光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250926001

基于伪随机编码的探地雷达信号调制方法研究

黄　维[1,2*]，欧阳健娜[1]，黄志都[1]，胡海斌[1]，董　珅[1]

（1. 广西电网有限责任公司电力科学研究院，南宁 530023；2. 广西电力装备智能控制与运维重点实验室，南宁 530023）

摘　要： 针对步进频连续波（SFCW）探地雷达发射信号极易受高强度窄带噪声干扰，导致探测精度和结果可靠性下降的问题，文章提出一种基于伪随机编码的SFCW信号调制方案。该方法利用m序列对SFCW发射信号进行相位编码，使信号呈现类噪声特性，在接收端通过相干解扩与匹配滤波实现干扰抑制与信号恢复。理论分析验证了m序列抗干扰的可行性，并设计了基于7位、31位和63位m序列的调制/解调及脉冲压缩定位方法。在gprMax仿真中，针对性地添加10倍幅值的790 MHz强窄带噪声，验证了该方案在不同位数m序列下的噪声抑制能力。实地实验结果表明，采用63位m序列调制信号配合FIR带通滤波器，相比未处理的加噪信号，探测结果的准确性与可靠性得到了有效改善。

关键词： 探地雷达；噪声抑制；伪随机编码；信噪比

中图分类号： TN957.5　**文章编号：** 1001－5868(2025)06－1121－08

Modulation Method of Ground-Penetrating Radar Signals Based on Pseudo-Random Coding

HUANG Wei[1,2], OUYANG Jianna[1], HUANG Zhidu[1], HU Haibin[1], DONG Kun[1]

(1. Guangxi Key Laboratory of Intelligent Control and Maintenance of Power Equipment, Nanning 530023, CHN;
2. Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, CHN)

Abstract: Aiming at the problem that stepped-frequency continuous wave (SFCW) ground-penetrating radar is susceptible to strong narrowband noise in complex electromagnetic environments, which leads to degraded detection performance, this study proposes a pseudo-random code-based SFCW-signal modulation scheme to suppress noise interference and enhance the signal-to-noise ratio of the echo signal, thereby improving the robustness of the system in a strong narrowband interference environment. The feasibility of the m-sequence interference resistance was verified through theoretical analysis, and modulation/demodulation and pulse compression positioning methods based on 7, 31, and 63 bit m-sequences were designed. In gprMax simulations, a 790 MHz strong narrowband noise with 10 times the amplitude was added to verify the noise-suppression capability of the proposed scheme under different m-sequence lengths. Field-experiment results show that using a 63 bit m-sequence modulated signal in conjunction with an FIR bandpass filter effectively improved the accuracy and reliability of the detection results compared with using an unprocessed noisy signal.

Key words: ground-penetrating radar; noise suppression; pseudo-random code; signal-to-noise ratio

收稿日期：2025－09－26.

基金项目：南方电网科技项目（GXKJXM20240044）.

*通信作者：黄　维

0 引言

探地雷达(GPR)是一种利用高频电磁波对地下目标进行无损检测的地球物理方法[1]。在生命探测方面,GPR已能探测出人体呼吸、心跳等微动生命迹象[2-3];在道路检测方面,GPR可高效识别路面结构层厚度、脱空等隐性病害[4-5];在工程建设中,GPR被广泛应用于工程前期地质勘察、施工过程质量控制和后期维护监测[6-7];在军事领域中,GPR已用于地雷探测、穿墙侦察和地下工事探测[8-9]。

随着城市化进程的不断加速及地下空间利用率的逐步提高,对地下不可视目标探测的精度要求变得日益严格[10]。当传统探地雷达在复杂电磁环境中工作时,信号极易受到噪声信号的干扰,导致信噪比下降,进而影响到探测深度及探测精度[11-12]。例如,在城市地下探测中,探地雷达常受Wi-Fi(2.4 GHz)和移动通信信号(如700 MHz频段)的干扰,信噪比下降幅度可达10 dB以上,导致目标探测精度显著降低;在管廊巡检过程中,地下电缆辐射的窄带电磁信号会干扰探地雷达的信号,严重时误判率可能上升至30%。

传统抗干扰方法,如频域滤波和自适应滤波,虽然在一定程度上能够抑制干扰信号,但存在频谱效率降低或实时性不足的局限。频域滤波能抑制干扰,却会削减信号的频谱宽度,影响探测深度;自适应滤波则对实时性要求较高,且难以完全抑制强窄带噪声。因此,如何在提升抗干扰能力的同时保持频谱效率,成为探地雷达技术发展的关键挑战。

