

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS.....	x
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	xiv
RESUMO.....	xviii
ABSTRACT.....	xix
INTRODUÇÃO.....	01

CAPÍTULO 1

ANTENA DE MICROFITA RETANGULAR CONVENCIONAL.....	03
1.1 - Introdução.....	03
1.2 - A antena de microfita.....	03
1.3 - Tipos de alimentação.....	06
1.4 - Antena de microfita retangular convencional.....	06
1.5 - Métodos de análise.....	07
1.5.1 - Modelo de linhas de transmissão.....	07
1.5.2 - Modelo da cavidade.....	10
1.6 - Limitação da antena convencional para redução das dimensões.....	19
1.7 - Conclusão.....	19

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DE ANTENA DE MICROFITA RETANGULAR COM ESTUBES.....	20
2.1 - Introdução.....	20
2.2 - Redução das dimensões de antenas de microfita.....	20
2.2.1 - Antena de microfita circular com estubes.....	21
2.3 - Antena de microfita retangular com estubes.....	24
2.4 - Método de circuitos de parâmetros concentrados.....	25
2.4.1 - Relação de frequência.....	26
2.4.2 - Relação de susceptância.....	28
2.5 - Método de linhas de transmissão.....	29
2.5.1 - Fundamento teórico.....	30
2.5.2 - Resultados.....	32

CAPÍTULO 3

O MÉTODO DE CONDIÇÕES DE CONTORNOS DE IMPEDÂNCIA.....	34
3.1 - Introdução.....	34
3.2 - Considerações iniciais.....	34
3.3 - O problema geral.....	35
3.3.1 - Solução dos problemas de autovalores.....	38
3.3.2 - Resumo dos resultados.....	42
3.4 - Microfita retangulares com estubes longitudinais.....	42
3.4.1 - Microfita retangular com estubes em um lado.....	42
3.4.2 - Microfita retangular com estubes nos dois lados longitudinais.....	46
3.5 - Microfita quadrada com estubes nos quatro lados.....	48
3.6 - Conclusão.....	50

CAPÍTULO 4

MICROFITA RETANGULAR COM ESTUBES LATERAIS.....	51
4.1 - Introdução.....	51
4.2 - Desenvolvimento teórico.....	51
4.2.1 - Frequência de ressonância.....	51
4.2.2 - Campos dentro da cavidade.....	53
4.2.3 - Campos irradiados.....	54
4.2.4 - Diretividade e impedância de entrada.....	57
4.2.5 - Fator de qualidade.....	59
4.3 - Resultados numéricos.....	62
4.3.1 - Frequência de ressonância.....	63
4.3.2 - Campos dentro da cavidade.....	67
4.3.3 - Diagramas de irradiação.....	69
4.3.4 - Diretividade e Impedância de entrada.....	69
4.3.5 - Fator de qualidade.....	70
4.4 - Propostas para melhorar características.....	72
4.5 - Conclusão.....	74
CONCLUSÕES.....	75
APÊNDICE A.....	76
BIBLIOGRAFIA.....	82

LISTA DE SÍMBOLOS

μ_0	Permeabilidade magnética do espaço livre.
ϵ_0	Permissividade elétrica do espaço livre.
ϵ_d	Permissividade elétrica do dielétrico contido na microfita.
ϵ_{Rd}	Permissividade elétrica relativa do dielétrico contido na microfita.
ϵ_{ef}	Permissividade elétrica relativa efetiva do dielétrico contido na microfita.
ϵ_{efs}	Permissividade elétrica relativa efetiva do dielétrico contido nos estubes.
Y_s	Admitância média de entrada dos estubes.
L	Comprimento da microfita retangular.
W	Largura da microfita retangular.
h	Altura da microfita retangular entre o <i>patch</i> e o plano de terra.
w_1	Largura dos estubes retangulares.
l	Comprimento dos estubes retangulares.
w_2	Largura dos espaços entre os estubes retangulares.
j	Unidade imaginária.
E_x	Componente (x) do campo elétrico.
E_y	Componente (y) do campo elétrico.
E_z	Componente (z) do campo elétrico.
H_x	Componente (x) do campo magnético.
H_y	Componente (y) do campo magnético.
H_z	Componente (z) do campo magnético.
t	Instante de tempo.
λ_0	Comprimento de onda para o espaço livre.
λ_g	Comprimento de onda ao longo da linha de microfita formada pelos estubes.
ω	Frequência de operação em (rad/s).
k_0	Constante de propagação para o espaço livre.
k	Constante de propagação no dielétrico da microfita.
k_x	Componente (x) da constante de propagação no dielétrico da microfita correspondente a autovalores negativos.
k_y	Componente (y) da constante de propagação no dielétrico da microfita correspondente a autovalores negativos.
k_z	Componente (z) da constante de propagação no dielétrico da microfita correspondente a autovalores negativos.
k'_y	Componente (y) da constante de propagação no dielétrico da microfita correspondente a autovalores positivos.
k'_z	Componente (z) da constante de propagação no dielétrico da microfita correspondente a autovalores positivos.

