

时域有限差分法计算中源的研究*

喻志远**

(电子科技大学应用物理所 成都 610054)

【摘要】 提出一种具有带通频谱特性的激励源,在波导不连续性问题的时域有限差分法计算中,具有激励效率高,可滤除主模式截止频率以下的频率分量,使波导系统工作在单模工作频带,从而避免了截止频率分量引入的不稳定影响,实际计算表明与常规高斯脉冲激励相比,可大大节省计算时间及相应的计算机内存要求。

关键词 时域有限差分法; 带通激励源; 傅里叶核函数; 截止模式
中图分类号 TN015

时域有限差分法(FDTD)是一种有效的分析电磁场与微波电路中散射与不连续问题的数字方法,近十年来在改进计算效率,改善吸收边界条件的吸收状况,以及各种应用方面取得了很大的进展^[1-3]。在时域有限差分法计算中激励源的设计问题,与吸收边界条件、数字解的稳定性、数字色散一样,是最基本的问题之一,它设置的妥当与否会直接影响数字计算的成功及计算的效率,但在已发表的有关时域有限差分法的文献中涉及到此问题的论文却很少,时域有限差分法运算中激励源的设置,主要涉及两个基本问题,即源在空间的分布形式和是源随时间的变化方式。

在早期的时域有限差分法计算中由于缺乏适合波导中色散严重的宽带吸收边界条件,波导中的不连续问题往往采用单频激励,但是这种激励源每次计算只能得到一个频率上的器件特性,而不能发挥时域有限差分法一次计算就可得到频段内的所有 S 参量的高效率计算特点。近年来由于适合于波导时域有限差分法计算的宽带吸收边界条件已经出现^[4,5],故单频简谐源逐渐被人们淘汰而代之以脉冲激励源^[6]。脉冲激励源中多用高斯脉冲,这是因为高斯脉冲在时域中波形平滑,其频谱函数亦为平滑的钟形脉冲,具有从直流到无穷宽频谱分布^[7]。

频谱函数具有窗口特性的激励源,鉴于文献的有频谱函数具有低通窗口特性的 Blackman-Harris windows 激励源^[8]。在已发表关于时域有限差分法应用文献中,绝大多数使用高斯激励源。然而在实际使用中我们发现,高斯脉冲激励并非理想的激励源。首先它的激励效率不高,由高斯脉冲的频谱函数可知,它的主要能量分布集中在零频率(直流)和低频段,而在实用中人们感兴趣的频段往往是微波毫米波或更高的频段,但在这些频段上高斯脉冲的能量分布比其零频率的能量分布往往小几个数量级,这对有效地激励所研究的电磁系统非常不利。其次由于其极宽的频谱分布在导波系统中往往造成主模式截止模式和高阶模式并存的局面,特别是在波导中能量分布较大的截止模式的存在会严重干扰正常的时域有限差分法计算,为摆脱这些截止模式的干扰常常需要加大计算区域以衰减它们到足够小的程度^[9]。实际计算表明,当计算区域太小时,这些截止频率分量将造成计算的不稳定性甚至致使计算失败。本文提出了一种具有带通频率特性的激励源,它具有矩形形状的频谱函数,其中心频率及频率带宽可以根据需求随意设计。这种新的激励源可滤去一

* 1997年6月5日收稿,1997年6月30日修改定稿

* 国家自然科学基金资助项目,基金号:69771027

** 男 50岁 博士 教授

切不想要的频率分量,可在时域有限差分法计算中使得整个系统工作在预先设定的最佳工作频带。由于这种新的具有窗口特性的带通源其所有信号能量均匀地分布在矩形频谱带内,从能量的观点来说这种激励源具有最高的激励效率,它可使波导工作在单模工作状态下,这是大多数波导的实际工作状态。另外,由于不存在截止频率分量故可有效地避免它们引起的有害影响,从而大大地节省了计算时间及计算机内存,有效地提高时域有限差分法的计算方法的效率。

这种新的激励源称为带通源,它是由变形的傅里叶核函数和一调制简谐源组成,其设置直观简易,实际计算表明我们提出的这种新的激励方案是有效的。

1 理 论

傅里叶核函数可以表示为

$$f(t) = \frac{\sin(Bt)}{\pi B} \quad (1)$$

其频谱函数为

$$G(\omega) = \begin{cases} 1 & |\omega| \leq B \\ 0 & |\omega| > B \end{cases} \quad (2)$$

