Chaotic Ground Penetrating Radar Based on Compressive Sensing for Underground Cavity Detection^{*}

SHI Zhe^{1,2}, LIU Li^{1,2*}, XU Hang^{1,2}, WANG Bingjie^{1,2}, LI Jingxia^{1,2}

(1.Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: It is an important task in urban construction to detect the underground cavities of urban roads, which can effectively reduce road collapse and ensure road safety. Compared with the conventional ground penetrating radar (GPR), the chaotic based GPR has the advantages of strong anti-interference and high signal-to-noise ratio. However, the existing chaotic GPR needs to collect a large number of data when determining the location of the cavity, and carry out cross-correlation operation between the echo signal and the delayed transmission signal, which takes a long time, and brings a great burden to the storage and transmission of the signal, which is not conducive to practical application. In this paper, a new two-dimensional imaging method based on compressed sensing is proposed for chaotic ground penetrating radar, and it is used in underground cavity detection. In this method, chaotic pulse phase modulation (CPPM) signal is used as the signal source, and compressive sensing (CS) is used to replace the cross-correlation operation in the process of traditional chaotic signal processing, so as to reduce the amount of data collected. The simulation and experimental results show that compared with the traditional chaotic GPR imaging method, the new imaging method based on CS can accurately detect the underground cavity target with only 10% of the data sampled by the traditional method while maintaining the effectiveness and accuracy of the imaging results, which greatly improves the efficiency of GPR.

Key words: ground penetrating radar (GPR); compressive sensing (CS); two dimensional imaging; underground cavity; chaotic pulse position modulation (CPPM)

EEACC: 6320 doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2020.05.039

基于压缩感知的混沌探地雷达空洞检测*

师 哲^{1,2},刘 丽^{1,2*},徐 航^{1,2},王冰洁^{1,2},李静霞^{1,2} (1.太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室,太原 030024; 2.太原理工大学物理与光电工程学院,太原 030024)

摘 要:城市道路地下空洞检测可有效减少道路塌陷,保证道路安全,是城市建设工作中的重要任务。基于混沌信号的探地 雷达相比传统探地雷达具有抗干扰性强,信噪比高,已被证明可以用于空洞检测。但现有混沌探地雷达在确定空洞位置时需 要采集大量数据,并对回波信号和延迟后的发射信号进行互相关运算,所需时间较长,给信号的存储和传输也带来很大负担, 不利于实际应用。文中针对混沌探地雷达,提出了一种基于压缩感知的二维成像新方法,并将其用于地下空洞检测。该方法 采用混沌脉冲相位调制信号作为信号源,利用压缩感知取代传统混沌信号处理过程中的互相关运算,减少信号采集数据量。 仿真和实验结果表明,基于压缩感知的混沌探地雷达成像新方法与传统混沌探地雷达成像方法相比,在保持成像结果的有效 性和准确性的同时,只需传统方法采样信号数据量的 10%即可准确检测地下空洞目标,极大地提高了探地雷达的工作效率。 关键词:探地雷达;压缩感知;二维成像;地下空洞;混沌脉冲位置调制信号

中图分类号:TN95 文献标识码:A 文章编号:1005-9490(2020)05-1158-10

项目来源:国家自然科学基金项目(41704147);国家自然科学基金项目(41604127);国家自然科学基金项目(61601319)山西 省自然科学基金项目(201801D221185);山西省重点研发计划项目(社会发展领域)(201803D31037);山西省自然 科学基金项目(201701D221114)

收稿日期:2020-02-05 修改日期:2020-04-28

70 年来我国城镇化率大幅提升,2018 年末我国 常住人口城镇化率达到 59.58%,随之相应的基础化 建设开始普及,城市道路是城镇发展的重要支撑。 城市道路下方空洞会导致地面塌陷,建筑损坏,人员 伤亡等一系列严重后果,现已经引起了政府和社会 的广泛关注^[1]。

探地雷达是近几十年发展起来的一种探测地下 目标的有效手段,是一种无损探测技术^[2],与其他 常规的地下探测方法相比,具有探测速度快、探测过 程连续、分辨率高、操作方便灵活、探测费用低等优 点^[3]。但是,在实际工程中,探地雷达工作时由于 环境复杂、杂波严重等原因,接收到的信号往往被削 弱,导致成像结果模糊,无法精确探测出地下目标。 混沌信号作为随机信号的一种,具有良好的自相关 性,且与其他任何混沌信号都不相关^[4-5]。这种体 制雷达不仅可以同时兼顾分辨率和探测距离,还具 有良好的电磁兼容性、低截获概率、强抗干扰性能等 优点^[6-8]。

