

doi: 10.11720/wtyht.2015.3.34

赵翠荣, 胡通海, 郭福强. 一种用于混凝土结构探测的探地雷达天线阵列的设计[J]. 物探与化探, 2015, 39(3): 633-636, 640. http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.3.34

Zhao C R, Hu T H, Guo F Q. Design of ground penetrating radar antenna array for concrete structure detection[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(3): 633-636, 640. http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.3.34

一种用于混凝土结构探测的探地雷达天线阵列的设计

赵翠荣, 胡通海, 郭福强

(中国电波传播研究所, 山东 青岛 266107)

摘要: 基于脉冲体制探地雷达天线原理, 针对混凝土结构探测的需求, 以变形领结天线为基础, 设计了一种双极化、多天线的探地雷达天线阵列, 该天线阵列具有 0.75~2.25 GHz 的频带宽度, 且方向性良好。该天线阵列不仅可以提高雷达系统的探测深度, 也提高了雷达的探测效率。设计的天线阵列已成功应用于成像探地雷达项目中, 对工程质量检测具有重要意义, 为探地雷达三维成像设备的进一步开发提供了强有力的技术支撑。

关键词: 探地雷达; 冲击脉冲; 双极化; 天线阵列; 混凝土

中图分类号: P631.3; TN959

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2015)03-0633-04

随着国内基础设施建设快速的发展, 钢筋混凝土结构在高铁轨道、隧道衬砌、桥梁工程及人防工程等设施上得到了广泛的应用, 对该结构的质量检测也得到了快速的发展。探地雷达作为地球物理学界广为接受的一项无损检测技术^[1-3], 越来越广泛地应用于混凝土结构检测中。

传统的利用探地雷达二维图谱进行结构探测的方法效率较低, 结果不够直观, 而且需要根据经验进行数据处理及判读, 这些特点决定了传统的雷达系统已逐渐不能满足钢筋混凝土质量检测的要求。通过天线阵列提高扫描效率, 并最终形成三维结构图, 是目前探地雷达技术发展的主要方向。

目前, 国内外探地雷达厂家在天线阵列设计方面均做了一部分工作, 但多集中在公路路面探测、地下管线探测等领域, 设备尺寸重量较大, 而大多数钢筋混凝土建筑物可操作区域较小, 必须研究便携式设备。

笔者创新性地采用双极化方式进行便携式天线阵列设计。双极化方式能够降低浅层强目标的干扰, 有利于深层目标探测; 同时, 天线阵列沿一个方向行进就能够对整个探测剖面进行成像, 不需要进行网格测线扫描, 提高了探测效率。所设计的天线阵列与接收机、发射机和匹配电路最终形成探地雷达天线阵列探头, 可用于高铁、桥梁、隧道和人防工

程等混凝土结构的检测, 最终通过数据处理直接进行三维成像, 提高了探测性能, 降低了操作难度和数据解释难度。

1 天线振子设计

1.1 振子形式

探地雷达天线属于超宽带时域天线, 对天线的行波特性要求很高。具有恒定阻抗的弯曲双锥 V 形天线是行波天线, 输入阻抗在很宽的频带内基本保持不变^[4]。领结天线是双锥天线的平面化(图 1), 是目前探地雷达地面耦合天线中普遍采用的天线形式^[5]。与常规偶极子天线相比, 领结天线具有更宽的带宽、更高的辐射效率等优点^[6]。

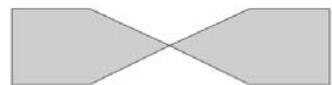


图 1 领结天线示意

1.2 频率选择

探地雷达的分辨率包括垂向分辨率和水平分辨率。垂向分辨率取决于频带宽度和电磁波的传播速度, 符合关系式^[7-8]

$$\Delta R = \frac{v}{2B} = \frac{C}{2B\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (1)$$