可见,傅里叶核函数的一个重要特点是其频谱函数是一个具有矩形形状的带通函数。在带内其频谱为 1,在带外为零。利用傅里叶变换的延时特性和频移特性^[10],即

$$F[f(t-t_0)] = F(\omega)\exp(-j2\pi\omega t_0) \quad (3)$$

$$F[f(t)\cos(\omega_0 t)] = [F(\omega+\omega_0)+F(\omega-\omega_0)]/2 \quad (4)$$

式中 $F(\cdot)$ 表示傅里叶变换。由此得到具有带通频谱特性的新的激励源函数

$$f(t) = A \frac{\sin[\Delta\omega(t-t_0)]}{\pi(t-t_0)} \cos[\omega_0(t-t_0)] \quad (5)$$

$$g(\omega) = \begin{cases} 1 & \omega_0 - \Delta\omega \leq \omega \leq \omega_0 + \Delta\omega \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad \omega \geq 0 \quad (6)$$

式中 A 是归一化常数,一般取 2; $\Delta\omega$ 是带通频谱的带宽; ω_0 为中心频率,就一般而言 $\Delta\omega < \omega_0$; t_0 是时延因子,取值为 $1/3 \sim 1/2$ 时域有限差分法运行时间。

从上面的计算式可以看出,本文提出的带通源在一给定的频带内有均匀的频谱分布,而在此频带外部其频谱为零,如图 1 所示,其频谱函数的带宽和中心频率可以根据使用者的要求进行设计。

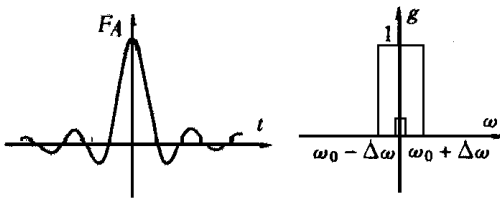


图 1 带通激励源及其频谱函数

这种新的激励源为一“清洁”的激励源,因其所有的信号能量都集中在预先设定的频带内,而滤除了所有不想要的频率分量。用这种激励源,可以使整个被研究的导波系统工作在预先设计好的频带内,例如波导的单模工作状态,单模工作状态是大多数导波系统的实际运行状态,因而这种新的激励源有可能使利用时域有限差分法技术的数字模拟更加接近实际状况。在新的激励源下,由于保证了时域有

限差分法计算过程不受主模截止频率以下和第一高阶模式截止频率以上寄生频率分量的干扰,因而使计算很快进入稳定状态,在大多数波导计算中,为了消除波导中截止模式的影响,计算区域不能设计得太小,而需要有一均匀段波导以衰减截止模式到足够小的程度,这无疑增加了计算量及计算机内存,致使计算代价升高,使用新的激励源可以克服上述这些缺点,从而大大地降低计算时间

和计算所需内存,在下面给出的例子中,可节省一半计算时间和计算机内存。

2 数值计算实例

为了证明文中提出的带通激励源的有效性和效率。我们计算了一段含有均匀介质层的不连续波导的 S 参数,波导型号为 WR3,横截面离散为 12×22 。设波导的传播方向为 Z 方向, $d_z = 0.042$ mm,介电常数为 $\epsilon_r = 3.7$;介质层的厚度 $d = 0.504$ mm。时域有限差分法计算后 S 参数的提取采取文献[12]所建议的方法。

图 2 给出了波导结构的 $|S_{11}|$ 和 $|S_{21}|$ 。从图中可看到在高斯脉冲激励下,当传播方向上的网格数为 40 时计算出的 S 参量受到激励信号中的寄生频率分量的严重干扰。当将波导的长度增加一倍后这种干扰现象消失了,而采用新的激励源在不增加波导长度的情况下可以成功地消除这种干扰。图 3 给出了这两种情况下的计算结果^[14],图中虚线表示在高斯脉冲激励下计算区域加长一倍后计算出的数据,圆点线的数据取自文献[12],实线表示用本文的新源在不增加计算域情况下计算出的 S 参数。在相同的吸收边界条件下场被吸收得很好,在迭代 2 500 时间步后场值已比峰值处小两个数量级以上,这证明在新的激励源激励之下计算可迅速达到稳定状态。