然而,传统的探地雷达采样方法需要符合奈奎 斯特(Nyquist)采样理论,即采集、传输、处理大量的 数据,对于混沌信号,目标成像时需要对数据互相 关,相关后数据量更大,比常规雷达问题更为突出, 因此造成更高的硬件成本和计算负担。压缩感知 (Compressive Sensing, CS)是一种突破了传统 Nyquist采样理论限制的新采样理论。当信号具备 稀疏性或在某些基中具备稀疏性(即大多数基系数 很小或为零值)时,用随机采样获取信号的离散样 本,然后通过非线性重建算法重建信号,使用比 Nyquist采样理论所需的更少的测量量来精确重建 信号^[9]。在探地雷达数据中,目标包含信息相对整 体探测场景信息而言具备稀疏性,因此可以使用 CS 方法来减少信号采集和处理的数据。

目前 CS 技术已经被广泛应用于探地雷达领域 当中。在国外,Suksmono 等人^[10]将 CS 与频率步进 探地雷达结合,通过压缩采样提高数据采集速度; Edison 等人^[11]使用固有的天线地面模型,结合 CS 理论,消除了混响效应和空气土壤界面的强烈反射, 并简化了硬件结构,减少了数据量与采样时间; Gurbuz 等人^[12]利用 CS 将雷达成像与特征提取合 为一体,省略图像形成步骤直接提取探测对象特征, 降低了数据的采集量,这些研究均表明将 CS 与探 地雷达相结合可以大大减少雷达信号的数据量,从 而提高探地雷达的工作效率。此外,压缩感知还与 极化技术^[13],层析技术等相结合^[14],拓展出许多新 型成像算法和应用技术。 在国内,同样有众多对于压缩感知在探地雷达 领域方面的应用研究。中国科学院电子学研究所的 方广有,屈乐乐等人在结合 CS 的探地雷达的数据 采集^[15]、成像算法^[16]和成象应用方面^[17]的研究有 众多成果;桂林电子科技大学汪瑞等人^[18]针对多目 标成像问题,提出一种根据探地雷达回波特征预提 取出潜在目标位置的压缩感知成像算法;东北大学 的佘黎煌等人^[19]针对当目标物体在目标区域内不 满足稀疏性情况时,提出一种适合块目标的 CS 探 地雷达模型,提高了 CS 探地雷达的精度和分辨率; 此外,针对结合 CS 的探地雷达成像算法,国内也有 许多研究,如沈阳航空航天大学的孙延鹏等人提出 的正交频分复用技术结合 CS 的探地雷达成像方 法^[20]与基于贝叶斯学习的贝叶斯压缩感知成像算 法^[21]等。

但将 CS 应用于探地雷达时采用的信号一般为 步进频或脉冲信号^[22-25],同样易受到环境因素和杂 波影响,而混沌探地雷达已被证明具有较强的抗干 扰能力,但目前尚未见将 CS 应用于混沌探地雷达 的报道。

本文提出了一种用于混沌探地雷达的压缩感知 成像新方法,并将其用于地下空洞探测。该系统采 用混沌脉冲相位调制(Chaotic Pulse Position Modulation, CPPM)信号作为信号源,具有抗干扰能力强, 分辨率高等特点,同时,利用 CS 方法来减少信号采 集量,从而减少数据的储存和传输负担,降低混沌探 地雷达对硬件的要求,提高其实时性和实用性。此 外,该系统利用所发射的混沌信号构造 CS 所需的 测量矩阵,能够获得与传统随机高斯矩阵相似的压 缩性能,且在设计上具有较低的硬件复杂度^[26]。仿 真和实验结果表明,本文提出的基于 CS 的混沌探 地雷达利用成像新方法可通过 10%的原始数据即 可有效探测地下空洞目标信息,具有较高的分辨率。

1 压缩感知理论

传统采样时必须遵守 Nyquist 采样定理:为了不 失真地恢复模拟信号,采样频率应该不小于模拟信 号频谱中最高频率的 2 倍。压缩感知理论指出:只 要信号有稀疏性或在某个变换域是稀疏的,那么就 可以用一个与变换基不相关的测量矩阵将变换所得 高维信号投影到一个低维空间上,然后通过求解一 个优化问题就可以从这些少量的投影中以高概率重 构出原信号。信号是否可以应用 CS 取决于两个基 本准则:稀疏性和非相关性,或等距约束性^[27]。

