

465-472

梯形屏蔽共面波导及共面耦合线 特性阻抗的计算*

韩明华 袁乃昌

(国防科技大学电子技术系,湖南,长沙,410073)

TN814.02

摘要 提出了适用于 MMIC 设计的一类新型共面传输线,它包括梯形屏蔽共面波导 (SMCPW)、梯形屏蔽共面耦合线 (SMCCL)、共面耦合梯形屏蔽线 (CCSML),推导出了用于计算这些传输线的 TEM 参数的解析公式,数值计算结果显示了此类共面传输线的性质。

关键词 保角变换 共面传输线,梯形屏蔽共面传输线。

波导 阻抗

引言

共面集成已经成为微波毫米波 (MMIC) 电路的发展趋势,随着单片集成技术的发展,对原来的耦合电路进行了修正^[1]。随着大规模高速集成电路的发展,多导体传输线备受青睐。在多导体传输线的应用中,为了减少线与线之间的耦合,对信号线加以屏蔽,这是近几年发展起来的新型的毫米波和亚毫米波传输线的形式,已经提出了许多种类的微屏蔽线,^[2~5]文献 [2] 中提出了“V”型传输线,并用静态矩量法进行了分析,结果表明了微屏蔽耦合微带线的耦合系数明显的低于常规的耦合微带线,其后又相继提出了“V”型屏蔽耦合微带线^[3,4,5]并采用保角变换方法得到了严格解板解,并对有无屏蔽壳的情况进行了详细的讨论,可以应用于 MMIC 设计。加屏蔽的传输线已经应用于实际的 MMIC 设计,Stephen V.^[6]将微屏蔽线应用于 W-Band 滤波器设计,天线的馈源电路设计^[7]、谐振器的设计^[8]等。实践证明,由于采用微屏蔽,降低了传输线之间的耦合,改善了电路的特性,而且通过选择不同的屏蔽形式,可以满足不同的需要,但以往设计过程中均采用矩形近似来得到传输线的参数,精确设计要求受到限制,为了得到此类传输线精确而统一的结果,在基于传输 TEM 模的假设下,利用保角变换方法对几类传输线进行了分析,得到了严格的解析公式,可用于 MMIC 版计算机辅助设计 (CAD)。

1 共面传输线的保角变换分析

1.1 梯形屏蔽共面波导 (SMCPW)

本文研究的三类传输线结构如图 1 所示,图 1(a) 中的传输线可视为由共面波导 (1 区) 和梯形区域传输线 (2 区) 组成,1 区电容为^[5];

* 国防预研基金 (编号 97JS93.2.1) 资助项目
稿件收到日期 1997-10-20,修改稿收到日期 1997-12-29

$$C_1 = 2\epsilon(K(k)/K(k')), \quad (1)$$

式(1)中 $K(x)$ 是第一类完全椭圆函数, x 是模数, $x^2 + x'^2 = 1$, ϵ 是填充介质的介电常数.

$$k^2 = \tanh(\alpha\pi/2h_1)/\tanh(\beta\pi/2h_2). \quad (2)$$

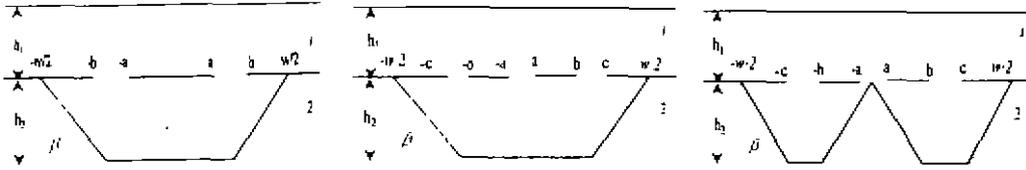


图1 新型共面传输线

(a) 梯形屏蔽共面波导 (b) 梯形屏蔽共面耦合线 (c) 共面耦合梯形屏蔽线

Fig. 1 New type of coplanar transmission lines

(a) step microshield coplanar waveguide (SMCPW)

