

频率步进探地雷达及其在地雷探测中的应用

方广有¹, 佐藤源之²

(1. 中国科学院电子学研究所, 北京 2702 信箱, 北京 100080; 2. Center for Northeast Asian Studies, Tohoku University, Sendai, 980-8576 Japan)

摘要: 频率步进方法是探地雷达技术的工作体制之一, 与时域无载频脉冲体制的探地雷达技术相比, 在探测性能上具有较多的优越性. 本文在简述其工作原理的基础上, 介绍了作者研制的一种频率步进探地雷达系统, 该系统主要用于对地雷目标进行三维成像探测. 在研制该雷达系统过程中, 对已有的反对称 Vivaldi 天线提出了改进设计. 实验测量结果表明, 本文研制的反对称 Vivaldi 天线与传统的同类天线相比, 性能更加优越. 同时, 为了得到更加清晰的地雷图像, 本文还分别引入了 $f-k$ 偏移成像方法和合成孔径雷达 (SAR) 处理技术对雷达探测信号进行处理, 得到了满意的结果. 探测实例表明, 频率步进探地雷达系统能够实现浅层地下地雷目标的高分辨率三维成像探测.

关键词: 频率步进探地雷达; Vivaldi 天线; 地雷探测; $f-k$ 偏移技术; 合成孔径雷达 (SAR) 处理技术
中图分类号: TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 03-0436-04

Stepped-Frequency Ground Penetrating Radar and Its Application for Landmine Detection

FANG Guang-you¹, SATO Motoyuki²

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 2702, Beijing 100080, China;
2. Center for Northeast Asian Studies, Tohoku University, Sendai, 980-8576, Japan)

Abstract: A Stepped-Frequency Continuous-Wave Ground Penetrating Radar (SFCW-GPR) system with array Vivaldi antenna for landmine detection has been developed. In developing such GPR system, a new antipodal Vivaldi antenna has been designed and constructed. Different from the normal antipodal Vivaldi antenna usually used in microwave and mm engineering, the newly developed antenna with a parallel strip line as its feeding configuration possesses much better properties. An antenna array with ten antipodal Vivaldi antenna elements has been developed. In order to improve the detected landmine images, some advanced signal processing methods, such as synthetic aperture radar (SAR) technique and $f-k$ migration method have been applied to highlight the landmine images. The effectiveness and validities of the above methods for processing GPR Anti-personnel (AP) landmine detection data are studied and compared with each other.

Key words: ground penetrating radar (GPR); landmine detection; Vivaldi antenna; SAR technique; $f-k$ migration technique

1 引言

在国内外已经提出的各种地雷探测方法中, 探地雷达 (Ground Penetrating Radar: GPR) 方法是比较有效的探测技术之一. 探地雷达的工作体制主要有三种^[1,2]: (1) 无载频脉冲 (Carrier-Free Pulse), (2) 频率步进 (Stepped-Frequency Continuous-Wave), (3) 调频连续波 (FMCW). 它们分别简称为 Pulse-GPR, SFCW-GPR, FMCW-GPR. 与其他两种雷达体制相比, SFCW-GPR 技术的优越性主要表现在: (1) 雷达信号源输出的频率分量能够精确地已知, 并且各频率分量的能量相等; (2) 通过控制雷达接收机的中频带宽 (IF Bandwidth), 能够有效地抑制接收信号中的噪声, 进而提高雷达接收机的灵敏度; (3) 雷达发射和接收的信号都是频率域信号, 能够比较方便地应用频率域的

信号处理技术对目标回波信号进行处理和分析等.

