

关于超宽带雷达技术

方广有

(中国科学院空天信息研究院)

一 发展历程

1865年,英国科学家詹姆斯·克拉克·麦克斯韦在前人研究成果基础上,总结出完美的麦克斯韦方程组,并天才地预言了空间存在以光速传播的电磁波;1888年,德国科学家海因里希·鲁道夫·赫兹在实验室完美地验证了麦克斯韦的预言;1898年,意大利科学家伽利尔摩·马可尼首次利用电磁波实现跨越英吉利海峡的无线电通信实验,1901年完成了从英格兰到加拿大纽芬兰省穿越大西洋的无线电信息传输。随后,科学家开启了利用电磁波改变人类生活方式的时代,在无线通信和雷达探测领域突破了一系列应用技术,尤其在动荡的三四十年代,雷达和无线通信技术更是得到快速发展。

尽管在50年代之前也出现个别专利提出利用电磁波探测介质中的目标,但并没有获得工程应用。50年后期,美军飞行员在北极圈格陵兰冰盖某机场着陆时,雷达高度表出现严重的错误。经过实地测试,科学家发现冰川对雷达波衰减很小,几乎是半透明的,雷达波在冰川表面反射很弱,波穿透了冰川导致高度表错误。这一发现激发了人们利用电磁波探测冰川厚度的研究工作(即Radio Echo Sounder, RES)。之后,科学家发现干燥煤层对电磁波的衰减也很小,研制出若干用于煤层厚度探测的雷达系统(Coal Penetrating Radar)。五六十年代,不论是用于冰川探测,还是用于煤层厚度探测,基本上都是利用电磁波干涉法测量或反演介质层厚度,硬件系统复杂笨重、探测数据解释难度大、分辨率和精度差。另一方面,这一时期科学家在瞬变电磁场领域取得了很好的研究进展,尤其是哈佛大学的Wu和King创造性地提出了渐变阻抗加载偶极子天线理论(Wu-King天线加载理论)^[1],为研制VHF-UHF波段的超宽频带偶极子天线提供了技术途径。可以毫不夸张地说,尽管Wu-King理论是在研究瞬变电磁场基础理论时为了无失真地辐射和接收冲激脉冲信号而提出的,但这一理论方法的出现为发展探地雷达技术提供了强大的助推力。这是因为:电磁波在介质中的衰减随频率升高而急剧增大,为了实现一定深度的探测,希望雷达工作于HF-VHF-UHF频段;同时,地下介质的复杂性以及电磁波在分层介质界面的多次反射等固有问题,基于载频体制的对空雷达无法有效地应用于对地下目标的探测和识别,需要研发无载频、超宽频带雷达技术,直接发射和接收宽度为几~几十纳秒的脉冲信号是较好的选择,Wu-King提出的终端无反射天线理论解决了天线辐射纳秒脉冲时存在的严重拖尾问题(该问题既降低天线效率,又影响雷达分辨率,更是目标识别的巨大障碍),基本可以实现纳秒脉冲的无失真地辐射和接收。

70年代初,美国科研人员Morey等人^[2]研发出基于Wu-King理论的超宽频带偶极子天线(Bow-Tie天线)、基于雪崩三极管的纳秒脉冲发射机,结合采样示波器原理实现周期性纳秒脉冲接收,研制出第一代商业化探地雷达产品,命名为Subsurface Interface Radar(SIR),并成立了首家探地雷达公司(GSSI公司)。受制于当时计算机发展水平,SIR探地雷达的探测数据存储于磁带机中,同时通过黑白色的热敏打印机打印出来。进入80年代后,加拿大、英国、日本等国家先后推出各自的探地雷达产品,探地雷达逐渐为工程技术人员接受并占据一定的工程勘探市场。这一时期,对探地雷达的命名出现了分歧,除GSSI的SIR名称外,还出现了诸如Ground Probing Radar, Video Pulse Radar, Georadar, Subsurface Impulse Radar,等等。90年代初期,探地雷达在各行业领域的应用越来越广泛,大约在1990年第三届探地雷达国际会议上,探地雷达名称规范为Ground Penetrating Radar (GPR)^[3],之后,每两年召开一次国际会议延续至今。

80年代也是国际上研究瞬变电磁场理论及其应用技术的高峰时期,同时,随着电子科学技术的发展进步,利用电路技术实现了超宽频带频率域信号的产生和放大,随之出现了宽频带的调频连续波探地雷达(FMCW-GPR)、频率步进探地雷达(SFCW-GPR)等产品。90年代初期,国际上规范了超宽带的定义,即百分比带宽(Fractional Bandwidth) $FB = 2(F_H - F_L) / (F_H + F_L)$ 大于25%时称为超宽带(Ultra Wide Band, UWB),其中 F_H 、 F_L 分别为工作频率的上限和下限。与常规的窄带雷达(FB 小于1%)、宽带雷达(FB 介于1%~25%之间)相比,超宽带雷达具有诸多的优点:(1)空间分辨率高;(2)实现对介质中隐蔽目标的高分辨率成像探测;(3)目标信息丰富,可得到目标大小、形状、特性等更多物理特征;(4)发射的功率谱密度(PSD)相对较低,对其它电磁系统的干扰小,抗干扰、抗窃听或截取能力强;(5)硬件复杂度低、成本低,不需要复杂的微波射频电路,几乎可以实现全数字化。

