

# 一种超宽带天线的分析设计

王长华, 王秩雄, 宋爱民

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

**摘要:**研究一种超宽带无加载的 TEM 喇叭天线。理论推导 V 形振子天线的远区场, 由此得到 TEM 喇叭天线的特性阻抗变化与反射系数的关系, 提出一种超宽带 TEM 喇叭天线的设计思路。利用电磁仿真软件 Ansoft HFSS 模拟分析, 并设计一种视轴长度 10cm 的 TEM 喇叭天线。当输入脉冲宽度 2.0ns, 测量得到天线带宽为 100MHz 至 600MHz。结果表明此天线不加载, 也能具有良好超宽带特性, 为 TEM 喇叭天线的设计和性能评估提供了参考。

**关键词:**超宽带天线; TEM 喇叭; 非均匀传输系统; 时域

**中图分类号:** TN82

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2009)03-0193-03

## Design of a Ultrawide-Bandwidth Antenna

WANG Chang-hua, WANG Zhi-xiong, SONG Ai-min

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** A ultrawide-bandwidth TEM horn antenna without resistive loading is presented in this paper. The far field pattern of V-shape dipoles is derived theoretically. From this, the relation is derived between the optimum variation of characteristic impedance of TEM wave and reflection coefficient. Discuss thought for the design of a kind of broadband antenna. The antenna is simulated and designed through the electromagnetic software Ansoft HFSS. It follows from measurements that when a practical axial length is 10cm, the width of input pulse is 2.0ns, the antenna bandwidth is from 100MHz to 600MHz, which shows its good wideband characteristics without resistive loading. These results provide a basis to design and fabricate practical ultra-wideband antenna.

**Key words:** ultrawide band antenna; TEM horn; nonuniform propagating system; time-domain

### 0 引言

超宽带天线又称脉冲天线, 能使一个超宽带脉冲信号通过其辐射时畸变最小, 即脉冲响应拖尾最小。为了实现此目的, 人们常采用 TEM 喇叭天线, 它是由两个导体构成的端射式天线。构成 TEM 喇叭天线的两块金属板的张角及宽度的选择原则是, 使特性阻抗为常数, 天线相当于均匀传输线, 这样的两块金属板引导了一个 TEM 波<sup>[1,2]</sup>。

实际上, 对于一般情况, 反射总是存在的, 为了减小反射, 常用一种被称为“非均匀传输系统”的 TEM 喇叭天线<sup>[3]</sup>。这种系统把反射因素考虑在内, 其 TEM 波的特性阻抗渐变, 使天线输入端的阻抗  $50\Omega$  与口径处阻抗  $120\pi\Omega$  逐渐过渡匹配, 以满足内部反射最小, 从而达到辐射效率高、脉冲响应拖尾小的目的。

### 1 基本原理

由于这种“非均匀传输系统”天线是由 V 形振子演变而来的, 其基本原理与 V 形振子相同, 所以对其特性的分析可转变为对 V 形振子的分析<sup>[4]</sup>。

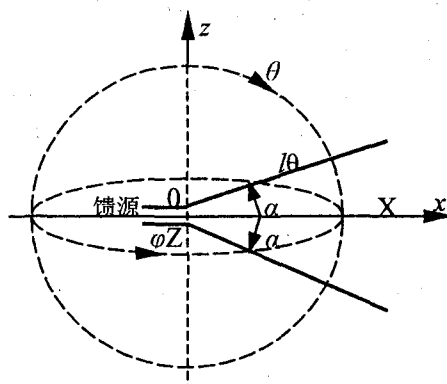


图1 均匀介质中 V 形振子的坐标及结构

图1中所示的端射式 V 形振子, 两臂间的张角为  $2\alpha$ ,  $l$  代表初始端与臂上各点间的臂长。首先假设输入信号在整个天线上无反射, 一个纯 TEM 行波沿天线传输, 故天线上行波电流为<sup>[4]</sup>:

$$I(l, \omega) = I_0(l, \omega) e^{-j\beta l} \quad (1)$$

收稿日期: 2008-11-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60471033); 陕西省自然科学基金资助项目(2007F39)