F_y	Componente que representa a variação em função da variável (y) do campo elétrico E_x dentro da cavidade.
F_z	Componente que representa a variação em função da variável (z) do campo elétrico E_x dentro da cavidade.
λ_y	Autovalor correspondente à função F_y .
λ_z	Autovalor correspondente à função F_z .
\mathbf{n}	Vetor unitário normal externo das superfícies da cavidade.
\mathbf{M}_s	Densidade de corrente magnética na superfície da cavidade.
\mathbf{J}_s	Densidade de corrente elétrica na superfície da cavidade.
m	Número de meios-ciclos de variação na direção (x).
n	Número de meios-ciclos de variação na direção (y).
p	Número de meios-ciclos de variação na direção (z).
TM_{mnp}^x	Modo transversal magnético em (x).
$(f)_{mnp}$	Frequência de ressonância da microfita retangular convencional para o modo TM_{mnp}^x em (Hz).
Y	Parte imaginária de Y_s .
Z_L	Impedância característica de antena de microfita de dimensões W, L e h.
Z_c	Impedância característica de uma linha de microfita.
Y_1, Y_2	Impedâncias equivalentes das aberturas 1 e 2.
G_1, G_2	Condutâncias equivalentes das aberturas 1 e 2.
B_1, B_2	Susceptâncias equivalentes das aberturas 1 e 2.
G_{12}	Condutância mútua equivalente das aberturas 1 e 2.
L_{ef}	Comprimento efetivo da microfita.
ΔL	Variação do comprimento da antena.
Z_0	Impedância característica do espaço livre.
Z_d	Impedância característica do dielétrico contido na microfita.
Y_l	Admitância característica dos estubes.
Z_l	Impedância característica dos estubes ($Z_l=1/Y_l$).
G_{in}	Condutância de entrada da microfita.
B_{in}	Susceptância de entrada da microfita.
K	Relação de larguras ($K=w_1/(w_1+w_2)$).
β	Comprimento normalizado dos estubes ($\beta=l/L$ ou $\beta=l/W$).
α	Frequência normalizada ($\alpha=\omega/\omega_0$).
Q	Fator de qualidade da cavidade.
Q_r	Fator de qualidade devido à irradiação.
Q_c	Fator de qualidade devido ao condutor.
Q_d	Fator de qualidade devido ao dielétrico.
R_r	Resistência de irradiação.
R_c	Resistência equivalente devido ao condutor.
R_d	Resistência equivalente devido ao dielétrico.

