

• 学术论文与技术报告 •

时域背腔式领结天线的工程化设计

周 游, 潘 锦, 聂在平

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】通过分析时域脉冲辐射信号的频谱, 确定了天线的工作频率和带宽, 并根据在探地雷达应用中满足信号最大能量对地辐射的要求, 提出了一种快速有效的时域背腔式领结天线的设计方法, 该方法简便实用, 便于在探地雷达系统的整体工程化设计中使用。所提出建立的方法得到了实验和数值仿真结果的验证, 并在探地雷达整机的开发和设计中得到了成功应用。

关键词 探地雷达; 天线设计; 瞬态脉冲信号; 背腔天线

中图分类号 TN82 文献标识码 A

Engineering Design of the Transient Back-Cavity Bowtie Antenna

ZHOU You PAN Jin NIE Zai-ping

(School of Electronic Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract An effective method is proposed for the design of the transient back-cavity bowtie antenna for ground-penetrating radar(GPR)applications, which is based on the demand that the maximum energy of the transient signal ought to be emitted downward to the earth in GPR. In the process of the design the frequency band of the antenna is first determined by analyzing the frequency spectrum of the transient pulse to be radiated, and then the structure sizes of both the antenna and back cavity can hereby be found easily with the presented method. The proposed method for the antenna design, having great facility in the engineering applications, has been validated by experiments and numerical simulation results. Otherwise, a GPR system, based on such-designed antenna with good performance in the buried-object detections, was developed with success.

Key words GPR; antenna design; transient pulse signal; cavity antenna

探地雷达中除要求收发天线要有良好的对地辐射性能外, 还要求天线具有极大的瞬时带宽, 这给时域探地雷达的天线设计提出了很大挑战, 并使其成为探地雷达中最重要的关键技术。目前, 用于窄脉冲信号辐射的天线主要有TEM喇叭、领结天线和加载天线等形式^[1,2], 其中领结形天线能较好的兼顾瞬时带宽、信号保形以及有效辐射等方面的性能, 而且制作简单、轻便, 是探地雷达所采用的一种主流天线。但是, 领结天线的辐射方向图类似于偶极天线, 即在H面近似为全向辐射^[3], 也就是信号在对地向下辐射和接收的同时也向地面上方有同等强度的信号辐射和接收, 这给探地雷达的目标探测应用造成了不利。为了改善领结天线的以上不足, 提高雷达系统的信噪/杂比, 增强天线的对地辐射能力, 将领结天线放入金属背腔内形成背腔式天线是一种行之有效办法^[4]。同时, 采用背腔结构还可以提高收发天线间的隔离度。

本文通过分析探地雷达辐射脉冲的信号频谱, 结合探地雷达要求信号最大能量对地辐射的原则设计一

收稿日期: 2004-08-30

基金项目: 国防科研基金资助项目

作者简介: 周游(1981-), 男, 硕士生, 主要从事电磁场与微波技术方面的研究。

种快速有效的时域背腔式领结天线。

1 时域背腔领结天线的设计

1.1 时域脉冲天线的频带设计要求

脉冲体制探地雷达的窄脉冲瞬态信号具有宽带的频谱成分,其频谱通过傅里叶变换求得。如对于4 ns高斯脉冲,该信号的主要能量集中在125~505 MHz,信号最强频点为315 MHz。其频谱特性决定了适合该信号收发的超宽带天线应以315 MHz为中心频率,并要求覆盖125~505 MHz的频段进行设计。

1.2 脉冲领结天线的设计

无限长双锥天线是一种宽频带天线,这是因为它的输入阻抗具有频率不变性,带宽无限。对于有限长双锥天线,高频端的特性仍然可以保持,但其低频辐射性能会降低,天线的长度决定了天线的低端工作频率,频带可以通过增大锥角来展宽,因此双锥天线的宽带特性使其可作为一种理想的脉冲天线。通常鉴于工程使用和加工的便利,一种双锥天线的变形——领结天线在实际工程中得到广泛应用。它具有和双锥天线很相似的电性能,而且是平面结构,适合用作探地雷达的收发天线。领结天线在张角较大时具有和双锥天线类似的宽频带特性,张角越大,它的频带就越宽。在设计时根据系统尺寸和性能的要求一般选择张角在60°~90°之间。天线的臂长是决定天线低端频率的重要参数,天线臂越长,天线低频覆盖性能越好,其长度与低频端波长的关系由下式给出^[5]:

$$l = \frac{\lambda}{4} \left(\frac{1 - 97.82}{Z_c} \right) \quad (1)$$

式中 l 为天线一臂长; λ 为天线低频端波长; Z_c 为天线的特性阻抗,由式(2)计算,其中 θ_0 为张角。

$$Z_c = 120 \ln \cot \frac{\theta_0}{4} \quad (2)$$

1.3 天线背腔的设计

良好的背腔设计应在屏蔽地面上干扰信号,抑制后向辐射的同时增大天线的对地辐射增益,因此合理设计背腔尺寸是影响背腔领结天线性能的关键因素。理想的时域背腔式天线设计需通过大量数值计算进行仿真来确定良好的背腔尺寸,不便于雷达系统的工程化设计应用。对于有效抑制后向辐射和增大天线前向辐射增益的要求,背腔设计中大面积的背腔顶面对天线的镜像作用是影响背腔式天线辐射性能的主要因素。考虑到任何一个确定尺寸的背腔相对于宽带脉冲信号而言都是一个窄带系统,故决定镜像作用效果的背腔高度设计应针对脉冲信号的最强频点来确定。该思想为时域背腔式天线的工程化设计提供了基础。

图1为背腔领结天线的示意图,图2示意了背腔顶面对下端天线的镜像作用使背腔式天线形成了一个两单元的天线阵。由阵列天线理论可知,该天线向下辐射总场为:

$$E = E_1 (1 - \exp j2kh) \quad (3)$$

式中 E_1 为领结天线自身的辐射电场; k 为波数,等于 $2\pi/\lambda_0$, λ_0 为脉冲信号最强频点的波长; h 为背腔高度。为使最大信号能量向下辐射,由式(3)可求得背腔高度为 $\lambda_0/4$,此时总场最大为 $E = 2E_1$ 。

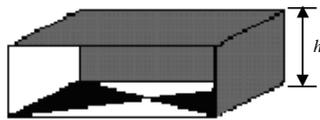


图1 背腔式领结天线示意图

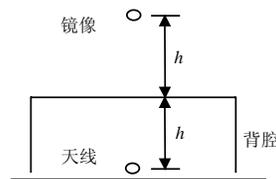


图2 背腔顶面的镜像作用

由图1所示背腔天线的结构可知,天线处于背腔的下端开口方,背腔的四面侧壁不能对天线形成镜像作用,侧壁的存在对天线的影晌主要是其上交叉极化的感应电流,该感应电流对天线的互耦作用可一定程度地影响天线的驻波性能和接收信号波形,但对天线的对地辐射性能影响甚弱。因此,设计时可根据雷达系统尺寸的要求灵活地选取。通常为了系统小型化和保证雷达系统的紧凑性,让侧壁紧靠天线进行设计。

2 设计示例

以4 ns的高斯脉冲辐射为例, 用上述建立的工程化设计方法进行所述背腔式探地雷达领结天线的设计。步骤如下: 1) 分析信号频谱, 确定天线的工作频段; 2) 根据天线的频率要求, 确定领结天线的尺寸; 3) 根据信号的最强频点, 确定背腔高度; 4) 根据系统小型化需要选择背腔长度和宽度。对于4 ns的高斯脉冲信号, 由其频谱特性, 可知天线工作频段为125~505 MHz, 信号最强频点为315 MHz。为了系统的小型化, 选择领结天线的张角为60°, 则由式(1)求得天线臂长为23 cm, 考虑10%左右的设计余量实际可取为25 cm。由于信号最强频点为315 MHz, 因此可求得背腔高度为24 cm。选择背腔侧壁紧贴领结天线设计背腔长度和宽度, 即长度取为50 cm。背腔宽度可通过天线臂长和张角算出为14.5 cm。图3和图4给出了背腔领结天线的测试驻波特性和接收信号辐射波形, 图中窄带背腔的引入对天线的驻波和接收信号波形影响不大, 在100~1300 MHz的测试范围内 $VSWR < 2.5$, 脉冲最大拖尾为主峰值的20%, 虽然比不加背腔的领结天线的波形拖尾有所增加, 但其宽带驻波特性和信号接收波形均保持良好。图5a的H面方向图测试结果, 其中0°方向为背腔开口下方, 故可知天线的对地辐射定向性能得以有效实现, 达到了设计要求。

