

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508231

# 无人机电探地雷达原型系统设计\*

李松<sup>1,2</sup> 高嵩<sup>1,2</sup> 曾庆刚<sup>2</sup> 辛翔<sup>2</sup> 唐洪豆<sup>2</sup> 吴嘉豪<sup>2</sup> 袁林<sup>2</sup>

(1. 成都理工大学地球勘探与信息技术教育部重点实验室 成都 610059; 2. 成都理工大学机电工程学院 成都 610059)

**摘要:**为高效实现对潜在不稳定斜坡的基覆界面大深度探测,研制无人机电探地雷达。剖析频率步进连续波探地雷达体制原理,论证了无人机电探地雷达原型系统的关键参数指标。基于矢量网络分析仪的测量原理、扫频方式和能够执行时域反射测量的特点,选型轻量化 N9914A 手持式矢量网络分析仪开发了雷达波收发机,即使用手持终端作为上位机,部署采集软件并导入编写的脚本文件,通过网络接口控制矢量网络分析仪按时间自动存储数据文件。研制小尺寸(66 cm×10 cm×0.1 cm)低频空气耦合天线,实现频率步进连续雷达波的辐射与接收,集成了一种基于手持式矢量网络分析仪的低频无人机电探地雷达原型系统。通过原型系统的性能和收发功能测试,结果表明系统的工作带宽达到 20~150 MHz,信号发射功率大于 5 W,收发功能满足实验设计要求。将原型系统挂载于无人机,在四川省营山县消水镇大秧坪滑坡点开展野外试验,结果表明测线 7-7'B-scan 图像中的反射界面的深度约为 11.5 m(土壤的相对介电常数为 9),与已知地质剖面中粉质黏土与泥岩的分层界面吻合,满足大于 10 m 探测深度的需求。

**关键词:** 无人机;探地雷达;矢量网络分析仪;低频空耦天线;原型系统

**中图分类号:** TN958.6; TH763 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

## Design of ground penetrating radar prototype system for unmanned aerial vehicle

Li Song<sup>1,2</sup> Gao Song<sup>1,2</sup> Zeng Qinggang<sup>2</sup> Xin Xiang<sup>2</sup> Tang Hongdou<sup>2</sup> Wu Jiahao<sup>2</sup> Yuan Lin<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Earth Exploration and Information Technology of Ministry of Education, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** To efficiently achieve in-depth detection of the deposit-bedrock interface of potentially unstable slopes, a ground-penetrating radar for the unmanned aerial vehicle was developed. The principle of the stepped-frequency continuous wave ground-penetrating radar prototype system was analyzed, and this study demonstrated the key parameters of the unmanned aerial vehicle-borne ground-penetrating radar prototype system. Based on the measurement principle, scanning frequency mode, and the feature of being able to perform time-domain reflectometry measurement of the vector network analyzer, this study selected the lightweight N9914A handheld vector network analyzer to develop a radar transceiver. Specifically, the handheld terminal is used as the master computer, the acquisition software is deployed and the written script file is imported. And vector network analyzer is controlled through the network interface to automatically store data files by time. A small-sized (66 cm×10 cm×0.1 cm) low-frequency air-coupled antenna was developed to achieve the radiation and reception of the stepped-frequency continuous radar waves, and a prototype system of low-frequency unmanned aerial vehicle-borne ground-penetrating radar based on a handheld vector network analyzer was integrated. Through performance and transceiver function tests of the prototype system, the results show that the working bandwidth of the system reaches 20 to 150 MHz and the signal transmission power is greater than 5 W, and its transceiver function meets the requirements of the experimental design. The prototype system was mounted on an unmanned aerial vehicle, and field tests were conducted at the Dayangping landslide site in Xiaoshui Town, Yingshan County, Sichuan Province. The results show that the depth of the reflection interface in the 7-7'B-scan image of the survey line

收稿日期:2025-03-11 Received Date: 2025-03-11

\* 基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3003202)项目资助

is approximately 11.5 m (the relative dielectric constant of the soil is 9), which is consistent with the stratified interface of silty clay and mudstone in the known geological section, meeting the requirement of a detection depth greater than 10 m.

**Keywords:** UAV; GPR; VNA; low frequency air-coupled antenna; prototype system

## 0 引言

探地雷达 (ground penetrating radar, GPR) 是利用天线发射和接收电磁波来探测介质内部物性和分布规律的一种地球物理探测技术,被广泛应用于道路检测<sup>[1-2]</sup>、管线探测<sup>[3-4]</sup>、隧道超前预报<sup>[5-6]</sup>、考古<sup>[7-8]</sup>、工程地质<sup>[9]</sup>、地下未爆物探测<sup>[10-12]</sup>等行业。

无人机电载 (unmanned aerial vehicle borne, UAV-Borne) 探地雷达与一般地面探地雷达相比,能对被植被覆盖的区域、地形起伏大的区域或人类无法到达的危险区域等执行大面积快速探测任务。但随着作业方式的改变,天线不满足地面耦合条件,且会受到地表植被、复杂地形的杂波干扰,这会使得探测深度显著降低。根据电磁波传播理论,为获得大的探测深度,需要选择更低的系统工作频段,同时还需提升发射信号的平均功率。

频率步进连续波 (stepped-frequency continuous wave, SFCW) 探地雷达相比于时域冲激脉冲探地雷达在探测方面有一些显著优势。第 1, 在系统带宽里的各个频率都有一个非常窄的瞬时带宽,使得接收机的噪声系数减小,因此灵敏度和动态范围增大;第 2, 绝对射频工作带宽可以很宽,从而获得较高的距离分辨率;第 3, 能够发射较大的平均功率,实现长距离探测和深穿透。Šipoš 等<sup>[13]</sup>研制了一款用于探测地下未爆物的 UAV-SFCW 探地雷达,系统带宽为 0.55~2.7 GHz,能在离地约 0.5 m 的高度探测到地下 0.2 m 的反步兵和反坦克地雷。Burr 等<sup>[14]</sup>研制了一款分别在 1~4 GHz 和 6~9 GHz 发射调频连续波 (frequency modulation continuous wave, FMCW) 的无人机电载合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR), 同样用于地雷的探测,利用高频段的雷达数据构建测线的数字高程模型,再利用低频段的数据结合模型进行聚焦,以提高检测概率。

矢量网络分析仪 (vector network analyzer, VNA) 简称矢网仪,是一种功能全面的射频微波测量仪器,能够在很宽的频率范围内进行扫频测量,主要用于测量有源或无源的单端口或多端口网络的 S 参数。由于其执行测量时的工作原理与 SFCW 雷达工作原理基本相同,许多研究人员都基于 VNA 研发出各种超宽带 (ultra wide band, UWB) 雷达系统。刘琦等<sup>[15]</sup>基于 VNA 和 LabVIEW 开发了一款超宽带穿墙雷达人体呼吸在线检测计,通过 LabVIEW 上位机控制,做到数据采集与显示一体化。信号处理方面,仅对奇异区做快速傅里叶变换 (FFT),减小

了运算量,提高了系统效率。李品用等<sup>[16]</sup>基于可编程的 VNA,采用 MFC 编程方法设计系统页面并编写应用程序,以便实时进行系统显示、数据采集与处理等功能,最终实现墙后隐藏人体呼吸在线检测。刘伟等<sup>[17]</sup>利用 VNA 搭建了一款宽带步进频雷达散射截面积 (radar cross section, RCS) 测试系统。Ye 等<sup>[18]</sup>基于 VNA 和空耦天线设计一款应用于考古的 SFCW 探地雷达原型系统。

在地质灾害防治领域,快速、准确地识别潜在不稳定斜坡的基覆界面,以此对边坡的危险性、稳定性做出评价具有十分重要的意义<sup>[19]</sup>。目前,地质灾害防治方面使用无人机电载探地雷达开展的研究工作几乎没有。本文分别从系统原理,设计与开发,系统验证及应用开展研究,研发了一种能快速、简单,便捷地应用于野外环境的无人机电载探地雷达原型系统。根据应用需求,分析系统参数并研制低频空气耦合天线,采用 VNA 作为雷达波收发机搭建无人机电载探地雷达原型系统,基于矢量网络分析仪的时域分析技术,在 VNA 上开发按时间顺序的自动存储功能,采用背景抑制、自动增益和滑动平均等数据处理方法,最终实现 B-Scan 成像。