作者简介: 王长华(1964-), 男, 副教授, 研究方向为短波通信、无线输电和超宽带天线。

其中:  $I_0$  为电流幅度,  $I_0(l, \omega)$  代表输入电流的频率响应,  $\beta$  为相移常数。

天线远区辐射特性可用 Schelkunoff 辐射矢量的球坐标<sup>[5]</sup> 得到, Schelkunoff 辐射矢量的球坐标由下式表示:

$$N_\theta(\theta, \varphi) = \cos\varphi \cos\theta \cos\alpha [f(\Psi_1) - f(\Psi_2)] - \sin\theta \sin\alpha [f(\Psi_1) + f(\Psi_2)]$$

$$N_\varphi(\theta, \varphi) = -\sin\varphi \cos\alpha [f(\Psi_1) - f(\Psi_2)] \quad (2)$$

式中,

$$f(\Psi, \omega) = \int_0^L I_1(l, \omega) e^{-j\beta l(1-\cos\Psi)} dl$$

$$\cos\Psi_1 = \cos\theta \cos\alpha + \sin\theta \cos\alpha \cos\varphi$$

$$\cos\Psi_2 = -\cos\theta \sin\alpha + \sin\theta \cos\alpha \cos\varphi$$

则

$$N_\varphi(\frac{\pi}{2}, 0) = 0$$

$$N_\theta(\frac{\pi}{2}, 0) = \sin\alpha \cdot f(\Psi) =$$

$$-2\sin\alpha \int_0^L I_1(l, \omega) e^{-j\beta l(1-\cos\Psi)} dl \quad (3)$$

在视轴方向, 远区辐射电场由下式表示:

$$E_\theta(r, \frac{\pi}{2}, 0) = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi r} e^{-j\beta r} N_\theta(\frac{\pi}{2}, 0) \quad (4)$$

把式(3)代入式(4), 则有

$$E_\theta(r, \frac{\pi}{2}, 0) = -\left[\frac{\mu_0 L' \sin\alpha}{2\pi r}\right] \cdot [j\omega I_1(0, \omega)] e^{-j\beta r}$$

式中,

$$L' = \int_0^L \frac{I_1(l, \omega)}{I_1(0, \omega)} e^{-j\beta l(1-\cos\alpha)} dl$$

上述分析中, 一直假设天线内部结构中无反射。但是, 实际上反射是不可避免的, 下面就把反射因素考虑在内, 讨论有利于增大天线带宽的特性阻抗与内部反射及天线尺寸的关系。

设一传输 TEM 模的无耗非均匀传输线均处于均匀介质中, 其上任意点处阻抗  $Z(x)$  可由下式方程求得:

$$\frac{dZ(x)}{dx} = \frac{j\gamma}{Z_0(x)} [Z_0^2(x) - Z^2(x)] \quad (5)$$

$\gamma$  为传输线的传播常数, 任意点上的反射系数由下式表示:

$$R(x) = \frac{Z(x) - Z_0(x)}{Z(x) + Z_0(x)} \quad (6)$$

把式(6)代入式(5)得:

$$\frac{dR(x)}{dx} + 2\gamma R(x) + [1 - R^2(x)] \cdot$$

$$\frac{1}{2Z_0(x)} \left( \frac{dZ_0(x)}{dx} \right) = 0 \quad (7)$$

上式为一阶 Riccati 方程, 其精确度的解析值是未

知的, 但  $|R(x)| \ll 1$  时, 文献[6] 中给出了一近似解, 由该解可得出下面的特性阻抗理想变化关系:

$$\ln Z(x) = \frac{1}{2} \ln [Z_0(0) Z_0(X)] + \frac{1}{2} \ln \left[ \frac{Z_0(X)}{Z_0(0)} G\left(B, \frac{2x}{X}\right) \right] \quad (8)$$

此处  $X$  为天线视轴方向的总长度, 函数  $G\left(\frac{2x}{X}\right)$  的定义可参见文献[6]。

## 2 结构分析与设计

### 2.1 结构分析

虽然 TEM 喇叭天线的辐射效率高, 但是其脉冲响应有明显拖尾现象。通常解决这一问题的方法是对 TEM 喇叭天线加载<sup>[7-9]</sup>, 抑制反射, 减小脉冲响应的拖尾。但加载的方式将牺牲天线的辐射效率和增大加工难度。