与传统的脉冲式探地雷达相比,步进频连续波(SFCW)探地雷达在频率的选择上更加灵活,且具有更高的能量效率。然而,SFCW探地雷达发射的离散频率连续波极易受到高强度窄带信号干扰,导致回波信噪比下降。伪随机编码(PRC)是使用伪随机序列对发射信号进行调制,使其具有类噪声特性的一种信号调制技术,被广泛应用于通信和雷达领域中。典型的伪随机序列包括m序列、Gold序列等,具有良好的自相关和互相关特性,在接收端能够实现对有效信号的提取和对干扰信号的抑制[13-14]。

本文提出一种将SFCW探地雷达与PRC技术相结合的技术路线。该融合方案旨在保留SFCW的高分辨率、高能效优点,同时利用PRC强大的抗干扰特性来克服SFCW易受窄带干扰的缺陷,以提升现有SFCW探地雷达在复杂电磁环境中的探测精度和可靠性。

1 研究方法

1.1 相关探地雷达理论概述

1.1.1 步进频连续波探地雷达

SFCW探地雷达的发射信号为一系列离散窄带频点构建出的等效宽频带信号,能够实现对地下目标的高分辨率探测,其优势在于发射信号中每个频点发射能量一致且功率谱具有平坦特性。如图1所示,在信号发射过程中,高速数模DAC生成SFCW,该信号分为两路:一路经功率放大后,通过发射天线辐射出去;另一路作为本振参考信号,在接收端与回波信号进行耦合,经脉冲压缩后由相位信息解析得到目标距离信息[15-16]。

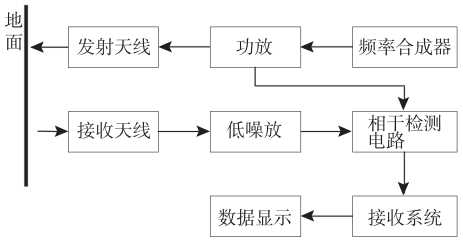


图1 步进频连续波探地雷达工作过程

频率步进信号$x(t)$的数学表达式为:

$$x(t)=\sum_{i=0}^{N-1}\mathrm{rect}\left(\frac{t-iT_r-\tau/2}{\tau}\right)\cdot \exp\left[-j2\pi(f_0+i\Delta f)t\right] \tag{1}$$

式中,T_r为脉冲信号的重复周期,τ为脉冲宽度,f_0为载波初始频率,Δf为频率变换间隔,N为频点数,rect(·)含义如下:

$$\mathrm{rect}(t/\tau)=\begin{cases}1, -\tau/2<t<\tau/2\\ 0, \text{others}\end{cases} \tag{2}$$

本振信号$z(t)$为:

$$z(t)=\sum_{i=0}^{N-1}\mathrm{rect}\left(\frac{t-iT_r-T_r/2}{T_r}\right)\cdot \exp\left[-j2\pi(f_0+i\Delta f)t\right] \tag{3}$$

距离探地雷达为R处的回波信号$y(t)$为:

$$y(t)=\sum_{i=0}^{N-1}\mathrm{rect}\left(\frac{t-iT_r-\tau/2-2R/c}{\tau}\right)\cdot \exp\left[-j2\pi(f_0+i\Delta f)\left(t-\frac{2R}{c}\right)\right] \tag{4}$$

将回波信号和本振信号进行混频得到低频复信号 $\bar{y}(t)$ 为：

$$\bar{y}(t)=\sum_{i=0}^{N-1}\mathrm{rect}\left(\frac{t-iT_r-\tau/2-2R/c}{\tau}\right)\cdot \exp\left(-j2\pi f_0\frac{2R}{c}\right)\cdot\exp\left(-j2\pi i\Delta f\frac{2R}{c}\right) \quad (5)$$

对公式(5)进行采样归一化、离散傅里叶逆变换、求模等操作，可以得到：

$$\left|\bar{y}(k)\right|=\left|\frac{\sin\left[\pi(-l+k)\right]}{\sin\left[\pi\dfrac{(-l+k)}{N}\right]}\right|,k=0,1,2,\cdots,N-1 \quad (6)$$

从公式(6)中可知，当 $k=l$ 时，等式取得最大值，此时的 k 值就是所需数据，然后根据 $k=l=\mathrm{round}(2RN\Delta f/c)$ 可以得到目标距离 R 的相关信息。

1.1.2　伪随机编码探地雷达

伪随机编码雷达通常采用二相编码的方式使用伪随机序列对发射信号进行调制，伪随机编码发射信号的二相调制过程如图 2 所示。载波的相位由相位调制器使用伪随机序列的码元调制(码元在 0 和 1 之间切换，相位同步在 0 和 π 之间切换)，由此形成探地雷达所需的伪随机编码信号。