(b) step microshield coplanar coupled lines (SMCCL)

(c) coplanar coupled step microshield line (CCSML)

为了计算 2 区的电容, 应用保角变换将梯形域从 z -平面内变换到 t -平面内(见图 2), 再利用保角变换将 t -平面变换成矩形域, 然后由熟知的平板电容公式得到. 利用 Schwarz-Christoffel 变换将梯形域变换到 t -平面.

$$z = A \int_0^t (t^2 - 1)^{-\rho} (t^2 - t_c^2)^{\rho-1} dt, \quad (3)$$

式(3)中 $P = \frac{1}{2} - \frac{\beta}{\pi}$, $-\frac{\pi}{2} \leq \beta \leq \text{Arctan}(\frac{W}{2h})$. 令 $\frac{t}{t_c} = \sin(\theta)$, 得到:

$$z = A \int_0^{\theta} t_c^{2\rho-1} \frac{d\theta}{(1 - t_c^2 \sin^2(\theta))^{\rho} \cos(\theta)^{1-2\rho}} = A' \int_0^{\text{arcsin}(t/t_c)} \frac{d\theta}{(1 - t_c^2 \sin^2(\theta))^{\rho} \cos(\theta)^{1-2\rho}}, \quad (4)$$

参数 t_a, t_b, t_c 可由下式表示:

$$\begin{aligned} \Delta &= A' \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{(1 - t_c^2 \sin^2(\theta))^{\rho} \cos(\theta)^{1-2\rho}}, \\ \frac{2h}{w'} \Delta &= \cos\beta A' \int_0^{\text{arccosh}(1/t_c)} \frac{d\theta}{(1 - t_c^2 \cosh^2(\theta))^{\rho} \sinh(\theta)^{1-2\rho}}, \\ \frac{2a}{w'} \Delta &= A' \int_0^{\text{arcsin}(t_a/t_c)} \frac{d\theta}{(1 - t_c^2 \sin^2(\theta))^{\rho} \cos(\theta)^{1-2\rho}}, \\ \frac{2b}{w'} \Delta &= A' \int_0^{\text{arcsin}(t_b/t_c)} \frac{d\theta}{(1 - t_c^2 \sin^2(\theta))^{\rho} \cos(\theta)^{1-2\rho}}. \end{aligned} \quad (5)$$

根据式(1)得 2 区的电容为

$$C_2 = 2\epsilon \frac{K(k)}{K(k')}. \quad (6)$$

其中

$$k_2 = \tanh(t_a \pi / 2h_1) / \tanh(t_b \pi / 2h_2). \quad (7)$$

则梯形屏蔽共面波导的总电容 C 为

$$C = C_1 + C_2. \quad (8)$$

1.2 梯形屏蔽共面耦合线(SMCCL)

在共面耦合线中,若屏蔽导体平面为梯形,则形成了梯形屏蔽共面耦合线(见图 1(b)).其电容值的计算可以分解为共面耦合线(1区)和梯形区域(2区)来计算,1区的奇耦模电容可由文献[2,5]得到.

$$C_{\text{even}} = \epsilon \frac{K(p)}{K(p')}, \quad C_{\text{odd}} = \epsilon \frac{K(s)}{K(s')}; \quad (9)$$

其中

$$p = \sqrt{\frac{b^2 - a^2}{c^2 - a^2}}, \quad s = \sqrt{\frac{c^2(b^2 - a^2)}{b^2(c^2 - a^2)}}. \quad (10)$$

对于梯形区域 2,先利用保角变换将梯形区域(z -平面)变换到 t -平面,将其转化为一共面耦合线(见图 3),利用上面的公式(9)可得到梯形区域的电容. t -平面内 t_a, t_b, t_c, t_d 可由下列公式得到:

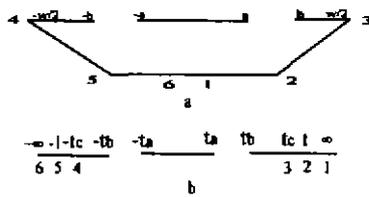


图 2 SMCPW 梯形区域保角变换

(a) z -平面 (b) t -平面

Fig. 2 Conformal Transform of step region of SMCPW (a) z -plane (b) t -plane

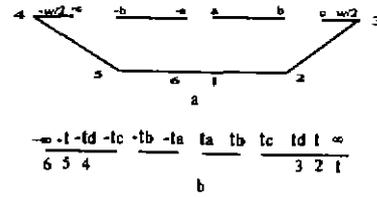


图 3 SMCCL 梯形区域保角变换

(a) z -平面 (b) t -平面

Fig. 3 Conformal Transform of step region of SMCCL (a) z -plane (b) t -plane

$$\Delta = A' \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{(1 - t_a^2 \sin^2(\theta))^p \cos(\theta)^{1-2p}},$$

$$\frac{2h}{w} \Delta = \cos \beta A' \int_0^{\operatorname{arccosh}^{-1}(t_d/t_a)} \frac{d\theta}{(1 - t_a^2 \cosh^2(\theta))^p \sinh(\theta)^{1-2p}},$$

$$\frac{2a}{w'} \Delta = A' \int_0^{\operatorname{arcsin}^{-1}(t_a/t_d)} \frac{d\theta}{(1 - t_a^2 \sin^2(\theta))^p \cos(\theta)^{1-2p}},$$

$$\frac{2b}{w'} \Delta = A' \int_0^{\operatorname{arcsin}^{-1}(t_b/t_d)} \frac{d\theta}{(1 - t_a^2 \sin^2(\theta))^p \cos(\theta)^{1-2p}},$$

$$\frac{2c}{w}\Delta = A' \int_0^{\arcsin t_c/t_d} \frac{d\theta}{(1 - t_2^2 \sin^2(\theta))^p \cosh(\theta)^{1-2p}} \quad (11)$$

于是得到了梯形域的奇耦模电容

$$C_{2\text{even}} = 2\epsilon \frac{K(k)}{K(k')}, C_{2\text{odd}} = 2\epsilon \frac{K(m)}{K(m')} \quad (12)$$

式(10)中

$$k = \sqrt{\frac{(\cosh^2 \frac{t_b \pi}{2h} - \cosh^2 \frac{t_a \pi}{2h}) \cosh^2 \frac{t_c \pi}{2h}}{(\cosh^2 \frac{t_c \pi}{2h} - \cosh^2 \frac{t_a \pi}{2h}) \cosh^2 \frac{t_b \pi}{2h}}},$$

$$m = \sqrt{\frac{(\cosh^2 \frac{t_b \pi}{2h} - \cosh^2 \frac{t_a \pi}{2h})(\cosh^2 \frac{t_c \pi}{2h} - 1)}{(\cosh^2 \frac{t_c \pi}{2h} - \cosh^2 \frac{t_a \pi}{2h})(\cosh^2 \frac{t_b \pi}{2h} - 1)}} \quad (13)$$

则总的奇耦模电容为

$$C_{\text{even}} = 2C_{1\text{even}} + C_{2\text{even}} \cdot C_{\text{odd}} = 2C_{1\text{odd}} + C_{2\text{odd}} \quad (14)$$

1.3 共面耦合梯形屏蔽线(CCSML)

CCSML也可看作由共面耦合线(1区)与梯形区域(2区)构成。1区电容计算如式(1)所示。对于2区,每条耦合线都加以梯形屏蔽,这等效于在传输线之间插入了一个电壁。这样2区的电容对于耦模和奇模激励其值不变,可由Schwarz-Christoffel变换,将梯形区域从z-平面变换为t-平面内的非对称共面波导(见图4)。

