

探测地下目标的矩形波导天线的研究设计

王令旭¹, 曾昭发^{1,2*}, 鹿琪^{1,2}, 闫家贺¹, 王浩宇¹, 胡传为^{1,3}

1. 吉林大学 地球探测科学与技术学院, 长春 130026;
2. 国土资源部应用地球物理重点实验室 (吉林大学), 长春 130026;
3. 中国人民解放军 92493 部队, 辽宁 葫芦岛 125000

摘要: 为探究特定介质中地下浅层埋设目标的电磁波探测响应特征, 满足城市地下管线管理及未知目标探测的迫切需求, 基于深入分析矩形波导理论, 笔者设计了一款专为探地雷达系统使用的高性能天线。首先, 依据电磁波在矩形波导中的传播特性, 构建了天线的基础模型, 计算了天线的截止频率, 并选定单极子探针作为有效激励源。其次, 利用电磁仿真平台 (Ansys electronics desktop, AEDT) 中的高频结构仿真器 (high frequency structure simulator, HFSS), 对天线模型进行了数值模拟和优化。通过深入分析单极子探针在矩形波导内的安装位置与插入深度对天线传输特性的影响, 精确调控了天线的 S11 反射系数、电压驻波比 (voltage standing wave ratio, VSWR) 及辐射方向图。最后, 为验证理论分析与仿真结果的准确性, 采用铝箔板材料制作了天线实物, 并在受控的沙槽中使用矢量网络分析仪 (vector network analyzer, VNA) 搭建探地雷达系统进行实地测试, 通过调整天线的探测高度来覆盖不同深度的地下目标。实验结果表明, 该天线能够稳定、准确地识别并成像所有预设目标。基于矩形波导的探地雷达天线, 在精细调节探针的插入深度和其到矩形波导短路面的长度后, 可以实现天线阻抗的最佳匹配, 展现出卓越的定向性、超宽带以及高分辨率等特性, 为城市地下空间管理及未知目标探测提供了一种高效、准确的新工具。

关键词: 高频结构仿真器; 矩形波导; 超宽带天线; 探地雷达

Research and design of rectangular waveguide antenna for underground target detection

WANG Lingxu¹, ZENG Zhaofa^{1,2*}, LU Qi¹, YAN Jiahe¹, WANG Haoyu¹, HU Chuanwei^{1,3}

1. College of Geo-Exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China;
2. Key Laboratory of Applied Geophysics Ministry of Land and Resources of China (Jilin University), Changchun 130026, China;
3. Unit 92493 of Chinese People's Liberation Army, Huludao 125000, Liaoning, China

收稿日期/Received: 2024-07-04; 修订日期/Revised: 2024-11-15; 出版日期/Published: 2025-05-25

基金项目: 陕西省土地工程与人居环境技术创新中心开放基金项目 (2021WHZ0080); NSFC 项目 (42074119); 吉林省军区综合办公室化学武器探测收回工程 ((2022) JMRH168)

第一作者: 王令旭 (1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事工程与环境地球物理装备研究。E-mail: wlx-310@163.com

* 通信作者: 曾昭发 (1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事工程与环境地球物理研究。E-mail: zengzf@jlu.edu.cn

© Editorial Office of World Geology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

Abstract: In order to explore the electromagnetic wave detection response characteristics of shallow underground buried targets in a specific medium and meet the urgent needs of urban underground pipeline management and unknown target detection, a high-performance antenna for ground penetrating radar system was innovatively designed based on the in-depth analysis of the rectangular waveguide theory. Firstly, according to the propagation characteristics of electromagnetic waves in the rectangular waveguide, the basic model of the antenna is constructed, the cut-off frequency of the antenna is calculated, and the monopole probe is selected as the effective excitation source. Secondly, the high frequency structure simulator (HFSS) of Ansys electronics desktop (AEDT) simulation platform was used to carry out numerical simulation and optimization of the antenna model. By in-depth analysis of the influence of the installation position and insertion depth of the monopole probe in the rectangular waveguide on the transmission characteristics of the antenna, the S11 reflection coefficient, voltage standing wave ratio (VSWR) and radiation pattern of the antenna were accurately adjusted. Finally, in order to verify the accuracy of the theoretical analysis and simulation results, the antenna was fabricated with aluminum foil board material, and the ground penetrating radar system was built with vector network analyzer (VNA) in a controlled sand trough environment for field testing, and the detection height of the antenna was adjusted to cover underground targets at different depths. Experimental results show that the antenna can stably and accurately identify all preset targets. The ground penetrating radar antenna based on rectangular waveguide shows excellent directionality, ultra-wideband and high resolution after finely adjusting the insertion depth of the probe and the distance between the probe and the short-circuit surface of the rectangular waveguide to achieve the best matching of antenna impedance, which provides an efficient and accurate new tool for urban underground space management and unknown target detection.

Keywords: HFSS; rectangular waveguide; ultra wideband antenna; ground penetrating radar

0 引言

探地雷达 (ground penetrating radar, GPR) 作为一种无损探测方法已被广泛应用于考古学^[1]、地球物理研究^[2]、探雷^[3]、土木工程^[4]以及土壤含水率计算^[5-6]等方面,近些年来,还被用于行星观测^[7]。

天线是 GPR 系统中最关键的组件之一,其来自空气的能量耦合到地面,造成了能量损失和分散^[8]。两个独立的天线通常用于发射和接收,由于快速切换天线的收发开关需要精准时钟控制,因此将接收器与发射器隔离开来存在一定的困难。为了将目标物体的所需信号与随机信号区分开来,天线必须能够传输具有抑制后期振铃的信号。一般来说,适用于 GPR 系统的天线可以分为几种类型,如电阻负载偶极子^[9-10]、蝴蝶结天线^[11-12]、螺旋天线^[13]和 TEM 喇叭^[14-19]。蝴蝶结天线在许多场景中被广泛使用,因为其工作带宽大,且可以通过各种负载方案抑制后期振铃,但是,这种电抗负载通常以天线中的间隙或插槽方式实现,如果不与任何形式的电阻负载结合使用,则不适合脉冲 GPR 应用,

因为其表现出明显的后期振铃现象会严重降低 GPR 性能。Lestari 等^[20]提出了一种用于改善脉冲辐射的 RC 负载蝴蝶结天线和泡沫吸收器,与无功(电容或电感)负载相比,这种方法可以减少后期振铃,但振铃仍然显示出相对较高的水平。Caratelli 等^[21]利用时域有限差分(finite difference time domain, FDTD)研究了腔背电阻负载蝴蝶结天线,包括最佳电阻负载和近场性能,但没有注意输入阻抗和辐射波形。此外, GPR 系统中使用的大多数领结天线都具有三角形臂,然而,这种天线的阻抗总是具有 $200\ \Omega \pm$ 的高阻抗,在没有阻抗变压器的情况下很难与 $50\ \Omega$ 同轴电缆相匹配^[22]。

近年来,国际天线研究领域出现了多种基于矩形波导^[23-27]的天线系统。矩形波导是一种支持 TE 和 TM 模式的传输介质,用于将电磁能量或功率从空间中的一个点高效传输到另一个点。矩形波导被用做卫星通信、雷达、隔离器、衰减器和开槽线等应用的一部分。在波导内部传播的电磁波可以通过导电壁的反射来进行描述,可以在矩形波导内传播多种模式的电磁波。刘晓勇^[28]对波导宽边缝隙天线的辐射特性进行了分析和研究,讨论了 FDTD 方

法在波导缝隙天线计算中的应用, 将改进的总场散射场方法的加源方式用于波导缝隙天线的激励源设置, 用 FDTD 方法计算了天线的远区辐射场, 并开发了一款用于矩形波导缝隙天线方向图计算的仿真分析软件。闫新胜等^[29]借助仿真模拟软件, 以中心频率 915 MHz 仿真设计了两种矩形波导同轴天线转换器。李剑书^[30]介绍了一种支持后向到前向空间扫描的新型扫频漏波天线的设计方法, 该天线在 Ka 波段范围内可实现 $10^\circ \sim 30^\circ$ 的扫描角度, 具有扫描角度大、匹配特性好和旁瓣低的优点。霍兴瀛等^[31]设计了一种基于长直缝隙漏泄矩形波导的低副瓣漏波天线, 其副瓣电平最大可降低 11.5 dB。周迎等^[32]设计一种工作于 Ku 波段的单脊波导宽边纵缝天线, 使用三维电磁仿真软件 HFSS 进行结构优化, 得到天线具体参数, 设计的单脊波导宽边尺寸是同频段标准矩形波导宽边尺寸的 73%, 天线带宽达到 1.8 GHz, $VSWR < 1.7$, 副瓣电平小于 -20 dB, 增益大于 15 dB。上述天线指向性较好, 有的在特定带宽内具有较高的口径效率, 有的具有较低的剖面高度, 但若综合工程和勘察各个场景使用需求, 天线的工作频段过高、尺寸较大, 无法保证在地下介质中的探测深度, 仍有需要改进提升的空间。

