

# 开放微带不连续电路的三端口网络描述

喻志远\*

(电子科技大学应用物理所 成都 610054)

**【摘要】** 给出了开放微带不连续电路的三端口网络描述。将微带电路向空间的辐射作为一个端口来处理,成功地消除了由于忽略电路的空间辐射效应引入的电路数字模拟误差。利用时域有限差分法(FDTD)一次运算就可得出三端口网络的  $S$  参数矩阵的各元素,而无需任何预处理,大大地节省了 CPU 时间。实际计算与已发表的数据吻合得很好,表明文中给出的三端口定义是合理有效的。此三端口微带电路的定义可容易地推广到其他非屏蔽传输线电路的分析,可广泛用于电磁兼容分析、微带天线及其他开放传输线电路的 CAD 技术中。

**关键词** 时域有限差分法; 三端口网络; 散射矩阵; 电磁辐射

**中图分类号** O441; TN455

在微带电路的数字分析中,通常是把信号的输入口和输出口作为一个二端口网络来处理<sup>[1-3]</sup>。这种方法对无屏蔽或开放微带电路,忽略了其向空间的电磁辐射,给计算结果带来一定的误差。当微带电路工作在较高频率下,会引起较强的辐射,此时辐射给电路参数引入的误差足以造成数字模拟的失效。本文引入一个三端口电路网络来描述无屏蔽微带电路,将微带电路上方的辐射空间作为一端口来处理,较圆满地解决了此类问题中的电磁辐射带来的计算误差。这一分析方法亦可用于电路的电磁兼容、微带天线的数字分析等技术。

对无源和无耗的开放微带电路,由能量守恒定律给出了  $S_{11}$  参数与  $S_{21}$  和  $S_{31}$  之间的关系式,以及  $S_{22}$  与  $S_{21}$ ,  $S_{32}$  和  $S_{33}$  与  $S_{31}$ ,  $S_{32}$  之间的关系,从而大大简化了分析。对一般的电路,由其可逆性可知,只有 6 个独立的  $S$  参数需要计算。这时需要选择两个端口分别进行二次 FDTD 计算即可确定电路的  $S$  矩阵,如果电路对于端口 2、1 和 3 是对称的,则独立的参数仅有 3 个,这时一次 FDTD 计算即可确定电路的  $S$  矩阵。另外,在以往的 FDTD 计算中,未能很好地解决在时域总场中分离入射波与反射波的技术。一般为了得到某个  $S$  参数,须进行两次 FDTD 计算,第一次先模拟一大小结构相同的均匀微带电路,以得到入射场;第二次计算实际电路,由其总场中减去第一次计算得到的入射场得到反射场,以计算  $S_{11}$  参数<sup>[1-4]</sup>。本文通过定义几个参考面上的电压,仅用一次 FDTD 计算,记录各电压的时间变化值,由各电压的 Fourier 变换,通过简单的解线性方程就可得到  $S_{11}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{31}$  等参数。这种方法不涉及电场磁场导数的计算<sup>[5]</sup>,亦不要求预先知道线带的特性阻抗<sup>[6,7]</sup>,与已发表的 FDTD 散射参数计算方法相比,有计算简单、可大大节省计算时间的优点。

## 1 开放不连续微带电路的三端口 $S$ 参数描述

当一无耗微带电路处于开放空间时,由于不连续处引起的电磁辐射,使得用二端口描述的电路模型不再是无耗的,因而用无耗二端口网络描述的电路不再有效。我们引入如图 1 所示的三端口网

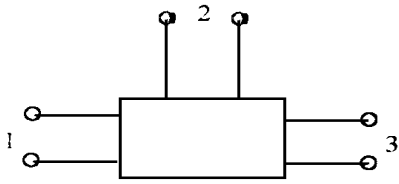


图 1 开放微带电路的三端网络

络,其中端口 1 和端口 3 分别代表一无源和无耗的开放微带电路的输入和输出端,端口 2 代表电磁能量的空间辐射口,其散射参数矩阵为

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11}, S_{12}, S_{13} \\ S_{21}, S_{22}, S_{23} \\ S_{31}, S_{32}, S_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

在这样的无耗网络中,由电路的互逆性,有  $S_j = S_{ji}$  则

在  $S$  矩阵中独立待定的参数为 6 个,即  $S_{11}, S_{22}, S_{33}, S_{21}(=$

$S_{12}), S_{31}(= S_{13}), S_{23}(= S_{32})$ 。假定端口 1 为输入端口,由能量守恒定律可得

$$|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2 + |S_{31}|^2 = 1 \quad (2)$$

同理有

$$|S_{22}|^2 + |S_{12}|^2 + |S_{32}|^2 = 1 \quad (3)$$

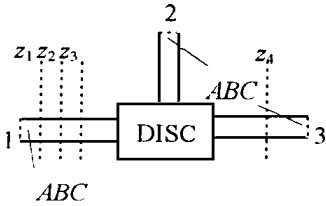
$$|S_{33}|^2 + |S_{13}|^2 + |S_{23}|^2 = 1 \quad (4)$$