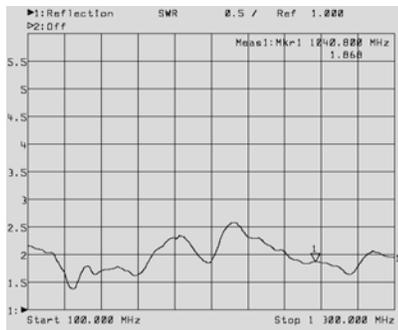


图3 4 ns背腔式领结天线的驻波特性

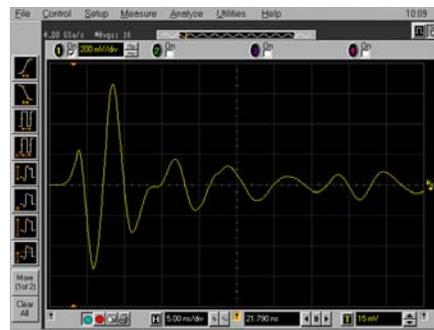


图4 4 ns背腔式领结天线的接收信号波形

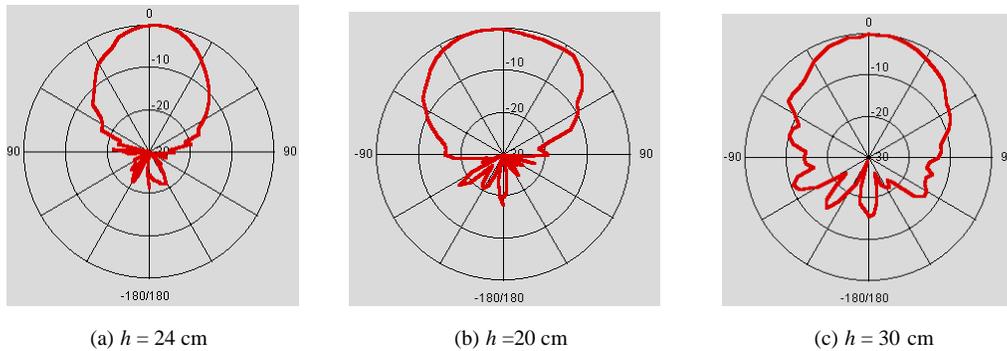


图5 背腔式领结天线的辐射方向图

另外, 为了考察背腔高度变化对辐射性能的影响, 图5b和图5c分别给出了减小和增大背腔高度后该天线的辐射方向图的测试结果, 从图中曲线可知, 两种情况的对地定向辐射性能均明显降低, 后向辐射增加, 由此证实了本文建立的工程化设计方法的有效性。(注: 以上测试是在4 m×3 m的微波暗室中进行接收天线实验, 仪器为HP8712C矢量网络分析仪、AV4032A频谱仪、安捷伦54845A高速采样示波器)

3 结论

时域脉冲天线的设计是探地雷达系统的关键技术, 收发天线单元的优劣直接影响着系统的整机性能。本文针对时域背腔式领结天线提出建立的快速有效且简便实用的工程化设计方法, 克服了基于数值仿真设计方法存在计算量大的困难, 便于在探地雷达系统的整体工程化设计中使用。

(下转第7页)

参 考 文 献

- [1] 何友, 王国宏, 陆大绘, 等. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京: 北京电子工业出版社, 2000
- [2] Bar-Shalom Y, Fortmann T E. Tracking and data association[M]. New York: Academic press, 1988
- [3] Kirubarajan T, Bar-Shalom Y. IMM-PDA for radar management and tracking benchmark with ECM[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronics, 1998, 1 115-1 132
- [4] Blom H A P. A sophisticated tracking algorithm for ATC surveillance data[C]. Proc.International Radar Conf., Paris, France, 1984
- [5] Bar-Shalom Y. Multitarget multisensor tracking, advanced application[M]. New York: Artech Houseinc, 1992
- [6] Birnirwal K, Bar-Shalom Y. Maneuver target tracking a cluttered environment with a variable dimension filter[J]. IEEE Trans.Aerospace & Electronic System, 1984, AES-20: 635-645
- [7] Fortmann T E, Bar-Shalom Y, Scheffe M, et al. Detection thresholds for tracking in clutter-a connection between estimation and signal processing[J]. IEEE Trans. Automatic Control, 1985, AC-30: 221-228
- [8] Fortmann T E, Bar-Shalom Y, Scheffe M, et al. Detection thresholds for multitarget tracking in clutter[C]. Proc.20th IEEE Conf. on Decision & Control, San Diego, CA, 1981
- [9] 周宏仁, 敬忠良, 王培得. 机动目标跟踪[M]. 北京: 北京国防工业出版社, 1991
- [10] Raraoq M, Bruder S. Information type filters for tracking a maneuvering target[J]. IEEE Trans. on AES, 1990, 26: 441-454

编辑 漆蓉

(上接第3页)

参 考 文 献

- [1] Yarovoy A G, Schukin A D, Kaploun I V. The dielectric wedge antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2002, 50(10): 1 460-1 472
- [2] Lestari A A, Yarovoy A G, Ligthart L P. Numerical and experimental analysis of circular-end wire bow-tie antennas over a lossy ground[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, 47(1): 26-35
- [3] Yasuhiro Nishioka, Osamu Maeshima, Toru Uno. FDTD analysis of resistor-loaded bow-tie antennas covered with ferrite-coated conducting cavity for subsurface radar[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1999, 47(6): 970-977
- [4] Bourgeois J M, Smith G S. A full electromagnetic simulation of a ground penetrating radar: theory and experiment[J]. AP-S. Digest Antennas and Propagation Society International Symposium, 1994, 3: 1 442-1 445
- [5] 王元坤, 李玉权. 线天线的宽频带技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995

编辑 徐安玉