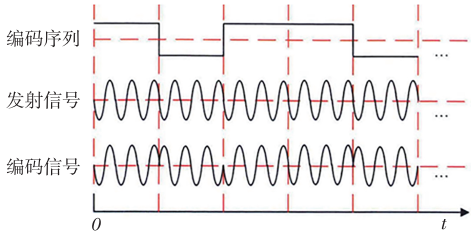


图 2　信号的二相调制过程示意图

伪随机编码探地雷达原理如图 3 所示。发射端通过伪随机码对载波实施相位调制生成宽带探测信号，接收单元捕获目标散射信号后，采用与发射编码匹配的压缩算法对回波进行时域压缩，由此实现目标分辨能力与探测灵敏度的同步提升。这种信号处理机制有效解决了传统脉冲雷达在探测深度与分辨率之间的固有矛盾。

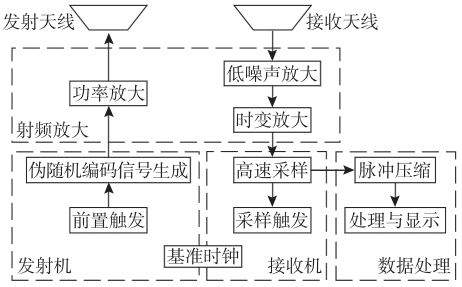


图 3　伪随机编码探地雷达原理框图

1.2　编码与解码过程

m 序列的全称为最长线性反馈移位寄存器序列，是由多级移位寄存器基于线性反馈生成的周期最长的码元序列，m 序列的产生过程如图 4 所示。

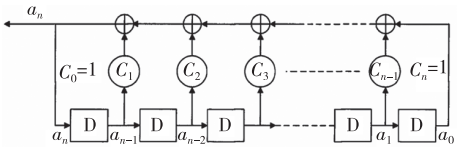


图 4　m 序列产生的线性移位寄存器

线性反馈移位寄存器的特征多项式表示为：

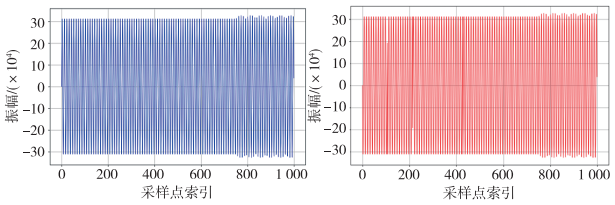
$$g(x)=c_0+c_1x+c_2x^2+\cdots+c_nx^n=\sum_{i=0}^{n}c_ix^i \quad (7)$$

式中，n 为移位寄存器的级数；x 是形式变量；c_i 是系数，当取值为 0 时，表示对应位置不参与反馈，当取值为 1 时，表示对应位置参与反馈。

1.2.1　编码过程

以 7 位 m 序列对 300～1 000 MHz 的 SFCW 信号编码为例，编码方式如下：首先，将每个频点 750 个采样点均分为 7 段(前 6 段为 107 个采样点，第 7 段为 108 个采样点)；然后，每一段的相位与 m 序列的每一个码元一一对应。当对应到 m 序列中的码元为“1”时，此段的相位不变；当码元为“0”时，此段的相位反转 180°，即码元在 0 和 1 之间切换，相位同步在 0 和 π 之间切换。

通过对比图 5 中编码前后发射信号的时域图像，可见发射信号的相位随着 m 序列的切换而改变。然而，在调制过程中信号的幅值保持不变，不会影响发射信号的强度，也不会影响探测深度。

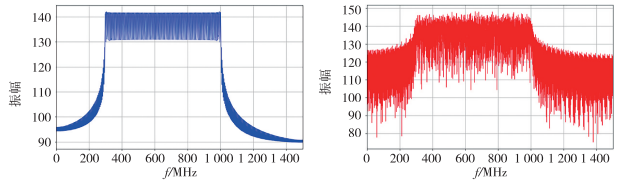


(a) 未编码信号　　(b) 编码信号

图 5　使用 7 位 m 序列编码前后信号时域对比

如图 6 所示，编码前发射信号的频谱均匀分布在 300～1 000 MHz 之间，编码后的发射信号频谱变得相对杂乱，但整体还是保持在 300～

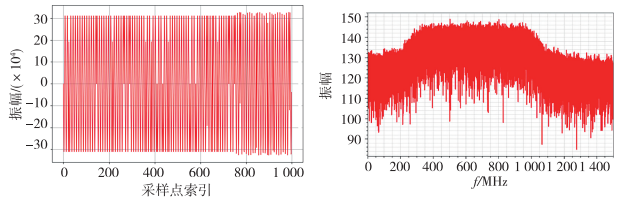
1 000 MHz之间，说明编码过程并未显著降低其频谱效率，仍然保持着SFCW探地雷达在探测深度上的优势。