针对上述问题, 笔者提出一种矩形波导天线系统, 用于探测地下浅层埋设目标。天线系统包括两个相同的矩形波导天线, 以寻求良好的辐射方向性。为了提高天线与馈线之间的匹配, 可以通过调节插入深度和波导终端短路距离, 使探针辐射电阻和同轴线的特性阻抗一致, 得到最大传输功率。所设计的天线在 1.02 ~ 1.51 GHz 的工作频率范围内表现出良好的回波损耗和增益性能, 并通过沙槽测试, 验证了矩形波导天线系统的性能。

1 天线设计与结构

考虑在矩形坐标系中排列的两个相同的矩形波导, 其宽度沿 x 轴, 宽度沿 y 轴, 内部尺寸为 $a \times b$, $a = 200$ mm、 $b = 100$ mm, 装有空气作为电介质, 内导体插入到波导腔体中 (图 1)。在矩形波导中, 电场和磁场被限制在波导内的空间内, 电磁波沿“ z ”方向传播。磁场的 z 分量 H_z 必须存在, 才能在矩形波导中进行能量传输。矩形波导中的 TE_{mn} 模式的表征为 $E_z = 0$, 即必须存在磁场 H_z 的 z

段 $\neq 0$, 才能通过波导传输能量。矩形波导中的 TM_{mn} 模式为以 $H_z = 0$ 为特征, 意味着电场 $E_z \neq 0$ 的 z 分量必须存在才能在波导中传输能量。

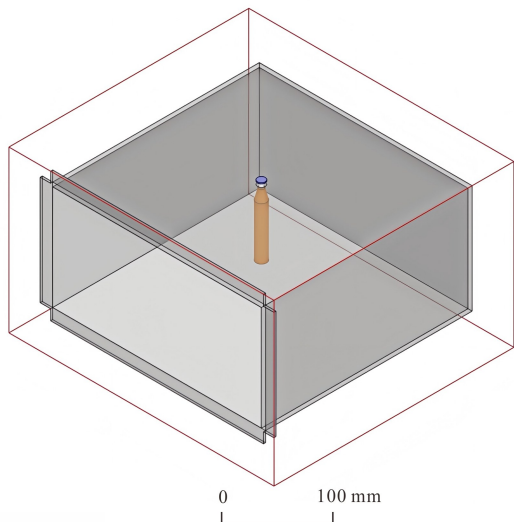


图 1 矩形波导模型

Fig. 1 Rectangular waveguide model

在特定波导中具有最低截止频率的模式称为主模式。矩形波导中的主模为 TE_{10} 模式, 具有低损耗、失真小的特点。 TE_{10} 模式的截止频率为:

$$f_c = \frac{C}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (1)$$

$$\lambda_c = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad (2)$$

式中: f_c 为截止频率 (Hz); a 、 b 为波导尺寸 (mm); m 、 n 为是波导的传播模式; λ 为波导的波长 (mm)。如果让尺寸为 200 mm × 100 mm 的矩形工作在 TE_{10} 模式, 可以计算出其截止频率为 0.75 GHz, 中心频率为 1.25 GHz。

使用紫铜棒单极子探针型波导转换器进行分析。传统的理论模型是以悬空式波导变换为研究对象^[29], 其结构是在矩形波导的宽边中心处开孔, 插入同轴波导的内导体, 使激励效率达到最高。内导体的作用是充当探针天线, 矩形向同轴变换, 内导体作为接收天线, 激励起同轴波导中的 TEM 模式; 同轴向矩形变换, 内导体作为发射天线, 激励起矩形波导中的 TE_{10} 模式。主要转换方法有过渡

鳍线转换、利用脊波导转换^[33]和利用探针转换^[34]，其中探针转换包括同轴探针耦合型和微带探针耦合型。对比其他转化方法，探针转化具有插入损耗低、回波损耗小、频宽较大、水平面上的纯垂直极化和全向辐射方向等特点^[35-36]，且结构紧凑容易加工，在无线通信系统中得到了广泛的应用，例如机载和地面通信系统。单极子探针结构简单，易获得相对良好的匹配^[37]，其最佳长度为工作波长的 $1/4$ ^[38]。笔者选择单极子探针通过矩形波导传输单模式电磁波，是因为在厘米/毫米波频率下，矩形波导仍然优于同轴线或微带线，且其具有低损耗、大功率处理能力和其他波导元件的易用性以及较好的分辨率。

在使用矩形波导天线探测地面时，通常选择垂直极化方式，可以更好地与地面相互作用，对地面反射敏感，极大减少地面反射的干扰，尤其适用于地下浅层掩埋目标探测应用，比如管道、光缆等。这种探测需求决定了单极子天线要从波导宽面插入，能量辐射时垂直于地面，以达到矩形波导工作时采用垂直极化的目的。由于矩形波导中插入了探针并在宽壁上开孔，会在同轴-矩形波导的连接处引入电抗，造成电磁波的反射，使得同轴线和矩形波导失配加剧。Colin^[39]详细分析了这种结构的输入阻抗，令输入阻抗为，则其表达式为：

$$R = \frac{2Z_0}{ab\beta_{10}k_0} \sin^2\beta_{10}l \tan^2 k_0 \frac{d}{2} \quad (3)$$

$$X = \frac{Z_0 \tan^2 \frac{k_0 d}{2}}{2\pi k_0 b} \left\{ \ln \frac{2a}{\pi r} + \frac{0.0518 k_0^2 a^2}{\pi^2} + \frac{2\pi}{\beta_{10} a} \sin 2\beta_{10} l - 2 \left(1 - \frac{2r}{a} \right) - 2k_0^2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[1 - \frac{\sin^2 \left(\frac{n\pi d}{2b} \right)}{\sin^2 \left(\frac{k_0 d}{2} \right)} \right] \frac{k_0 (K_{nr})}{K_n} \right\} \quad (4)$$

式中： l 为探针轴心距波导终端短路距离（mm）； d 为探针插入的深度（mm）； a 、 b 分别波导的宽（mm）和高（mm）。由公式（3）、（4）可以看出探针的输入阻抗与探针直径、插入深度、距离波导终端短路距离以及频率有关，在直径和工作频率一定时，可以通过调节插入深度和波导终端短路

距离，使得探针辐射电阻和同轴线的特性阻抗一致，实现阻抗匹配，使得同轴线传输到矩形波导的功率最大。

2 天线模拟仿真结果

通过 AEDT 中的 HFSS 模拟仿真馈电激励探针单极子铜棒距离矩形波导顶端短路面的安装位置和深入矩形波导内的长度，来确定矩形波导及激励探针的合理尺寸，保证矩形波导天线的最优性能。

2.1 单极子探针的安装位置反射系数

由分析可知，探针应安置在距封闭端 $\lambda/4$ 的位置，且垂直于并位于宽边中央。为保证矩形波导在 TE_{10} 模式下传输电磁波，将探针位置从矩形波导宽边中央的 $1/2$ 位置处向顶端短路面沿着电磁波辐射传播负方向进行移动，以更好的匹配阻抗，获得最佳的安装位置^[28-29, 38-39]（图2）。