式中, C 为空气中电磁波波速, v 为电磁波在介质中的传播速度, ϵ_r 为介质的相对介电常数, B 为频带宽度。

根据 Fresnel 原理, 假设目标埋设深度为 h , 水平分辨率可按照下式计算^[9]

$$R_f = \sqrt{\frac{\lambda h}{2}}, \quad (2)$$

式中, λ 为电磁波在介质中的波长。

一般来说, 天线的频率越高, 分辨率越高, 但探测深度减小。根据探测深度和分辨率要求, 本天线的中心频率选择 1.5 GHz。探地雷达属于超宽带雷达, 其相对带宽一般为 100%, 其工作频率应符合公式

$$B = f_{\max} - f_{\min} = \frac{f_{\max} + f_{\min}}{2} = f_0, \quad (3)$$

式中, f_0 为中心频率, f_{\max} 为最高频率, f_{\min} 为最低频率, 本文中天线频带宽度按照 0.75~2.25 GHz 进行设计。

2 天线阵列设计与测试

在天线阵列设计中, 需要解决以下几个关键问题: 阵列排布的效率、天线极化选择及阵列之间的耦合等。

2.1 天线阵列排布

对于天线阵列来说, 天线排布密度越高, 相当于增加了测线数量, 成像效果越好; 但过高的阵列排布会造成天线方向角畸变, 而且天线单元之间的耦合和干扰也会增加, 进而影响天线的探测性能。图 2 为单个天线振子的归一化辐射方向图, 左图为天线在其行进方向上, 即 H 面的方向图; 右图为行进垂直方向上, 即 E 面的方向图。由天线 E 面方向图可以看出, 天线向下辐射的能量主要集中在主瓣轴线 $\pm 30^\circ$ 的角度内。

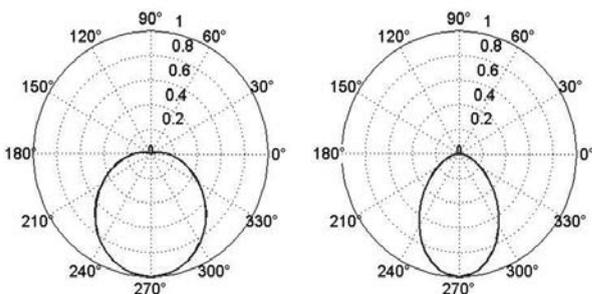


图 2 天线在 H 面(左)及 E 面(右)的方向图

设目标深度为 h , 可得天线单次扫描覆盖的范围

$$d = 2h \cdot \text{tg}30^\circ = \frac{2\sqrt{3}}{3}h. \quad (4)$$

一般钢筋混凝土建筑物内第一层钢筋深度约为 10 cm, 由此计算出 $d = 11$ cm。

当选择单天线对混凝土结构进行成像探测时, 必须设置网格测线, 测线分布越密集, 最终的成像效果越好, 但过密的测线增加了探测工作量。大量的实验证明, 当测线间距大于 7 cm 时, 钢筋网的轮廓能够显现, 但钢筋成像效果不圆滑。实际工程探测时, 常采用的测线间距为 5 cm, 钢筋成像结果清晰, 其他异常也能够清晰反映。综合上述分析, 最终选择间距为 5 cm, 以实现探测全面覆盖和提高精度的要求。

2.2 天线极化分析

探地雷达天线的极化方式一般分为 HH 极化和 VV 极化两种^[10], 两种极化方式对目标的探测效果各有利弊。理论分析表明, 采用双极化天线进行探测时, 可以有效降低浅层目标对深层目标的屏蔽作用, 从而提高系统的探测深度^[11]。

采用两种极化方式对双层钢筋网试件进行了探测(图 3、图 4), 钢筋网下方预埋了 PVC 管。从图 4 可以明显看到, 钢筋目标的双曲线反应变弱变窄, 在一定程度上反而可以避免上层钢筋强反射的影响, 探测到了深层的 PVC 管。

