

基于电阻加载技术的超宽带天线系统设计与实验

李雪萍, 王立, 甘利萍, 闫静

(河南师范大学 电子与电气工程学院; 河南省高校电磁波特征信息探测重点学科开放实验室, 河南 新乡 453007)

摘要: 针对安装在探测车尾部的超宽带天线的需求, 研制了一种基于电阻加载技术的超宽带天线系统. 该天线系统由两个完全相同的电阻加载单极子天线组成, 其中一个天线用于发射信号, 另一个用于接收信号. 采用时域有限差分方法对整个收发天线系统的电性能进行了仿真模拟, 并制作了一套收发天线样机, 安装在探测车上, 在电波暗室中进行了测试. 分析研究了介质的电特性参数对雷达系统探测能力的影响, 并对冰川进行了探测试验. 测试与仿真模拟结果表明: 该天线具有较低的电压驻波比和良好的辐射特性以及较小的拖尾, 可以满足超宽带雷达的实际工程应用要求.

关键词: 超宽带; 单极子天线; 电阻加载; 时域特性

中图分类号: TN957.2

文献标志码: A

基于无载波脉冲体制的超宽带探测雷达由于其高分辨率、强穿透能力、非破坏性以及快速成像的特点, 近年来受到国内外广大科研人员和工程部门的青睐^[1]. 而在月球与火星等深空探测中, 基于无载波脉冲体制的超宽带探测雷达被认为是最有前景的工具之一, 已在月球探测中得到了广泛的应用^[2].

天线作为超宽带探测雷达中重要的部件在近几年得到广泛关注, 其中普遍采用的超宽带天线形式有偶极子天线及其变形^[3-6]、Vivaldi 天线^[7]、TEM 喇叭天线^[8-9]和小型 TSA 天线^[10-11]. 偶极子天线因结构简单、时域辐射特性好近年来被广泛研究. 而在所有外太空星体的地质地貌与矿物组成探测研究中, 雷达均安置于一个载体上. 一般来说, 当天线安装于复杂的载体时, 由于天线与载体之间的电磁耦合, 天线原来的电磁特性可能会发生很大的改变, 在分析其电磁特性时需要将天线及其载体所构成的“天线系统”作为一个整体来考虑, 因此在分析放置于外太空星体的超宽带雷达探测能力时必须充分考虑整个天线系统的辐射与接收能力. 对于米波段偶极子天线而言^[12-13], 天线非常大, 难以在探测车上安装. 考虑到安装环境的限制, 为了减小天线的体积, 本文提出一种基于电阻加载技术的超宽带天线系统. 该天线系统由两个完全相同的单极子天线组成. 为了抑制辐射脉冲拖尾, 在天线臂上通过 Wu-king 方式的离散电阻加载, 采用时域有限差分方法对整个系统的电性能进行了仿真计算. 根据仿真设计结果制作了一套收发天线样机, 并安装在探测车上, 在电波暗室中进行了测试. 分析研究了介质的电特性参数对雷达系统探测能力的影响, 并对冰川进行了外场探测试验.

1 天线系统

本文设计的天线安装在一尺寸为 1.2 m×0.8 m×0.87 m 的探测车上, 要求探测深度能达到 100 m. 发射机能提供的最大脉冲电压幅度为 1000 V, 且探测环境为类冰环境. 在工程应用中需要满足以下几个条件: 1) 确保天线的辐射特性; 2) 尽量减小天线结构对探测车移动过程中跨越障碍物能力的影响; 3) 尽量减小天线的体积. 综合考虑上述条件, 基于电阻加载技术的超宽带天线系统由两个完全相同的单极子天线组成,

收稿日期: 2016-06-12; 修回日期: 2016-12-15.

基金项目: 国家自然科学基金(61172017); 河南省科技攻关计划项目(162102210266); 河南师范大学博士科研启动基金(5101029170276).