## 1 系统原理与参数设计

### 1.1 系统原理

在探地雷达领域,探测深度大于 10 m 即可称该雷达为大深度探地雷达,已知频率步进连续波探地雷达相较于时域冲激脉冲探地雷达在探测深度方面有优势。SFCW 探地雷达系统的工作原理如图 1 所示,发射机的频率合成器产生频率步进的单频简谐连续波,经过功分器将信号分为两路,一路与接收机的晶振混频,混频后的信号作为接收机的第 1 本振信号,另一路信号经过功率放大后由发射天线发射出去。电磁波遇到目标产生后向散射,回波信号被接收天线接收后,先经过信号调理电路对信号作滤波和放大,再与第 1 本振信号混频得到回波的中频信号,接收机的晶振又做为第 2 本振与中频信号作正交解调得到模拟基带 I/Q 信号,最后通过 ADC 采样得到数字基带 I/Q 信号,存储至上位机。采集的 I/Q 信号构成的包络携带目标的距离信息,使用快速傅里叶逆变换 (IFFT) 对采集到的基带信号数据进行处理,即可得到目标的距离。

SFCW 发射信号频率与时间的关系如图 2 所示, SFCW 探地雷达发射信号的频率随时间以频点持续时间  $\Delta t$  为间隔增加,频率步进量为  $\Delta f$ ,信号频率增加  $N-1$  次

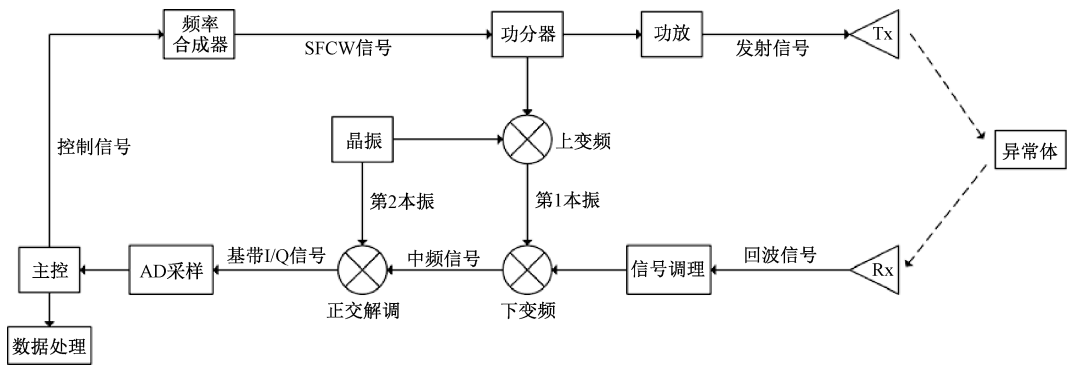


图 1 SFCW 探地雷达原理框图

Fig. 1 Schematic block diagram of SFCW GPR

后达到截止频率  $f_{N-1} = f_0 + (N-1)\Delta f$ , 然后重新回到起始频率  $f_0$ , 再进行下一个周期的发射。信号从起始频率步进到截止频率的时间  $T = N \times \Delta t$  被称为扫频周期,  $N$  是在信号带宽  $B = f_{N-1} - f_0$  内所发射的单频信号的频点个数,  $N = (f_{N-1} - f_0) / \Delta f + 1$ 。

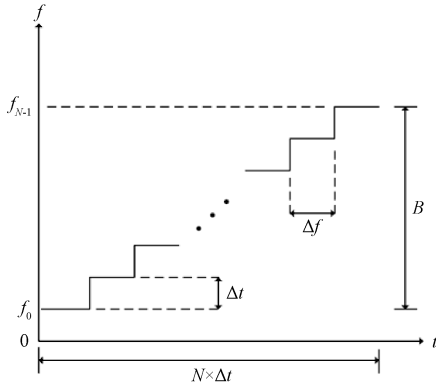


图 2 SFCW 信号频率与时间的关系

Fig. 2 Frequencies versus time of SFCW signal

单个扫频周期的 SFCW 信号  $x_T(t)$  时域表达式为:

$$x_T(t) = \sum_{i=0}^{N-1} A_i \cos[2\pi(f_0 + i\Delta f)t + \theta_i] \cdot \text{rect}\left(\frac{t - i\Delta t - \Delta t/2}{\Delta t}\right) \quad (1)$$

式中:  $A_i$  和  $\theta_i$  分别表示第  $i$  个频点的振幅和相对相位。 $\text{rect}()$  的标准形式为:

$$\text{rect}\left(\frac{t}{\Delta t}\right) = \begin{cases} 1, & -\Delta t/2 < t < \Delta t/2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

单个静止目标反射后的回波信号  $r_T(t, \tau)$  可以表示为:

$$r_T(t, \tau) = \sum_{i=0}^{N-1} B_i \cos[2\pi(f_0 + i\Delta f)(t - \tau) + \theta_i] \cdot \text{rect}\left(\frac{t - \tau - i\Delta t - \Delta t/2}{\Delta t}\right) \quad (3)$$

式中:  $B_i$  表示第  $i$  个频点回波的振幅,  $\tau = 2R/v$  表示电磁波从天线到目标的往返传播时间, 该时间又叫双程走时, 与天线到目标的距离  $R$  和电磁波在介质中的传播速度有直接关系, 其中  $c$  代表光速,  $\epsilon_r$  是介质的相对介电常数, 在探地雷达的相关研究中, 一般假设土壤的相对介电常数为 9。

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4)$$

如图 1 所示依次对接收天线接收到的回波信号做基本的信号调理 (小信号放大, 滤波等)、下变频、正交解调, 归一化后得到基带 I/Q 信号:

$$\begin{cases} I_i(f_i, \tau) = \cos\phi_i \\ Q_i(f_i, \tau) = -\sin\phi_i \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $f_i = f_0 + i\Delta f$ ,  $i = 0, 1, \dots, N-1$ 。目标的距离信息可以从 I/Q 信号的相位  $\phi_i = 2\pi f_i \tau$  中获知。将 I/Q 信号各频率成分数字化后, 结合成一个复序列:

$$C_i(f_i, \tau) = I_i(f_i, \tau) + jQ_i(f_i, \tau) = \exp(-j\phi_i) \quad (6)$$

此时复序列  $C_i$  所包含的元素个数为  $N$ , 由于 IFFT 算法要求待变换序列的元素个数为  $M = 2^m$  ( $M > N$ ,  $m$  为正整数), 于是在对  $C_i$  做变换之前还需在序列中添加  $(M-N)$  个“0”, 得到新的复序列  $C_k$ 。补零除了将原有复序列的元素个数改变为 2 的幂次以提升 IFFT 算法的运算速度外, 还能够提高变换后的距离分辨率。对  $C_k$  做点  $M$  的 IFFT 再取模值, 即可得到该扫频周期的一维距离像  $|y(n)|$ 。对  $C_k$  做点  $M$  离散傅里叶逆变换 (IDFT) 的定义式为:

$$y(n) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} C_k \exp(j2\pi k \frac{n}{M}) \quad (7)$$

式中:  $M$  是变换区间的长度。再对式 (7) 两边同时取模, 将  $C_k$  代入, 整理可得:

$$|y(n)| = \left| \frac{\sin\pi\left(n - \frac{2MR\Delta f}{v}\right)}{M \sin\frac{\pi}{M}\left(n - \frac{2MR\Delta f}{v}\right)} \right| \quad (8)$$

式(6)~(8)表示的过程被称为 SFCW 雷达的一维脉冲压缩,其示意图如图 3 所示。

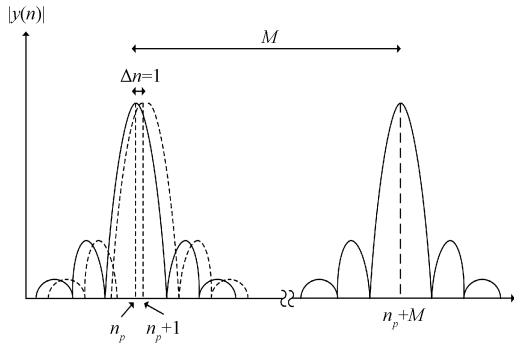


图 3 一维脉冲压缩示意图

Fig. 3 Schematic diagram of 1D pulse compression

由图 3 可以看出  $|y(n)|$  是一个在  $n = n_p = (2MR\Delta f/v) \pm iM$  ( $i$  为整数) 时能够达到峰值的 sinc 函数的周期延拓,其周期为  $M$ 。当一维距离像  $|y(n)|$  取到峰值,表示在该处有目标的回波响应,其所对应的距离单元号为  $n_p$ ,根据回波信号作脉冲压缩所产生的距离像,可以将雷达所探测到的目标的距离写成:

$$R = \frac{n_p v}{2M\Delta f} \quad (9)$$

此外,在主瓣上紧邻峰值的值所对应的距离单元号为  $n_p + 1$ ,当距离单元号由  $n_p$  变为  $n_p + 1$ , $|y(n)|$  取值的变化代表的是距离准确度  $\delta R$ 。令  $n_p = 1$ ,有:

$$\delta R = \frac{v}{2M\Delta f} \quad (10)$$

式(10)表明进行补零处理能够提高距离分辨率,再将其代入式(9),此时目标距离  $R$  可以看作  $|y(n)|$  取到峰值时的距离单元号  $n_p$  与距离准确度  $\delta R$  相乘,这也说明可以从一维脉压结果中得到目标距离。