90年代以来,超宽带雷达技术得到飞速发展,除探地雷达外,逐渐发展了穿墙成像雷达、机载超宽带合成孔径雷达(SAR)等技术。

国内在这一时期基本经历了从模仿学习、跟跑到并跑等过程,推出了国产替代的探地雷达、穿墙成像雷达和机载超宽带成像雷达等产品或装备。

二 技术现状和发展趋势

受发射功率制约,超宽带雷达的探测距离比较短,主要用于探地和穿墙等领域,出现了一批比较好的商业化产品,国内外的产品性能、技术指标相当,硬件探测能力一般优于国外产品,但在软件的实用性、功能完备性以及人机交互性等方面与国外产品尚有一定差距。就探地雷达而言,在城市环境下的探测深度基本上是5 m以浅,在野外干燥或弱衰减地区可以获得几十米(20~50 m)的可靠数据,个别场景可以实现100 m深度的探测(例如工作于HF频段的伪随机编码脉冲探地雷达PRS-GPR)。

值得指出的是,中国重大科技专项探月工程的实施为探地雷达提供了很好的技术发展和应用机遇,中科院电子所探月团队在实施测月雷达项目过程中实现了一系列关键技术突破:研发出轻量化(小于5 kg)、低功耗(小于10 W)、环境适应性强(月球环境温度 $-190^{\circ}\text{C}\sim+130^{\circ}\text{C}$ 、真空、带电粉尘、太阳高能粒子等)的双通道超宽带探月雷达(嫦娥三号/四号测月雷达),国际上首次利用超宽带雷达技术实现着陆区月壤厚度和次表层岩石地质结构探测^[4];研发出超宽带MIMO成像雷达(嫦娥五号月壤结构探测仪),首次实现采样区月壤分层结构的三维成像探测;研发出火星车全极化超宽带探测雷达,首次获取火星土壤厚度和次表层结构的全极化雷达数据。超宽带雷达获取的月球和火星探测数据已发表一批高水平的研究论文(包括SCIENCE, NATURE等)。

目前,探地雷达技术已相对比较成熟。电磁波与损耗介质相互作用的物理机理决定了探测深度和分辨率是一对互为制约的矛盾体,而增加探测深度和分辨率又是工程应用的永恒需求。尽管提升发射功率可以增加探测深度,但也伴随着接收机饱和导致浅层的探测盲区,一般不采用。提高收发天线增益、发射伪随机编码脉冲信号是增加探测深度的有效途径,值得深入研究。

探地雷达在浅层工程地质探测中得到广泛应用,尤其是在市政道路隐蔽病害探测应用领域。城市道路地下5米以浅是人类活动反复挖掘或破坏的介质层,并且人为埋设目标多,导致雷达数据解译困难,基于机器学习或人工智能(AI)的地下目标识别是当前和今后相当长一个时期研究的焦点,开展此类问题应用研究时,一定要考虑电磁波与地下不同介质或目标体的相互作用关系,唯此,才能研发出真正实用的AI识别算法。

相比于探地雷达,穿墙探测雷达发展较晚,国内外基本同步发展,国内些许领先。尽管如此,穿墙雷达当前的技术现状与用户期望值之间还有较大的距离。一般期望穿墙雷达不仅能给出隔墙人员的数量和分布位置,而且希望知道人员的活动状态、身体姿态甚至是否随身携带有枪支或危险器具等。房间内的家具、墙体、门窗等各种干扰因素的存在导致雷达回波极其复杂,图像解译和识别难度巨大。先进的AI算法是突破穿墙雷达需求目标的有效途径,值得深入研究。同时,提高探测距离和分辨率以及系统轻小型化是硬件技术努力的方向。

近年国内在超宽带雷达及其应用技术领域取得了很多有国际影响力的科研成果,从事该学科技术领域研究的单位越来越多,工程应用单位更多。经与国内同行和学报编辑部商议,决定出版一集超宽带雷达专辑。本专辑在金添教授、孔令讲教授、曾昭发教授、张安学教授、梁步阁教授、杨小鹏教授等同仁以及学报编辑部同志们的共同努力下,征集到了几十遍投稿论文,经同行评审,最终收录39篇论文予以发表。感谢为本专辑付出辛勤劳动的各位教授、同仁、论文作者、审稿人以及编辑部和出版社的同事们。

参 考 文 献

- [1] WU T and KING R. The cylindrical antenna with nonreflecting resistive loading[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1965, 13(3): 369–373. doi: [10.1109/TAP.1965.1138429](https://doi.org/10.1109/TAP.1965.1138429).
- [2] MOREY R M. Continuous subsurface profiling by impulse radar[C]. *Proceedings of Engineering Foundation Conference on Subsurface Exploration for Underground Excavation and Heavy Construction*, New York, USA, 1974: 213–232.
- [3] Excavations and Heavy Construction. Henniker, N. H. p. 213–232. 2nd International Conference on Ground Penetrating Radar, 1998 – Gainesville, Florida, USA.
- [4] MORGAN G A, CAMPBELL B A, CAMPBELL D B, *et al*. Investigating the stratigraphy of mare imbrim flow emplacement with earth-based radar[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2016, 121(8): 1498–1513. doi: [10.1002/2016JE005041](https://doi.org/10.1002/2016JE005041).