作者简介(通信作者): 李雪萍(1985-), 女, 河南焦作人, 河南师范大学副教授, 博士, 从事电磁场数值仿真计算、超宽带天线理论及应用研究, E-mail: lxpslxhhw@126.com.

其中心频率为 80 MHz,长度取 1/4 波长,半径为 6 mm,且天线与地面的夹角为 16° ,如图 1 所示.每个天线上各开有 7 条缝隙并通过加载电阻相连接,可以有效减小天线末端反射,其阻值可以通过 Wu-king 加载公式计算得出^[14],具体如下:

$$R^i(z/L) = \frac{\zeta_0 \phi_0}{2\pi L(1 - \frac{z}{L})}, \quad (1)$$

其中, R^i 是第 i 个加载电阻的电阻值,它是相对距离 z/L 的函数; L 是天线臂单元的总长度; z 是以馈电点处作为原点情况下加载电阻的位置; $\zeta_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 120\pi \Omega$ 是自由空间波数; ϕ_0 是一个无量纲量,可以通过计算天线上电流的分布得到,在文献[14]中有详细讨论.经过计算,从馈电端开始电阻阻值分别为 26.9、31.1、37.4、46.7、62.1、93.4、186.8 Ω ,考虑到电阻分布表的实际情况,在取值时只选取了整数部分.

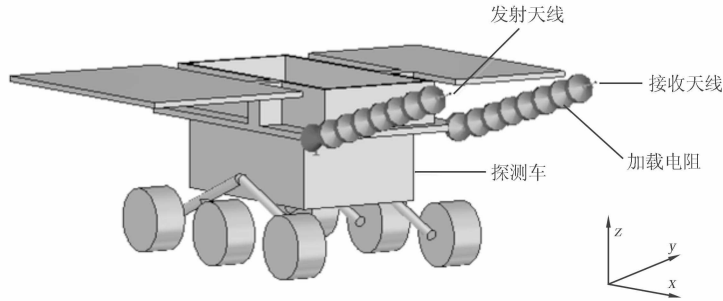


图1 基于电阻加载技术的超宽带天线系统示意图

2 仿真设计方法

自 1966 年 K. S. Yee 提出时域有限差分 (FDTD) 至今,FDTD 已经形成了一套完整的计算方法,并与矩量法、有限元法一起构成了计算电磁学的基础.此方法在计算中将空间某一样本点电场(或磁场)与周围格点的磁场(或电场)直接相关联,且介质参数已赋值给空间每一个细胞,因此可以处理复杂形状目标和非均匀介质的电磁散射、辐射等问题,同时可以清晰地显示电磁场变化的物理过程,便于分析和设计^[15].麦克斯韦方程经过离散后, E_z 、 H_z 分别为^[16]:

$$E_z^{n+1}(i, j, k) = \frac{\epsilon_z(i, j, k) - 0.5\Delta t\sigma_z(i, j, k)}{\epsilon_z(i, j, k) + 0.5\Delta t\sigma_z(i, j, k)} E_z^n(i, j, k) + \frac{N}{\epsilon_z(i, j, k) + 0.5\Delta t\sigma_z(i, j, k)} \times \left[\frac{H_y^{n+1/2}(i+1, j, k) - H_y^{n+1/2}(i, j, k)}{\Delta x(i)} - \frac{H_x^{n+1/2}(i, j+1, k) - H_x^{n+1/2}(i, j, k)}{\Delta y(j)} \right], \quad (2)$$

$$H_z^{n+1/2}(i, j, k) = H_z^{n-1/2}(i, j, k) + \frac{\Delta t}{\mu_z(i, j, k)} \times \left[\frac{E_x^n(i, j+1, k) - E_x^n(i, j, k)}{\Delta y(j)} - \frac{E_y^n(i+1, j, k) - E_y^n(i, j, k)}{\Delta x(j)} \right], \quad (3)$$

式中, Δx 、 Δy 、 Δz 分别表示直角坐标系下 3 个坐标轴方向上的网格单元(空间离散值).为了保证离散后差分方程的解收敛和稳定,时间步进 Δt 需满足 Courant 条件:

$$\Delta t \leq c^{-1}((\Delta x)^{-2} + (\Delta y)^{-2} + (\Delta z)^{-2})^{-\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

由于计算机内存和计算速度的限制,时域有限差分方法的计算只能在有限区域进行,为了能够模拟开域电磁过程,在计算区域的截断边界处必须给出吸收边界条件,仿真设计方法中选用的吸收边界为完全匹配层(PML).