## 1.2 系统参数设计

探地雷达以探测、分辨和识别目标为最终目的。因此探地雷达系统的各项设计参数要根据目标体的探测要求并结合具体的应用场景来论证。探地雷达系统的设计指标最主要的依据就是探测深度和探测目标的分辨率。由于本文针对的是应用于非显性滑坡基覆界面的探测,即目标是基岩与覆盖层的分层,因此设计的系统要满足大于 10 m 的探测深度,分米级的垂直分辨率。

### 1) 中心频率与带宽

研究表明,不同频率的电磁波在土壤中传播相同的距离其能量损耗是不同的。为提高目标回波信号的信噪比,实现对地下基覆界面的探测,需研究电磁波在土壤中传播的衰减特性,为不同探测深度的探地雷达选择合适的中心频率。电磁波衰减常数  $\alpha$  的计算公式为:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}} \left[ \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2 + 1} - 1 \right]^{1/2} \quad (11)$$

式中: $\sigma$ 、 $\mu$ 、 $\varepsilon$  分别是传播介质的电导率、磁导率和介电常数, $\omega$  是电磁波的角频率。可以看出,相同辐射能量的电磁波在土壤中传播相同距离时,频率越高,能量衰减越大。

但事实上,各地区甚至同一地区的土壤,其含水量、物质构成存在明显差别,导致土壤的电导率和相对介电常数等电磁参数差异很大,故很难建立一个标准的数学模型来表示电磁波在土壤传播时的能量衰减特性。国外研究机构用探地雷达在不同地区进行实地实验,获取大量实验数据后对数据做分析和归纳,从而得到土壤的电磁波传播衰减特性的一般规律。美国陆军工程兵团环境实验室在不同土壤中用不同频率的电磁波进行多次实验,得到的土壤传播功率衰减的平均统计结果如表 1 所示<sup>[20]</sup>。

表 1 不同频率电磁波在土壤中的衰减值

Table 1 Attenuation values of EM waves with different frequencies in soil

频率/ MHz	10% 体积湿度下的	10% 体积湿度下的
	平均衰减/ (dB·m <sup>-1</sup> )	保守衰减估计/ (dB·m <sup>-1</sup> )
10	3	1
100	6	2
500	12	4
1 000	17	10
5 000	122	100
10 000	422	300

该统计结果同样符合电磁波传播规律。参照时域冲激脉冲探地雷达的设计理念,为获取深层的回波信号,一般使用中心频率  $\leq 100$  MHz 的天线,由表 1 可知,其双程衰减量约为 120 dB,需要雷达设备满足大功率发射和高灵敏度接收的要求。因此,在 100 MHz 的基础上,适当下调发射电磁波的中心频率能为硬件研制留有一定冗余,最终保证 10 m 的探测深度。本文的探地雷达原型系统发射的 SFCW 信号的中心频率拟设定为 70 MHz。

分辨率是探地雷达的另一个重要指标,决定了探地雷达分辨最小异常介质的能力。在本文中,由于探测目标是地下基覆界面,因此只需考虑垂直距离分辨率  $\Delta R$ :

$$\Delta R = \frac{v}{2B} = \frac{v}{2N\Delta f} \quad (12)$$

式(12)是计算雷达分辨率的理论公式,在波速  $v$  一定的情况下,系统带宽  $B$  越宽,雷达的分辨率越高,具体到 SFCW 雷达,其分辨率与频率步进量  $\Delta f$  和频点个数  $N$

有关。对比式(12)与(10)可知,理论分辨率  $\Delta R$  大于距离准确度  $\delta R$ ,这是因为在执行 IFFT 算法之前进行了补零处理,再次说明补零可以提高距离分辨率。为达到 0.3~0.7 m 的垂直分辨率,系统带宽至少要大于 100 MHz。依据拟设定的中心频率,系统的频率范围为 20~120 MHz,同样为确保能满足设计的分辨率要求,适当拓展高频带宽,拟定系统频率范围为 20~150 MHz。

### 2) 频率步进量

频率步进量  $\Delta f$  要综合垂直分辨率  $\Delta R$  和不模糊距离  $R_u$  来确定。由式(5)可知, I/Q 信号的相位  $\phi_i$  取决于频率  $f_i$  和电磁波双程走时  $\tau$ :

$$\phi_i = 2\pi f_i \tau = \frac{4\pi f_i R}{v} \quad (13)$$

$\phi_i$  在  $2\pi$  范围内,因为回波的目标信息包含在  $\phi_i$  内,考虑相位的变化  $\Delta\phi$ ,由式(13)可得:

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta f} = \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{f_{i+1} - f_i} = \frac{4\pi R}{v} \quad (14)$$

式(14)改写为:

$$R = \frac{v\Delta\phi}{4\pi\Delta f} \quad (15)$$

由于  $\Delta\phi$  具有周期性,即  $\Delta\phi = \Delta\phi + 2\pi n, n = 1, 2, 3, \dots$ ,考虑距离位于  $R_1$  和  $R_2$  的两个目标,其产生的相位差若满足  $\Delta\phi_{R_1} = \Delta\phi_{R_2} + 2\pi n$ ,那么这两个目标是模糊的,令  $n=1$ ,由此可得出 SFCW 雷达的最大不模糊距离:

$$R_u = |R_1 - R_2| = \left| \frac{v(\Delta\phi_{R_1} - \Delta\phi_{R_2})}{4\pi\Delta f} \right| = \frac{v}{2\Delta f} \quad (16)$$

可以看出要增大不模糊距离,应减小  $\Delta f$ ;要提高垂直分辨率,应增大  $\Delta f$ 。故频率步进量也需根据应用需求折衷考虑,拟定系统带宽为 20~150 MHz,既要满足  $R_u$  至少大于 10 m 的探测深度,则  $\Delta f \leq 4$  MHz;又要保证探测分辨率,则  $\Delta f > 1$  MHz;还要考虑系统带宽内,频点个数  $N$  最好为整数;故设定  $\Delta f = 2$  MHz。

### 3) 频点持续时间

SFCW 雷达对发射的各个单频信号,在特定的频点持续时间  $\Delta t$  内,都有相应的反射信号被接收。为了进行相参解调, $\Delta t$  应至少大于探地雷达天线到目标的往返传播时间。所以,与一个步进频率相对应的  $\Delta t$  必须大于电磁波到最远目标的往返传播时间,即:

$$\Delta t \geq \tau = \frac{2R}{v} \quad (17)$$

将式(16)的  $R_u$  代入式(17),可得:

$$\Delta t \geq \frac{1}{\Delta f} \quad (18)$$

由于雷达工作时搭载于无人机平台上,对测区进行连续探测,因此频率合成器的速度必须足够快以适应平台移动的速度。分析 SFCW 信号的过程中,已知扫频周

期  $T = N \times \Delta t$ ,在频点数  $N$  一定的情况下,增加  $\Delta t$  即增大扫频周期,则降低了频率合成器的扫频速度,就要求无人机平台必须降低移动速度,其结果就是雷达的探测效率低,不符合滑坡探测的应用场景。因此在满足式(16)的前提下,适当增大频点持续时间,设置为 200  $\mu s$ ,于是扫频周期  $T = 13.2$  ms。

### 4) 发射功率与接收灵敏度

从信号的角度出发,论证了为达到设计的探测深度和垂直分辨率,发射信号的参数应如何选取。此外,还需从系统硬件方面进一步明确雷达收发机的部分性能参数。当地下介质为均匀媒质,考虑到天线的传播特性,雷达方程为:

$$R = e^{-\alpha R} \left[ \frac{P\sigma_{RCS} G^2 \lambda^2 L}{(4\pi)^3 k T_0 B F (SNR)} \right]^{1/4} \quad (19)$$

式中: $P$  代表发射机的发射功率; $\sigma_{RCS}$  是目标的雷达散射截面积; $G$  是天线的增益; $\lambda$  是电磁波在介质中传播时的波长; $L$  为雷达系统总的损耗; $k$  是玻尔兹曼常数; $T_0$  表示接收机输入端的绝对温度; $F$  是接收机的噪声系数, $SNR$  代表接收机的信噪比。接收机灵敏度的计算公式为:

$$S_R = k T_0 B F (SNR) \quad (20)$$

式中: $S_R$  代表接收机灵敏度。由式(19)和(20)可以明显看出,在其他条件一定的情况下,增大发射功率  $P$ ,提高接收灵敏度  $S_R$ ,提高天线增益  $G$  能在一定程度上提升雷达系统的探测深度,从表 1 可得,100 MHz 的电磁波在土壤传播 10 m 的双程衰减量达 120 dB,为降低射频组件的研制难度,拟定系统的发射功率大于 5 W (37 dBm),接收灵敏度小于 -90 dBm。

