 regiões dielétricas de dimensões quaisquer, e com fendas arbitrarias, e b) unilateral tridielétrica arbitraria.

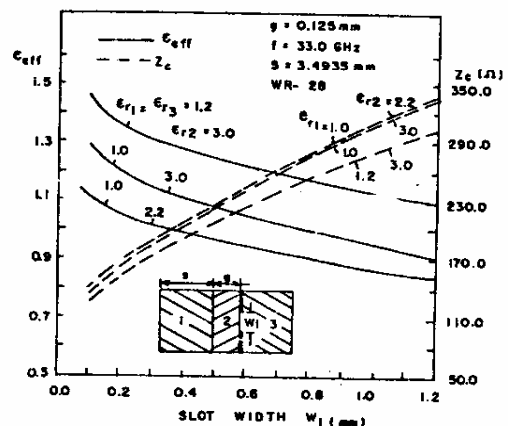


Fig. 2 - Curvas da constante dielétrica efetiva, ϵ_{ef} , e da impedância característica Z_c , em função da largura da fenda w_1 , para uma linha de lâminas unilateral tridielétrica.

Finalmente, na Fig. 5, uma nova estrutura de linhas de lâmina trilaterial é mostrada. São apresentados resultados de ϵ_{ef} para o modo básico, em função da largura das fendas $W_1 = W_3$, e para dois diferentes pares de dielétricos, localizados assimetricamente no plano-E do guia de ondas milimétricas. Observa-se que o valor de ϵ_{ef} aumenta consideravelmente a medida que ϵ_{ef} aumenta. O deslocamento dos dielétricos e lâminas do centro do plano-E provoca um decréscimo em ϵ_{ef} como esperado [7].

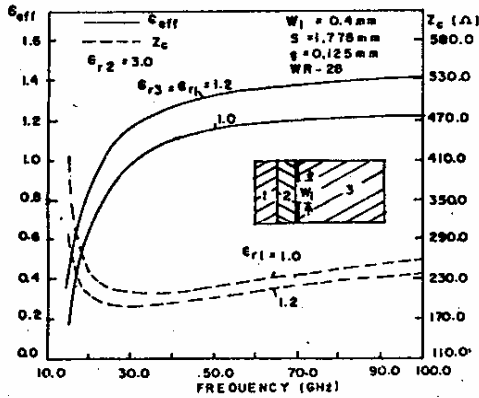


Fig. 3 - Curvas de ϵ_{ef} e Z_c em função da frequência para diferentes dielétricos localizados assimetricamente no plano-E, de uma linha de lâminas unilateral tridielétrica arbitrária.

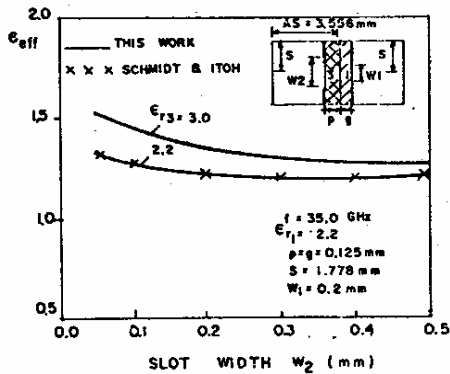


Fig. 4 - Curvas da constante diel. efetiva versus largura da fenda, w_2 , para novas linhas de lâminas bilaterais com duas regiões dielétricas diferentes, pelo método LTE.

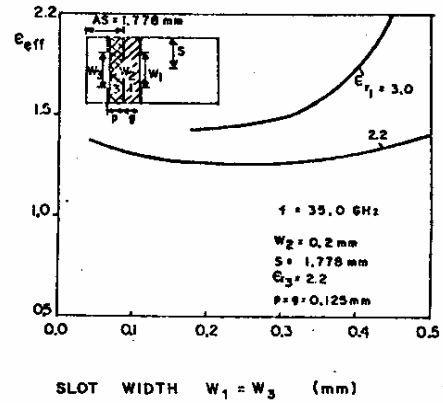


Fig. 5 - Curvas de ϵ_{ef} versus $w_1 = w_3$, para uma nova estrutura de linhas de lâminas trilaterial, localizada assimetricamente no plano-E do guia WR-28, pelo método LTE.

IV. CONCLUSÕES

Novas estruturas de linhas de lâminas incluindo unilaterais, bilaterais e trilaterais, unidielétricas, bidielétricas e tridielétricas arbitrárias no plano-E foram apresentadas, possibilitando uma maior flexibilidade na fabricação de dispositivos e circuitos de ondas milimétricas. Foram considerados dois métodos e igualmente diretos métodos de análises exatas: o método da linha de transmissão equivalente - LTE e o novo e simplificado método da linha de transmissão transversa - LTT.

Resultados numéricos foram apresentados para a constante dielétrica efetiva e para a impedância característica, em função da frequência e largura das fendas, para diferentes parâmetros das linhas de lâminas. Comprovações exatas dos dois métodos foram obtidas na identificação de resultados. Estes apresentam uma rápida convergência computacional confirmando a eficiência dos métodos.

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq, FAPESP e TELEBRÁS.