对探地雷达系统而言, 超宽带收发天线是其关键技术之一, 在探地雷达系统中已经获得成功应用的超宽带天线主要有两大类: 介质耦合天线和空气耦合天线. 前者主要包括蝴蝶结型 (Bowtie) 宽带天线, 螺旋天线, 棒形偶极子天线等; 后者主要包括各种宽带喇叭 (Horn) 天线和宽带渐变缝隙天线 (Tapered Slot Antenna) 等. 在利用介质耦合型天线作为收发天线时, 信号能量主要是通过近场耦合传入地下, 雷达的探测性能随天线高度的升高而降低^[3]. 为了提高天线的辐射和接收效率, 需将天线紧贴介质表面, 该类天线基本不适合于探测地下地雷的场合. 与此相反, 空气耦合天线则没有该方面的限制, 天线离开地面一定距离并不十分明显地改变雷达的探测性能. 在空气耦合型天线中, 尽管喇叭天线具有较高的增益、

方向性等优点,但是,由于各种宽带喇叭天线的体积都比较大,不适合应用于便携式探雷雷达系统中。

Vivaldi 天线是一种宽带渐变缝隙天线,由于其具有很好的超宽带特性、端射特性、中等增益和尺寸小、重量轻、易于加工等特点,在微波、毫米波等领域都得到了比较广泛地应用^[4,5]。在研制本文的频率步进探雷雷达过程中,作者选用了一种反对称 Vivaldi 天线(Antipodal Vivaldi Antenna)作为雷达的收发天线,并对该类天线存在的缺陷提出了改进设计,使该类天线的性能有比较大地提高。实际测量结果表明,新研制的反对称 Vivaldi 天线性能优越,能够满足探雷雷达系统的需要。

另外,为了提高雷达输出图像的质量,主要是为了提高雷达探测图像的水平分辨率和抑制接收信号中的随机干扰信号,本文还分别引入了地震信号处理中的 f-k 偏移方法和雷达探测领域中的合成孔径雷达(SAR)处理技术对探雷雷达输出的地雷图像进行处理,得到了比较满意的结果。

2 频率步进探地雷达工作原理

频率步进探地雷达是一种工作频率以阶梯方式步进的连续波雷达^[1]。在一个扫描周期内,雷达发射的信号频率从起始频率 f_{start} 以频率间隔 f 逐步上升到终止频率 f_{stop} ,其工作带宽 B 和 f 分别为: $B = f_{stop} - f_{start}$, $f = B / (N_f - 1)$,其中 N_f 为步进的频率点数。

由雷达探测原理知,频率步进探地雷达的最大不模糊探测距离 R_{max} 和距离向的分辨率 R 分别为: $R_{max} = v/2f$, $R = R_{max} / N_f$,其中 v 为电磁波在地下介质中的传播速度。

对于地下目标探测而言,为了实现对被探测目标的有效识别,需要求出被探测目标的电磁散射系数。由于地下土壤环境及探地雷达工作机理等问题的复杂性,一般很难直接从雷达接收信号中求解出目标的散射系数。通常是通过一定的天线扫描方法和信号处理技术对被探测目标进行成像,借助于雷达显示的二维或三维图像,实现对目标的探测和识别。这是目前探地雷达技术在实际工程应用中最主要的工作方法。

3 反对称 Vivaldi 天线的改进设计及实验测量结果分析

如前所述,Vivaldi 天线是一种综合性能优良的超宽带天线,理论上讲,这种天线的工作带宽可以是无限宽。但实际上,主要有两个因素限制该类天线的宽带性能:天线馈电结构和天线辐射体的形状。其中,馈电结构的设计依据主要来源于微带线理论,而天线辐射体结构的设计主要源自于设计者的实际经验。

为了克服馈电结构对频带宽度的限制,Gazit 设计出一种反对称 Vivaldi (Antipodal Vivaldi) 天线^[4,5],如图 1(a)所示。

在 Gazit 给出的设计方法中,反对称 Vivaldi 天线馈电结构包括两部分:以指数曲线渐变的微带线和平行带状线,即如图 1(a)中所示的区域 I 和区域 II 部分。

由微带线设计方法知,图 1(a)区域 I 中微带线宽度 d 的选取依赖于如下设计公式^[6]:

$$\frac{d}{h} = \frac{2}{r} [(d_e - 1) - \ln(2d_e - 1)] + \frac{r-1}{r} [\ln(d_e - 1)] + 0.293 - \frac{0.517}{r} J, \text{ for } d/h < 2 \quad (1)$$