本文设计的基于电阻加载技术的超宽带天线系统与地面夹角为 16° ,且缝隙之间通过加载电阻连接,若用传统的时域有限差分方法进行模拟,受直角坐标系下矩形网格的限制,在网格选取上除非使用很小的网格,否则将会产生严重的计算误差,但是网格数目的增加则需要更多的内存和计算时间,考虑到该超宽带天线系统的尺寸以及安装的位置,此做法也不可取.为了解决上述问题,天线模拟过程中网格的剖分采用了共

形网格技术,这样既保证了计算的精确度,同时又不会要求减小时间步长.计算过程中网格剖分尺寸为 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.05 \text{ m}$, $\Delta t = 117.932\ 719 \text{ ns}$.其电场节点的递推过程与传统时域有限差分方法相同,磁场节点则需要特殊处理.经过递推后,磁场递推表达式如下^[17]:

$$H_z^{n+1/2}(i,j,k) = H_z^{n-1/2}(i,j,k) + \frac{\Delta t}{\mu_z(i,j,k)} \times \left[\begin{array}{c} \frac{E_x^n(i,j+1,k)\Delta x(i,j+1,k) - E_x^n(i,j,k)\Delta x(i,j,k)}{\Delta y_0(j)\Delta x_0(i)} \\ - \frac{E_y^n(i+1,j,k)\Delta y(i+1,j,k) - E_y^n(i,j,k)\Delta y(i,j,k)}{\Delta x_0(i)\Delta y_0(j)} \end{array} \right].$$

3 天线系统特性和分析

采用时域有限差分方法对超宽带天线系统(如图 1 所示)的电性能进行了仿真计算,以确定天线的体积和加载值的最优参数;然后依据设计结果制作了一套收发天线样机,并安装在探测车上,在电波暗室中对整个系统进行了测试,最后分析研究了介质的电特性参数对雷达系统探测能力的影响,并对冰川进行了外场探测试验.

图 2 给出了整个天线系统在电波暗室中的测试状态.天线系统的电压驻波比是天线电性能的一个重要参数.它体现了天线输入端口的阻抗匹配特性.驻波系数越低表明天线输入端口的匹配效果越好,即天线具有稳定的特性阻抗和较小的反射系数.图 3 给出了基于电阻加载技术的超宽带天线系统在通频带内仿真和测试的端口驻波,可以看到在整个频带范围内天线都具有较好的驻波特性和匹配特性,能够适应工作环境需要,且仿真结果和测量结果具有良好的一致性.