CS的首要前提是信号的稀疏性。如果长度为

(6)

*N*的信号 X,在变换域 Ψ 中是稀疏的,则称 Ψ 为 X的稀疏矩阵或稀疏基,S 为在稀疏基内信号 X 的等价信号,为一个列向量。

$$\boldsymbol{X} = \boldsymbol{\Psi} \boldsymbol{S} \tag{1}$$

CS的第二个条件是测量矩阵与稀疏矩阵之间的非相关性。在CS编码测量模型中并不是直接测量稀疏信号 *X*本身,而是将信号投影到一组测量矩阵 *Φ*上而得到测量值 *Y*,即用一个与稀疏矩阵不相关的 *M*×*N*(*M*<*N*)测量矩阵 *Φ* 对信号 *X* 进行线性投影,得到线性测量值 *Y*。

$$Y = \Phi X = \Phi \Psi S \tag{2}$$

测量值 Y 是一个 M 维向量,这样使测量对象从 N 维降为 M 维。测量矩阵 Φ 的设计要求满足有限 等 距 性 质 RIP (Restricted Isometry Property, RIP)^[28], RIP 性质的等价条件是测量矩阵 Φ 和稀 疏基 Ψ 不相关^[29]。在式(2)中已知 Y、 Φ 、 Ψ 的情 况下求解 S,是个 NP-hard 难解问题,其本质为求最 小 ℓ_0 范数问题,如式(3)所示。在一定条件下最小 ℓ_1 范数和最小 ℓ_0 范数具有等价性,可以通过求解 ℓ_1 得出相同解,如式(4)所示。

$$\min_{\alpha} \| \alpha \|_{l_0}, \quad \text{s.t. } \boldsymbol{Y} = \boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{\Psi} \boldsymbol{S}$$
(3)

$$\min \| \alpha \|_{l_1}, \quad \text{s.t. } \boldsymbol{Y} = \boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{\Psi} \boldsymbol{S}$$
(4)

2 基于压缩感知的混沌探地雷达

2.1 基于 CS 的混沌探地雷达成像原理

混沌探地雷达成像原理如图 1 所示,电磁波信号 由发射天线发出,并由接收天线采集目标区域的反射 波,测量天线以固定间距沿 x 轴进行 M 次测量。



图1 探地雷达原理图

传统混沌雷达中,为获取目标的距离信息,需要 将参考信号与回波信号做互相关运算,然而互相关 后数据量约为原始数据的 2 倍,给信号的存储和传 输都带来很大负担。根据 Born 假设^[30-31],雷达的 回波信号 $s_R(t)$ 模型可以表示为发射信号 $s_T(t)$ 与目 标场景函数 $\sigma(t)$ 的卷积:

$$s_{R}(t) = s_{T}(t) * \sigma(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s_{T}(t-t') \sigma(t)' dt' (5)$$

可以将其离散化表示为矩阵 S_r 与向量 σ 的乘 积^[32]: $S_R = S_T \cdot \sigma$

$s_R(1)$		$\int s_T(1)$	0		0		
$s_{R}(2)$	=	$s_{T}(2)$	$s_{T}(1)$		0	$\begin{bmatrix} \sigma(1) \\ \sigma(2) \\ \vdots \\ \sigma(N-1) \\ \sigma(N) \end{bmatrix}$	
÷		:	÷	·.	÷		
$s_R(N)$		$s_T(N)$	$s_T(N-1)$		$s_{T}(1)$		
$s_R(N+1)$		0	$s_T(N)$		$s_{T}(2)$		
÷		:	÷	·.	÷		
$s_R(2N-2)$		0	0		$s_T(N-1)$		
$s_R(2N-1)$		0	0		$s_T(N)$		

矩阵 S_{τ} 是行被反转的卷积矩阵,由式(1)可以将 其视为信号的稀疏矩阵 Ψ,探地雷达二维图像可以将 目标场景分为适当分辨率的像素格来获得,如图1所 示,相对于整体目标场景,包含地下空洞目标信息的 像素格具备稀疏性,即 $\sigma(t)$ 为稀疏的,因此,采样点 处收集到的回波信号 $S_{p}(t)$ 具备稀疏性,可以利用 CS 在每个采样点处实现随机采样并重构信号。在传统 CS 成像中,需要对每个采样点包含的所有信息和对 所有采样点进行随机抽样,通常将所有采样点的信息 合为一组列向量进行 CS 重构成像,然而对于混沌信 号而言,每个采样点数据量十分庞大,利用传统的 CS 成像需要构建庞大的测量矩阵,使 CS 的信息处理过 程极难实现。因此,本文将 CS 方法与传统后向投影 (Back Projection, BP)算法相结合,提出一种 GPR (Ground Penetrating Radar, GPR)二维成像新方法:首 先在每个采样点处利用 CS 进行降采样并重构信息, 在减少混沌探地雷达所需采集的数据量的同时保证 算法可以正常实现,然后对全部采样点信息进行后向 投影算法实现对地下空洞目标的二维成像。