E_{ϕ}	Componente (ϕ) do campo elétrico irradiado.
E_{θ}	Componente (θ) do campo elétrico irradiado.
P_{rad}	Potência irradiada.
P_{in}	Potencia de entrada.
P_{diss}	Potência média dissipada.
P_{dmed}	Potência média dissipada no dielétrico da cavidade.
P_{cmed}	Potência média dissipada nos condutores (<i>patch</i> e plano de terra).
U	Intensidade de irradiação.
U_{m}	Intensidade de irradiação máxima.
D_0	Diretividade máxima.
R_{in}	Resistência de entrada.
V	Tensão entre o <i>patch</i> e o plano de terra.
V_{in}	Tensão de entrada entre o <i>patch</i> e o plano de terra.
w_e	Energia elétrica armazenada na cavidade.
σ_d	Condutividade do dielétrico contido na microfita.
σ_c	Condutividade dos condutores do <i>patch</i> e plano de terra.
J_d	Densidade de corrente no dielétrico.
J_c	Densidade de corrente no condutor.
δ	Profundidade pelicular.
N	Número de estubes em um lado da microfita retangular.
M_z	Componente (z) da densidade de corrente magnética na superfície da cavidade.
J_x	Componente (x) da densidade de corrente elétrica na superfície da cavidade.
$E_{1,2}$	Componente (ϕ) do campo elétrico irradiado devido às aberturas 1 e 2.
$E_{3,4}$	Componente (ϕ) do campo elétrico irradiado devido às aberturas 3 e 4.
$E_{3,4}$	Componente (θ) do campo elétrico irradiado devido às aberturas 3 e 4.
E_r	Campo elétrico total irradiado.
K_y	Componente (y) da densidade de corrente elétrica superficial.
K_z	Componente (z) da densidade de corrente elétrica superficial.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

ILUSTRAÇÃO	DESCRIÇÃO	PÁG.
Figura 1.1	Antena de microfita retangular.....	04
Tabela 1.1	Propriedades dos Materiais Substratos Dielétricos não Condutores.....	04
Tabela 1.2	Propriedades dos Materiais Substratos Dielétricos Condutores.....	05
Figura 1.2	Métodos de alimentação.(a) via linha de microfita. (b) via cabo coaxial.	06

Figura 1.3	Antena de microfita retangular e seu circuito equivalente.(a) <i>patch</i> retangular. (b) modelo equivalente de linhas de transmissão.....	08
Figura 1.4	Alimentação via linha de microfita recuada e resistência normalizada. (a) alimentação via linha de microfita. (b) resistência normalizada.....	10
Figura 1.5	Modelo da cavidade para a microfita retangular convencional.....	11
Figura 1.6	Campos eletromagnéticos dentro do ressoador modo TM^x_{010} . (a) campo elétrico E_x . (b) campo magnético H_z	13
Figura 1.7	Fontes equivalentes. (a) sem considerar o plano de terra. (b) considerando o plano de terra.....	14
Figura 1.8	Densidades de correntes magnéticas nas aberturas laterais.....	14
Figura 1.9	Sistema de referência para a <i>abertura</i> I	15
Figura 1.10	Diagramas de irradiação para a antena de microfita retangular convencional obtidos do modelo da <i>cavidade</i> . (a) plano E. (b) plano H..	17
Figura 2.1	Ressorador circular com estubes. (a) dimensões do ressoador com estubes. (b) ressoador uniforme com condições de contorno de impedância $\rho=R$	21
Figura 2.2	Frequência normalizada (ω/ω_0) versus comprimento normalizado dos estubes (l/R_0). (a) Y_l é mantido fixo e K varia. (b) K é mantido fixo e Y_l varia.....	22
Figura 2.3	Variação B'/B'_0 em função do comprimento normalizado dos estubes l/R_0 . (a) Y_l é mantido fixo e K varia. (b) K é mantido fixo e Y_l varia.....	23
Figura 2.4	Microfita retangular com estubes nos quatro lados.....	24

Figura 2.5	Microfitas retangulares com estubes. (a) caso geral. (b) estubes longitudinais.(c) estubes laterais. (d) estubes em um lado. (e) quadrada.	24
Figura 2.6	Microfita retangular convencional. (a) ressoador. (b) modelo equivalente de circuitos.....	25
Figura 2.7	Microfita retangular com estubes. (a) ressoador. (b) modelo equivalente de circuitos.....	26
Figura 2.8	Frequência normalizada (ω/ω_0) em função do comprimento normalizado (l/W).....	28
Figura 2.9	Susceptância normalizada (B'/B'_0) em função do comprimento normalizado (l/W).....	29
Figura 2.10	Representação do <i>patch</i> da antena e seus campos associados.....	30
Figura 2.11	Linha de microfita com um <i>slot</i> e o seu modelo equivalente.....	30
Figura 2.12	Antena de microfita retangular com estubes.....	31
Figura 2.13	Modelo de linhas de transmissão equivalente da microfita da Fig. 2.12..	31
Figura 2.14	Variação da frequência de ressonância em função do número de slots...	32
Figura 2.15	Comparação das medidas e teoria das partes real e imaginária da admitância de entrada para as duas microfitas, normal e com estubes....	33
Figura 3.1	Microfita retangular com estubes, caso geral. (a) vista superior. (b) vista transversal.....	35
Tabela 3.1	Resumo dos resultados do problema geral, a é constante.....	42
Figura 3.2	Microfita retangular com estubes em um lado. (a) vista superior. (b) vista transversal.....	43
Figura 3.3	Autovalores para a microfita retangular com estubes em um lado, $w_1/(w_1+w_2)=0.5$ e $l/L=0, 0.2$ e 0.4	44