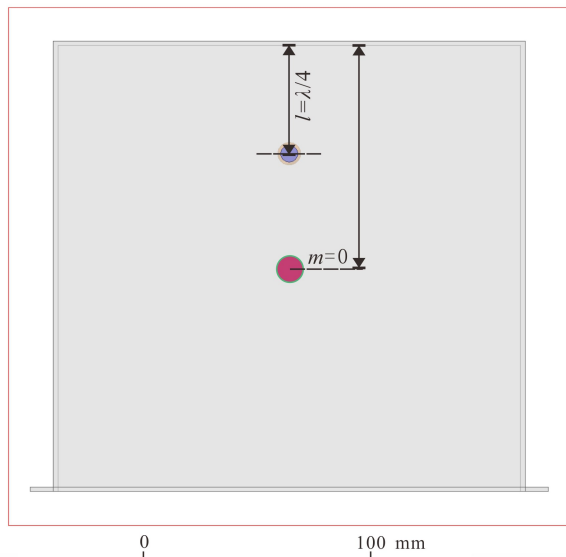
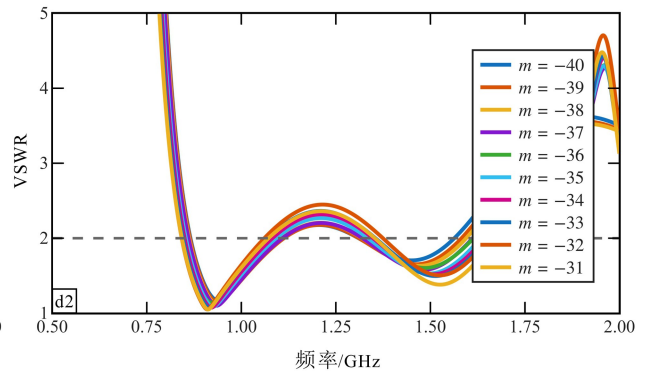
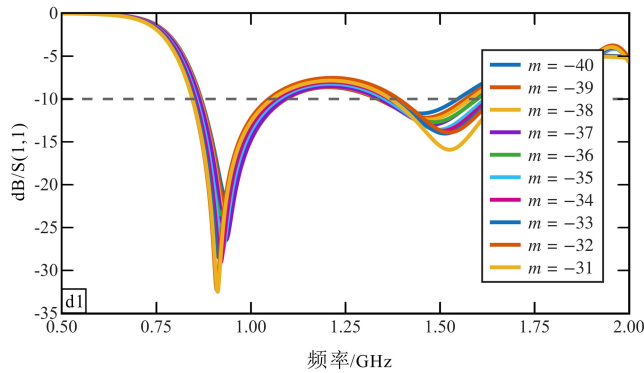
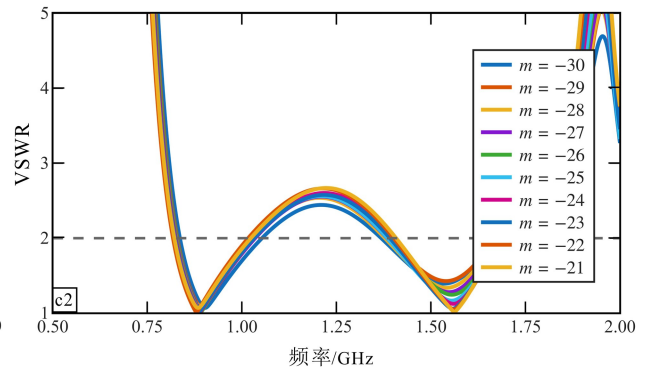
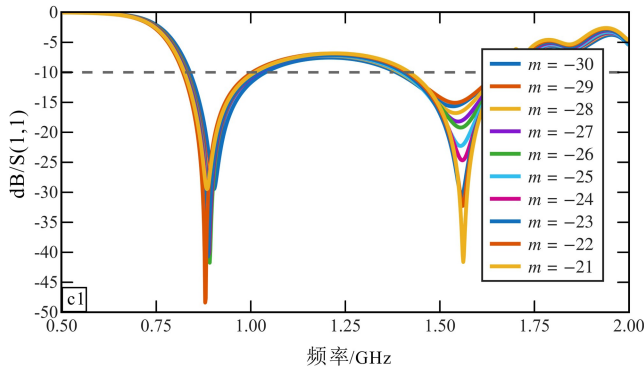
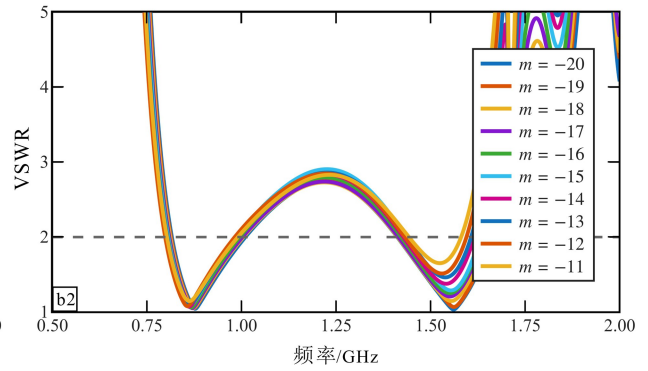
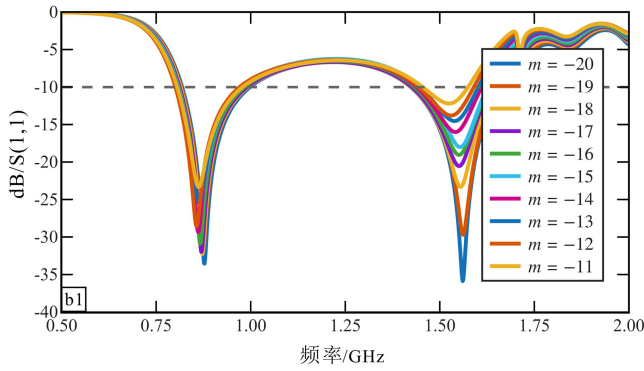
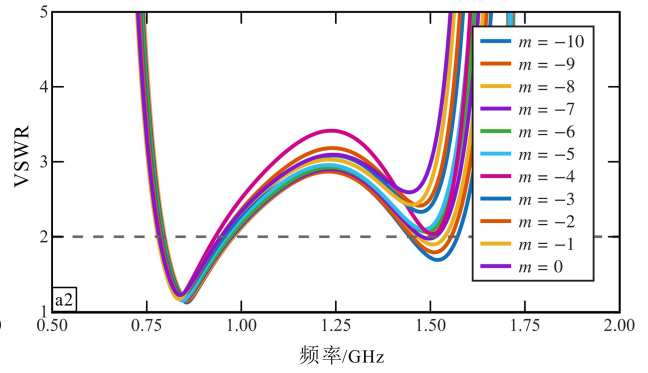
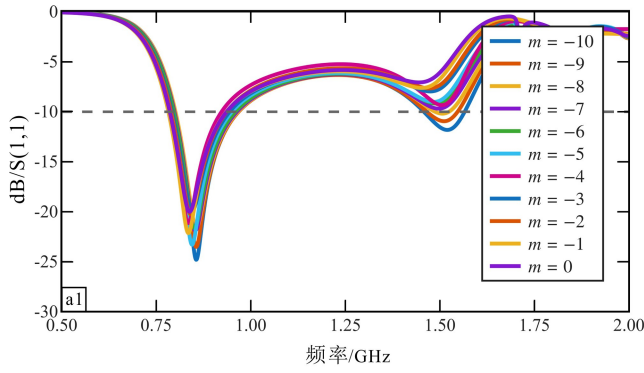
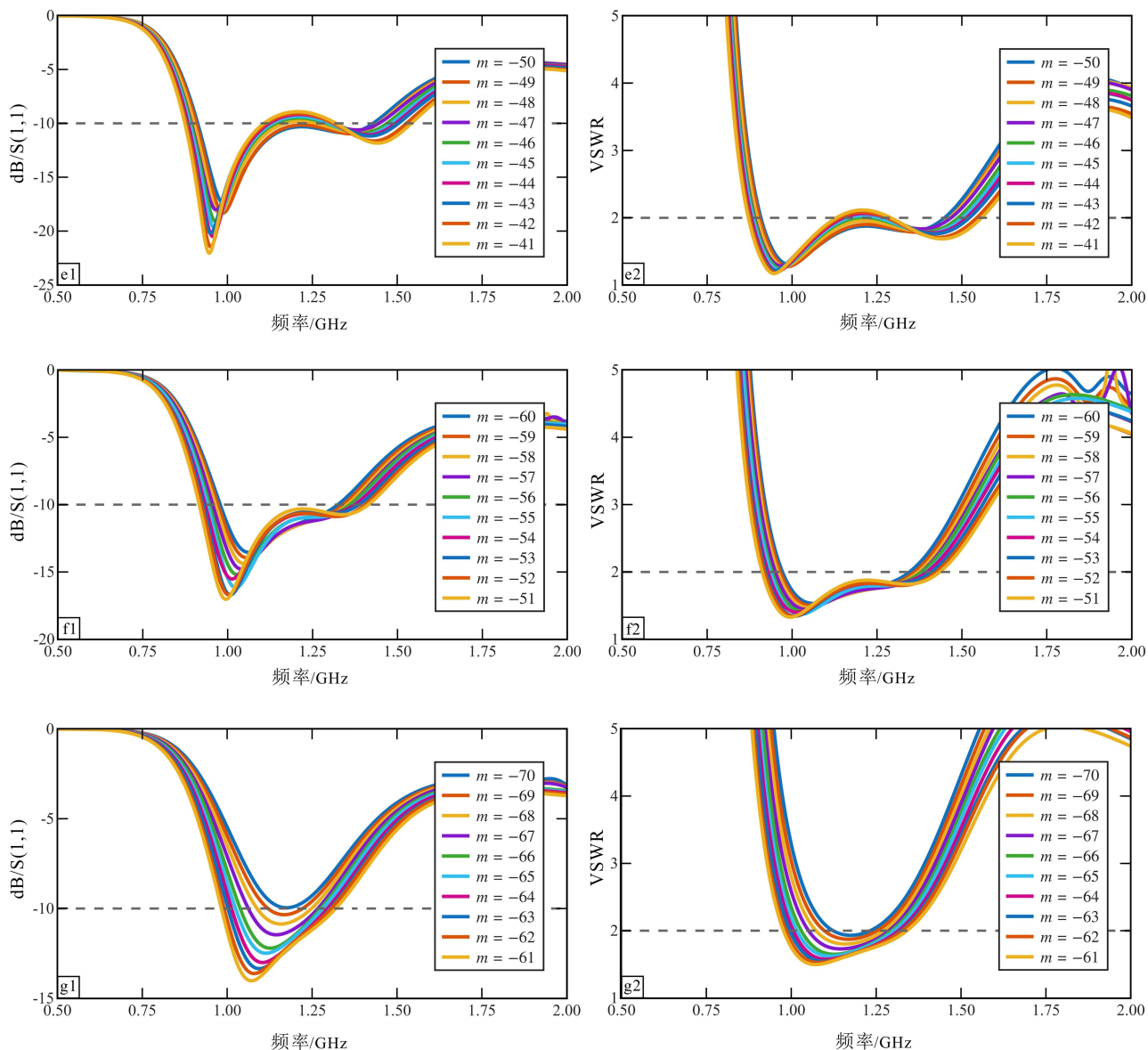