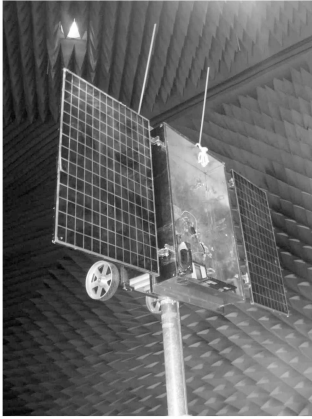


图2 整个天线系统的测试状态

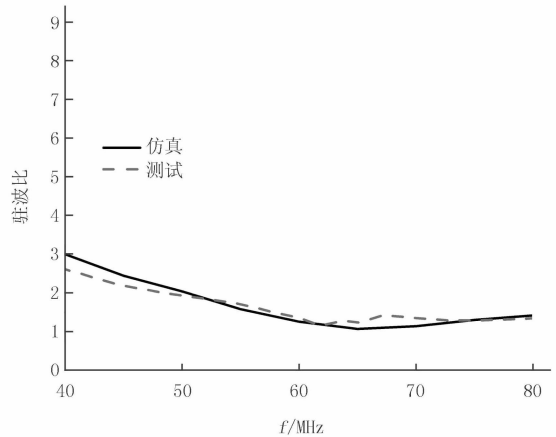


图3 基于电阻加载技术的超宽带天线系统电压驻波比

图 4 给出了从 40 MHz 到 80 MHz 仿真和测量的归一化的 E-面方向图.从仿真和测试的对比结果可以看到两者在主辐射方向上具有很好的一致性,并且在整个频带范围内没有出现主瓣分裂的现象,而主辐射方向和地面之间存在有一定的夹角,这是由天线与探测车之间的角度引起.

根据实际工程任务和科学探测目标,整个车载系统的探测距离要不小于 100 m,发射机能提供的最大脉冲电压幅度为 1000 V,而系统能探测到的最小信号约为 $42 \mu\text{V}$,且探测环境为类冰环境,在需要测量的频率范围内,其相对介电常数从 2 到 8 变化,损耗因子从 0.005 到 0.030 变化^[18-19].为了检验整个天线系统的有效性,对系统进行了建模和计算.该物理模型由 4 层介质组成,其中,第 1 层为自由空间,第 2 层为土壤层,相对介电常数为 ϵ_1 ,损耗因子为 $\tan \delta_1$,深度为 $R_1 = 30 \text{ m}$,第 3 层为岩石层,相对介电常数为 ϵ_2 ,损耗因子为 $\tan \delta_2$, $R_2 = 50 \text{ m}$,第 4 层为深层岩石层,相对介电常数 ϵ_3 ,损耗因子 $\tan \delta_3 = 0.030$, $R_3 = 40 \text{ m}$.图 5 和图 6 分别给出了土壤层介电常数和损耗因子不同情况下天线接收到的回波信号,其中岩石层损耗因子为 0.016,介电常数为 5.由图 5 和图 6 可知:1)当土壤层损耗因子为 0.009,介电常数分别为 2 和 4 时,回波信号中由土壤层、岩石层和深层岩石层引起的电压值分别为 0.510 V、0.128 V、0.007 V 和 0.92 V、0.032 6 V、0.005 5 V,土壤层介电常数的增加使得其表面引起的散射回波增强,而岩石层和深层岩石层表面引起的散

射回波处于减弱状态. 2) 当土壤层介电常数 2, 损耗因子分别为 0.005 和 0.009 时, 回波信号中由土壤层、岩石层和深层岩石层引起的电压值分别为 0.510 V、0.1556 V、0.009 V 和 0.510 V、0.128 V、0.007 V, 土壤层损耗因子的增加并没有导致其表面引起的散射回波变化, 但岩石层和深层岩石层表面的散射回波减弱. 图 7 和图 8 分别给出了岩石层介电常数和损耗因子不同情况下天线接收到的回波信号, 其中土壤层损耗因子为 0.009, 介电常数为 2. 由图 7 和图 8 可知: 1) 当岩石层损耗因子为 0.016, 介电常数分别为 5 和 7 时, 回波信号中由土壤层、岩石层和深层岩石层引起的电压值分别为 0.510 V、0.128 V、0.007 V 和 0.510 V、0.168 V、0.002 V, 岩石层介电常数的增加导致了其表面的散射回波强度增强, 而深层岩石表面的散射回波减弱; 2) 当岩石层介电常数 5, 损耗因子分别为 0.016 和 0.025 时, 回波信号中由土壤层、岩石层和深层岩石层引起的电压值分别为 0.510 V、0.128 V、0.007 V 和 0.510 V、0.128 V、0.001 9 V, 岩石层损耗因子的增加仅仅导致深层岩石层表面的散射回波强度减弱. 所有这些数值的变化趋势与先前的数值计算相吻合^[20]. 在工程任务要求的探测范围内, 这些电压值均大于系统可探测到的最小值, 因此雷达系统可以检测到这些信号, 满足承担探测任务的要求.