（a）未编码信号 （b）编码信号

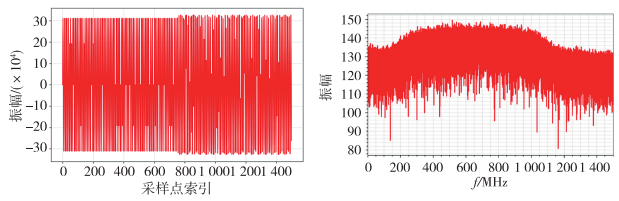
图6 使用7位m序列编码前后信号频域对比

对比图7与图8可见，随着m序列位宽增加，编码后信号在频域出现更显著的弥散，频谱效率呈下降趋势。相较于扩频形式的编码方法，极大保留了SFCW的频谱效率。



（a）时域图像 （b）频域图像

图7 使用31位m序列编码信号的时域和频域图像



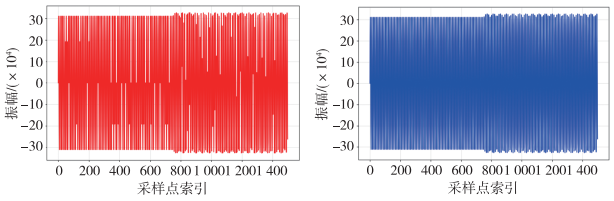
（a）时域图像 （b）频域图像

图8 使用63位m序列编码信号的时域和频域图像

1.2.2 解码过程

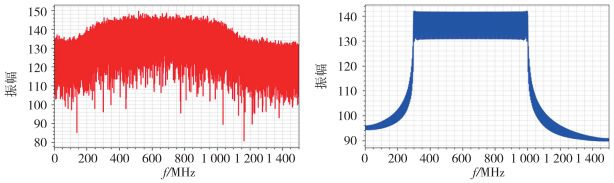
m序列解码过程可视为“二次编码”过程。在接收端，采用与发射端完全相同的伪随机序列和子段长度，将各频点的采样序列重新分段，并逐位对应每个子段相位与m序列中的码元。若码元为“1”，子段相位保持不变；若码元为“0”，则再次倒相180°。两次倒相（或零次倒相）使各子段相位回零，整频点相位恢复至发射初相。遍历全部频点后，即完成相干解扩，实现无失真解码。

对比图9与图10可见，解码后各频点相位已精确恢复至编码前状态，频谱亦由编码后的弥散形态重新收敛为标准300～1 000 MHz的矩形包络，频谱效率随之完全恢复，验证了编解码流程的严格自洽与成功匹配。



（a）未解码信号 （b）解码信号

图9 使用63位m序列信号解码前后的时域对比



（a）未解码信号 （b）解码信号

图10 使用63位m序列信号解码前后的频域对比

1.3 参数选取

1.3.1 噪声选择

为了探究实验室环境中可能存在的频段噪声干扰，在实验室中使用具有高精度和宽频段测量能力的频谱分析仪，测量了环境中存在的电磁信号，测量结果如图11所示。

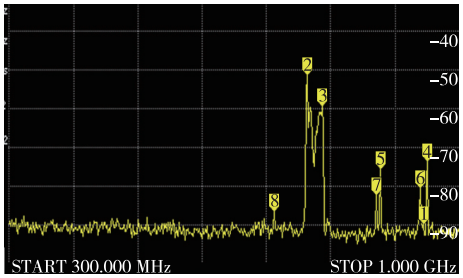


图11 实验室环境电磁背景频谱

从测试结果来看，实验室环境中存在着一些强度较高的信号干扰，比如790 MHz和870 MHz处。这些干扰信号的强度远超出了正常背景噪声水平，且信号在SFCW探地雷达所包含的频段内。

使用探地雷达设备接收环境中的电磁信号，并对接收信号进行频谱分析，得到结果如图12所示。

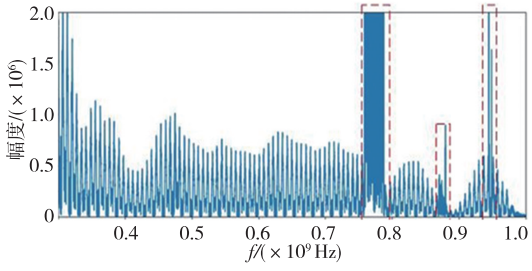


图12 回波信号中存在的噪声

由图 12 可见，790 MHz，890 MHz 及 950 MHz 三处呈现幅值突出的噪声干扰，可视为对 GPR 回波的强相干干扰。为了在仿真中逼近实验室环境，将中心频率锁定为 790 MHz，波形设计为单频正弦载波叠加零均值高斯噪声，二者按 10∶1 的峰-幅比值合成，使合成干扰的幅度期望为发射脉冲幅度的 10 倍。计算得到信噪比为：

$$SNR = 20\lg\left(\frac{A_s}{A_n}\right) = 20\lg\left(\frac{1}{10}\right) = -20\,\mathrm{dB} \quad (8)$$