### 5) 系统设计要求

考虑天线空气耦合和野外实际环境的影响并假设介质均匀,本文根据地下 >10 m 的探测深度和分米级的垂直分辨率的要求,设定的无人机载探地雷达原型系统参数如表 2 所示。

表 2 系统参数设定

Table 2 System parameter setting

参数	符号	值
起始频率	$f_0$	20 MHz
截止频率	$f_{N-1}$	150 MHz
带宽	$B$	130 MHz
频率步进量	$\Delta f$	2 MHz
频点持续时间	$\Delta t$	200 $\mu s$
发射功率	$P$	37 dBm
接收灵敏度	$S_R$	-90 dBm
天线增益	$G$	0 dBi@ 100 MHz

## 2 原型系统设计

### 2.1 VNA 选型

VNA 是测量电气网络参数的测量仪器,对射频微波器件的分析至关重要。VNA 主要包括信号源和接收机,接收机检测器件或网络输出信号的变化,再与输入该器件的源信号作比较。为了评测器件对电流和电压的影响,VNA 会测量其引起的幅度和相位响应,由此得到传输和反射测量结果、阻抗及 S 参数。二端口 VNA 的硬件结构一般如图 4 所示,除了信号源,接收机外,还包括功分器、定向耦合器、切换开关等部分。VNA 内部一般还包含微处理器和存储器对测量结果进行处理,还有显示单元对测量结果进行显示。

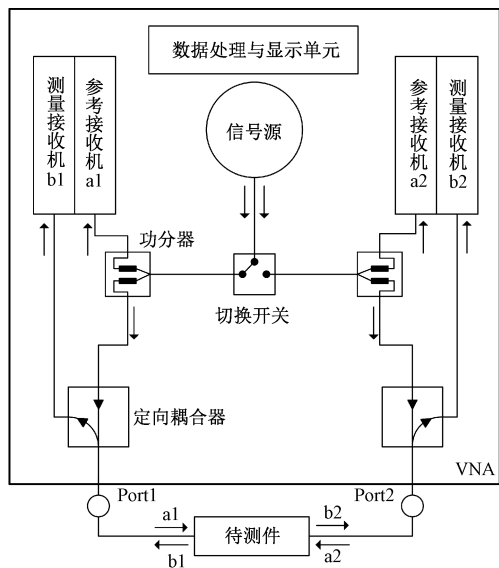


图 4 VNA 内部结构框图

Fig. 4 Block diagram of VNA internal structure

VNA 一般使用扫频信号源,以频率步进的方式发射连续波信号。功分器将信号源产生的信号分成等功率的两部分,一部分输出到参考接收机,另一部分输出到待测件。定向耦合器将待测件反射回的信号输出到测量接收机。测量接收机可以测量输入信号的幅度和相位。VNA 的数据处理单元,能对测量的数据进行处理,如将 S 参数转换成其他网络参数等,使仪器的测量结果更精确,功能更多样。

VNA 加装时域分析功能,能将频域分析转换至时域,这极大拓展了使用范围<sup>[21-22]</sup>,该功能使用线性调频逆 Z 变换(inverse chirp-z transform, ICZT),与 SFCW 雷达一维脉冲压缩过程中使用的 IFFT 相比,ICZT 更高效、灵活,能呈现任意时域区间、任意细节的波形。相比 FFT 在 Z 平面的单位圆上均匀采样,CZT 可以在 Z 平面的螺旋线上均匀采样,该螺旋线可以始于 Z 平面的任意一点,终

于另一任意点,设序列  $x(n)$  的长度为  $N$ ,其点  $M$  的 CZT 如式(21)所示。

$$X(z) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot z^{-n} \quad (21)$$

式中: $z = AW^k$ ,  $k = 0, 1, \dots, M-1$ 。其中:

$$\begin{cases} A = A_0 \cdot e^{j2\pi\theta_0} \\ W = W_0 \cdot e^{j2\pi\varphi_0} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $A$  是 Z 平面上采样的起点; $W$  为采样间隔。ICZT 等价于对频域数据  $X(k)$  取共轭,做 CZT 变换,再取共轭,前提是  $A_0 = W_0 = 1$ ,即:

$$ICZT[X(k)] = [CZT(X(k)^*)]^* \quad (23)$$

综上,带时域分析功能的 VNA 可作为 SFCW 雷达收发机和数据预处理单元,再连接宽带功率放大器和空耦天线即可组成 SFCW 探地雷达原型系统。为能搭载于无人机,考虑 VNA 的重量和体积,本文设计的原型系统选用 Keysight 公司 N9914A 型 VNA 作为探地雷达主机,该 VNA 体积小、重量轻、可手持、待机久,性价比高,适合搭载于中小型无人机上,部分性能参数如表 3 所示。

表 3 FieldFox N9914A 性能参数

Table 3 Performance parameters of FieldFox N9914A

参数名称	值
重量	3.0 kg
频率范围	30.0 kHz~6.5 GHz
频率分辨率	1.0 Hz
中频带宽	10.0 Hz~100.0 kHz
动态范围	100.0 dB
输出功率	3.0 dBm(max)
数据点个数	10 001(max)

### 2.2 原型系统组成与开发

原型系统组成如图 5 所示。该原型系统以 N9914A 型 VNA 与低频超宽带空气耦合天线为主体,主要实现 SFCW 信号产生、辐射、接收、回波信号频-时变换,数据自动存储等功能。为弥补 VNA 发射功率的不足,输出端口外接宽带功率放大器,将发射信号的功率放大至 5 W,使得电磁波在地下传播得尽可能的远。该 VNA 加装 GPS 接收机功能,通过 GPS 天线接收卫星信号,可在单道数据文件中记录经纬度信息。无人机平台上搭载装有 SIM 卡的小型终端作为上位机,部署 Command Expert 软件用于控制 VNA 实现测量数据自动存储功能,还通过互联网使得该终端运行远程桌面,地面人员可通过远程桌面对原型系统进行参数设置、采集控制等操作。

VNA 在执行完测量后,若要保存当前的测量数据,需按照数据保存的操作步骤,逐步按下仪器操作面板上的物理按键。然而原型系统在低空中执行探测作业,人员无法直接接触操作面板,于是需要在 VNA 上开发数据自动储存功能,可以使用 VNA 的外部接口,外接上位机

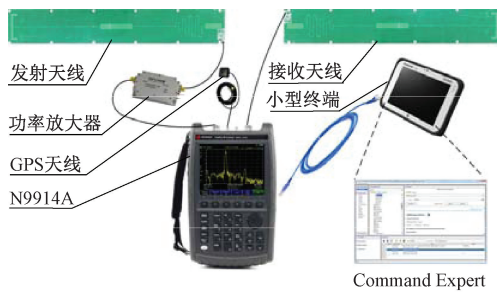


图5 原型系统组成

Fig. 5 Prototype system composition

或存有控制程序的存储设备来控制仪器进行数据存储。

许多基于 VNA 搭建的雷达实验系统都是在上位机中编写程序或开发软件来实现系统显示、数据采集控制与数据处理等功能。为方便研究人员的使用与系统在野外灵活、快速地应用,本文选择使用 Keysight 公司公开的仪器控制软件 Command Expert 来实现这一功能。

Command Expert 将仪表命令、文档、语法检查和命令执行全部结合在一个简单的界面中,与使用标准命令的可编程仪器(standard commands for programmable instruments, SCPI)一起工作。实现自动存储功能的两条基本的 SCPI 指令:1) 仪器局域网连接指令,“INP: LAN: ADDR "192.168.0.1"”。连接仪器与上位机,在 Command Expert 的命令行窗口中输入以上指令,待软件正确识别指令后,即代表上位机与仪器建立了网络通信。2) 存储文件指令,“MMEM:STOR:FDAT "MyFile.CSV"”。以 MyFile 作为文件名,在 VNA 的内部存储器中以 CSV 格式存储数据文件,一个 CSV 文件存储一道数据。为了实现数据自动存储功能,只需持续不断地向程序输入命名不同的存储文件的指令,这样就实现了自动存储的功能。

除了在命令行中输入指令外还可将指令写入一个文本文件中,只需向 Command Expert 导入该文件,程序就会自动执行文件内所包含的所有 SCPI 指令。还需下载可离线使用的指令集包到上位机,确保程序能从文本文件中正确识别出 SCPI 指令。所以,只需用 C 语言编写一个 for 循环,用数字作为文件名,每执行一次,数字加 1 并且打印出该行命令,执行该循环一万次,即可打印出一万行存储文件指令。

综上所述,本文提出的 VNA 自动存储方法避免研究人员从复杂的仪器控制指令和程序接口中进行 C#程序或软件的开发,节省研究时间,同时也提供了一种简单、便捷、高效的操作方式。待无人机执行完测线任务后拷贝仪器内部所有的 CSV 文件到 MATLAB 中执行原始数据拼接、数据处理等操作,即可得到测线的 B-Scan 图像。

