

时域 TEM 喇叭天线的分析和设计*

周蔚红,刘培国,何建国,李高升

(国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘要 :TEM 喇叭是一种超宽带天线,但迄今为止大都是利用频域的概念来研究的。本节从波模理论出发,提出喇叭的开口阻抗不能看作真空波阻抗,它与喇叭尺寸、张角有关;由于冲激脉冲有时序性,反射只与局部结构有关。介绍了实际制作的 TEM 喇叭天线,并给出了实验结果,表明它具有良好的阻抗匹配特性和波形保真性,对时域天线的研究具有很好的理论和实用价值。

关键词 :时域天线;TEM 喇叭;瞬态电磁场

中图分类号 :TN82 文献标识码 :A

Analysis and Design of Time-domain TEM Horn Antenna

ZHOU Wei-hong, LIU Pei-guo, HE Jian-guo, Li Gao-sheng

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract :TEM Horn is an ultra-wide-band antenna, which is usually employed in the analysis of frequency domain up to the present. A new concept is presented with wave mode theory. According to this concept, the impedance of antenna aperture cannot be regarded as the wave impedance in vacuum, but is connected with antenna size and flare angle. Because of the time sequence, the reflection is only connected with local structure. A TEM horn antenna is designed and fabricated. The experiment results show that its wave fidelity and impedance performance are excellent, so it is very valuable for the study of time-domain antenna.

Key words :time-domain antenna; TEM horn; transient field

TEM 喇叭的宽带性能已有多人描述,但都局限于用频域的概念来分析。这在某种程度上是正确的,因为通过频域的结果可以反演到时域。但在讨论 TEM 喇叭的阻抗匹配时,如果仍沿用频域中阻抗变换的概念,如切比雪夫和巴特沃兹变换就不正确,因为这些变换是在稳态正弦条件下建立的。所有阻抗阶梯的反射波都参与了迭代过程,而冲激脉冲是一种极短的时序脉冲,只有在脉冲到达点的阻抗阶梯才会发生反射,这里只有一小端阶梯参与了作用,迭加时必须考虑时序性。许多作者把喇叭口面的阻抗看作空气波阻抗 120π ,并把它作为喇叭的终端负载,喇叭本身则作为馈源与负载之间的阻抗匹配器,这样做的结果往往效果很差,产生很长的拖尾,使冲激脉冲产生了严重的失真。

1 理论分析

时域天线要求天线的最重要的指标之一是波形的保真性,如果运用频域超宽带的概念来设计时域天线是错误的。这是因为冲激脉冲在喇叭内的传输过程中具有时序性,只有波到达点处的传输线段才有反应,未到达点的传输线是看不见的,因此每一时刻只有冲激脉冲到达的那一段传输线才有反射,其后的部分可以看作匹配负载(如图 1),如果反射系数是常数,那么传输系数也是常数,不

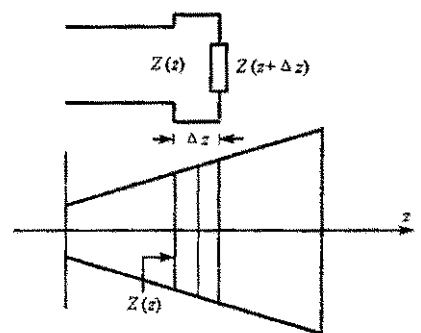


图 1 喇叭不连续性等效电路

Fig.1 Equivalent circuit for discontinuity of the horn

* 收稿日期:2005-12-23

基金项目:国家 863 高技术资助项目(2001AA132020)

作者简介:周蔚红(1972-),女,博士生。

引起波形失真,这是时域中讨论阻抗匹配的基本概念。

设天线在 z 截面处的归一化瞬态特性阻抗为 $Z(z)$,则此处的反射系数为

$$\Gamma(z) = \frac{Z(z + \Delta z) - Z(z)}{Z(z + \Delta z) + Z(z)} \quad (1)$$

式中 $Z(z + \Delta z)$ 为波到达段的瞬态特性阻抗,当信号很窄时, Δz 非常小,上式可以简化为

$$\Gamma(z) \approx \frac{1}{2} \frac{dZ}{Z(z) dz} \Delta z = \frac{1}{2} \frac{d \ln Z}{dz} \Delta z \quad (2)$$