图2 单极子探针的安装位置

Fig. 2 Mounting position of monopole probe

将控制探针在矩形波导宽边中央处向顶端开路面移动的参数 m 取值（ $-70, 0$ ），对比图3中的 S_{11} 反射系数曲线，可以发现当探针安装位置参数 m 的值在（ $-60, -49$ ）范围内， S_{11} 反射系数曲线是连续的，即 S_{11} 数值小于 -10 dB，可用频谱带宽较宽，有较强的抗干扰性能；当 m 在（ $-70, -60$ ）范围内取值时，带宽明显变窄，抗干扰性能变差。





a1-a2. m 取值 (0, -10) 位置处的 S11 反射系数和电压驻波比; b1-b2. m 取值 (-11, -20) 位置处的 S11 反射系数和电压驻波比;
 c1-c2. m 取值 (-21, -30) 位置处的 S11 反射系数和电压驻波比; d1-d2. m 取值 (-31, -40) 位置处的 S11 反射系数和电压驻波比;
 e1-e2. m 取值 (-41, -50) 位置处的 S11 反射系数和电压驻波比; f1-f2. m 取值 (-51, -60) 位置处的 S11 反射系数和电压驻波比;
 g1-g2. m 取值 (-61, -70) 位置处的 S11 反射系数和电压驻波比。

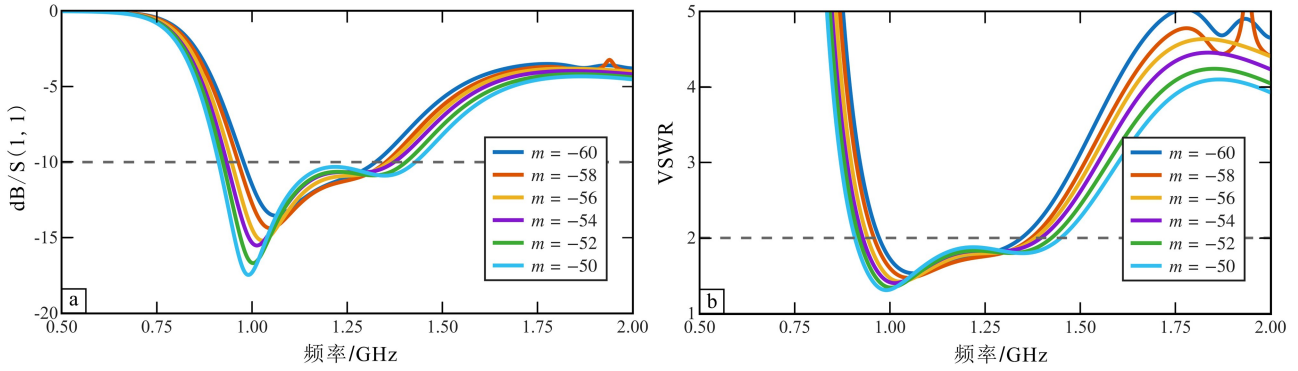
图3 不同的探针安装位置处的 S11 反射系数图和电压驻波比图

Fig. 3 S11 reflection coefficients and VSWR plots at different probe mounting positions

从图4可以看出,通过改变探针轴心距波导终端短路距离 $l = (100 + m)$ 的大小,可以进一步分析 S11 参量的情况。当探针安装位置的值 l 取 $m = -50$ mm 时,可用带宽最大、效果最佳。 $l = 50$ mm 分别对应着约 $1/4$ 波长的长度,这与理论的分析相吻合。

2.2 单极子探针的深入波导长度

探针类似于一个单边的振子,可以用分析振子天线的方法分析探针的辐射。在谐振的情况下,每 $1/4$ 个波长的传输线上的电荷电性相同,且电荷密度同步变化,电性同时反转。所以每 $1/4$ 波长长度上的电流是相干的,其辐射也是相干的,因此能获



a. m 取值 $(-60, -50)$ 位置处的 S11 反射系数; b. m 取值 $(-60, -50)$ 位置处的电压驻波比。

图 4 探针安装位置在 m 取值 $(-60, -50)$ 处的 S11 反射系数图和电压驻波比图

Fig. 4 S11 reflection coefficients and VSWR plots for probe installation location at $m = (-60, -50)$

得最强的辐射, 所以振子天线通常取 $1/4$ 波长长度 (图 5)。矩形波导在垂直于探针本身的方向有一边是开放的, 且该方向辐射最强。

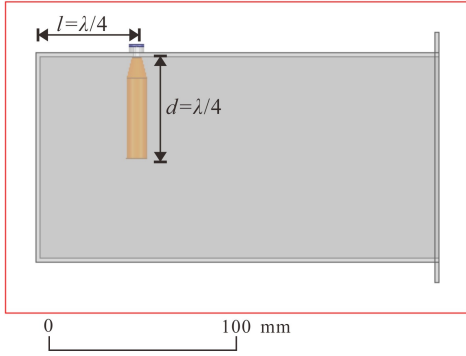


图 5 单极子探针的深入波导内长度

Fig. 5 Length of monopole probe into waveguide

图 6 中的变量 $h2$ 是附加在探针深入的圆锥体面初始长度 10 mm 的一个变量, 当探针安装位置确定时, 缩短和加长探针深入长度会导致耦合效果发生变化。本文设计主要是为了探测地下浅层埋设目标, 保留电磁波信号数据中的高频成分可以更好地识别目标, 由图 6 可知, 探针深入矩形波导的最佳长度为 50 mm (即 $h2 = 40$ mm, 蓝色曲线所示), 该长度正是约 $1/4$ 波长。