基于 CS 的混沌探地雷达在每个采样点处进行 降采样,将采集到的信号通过 CS 进行重构,重构算 法使用大规模 ℓ_1 -正则化最小二乘的内点法^[33],还 原出每个点处包含目标场景一维信息的函数 $\sigma(t)$ 。 对 $\sigma(t)$ 进行希尔伯特变换,得到信号的瞬时幅值:

$$G(t) = |\sigma(t) + jH\{\sigma(t)\}|$$
(7)

 $H\{\cdot\}$ 表示进行希尔伯特变换, $|\cdot|$ 表示取幅值。然后,采用后向投影算法进行目标区域二维成像。由图1所示,将整体成像区域划分为M个适当分辨率的像素网格,每个像素网格的信号 $S_p(t)$ 是天线在m个位置接收到的目标场景函数信号在不同时延的信号叠加:

$$S_{p}(t) = \sum_{m=1}^{M} |G(t)| \delta(t - 2r/v)$$
 (8)

式中:r 为收发天线中点到目标的距离,v 为电磁波 在介质中的传播速度。包含目标所在位置的网格具 有较高的值,而没有包含目标的网格的值很低,将每 个采样点信号叠加后即可得到目标区域图像结果。

2.2 CPPM 信号特性

混沌探地雷达采用的混沌信号源为 CPPM 信号,由具有随机间隔的脉冲序列组成,脉冲宽度是常数,并且每个脉冲之间的时间间隔 T_n 由特定的混沌动力学系统控制,例如 logistic 映射,如式(9)所示,其中 λ =4,初始值 x_0 =0.4,此时产生的序列处于混沌状态且具有良好的自相关性。

$$x_{n+1} = \lambda x_n (1 - x_n) \tag{9}$$

本文中的 CPPM 信号是基于 FPGA 开发板实现 的,图2是其硬件结构图,它由 logistic 映射,计数 器,比较器,脉冲发生器,静态随机存取存储器 (Static Random Access Memory, SRAM), SRAM 控制 器,收发器物理层(physical layer, PHY)和收发器 PHY 复位控制器组成。首先,计数器从零开始计 数,直到计数值大于 logistic 映射 x_{n+1} 的输出。然后, 触发脉冲发生器产生新脉冲。新脉冲被分为两部 分,分别反馈到 logistic 映射模块和计数器模块的输 入端。脉冲上升沿触发计数器复位为零,并使 logistic 映射更新进入下一状态。所产生的 CPPM 数据流通过 SRAM 控制器存储在 SRAM 中,收发器 PHY 复位控制器释放收发器 PHY 的复位状态。因 此,收发器 PHY 产生一个反馈时钟进入 SRAM 控制 器,SRAM 控制器从 SRAM 中读取并行的 CPPM 数 据流并传送至收发器 PHY。最终,收发器 PHY 解 串并行数据并产生高速率的 CPPM 信号。



图 2 CPPM 信号硬件结构

图 3(a)为 CPPM 信号的时序,单脉冲均相同如 插图所示,宽度均为 0.64 ns,幅度为 0.12 V,相邻脉 冲上升沿之间的时间间隔由 {*T_i*}决定;图 3(b)为 CPPM 信号的功率谱,带宽为 1.56 GHz;图 3(c)为 CPPM 信号的自相关函数,具有理想的 δ 函数曲线, 且具有较低的旁瓣,如插图所示,半高全宽(Full Width at Half Maximum,FWHM)为0.63 ns,理论的距离分辨率为9.6 cm。