式中，A_s 为发射脉冲峰－峰幅度，A_n 为合成干扰峰－峰幅度。

2　仿真实验验证

2.1　信噪比计算

仿真流程如图 13 所示。首先，在 300～1 000 MHz 频段内生成 101 点步进频连续波，步长为 7 MHz，单频点驻留为 25 ns，总帧长为 25.25 μs。然后，使用三组独立本原特征多项式分别生成 101 个 7 位、31 位及 63 位的 m 序列，确保每一个 m 序列均为随机生成。接着，对发射信号进行编码，编码后在 790 MHz 频点处添加十倍幅值的噪声。随后，使用相同的 m 序列对信号进行解码操作，再用 FIR 带通滤波器（通带 785～795 MHz）滤除带外分量，并于该频点内估计信噪比。实验结果表明，采用 7 位、31 位与 63 位 m 序列编码后，信噪比依次提升 2.6 dB，6.83 dB 与 8.63 dB。

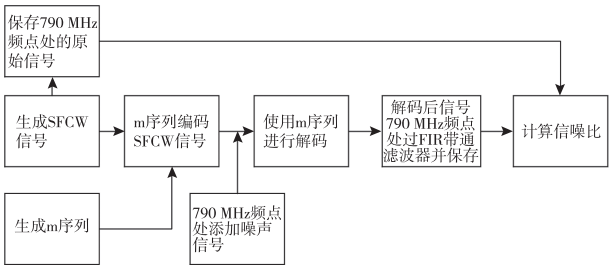


图 13　仿真流程示意图

2.2　gprMax 模拟测试

2.2.1　模型搭建

采用 SFCW 信号进行仿真，信号频率范围为 300～1 000 MHz，步长为 7 MHz，共包含 100 个频点。传统 gprMax 仿真需逐点发射 100 组单频正弦波并采集回波，或利用自定义波形一次性发射 100 步超宽带脉冲。在此框架下，仿真探测环境的参数设置如下：

（1）定义模型的尺寸：长为 4 m，宽为 2 m，高为 0.4 m；

（2）为了适应不同介质的特性，定义网格分辨率在 x，y，z 方向均为 0.01 m；

（3）最上层介质材料设为空气：相对介电常数 ε_r 为 0、电导率 σ 为 0、相对磁导率 μ_r 为 1、磁损耗为 0；下层介质定义为干燥土壤：相对介电常数 ε_r 为 4、电导率 σ 为 0、相对磁导率 μ_r 为 1、磁损耗为 0；

（4）定义探测目标：使用一个无限长（y 方向）的 PEC（理想导体）圆柱体模拟地下管道，起点（2，0.3，0），终点（2，0.3，0.4），半径为 0.15 m。

（5）在（0.1，1.61，0.2）位置放置一个 z 方向的发射天线，在（0.5，1.61，0.2）位置放置一个接收器，二者均沿 x 方向步进 0.1 m。

基于上述参数，使用 gprMax 构建的仿真检测环境如图 14 所示。

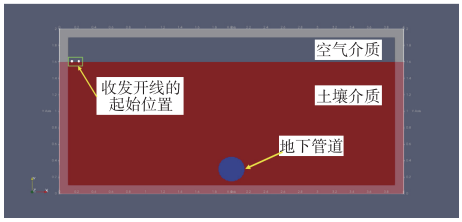


图 14　仿真模型剖面图

2.2.2　仿真流程

实验（1）：使用未编码无噪声的 SFCW 信号作为发射信号进行验证性仿真，将输出结果作为整个后续实验的参考对照。具体流程为将未编码的 SFCW 信号“发射”，发射信号与系统的冲激响应 $h(t)$ 进行卷积，然后将输出的“回波”信号进行脉冲压缩等信号处理，最后输出图像。

实验（2）：使用未编码但添加噪声的 SFCW 信号作为发射信号做对照组仿真实验，噪声波形设计为单频正弦载波叠加零均值高斯噪声，中心频率为 790 MHz，单频点噪声幅值为正常信号的 10 倍。其余流程与实验（1）相同。

实验（3）：使用 63 位的 m 序列对加噪声的 SFCW 信号进行处理，并与实验（1）和实验（2）的结果进行对比，分析编码方式对于单频点噪声的抑制作用。流程如下：首先使用 m 序列对 SFCW 信号进行编码，编码后添加实验（2）中相同噪声，接着将信号与系统的冲激响应 $h(t)$ 进行卷积，然后将输出的回波信号进行解码，并使用 FIR 带通滤波器（通带 785～795 MHz）滤除带外分量，最后将处理后的“回

波”信号进行脉冲压缩等信号处理，最后输出图像。

2.2.3 仿真结果分析

实验(1)结果：如图15的A-Scan中能够清晰看出空气与地面的交界面处的地面回波及地下目标的回波，且位置与搭建模型一致；在图16的B-scan中，能够看出整个雷达探测过程的地下目标情况，其中地下管道在图像中以双曲线的形式体现。