为了解决上述矛盾, 文中提出了一种不需要加载和增加天线长度而能抑制拖尾的 TEM 喇叭天线设计方案。

脉冲响应拖尾往往是由于 TEM 喇叭出口处电磁波不能充分辐射而被反射所致。为了能使电磁波能量在喇叭出口处充分辐射出去, 对图 1 中所示的 TEM 天线 V 形结构进行了改进, 利用指数变阻线原理, 使天线臂  $l$  按弧形弯曲, 天线起始部分过渡缓慢, 喇叭出口处增加有效面积, 使天线上的功率充分向空间辐射, 减小内部反射, 从而达到消除脉冲拖尾的目的。

### 2.2 仿真

根据上面理论分析所得公式(8), 取天线视轴总长度  $X = 10.0\text{cm}$ , 输入端反射系数  $R(0) \leq 0.1$ , 馈点处特性阻抗为  $50\Omega$ , 出口处特性阻抗约为  $377\Omega$ , 天线臂  $l$  呈弧形弯曲, 天线臂金属板的宽度为  $y$ , 臂间距为  $z$ 。天线臂金属板宽  $y$ , 是根据已知特性阻抗  $Z(x)$  和天线臂之间距离  $z$ , 利用带状线特性阻抗近似公式得到。

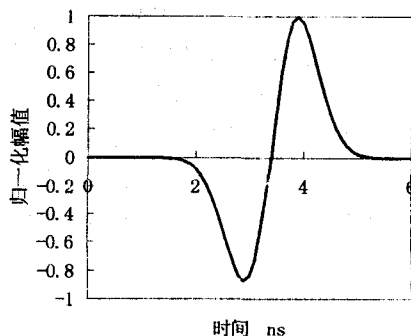


图 2 天线时域响应

利用软件 Ansoft HFSS 进行仿真, 信号源选 2ns 脉宽的高斯脉冲, 通过调整相应的  $z$ 、 $l$ 、 $y$  以及天线臂弯

曲弧度,使天线脉冲响应拖尾最小。仿真结果表明,当 $z$ 、 $l$ 、 $y$ 以及天线臂弯曲弧度选取适当,可以得到理想的脉冲响应拖尾效果,如图2所示。

2.3 尺寸设计

在仿真结果的基础上,结合实验测试,反复调整所设计的喇叭天线,最后选定 TEM 喇叭天线的具体各项参数值如表1所示,实际天线的结构如图3所示,天线结构大为简化,加工方便,这是本设计的独特之处。

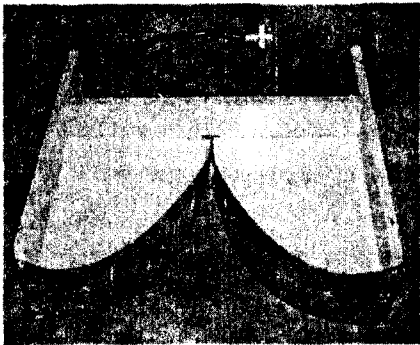


图3 实际天线的结构

表1 天线的相关参数

$x(\text{cm})$	$Z(x)(\Omega)$	$l(\text{mm})$	$z/y$	$z(\text{mm})$	$y(\text{mm})$
0.0	50	0.0	0.165	4.0	24.2
0.5	55	5.0	0.183	4.2	23.2
1.0	60	10.0	0.200	5.0	25.0
1.5	66	15.1	0.232	6.2	27.0
2.0	73	20.1	0.263	8.0	30.4
2.5	80	25.3	0.300	10.4	34.6
3.0	89	30.5	0.350	13.2	38.7
3.5	99	35.8	0.400	16.6	41.6
4.0	110	41.2	0.460	20.6	45.0
4.5	123	46.7	0.540	25.4	47.0
5.0	137	52.4	0.650	30.8	47.5
5.5	153	58.2	0.760	37.0	48.6
6.0	171	64.4	0.920	44.0	47.8
6.5	190	70.8	1.120	52.0	46.4
7.0	211	77.5	1.400	61.2	43.6
7.5	234	84.8	1.800	71.8	39.8
8.0	259	92.7	2.300	84.0	36.6
8.5	285	101.6	2.900	98.6	34.0
9.0	313	112.0	4.100	116.8	28.4
9.5	343	125.3	6.300	141.6	22.4
10.0	376	157.1	13.00	204.0	15.6