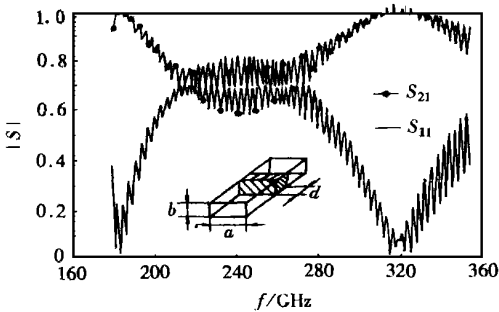


图 2 高斯脉冲激励源中的寄生频率分量对计算的 S 参数的影响

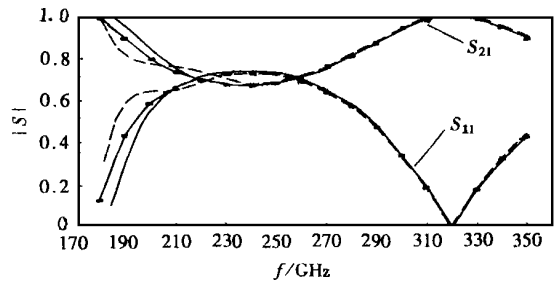


图 3 在不同激励源下波导长度计算的 S 参数

3 结 论

本文给出了一种用于时域有限差分法的新的激励源,这种激励源具有可预先给定的矩形频谱函数。实际计算表明,与传统的高斯脉冲相比,新的激励源是一种高效率的激励源,在它的激励下数字计算具有稳定性好,可完全排除寄生激励频率分量干扰的优点。在文中给出的计算实例中可节省一半的计算时间及计算机内存,此外还有设置简易直观的特点。

参 考 文 献

- 1 Lee W ai, Mittra K o Rai. A combination of FD-TD and Prony's methods for analyzing microwave integrated circuits. IEEE MTT, 1991, 39(12) :2 176 ~ 2 181
- 2 Asi L A, Fai Sha. Dispersion analysis of anisotropic inhomogeneous waveguides using compact 2D-FDTD. Electronic Letters, 1992, 29(19) :1 451 ~ 1 452
- 3 Toland B, Houshmand B, Itoh T. Modeling of nonlinear active regions with the FDTD method. IEEE Microwave. Guided Wave, Letters, 1993, 3(9) :333 ~ 335
- 4 Esw arappa Channabassappa, Gang W, Hoefer J R. Absorbing boundary conditions for time domain in TLM and FDTD analysis of eletromagnetic structure. Electromagnetics 1996, 16:489 ~ 519
- 5 Enrique A, Aavarro N, Sangary T et al. Some consideration on the accuracy of the nonuniform FDTD method and its application to waveguide analysis when combined with the perfectly matched layer technique. IEEE M TT, 1996, 44(7) :1 115 ~ 1 124
- 6 Cornelius Oilvier Jan, McNamara D A. Analysis of multiport discontinuities in wavguide using a pulse FDTD approach. IEEE M TT, 1994, 42(12) :2 229 ~ 2 238
- 7 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(12) :1 775 ~ 1 787
- 8 Schamberger M A, Kosanovich S, Mittra R. Parameter extraction and correction for transmission line and discontinuities using the finite-difference timedomain method. IEEE MTT, 1996, 44(6) :919 ~ 925
- 9 Huang Tianwei, Houshmand B, Itoh T. Efficient modes extraction and numerically exact matched source for a homogeneous waveguide crosssection in a FDTD simulation. 1994 IEEE MTT's Digest, 1994 :31 ~ 34
- 10 管致中. 无线电技术基础, 上册. 北京:人民教育出版社, 1964
- 11 Yu Zhiyuan. A simple and effective method for the reflection coefficient extracting in rectangular waveguide discontinuity analysis by the FDTD. Microwave and Optical Technology Letter, 1997, 15(1) :57 ~ 59
- 12 Krupezevic Dragan V, Brankovic V J, Amit F. The wave-equation FDTD method for the efficient eigenvalue analysis and S-matrix computation of waveguide structure. IEEE MTT, 1993, 41(2) :2 109 ~ 2 115

A Study of Excitation Source in FDTD Calculation

Yu Zhiyuan

(Institute of Applied Physics UEST of China Chengdu 610054)

Abstract A new source which has a rectangular spectrum is proposed for the FDTD analysis of waveguide discontinuity. The source has high excitation efficiency and can filter out all undesired frequency components which are under the cut-off frequency of the dominant mode and makes the calculation operating on a single dominant mode condition. Compared with the convention Gaussian pulse excitation, a practical calculation shows that both the CPU time and the memory requirement is greatly saved.

Key words finite difference time domain; bandpass excitation source; Fourier kernel function; cut-off modes

编辑 徐培红