式中  $S_{ii}$  为  $i$  端口的电压反射系数;  $S_{ij}$  分别为  $j$  端口到  $i$  端口的电压传输系数。对一般电路,需进行二次 FDTD 计算,并利用式 (1)~ (3),得到各  $S$  矩阵元素。如电路是关于 2 端口对称的,即存在着一对称平面  $z = z_0$  (假定微带电路的传播方向是  $Z$  方向),则有  $S_{32} = S_{12}$ 。在这种情况下,只需要进行一次 FDTD 计算与式 (1)~ (3) 中的两式,就可以确定  $[S]$  中所有的元素

## 2 利用 FDTD 计算确定散射矩阵元素

假设电路的输入口为端口 1,此处的均匀段距离不连续长度  $L$  处 (以保证选择处只有主模式传

播),选择 3 个参考面以  $z_1, z_2, z_3$  表示,同样在三端口选择一个参考面  $z_4$ ,如图 2 所示。其中 DISC 表示电路的不连续;  $ABC$  表示吸收边界。在 FDTD 计算中分别在 4 个参考面上取微带中心到接地地板的电压的时间变化,记为  $V_1, V_2, V_3, V_4$ ,其傅氏变换为



$$V_i(z_i, k) = \int_{-\infty}^{\infty} V_i(t, z_i) e^{jkz} dt \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (5)$$

对参考面 1, 2, 3, 有

$$V_i(z_i, k) = A \exp[-jU(k)z_i] + B \exp[jU(k)z_i] \quad i = 1, 2, 3 \quad (6)$$

式中  $A, B$  分别是频率  $k$  下的入射波和反射波的振幅;  $U(k)$  为与频率有关的传播常数。解式 (6) 可得某一频率下的反射系数及传播常数。反射系数为

$$|S_{11}(k)| = |B/A| \quad (7)$$

对于  $z = z_4$ , 由于位于不连续之后,在此参考面上只有透射波

$$V_4(z_4, k) = T \exp[-jU(k)z_4] \quad (8)$$

这里  $T$  为透射波的振幅,则

$$|S_{31}(k)| = |T/A| \quad (9)$$

$S_{21}$  可由式 (2) 得到

$$|S_{21}(k)|^2 = 1 - |S_{11}(k)|^2 - |S_{31}(k)|^2 \quad (10)$$

用相同的方法,选择端口 3 为信号入射端,与式 (2)~ (4)共同求解,则可得到另 3 个独立的  $S$  参数:

$$S_{23}, S_{22}, S_{33}$$

如果电路是关于端口 2 对称的,则有  $S_{32} = S_{12}$  在这种情况下只需要进行一次 FDTD 计算与式 (2)~ (4)中的两式,就可以确定  $[S]$  中所有的元素。这样的不连续微带电路有开路线、短路线和阶跃不连续等。

### 3 计算实例

作为一个计算的实例,我们计算一个微带开路线的  $S$  参数。如图 3 所示,这是一个典型的对称不连续微带电路。取传播方向为  $Z$  方向,计算目标离散化后,  $NX = 15, NY = 59, NZ = 45$ ,各方向上的步长分别为:  $dx = 0.0635 \text{ mm}; dy = 0.038333 \text{ mm}; dz = 0.127 \text{ mm}, dt = 1.05e-13 \text{ s}, X = 9.9$ ,采用廖氏的吸收边界<sup>[8]</sup>在 486/66 微机上,迭代 3 000 次,得出如图 4 5 所示的  $S_{11}, S_{21}, S_{31}$  参数。其中虚线是文献 [9] 给出的参数,对应于三端口矩阵的  $S_{31}$  参数。我们计算的传输零点及频率低端与文献中的测量是吻合的,高端的差别是因为一般微带电路都是被屏蔽在金属盒中,无辐射效应,因而可认为是一个二端口网络。而我们设计的电路是一开放电路,计算中已计入了辐射效应。从电路的  $S_{21}$  参数可以清楚地看出随着频率的上升,辐射的能量亦呈上升趋势,这与  $S_{11}$  的高频段的逐渐变小是一致的。图 6 给出了三端口电路的  $S_{22}$  及  $S_{23}$  参数。