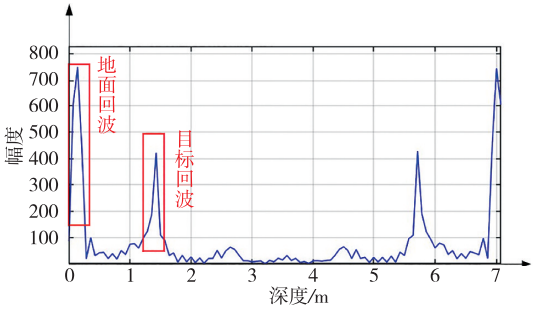


图15 发射原始信号得到的A-Scan图像

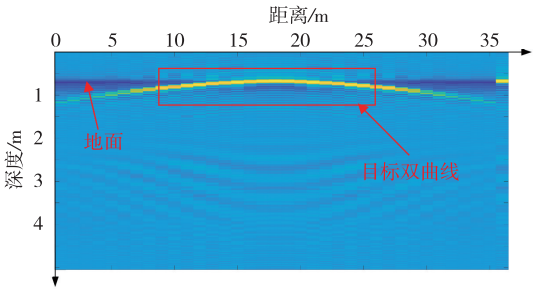


图16 发射原始信号得到的B-Scan图像

实验(2)结果：由图17可见，处理得到的A-Scan中目标回波信号已经被噪声信号覆盖；图18说明在此噪声环境下得到的B-Scan图像中目标信息几乎与背景融合，无法准确判断目标管道在图中对应的双曲线信息。

实验(3)结果：从图19可见，尽管A-Scan图中仍然存在噪声的干扰，但是对比图17，目标回波峰值已显著突出，可准确定位；如图20所示，B-Scan图像与图18相比提升明显，双曲线图像可以清晰判断。

综合三组仿真实验结果可以看出，采用m序列对SFCW信号编码后再发射，并在接收端解码，辅以FIR带通滤波，可有效抑制噪声。尽管这种处理方式的探测性能尚未达到原始发射信号的水平，但是明显优于“未编码仅加噪”的发射信号。本文使用m序列对SFCW信号进行编码的方法对噪声信号有一定的抑制作用。

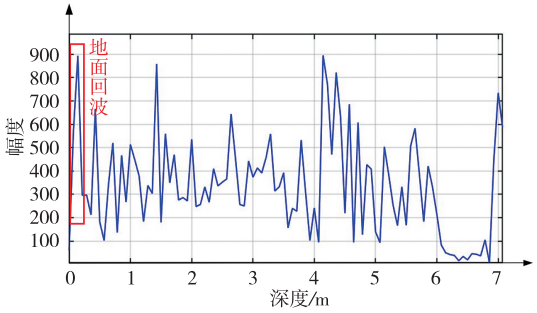


图17 发射仅加噪声信号得到的A-Scan图像

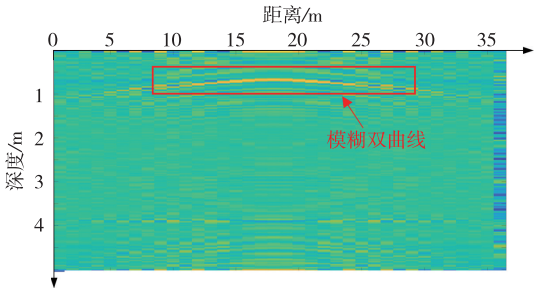


图18 发射仅加噪声信号得到的B-Scan图像

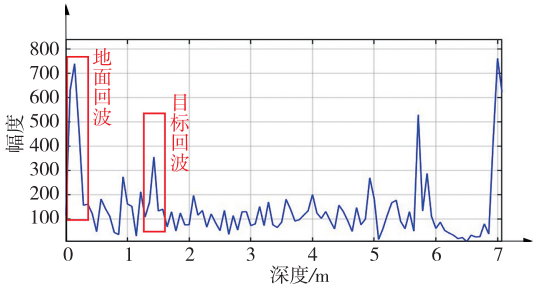


图19 发射加噪声编码后信号得到的A-Scan图像

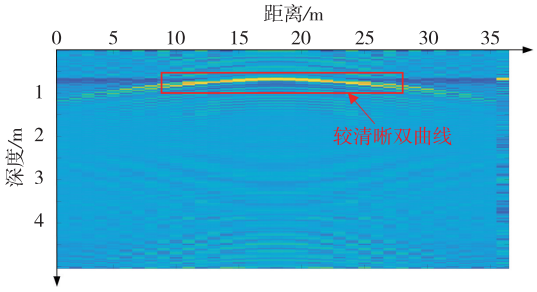
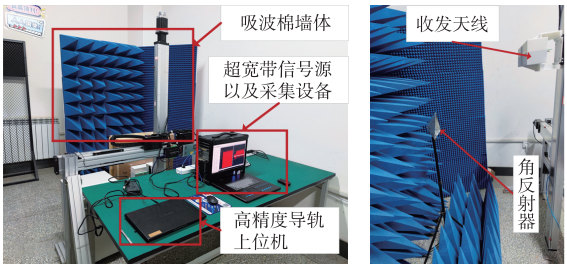