即

$$Z(z) = e^{\alpha \Gamma(z) z} \quad (3)$$

式中 $\alpha = 2/\Delta z$ 。

由此可见,如果希望

$$\Gamma(z) = C \quad (\text{常数}) \quad (4)$$

那么天线的特性阻抗应为指数变化函数。当

$$\Gamma(z) = 0 \quad (5)$$

时,天线的特性阻抗为常数,天线具有超宽频带特性阻抗。因此这比频域中宽带阻抗匹配要简单得多。

2 计算仿真

图2是喇叭天线的横截面,可以用积分方程方法计算其特性阻抗。

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\oint D \cdot dS}{V} = \frac{\epsilon \iint E_x dS}{\int E_x dl_x} = \frac{\epsilon E_x w}{E_x d} = \frac{\epsilon w}{d} \quad (6)$$

$$L = \frac{\iint B \cdot dS}{I} = \frac{\iint \mu H_y dS}{I} = \frac{\mu H_y d}{I} = \frac{\mu H_y d}{H_y w} \quad (7)$$

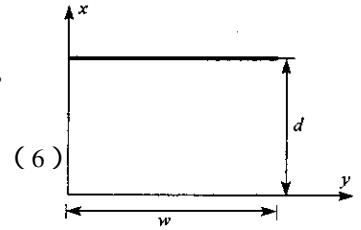


图2 喇叭天线的横截面
Fig.2 Transverse cross-section of the horn antenna

特性阻抗

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = 120\pi \frac{d}{w} \quad (8)$$

仿真计算了平板恒阻抗 TEM 喇叭和切比雪夫阻抗渐变的 TEM 喇叭,如图3为天线从馈电端 50Ω 到 377Ω 口径阻抗之间连续过渡,采用切比雪夫阻抗渐变实现。以下称为变阻抗喇叭。图4为平板喇叭,其阻抗沿喇叭主轴方向是不变的,都是 377Ω 。以下称为恒阻抗喇叭。两种喇叭长度一致。仿真计算了两种天线在高斯微分脉冲激励下的轴向辐射波形。喇叭长度 L 均为 0.5m 。

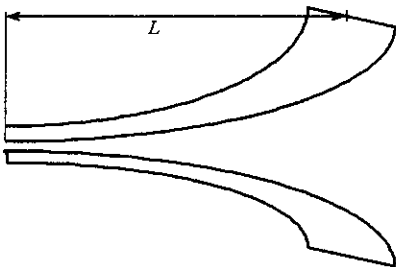


图3 切比雪夫阻抗渐变的喇叭

Fig.3 Horn with chebyscheff impedance shading

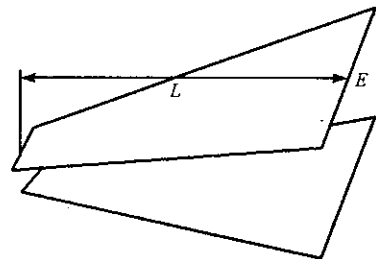


图4 恒阻抗喇叭

Fig.4 Horn with constant impedance

从轴向的辐射波形(图5)可以看出:虽然两种喇叭的口径面积一致,但是采用切比雪夫阻抗渐变的喇叭的轴向辐射波形却发生了较为严重的畸变,产生几乎是半幅的拖尾。同样从输入电流的波形(图6)可以看出:尽管喇叭阻抗变换是采用反射最小的切比雪夫阻抗渐变的,其入射电流的反射也远远大于恒阻抗喇叭。

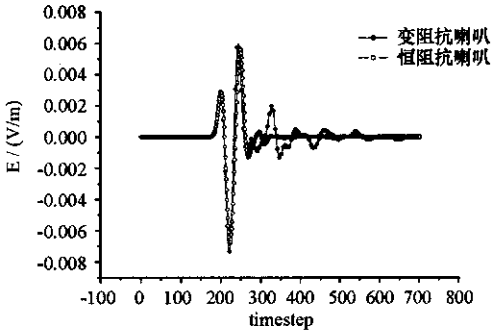


图 5 两种喇叭天线的轴向辐射波形
Fig.5 Radiation waveform of two kinds of horn antennas in axial direction