这种非对称共面导波的电容可由下式计算:

$$C' = \epsilon \frac{K(r)}{K(r')}, \quad (15)$$

式(15)中

$$r = \sqrt{\frac{(t_c + 1)(t_b - t_a)}{(t_c - t_a)(t_b + t_a)}} \quad (16)$$

其中 t_a, t_b, t_c 可分别通过求解下列方程的解得到

$$\Delta = A' \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{(1 - t_3^2 \sin^2(\theta))^p \cosh(\theta)^{1-2p}},$$

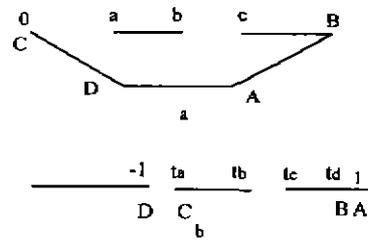


图4 CCSML保角变换

(a) z-域 CCSML (b) t-平面 CCSML

Fig. 4 Conformal mapping of CCSML

(a) z-plane of CCSML (b) t-plane of CCSML

$$\begin{aligned} \frac{2h}{W}\Delta &= \cos\beta A' \int_0^{\operatorname{arccosh}^{1/t_c}} \frac{d\theta}{(1-t_c^2 \cosh(\theta)^2)^p \sinh(\theta)^{1-2p}}, \\ \frac{2a-d}{W}\Delta &= A' \int_0^{\operatorname{arcsin}^{1/t_c}} \frac{d\theta}{(1-t_c^2 \sin(\theta)^2)^p \cos(\theta)^{1-2p}}, \\ \frac{2b-d}{W}\Delta &= A' \int_{\pi}^{\operatorname{arcsin}^{1/t_c}} \frac{d\theta}{(1-t_c^2 \sin(\theta)^2)^p \cos(\theta)^{1-2p}}, \\ \frac{2c-d}{W}\Delta &= A' \int_0^{\operatorname{arcsin}^{1/t_c}} \frac{d\theta}{(1-t_c^2 \sin(\theta)^2)^p \cos(\theta)^{1-2p}}; \end{aligned} \quad (17)$$

则整个构图的奇耦模电容为

$$C_{\text{even}} = C_{1\text{even}} + C', C_{\text{odd}} = C_{1\text{odd}} + C'. \quad (18)$$

2 传输线阻抗计算

通过上面的公式得到了各种传输线的单位长度的电容后,就可以求得相对介电常数和特性阻抗

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{C(\epsilon)}{C(1)}, \quad z_{0e} = \frac{\sqrt{\mu_0 \epsilon}}{C_{\text{even}}}, \quad z_{0o} = \frac{\sqrt{\mu_0 \epsilon}}{C_{\text{odd}}}. \quad (19)$$

从上面的讨论可知,对于“V”型及矩型传输线均是梯形屏蔽传输线的特例,分别对应 $\beta = \arctan(w/2h)$ 和 $\beta=0$ 的情况.

3 矩形屏蔽近似公式($\beta=0$)

当 $\beta=0$ 时,梯形退化为矩形,此时可由近似公式直接对式(5)进行求解,下面以梯形屏蔽共面波导为例说明.

当梯形屏蔽退化为矩形时,式(5)可简化为^[11]

$$t_c = \left[\frac{e^{\frac{w\pi}{2h}} - 2}{e^{\frac{w\pi}{2h}} + 2} \right]^2, \quad 1 < \frac{w}{2h} < \infty, \quad (20)$$

$$t_c = \sqrt{1 - \left[\frac{e^{\frac{w\pi}{2h}} - 2}{e^{\frac{w\pi}{2h}} + 2} \right]^4}, \quad 0 < \frac{w}{2h} < 1,$$

$$\frac{2a}{W} = \frac{F(\arcsin(ta/t_c, t_c)}{K(t_c)}. \quad (21)$$

其中 $F(\varphi, k)$ 为第一类不完全椭圆函数积分,可由数值方法求得结果.上式即为文献[5]中讨论的矩形情况.