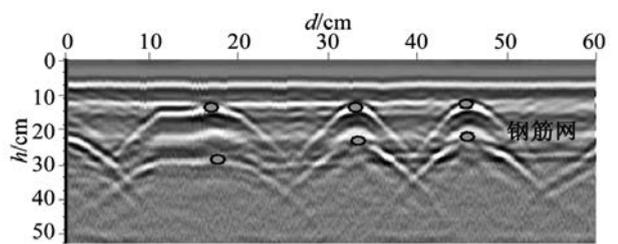


图 3 HH 极化探测结果

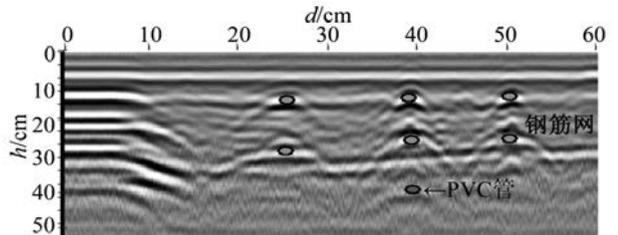


图 4 VV 极化探测结果

根据探测结果可知, 在探测复杂未知隐蔽物, 尤其是上下平行、距离很近的目标时, 单极化天线有可能造成漏判, 如果将两种极化方式结合, 就可以降低上层目标对下层目标的屏蔽作用, 降低误判率。

同时, 使用单极化天线对钢筋网进行成像探测时, 必须布置网格测线, x 方向采集完成后, 需在 y

方向上继续采集。如果采用双极化天线, x 方向探测完成后即可同步获得 y 方向数据, 不需要进行网格测线扫描, 工作效率提高一倍。

采用天线阵列探测时, 天线数量越多, 成像效果越好, 但考虑到实际探测对设备便携性的需求, 设计时采取模块组合方式, 可根据需要增加或减少天线模块数量。不失一般性, 笔者采用 4 组天线进行分析研究(图 5)。

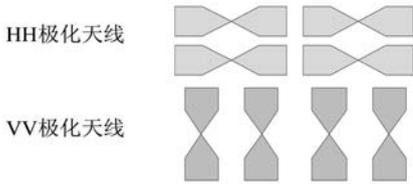


图 5 天线阵列排列示意

2.3 天线阵列耦合干扰解决

系统采用分时方式进行工作, 以此降低阵列之间的最大干扰。同时, 每个天线单元分别加侧板进行隔离, 降低天线间的互耦效应。增加侧板隔离后天线带宽虽稍有降低, 但天线的方向性变化不大, 基本不影响天线性能。

实验时发现雷达波形拖尾现象明显, 影响浅层目标及钢筋的识别(图 6 上)。造成拖尾的主要原因是每个天线对应的金属屏蔽壳表面的感应电流的相互影响。为消除感应电流, 在屏蔽壳内表面增加磁性吸收介质层, 同时在发射机、接收机与屏蔽壳地之间增加滤波电路。经过加载和滤波处理后的波形拖尾震荡明显减小(图 6 下)。