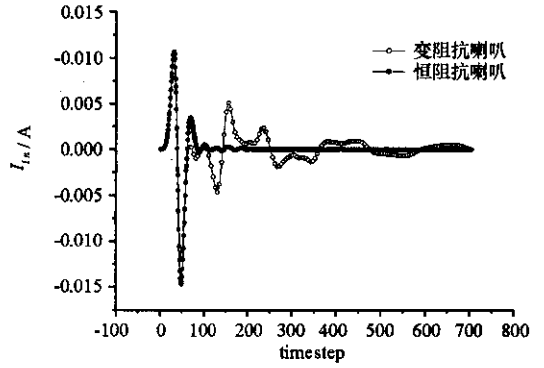
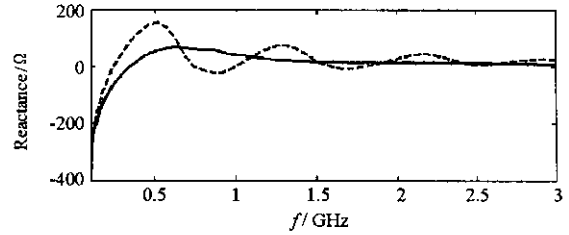
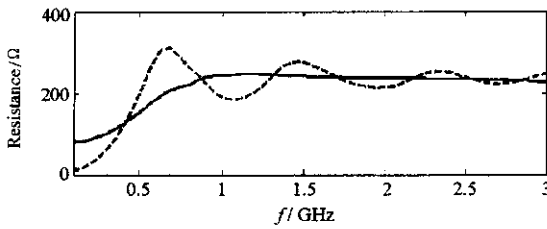


图 6 两种喇叭天线的输入电流
Fig.6 Input current of two kinds of horn antennas



(- 恒阻抗喇叭天线 ; - - - 变阻抗喇叭天线)
(- horn antenna with constant impedance ; - - - horn antenna with changing impedance)

图 7 输入阻抗变化图
Fig.7 Variation curves of input impedance

从输入阻抗图(图 7)中可以看出:在频率大于 500MHz 以后,电阻和电抗围绕一根水平线做小的起伏,曲线变化平缓,因此是宽带阻抗匹配特性,而作为对比的变阻抗喇叭,则有多次尖锐的振荡,输入阻抗和电抗是剧变的,其阻抗匹配并不具有宽带特性。这是因为实际上喇叭口面与空气匹配的概念并非如此简单,严格分析应从波模理论出发,即喇叭内的导行波可分解为各次波模,自由空间的球面波也可分解为各次波模,二者在喇叭口面上连续。如图 8 所示,用方程表示为

$$\left. \begin{aligned} \sum a_n (E_n^+ + \Gamma_n E_n^-) &= \sum b_m E_m^+ \\ \sum a_n (H_n^+ - \Gamma_n H_n^-) &= \sum b_m H_m^+ \end{aligned} \right\}$$

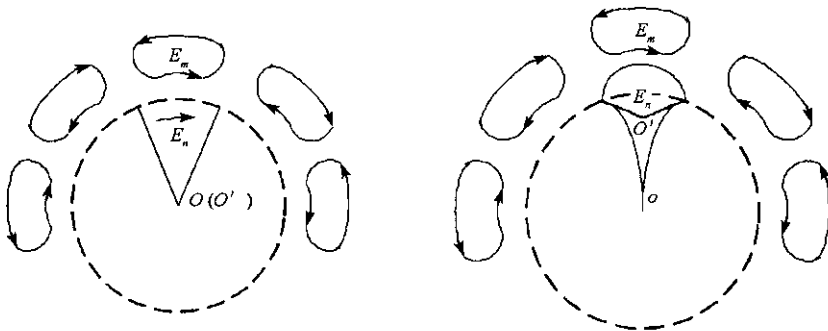


图 8 喇叭内外波模表示
Fig.8 Indication of wave modes both inside and outside the horn

方程左端为波导模之和,上标“+”表示外形波,“-”表示反射波, Γ_n 为反射系数, a_n 为n次模的幅度,右端表示空间模之和。各次波模的波阻抗不仅与波形有关,还与距离有关。低次模在很小的距离上其值已接近自由空间波阻抗,波形模次越高,要求的距离越远,而在小距离上,它们或趋于零,或趋于无限