图20 发射加噪声编码后得到的B-Scan图像

3 现场试验验证

如图21(a)所示，实验测试环境在待测物体四周布置吸波材料，用于隔绝墙体回波反射及外界电磁干扰；图21(b)给出角反射器实验测试方案，角反射器距离收发天线60 cm，收发天线沿导轨上下往返一次，对角反射器完成全程扫描。实验所用的原始发射信号为频率范围为300～1 000 MHz的SFCW信号。



（a）实验信号发射设备　　（b）实验测试目标位置

图 21　现场试验场景示意图

如图 22 为发射原始信号经回波采集与处理后得到的 B-Scan 图像，能够清晰辨识出一组对称的目标双曲线，且双曲线中心位置处于设置的 60 cm 左右；顶部为直耦波经处理后的成像结果；中部因角反射器距地面较近，同步呈现地面强反射回波。

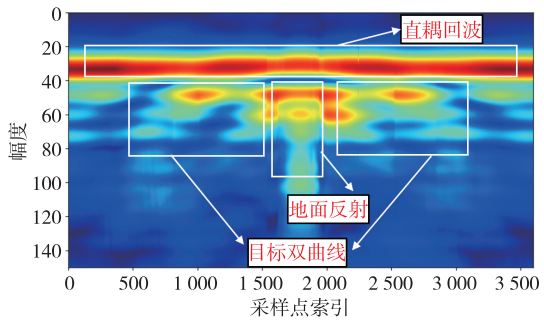


图 22　发射原始信号所得 B-Scan 图像

如图 23 为在原始 SFCW 信号的 790 MHz 频点处添加了噪声干扰，噪声形式为单频正弦载波叠加零均值高斯噪声，中心频率为 790 MHz，其回波信号处理得到的 B-Scan 图像中出现许多竖状的噪声干扰。

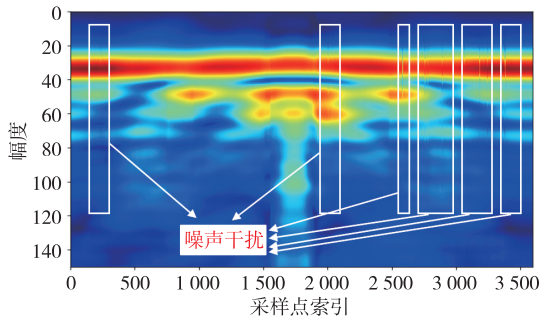


图 23　发射仅加噪声信号所得 B-Scan 图像

图 24 给出采用本文编码方案对含噪 SFCW 信号进行处理后的结果，在图 23 中出现的条带噪声干扰在经 m 序列编码及 FIR 带通滤波后已被大幅抑制。

实地实验表明，尽管本文编码方式配合 FIR 带通滤波器无法彻底根除高强度单频点噪声，但其对干扰能量的抑制效果显著，成像质量获得明显提升。

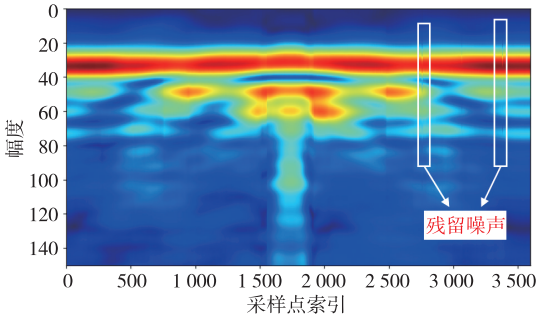


图 24　发射加噪声编码信号所得 B-Scan 图像

4　结论

本研究针对 SFCW 探地雷达在复杂电磁环境中易被高强度窄带噪声干扰、导致成像质量下降的问题，提出并验证了一种基于伪随机 m 序列的信号调制方案。首先，通过理论推导和数值仿真，在 790 MHz 处施加幅值为信号 10 倍的单频强干扰后，采用 7 位、31 位和 63 位 m 序列编码后信噪比分别提升 2.6 dB，6.83 dB 和 8.63 dB，且随着序列长度的增加，抑制效果显著增强。随后，在 gprMax 平台构建典型地下场景，对比未编码、仅加噪以及编码加噪三种情况下回波信号的成像结果：在未编码情况下，目标回波被噪声完全掩盖，B-Scan 中无法辨识管道双曲线；而在采用 63 位 m 序列编码后，目标回波得以显著恢复，双曲线轮廓清晰重现。现场实验进一步验证了该方案的有效性，结果表明将该信号调制方案与 FIR 带通滤波器级联后，可有效削弱实测环境中 790 MHz 附近的强干扰，显著改善成像质量。