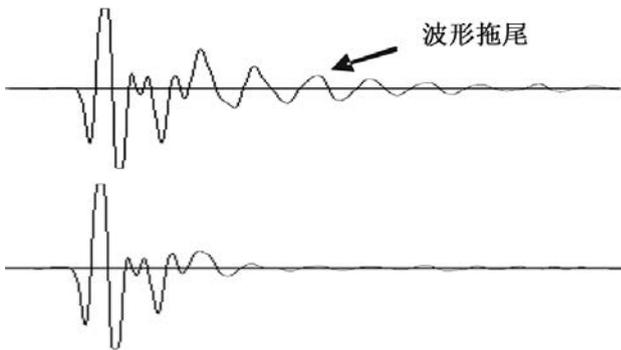


图 6 未处理雷达波形(上)与处理后雷达波形(下)对比

2.4 天线屏蔽设计

天线屏蔽腔体对频带宽度、辐射效率和时域响应均有比较明显的影响^[11-13], 其设计非常重要。加入屏蔽腔体后, 天线的辐射场可按

$$E = E_1(1 - e^{j2kh}) = E_1(1 - e^{j2k\frac{\lambda_0}{4}}) \quad (5)$$

计算式中, E_1 为单个领结天线的辐射场, λ_0 为中心频率频点的波长, k 为波数, h 为屏蔽背腔高度。

为了改善天线的行波特性, 同时降低天线之间的耦合, 采用多层介质吸波材料进行加载^[14-15], 屏蔽腔高度应按

$$h = \frac{\lambda_1}{4} = \frac{\lambda_0}{4}\sqrt{\varepsilon} \quad (6)$$

计算, 式中, ε 为吸波材料的相对介电常数。

2.5 天线仿真测试

天线归一化方向图仿真结果见图 7。与单天线的辐射方向图进行对比, 发现天线辐射在 E 面方向有了略微的变化, 最强辐射方向受相邻天线单元的影响向阵列中心轴方向产生了偏离, 并随振子在阵列中位置的不同偏差在 $10^\circ \sim 15^\circ$ 之间, 但波束宽度基本不变, H 面也基本保持不变。E 面和 H 面辐射场最强点位置基本保持在一条线上。表明双极化天线采用 E 面和 H 面分别能够对同一位置进行扫描, 从而达到实现增加探测深度和两个方向同时测量的目的。

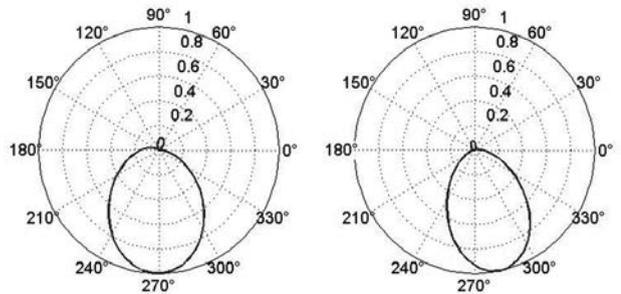


图 7 天线归一化方向图仿真结果

使用 AgilentE9923A 矢量网络分析仪对天线进行测量, 其 S11 的测试结果如图 8 所示。该天线阵列在 $0.75 \sim 2.25$ GHz 频率之间基本小于 -10 dB, 带宽达到设计要求。

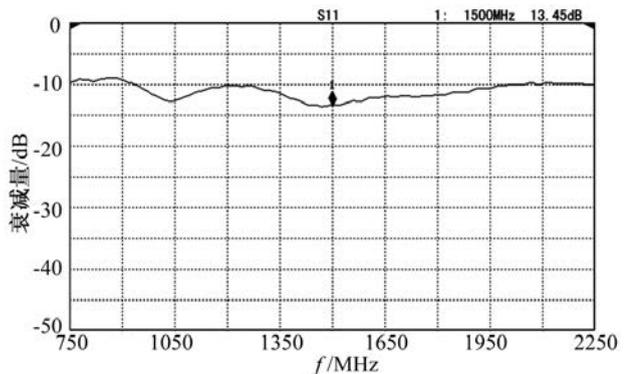


图 8 天线频带宽度测试结果

3 工程应用

采用该天线阵列和匹配的发射机、接收机以及主机组成了中心频率为 1.5 GHz 的成像探测系统,

并进行了实际探测。图 9 为北京某实验场混凝土试件设计图及探测图谱,第一层埋设了不同粗细的钢筋,第二层埋设了 3 个不同大小的目标,从探测图谱可以看出,浅层钢筋并未影响深层目标的探测,双极化阵列在探测深度上具有一定优势。