Figura 3.4	Variação da frequência normalizada (ω/ω_0) em função do comprimento normalizado (l/L), $\sqrt{\frac{ef\beta}{s}}$ e $K=0.2, 0.5$ e 0.8	45
Figura 3.5	Microfita retangular com estubes longitudinais. (a) vista superior. (b) vista transversal.....	46
Figura 3.6	Variação da frequência normalizada (ω/ω_0) em função do comprimento normalizado (l/L), $\sqrt{\frac{ef\beta}{s}}$ e $K=0.2, 0.5$ e 0.8	47
Figura 3.7	Microfita quadrada com estubes nos quatro lados. (a) vista superior. (b) vista transversal.....	48
Figura 3.8	Frequência (ω/ω_0) em função do comprimento (l/L), $\sqrt{\frac{ef\beta}{s}}$ e $K=0.2, 0.5$ e 0.8	49
Figura 4.1	Microfita retangular com estubes laterais. (a) vista superior. (b) vista transversal.....	52
Figura 4.2	Fontes equivalentes nas aberturas da microfita.....	55
Figura 4.3	Sistema de referência para os campos irradiados.....	56
Figura 4.4	Alimentação via linha de microfita.....	59
Figura 4.5	Autovalores para a microfita com estubes laterais, $\phi=W/L=0.3$, $K=0.5$, $\sqrt{\frac{ef\beta}{s}}$ e $\beta=0.2, 0.5$ e 0.8	64

Figura 4.6 Variação da frequência normalizada (ω/ω_0) em função do comprimento normalizado dos estubes (l/W), onde $K=0.2, 0.5$ e 0.8 .

(a)

$$\sqrt{\frac{e}{W/L=0.5.}} \quad \text{efs} \quad l$$

e

$W/L=0.5.$

(b)

65

$$\sqrt{\frac{e}{W/L=0.2.}} \quad \text{efs} \quad l$$

e

$W/L=0.2.$

(c)

$$\sqrt{\frac{e}{W/L=0.3.}} \quad \text{efs} \quad l$$

e

$W/L=0.3.$

(d)

$$\sqrt{\frac{e}{W/L=0.3.}} \quad \text{efs} \quad l$$

e $W/L=0.3$

Figura 4.7 Antenas utilizadas para comparação de frequência. (a) microfita com

estubes.(b)

microfita

sem

65

estubes.....

Figura 4.8 Simulação de (4.49) para $K=w_1/(w_1+w_2)=0.5$, $W/L=0.13$ e

$$\sqrt{\frac{e}{W/L=0.13.}} \quad \text{efs} \quad l$$

66

Tabela 4.1 Comparação

de

66

Resultados.....

Figura 4.9 Distribuição espacial dos campos eletromagnéticos dentro da cavidade

com

$K=w_1/(w_1+w_2)=0.8$,

$$\sqrt{\frac{e}{W/L=0.4.}} \quad \text{efs} \quad l \quad \text{efs}=1.4$$

67

, $l/W=0.4$ e $W/L=0.5$. (a) E_x/E_{x0} . (b) H_y/H_{y0} . (c)

H_z/H_{z0}

Figura 4.10 Variação das distribuições dos campos eletromagnéticos em função do

comprimento normalizado dos estubes (l/W). (a) E_x/E_{x0} . (b) H_y/H_{y0} . (c)