4 数值分析

利用上述的解析公式,采用数值算法求得结果,说明本文提出的共面传输线的性质.

图5中给出悬置微带线的特性阻抗,阻抗为 $\beta, a/h, a/b, 2b/w$ 的函数. 由于微带厚度与梯形腔体的高度相比很小,在计算中可忽略微带的厚度. 对于给定的 $a/h, a/b, 2b/w$,特性阻抗随着 β 的增大而减小,这是因为当 β 增大时,单位长度的电容增大的缘故. 但是当对于给定的 $\beta, 2b/w$ 均较小时,特性阻抗变化不大. 对于给定的 $a/h, a/b, 2b/h$,在 $2b/w=1$ 时特性阻抗的减小速率达到最大.

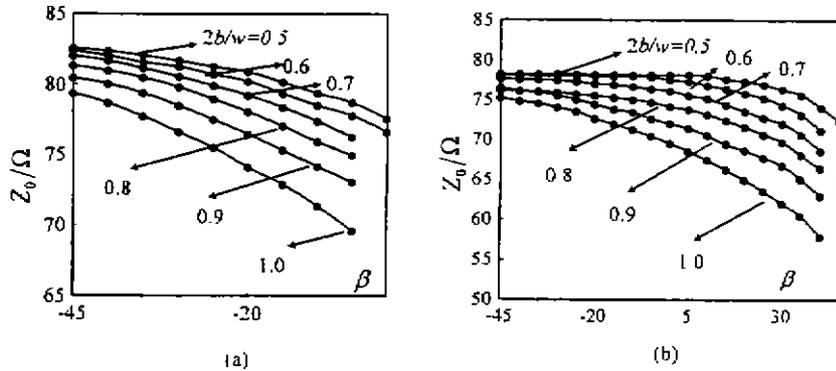


图5 当填充介质为空气时共面波导的特性阻抗
(a) $a/h=0.1, a/b=0.8$ (b) $a/h=0.5, a/b=0.8$

Fig. 5 Plots for characteristic impedance of an air-suspended microshield line

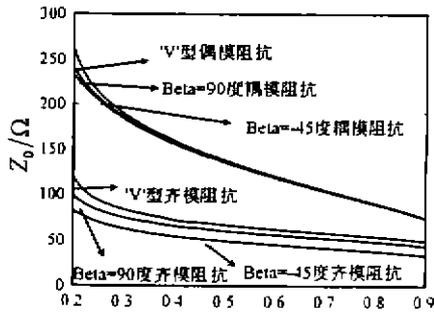


图6 矩形屏蔽共面耦合及“V”型屏蔽共面耦合特性阻抗的比较

Fig. 6 Comparison of characteristic impedance of rectangle microshield and “V”-shaped microshield coplanar coupled transmission lines

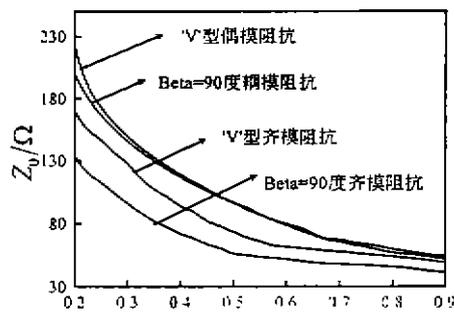


图7 共面耦合矩形屏蔽线及共面耦合“V”型屏蔽线的特性阻抗的比较

Fig. 7 Comparison of the characteristic impedance of coplanar coupled rectangle microshield and the “V”-shaped microshield coplanar coupled transmission lines

在 $\beta = -\pi/4, a = 4.745E-5m, c = 4.795E-4, w = 1.0E-3, h = 3.0E-3m, \epsilon_r = 2.55$ 条件下给出了三种不同形式的屏蔽共面耦合线在 b/c 变动时的结果(见图6)。通过比较,可以看出不同的屏蔽对于共面耦合线的耦模阻抗的影响不大,但对奇模阻抗的影响较大,其变化趋势为随 β 的减小而减小,因此共面耦合线的耦合系数随 β 的减小而增大. 当 $\beta = -\pi/2$ 时,屏蔽共面耦合线退化为共面耦合线,此时耦合系数达到最大.