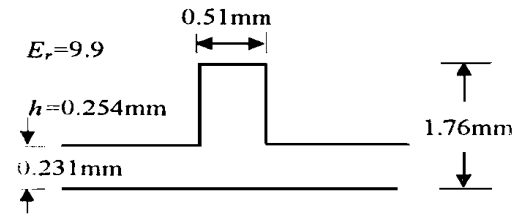


图 3 开放微带开路线

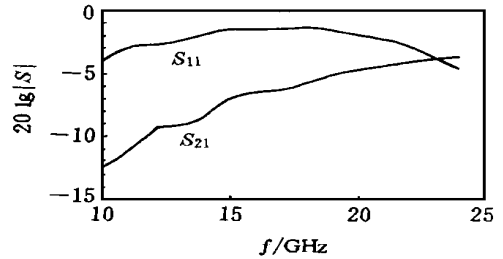


图 4 开路线的  $S_{11}$  和  $S_{21}$  参数

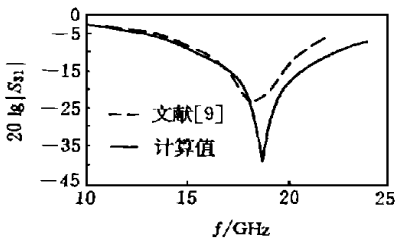


图 5 开路线的  $S_{31}$  参数与文献 [9] 中的  $S_{21}$  参数比较

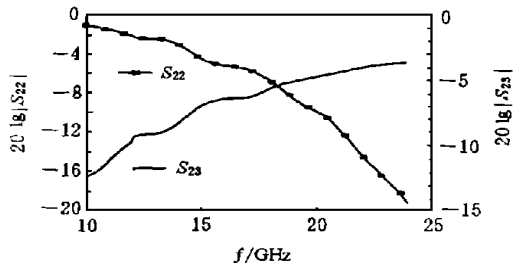


图 6 三端口电路的  $S_{22}$  和  $S_{23}$  参数

### 4 结论

本文给出了开放微带电路的三端口电路的描述。由于将电路向空间的辐射作为一个端口来处理,因而消除了二端口电路由于忽略电磁辐射而引起的误差。利用时域有限差分法 (FDTD) 一次运算就可得出三端口网络的  $S$  参数矩阵的各元素,而无需任何预处理,大大地节省了 CPU 时间。实

际计算与已发表的数据吻合得很好,这表明我们给出的三端口定义是合理有效的。此三端口微带电路的定义可容易地推广到其他非屏蔽传输电路的分析,可广泛用于电磁兼容分析、微带天线及其他开放传输线电路的 CAD 技术中。

### 参 考 文 献

- 1 Zhang Xiaolei, Mei K K. Time-domain finite difference approach to the calculation of the frequency-dependent characteristics of microstrip discontinuities. *IEEE MTT*, 1988, 36: 1 775~ 1 787
- 2 Sheen David M, Ali Sami M, Abouzahra M D et al. Application of the three dimensional finite-difference time-domain method to the analysis of planar microstrip circuits. *IEEE MTT*, 1990, 38: 849~ 857
- 3 Ko Wai Lee, Mittra Rai. A combination of FDTD and Poy's methods for analyzing microwave integrated circuits. *IEEE MTT*, 1991, 39: 2 176~ 2 281
- 4 Krupzevic Dragan V, Brankovic V J, Arndt Fritz. The wave equation FD-TD method for the efficient eigenvalue analysis and S-matrix computation of waveguide structures. *IEEE MTT*, 1993, 41: 2 109~ 2 115
- 5 Gwarek W K, Celuch-Marsysiak Malgozata. A differential method of reflection coefficient extraction from FDTD simulations. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 1996, 6: 215~ 217
- 6 Gwarek W K. Analysis of arbitrarily shaped two-dimensional microwave circuits by finite-difference time-domain method. *IEEE MTT*, 1988, 36: 738~ 744
- 7 Okonjewski M, Andorsen J, Stuchly S S. A technique to compute reflection coefficient in FDTD method. *Proc IEEE Antennas Propagat, Society Int*, 1994: 1 446~ 1 449
- 8 廖振鹏, 黄孔亮. 暂态波透射边界. *中国科学 A 辑*, 1984, 27: 556~ 564
- 9 Giannini F, Bartolucci G, Ruggieri M. Equivalent circuit models for computer aide design of microstrip rectangular structures. *IEEE MTT*, 1992, 40: 378~ 388

## Descriptions of Discontinuity of An Opened Microstrip Circuits by Three-ports Electric Network

Yu Zhiyuan

(Inst. of Applied Physics, UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** An opened microstrip circuit is described employing a three ports electric network in this paper. The errors caused by omiting of electromagnetic radiations of opened microstrip in numerical simulating of microstrip circuits is eliminated successfully by making one circuit port of the radiation. No priori procedure is needed, and the  $S$ -parameters of the-three-ports circuit are calculated from a single run of FDTD, which leads to a significant reduction in CPU time. A good agreement is found between the example and the data published, which shows that the definition of three-ports network used to describe the opened microstrip circuit is reasonable and effective. The definition can be widely used in the analysis of unshielded transmission, electromagnetic compatibility, microstrip antenna and CAD of opened transmission line circuits.

**Key words** finite difference time domain; three ports electric network; scattering matrix

编辑 徐培红