2.3 混沌测量矩阵

压缩感知中常用的测量矩阵为随机测量矩阵, 如高斯随机测量矩阵、贝努利随机测量矩阵、稀疏随 机测量矩阵等,但这些测量矩阵由于其随机性而导 致硬件存储困难。由式(9)产生的混沌信号由于其 混沌特性,将其作为 CS 的测量矩阵时与任意稀疏 矩阵均具有良好的非相关性,且该测量矩阵性能与 初始值无关^[34],因此,本文所用的混沌信号不仅可 以作为发射信号,而且可以用于构造测量矩阵*Φ*, 从而大大降低硬件设计的复杂度,便于实际应用。 将图 3(a)所示的 CPPM 信号组成测量矩阵*Φ*,并对 其归一化处理,以便更好地满足 RIP 性质。图 4 为 大小为 100×100 的混沌测量矩阵 **Φ** 的灰度分布图, 可以看出矩阵内数值成均匀随机分布。



为验证上述混沌测量矩阵的有效性,选择 Lena 图像作为测试图像,利用混沌随机测量矩阵、高斯随 机测量矩阵、贝努利随机测量矩阵、稀疏随机测量矩 阵在不同压缩率下分别对图像进行重构成像,重构 算法均采用相同算法。为定量分析,采用峰值信噪 比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)作为图像质量 评价^[35],其表达式为:

$$PSNR = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{MAX_{I}}{\sqrt{MSE}} \right)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (\theta - \theta')^{2}$$
(10)

式中:*MAX*₁ 为常数 255,*MSE* 为均方误差, θ 为原始 值, θ 为估测值。PSNR 是一个表示信号最大可能功 率和影响它的表示精度的破坏性噪声功率的比值的 工程术语,经常用作图像压缩等领域中信号重建质 量的测量方法^[36],其值越大图像重构效果越好。

图 5 为不同压缩率(数据量压缩后的大小与压 缩前的大小之比)下四种测量矩阵重构图的 PSNR 值对比图,从图中可以看到,混沌随机测量矩阵在具 备较低硬件设计复杂度的优势下,具备与传统随机 测量矩阵相似的重构性能。



3 地下空洞模拟仿真

本文利用 XFDTD 软件进行仿真,通过建立与实际相似的空洞模型,利用混沌信号对地下空洞目标进行探测,首先通过比较选取适合的重构算法,然后对不同类型的地下空洞进行模拟探测。仿真模型如图 6 所示,总体空间为 2 m×2 m×2 m 的介电常数分布均匀的干沙,地下空洞模型处于沙子内部,模型周边截断边界采用完全匹配层(Perfectly Matched Layer, PML)作为吸收边界,基于时域有限差分法(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)的空间网格设置为0.024 3 m×0.024 3 m。雷达信号源采用CPPM 信号源,扫描路径为沿模型上表面位于 y 轴中部的一条平行于 x 轴水平直线,扫描点间距为0.024 3 m。仿真结果为绝对理想条件下的结果。



图 6 地下空洞三维仿真模型

为了对新成像方法效果进行验证,首先进行单 一目标仿真,对直径为 30 cm 的地下圆形空洞进行 仿真成像,目标掩埋深度为0.5 m。先利用全部数据 进行传统互相关处理后再利用 BP 方法成像,然后 再将数据进行基于 CS 的 BP 成像方法成像,并按不 同压缩率对原数据随机采样后重构成像,对降采样 数据成像结果进行阈值处理。由图 7(a) BP 成像效 果与图 7(b) 基于 CS 的 BP 成像方法利用 100% 原 始数据成像效果对比可知,结合 CS 的新型 BP 成像 算法在对目标的定位效果上与原始 BP 基本保持一 致,均可较为准确地定位到地下空洞目标所在位置: 而由图7(c)压缩率为0.5的重构结果与图7(d)压 缩率为0.1的重构结果中可以看到,当使用的数据 量减少时,结合 CS 的新型 BP 成像算法成像结果的 目标聚焦度有所降低,但在使用10%原始数据量的 情况下,仍可以准确定位目标位置信息。由上述结 果可以得出,本文所提出的方法无需进行传统互相 关运算,即可以通过采集较少的数据量,获得与传统 方法相媲美的成像结果。



进一步分析影响地下空洞检测性能的参数,一 般情况下,对检测结果造成影响的因素分为四种:地 面反射(直达波),其他物体干扰杂波,电磁波衰减 和电磁波实际传播速度估算。其中,为了抑制直达





波干扰信号,采用均值滤波法,即通过将每个采样点 的场景函数减去所有场景函数的均值来抑制直达波 干扰信号,提高成像效果;而对于电磁波的实际传播 速度的估算,在面对各种不同的地下情况时,只能做 近似值估计,在实验中,可以通过使用材质单一且介 电常数分布均匀的介质来确保波速估计的准确性。 针对电磁波的衰减现象与高水平杂波干扰情况,进 行进一步仿真分析。