2.3 矩形金属波导天线优化结果分析

通过以上对矩形波导天线的设计分析, 并经过大量的理论计算和仿真优化后确定了最终的天线结构参数如表 1 所示。

如图 7 所示, 矩形波导电场分布 (图 7a) 和磁场分布 (图 7b) 分析与理论计算结果基本一致, 同时比较图 7a 和图 7c 可以发现, 矩形波导内壁上电流分布与波导内部电场分布也基本一致。

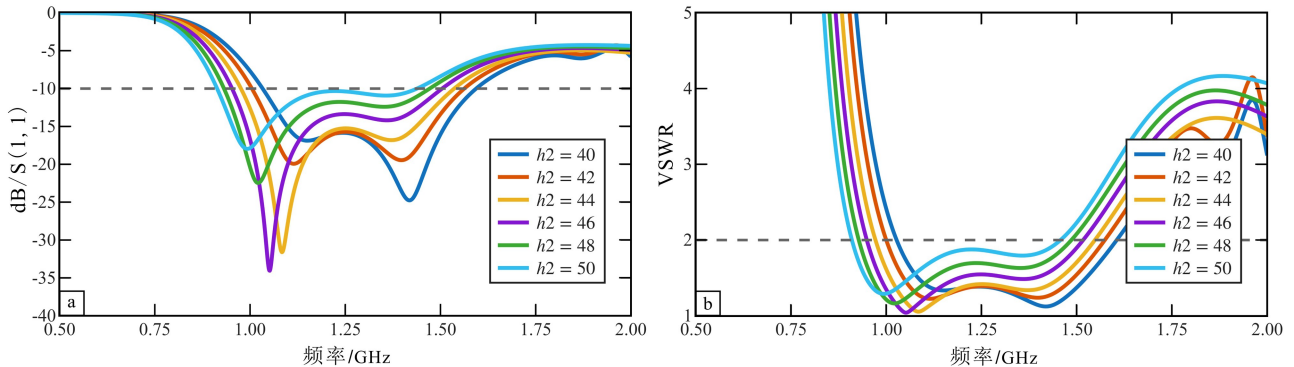
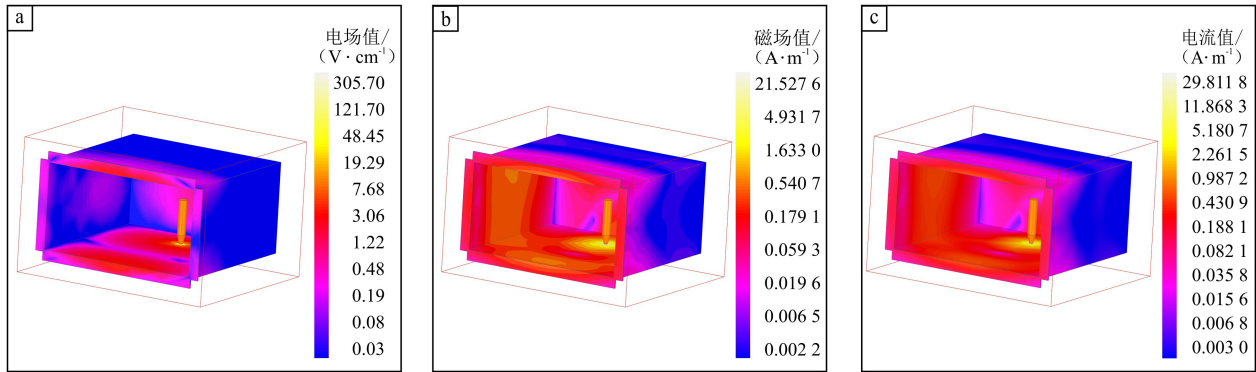


图 6 单极子探针深入波导内长度 ($d = h1 + h2$, $h1 = 10$ mm) 的 S11 反射系数图和电压驻波比图

Fig. 6 S11 reflection coefficients and VSWR plots of different length of monopole probe into waveguide ($d = h1 + h2$, $h1 = 10$ mm)

表 1 优化后矩形波导天线结构参数

设计变量名	参数值/mm
波导宽边长 a	200
波导短边长 b	100
单偶极子铜棒的安装位置（距离顶端短路面）	50
单偶极子铜棒探针的深入长度 d （ $h_1 + h_2$ ， h_1 为铜棒顶端圆锥面体长度）	10 + 40



a. 矩形波导电场分布图；b. 矩形波导磁场分布图；c. 波导内壁面电流分布图。

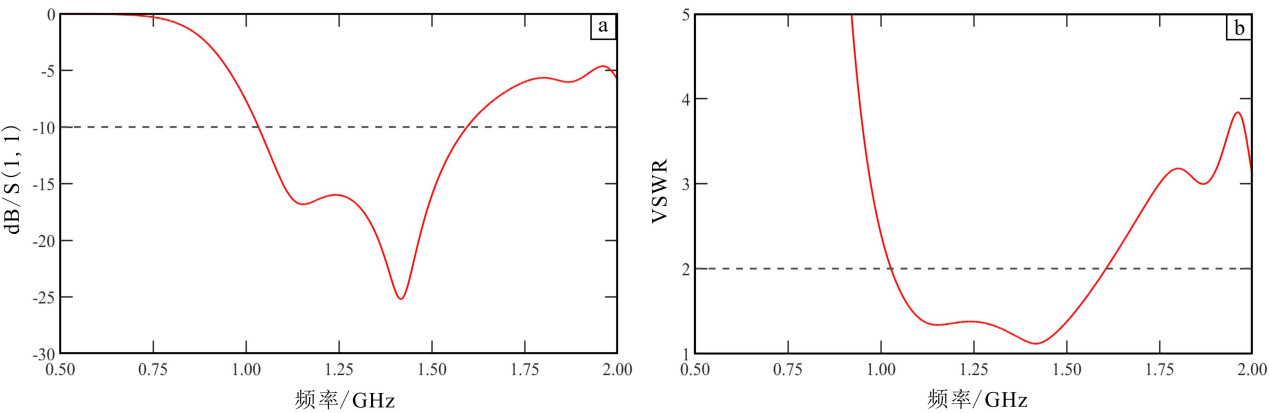
图 7 矩形波导电场、磁场、波导内壁面电流分布图

Fig. 7 Current distribution diagrams of electric field, magnetic field and inner wall of waveguide in rectangular waveguide

2.3.1 天线的反射系数和驻波比

对设计的矩形波导天线进行仿真优化，得出各参数的最优解。单极子探针插入波导内长度和其距波导顶端短路面分别为 50 mm 和 50 mm 时，天线整体性能表现最优。优化后的探地雷达天线的频域性能参数如图 8 所示。

可以看出，优化后的探地雷达矩形波导天线阻抗带宽为 1.02 ~ 1.59 GHz，在频率为 1.15 GHz 和 1.40 GHz 时匹配最好，满足设计指标 0.90 ~ 1.50 GHz 的工作频带要求，在工作频段内驻波比 VSWR < 2，各项参数满足设计要求。



