doi:10.3969/j.issn.1001 - 893x.2013.08.019

一种末端加载型 300 MHz/1 GHz 双频车载超宽带 探地雷达天线设计*

郭 晨^{1,***},张安学²,刘 策¹

(1.长安大学 信息工程学院,西安 710064;2.西安交通大学 微波工程与光信息技术研究所,西安 710049)

摘 要:为满足高速铁路无损探测需兼顾低频探测深度与高频探测精度的要求,采用理论计算与软件仿真结合的方法,设计制作了一种双频带(300 MHz/1 GHz)指数型 TEM 喇叭天线并对其进行了测量。所设计的指数型 TEM 喇叭天线采用末端加载和适当天线臂切削来实现此超宽带天线的双频带工作。仿真与实测结果表明,天线分别工作在中心为360 MHz、带宽约为110 MHz的低频带和中心为1020 MHz、带宽约为260 MHz的高频带,相对带宽均大于 20%。实测天线的接收信号保真度较高,拖尾持续时间短,满足设计要求。此外,这种双频带天线系统可减少雷达系统天线和采样盒等设备的使用数量,降低雷达系统的成本,有较好工程应用前景。

关键词:探地雷达天线;路基探测;TEM 喇叭;双频带;末端加载;超宽带

中图分类号:TN82 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2013)08-1069-05

Design of a Loaded Dual-band (300 MHz/1 GHz) Antenna for Vehicular UWB GPR Application

GUO Chen¹, ZHANG An-xue², LIU Ce¹

(1. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Institute of Microwave Engineering and Optical Information Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To meet the demand of nondestructive exploration for high-speed railway, which requires outstanding depth in low frequency and resolution in high frequency, a dual-band (300 MHz and 1 GHz) exponential Transverse Electric and Magnetic (TEM) horn antenna is designed based on theoretical calculation and numerical simulation in this paper. End-loading and arm profiling are utilized in the proposed antenna design for conducting the dual-band performance. Simulation and experiment results show that the antenna works both in 360 MHz and 1 020 MHz with bandwidths of 110 MHz and 260 MHz respectively, which exceeds the ultra-wide band(UWB) requirement of 20% relative bandwidth. The proposed antenna also has the advantages in signal fidelity and low ringing, which fully meets the design requirements. Furthermore, the proposed dual-band UWB antenna system has more potential advantages in engineering application field because of the low cost of the entire radar system. **Key words**: ground penetrating radar (GPR) antenna; railway substructure detection; TEM horn; dual-band; end-loaded; UWB

1 引 言

随着近些年我国铁路建设的快速发展,高速列

车的运行已对铁路路基安全提出了更高的要求,主要体现在对路基隐患的检测需要做到更为快捷和高

 ^{*} 收稿日期:2013-04-15;修回日期:2013-06-24 Received date:2013-04-15;Revised date:2013-06-24
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277012);中央高校基本科研业务项目(CHD2011JC049,CHD2011ZD004)
Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(No.51277012); Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (CHD2011JC049, CHD2011ZD004)

^{**} 通讯作者:chenguo@chd.edu.cn Corresponding author:chenguo@chd.edu.cn

效^[1-2]。目前,国内外铁路探地雷达测试主要用于 道碴厚度(土与道碴界面)和道碴污染程度的测 试^[3-4],使用的天线频率相对较高,探测深度较浅。 而由于高速铁路对3 m左右深度铁路路基的应力性 变化更为关注,火车运行负荷对这一深度处路基的 影响也较大,因此需要研究出兼顾较大探测深度和 较高精度的高速铁路用探地雷达天线。此外,考虑 到近年来超宽带技术及探地雷达天线的发展现状, 对应用于高速铁路的探地雷达天线主要有以下几个 问题迫切需要解决[4-7]:一是提高超宽带雷达脉冲 信号的接收保真度,以保证高速测量时的精确性;二 是当雷达天线与铁道基石和路枕近距离非接触并伴 随振动时保证较好的空气耦合性及稳定性;三是使 雷达天线兼具有高低频段同时工作的能力,保证探 测深度的同时达到高精度;四是实现小型化、轻型化 以及低成本化,以适应机车空间、运行环境等客观因 素限制。