首先对不同掩埋深度的地下空洞目标进行仿 真,将直径 30 cm 空洞目标分别掩埋在中心点离地 1 m 和 1.5 m 的位置处,成像结果如图 8 所示。由图 7、图 8 可知,距离地面越远图像弧线越长,这是由于 电磁波在地下传播过程中的衰减所造成的,目标距 离地面越远,其反射信号越弱,成像效果随之降低。 利用 10%的数据量进行重构,可准确还原出目标空 洞位置信息。

为了分析其他物体干扰杂波对空洞检测的影响,即实际检测道路下方地下空洞时,目标空洞周围可能会出现其他空洞等弱反射目标,或者金属管道等强反射目标,因此进行对同一深度的地下空气空洞分别与不同反射强度的物体同时进行探测,包括空洞,地下积水洞和金属管道等,不同材质目标的相对介电常数与电导率如表1所示。

表1 不同介质电磁特性参数

介质	相对介电常数	电导率/(S/m)
干沙	3	1×10^{-5}
空气	1	0
水	78.5	0.05
金属	300	1×10^{10}

首先进行双目标空洞仿真,将两个直径 30 cm 空洞目标掩埋在中心点离地 0.5 m 处,两空洞中心 间距 0.5 m,成像结果如图 9 所示。由图 9(a)成像 效果可以看到,当目标为多个空洞时,在目标反射波 的重叠处,信号会叠加,使成像图叠加处的信号增 强,利用 10%的数据量进行重构,由图 9(b)所示,可 准确还原出双目标空洞位置信息。

随后将右侧空洞中注满水形成积水洞,进行空洞目标与积水洞目标仿真,为了减少信号叠加,两空洞中心间距增加为1m,成像结果如图10所示。由图10成像效果可以看到,由于水的反射强度比空气强很多,充水空洞的反射波会覆盖空气空洞的反射电磁波,并且电磁波在充水空洞上表面反射最为强烈;利用10%的数据量进行重构,可准确还原原始图像信息。

随后将右侧目标换为同样大小的金属管道,进 行空洞目标与金属管道目标仿真,成像结果如图 11 所示。由图 11 成像效果可以看到,当电磁波遇到具 有更强反射的金属目标时,金属目标的反射波不但 会覆盖空气空洞的反射电磁波,并且基本在金属上 表面形成全反射;利用 10% 的数据量进行重构,可 准确还原原始图像信息。





图 11 空洞与金属双目标成像结果

经过仿真研究验证,当使用混沌探地雷达对地下 空洞进行检测时,如果目标空洞周围存在其他空洞等 弱干扰信号时,不同目标之间的信号会产生叠加现象; 当目标周围存在积水洞,金属等高水平杂波时,空洞的 检测信号会受到很大程度影响,基本被完全屏蔽。

4 实验验证

利用基于 CS 的混沌探地雷达系统进行实验验 证,实验装置如图 12(a) 所示^[37],天线沿直线等距 扫描,由 FPGA 信号源 A 产生的带宽为 1.56 GHz 的 CPPM 混沌信号,信号从两路端口引出两路相同信 号,一路作为发射信号 s_r(t) 由实时示波器 J 采集记 录,并生成混沌测量矩阵,另一路信号先通过宽带放 大器 B 放大(增益为 25 dB),再经混频器 C 进行上 变频,并进一步通过宽带放大器 D 放大(增益为 10 dB)后通过宽带喇叭发射天线 E 发射;当电磁波遇 到地下目标物时发生反射,反射的回波信号经宽带 喇叭接收天线 F 接收,天线工作频段为1 GHz~18 GHz。接收信号通过宽带放大器 G 放大(增益为 20 dB),并经混频器H下变频、低噪放大器I放大后作 为回波信号 $S_{R}(t)$,由示波器 J 进行数据采集和降采 样处理,采集到的全部信号和降采样信号都在计算 机K上进行处理。信号发生器L提供混频器所需 本振频率,本振频率为3.4 GHz。

实验场景如图 12(b) 所示,试验箱尺寸为 2 m× 1.5 m×1.5 m,箱体各面主体材质为 PE 材料,支撑架 构为钢筋材料,全部由硅胶胶板吸波材料包裹,确保 屏蔽金属反射。箱内填充介电常数分布均匀的干燥 河沙,探测目标为尺寸 0.3 m×0.2 m×0.25 m 的空 箱,将其视为目标空洞,掩埋至上表面离地 0.5 m 处,信号采集时每个采样点位置相距 0.05 m,发射天 线与接收天线间隔 0.02 m。利用 CS 重构算法分别 对全部数据和 10% 的数据进行重构成像。