a. 优化后的 S11 反射系数；b. 优化后的电压驻波比。

图 8 优化后矩形波导天线整体性能

Fig. 8 Overall performance of optimized rectangular waveguide antenna

相对带宽的计算公式：

$$FFoc = 2 (F_h - F_l) / (F_h + F_l) \quad (5)$$

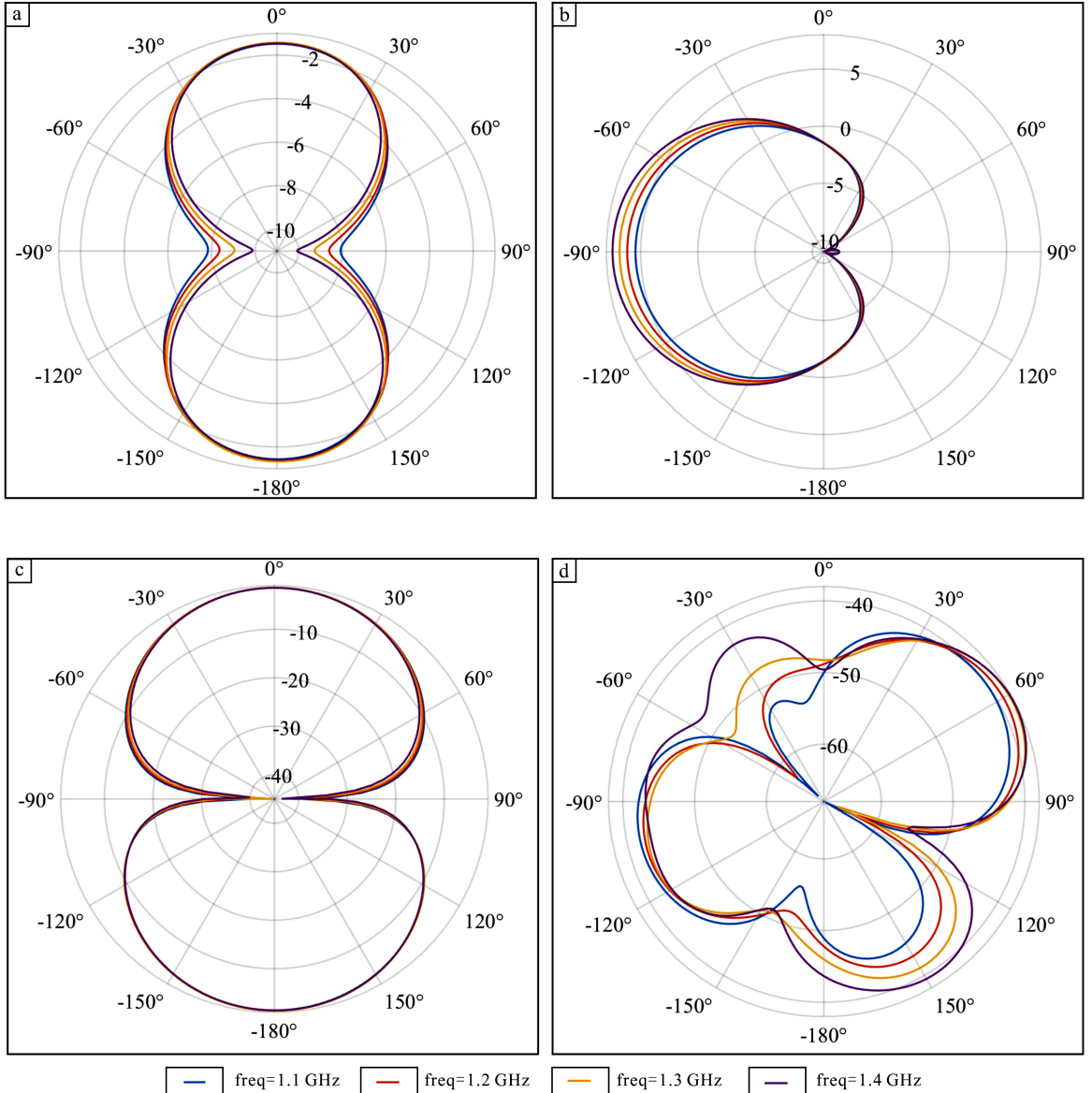
式中： F_h 和 F_l 分别表示上限和下限频率 (GHz)，可得其相对带宽达到 43.68%，天线的频域性能优越。

2.3.2 天线辐射方向图

天线辐射方向图一般用来表征天线的远场特性，是衡量天线性能的重要指标。将矩形波导天线

在频率分别为 1.10 GHz、1.20 GHz、1.30 GHz 和 1.40 GHz 进行仿真模拟，天线的辐射方向如图 9 所示，对应的三维辐射方向如图 10 所示。

由图 9 和图 10 可知，E 面和 H 面的辐射主瓣宽度都在 180° ，天线的定向辐射特性良好。随着频率的逐渐增加，天线表面有效辐射电流增大，增益也快速上升，频带内辐射主瓣突出，证明天线辐射特性优越。



a. E 面方向总增益图；b. H 面方向总增益图；c. E 面垂直极化方向图；d. H 面垂直极化方向图。

图 9 优化后矩形波导天线辐射方向图

Fig. 9 Radiation patterns of optimized rectangular waveguide antenna

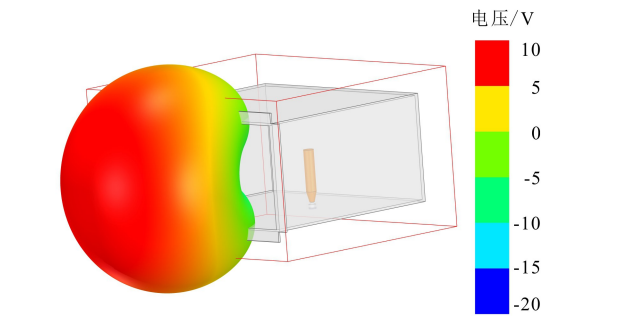


图 10 优化后矩形波导天线三维辐射方向图
Fig. 10 Three-dimensional radiation pattern of optimized rectangular waveguide antenna

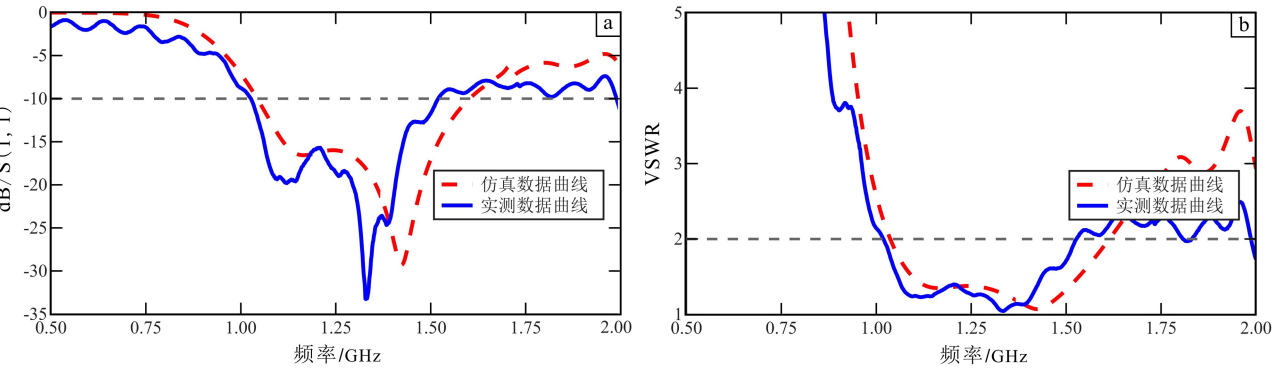
2.3.3 实物参数对比

将矩形波导天线按照仿真结果进行制作，并使用 VNA（Agilent N9925A Field Fox 手持微波矢量网络分析仪）测量回波反射损耗 S11 参数和驻波比 VSWR 参数，结果如图 11 所示。

由图 11 可知，探地雷达矩形波导天线实测结果与仿真曲线趋势大体相同，阻抗带宽为 1.00 ~ 1.52 GHz，在频率为 1.10 GHz 和 1.30 GHz 时匹配最好，满足设计指标 0.90 ~ 1.50 GHz 的工作频带要求，在工作频段内驻波比 $VSWR < 2$ ，各项参数满足设计要求，且相对带宽达到 41.27%，比仿真设计降低了 2.41%，这是由于制作误差引起的，但仍然符合超短带天线的要求，天线的频域性能同样优越。

3 探测实验与数据分析

为了进一步验证矩形波导天线性能，测试实验所选择的场地为实验室内充满干沙介质的沙槽，沙槽长度为 9.0 m，深度为 1.1 m，沙槽中预先埋置 3 根铜管和 4 根 PVC 管，埋深为 20 cm、30 cm 和 40 cm，沙槽实物探测模型如图 12 所示。



a. S11 反射系数仿真与实测数值对比；b. 电压驻波比仿真与实测数值对比。红色代表仿真值，蓝色代表实测值。

图 11 矩形波导天线实物与模拟仿真整体性能对比
Fig. 11 Comparison of overall performance between actual and simulated rectangular waveguide antenna