### 2.3 小型化低频空耦天线设计与研制

天线是整个探地雷达系统最为关键的部件。天线的

性能对探地雷达系统的辐射功率和接收灵敏度都有着极大的影响,可以说天线的性能基本决定了探地雷达系统的探测深度。为了达到 >10 m 的探测深度,系统的工作带宽设计为 20~150 MHz,当天线的工作频率为 20 MHz 时,按照标准的半波偶极子天线来计算,其单臂的长度将达到 3.75 m(总长度 7.5 m),这样长度的天线挂载于无人机,势必会影响其飞行姿态及安全,不适宜集成于无人机平台。因此在天线设计时,需要考虑在牺牲较小天线性能的情况下如何做到小型化。

在设计之前先对同一频率的偶极子天线和单极子天线(偶极子天线的一臂,长度是偶极子天线一半)进行仿真。天线的空间电磁场分布由天线上的电流分布决定,偶极子线天线上的归一化电流分布  $I$  可以表示为:

$$I(z) = \sin[k(l - |z|)], |z| \leq l \quad (24)$$

式中: $k = 2\pi/\lambda$ ,  $k$  为相位常数; $l$  表示偶极子天线单臂的长度; $z$  代表天线上电流元的位置。使用电磁仿真软件 HFSS 分别建立了同一频率偶极子线天线和单极子线天线的仿真模型如图 6 所示,并得到仿真结果,可以看出两种天线的 E 面方向图和最大增益 1.75 dBi 相同,说明单极子线天线的电流分布也符合式(24),因此可以采用单极子天线形式来设计小型化天线。

设  $l = 1.5$  m,分别计算单极子天线发射 20、50、100 和 150 MHz 信号时的归一化电流分布,结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出,50 MHz 及以下频点的电流幅度在 1.5 m 以内呈递增的趋势,且 20 MHz 信号的归一化电流幅度在 0.5 m 处仅为最大电流幅度的 20%,在 1 m 处为最大电流幅度的 40%。即在天线辐射导体前 1 m 以内对天线进行部分折叠对 20 MHz 频点的增益并无太大影响,而且,通过折叠可以在不增加天线长度的情况下增加辐射导体的长度,使天线工作频带内的低端频点更接近它们的谐振点。还可看出 150 MHz 信号的归一化电流幅度在 1 m 之后开始反向,对于最高工作频率为 150 MHz 的天线来说,为了消除反向电流带来的天线旁瓣,天线辐射导体的长度不宜超过 1 m。

基于上述分析,为了进一步小型化天线尺寸,本文设计了一种折叠单极子贴片天线,其工作频段为 20~150 MHz,尺寸为 66 cm×10 cm×0.1 cm,天线的长度是最低工作频率的 4.4%,相对带宽约为 153%。将天线辐射导体的总长度设置为 1 m,综合考虑天线的功率容限和辐射导体的分布电阻,将辐射导体的宽度设置为 1 mm。

电阻加载是目前常用的拓展天线阻抗带宽的方式之一,通过电阻加载可以消除天线的“振铃效应”,但要牺牲天线的辐射效率。针对电阻加载的不足,采用电抗加载与 RLC 端口阻抗匹配相结合的方式在保证天线的阻抗带宽和辐射效率。研制完成的天线实物如图 8 所示。

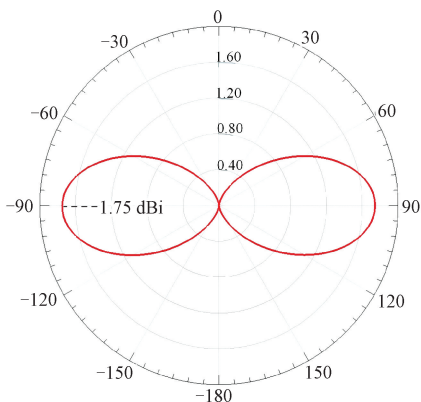
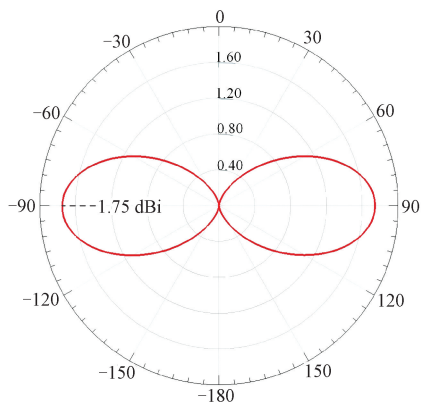
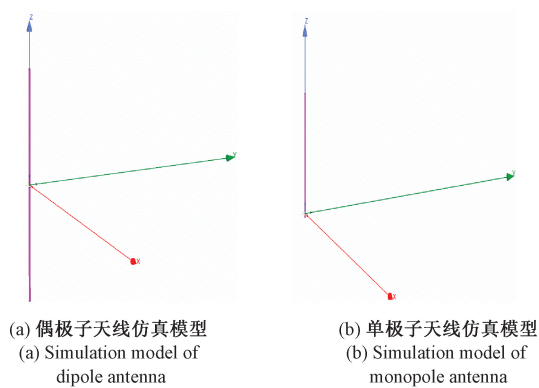


图 6 天线仿真模型和 E 面仿真结果

Fig. 6 Antenna simulation model and E-plane simulation results

### 3 原型系统验证与应用

#### 3.1 系统验证

搭建好无人机载探地雷达原型系统后,为验证系统是否达到设计时的各项功能指标,需使用频谱仪对系统发射信号的带宽、输出功率、频率步进量,频点数和使用网络分析仪对收发天线的回波损耗、增益与工作带宽进行测试,最后还要对系统的收发功能进行验证。

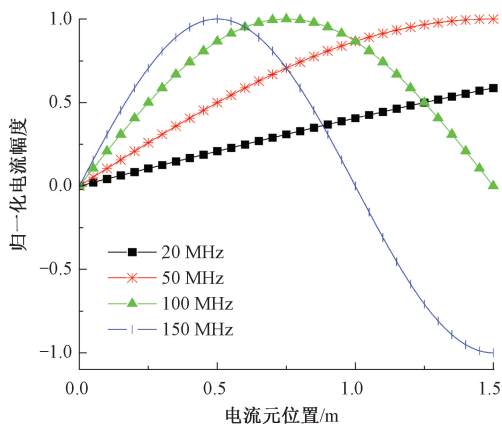


图 7 不同发射频率下的归一化电流分布



图 8 单极子天线实物

Fig. 8 Physical object of monopole antenna

#### 1) 发射信号参数测试

发射信号测试采用传导测试法,测试原理如图 9 所示。

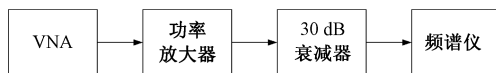


图 9 发射信号测试原理框图

Fig. 9 Schematic block diagram of emission signal test

原型系统中功率放大器增益为 39 dB,设置 VNA 的输出功率为 -6 dBm,固定衰减器的标称衰减量为 30 dB,在传导链路中起保护作用,线缆与接头插损约为 2 dB。图 10 所示是 SFCW 信号在 9 kHz~170 MHz 的频谱,图中 Mark 1 和 Mark 2 之间的频率差代表了所设置的频率步进量  $\Delta f=2$  MHz,Mark 1 和 Mark 3 代表发射信号带宽为 20~150 MHz,整个频带内的信号功率不平坦度约为  $\pm 0.1$  dB。系统在执行探测任务时,设置 VNA 信号输出功率  $> -2$  dBm,则整个系统的输出功率  $> 37$  dBm,即 5 W。

#### 2) 天线主要参数测试

天线的主要评价指标除了增益和方向性以外,还有一个衡量天线与发射机阻抗匹配程度的重要指标  $S_{11}$ ,即回波损耗。普遍以  $S_{11} \leq -10$  dB 的通频带作为天线的工作带宽。使用 VNA 对天线的  $S_{11}$  和  $S_{21}$  进行了测试,VNA 输出功率为 -15 dBm,其中  $S_{21}$  测试为了尽量减小环境因素带来的影响,测试场地为室外开阔场地,收发天线固定在木板上,以最小辐射方向并排放置;收发天线距离地面