(b) 实验场景图 12 实验系统

实验结果如图 13 所示,由图 13(a)与图 13(b) 中可以看出,基于 CS 的 BP 算法成像结果与传统 BP 成像结果对目标定位基本相同,目标上下表面位 置与实际掩埋位置相符,准确定位出目标方位信息; 同时,利用原始数据 10%的数据量重构成像,结果 如图 11(c)所示,成像的目标上下表面位置与实际 掩埋位置同样相符,验证了本文中提出的基于 CS 的混沌探地雷达系统的可行性。

5 结论

本文提出了一种用于混沌探地雷达的压缩感知 成像方法探测地下空洞。该方法采用 CPPM 信号 作为信号源,具有分辨率高,抗干扰能力强,电磁兼 容性好等优点,便于复杂环境下地下空洞的探测;同





时系统利用 CS 方法与 BP 算法结合成像,可以大幅 度减少信号采集量,减少系统的储存和传输负担,降 低系统的硬件成本,加快雷达数据采集速度,提高混 沌探地雷达的实时性和实用性。此外,混沌信号不 仅用于雷达发射信号,还用于构造 CS 的测量矩阵, 具有与随机高斯矩阵相似的性能,但能有效降低 CS 硬件实现的复杂度。仿真和实验结果表明,本文提 出的基于 CS 的混沌探地雷达能够有效探测地下空 洞目标,仅使用 10%的原始数据量即可还原出目标 的方位,可以用于实际应用。

参考文献:

- [1] 陶连金,袁松,安军海.城市道路地下空洞病害发展机理及对路面塌陷的影响[J].黑龙江科技大学学报,2015(3):289-293.
- [2] Vladimir Shapovalov, Victor Yavna, Andrei Kochur, et al. Application of GPR for Determining Electrophysical Properties of

Structural Layers and Materials [J]. Journal of Applied Geophysics, 2020, 172:103913.

- [3] Azizatun A, Widodo. Analysis of Ground Penetrating Radar's Capability for Detecting Underground Cavities: A Case Study in Japan Cave of Taman Hutan Raya, Bandung[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 62:012030.
- [4] Qiao J, Xu H, Zhang J, et al. High-Resolution and Anti-Jamming Chaotic Guided Radar Prototype for Perimeter Intrusion Detection [J]. Journal of Electromagnetic Waves, 2019:1-10.
- [5] Xu H, Wang B, Zhang J, et al. Chaos Through-Wall Imaging Radar[J]. Sensing and Imaging, 2017, 18(1):6.
- [6] Liu L, Guo C Y, Li J X, et al. Simultaneous Life Detection and Localization Using a Wideband Chaotic Signal with an Embedded Tone[J]. Sensors, 2016, 16(11):1866.
- [7] Wang B J, Xu H, Yang P, et al. Target Detection and Ranging Through Lossy Media Using Chaotic Radar [J]. Entropy, 2015, 17 (4):2082-2093.
- [8] Xu H, Li Y, Zhang J G, et al. Ultra-Wideband Chaos Life-Detection Radar with Sinusoidal Wave Modulation [J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2017, 27(13):1730046.
- [9] Donoho D L. Compressed Sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4):1289–1306.
- [10] Suksmono A B, Bharata E, Lestari A A, et al. Compressive Stepped-Frequency Continuous-Wave Ground-Penetrating Radar [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2010, 7(4): 665-669.
- [11] Edison C, Mathias B, Sebastien L, et al. Random Subsampling and Data Preconditioning for Ground Penetrating Radars [J]. IEEE Access, 2018, 6:26866-26880.
- [12] Gurbuz A C, Mcclellan J H, Scott W R. Compressive Sensing of Underground Structures Using GPR[J]. Digital Signal Processing, 2012,22(1):66-73.
- [13] Lu Y, Statz C, Benedix W S, et al. Enhanced GPR Target Classification by Compressed Sensing and Radar Polarimetry [C]//2017
 18th International Radar Symposium(IRS). Prague, Czech Republic. IEEE, 2017;1–8.
- [14] Qu L, Yin Y, Sun Y, et al. Diffraction Tomographic Ground-Penetrating Radar Multibistatic Imaging Algorithm with Compressive Frequency Measurements [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(10):2011-2015.
- [15] 卢策吾,刘小军,方广有. 基于感知压缩的探地雷达数据压缩 采集[J]. 电子学报,2011,39(9):2204-2206.
- [16] 屈乐乐,黄琼,方广有. 基于压缩感知的频率步进探地雷达成 像算法[J]. 系统工程与电子技术,2010,32(2):295-297.
- [17] 屈乐乐,方广有,杨天虹. 压缩感知理论在频率步进探地雷达 偏移成像中的应用[J]. 电子与信息学报,2011,33(1):21-26.
- [18] 汪瑞,欧阳缮,周丽军. 超宽带探地雷达多目标压缩感知成像 研究[J]. 微波学报,2017,33(5):50-54.
- [19] 佘黎煌,王培人,张石.基于块目标的频率步进连续波探地雷达压缩感知重建算法[J].东北大学学报(自然科学版), 2018,39(3):316-319,338.
- [20] 孙延鹏,张瀚文,屈乐乐,王尔申.基于 OFDM 的探地雷达压缩感 知成像方法[J]. 沈阳航空航天大学学报,2019,36(1):50-56.