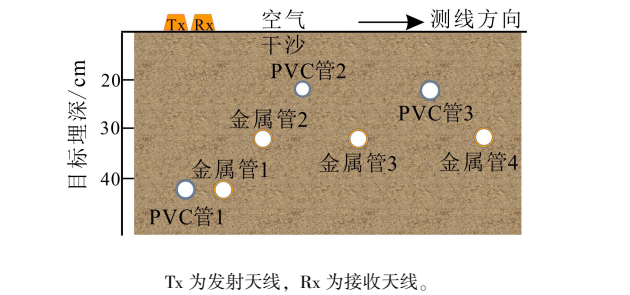
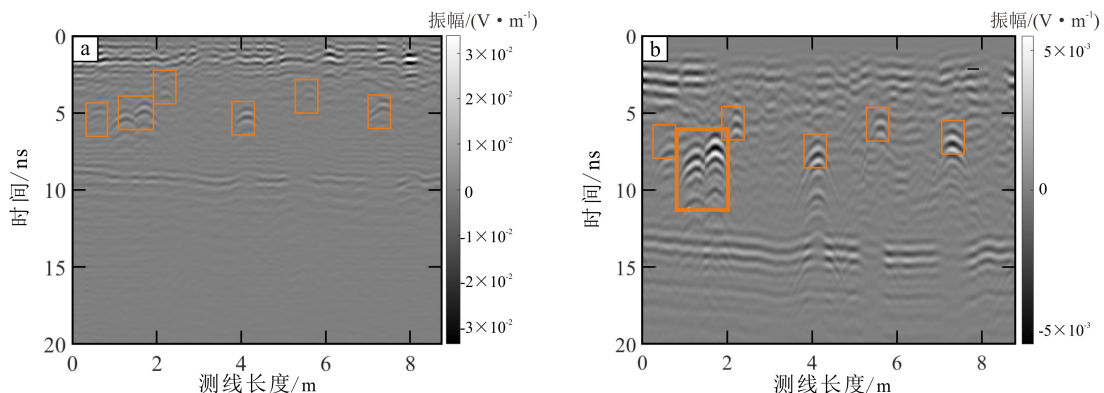


图 12 实验室沙槽探测环境
Fig. 12 Detection environment of laboratory sandbox

为精准掌握矩形金属波导天线在不同离地高度下对塑料管和金属管的响应，对沙槽中预先埋入的根塑料管和紫铜金属管，进行了单/双站天线在不同离地高度的探测实验。在实验过程中，将收发天线置于沙槽表面，采用剖面法探测方式，从沙槽一端沿测线方向慢慢移动，天线移动步距 5 cm，记录 180 个测点数据。天线离沙槽介质表面高度分别为 5 cm、10 cm、24 cm 和 50 cm。

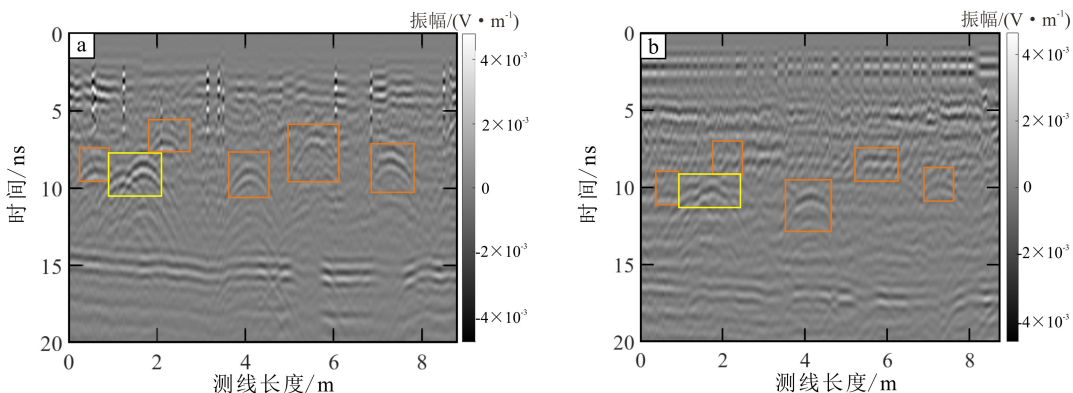
将得到的数据进行去除直达波处理和增益、均衡处理后得到实验测试结果（图 13、14）。



a. 天线距离沙槽表面 5 cm 时单基站天线采集数据成像; b. 天线距离沙槽表面 10 cm 时双基站天线采集数据成像。

图 13 矩形波导天线离地 5 cm 和 10 cm 时单、双基站天线采集数据成像效果

Fig. 13 Imaging effect of data collected by single and dual base station antennas when rectangular waveguide antenna are 5 cm and 10 cm above the ground



a. 天线距离沙槽表面 24 cm 时双基站天线采集数据成像; b. 天线距离沙槽表面 50 cm 时双基站天线采集数据成像。

图 14 矩形波导天线离地 24 cm、50 cm 时双基站天线采集数据成像效果

Fig. 14 Imaging effect of data collected by dual base station antennas when rectangular waveguide antenna are 24 cm and 50 cm above the ground

由图 13、14 可知, 采用双基站天线采集数据成像目标体双曲线响应得到显著增强, 沙槽中浅埋管线分布清晰可辨, PVC 塑料管的电磁响应能量增大, 金属管电磁响应现象也得到加强。随着双基站天线距离沙槽介质表面高度的增加, 天线对两种管的响应皆有所减弱; 3 根 PVC 管介电常数较小, 随着天线距离地面的高度增加, 剖面图中双曲线的响应逐渐减弱, 但仍可以被识别出来; 剩下的 4 根金属管由于介电常数与干沙差异大, 反射信号明显, 但对相邻埋设的两根金属管分辨力降低 (图 14b 黄色区域所示), 这是由于两根管子的水平埋

设距离只有 55 cm, 天线离地高度为 50 cm, 相对较近, 垂直埋设距离只有 10 cm。根据探地雷达的基本理论可知, 一般在探测过程中, 两个目标体之间的距离要大于 $1/2$ 波长, 当天线选择空气耦合方式工作时, 从地面到天线位置高度延伸到一个 1.5 倍波长^[40], 可以将两个波形进行区分, 反之则不能区分。

4 结论

(1) 采用 AEDT 电磁仿真平台中 HFSS 对天线进行了设计优化, 通过精细调节探针的插入深度及

距矩形波导终端短路面的长度来实现天线阻抗的最佳匹配,精确调控了天线的 S11 反射系数、电压驻波比 (VSWR) 及辐射方向,并在 1.02 ~ 1.59 GHz 频段范围内获得了良好的阻抗匹配和辐射特性。根据设计的天线结构,加工测试了实物天线,实测结果与仿真曲线趋势大体相同,阻抗带宽为 1.00 ~ 1.52 GHz,在频率为 1.10 GHz 和 1.30 GHz 时匹配最好,且相对带宽达到 41.27%,符合超宽带天线特征。

(2) 基于 VNA 构建了探地雷达系统,在沙槽中通过调整天线的探测高度以覆盖不同深度的地下目标,7 个预埋目标全部检出,随着天线距离地面高度逐步升高到 50 cm, PVC 管的电磁响应减弱程度明显,金属管的电磁响应减弱程度则不明显,但当天线离地高度与两根金属管水平埋设距离相近时,则会降低其水平分辨率。

(3) 探测实验结果证明,基于矩形波导的探地雷达天线,展现出了卓越的定向性、超宽带以及高分辨率等特性,天线探测精度高,成像质量好,能够对地下浅层目标进行探测,验证了天线的优越性能。

参考文献:

- [1] ALASTAIR R, BENJAMIN R. Combined use of drones and geophysics in enhancing cemetery studies: two case studies in northern Ireland, UK [J]. *Archaeological Prospection*, 2024, 31 (4): 299–306.
- [2] LAN R, LIU Z, LIU M, et al. Detection of karst caves during tunnel construction using ground-penetrating radar and advanced drilling: a case study in Guangxi Province, China [J]. *Near Surface Geophysics*, 2022, 20: 265–278.
- [3] STADLER S, SCHENNEN S, HILLER T, et al. Realistic simulation of GPR for landmine and IED detection including antenna models, soil dispersion and heterogeneity [J]. *Near Surface Geophysics*, 2024, 22: 188–205.
- [4] WU H K, SHU Z L, LIU C W, et al. Experimental research on the detection of inner defects of bellows based on ground penetrating radar [J]. *Russ J Nondestruct Test*, 2020, 56: 516–526.
- [5] LU Q, LIU K, ZENG Z, et al. Estimation of the soil water content using the early time signal of ground-penetrating radar in heterogeneous soil [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15 (12): 3026.
- [6] ZHOU H Q, LU Q, DONG Z J, et al. Mapping agricultural soil water content using multi-feature ensemble learning of GPR data [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2024, 227: 105433.
- [7] LI C, ZHENG Y, WANG X, et al. Layered subsurface in Utopia Basin of Mars revealed by Zhurong rover radar [J]. *Nature*, 2022, 610: 308–312.
- [8] WAGNER S, HOSSAIN A, PANCRAZIO S, et al. System-based specifications for better design of ground-penetrating radar antennas [J]. *IET Microw Antennas Propag*, 2023, 17 (6): 478–493.
- [9] ISMAIL M S, ELDAMAK A R, GHALI H A. Bandwidth enhancement for meander dipole antenna in MHz range [C] //2020 37th National Radio Science Conference (NRSC), Cairo, Egypt, 2020: 24–29.
- [10] JADID M, DELAVEAUD C, BORIES S, et al. Single substrate electrically small Huygens dipole antenna design with reactive loading [C] //2022 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Sydney, Australia, 2022: 51–52.
- [11] WU J, MA J, SHI B, et al. Design of an ultra-wideband low-profile directional bowtie antenna for ground-penetrating radars [C] //2024 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Beijing, China, 2024: 1–3.
- [12] YANG G, YE S, JI Y, et al. Radiation enhancement of an ultra wideband unidirectional folded bowtie antenna for GPR applications [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 182218–182228.
- [13] GRIGOR F N, MASOUMI R, KAZEMI R. Development of a fully planar logarithmic spiral antenna with integrated balun in UWB GPR systems for landmines detection [J]. *Electromagnetics*, 2022, 42 (8): 559–570.
- [14] MUZALEVSKIY K, FOMIN S, KARAVAYSKIY A, et al. Measuring biophysical parameters of wheat canopy with MHz- and GHz-frequency range impulses employing contactless GPR [J]. *Remote Sensing*, 2024, 16 (19): 3547.
- [15] KRABBE L, HABERBERGER N, STELZIG M, et al. Design and verification of a versatile and lightweight radar platform for high-resolution imaging of glacial subsurface structures [J]. *IEEE Journal of Microwaves*, 2024, 4 (4): 871–880.
- [16] MATTHEW J C, BRIAN B, ASGER E. Synthetic modelling of railway trackbed for improved understanding of ground penetrating radar responses due to varying conditions [J]. *Near Surface Geophysics*, 2024, 22

- (2): 206–219.
- [17] SUO Y, QI F, LI W. Design of exponential gradient TEM horn antenna for ground penetrating radar [C] // 2021 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Taipei, Taiwan, 2021: 1–2.
- [18] WU K, LAMBOT S. Effect of radar incident angle on full-wave inversion for the retrieval of medium surface permittivity for drone-borne applications [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1–10.
- [19] GAO L, DACHENA C, WU K, et al. Full-wave modeling and inversion of UWB radar data for wave propagation in cylindrical objects [J]. Remote Sensing, 2021, 13 (12): 2370.
- [20] LESTARI A A, YAROVY A G, LIGHTART L P. Capacitively tapered bowtie antenna [C] // Proceedings of the Millennium Conference on Antennas and Propagation (AP'00), Davos, Switzerland, 2000: 1–4.
- [21] CARATELLI D, YAROVY A G, LIGHTHART L P. Full-wave analysis of cavity-backed resistively loaded bow-tie antennas for GPR applications [C] // Proceedings of the 5th European Radar Conference (EuRAD'08), Amsterdam, The Netherlands, 2008: 204–207.
- [22] PI S, WANG T, LIN J. Directional and high-gain ultra-wideband bow-tie antenna for ground-penetrating radar applications [J]. Remote Sensing, 2023, 15 (14): 3522.
- [23] 赵文来, 杨俊秀, 孔艳岩, 等. 基于有限元的传输线接头及波导波长仿真实验设计 [J]. 大学物理实验, 2024, 37 (5): 72–77.
- ZHAO W L, YANG J X, KONG Y Y, et al. Experimental design of transmission line joint and waveguide wavelength simulation based on finite element [J]. University Physics Experiment, 2024, 37 (5): 72–77.
- [24] 李泽坤, 汤一铭, 杜勇, 等. 毫米波段阶梯波导转换器 [J/OL]. 光通信研究, 1–7 [2024–11–29].
- LI Z K, TANG Y M, DU Y, et al. Stepped waveguide converter in the millimeter wave band [J/OL]. Optical Communication Research, 1–7 [2024–11–29].
- [25] 魏溢宏, 李相强, 苏奕宇, 等. 高功率高效率开口波导阵列天线设计与实验 [J]. 强激光与粒子束, 2024, 36 (7): 47–57.
- WEI Y H, LI X Q, SU Y Y, et al. Design and experiment of high-power and high-efficiency open waveguide array antenna [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2024, 36 (7): 47–57.
- [26] LI S, YAO Y, CHENG X, et al. Design of a dual-band filter based on the band gap waveguide [J]. Electronics, 2024, 13 (20): 3982.
- [27] MONEBI A M, LEE C S, AHN B C, et al. Design of a Ku-band monopulse antenna with a truncated reflector and an open-ended waveguide feed [J]. Sensors, 2023, 23 (1): 118.
- [28] 刘晓勇. 矩形波导缝隙天线分析与计算 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- LIU X Y. Analysis and calculation of rectangular waveguide slot antenna [D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
- [29] 闫新胜, 赵连敏, 刘甫坤, 等. 矩形波导转微波谐振腔同轴天线的仿真设计 [J]. 真空电子技术, 2019 (3): 55–58.
- YAN X S, ZHAO L M, LIU F K, et al. Simulation design of rectangular waveguide-to-microwave resonator coaxial antenna [J]. Vacuum Electronic Technology, 2019 (3): 55–58.
- [30] 李剑书. 电磁超材料可重构波束扫描漏波天线研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2024.
- LI J S. Research on reconfigurable beam-scanning leakage antenna of electromagnetic metamaterials [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2024.
- [31] 霍兴瀛, 李铮. 基于漏泄矩形波导的低副瓣漏波天线 [J]. 微波学报, 2021, 37 (1): 32–36.
- HUO X Y, LI Z. Low sidelobe leaky antenna based on leakage rectangular waveguide [J]. Journal of Microwave, 2021, 37 (1): 32–36.
- [32] 周迎, 周以国. 一种宽带单脊波导缝隙天线的设计与仿真 [J]. 科技创新与应用, 2024, 14 (27): 139–142.
- ZHOU Y, ZHOU Y G. Design and simulation of a broadband single-ridge waveguide slot antenna [J]. Science and Technology Innovation and Application, 2024, 14 (27): 139–142.
- [33] HUANG Y X, YAN Y X, YANG Y J, et al. Broadband low-loss four-way power divider using composite cavity [J]. IEEE Microwave and Wireless Technology Letters, 2024, 34 (6): 595–598.
- [34] LIU P, LI J L, LI Z P, et al. Design of ultra-wideband double-ridge-waveguide to microstrip transition using E-plane probe [C] // 2024 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT),

Beijing, China, 2024: 1–3.

[35] 许文文. 基于特征模理论的机载阵列天线研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2024.

XU W W. Research on airborne array antenna based on eigenmode theory [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2024.

[36] 王崧. 方向图可重构天线及其阵列研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2023.

WANG X. Research on reconfigurable antenna and its array [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.

[37] 李倬涛. 超宽带小型化天线技术与应用研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2021.

LI Z T. Research on technology and application of ultra-wideband miniaturized antenna [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.

[38] 张炫. 宽频带电磁偶极子天线设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.

ZHANG X. Design of wideband electromagnetic dipole antenna [D]. Xi'an: Xidian University, 2020.

[39] COLIN C E. 导波场论 [M]. 第一版, 侯元庆, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 1966: 249–262.

COLIN C E. Theory of guided wave field [M]. 1st Edition, HOU Yuanqing, translated, Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1966: 249–262.

[40] 咎月稳, 苏国锋, 魏文涛, 等. 高铁隧道车载探地雷达检测技术及其应用 [J]. 现代隧道技术, 2018, 55 (增刊2): 1288–1294.

ZAN Y W, SU G F, WEI W T, et al. Vehicle mounted ground penetrating radar detection technology and its application in high-speed railway tunnels [J]. Modern Tunneling Technology, 2018, 55 (Suppl. 2): 1288–1294.