3 测试结果

所设计的 TEM 喇叭天线,在时域测试系统中进行了实验研究论证。发射天线的信号为2ns脉宽的高斯脉冲,接收天线为所设计的 TEM 喇叭天线。实验测量得到该天线的时域响应如图4所示,通过快速傅里叶变换,得到其幅度频谱见图5。天线半功率带宽

约为100MHz至600MHz。

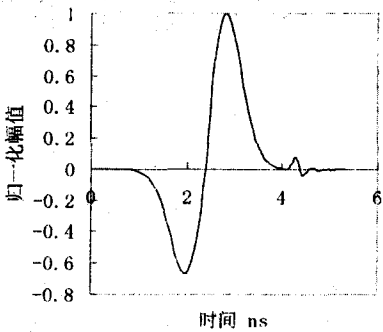


图4 实际天线的接收时域响应

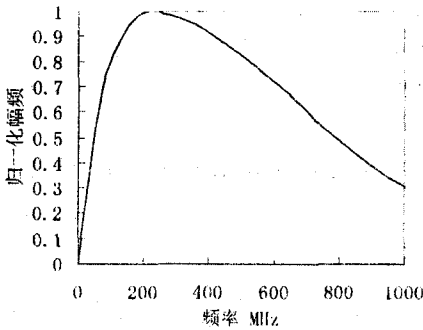


图5 实际天线的幅度频谱

4 结束语

所设计的 TEM 喇叭天线,在不需加载且不增加天线视轴长度的条件下,天线臂选择适当的弯曲弧度,能使脉冲拖尾现象得到很好的抑制,比加载的 TEM 喇叭天线效率高,且结构简单易加工,是一种理想的超宽频带天线。此结构的 TEM 喇叭天线在实际应用中效果良好。

参考文献:

[1] Peters Jr L, Daniels J J, Young J D. Ground penetrating radar as a subsurface environmental sensing tool[J]. Proceedings of the IEEE, 1994, 82(12):1802 - 1822.

[2] Maloney J G, Smith G S, Scott W R. Accurate computation of the radiation from simple antennas using the finite difference time domain method[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1990, 38(7):1059 - 1068.

[3] Scheers B. Time - domain simulation and characteristion of TEM horns using a normalised impulse response [J]. IEE Proc. AP, 2000, 147(6):463 - 468.

[4] Lizuka K. The traveling wave V - antenna and related antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1967, 15:312 - 320.

[5] Sohelkunoff S A, Friis H T. Antennas theory and practice [M]. [s.l.]:Wiley, 1952.

[6] Hecken R B. A near - optimum matching section without dis-

(下转第199页)

是在最佳的高炉煤气平衡模式即高炉煤气充足时利用高炉煤气;而当气源厂检修或高炉煤气不足时,缓冲用户可燃用其它燃料。煤气柜在管网中的作用是补偿因高炉煤气供销波动造成的不平衡,一方面它可以储存系统中的过剩高炉煤气,另一方面当系统中的高炉煤气不足时,为保证生产线的正常运行,将柜中煤气补充到管网中。应建立与高炉煤气管网中小时流量相一致的大容量煤气柜,使其发挥自动削峰填谷的作用。

建立吞吐量较大的高炉煤气缓冲用户和煤气储气柜,对高炉煤气系统供应的不足或过剩有较强的吐纳能力,可以充分有效地利用已有资源,将高炉煤气波动减小到最低限度。

#### 4.3 建立高炉煤气调控中心

煤气调度中心是企业煤气生产、输送、分配和动态调控强有力的机构。煤气调度中心目前已在各钢铁企业普遍推行,并且各厂的调度中心不再是简单地进行全厂煤气消耗和记录的一般煤气调度中心,而是发展成为现代化的能源管理系统。高炉煤气集中控制系统的建立,实现了对检测点进行采样,并通过计算机网络将采集的信息传输到能源管理中心进行集中处理、显示、累计和打印。另外对全厂的高炉煤气用量进行预测,并与煤气的回收情况结合起来进行合理调度和控制,从而有效地利用高炉煤气,减少放散,可以最大限度地节约能源。