在 $a=4.845E-5m$, $c=4.772E-4$, $w=1.392E-3$, $h=3.0E-3m$, $\epsilon_r=2.55$ 条件下, 图 7 给出了当每条传输线均有屏蔽, b/c 不同的结果. 由图 7 可见, 矩形屏蔽时的奇耦模电容要比“V”型屏蔽时小, 则耦合线的奇耦模阻抗增大. 这种变化特性对电路设计提供了很大的自由度, 我们可以根据需求来选择合适的电路模型, 通过调整传输线的几何尺寸及屏蔽的形式(即调整 β)来满足不同的需求.

5 结语

本文利用保角变换的解析方法对一类新型的共面屏蔽传输线进行了分析, 给出了解析表达式. 其中的 SMCPW 已经得到了成果的应用, 另外两种传输线的特例情况($\beta=0$, “V”型)也得到了应用. 由于通过调整梯形屏蔽的几何结构, 可以改变传输线的特性参数, 如特性阻抗、电容、奇耦模阻抗等, 这使设计电路具有灵活性. 本文所提供的解析公式容易用作 MIC 及 MMIC 的计算机辅助设计.

REFERENCES

- 1 WEN C P. *IEEE, Trans.*, 1970, **MTT-18**(3); 318~322
- 2 SCHUTT-AINE J E. *IEEE, Trans.*, 1992, **MTT-40**(4); 659~664
- 3 YUAN Nai-Chang, Ruan Cheng-Li. *IEEE, Trans.*, 1995, **MTT-43**(10); 2501~2504
- 4 YUAN Nai-Chang, Ruan Cheng-Li. *IEEE Proc-Micro. Antenna Prpagat.*, 1995, **142**(1); 63~65
- 5 YUAN Nai-Chang, He Jian-Guo. *Journal of National University of Defense Technology*(袁乃昌, 何建国. *国防科技大学学报*), 1995, (4); 1~8
- 6 Stephen V Robertson. *IEEE, Trans.*, 1996, **MTT-44**(4); 598~606
- 7 YUAN Naichang, Ruan Chengli, Lin Weigan. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, (袁乃昌, 阮成礼, 林为进. *电子科技大学学报*), 1993, **22**(5); 464~469
- 8 Ghione G, Naldi Carlo U. *IEEE, Trans.*, 1987, **MTT-35**(3) 260~267
- 9 Kwo k-Keung M Cheng. *IEEE, Trans.*, 1996, **MTT-44**(4); 356~362

CALCULATION OF CHARACTERISTIC IMPEDANCE OF COPLANAR WAVEGUIDE, COPLANAR COUPLED LINES WITH STEP MICROSHIELD*

HAN Ming-Hua YUAN Nai-Chang

(Department of Electronic Technique of NUDT, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract A new type of coplanar transmission lines was presented, including step microshield coplanar waveguide (SMCPW), step microshield coplanar coupled line (SMCCL), and coplanar coupled step microshield line (CCSML), which are suitable for MMIC design. The simple, analytical and practical formula for the evaluation of the quasi-TEM characteristic parameters was derived, which is based on a conformal mapping procedure. The numerical calculation results show the characteristics of these coplanar transmission lines.

Key words conformal mapping, coplanar transmission lines, step microshield coplanar transmission lines.

* The project supported by the Preliminary Research Foundation of National Defence
Received 1997-10-20, revised 1997-12-29