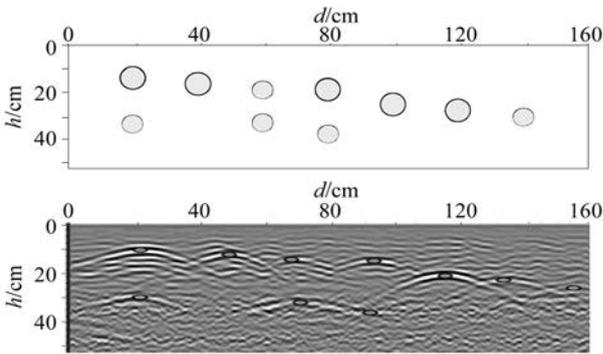


图 9 混凝土试件设计图(上)及探测图谱(下)

采用单方向扫描对青岛某人防工程钢筋网进行成像探测,三维切片图图 10 显示,探测效果良好。为进一步验证设计,在北京某体育馆进行了斜钢筋探测(图 11)。探测结果表明双极化设计可以满足混凝土结构斜钢筋的探测需求。

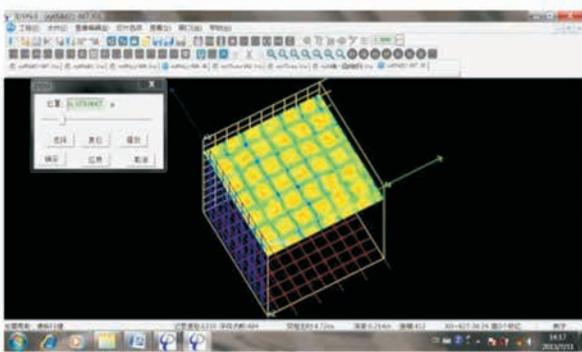


图 10 青岛某人防工程钢筋网单向扫描三维成像

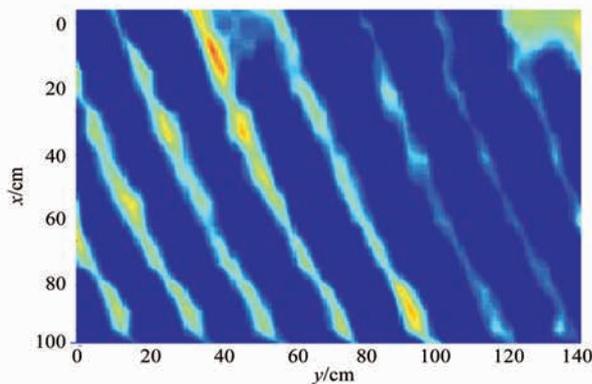


图 11 北京某体育馆混凝土结构斜钢筋三维切片

4 结论

本天线阵列采用双极化多天线组合排列,频带宽度为 0.75~2.25 GHz,在设计过程中有效减小了

天线之间的互相耦合,在探测深度、探测效率和探知率等方面优于单天线设计。该天线阵列与匹配的发射机、接收机、主机形成了成像探地雷达系统,主要应用于混凝土结构的探测,在实际探测中取得了良好的应用效果。该天线阵列的研制成功,为未来天线阵列的设计提供了经验,并为国内三维成像设备的进一步设计开发提供了强有力的技术支撑。

参考文献:

- [1] Chen Chi-Chih, Soumya Nag, A Standoff. Focused-beam land mine radar[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(1): 507-515.
- [2] Thokild B Hansen, Peter M Johansen. Inversion scheme for ground penetrating radar that takes into account the planar air-soil interface[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(1): 496-506.
- [3] Harry M Jol. 探地雷达理论与应用[M]. 雷文泰, 董孝忠, 周咏, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [4] John D. Kraus, Ronald J Marhefka. 天线(第三版上册)[M]. 章文勋译. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [5] Mardeni Roslee. Design of bow tie antenna in CST studio suite below 2 GHz for ground penetrating radar applications[C]//IEEE International RF and Microwave Conference, 12th-14th December 2011, Seremban, Malaysia.
- [6] A Oral Salman, Emrullah Bicak, Mehmet Sezgin. Textile antenna for the multi-sensor (impulse GPR&EMI) subsurface detection system[C]//IEEE 13th International Conference. 21-25 June, 2010.
- [7] Egil S Eide. Radar imaging of small objects closely below the earth surface[M]. Department of Telecommunications Norwegian of Science and Technology N-7491 Trondheim, Norway, August, 2000: 28.
- [8] Demet S. Armagan Sahinkaya. An innovative GPR system design: detection of cylindrical dielectric objects[C]//Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar, 21-24 June, 2004, Delft, The Netherlands.
- [9] 曾昭发, 刘四新, 王者江, 等. 探地雷达方法原理及应用(第 1 版)[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [10] Lee Kwan-Ho, Chen Chi-Chih, Fernando L. Modeling and investigation of a geometrically complex UWB GPR antenna using FDTD[J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 2004, 52(8).
- [11] Alessandro Simi, Guido Manacorda, Andrea Benedetto. Bridge deck survey with high resolution ground penetrating radar[C]//2012 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), June 4-8, 2012: 489-495.
- [12] Chen Guo, Richard C. A 900 MHz shielded bow-tie antenna system for ground penetrating radar[C]//2010 13th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), 21-25 June, 2010.

除方法[J].物探与化探,2011,35(3):427-430.

[J].物探与化探,2014,38(1):185-188.

[12] 周奇才,周杰,范思遐,等.高铁隧道 GPR 技术研究与应用

Ground penetrating radar circular profile detection method

CAI Lian-Chu

(Zhejiang Huadong Engineering Safety Technology Co., Ltd, Hangzhou 310014, China)

Abstract: GPR profile is designed to the crossed grid in the tunnel, and in some special circumstances required along the tunnel cross section for the circular detection, The profile is a circle connected by start and end. Plane and spherical geologic structure are characterized by arc shape in the radar images. Based on space geometry relation of the circular line and detecting object, the relation formula of the reflected signal is derived and developed software, and the precise detection of geometric parameters of the object can be obtained.

Key words: ground penetrating radar; circular profile; curve-fitting; planar model; globoid model

作者简介: 蔡连初(1969-),男,高工,主要从事工程物探及地质灾害超前预报工作。

上接 636 页

[13] Wu Bing-Heng, Ji Yi-Cai, Fang Guang-You. Analysis of GPR UWB half-ellipse antenna with different height of backed cavity above ground[J]. IEEE Antenna and Wireless Propagation Letters, 2010, V9.

pulse radar[J] Electronics and Communications Japan, 2002, 85(8).

[14] Yasuhro Nishioka, Toru Uno, Takehito Iguchi. Characteristics of cavity-isolated and cavity-connected bow-tie antennas for subsurface

[15] 彭宇,王蕾,郭福强,等.一种超宽带小型化探地雷达天线的设计[J].物探与化探,2014,38(5):751.

Design of ground penetrating radar antenna array for concrete structure detection

ZHAO Cui-Rong, HU Tong-Hai, GUO Fu-Qiang

(Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao Shandong 266107, China)

Abstract: Based on Impulse Ground Penetrating Radar(GPR) antenna theory, and according to the requirement of concrete structure detection, This thesis designs a kind of dual-polarized multi-antennas array. The designed antenna array possesses 0.75~2.25 GHz frequency bandwidth and good direction. The double polarization enables deeper surveying, and enhances the efficiency of detection. The designed antenna array is successfully applied to three imaging GPR project. The design method is significant for project quality inspection and provides effective support for the design of 3D GPR systems.

Key words: ground penetrating radar; impulse; dual-polarized ; antenna array; concrete

作者简介: 赵翠荣(1973-),女,山东人,高级工程师(所级专家),研究方向为探地雷达超宽带天线与发射机接收机技术,公开发表学术论文数篇。