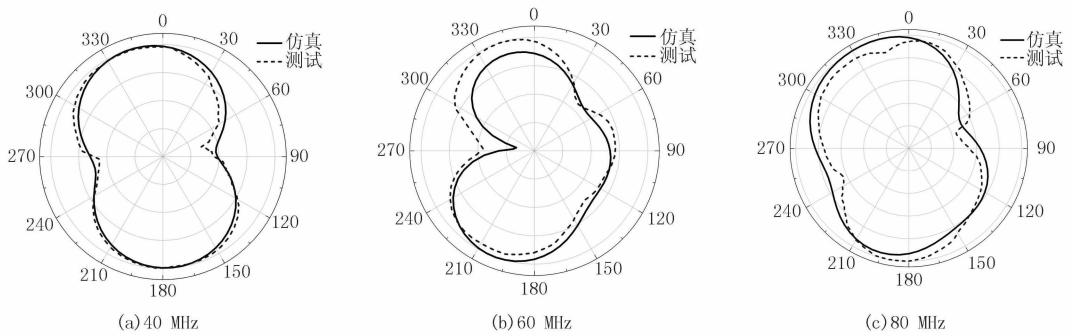


图4 从40 MHz到80 MHz上归一化天线系统的E面方向图

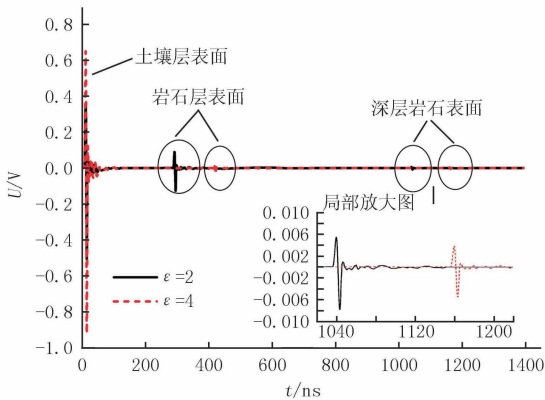


图5 土壤层介电常数不同情况下天线接收到的回波

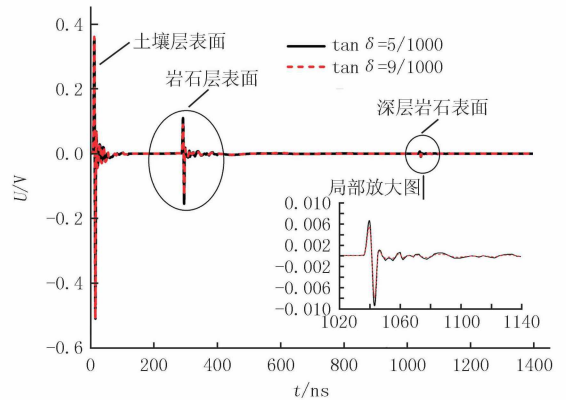


图6 土壤层损耗因子不同情况下天线接收到的回波

为了验证整个天线系统的辐射与接收特性, 将制作的天线安装在探测车上, 在与实际工程应用环境特性相似的冰川进行了实验, 测试得到了冰川内部的剖面图, 如图 9 所示. 可以清晰观测到冰川内部的分层结构, 包括冰层、冰石混合层以及基岩层, 并且探测结果与实际地形地貌相吻合. 这表明天线具有良好的辐射特性. 由于月球地质结构的类冰特性, 介电常数低, 损耗比较小, 根据已有的月壤资料显示该天线特性在优先满足工程要求与实现良好时域辐射特性的条件下能够达到指定的探测目的.