其中, d 为微带线的宽度, h 为天线体厚度, Z_c 为微带线的特性阻抗, $d_e = 60 \sqrt{\epsilon_r} / Z_c$ 。

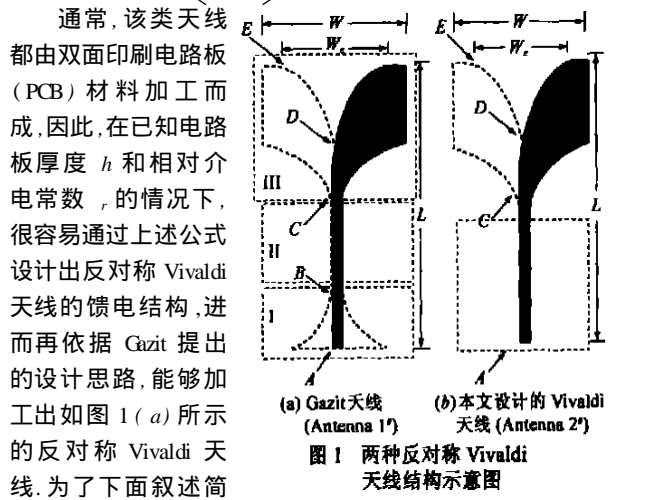


图 1 两种反对称 Vivaldi 天线结构示意图

通常,该类天线都由双面印刷电路板(PCB)材料加工而成,因此在已知电路板厚度 h 和相对介电常数 ϵ_r 的情况下,很容易通过上述公式设计出反对称 Vivaldi 天线的馈电结构,进而再依据 Gazit 提出的设计思路,能够加工出如图 1(a)所示的反对称 Vivaldi 天线。为了下面叙述简便起见,称之为 Antenna 1#。其中天线辐射体形状的选取主要源自于设计者的实际经验^[4,5],在具体加工之前也可以通过一定的数值模拟计算方法,例如 FDID 法等,对其形状的细节进行优化设计^[7]。

该天线在频域和时域的返回损耗(Return Loss)测量值分别如图 2(a)和 2(b)中的虚线所示。由图 2(b)知,在该天线馈电结构的渐变过渡部分,即区域 I 中,仍存在有较大的反射信号。该反射信号的来源分析如下:

假设天线激励源的阻抗为 50Ω ,由图 1(a)可以看出,在区域 I 中,靠近天线馈电点 A 处,由于微带线基底的宽度远大于上层微带线的宽度,则公式(1)成立的条件得以满足。但当观察点离开馈电点 A 时,由于微带线基底的宽度逐渐变窄,不能满足公式(1)成立所要求的条件,因此,微带线的特性阻抗也发生变化。即随着观察点离开馈电点 A,微带线的特性阻抗不再保持为 50Ω 。由传输线理论知,阻抗的不匹配,必然导致电磁波的反射。如图 2(b)中字母“A”所指的虚线部分。

另外,在该图中,沿天线结构的主要反射点 A、B、C、D 和 E 等产生的反射信号也分别以字母“A”、“C”、“D”和“E”标注于图中。

对于如图 1(a)所示的反对称 Vivaldi 天线,由传输线理论知,由于馈电部分的阻抗不匹配,沿馈线结构产生了电流的反射,必然导致该天线的行波特性变差,即有效带宽降低,如图 2(a)虚线所示。

为了进一步改善反对称 Vivaldi 天线的性能,这里提出了

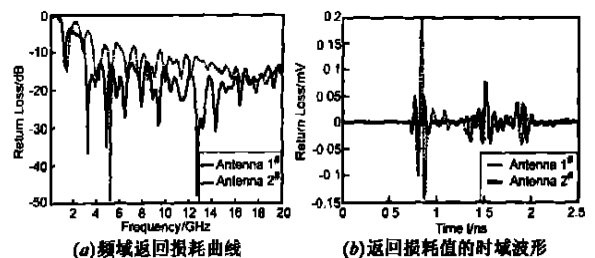


图 2 两种天线的频域和时域返回损耗测量值

改进设计方法,其基本思路简述如下:

如果在设计反对称 Vivaldi 天线时,天线的馈电部分不选用这种以指数曲线渐变的微带线结构,直接以阻抗特性为恒定值的平行带状线结构对天线进行馈电,则由于其阻抗特性将保持不变,在平行带状线馈电结构与天线辐射臂之间将不会存在多余的反射波。

平行带状线的宽度 d 可以通过下列公式(2)确定^[8]:

$$Z_c = \frac{377}{\sqrt{\mu_r}} \sqrt{\frac{1 + \ln[2(m/h + 0.94)]}{m/h}} \quad (2)$$

其中 $m = h/d$, $\mu_r = \sqrt{\mu_r}$, 为考虑到天线基板介电常数后的本征阻抗。

当不考虑平行带状线的边缘效应时,特性阻抗由 $Z_c = h/d$ 计算。

计算分析表明,对于公式(2)而言,即使带状线的宽度 d 与天线基板的厚度 h 相等,即 $d = h$,该公式的计算误差仍可以小于 0.3%,因此,能够给出足够高的设计精度。

依照公式(2)设计的反对称 Vivaldi 天线如图 1(b)所示,其中天线尺寸和辐射体的形状与图 1(a)中的天线完全相同。为了方便,这里称之为 Antenna 2[#]。该天线在频率域和时间域返回损耗值(Return Loss)的实验测试结果分别如图 2(a)和 2(b)中的实线所示。

从图 2(b)中的实曲线可以看出,依照上述改进方法设计出的 Vivaldi 天线,信号源输出的信号仅在天线馈电部分的起始点(A点处)产生很小的反射。进一步分析表明,该反射信号可能是由于 50 同轴电缆连接器(SMA-50-0-14)与天线平行馈电线相连接时引起的,即当该连接器与双线平行线相连接时,连接器的加固端子与平行双线之间产生了附加的电容,导致其阻抗特性发生变化,即偏离 50,从而产生波的反射。

对比图 2(a)中的曲线知,新设计的天线具有较宽的工作频带,尤其在 1.5 GHz ~ 16.0 GHz 频率范围内,该天线的返回损耗明显低于依照 Gazit 方法设计出的同类 Vivaldi 天线。

4 SFCW 探雷雷达系统及探测结果分析

4.1 频率步进探雷雷达系统

我们研制的频率步进探雷雷达系统如图 3(a)所示,该系统由 HP8753 网络分析仪、反对称 Vivaldi 天线(阵)、天线扫描伺服系统、微机部分组成。其工作过程简述如下:在主控程序控制下,收发天线在被探测区域上方作水平方向的二维扫描,即 X 、 Y 方向。在 X 、 Y 方向上,天线扫描步进间隔分别为 x 和 y 。接收天线检测到的信号经过一定的程序处理后,以二维电平图或波形堆积图的方式实时显示出来。待测量区域



图 3 SFCW-GPR 探雷系统

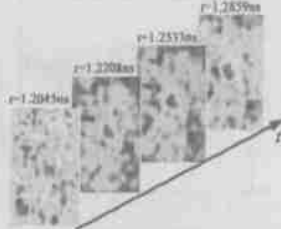


图 4 地雷目标沿深度方向的原始二维切片图像

扫描结束后,经过一定的成像算法再以二维水平切片图(2D-Slice)或三维图像方式显示出来。

为了提高雷达探测时的作业效率,即提高探测数据的采集速度,我们还研制出在多路收发开关控制下的 Vivaldi 天线阵列。本实验中所用的地雷目标是一种比较难于探测的 72 式塑料壳防步兵地雷,其直径和厚度分别为 7.8 cm 和 4.0 cm,介电常数约为 3.0。同时,掩埋地雷目标的土壤选取一种块状的粘土,以模拟探雷雷达在实际应用时经常遇到的地下随机分布的大量不均匀体。