煤气调度中心不仅能对全厂各个时期的煤气供需情况加以分析和整理,对全场的煤气调度起到指导作用,而且能在某时段煤气供应出现问题时,依照获得最大效益的原则,分出轻重缓急进行调控。从而保证了高炉煤气的安全生产和合理分配使用。

(1) 用户流量分配原则。高炉煤气的用户较多,主要有高炉、焦炉、轧钢、电厂、燃气轮机、低压锅炉等。根据生产工艺和设备特点,高炉煤气用户分为固定用户和调整用户,固定用户主要是轧钢、高炉等用户。高炉系统消耗量较大,所以在热风炉换向时它的波动对高炉煤气平衡有重要影响,燃气轮机只消耗高炉煤气,低压锅炉具有多种燃料组合模式,调节比较灵活;电厂是最重要的调整用户,吞吐能力约  $0 \sim 80 \text{ 万 m}^3/\text{h}$ ,这给煤气调配创造了极其有利的条件。

(2) 高炉煤气失衡调整。对于热风炉换炉、轧钢

生产节奏变化、轧钢机组故障引起的波动,可以改变电厂使用量、改变低压锅炉的燃料组合模式;对于高炉临时减风或休风引起的煤气大量不足,一般可以减少或停止电厂使用量取得平衡。

(3) 煤气平衡预调整。物流对能耗的影响很大,生产节奏的变动,不仅影响到生产单元的能耗,还可能影响整个煤气系统的平衡。应与生产、炼钢、炼铁、轧钢等调度保持密切联系,主动把握炼钢的吹炼、轧钢的轧制等生产计划,预测其对高炉煤气系统造成的影响。

(4) 燃气—热力—电力综合平衡。在蒸汽发生设备中,有许多可以发电,而且发电量与蒸汽发生量可以相互调节,这给燃料最优配置提供了条件。煤气紧张时,可指令 CDQ 少发电多产蒸汽、电厂产蒸汽来降低低压锅炉的负荷,从而减少其煤气耗量。

## 5 结束语

钢铁企业的煤气平衡是一项复杂的系统工程,企业煤气产量的高低以及煤气供应量与需求量之间的平衡关系,对企业的产品成本和能源消耗影响极大。高炉煤气是钢铁企业重要的副产煤气之一,对高炉煤气用户的消耗量进行预测,有利于高炉煤气的合理分配及优化利用,不仅使企业高炉煤气的供需平衡达到相对良好的状态,而且有利于企业节能降耗,减少污染排放,降低生产成本,提高经济效益。

#### 参考文献:

- [1] 顾洁,王少军.高炉煤气利用的研究[J].冶金能源,2006,25(1):32-34.
- [2] 邓万里,陈伟昌.宝钢高炉煤气系统平衡实践[J].宝钢技术,2003(2):31-33.
- [3] 鹏程.应用系统节能观点做好钢铁企业煤气平衡[J].中国能源,2000(8):37-38.
- [4] 吕佐周.冶金燃气[M].北京:冶金工业出版社,1985:25-26.
- [5] 田景文,高美娟.人工神经网络算法研究及应用[M].北京:北京理工大学出版社,2006:35-39.
- [6] 董长虹.Matlab神经网络与应用[M].北京:国防工业出版社,2005:68-71.
- [7] 黄乐天.梅钢煤气平衡及对策初探[J].宝钢技术,2002(5):55-59.

(上接第195页)

- continuities[J]. IEEE Trans. MTT, 1972, 20: 734-739.
- [7] 刘小龙,汪文秉.恒阻抗 TEM 喇叭辐射特性[J].强激光与粒子束,2003,15(11):88-90.
- [8] 粟毅.探地雷达理论与应用[M].北京:科学出版社,2006:88-89.
- [9] 高飞,刘其中.加载宽带天线分析[J].电子学报,1999,27(16):124-125.