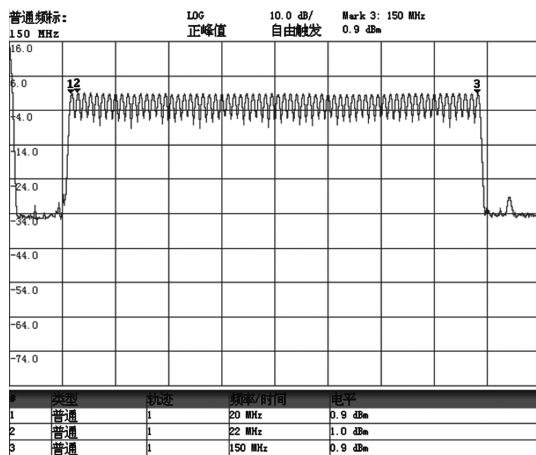


图 10 SFCW 信号频谱测试结果

Fig. 10 Test result of SFCW signal spectrum

的高度为 0.8 m,使用塑料材质的物体作为承载平台,测试场景如图 11 所示,测量结果如图 12 所示。



图 11 单极子天线  $S_{21}$  参数测试场景

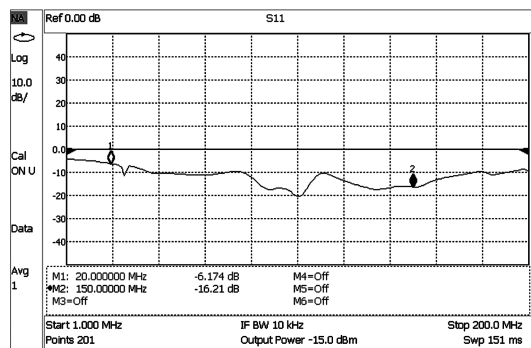
Fig. 11  $S_{21}$  test scenario of monopole antenna

从图 12(a)可以看出,匹配完成的天线回波损耗在 40~200 MHz 范围内基本都  $\leq -10$  dB。但是,  $S_{11}$  只能表征天线端口与 VNA 端口的匹配程度,并不能反映天线的增益、方向性和辐射效率等性能,所以单纯用阻抗带宽来定义天线的工作带宽存在一定的局限性。天线工作带宽的定义并不唯一,除了阻抗,还可以用方向图、增益、辐射效率等参数来定义,能基于应用场合来综合考虑天线所有重要特性的方法,才是描述天线带宽有效的方法<sup>[23]</sup>。

从图 12(b)可以看出,天线的 10 dB 传输损耗通频带约为 20~150 MHz,考虑到  $S_{21}$  是天线增益、辐射效率和方向性的综合反映,且影响探地雷达分辨率的参数实际上是传输损耗带宽,所以,可认为 20~150 MHz 是该天线的工作带宽。

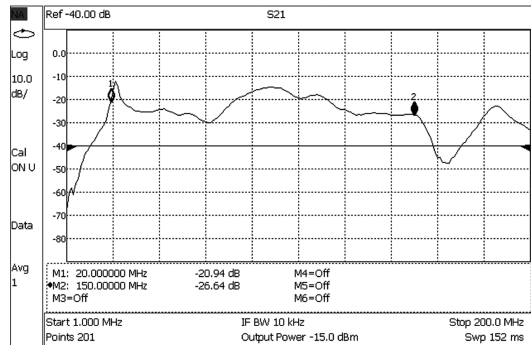
### 3) 系统收发功能验证

原型系统收发功能验证的实验场景及示意图如图 13 所示,利用吊装装置将收发天线吊在空中距离地面



(a) 单极子天线  $S_{11}$  测试结果

(a)  $S_{11}$  test result of monopole antenna



(b) 单极子天线  $S_{21}$  测试结果

(b)  $S_{21}$  test result of monopole antenna

图 12 单极子天线 S 参数测试结果

Fig. 12 S-parameter test results of monopole antenna

1.4 m 的位置,收发天线各通过 2 m 的射频传输线直连到 VNA 的输入和输出端口,已测得总计 4 m 长的射频线和接头的时延为 23.1 ns,利用 VNA 的时域分析功能,验证系统收发电磁波的能力,两次测试收发天线的收发距分别为 0.6 和 1.2 m,验证结果如图 14 所示。

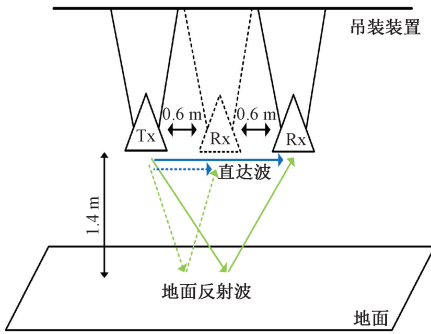
图 14(a)、(b)中第 1 个和第 2 个 Ricker 子波分别代表直达波和地面反射波,除此以外还有许多杂波,这是实验室内复杂的电磁环境所引起的干扰。从图 14(a)可以看出,直达波在空气中的传输时间约为 25.2 ns - 23.1 ns = 2.1 ns,与电磁波在空气中传播 0.6 m 所需时间接近,同理,地面反射波的传播时延 33.2 ns - 23.1 ns = 10.1 ns 也与电磁波辐射地面并反射距离 3 m 所需时间接近。从图 14(b)看出,当收发天线间距增大 0.6 m 后,直达波与地面反射波都出现约 2 ns 的延时,与理论计算的传输时延基本接近,表明原型系统收发雷达波功能正常。

### 3.2 对比实验

为了验证原型系统的功能更加直观,与国外高性能探地雷达系统做对比,选择同一场地进行相同的测线试验。对比采用的探地雷达是国外某公司的时域探地雷



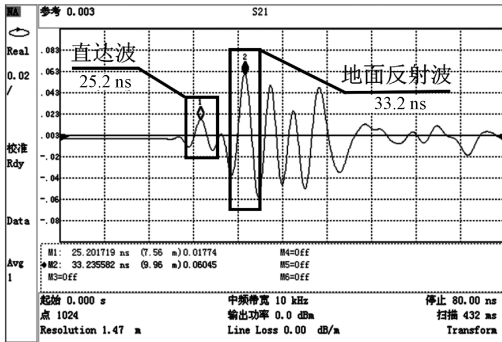
(a) 原型系统收发功能验证场景  
(a) Prototype system transceiver function verification scenario



(b) 原型系统收发功能验证示意图  
(b) Prototype system schematic diagram of transceiver function verification

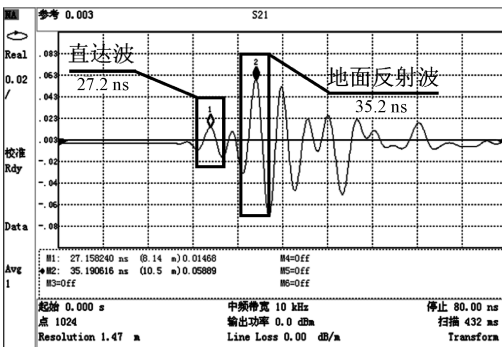
图 13 原型系统收发功能验证场景及示意图

Fig. 13 Prototype system transceiver function verification scenario and schematic diagram



(a) 0.6 m收发距测试结果

(a) Test result of 0.6 m transceiver distance



(b) 1.2 m收发距测试结果

(b) Test result of 1.2 m transceiver distance

图 14 原型系统收发功能测试结果

Fig. 14 Prototype system transceiver function test results

达,其中心频率为 70 MHz。实验场地的实景和工程结构示意图如图 15 所示。图 15(a)、(b)中红色虚线箭头所指是测线路径,即从学校实验大楼外围道路开始,围绕图中玻璃顶逆时针一圈后停止。图 15(c)为该测线路径的地下结构示意图。原型系统采用人工作业,将 VNA 和天线用碳板和玻棒固定好后,由实验人员手抬原型系统沿测线行走,天线距离地面约为 0.5 m;时域探地雷达搭载于手推车上,天线距离地面约为 0.15 m,两种探地雷达数据使用相同的处理方法,实验成像结果如图 16 所示。

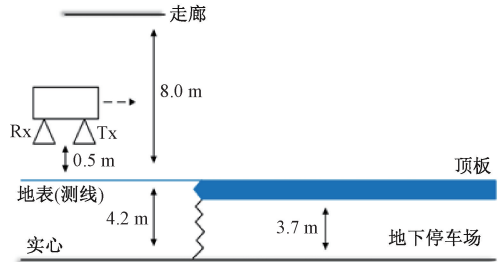


(a) 实验场景1

(b) 实验场景2

(a) Experimental scenario1

(b) Experimental scenario2



(c) 工程结构示意图

(c) Schematic diagram of engineering structure

图 15 实验场景与工程结构示意图

Fig. 15 Experimental scenario and schematic diagram of engineering structure

从图 16(a)、(b)可以看到,在测线接近 20 m 处,约 65 ns 以下的位置图像特征为双曲线,由于原型系统和时域雷达的收发天线均为全向天线,除了地下的反射波外,还会接收到来自空气中不同目标的反射波,而且这些空气中的目标在成像结果中容易造成误判,推测为图 15(a)中红色方框标识的架空走廊。图 16(a)中约 25 和 45 ns 有两条连续的水平同相轴,分别代表直达波与地表反射波。在测线后半程(40~80 m),约 50 和 60 ns,出现了两条水平的同相轴,由图 15(c)可以推测是原型系统从地下实心的地表移动到地下停车场正上方地表时,地下停车场顶板和地面的回波。约 80 ns 以下的水平同相轴推测为电磁波在地下空间顶板和地面来回反射的多次波,由于数据处理时使用的增益算法,增益因子随深度指数增加,造成了多次波的信号强度在图 6 中显示比有用信号的强度大。时域雷达则未探测到地下空间,而且该雷达采用了延迟接收技术,在成像结果中未显示出直达波和地表反射波,由此可以判断本文所研制的原型系