4 结论

针对实际工程应用中安装在探测车上的超宽带雷达的需求, 本文设计了一种基于电阻加载技术的超宽带天线系统, 该天线系统由两个完全相同的单极子天线组成, 并通过 Wu-king 加载技术, 在天线臂上采用离

散电阻加载,利用时域有限差分方法对整个系统的电性能进行了仿真计算,根据研究结果制作了一套天线系统样机并安装在探测车上,在电波暗室中进行了测试,分析研究了介质的电特性参数对雷达系统探测能力的影响,并在冰川进行了外场探测试验.模拟和实际测量结果表明,该天线系统可以满足超宽带雷达的实际工程应用要求.

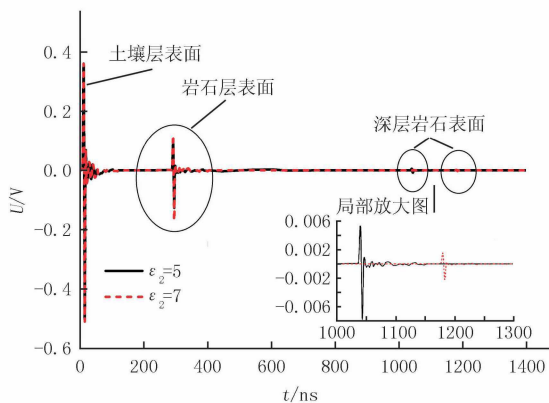


图7 岩石层介电常数不同情况下天线接收到的回波

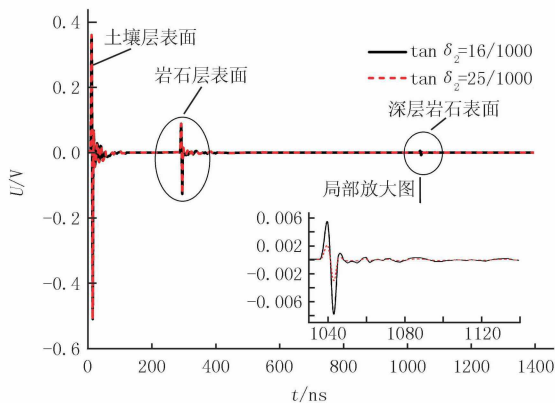


图8 岩石层损耗因子不同情况下天线接收到的回波

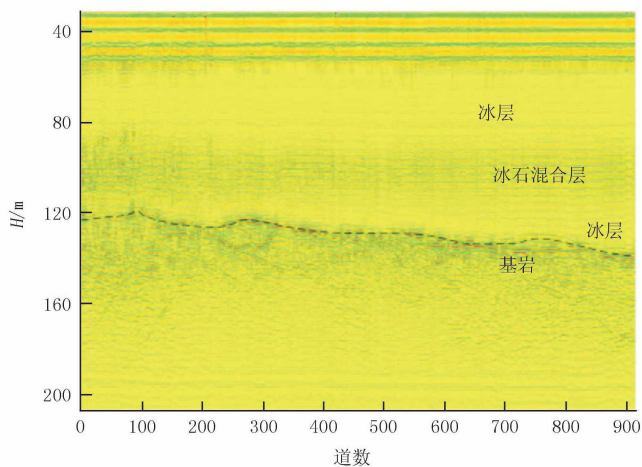


图9 冰川内部分层结构剖面图

参 考 文 献

- [1] Fontana R J. Recent System Application of Short-Pulse Ultra Wideband (UWB) Technology[J]. IEEE Transaction on Microwave of Theory and Techniques, 2004, 52(9):2087-2104.
- [2] Kobayashi T, Lee S R, Ping J S. Kaguya Lunar Radar Sounder Observation of Sinus Iridum[C]//Proceeding of the 14th International Conference on Ground Penetrating Radar. Piscataway:IEEE,2012: 919-922.
- [3] Gong B, Li J L, Zheng Q R, et al. A compact inductively loaded monopole antenna for future UWB applications[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2013, 139: 265 - 275.
- [4] Shao J J, Fang G Y, Ji Y C, et al. Semicircular Slot-Tuned Planar Half-Ellipse Antenna With a Shallow Vee-Cavity in Vital Sign Detection[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7: 767-774.
- [5] Xu L N, Li L, Zhang W M. Study and Design of Broadband Bow-tie Slot Antenna Fed With Asymmetric CPW[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2015,63(2):760-765.
- [6] Tien W M, Lin C M. Multibroadband Slotted Bow-Tie Monopole Antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,2015, 14:887-890.
- [7] Wang Z, Yin Y, Wu J, et al. A Miniaturized CPW-Fed Antipodal Vivaldi Antenna with Enhanced Radiation Performance for Wideband Applications[J]. IEEE Antennas and wireless Propagation letters, 2016, 15: 16-19.
- [8] Bobreshov A M, Meshcheryakov I I, Uskov G I. Optimization of the Flare Angle of a TEM Horn for Efficient Radiation of Ultrashort

- Pulses[J]. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2012, 57(3):291-295.
- [9] Shao J J, Fang G Y, Fan J J, et al. TEM Horn Antenna Loaded With Absorbing Material for GPR Applications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014,13: 523-527.
- [10] Lee D H, Yang H Y, Cho Y K. Ultra-wideband tapered slot antenna with dual band-notched characteristics[J]. *IET Microwave Antennas & Propagation*, 2014, 8(1): 29-38.
- [11] Khalichi B, Nikmehr S, Pourziad A, et al. Designing Wideband Tapered-Slot Antennas[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2015, 57(3): 60 - 70.
