

波导与开口腔体瞬态特性研究

张安学, 师振盛, 蒋延生, 汪文秉

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 从理论上分析了矩形波导中传播模式的瞬变过程, 给出了在冲激脉冲、阶跃脉冲和高斯脉冲波形激励下, 波导中电磁波瞬态响应的解析公式, 并采用时频分析方法对波导中传播信号、开口腔体的散射信号的瞬态特性进行了分析. 分析结果发现, 当电磁脉冲信号投射到开口腔体上时, 其散射信号中含有与其腔体形状、尺寸特征有关的谐振模式, 不同的腔体目标, 其散射信号后期信号中的谐振频率不同, 通过提取散射信号中的谐振特征, 可对带腔体目标进行目标识别.

关键词: 波导; 开口腔体; 瞬态特性; 目标识别; 时频分析

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)10-1179-05

Study on Wave Guide and Open Cavity Transient Response

Zhang Anxue, Shi Zhensheng, Jiang Yansheng, Wang Wenbing

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The transient process of propagation pattern in rectangle waveguide is analyzed theoretically and the analytical formulas of electromagnetic wave transient response excited by impulse, step signal and Gaussian pulses wave in the wave-guide are given. The time-frequency analysis method is used to analyze the transient response characteristics of signals propagated along waveguide and open cavities scattering signal. Through analyzing it is found that the scattering signal contains resonance pattern that is related with the size and shape of cavities when an electromagnetic pulse signal is projected on open cavities. With different open cavity target the resonant frequency will be different in scattering subsequent signal. The targets with open cavities can be identified by extracting the resonance feature in scattering signal.

Keywords: waveguide; open cavity; transient characteristics; target recognition; time-frequency analysis

飞行目标的腔体结构可视为开口波导谐振腔^[1], 开口腔体的谐振模式信号较强, 可以从散射场中提取腔体所对应的谐振频率. 不同的飞行目标所携带的腔体不同, 可以通过分析目标携带腔体的谐振特性进行识别.

为了能激励起目标腔体的谐振模式, 雷达需采用宽带信号进行探测, 为此需要研究波导与开口腔体在宽带信号激励下的瞬态特性. 近年来, 国内外学者们的研究主要集中在波导与传输线瞬态计算方法上, 如文献[2-4]给出的半解析方法、文献[5-6]给出

的数值计算方法等, 对于开口腔体瞬态特征分析的研究尚未查出报道文献. 本文重点分析波导与开口腔体散射信号的瞬态特征, 为带腔体目标的识别提供依据.

本文首先给出了在冲激脉冲、阶跃脉冲和任意脉冲波形激励下, 电磁波在波导中传播的瞬变响应表达式. 然后, 利用联合时频分析方法^[7-8]分析了波导中传播信号和开口金属腔体散射信号的时-频特征. 分析结果发现, 当用超宽带脉冲照射开口腔体时, 散射场中含有腔体谐振模式信息, 不同的腔体结

构具有不同的谐振频率,利用此信息可对带腔体目标进行识别.

1 波导中的瞬变过程

1.1 波导中的瞬变过程理论分析

如图1所示,假设波导截面沿管轴(z 轴)是均匀的,管壁为理想导体.对于矩形波导,在如图1所示的激励条件下,时变形式的二维波动方程为^[9]

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) e_y(\mathbf{r}, t) = \mu_0 \frac{\partial j_{i,y}}{\partial t}(\mathbf{r}, t) \quad (1)$$

式中: $e_y(\mathbf{r}, t)$ 为波导中的时变电场; ϵ_0, μ_0 为真空介电常数和磁导率; $\mathbf{r}$ 为空间距离矢量; x, y, z 为空间场点坐标; $j_{i,y}$ 表示 y 方向的激励电流.