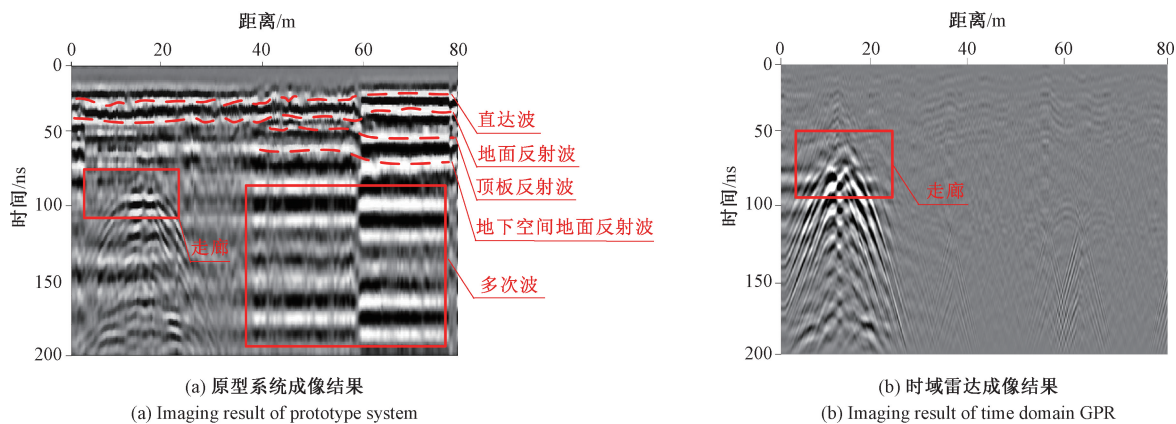


图 16 成像结果

Fig. 16 Imaging results

统不仅具备探测功能,而且其探测能力也优于部分商用时域冲激脉冲雷达。

### 3.3 野外探测试验

为了进一步验证无人机载探地雷达原型系统的功能,同时也为了测试其具体探测性能,选择野外一处滑坡点开展地下结构探测试验。为了减小直达波的干扰,增大收发天线收发距至 1 m,以免接收到的直达波功率过大使得仪器损坏。装配完成的无人机载探地雷达原型系统如图 17 所示,作业流程如图 18 所示。



图 17 无人机载探地雷达原型系统

Fig. 17 Prototype system of UAV-GPR

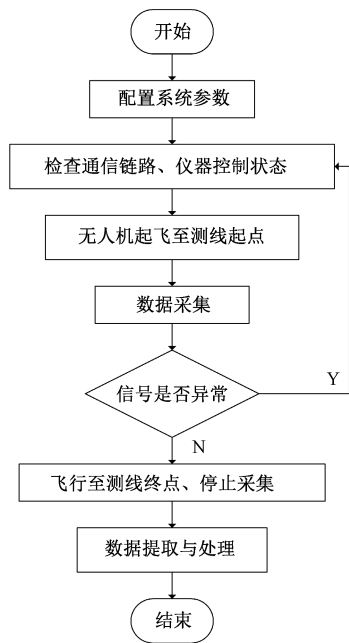


图 18 原型系统作业流程

Fig. 18 Prototype system workflow

试验地点位于四川省南充市营山县消水镇大秧坪滑坡点,试验测线选择了已知地质剖面的测线 7-7',该测线上分布有地质钻孔,可获知地下分层结构,选择地势相对平坦,周边建筑、植被相对较少的钻孔 ZK05 至 ZK13 附近的一段进行作业。试验地点卫星正射影像、地质剖面如图 19 所示,野外探测试验结果与钻孔资料如图 20 所示。

探地雷达数据从 VNA 提取出来后使用 MATLAB 进行数据处理,处理方法包含均值去背景、自动增益、滑动平均等。图 20(a)是上述测线试验的 B-Scan 结果,图 20(b)是钻孔 ZK13 的资料。

试验结果表明,在红色框标示位置(时延为 245 ns)

处有一条断续的同相轴,且 245~300 ns 之间的灰度图纹理明显与上下纹理不同。代入一般假设的土壤相对介电常数  $\epsilon_r = 9$ ,根据式(4)计算电磁波波速,从图 20(a)可以得出,电磁波在土壤中的双程走时为  $245 \text{ ns} - 15 \text{ ns} = 230 \text{ ns}$ ,最终计算可得 245 ns 处分界面的深度为 11.5 m。由钻孔 ZK13 的地质资料可知,在 ZK13 的地下 12.2 m 处有一层粉质粘土和泥岩的分界面,且泥岩层为强风化,已有风化裂隙发育,图 20(a)中分界面的深度与图 20(b)中钻孔资料的深度相差 0.7 m,也符合系统设计时所要达到的探测分辨率。根据地质资料的印证,可以初步判定该原型系统具备探测基覆界面的能力,且探测深度 >10 m。

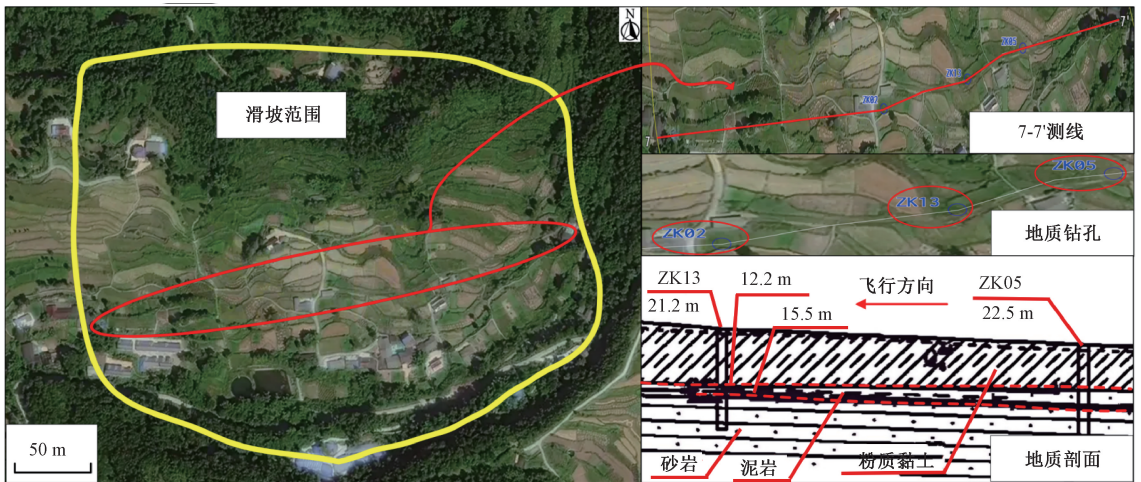
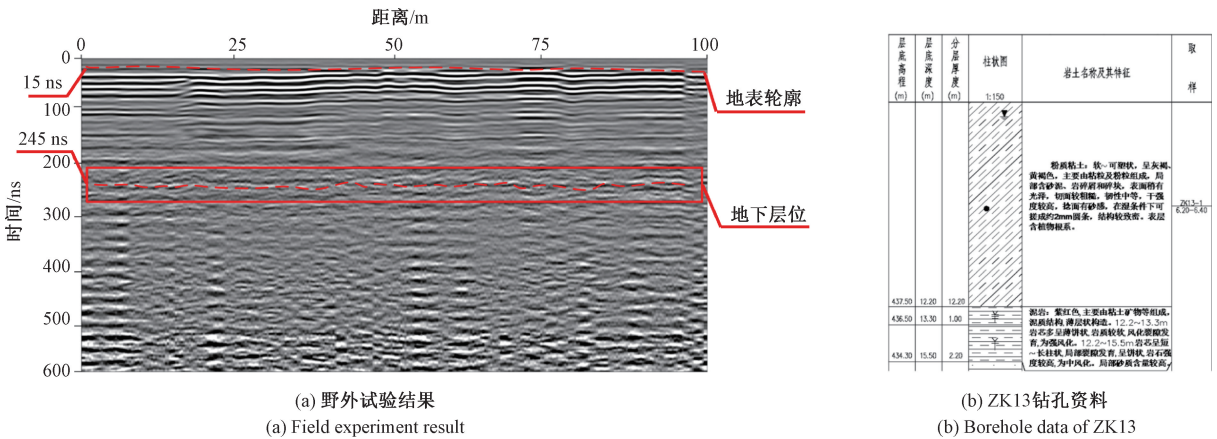