2 双频带指数型 TEM 喇叭天线设计

针对上述要求,考虑到 TEM 喇叭天线属于空气 耦合天线,具有较好的方向性、较宽的带宽及辐射相 位中心的不变性、可获得较好信号保真度,故选择 TEM 喇叭型天线为设计天线^[8-9]。此外,考虑到目 前商用探地雷达天线基本上都是单频段工作,要探 测不同的深度需要换不同的天线,使得整个系统中 天线及采样盒个数较多,测量时需要切换,较为不 便,且成本较高。本文在平板式 TEM 喇叭天线的基 础上,设计了一种双频带(300 MHz和1 GHz)指数型 TEM 喇叭天线。

2.1 指数型天线臂设计

一般 TEM 喇叭结构包括同轴线与平行金属板 转换结构以及金属板拓展成的喇叭两个部分,喇叭 末端形成辐射口径。在分析 TEM 喇叭天线时,无论 是馈电端口,还是辐射区经过在主轴方向进行 N 段 剖分后的每一小单元,都可以近似为平行平板波导 结构,通过平行平板结构的阻抗分析来讨论天线的 输入阻抗,反射系数等参数的计算^[8]。

假设天线在截面 z 处的瞬态特性阻抗为 Z(z), 考虑到时谐场下反射系数的计算方法,瞬态场下反 射系数计算近似认为

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

式中, $Z(z + \Delta z)$ 为波到达段的特性阻抗,当信号很 窄时 Δz 比较小,这时可以得到

$$\frac{2\Gamma(z)}{\Delta z} = \frac{\mathrm{d}\,\ln Z}{\mathrm{d}z} \tag{2}$$

 Δz 是一很小的定值,如果要求 $\Gamma(z)$ 等于常数 C,可推导出

$$Z(z) = e^{\frac{2\Gamma(z)}{\Delta z^2}z}$$
(3)

从公式(3)可以看出,当天线上每段小单元的特 性阻抗按指数规律变化时,才能获得恒定的 TEM 喇 叭天线反射系数,因此天线主辐射区采用指数型喇 叭设计可减少天线臂反射,使天线在较小的外形尺 寸下实现阻抗的较好匹配并提高低频辐射能力,从 而提高辐射波形的保真度。

2.2 双频带天线臂切削及末端加载设计

本文所设计的双频带指数型 TEM 喇叭天线由 平行平板端口、指数渐变加一定切削的主辐射区,以 及直板加载的末端三部分组成。通过末端加载和一 定的天线臂切削来实现天线工作在两个高低不同的 超宽带频带上^[10]。末端加载主要对低频带宽起作 用;特定的天线臂切削,主要与末端加载同时作用, 使天线工作于特定的高低双频带上。所设计天线的 后向低频加载采用为直板加载,相较于其他弧形或 指数性加载方式而言,结构简单,易于制作。同时直 板加载相当于增大了前向辐射口面,因而可提高天 线效率。天线的外围尺寸为125 mm × 76 mm × 300 mm,其具体结构设计如下:天线在 *XOZ* 面变化 遵循的指数变化曲线为 ± Z = 3. 2e^{0.03x} – 2. 2,辐射 末端直板加载 c = 55 mm,天线臂宽展角为 β = 18°, 结构如图 1 所示。



Fig.1 Antenna structure

· 1070 ·

3 数值仿真

为验证所设计双频带喇叭天线的辐射有效性, 并进一步优化其结构参数,利用仿真软件对其进行 建模计算。仿真所采用归一化激励脉冲如图 2 所 示。考虑到所设计天线工作频段需覆盖300 MHz及 1 GHz,选用激励信号的带宽范围是 0~2 000 MHz。 理想边界条件下的单元天线单端口回波损耗 S₁₁如 图 3 所示,可以看出,天线低频中心为348 MHz, S₁₁ 约 为 - 27 dB;高频中心为1048 MHz, S₁₁ 约 为 - 40 dB,均低于工程要求的 - 10 dB,满足天线双频 带工作要求。此时低频工作带宽约为130 MHz,高 频工作带宽约为350 MHz,也均达到了相对带宽超过 20%的超宽带天线要求。