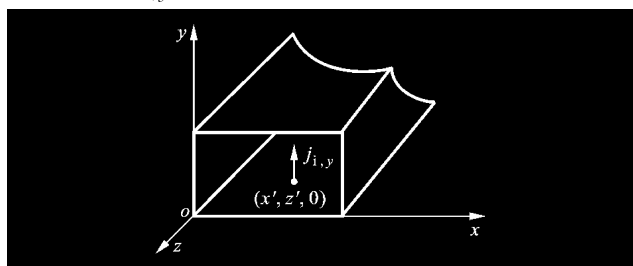


图1 矩形波导激励示意图

设 $j_{i,y}$ 是位于 (x', z') 点、在时间 $t=t'$ 上接入的激励电流,即

$$j_{i,y} = \delta(t-t')\delta(x-x')\delta(z-z') \quad (2)$$

设 $E_y(\mathbf{r}, s)$ 为 $e_y(\mathbf{r}, t)$ 的拉普拉斯变换,即

$$E_y(\mathbf{r}, s) = \int_0^\infty e_y(\mathbf{r}, t) \exp(-st) dt \quad (3)$$

则 $E_y(\mathbf{r}, s)$ 是某个与时间有关的格林函数 $g(\mathbf{r}|\mathbf{r}', t-t')$ 的拉普拉斯变换 $G(\mathbf{r}|\mathbf{r}', s)$,其中 $\mathbf{r}'$ 为源点坐标.根据拉普拉斯变换的性质, $j_{i,y}(\mathbf{r}, t)$ 的拉普拉斯变换为

$$J_{i,y}(\mathbf{r}, s) = \exp(-s't')\delta(x-x')\delta(z-z') \quad (4)$$

于是由式(1)可得

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - s^2 \mu_0 \epsilon_0\right) G(\mathbf{r}|\mathbf{r}', s) = s \mu_0 \exp(-s't')\delta(x-x')\delta(z-z') \quad (5)$$

可以证明^[9],格林函数

$$G(\mathbf{r}|\mathbf{r}', s) = -\frac{\mu_0}{a} \sum_{m=1}^{\infty} \phi_m(x) \phi_m(x') s \cdot \exp\left\{-s't' + \left[\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \mu_0 \epsilon_0 s^2\right]^{1/2} |z-z'|\right\} / \left[\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \mu_0 \epsilon_0 s^2\right]^{1/2} \quad (6)$$

式中: $\phi_m(x) = \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right)$; m 为场模式数; a 为波导

宽边尺寸.利用拉普拉斯变换的性质,去掉式(6)中的因子 s ,求每项的反变换,再将所得结果对 t 求导.可得时域格林函数的解

$$g(\mathbf{r}|\mathbf{r}', t-t') = \frac{\eta_0 c^2}{a} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{m\pi}{a} \phi_m(x) \phi_m(x') (t-t') \cdot J_1\left\{(m\pi/a)[c^2(t-t')^2 - (z-z')^2]^{1/2}\right\} / [c^2(t-t')^2 - (z-z')^2] \quad (7)$$

$$t > t' + |z-z'|/c$$

式中: J_1 为一阶第一类柱贝塞尔函数; $\eta_0 = (\mu_0/\epsilon_0)^{1/2}$ 为真空波阻抗; c 为光速.从式(7)可以看出,在离开场源给定距离 $|z-z'|$ 处,在达到时刻 $t=t'+|z-z'|/c$ 之前,电场一直为零,每个模式所贡献的场量最初以一种不连续的跃变出现,然后以类似于一种衰减正弦波的形式振荡.这样,一个原来在时间和空间内都受到局限的脉冲转变为一种弥散在整个时间和空间范围内的场.