4.2 天线直达波消除

在探地雷达的实际应用中,雷达接收信号中主要包括三部分:(1)来自于收发天线之间的直接耦合波和来自于地表面的反射波,二者合称为直达波;(2)地下被测量目标产生的回波信号;(3)来自于外界和系统内部的随机干扰信号。由于收发天线之间的距离很近,地下土壤的衰减,以及需要探测的地下目标往往是弱散射体(如塑料壳地雷)等原因,导致雷达接收信号中的直达波信号往往比目标回波信号大很多,微弱的目标回波信号通常被淹没于强大的直达波干扰信号中。如何有效地去除直达波,一直是探地雷达技术研究的热点问题。多年来,国内外的研究人员分别提出了各种各样的方法^[9],包括直接相减法、小波变换法、信号距离法、相关方法及反卷积方法等。相对而言,比较简捷和有效的技术还是直接相减法。这种直接相减法不仅能够消除收发天线之间的直达波干扰,而且还能够部分地消除来自系统内和系统外的其他干扰噪声。

4.3 探测结果及分析

被探测塑料壳防步兵地雷埋于一种块状的粘土中,埋设深度为 3.0 cm;粘土块的直径大约在 1.0 cm ~ 3.5 cm 之间,根据 TDR 技术测量的结果,其相对介电常数约为 3.3。如前所述,这里选用粘土块作为掩埋地雷目标的土壤,其主要目的是为了更真实地模拟雷达实际作业时遇到的地质环境。天线的扫描区域为 37 cm × 62 cm,扫描的步进间隔为 $x = y = 1.0$ cm。雷达的工作频率范围为 1.0 GHz ~ 6.0 GHz。

雷达回波信号沿传播时间(深度方向)的二维切片(2D-Slice)图像(伪彩色电平图)如图 4 所示。

由上面给出的地雷目标和粘土块的介电常数知,二者的值比较接近,地雷在此环境中属于弱散射体,尽管如此,我们研制的雷达系统还是比较清晰地显示出被探测地雷的图像。

在本文的雷达探测实验中,由于粘土块的电尺寸比较大,每个粘土块都相当于一个孤立的散射体,这些随机分布的散射体产生的干扰信号如图 4 所示。

另外,由图 4 可以看出,受周围粘土块产生的随机散射信号的影响,在雷达输出的原始图像中,地雷目标的形状产生了一定的畸变,即其形状不再是圆形,如图 4 所示。此时,如果单纯依靠雷达显示的图像形状来识别地雷目标,将产生误判。

为了消除地下随机介质体产生的随机干扰信号,这里分别引入了 $f-k$ 偏移和 SAR 处理方法对雷达原始图像进行处理^[10-12]。经过 $f-k$ 偏移和 SAR 技术处理后的地雷图像分别如图 5(a)和 5(b)所示。

由图中结果可以看出, $f-k$ 偏移和 SAR 处理技术都比较好

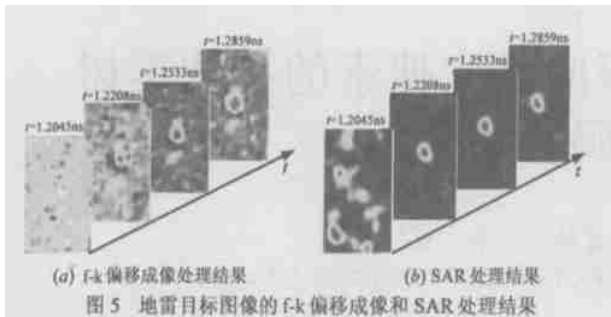


图 5 地雷目标图像的 f-k 偏移成像和 SAR 处理结果

地重现了地雷目标的形状,同时,由于 SAR 处理技术在其合成孔径范围内,利用了相邻接收信号之间的相关关系,对来自粘土块的随机干扰信号还具有比较好地抑制作用,使得雷达显示的地雷目标图像更加清晰。

5 结论

自地雷问世以来,对地雷的探测和清除一直是人类面临的技术挑战之一。在已经提出的各种探测方法中,探地雷方法被认为是最有希望的方法之一。本文的实验结果表明,即使在土壤环境比较复杂的情况下,利用本文研制的频率步进探地雷达系统,也能够实现对包括 72 式塑料壳反步兵地雷在内的各种不同类型地雷的高分辨率探测。在研制该雷达系统过程中,对具有极宽频带的反对称 Vivaldi 天线提出了改进设计,使得该类天线的性能得到了较大程度地提高。