H_z/H_{z0}

68

- Figura 4.11 Variação do diagrama plano E em função do comprimento normalizado dos estubes (l/W), $W/L=0.3$, $\sqrt{\frac{l}{W}}_{ef}=1$ 69
 $, h/L=0.01, \epsilon_{Rd}=2, K=w_1/(w_1+w_2)=0.5$ e $l/W=0, 0.6$ e 1.2
- Figura 4.12 Variação da diretividade máxima em função do comprimento normalizado dos Estubes (l/W), $W/L=0.1$, $\sqrt{\frac{l}{W}}_{ef}=1$ 70
 $, h/L=0.01, \epsilon_{Rd}=2$ e $K=0.2, 0.5$ e 0.8
- Figura 4.13 Variação da resistência de radiação normalizada (R_r/R_{r0}) em função do comprimento normalizado (l/W), $W/L=0.3$, $\sqrt{\frac{l}{W}}_{ef}=1$ 70
 $, h/L=0.01, \epsilon_{Rd}=4.4$ e $K=0.2, 0.5$ e 0.8
- Figura 4.14 Variação dos fatores de qualidade normalizado em função do comprimento normalizado dos estubes (l/W), $K=0.2, 0.5$ e 0.8 . (a) Q_r/Q_{r0} , onde $W/L=0.3$, $\sqrt{\frac{l}{W}}_{ef}=1$ 71
 $, h/L=0.01$ e $\epsilon_{Rd}=4.4$. (b) Q_c/Q_{c0} , onde $W/L=0.5$ e $\sqrt{\frac{l}{W}}_{ef}=1.4$
- Figura 4.15 Variação das resistências equivalentes normalizada em função do comprimento normalizado dos estubes (l/W), $W/L=0.5$, $\sqrt{\frac{l}{W}}_{ef}=1.4$ 71
 $e K=0.2, 0.5$ e 0.8 . (a) Q_d/Q_{d0} . (b) Q_c/Q_{c0}
- Figura 4.16 Geometria de 72
 estubes.....
- Figura 4.17 Alimentação via acoplamento eletromagnético. (a) vista superior. (b) 73
 viste transversal.....

Figura 4.18	Antena com <i>patch</i> em forma de E, alimentação via cabo coaxial. (a) convencional. (b) com estubes.....	73
Figura 4.19	Variação de S_{11} em função da frequência. (a) largura de banda 21.2%. (a) largura de banda 32.3%.....	74
Figura A.1	Sistema de referência da <i>abertura</i> 1 (Fig. 4.2).....	76
Figura A.2	Referência para a <i>abertura</i> 1.....	79

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um novo método para a análise de redução das dimensões da microfita retangular com estubes periódicos, a qual pode operar como ressoador e radiador. O método baseia-se no modelo da cavidade, sendo que os efeitos dos estubes são modelados por condições de contorno de impedância. Por meio deste modelo, são analisados quatro tipos de microfita: a retangular que possui estubes em um lado, a quadrada com estubes nos quatro lados, a retangular com estubes longitudinais e a retangular com estubes laterais. Por meio de simulações, das equações obtidas, utilizando o *software* MATLAB 6.0, são calculados, para todos os casos, a variação da frequência ressonante fundamental em função dos estubes. Para o último caso citado acima, é determinado também os efeitos dos estubes em outros parâmetros característicos da microfita.

Palavras-chaves: Antenas de microfita, ressoadores e radiadores de microfita, estubes, condições de contornos de impedância.

ABSTRACT

In this work is presented a new method for analysis of size reduction of the microstrip with periodic stubs, which can to act as resonator and radiator. The method base the cavity model, where the effects of the stubs are modeled by impedance boundary conditions. By means this model, are analysed four kind of microstrips: rectangular microstrip with stubs in one side, square microstrip with stubs in the four sides, rectangular microstrip with stubs in the longitude and rectangular microstrip with stubs in the lateral. By means of simulations, of the equations obtained, using the software MATLAB 6.0, are calculated, for all cases, the variation of the fundamental resonant frequency in function of the stubs. For the last case mentioned above, is determined too the effects of the stubs in other characteristic of the microstrip.

Key words: Microstrip antennas, resonators and radiators of microstrip, stubs, impedance boundary conditions.