图 19 试验地点卫星正射影像与部分地质剖面

Fig. 19 Satellite orthophoto image and partial geological section of the experimental site



(a) 野外试验结果  
(a) Field experiment result

(b) ZK13 钻孔资料  
(b) Borehole data of ZK13

图 20 野外试验结果与钻孔资料

Fig. 20 Field experiment result and borehole data

原型系统的移动载体为 DJI T60 型无人机,该无人机使用 RTK 进行定位,水平定位精度为  $1\text{ cm} + 1 \times 10^{-6}\text{ cm}$ ,垂直定位精度为  $1.5\text{ cm} + 1 \times 10^{-6}\text{ cm}$ ,所以其定位误差在厘米级。定位误差对采集数据的质量与成像以及反演的结果有一定影响,垂直定位误差  $\Delta z$  会导致深度标定偏差(如 RTK 垂直误差为  $\pm 3\text{ cm}$ ,在介电常数  $\epsilon_r = 9$  时转化为深度误差  $\pm 1\text{ cm}$ );水平定位误差可能使实际航迹偏离设计的测线,导致航迹与探测测线未完全重合。要求探测地下层位的分辨率为分米级,垂直定位误差导致反演的深度标定偏差在可接受的范围之内;在厘米级航迹偏移的情况下,B-scan 图像的厘米级位移偏差对于反映实际地下结构没有影响。

### 4 结论

本文根据地下大深度基覆界面探测的应用需求,集

成研制了一种频率步进式无人机载探地雷达原型系统。设计并研制了小型化低频单极子空耦天线,使其能够挂载在无人机上,选型 N9914A 手持式矢量网络分析仪作为雷达波收发机,利用部署在手持终端上的 Command Expert 软件在 VNA 上开发出数据自动存储功能,解决原型系统无法自动采集数据的问题。野外试验表明原型系统能够探测的地下层位深度大于 10 m。该原型系统操作简便,高效,适合在野外应用,为探地雷达研究提供一种新方法。未来将进一步研究基于 SoC 的探地雷达主机以替代 VNA,研制专用的航空探地雷达系统。

### 参考文献

[ 1 ] LIU W B, YANG X, YAN Y X, et al. A state-of-the-art review on graph characterization and automated detection of road underground targets using ground-penetrating radar[J]. Measurement, 2024, 244: 1-22.

- [ 2 ] LING J Y, QIAN R Y, SHANG K, et al. Research on the dynamic monitoring technology of road subgrades with time-lapse full-coverage 3D ground penetrating radar (GPR)[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(7): 1593.
- [ 3 ] 刘海, 黄肇刚, 岳云鹏, 等. 地下管线渗漏环境下探地雷达信号特征分析[J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(4): 1257-1264.
- LIU H, HUANG ZH G, YUE Y P, et al. Characteristics analysis of ground penetrating radar signals for groundwater pipe leakage environment [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(4): 1257-1264.
- [ 4 ] 肖小汀, 李怡, 葛亮, 等. 埋地非金属管道雷达探测成像定位方法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(8): 223-233.
- XIAO X T, LI Y, GE L, et al. Research on imaging and positioning method of buried non-metallic pipeline radar[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(8): 223-233.
- [ 5 ] 苏晓堃, 高红兵. 基于 HSP-GPR 法的隧道三维超前地质预报技术及应用[J]. *铁道学报*, 2024, 46(7): 150-158.
- SU X K, GAO H B. Three-dimensional advanced geological forecasting technique for tunnels based on HSP-GPR method and its application[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2024, 46(7): 150-158.
- [ 6 ] 许少毅, 卢文庭, 王承涛, 等. 随掘连续超前探测异常体辨识成像研究[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(11): 159-175.
- XU SH Y, LU W T, WANG CH T, et al. Research on anomaly identification imaging with continuous advanced detection of excavation[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(11): 159-175.
- [ 7 ] MOHAMMAD Z, CHRYSLER A M. Airborne reflector-based ground penetrating radar for environmental and archaeological studies [J]. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 2023, 4: 748-753.
- [ 8 ] MANATAKI M, PAPADOPOULOS N, SCHETAKIS N, et al. Exploring deep learning models on GPR data: A comparative study of AlexNet and VGG on a dataset from archaeological sites [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(12): 3193.
- [ 9 ] 王韵, 王红雨, 李其星, 等. 探地雷达在湿陷性黄土挖填方高边坡土体性状探测中的应用[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2023, 34(2): 102-110.
- WANG Y, WANG H Y, LI Q X, et al. Application of the ground-penetrating radar technology in detection of soil properties of the high cutting and filling slopes in collapsible loess area [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2023, 34(2): 102-110.
- [ 10 ] KONDO T, KIKUTA K, SATO M. Ground surface reflection compensation for hand-held GPR [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 1-5.
- [ 11 ] YUE Y, CHI-CHIH C. Automatic subsurface unexploded ordnance detection using a wideband full-polarization ground penetrating radar and entropy-based polarimetric signatures [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2023, 209: 1-12.
- [ 12 ] RANGEL A, RUIZ F, PEDRAZA C, et al. Integrating statistical methods and machine learning classifiers for accurate landmine detection using ground penetrating radar a-scan signals [C]. *2024 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*. IEEE, 2024: 349-350.
- [ 13 ] ŠIPOŠ D, GLEICH D. A lightweight and low-power UAV-borne ground penetrating radar design for landmine detection[J]. *Sensors*, 2020, 20(8): 2234.
- [ 14 ] BURR R, SCHARTEL M, GRATHWOHL A, et al. UAV-Borne FMCW InSAR for focusing buried objects[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 1-5.
- [ 15 ] 刘琦, 晋良念, 张燕, 等. 超宽带雷达人体呼吸在线检测系统设计[J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(10): 1606-1614.
- LIU Q, JIN L N, ZHANG Y, et al. Design of ultra-wideband radar system for online detection of human respiratory[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(10): 1606-1614.
- [ 16 ] 李品用, 晋良念, 唐茜, 等. 基于 VNA 的穿墙雷达人体呼吸检测系统设计[J]. *电子测量技术*, 2018, 41(4): 11-15.
- LI P Y, JIN L N, TANG Q, et al. Human respiration detection system design for through-the-wall radar based on VNA[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2018, 41(4): 11-15.
- [ 17 ] 刘伟, 吴飞燕, 范岩. 基于矢量网络分析仪的宽带步进频 RCS 测试系统[J]. *国外电子测量技术*, 2019, 38(6): 154-158.
- LIU W, WU F Y, FAN Y. Broadband stepped frequency RCS test system based on VNA[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2019, 38(6): 154-158.
- [ 18 ] YE S B, LI X, LI X H, et al. A compact air-coupled SFCW ground penetrating radar and its application in the earthen sites[C]. *2024 20th International Conference on Ground Penetrating Radar*, 2024: 1-5.
- [ 19 ] 许强, 陆会燕, 李为乐, 等. 滑坡隐患类型与对应识别方法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2022,

47(3): 377-387.

XU Q, LU H Y, LI W L, et al. Types of potential landslide and corresponding identification technologies [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(3): 377-387.

[20] CURTIS J O. Electromagnetic power attenuation in soils[R]. US Army Engineer Research and Development Center, 2005.

[21] 闻乐天. 矢量网络分析仪时域测量技术及不确定度研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.

WEN L T. Research on time domain measurement technology and uncertainty based on vector network analyzer[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.

[22] 申龙. 对矢量网络分析仪频域至时域转换过程的探究[J]. 电子测试, 2022, 36(11): 47-49, 71.

SHEN L. Research on the conversion process from frequency domain to time domain of vector network analyzer[J]. Electronic Test, 2022, 36(11): 47-49, 71.

[23] SCHANTZ H G. The Art and Science of Ultra-Wideband Antennas[M]. Norwood: Artech House, 2015.

## 作者简介



李松, 2021 年于成都理工大学获得学士学位, 现为成都理工大学硕士研究生, 主要研究方向为探地雷达。

E-mail: lisong1@stu.cdut.edu.cn

**Li Song** received his B. Sc. degree from Chengdu University of Technology in 2021.

Now he is a M. Sc. candidate at Chengdu University of Technology. His main research interest includes ground penetrating radar.



高嵩(通信作者), 2015 年于成都理工大学获得博士学位, 现为成都理工大学教授, 硕士生导师, 主要研究方向为地球物理电磁探测仪器和无人机技术应用。

E-mail: gs@cdut.edu.cn

**Gao Song** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Chengdu University of Technology in 2015. Now he is a professor and M. Sc. supervisor in Chengdu University of Technology. His main research interests include geophysical electromagnetic detection instrument and application of UAV technology.