在探地雷的实际工程应用中,经常会遇到复杂的土壤环境,例如,地表面比较粗糙,地下分布着各种随机散射体等。为了更好地模拟实际情况,在本文的探测实验中,我们选用了一种不均匀的粘土块作为掩埋地雷的土壤;同时,为了更好地检测雷达性能,我们还选取了一种比较难于探测的 72 式塑料壳反步兵地雷作为被探测目标。雷达探测结果表明,我们研制的探地雷达系统能够实现对该类地雷目标的探测。另外,本文引入的 f-k 偏移处理方法和 SAR 成像技术能够比较好地对雷达探测图像进行处理,均分别给出了很好地处理结果。下一步研究工作的重点主要集中在如何利用目标特征实现对目标的自动识别。

致谢 本研究得到日本科学振兴会(JSPS)资助。

参考文献:

- [1] Iizuka C, et al. Step-frequency radar[J]. Journal of Applied Physics, 1984, 56(9): 2572 - 2583.
- [2] Daniels D J. Surface penetrating radar[M]. London: The Institute of Electrical Engineers, 1996.
- [3] 方广有,等. FDID 法分析无载频脉冲探地雷达特性[J]. 电子学

报, 1999, 27(3): 74 - 78.

- [4] Güzit E. Improved design of the vivaldi antenna[J]. IEE Proc, Pt H, 1988, 135(2): 89 - 92.
- [5] Langley J D S, et al. Novel ultrawide-bandwidth vivaldi antenna and low cross polarization[J]. Electronic Letters, 1993, 29(23): 2004 - 2005.
- [6] Pozar D M. Microwave engineering[M]. 2nd Ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1998.
- [7] Fang Guangyou, Sato Motoyuki. Optimization of vivaldi antenna for dening by GPR[A]. Proceedings of the 2002 Interim International Symposium on Antennas and Propagation[C]. Tokyo: The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, 2002. 263 - 266.
- [8] Grivet P, et al. The Physics of transmission lines at high and very high frequencies[M]. Volume 1. New York: Academic Press, 1970.
- [9] Fang Guangyou, Sato Motoyuki. Clutter reducing by similarity measurement methods for ground penetrating radar (GPR) [A]. The Technical Meeting on Electromagnetic Theory[C]. Tokyo: The Institute of Electrical Engineers of Japan, 2002. 27 - 32.
- [10] Güzdag J. Wave equation migration with the phase-shift method[J]. Geophysics, 1978, 43(7): 1342 - 1351.
- [11] Yilmaz O. Seismic data processing[M]. New York: Society of Exploration Geophysicists, 1987.
- [12] Johansson E M, et al. Three-dimensional ground penetrating radar imaging using synthetic aperture time-domain focusing[A]. SPIE Proceedings, Vol. 2275[C]. San Diego: The International Society for Optical Engineering, 1994. 196 - 203.

作者简介:



方广有 男, 1963 年出生, 博士, 中国科学院电子所研究员, 博士生导师, 中科院“百人计划”入选者, 1996 年于西安交通大学获得博士学位, 2000 年~2003 年分别以访问学者和特别研究员身份赴意大利科学和高技术国际研究中心、日本东北大学(Tohoku University)等单位从事地下目标探测、超宽带电磁学理论及其工程应用等方面的研究工作。在国内外学术刊物上发表论文四十余篇, 主持完成国家和部级科研项目十余项, 以第一完成人获省部级科技进步一等奖等奖励两项, 国家发明专利一项, 研究兴趣主要有: 超宽带电磁学及其工程应用, 损耗介质中隐蔽目标的电磁探测, 微波成像新技术和新方法, 电磁场的数值计算方法等。E-mail: gyfang@mail.ie.ac.cn

佐藤源之(Sato Motoyuki) 男, 1957 年出生, 日本国立东北大学(Tohoku University)东北亚国际研究中心教授, 主要从事电磁测井, 探地雷达及微波遥感等方面的研究工作。