- [21] 孙延鹏,王艺霖,屈乐乐. 基于贝叶斯压缩感知的频率步进探地 雷达成像算法[J]. 沈阳航空航天大学学报,2015,32(5):68-73.
- [22] Zhang Y, Wang G, Xia T. Compressive Orthogonal Frequency Division Multiplexing Waveform Based Ground Penetrating Radar [C]//2015 IEEE Radar Conference(RadarCon). Arlington, VA, USA. IEEE, 2015:0684-0689.
- [23] Feng W, Yi L, Sato M. Near Range Radar Imaging Based on Block Sparsity and Cross-Correlation Fusion Algorithm [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11(6):2079-2089.
- [24] Karlin R, Sato M. Model-Based Compressive Sensing Applied to Landmine Detection by GPR[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2016, 99(1):44-51.
- [25] Yang H, Li T, He Z, et al. Impulse Borehole Radar Imaging Based on Compressive Sensing [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 12(4):766-770.
- [26] 王强,李佳,沈毅. 压缩感知中确定性测量矩阵构造算法综述 [J]. 电子学报,2013,41(10):2041-2050.
- [27] Vetterli M, Marziliano P, Blu T. Sampling Signals with Finite Rate of Innovation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(6):1417-1428.
- [28] Candes E J. The Restricted Isometry Property and Its Implications for Compressed Sensing [J]. Comptes Rendus Mathematique, 2008,346(9-10):589-592.



师 **哲**(1995—),男,汉族,山西临汾 人,太原理工大学新型传感器与智能 控制教育部重点实验室,硕士研究生, 主要研究方向为探地雷达系统及信号 处理,shizhe0211@163.com;

- [29] Tsaig Y, Donoho D L. Extensions of Compressed Sensing [J]. Signal Processing, 2006, 86(3):549-571.
- [30] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, et al. Synthetic Aperture Radar Interferometry[J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 88 (3): 333 – 382.
- [31] Ulaby F T, Elachi C. Radar Polarimetry for Geoscience Applications[J]. Geocarto International, 1990, 5(3):38-38.
- [32] Tello Alonso M, Lopez-Dekker P, Mallorqui J J. A Novel Strategy for Radar Imaging Based on Compressive Sensing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(12);4285–4295.
- [33] Kim S J, Koh K, Lusting M, et al. An Interior-Point Method for Large-Scale l₁-Regularized Least Squares [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2007, 1(4):606-617.
- [34] Yu L, Barbot J P, Zheng G, et al. Compressive Sensing with Chaotic Sequence [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010, 17 (8):731-734.
- [35] 兰明然,王友国. 基于压缩感知中矩阵分解的观测矩阵改进 [J]. 计算机技术与发展,2017,27(6):56-59,65.
- [36] 董博,姚治海,李喆,等. 压缩感知 OMP 算法与 IRLS 算法在计 算鬼成像中的对比分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学 版),2016,39(1):21-27.
- [37] Li J X, Guo T, Henry L, et al. Locating Underground Pipe Using Wideband Chaotic Ground Penetrating Radar [J]. Sensors, 2019, 19(13):2913.



刘 丽(1982—),女,汉族,山西吕梁 人,太原理工大学新型传感器与智能 控制教育部重点实验室,副教授,主要 研究方向为穿墙/探地雷达系统及信 号处理,liu_li82@163.com。