Fig. 2 Excitation signal of Gaussian impulse



Fig.3 Simulated return loss

4 实物天线的测量

按照仿真天线的最佳数据制作的一对实物天线 如图 4 所示。金属板材为铁皮(传导率为 3.57 × 10⁷ s/m),使用 SMA 接头馈电,馈电端为15 mm × 2 mm 的平行平板,长为10 mm,天线高为300 mm,宽为 76 mm,主辐射方向长为125 mm。



图 4 一对实物天线 Fig.4 Antenna prototype

4.1 实测回波损耗 S₁₁参数

采用 Agilent E8363B 测试天线的 S₁₁曲线如图 5 所示。实测 S₁₁参数表明,天线有两个工作频带,分 别是工作在中心为360 MHz、带宽约为110 MHz的低 频带和工作在中心为1 020 MHz、带宽约为260 MHz 的高频带。两个工作频带均达到了超宽带天线的 要求。



图 5 实测 S_{11} (回波损耗) Fig.5 Measured S_{11} (return loss)

4.2 实测信号波形

作为探地雷达收发天线,需对天线系统的收发 特性进行测试。天线测量选用空旷场地,两测试天 线一发一收,天线口面相距1500 mm,距地面 500 mm。

(1)1 GHz 源馈电时信号波形

采用3 GHz Tektronix TDS 694C 示波器测量天线 辐射信号的时域波形如图 6 所示,发射天线与1 GHz 信号源相连接,可以看出天线在1 GHz脉冲信号激励 下,辐射及接收信号呈现较理想 W 波形,保真度较







(2)300 MHz 源馈电时信号波形

发射天线与300 MHz信号源相连接时,采用普源 300 MHz示波器测量天线辐射信号波形如图 7 所示, 可以看出低频信号源激励时,信号的保真度相对高频 激励时略有降低,有小幅度拖尾,但辐射波形的 W 形 特征明显,达到探地雷达天线时域辐射波形要求。



图 7 300 MHz 源的实测信号波形 Fig.7 Measured waveform(300 MHz source)

5 结 论

本文针对高速铁路探地雷达天线设计的应用要 求,设计制作了一种末端加载型双频带指数 TEM 喇 叭天线。这种双频带指数型 TEM 喇叭天线兼顾低 频探深与高频探精需求,分别工作于300 MHz和 1 GHz频段。相对平板式 TEM 喇叭天线,其体积较 小,结构简单,可节省探地雷达系统成本,具有工程 应用价值。仿真和实测表明,所设的双频带指数型 TEM 喇叭天线实现了300 MHz和1 GHz双频带工作的 要求,实测与仿真回波损耗曲线吻合较好,实测低、 高频段相对带宽分别达到 30%和 25%,满足超宽带 天线设计需求;从天线时域辐射信号波形看,无论是 用1 GHz源还是用300 MHz源,辐射波形特征良好,拖 尾持续时间较短,达到了雷达时域信号保真度要求。 300 MHz激励源测量时,信号的拖尾幅度相对较大, 在不排除由于300 MHz示波器带宽相对较小这一因 素的同时,表明此设计天线的低频特性与高频特性 相比,还有进一步加强的空间。

参考文献:

- Bai Ming-zhou, Xie Jin-shui, Zhang Ai-jun, et al. Ground penetrating radar nondestructive testing of karst grouting performance in high-speed railway subgrade engineering [J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(7):89 – 95.
- [2] Liu Jie, Cheng Yuanshui. A new approach of detecting and evaluation railway by using the train-mounted ground penetrating radar in China [C]//Proceedings of 2011 International Conference on Civil Engineering, Architecture and Building Materials. [S.1.]:IEEE,2011:243 – 249,4351 – 4355.
- [3] Fernandes E M, Pereira M, Gomes C A, et al. Assessment of layer thickness and uniformity in railway embankments with ground penetrating radar[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Transportation Geotechnics. Nottinghan, UK: IEEE, 2008:571 – 575.
- [4] Andreas L, Christina P. Ground penetrating radar: A smart sensor for the evaluation of the railway trackbed [C]//Proceedings of 2007 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Warsaw, Poland: IEEE, 2007:1-6.
- [5] Li Lin, Tan A E C, Jhamb K, et al. Buried Object Characterization Using Ultra-Wideband Ground Penetrating Radar[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012,60(8):2654 – 2664.
- [6] Hertl I, Stryek M. UWB Antennas for Ground Penetrating Radar Application [C]//Proceedings of the 19th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications. Dubrovnik: IEEE, 2007: 1-4.
- [7] Jenks H, Pennock S R, Redfern M A, et al. Novel loop and dipole based UWB antennas for GPR and communication applications [C]//Proceedings of 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation. Prague, Czech Republic: IEEE, 2012;2832 – 2836.
- [8] Lee R T, Smith G. On the Characteristic Impedance of the TEM Horn Antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004,52(1):315 – 318.
- [9] Turk A S, Keskin A K. Ultra wide band TEM horn antenna designs for ground penetrating impulse radar [C]//Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Ultra-Wideband. Syracuse, NY, USA: IEEE, 2012:87 – 91.
- [10] Diot J C. A Novel Antenna for Transient Applications in the Frequency Band 300 MHz – 3 GHz: The Valentine Antenna
 [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007,55(3):987 – 990.

· 1072 ·

作者简介:



郭 晨(1984—),女,江苏南京人,分别 于 2004、2010 年获西安交通大学信息工程专 业学士学位、电磁场与微波技术专业博士学 位,美国休斯敦大学传感与测井实验室访问 学者,目前为长安大学电子信息工程学院博 士后讲师,《IEEE Geoscience Remote Sensing》、 《电子与信息学报》等刊物审稿人,主要研究

方向为超宽带天线设计、探地雷达技术、基于电磁方法的无 损检测技术等;

GUO Chen was born in Nanjing, Jiangsu Province, in 1984. She received the B.S. degree and the Ph.D. degree from the Xi'an Jiaotong University in 2004 and 2010, respectively. She is now a lecturer. Her research concerns non-destructive detection, UWB GPR, and EM theory.

Email: chenguo@chd.edu.cn

张安学(1972一),男,河南安阳人,2003 年获西安交通大 学电磁场与微波技术专业博士学位,现为西安交通大学教 授,2008 年 4 月至 2009 年 8 月应邀到美国 Auburn 大学做访 问学者,《IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation》、《电波 科学学报》、《电子与信息学报》等刊物审稿人,《电波科学学 报》编委,主要研究方向为通信及雷达系统中的射频微波器件、天线与电路设计、超宽带雷达信号处理、超材料理论及其应用等;

ZHANG An-xue was born in Anyang, Henan Province, in 1972. He received the Ph. D. degree in Electromagnetics & Microwave Technology from Xi' an Jiaotong University in 2003. He is now a professor. His research concerns RF devices in communication and radar system, antenna and circuit design, UWB radar signal processing, and meta-material.

刘 策(1959—),男,新疆维吾尔自治区人,1985年于西 安交通大学获电磁场与电磁波专业博士学位,现为美国休斯 敦大学终身教授、长安大学信息工程学院教授、美国科学院 辐射源专家委员会成员、国际电子电气工程师协会(IEEE)高 级会员、环境与地球物理工程协会(EEGS)会员。

LIU Ce was born in Xinjiang Uygur Autonomous Region, in 1959. He received the Ph. D. degree in Electromagnetics & Microwave Technology from Xi' an Jiaotong University in 1985. He is currently working in University of Houston, US and Chang' an University, China as a professor. His research concerns EM theory and devices, radar system, Well logging and dielectric materials.