大。

对于恒阻抗喇叭天线,其阻抗是沿喇叭主轴方向不变的,可以看到天线末端的球面波前与自由空间中的球面波前是一致的。而对于喇叭从 50Ω 的馈电端到 377Ω 口径阻抗之间,虽然是采用阻抗渐变实现,但喇叭的球面波前与自由空间的球面波前的球心并不一致,因而效果反而变差,产生了较为严重的波形失真。显然,作为一个设计值的TEM喇叭的波阻抗与喇叭尺寸和张角有关。当喇叭长度增加,喇叭张角加大,喇叭的波阻抗就更接近自由空间波阻抗,口面的反射将减小,脉冲波形的失真亦随之减小。

3 实验研究

设计制作了一个TEM平板喇叭天线,喇叭口径高为40cm,平板长47cm,平板张角为 40° ,用同轴线馈电。实验测得的轴向辐射波形和驻波如图9、图10所示。

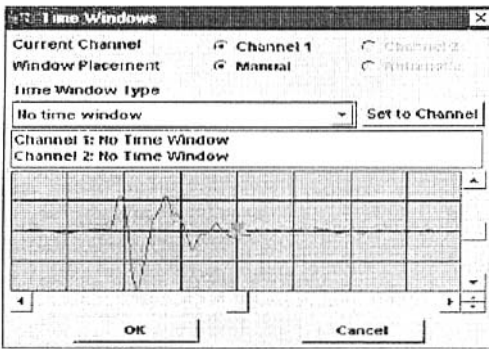


图9 TEM喇叭天线的辐射波形

Fig.9 Radiation waveform of horn antenna in TEM mode

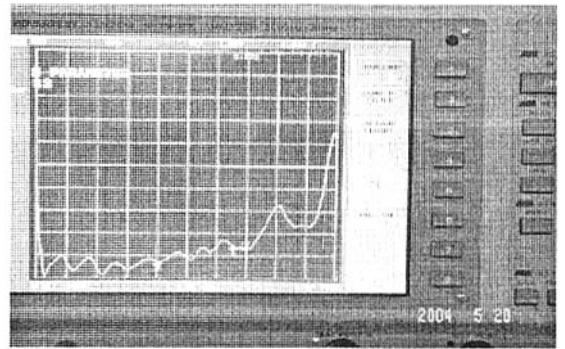


图10 TEM喇叭天线的驻波图

Fig.10 VSWR curve of TEM horn antenna

测试表明,在 $0.3 \sim 1.5\text{GHz}$ 的范围内, $\text{VSWR} \leq 2$,天线具有较宽的阻抗匹配特性;由测得的轴向辐射波形可见,辐射波形基本上是高斯微分脉冲的形式,脉冲拖尾较小,保形性是好的。

4 结论

TEM喇叭是一种超宽带天线,但迄今为止大都是利用频域的概念来研究。本文从波形保真性出发,提出了两个新概念:(1)喇叭的开口阻抗不能看作真空波阻抗,它与喇叭尺寸、张角有关;(2)冲激脉冲有序性,反射只与局部结构有关。

并且仿真计算了两种结构的喇叭天线,从输入电流、辐射波形、输入阻抗可以看出恒阻抗TEM喇叭天线性能最好。介绍了实际制作的TEM喇叭天线,并给出了实验结果,表明它具有良好的阻抗特性和波形保真性,对瞬变场和超宽带雷达的研究具有很好的理论和实用价值。

参考文献:

- [1] Turner G. Modeling Antenna Ground Interactions[A]. Proc. of the 5th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR '94) [C]. Ontario, Canada, 1994.
- [2] Shlarge K L, Smith G S, Maloney J G. Optimization of Bow-Tie Antennas for Pulse Radiation[J]. IEEE Trans. Antenna and Propagation, 1994, AP-42: 975-982.
- [3] 周蔚红, 周东明, 刘克成. 二维 FDTD 分析土壤及地下管道地时域散射场[J]. 国防科技大学学报, 2003, 25(6): 53-56.
- [4] Bourgeois J M, Smith G S. A Fully Three-Dimensional Simulation of Ground-Penetrating Radar: FDTD Theory Compared with Experiment[J]. IEEE Trans. 1996, GE-34: 36-43.
- [5] Roberts R, Daniels J J. Modeling Near-field GPR in Three Dimensions Using the FDTD Method[J]. Geophysics, 1997, 62(4): 1114-1126.
- [6] Maloney J G, Shlarger K L, Smith G S. A Simple FDTD Model for Transient Excitation of Antennas by Transmission Lines[J]. IEEE Trans. Antenna and Propagation, 1994, AP-42: 289-292.