如果源电流作单位阶跃变化,即

$$j_{i,y}(\mathbf{r}, t) = u(t-t')\delta(x-x')\delta(z-z') \quad (8)$$

式中: u 为单位阶跃函数

$$u(t-t') = \begin{cases} 0 & t < t' \\ 1 & t > t' \end{cases} \quad (9)$$

根据拉普拉斯变换的性质

$$J_{i,y}(\mathbf{r}, s) = s^{-1} \exp(-s't')\delta(x-x')\delta(z-z') \quad (10)$$

当源电流为单位阶跃函数时,可以得到电场为

$$e_y(\mathbf{r}, t) = \frac{\eta_0}{a} \sum_{m=1}^{\infty} \phi_m(x) \phi_m(x') J_0 \cdot \left\{ \frac{m\pi}{a} [c^2(t-t')^2 - (z-z')^2]^{1/2} \right\} \quad (11)$$

$$t-t' > \frac{|z-z'|}{c}$$

式中: J_0 为0阶贝塞尔函数.对于当 $t>0$ 时随时间作任意变化的源电流 $j_{i,y}(\mathbf{r}, t)$,电场的拉普拉斯变换根据下式得到

$$E_y(\mathbf{r}, s) = \int_A J_{i,y}(\mathbf{r}', s) G(\mathbf{r}|\mathbf{r}', s) d\mathbf{r}' \quad (12)$$

式中: A 表示包含电流 $J_{i,y}$ 的整个截面.

对式(12)应用拉普拉斯变换中的卷积定理,有

$$e_y(\mathbf{r}, t) = \int_0^t \int_A j_{i,y}(\mathbf{r}', t') g(\mathbf{r}|\mathbf{r}', t-t') d\mathbf{r}' dt' \quad (13)$$

1.2 矩形波导中传播信号的时频特征分析

根据式(7)、式(11)和式(13)给出在冲激脉冲、

阶跃脉冲和高斯脉冲激励下,矩形波导中电磁波的瞬态响应波形,并用联合时频分析方法^[7-8]分析其信号特征.采用如图1所示坐标,激励电流源在波导宽边中央位置,极化方向为 y 方向,观察点位置为 $x=a/2, z=30$ cm.

图2为宽边 $a=22.86$ cm、窄边 $b=11.2$ cm、 $m=10$ 时,采用冲激脉冲激励时在波导中观察到的电场传播波形的联合时频分析图.从图中时域波形可以看出,在最初的时间里,电场以一种不连续的跃变出现,然后以类似于一种衰减正弦波的形式振荡;从时频图上可以看出,所有频率信号的波头同时到达观察点位置,但是在传播信号的后期,就只有传播模式对应的频率信号可以传播.在模型中,由于激励在波导宽边中央位置,且极化方向只有 y 分量,因此对于冲激脉冲激励源来说,只能激励出TE模式的奇数模式,如 TE_{10} 、 TE_{30} 、 TE_{50} 、 TE_{70} 和 TE_{90} 等,不同模式的截止频率公式为

$$f_c = \frac{1}{2}(\epsilon\mu)^{-1/2} \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (14)$$

截止频率与波导尺寸、传播模式及波导中填充的介质参数有关.将参数代入式(13),可计算出与 TE_{10} 、 TE_{30} 、 TE_{50} 、 TE_{70} 、 TE_{90} 模式对应的截止频率分别为1.031、3.092、5.154、7.215、9.276 GHz.从图2所示的时频图上也可以清晰地看出不同模式对应的截止频率来.

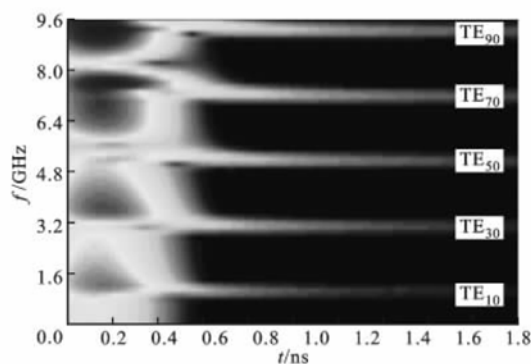
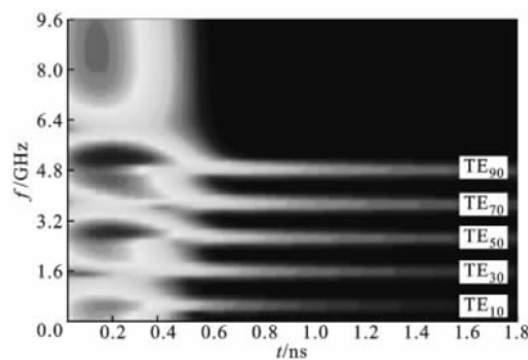