REFERÊNCIAS

- [1] K. Solbach, "The status of printed millimeter-wave E-plane circuits", IEEE Trans. Microwave Theory Tech, Vol. MTT-31, nº 26, pp. 107-121, Fev. 1983.
- [2] A. Beyer, D. Küther e I. Wolf, "A combined experimental and theoretical characterisation of discontinuities in unilateral fin-lines", 1986 IEEE MTT-S, International Microwave Symposium. Conf. Proc. pp. 127-130, Jun. 1986.
- [3] R.E. Collin, "Field Theory of Guided Waves", N.Y., McGraw-Hill Book Co., 1960, 606p.
- [4] L.P. Schmidt, T. Itoh e H. Hofmann, "Characteristic of unilateral fin-line structure with arbitrarily located slots", IEEE Trans. Microwave Theory Tech. Vol. MTT-29, pp. 325-355, 1981.
- [5] H.C.C. Fernandes e A.J. Giarola, "Dispersion in unilateral fin-lines with two dielectric layers", IEE Proc.

dings, MOA, Vol. 131, Pt.H, nº 3, pp. 427-436, 1981.

- [6] L.P. Schmidt e T. Itoh, "Characteristics of generalized fin-line for millimeter wave integrated circuits", Int. J. Infrared and Millimeter Wave, Vol. 2, nº 3, pp. 427-436, 1981.
- [7] H.C.C. Fernandes, "General planar structures in millimeter waveguides fin-lines", Doctoral these, (in portuguese), State University of Campinas-SP, Brazil, 197p., Jul. 1984.

BIOGRAFIAS



FERNANDES, HUBERTO CÉSAR CHAVES. Nasceu em Martins, RN, Brasil, em 1955. Recebeu o grau de Engenheiro Eletricista, com louvor, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte-UFRN, Natal, RN, Brasil, em 1977, os graus M.Sc. (Mar. 1978-Jan. 1980), Ph.D (Ago. 1981-Jul. 1984), em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Brasil, e atualmente está desenvolvendo um programa de Pós-Doutoramento na UNICAMP

desde agosto de 1986. Ele tem desenvolvido pesquisas sobre dispositivos de Microondas e estruturas e dispositivos de Ondas Milimétricas. De 1984 a 1986 foi Presidente da Revista TEE-Telecomunicações, Eletrônica e Eletrotécnica, Coordenador da Câmara de Telecomunicações do Departamento de Engenharia Elétrica-DEE da UFRN, e, desde 1984 é o chefe do Laboratório de Telecomunicações da UFRN, Natal-RN, Brasil. Dr. Humberto é membro do IEEE, e sócio Fundador Efetivo da Sociedade Brasileira de Telecomunicações-SBT e da Sociedade Brasileira de Microondas-SBMO.



GIAROLA, ATTÍLIO JOSÉ. Recebeu o grau de Bacharel em Engenharia Elétrica e em Engenharia Mecânica da Universidade de São Paulo (USP), SP, Brasil, em 1954, e os graus M.S. e Ph.D em Engenharia Elétrica da Universidade de Washington, EUA, em 1959 e 1963, respectivamente. Ele trabalhou no ITA (S.J.Campos, Brasil), Universidade de Seattle e Universidade de Washington, antes de trabalhar na Co. Boeing (EUA) em 1962 onde

conduziu pesquisas sobre dispositivos de Microondas. Mais tarde trabalhou dois anos no ITA e foi um Professor Visitante da USP. Foi também o Presidente da Primeira Conferência Nacional de Eletrônica no Brasil, e Presidente do 1985 Simpósio Internacional de Microondas no Desenvolvimento Industrial-Brasil. De 1968 a 1974 ele foi um Professor Associado da Engenharia Elétrica da Universidade do Texas A & M. Desde 1975 é Professor Titular de Engenharia Elétrica e até 1986 foi Coordenador Geral dos Cursos de Pós-Graduação da UNICAMP. De 1980 a 1982 foi o Coordenador Geral das Faculdades da UNICAMP. Dr. Giarola é Senhor Membro do IEEE, membro do Eta Kappa Nu e Sigma Xi e Vice-Presidente da Sociedade Brasileira de Microondas-SBMO.

SOUZA, RUI FRAGASSI. Nasceu em São Paulo, Brasil, em 13 de dezembro de 1946. Recebeu o grau de Bacharel em Engenharia Elétrica, da Universidade de São Paulo, USP, Brasil em 1969, o grau de M.S.E.E. da Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP, Brasil em 1972, e o grau de Ph.D da Universidade de Cornell, Ithaca, N.Y., EUA em 1976. De janeiro de 1970 a fevereiro de 1971 foi um pesquisador da Comissão Nacional de Atividades

Espaciais-CNAE, nos campos de Ruído e propagação VLF. Foi coordenador do Convênio TELEBRÁS-FTPT-UNICAMP, em transmissão digital de 1983 a 1986. Desde 1971 é Professor de Departamento de Engenharia Elétrica da UNICAMP, e atualmente é o Chefe do Departamento de Microondas e Óptica - DMO da UNICAMP. Dr. Rui é Sócio Fundador-Efetivo da Sociedade Brasileira de Microondas - SBMO e da Sociedade Brasileira de Telecomunicações - SBT.