- [12] Unal I, Turetken B, Canbay C. Spherical Conformal Bow-Tie Antenna for Ultra-Wide Band Microwave Imaging of Breast Cancer Tumor [J]. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 2014, 29(2): 124-133.
- [13] Jang E S, Kim K, Park J, et al. A selective robust SRR providing notched band in conical monopole UWB antenna[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2016, 58(2): 332-337.
- [14] Wu T T, King R W P. The cylindrical antenna with nonreflecting resistive loading[J]. *IEEE Transaction on Antennas Propagation*, 1965,13(5): 369-373.
- [15] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011.
- [16] Yu W H, Mittra R. A Conformal FDTD Software Package Modeling Antennas and Microstrip Circuit Components[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2000, 42(5):28-34.
- [17] Zohouri B A, Hadi M F. Conformal modelling of perfect conductors in the high-order M24 finite-difference time-domain algorithm[J]. *IET Microwave Antenna & Propagation*, 2010, 5(5):583-587.
- [18] Shkuratov Y G, Bondarenko N V. Regolith Layer Thickness Mapping of the Moon by Radar and Optical Data[J]. *Icarus*, 2001, 149(2): 329-338.
- [19] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005.
- [20] 李雪萍, 纪奕才, 卢伟, 等. 车载探地雷达信号在分层介质中的散射特性[J]. *物理学报*, 2014, 63(4): 044201.

Optimization and Experiment of UWB Resistor-Loaded Monopole Antenna System

Li Xueping, Wang Li, Gan Liping, Yan Jing

(College of Electronic and Electrical Engineering; Henan Key Discipline Open Laboratory of Electromagnetic Wave Detecting, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: An ultra-wideband resistor-loaded monopole antenna for the vehicle-mounted Ground Penetrating Radar(GPR) is designed. The antenna system includes two identical monopole antennas; One is used for transmission, and the other is for reception. The electrical characteristics of the antenna system are analyzed and designed by Finite-Difference Time-Domain (FDTD) Method, and the antenna prototype is manufactured and measured in an anechoic chamber. Then the effects of the electrical characteristics of the layer on the radar detection ability of the system are studied. Finally the system is tested in the Glacier. It is concluded that the antenna system has good time domain characteristics and small late-time ringing by comparing the simulated results with measured results, which is suitable for the needs of the radar system.

Keywords: ultra-wideband; monopole antenna; resistive loading; time domain characteristics

[责任编辑 杨浦]