图2 矩形波导传播信号联合时频分析图

改变波导宽边尺寸,使得 $a=40$ cm,仍然采用冲激脉冲激励,图3为波导中的电场的传播信号的时频图,从图中可以看到其中有5个传播模式,仍为 TE_{10} 、 TE_{30} 、 TE_{50} 、 TE_{70} 、 TE_{90} 模式,但和图2情况不同,各模式的截止频率都发生了改变,截止频率和理论算出的截止频率接近,即0.535、1.606、2.677、3.748、4.819 GHz.

采用单位阶跃激励,对于图2和图3所示情况

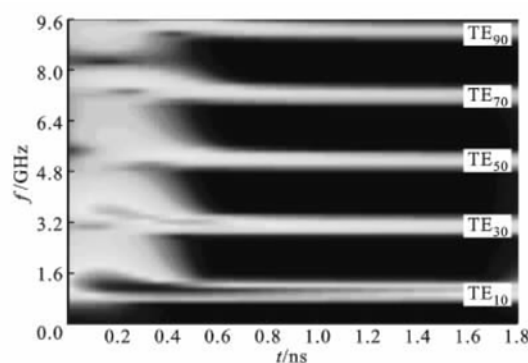


$a=40$ cm, $m=10$

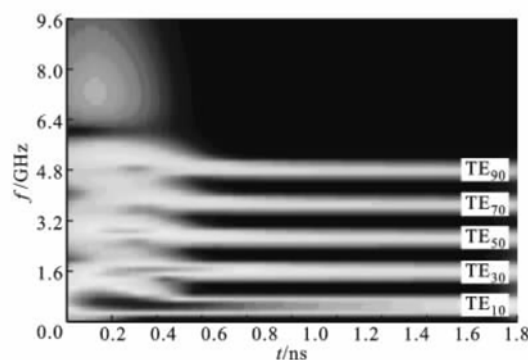
图3 激励为冲激脉冲时波导中的波形

进行分析,可以得到如图4所示的时频图,从图4可以得到相同结论.所以通过分析波导中传播信号的时频图,可以得到不同传播模式的截止频率,进而判断不同的波导类型.

在实际应用中,由于雷达发射信号具有一定的带宽,因此能否激励出带宽范围内的传播模式,是影响目标识别的关键.图5为正弦调制高斯脉冲激励时波导中信号的时频图,激励脉冲中心频率为5.3 GHz,3 dB带宽为2.5 GHz.从图中可以看出,在超宽带高斯脉冲激励时,可以激励出分布在信号频带内的有限个传播模式(TE_{30} 、 TE_{50} 和 TE_{70}).

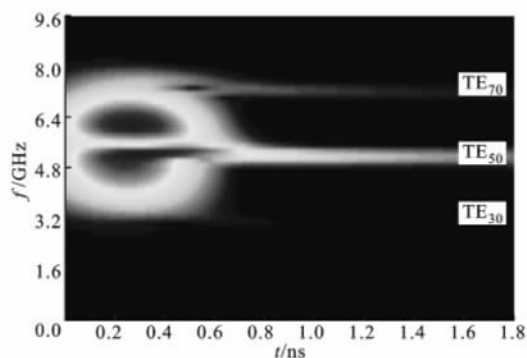


(a) $a=22.86$ cm



(b) $a=40$ cm

图4 激励为单位阶跃时波导中的波形



$$a=22.86 \text{ cm}, m=10$$

图5 激励为高斯脉冲时波导中信号的时频图

对于飞行目标上的腔体,可看作有限长的开口波导.脉冲雷达信号投射到目标腔体上,在腔体中可激励出信号频谱范围内的谐振模式,谐振模式再通过腔体开口辐射出去.在带有腔体的目标散射信号中,含有腔体的谐振模式信息.对于不同类型的目标,其所携带腔体不同,散射场信号中腔体谐振模式和谐振频率也不相同,可通过分析带有腔体的目标散射信号中的谐振模式,来达到识别目标的目的.

2 开口波导腔体散射场瞬态特征分析

为了模拟实际雷达探测时目标腔体的散射特性,本文采用平面波激励,用FDTD^[5]方法来模拟腔体的散射场,然后通过联合时频分析方法分析腔体的谐振频率.

2.1 开口的矩形波导腔体散射场瞬态特征分析

如图6所示,矩形波导腔体一端开口,长度为300 mm,宽边为50 mm,窄边为40 mm.采用正弦调制高斯脉冲平面波激励,激励信号中心频率为10 GHz,20 dB衰减带宽为12 GHz.采用FDTD计算其散射场,分别在腔体内、外记录总场,记录点位置分别位于波导内部中心和波导口外部正下方70 mm处.

入射波传播方向为 x 方向,极化方向为 z 方向,图7为在波导腔内部和外部记录场的时频图.从图

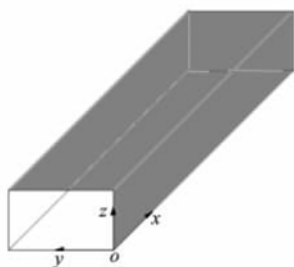
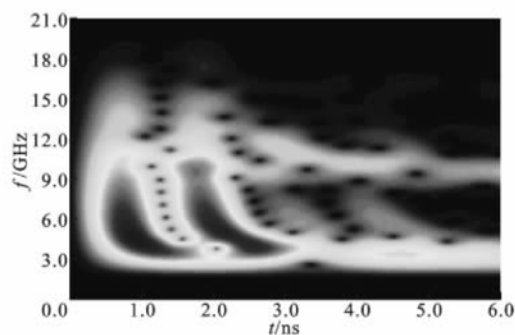
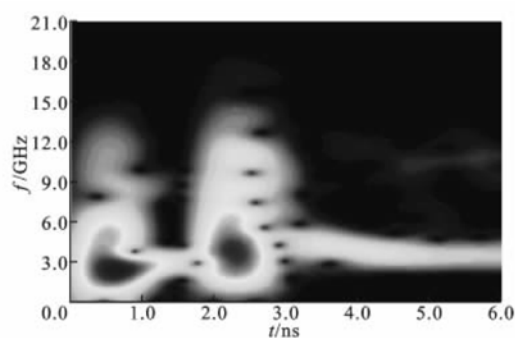


图6 一端开口的矩形波导腔体模型



(a)矩形波导内部



(b)矩形波导外部

图7 矩形波导内部和外部记录场时频图

7a可以看出,波导内部电场后期信号中有2个明显的谐振频率点,对应信号带宽范围内的2个谐振模式.从图7b可以看出,在波导谐振腔的外部散射场中,仍含有谐振模式,但由于腔内的高次谐振模式幅度相对较弱,因此时频图中只能看到较低的谐振模.

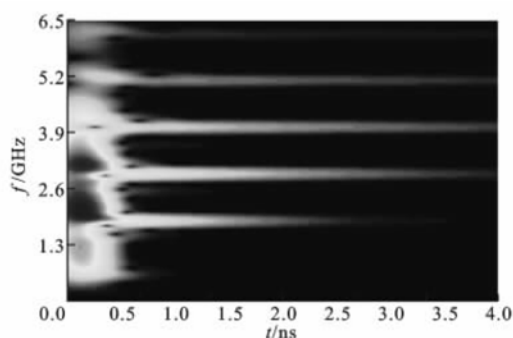
2.2 开口圆波导腔体散射场瞬态特征分析

图8为一端开口的圆波导腔体模型,其半径为150 mm,长度为300 mm.采用平面波激励,入射波方向为 z 方向,极化方向为 x 方向.分别在腔内和腔外记录电场的 x 分量,腔内记录点位于波导中心,腔外记录点位于轴线上距离开口180 mm处.

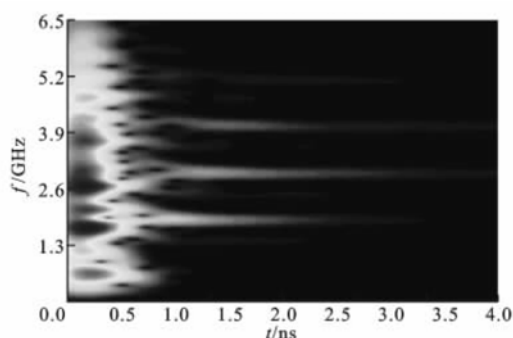


图8 一端开口的圆波导腔体模型

图9为在圆波导腔内部和外部记录场的时频图,从图9a可以看出,圆波导腔内部记录场的后期信号中,有明显的谐振频率点,此谐振频率与腔体的形状、尺寸有关.从图9b可以看出,外部场与内部场相比,具有相同的谐振模式,但外部信号中谐振模式场幅度较小.



(a)圆波导腔内部



(b)圆波导腔外部

图9 圆波导腔内部和外部记录场时频图

3 结 论

从本文的数值模拟和分析可以看出,当飞行目标上存在开口腔体时,开口腔体可视为一谐振腔,在入射信号的频谱范围内,可激励有限个谐振模式。通过分析散射场中谐振模式的谐振频率,可以得到腔体的特征信息,进而达到识别目标的目的。但是,由于目标腔体谐振信息分布在散射信号的后期响应中,一般信号幅度较弱,如何从较弱的信号中准确提取目标腔体的谐振频率,是本文后续工作的主要研究内容。

参考文献:

- [1] 童创明,王光明,张晨新,等. 喷气发动机的 J. E. M 效应调制谱分析[J]. 电波科学学报, 1999, 14 (2): 136-143.
Tong Chuangming, Wang Guangming, Zhang Chen-

- xin, et al. Analysis of J. E. M effect modulation spectra of jet engine [J]. Chinese Journal of Radio Science, 1999, 14 (2): 136-143.
- [2] Zhou Xiaojun, Yu Zhiyuan, Lin Weigan. The numerical stable and dispersion in the conformal mapping method hybridization with FDTD [J]. Journal of Electronics, 2000, 22(4): 618-625.
- [3] 李思敏,张德琨,林为干. 波导中模式吸收边界条件的计算方法 [J]. 电子学报, 2001, 29(9): 1256-1258.
Li Simin, Zhang Dekun, Lin Weigan. Method of calculation modal absorbing boundary condition for waveguide problems [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(9): 1256-1258.
- [4] Alpert B, Greengard L, Hagstrom T. Nonreflecting boundary conditions for the time dependent wave equation [J]. Journal of Computational Physics, 2002, 180 (1): 270-296.
- [5] Alimenti F, Mezzanotte P. Revised formulation of modal absorbing and matched modal source boundary conditions for the efficient FDTD analysis of waveguide structure [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2000, 48(1): 50-59.
- [6] 李思敏,姜兴,林为干. 一种快速求解波导模式瞬态响应的新方法[J]. 电波科学学报, 2006, 21(2): 194-198.
Li Simin, Jiang Xing, Lin Weigan. A new method for fast simulating transient response of waveguide modes [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(2): 194-198.
- [7] 王运飞,王经瑾,刘国治. 时频分析在超宽带散射信号处理中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(7): 689-693.
Wang Yunfei, Wang Jingjin, Liu Guozhi. Application of time-frequency analysis on UWB scattering signal processing [J]. High Power Laser & Particle Beams, 2003, 15(7): 689-693.
- [8] Chen V C, Ling H. Time-frequency transforms for radar imaging and signal analysis [M]. Boston, USA: Artech House, Inc., 2002.
- [9] 黄席椿. 论波速[M]. 北京:高等教育出版社, 1985.

(编辑 刘杨)