实验结果表明，该方法具有以下优势：(1)能够有效抑制强窄带干扰，提升信噪比；(2)解码后频谱恢复完整，保留了原 SFCW 体制的频谱效率；(3)方法简单高效，适用于嵌入式系统实现，具备工程移植潜力。

然而，该方法也存在一定的局限性。例如，当干扰涉及多个频点或宽带噪声时，抑制效果可能下降；此外，随着 m 序列长度的增加，计算与存储开销显著增加，限制了其在资源受限的嵌入式系统中的应用。

综上所述，伪随机编码技术在不牺牲 SFCW 体制频谱优势的前提下，为探地雷达在强窄带干扰场景中的可靠探测提供了一种切实可行的解决途径。未来工作可聚焦于以下方向：(1)将该方案集成于商用 GPR 系统中，并扩展至多天线阵列雷达，以提升扫描效率与覆盖范围；(2)探索动态码长选择或硬件加速策略（如 FPGA 实现），以在嵌入式系统中进一步优化性能与资源平衡。

参考文献：

[1] 薛策文，冯 晅，李晓天，等. 全极化探地雷达多极化数据融合分析研究[J]. 雷达学报，2021，10(1)：74-85.
Xue Cewen，Feng Xuan，Li Xiaotian，et al. Multi-polarization data fusion analysis of full-polarimetric ground penetrating radar[J]. Journal of Radars，2021，10(1)：74-85.

[2] Crocco L，Ferrara V. A review on ground penetrating radar technology for the detection of buried or trapped victims[C]//2014 International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS)，2014：535-540.

[3] 夏正欢，张群英，叶盛波，等. 一种便携式伪随机编码超宽带人体感知雷达设计[J]. 雷达学报，2015，4(5)：527-537.
Xia Zhenghuan，Zhang Qunying，Ye Shengbo，et al. Design of a handheld pseudo random coded UWB radar for human sensing[J]. Journal of Radars，2015，4(5)：527-537.

[4] 刘忠杰. 探地雷达在变电站建设区域地下采空区探测中的应用[J]. 能源与节能，2019(7)：174-175.
Liu Zhongjie. Application of ground penetrating radar in detecting underground goaf in substation construction area[J]. Energy and Energy Conservation，2019(7)：174-175.

[5] Shlykov V，Spitsyn D，Guzhov S，et al. Signal processing in GPR applications for cave-in prediction in road assessment：a review [C]//2025 27th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA)，2025：1-10.

[6] Yang B，Li X，Zhang X，et al. Application of ground penetrating radar 3D detection in tunnel engineering[J]. IET Conference Proceedings，2024，2023(47)：4156-4160.

[7] Zhao W，Tian G，Forte E，et al. Advances in GPR data acquisition and analysis for archaeology [J]. Geophysical Journal International，2015，202(1)：62-71.

[8] Gonzalez-Huici M A，Giovanneschi F. A combined strategy for landmine detection and identification using synthetic GPR responses [J]. Journal of Applied Geophysics，2013，99：154-165.

[9] Šipoš D，Gleich D. A lightweight and low-power UAV-borne ground penetrating radar design for landmine detection [J]. Sensors，2020，20(8)：2234.

[10] 李志汇，唐 波，周青松，等. 新体制机载雷达波形优化设计研究综述[J]. 系统工程与电子技术，2023，45(12)：3852-3865.
Li Zhihui，Tang Bo，Zhou Qingsong，et al. Overview of waveform design methods for new system airborne radar[J]. Systems Engineering and Electronics，2023，45(12)：3852-3865.

[11] Han J，Nguyen C. Development of a tunable multiband UWB radar sensor and its applications to subsurface sensing [J]. IEEE Sensors Journal，2007，7(1)：51-58.

[12] Eyyup T ，Hakkı N ，Serkan A . Comparative analysis of short and long GPR pulses for landmine detection [J]. Proc. of SPIE，2016，9823：98230L.

[13] 李佳颖. 伪随机编码雷达信号处理研究[D]. 北京：北京理工大学，2015.
Li Jiaying. Research on signal processing of pseudo-random coded radar [D]. Beijing：Beijing Institute of Technology，2015.

[14] Abouzaid S H，Ahmad W A，Eibert T F，et al. Vital signs monitoring using pseudo-random noise coded Doppler radar with Delta - Sigma modulation [J]. IET Radar，Sonar & Navigation，2020，14(11)：1778-1787.

[15] Lü H，Jiao T，Zhang Y，et al. A novel method for breath detection via stepped-frequency continuous wave ultra-wideband (SFCW UWB) radars based on operational bandwidth segmentation[J]. Sensors，2018，18(11)：3873.

[16] Paun M. Stepped-frequency software-defined ground penetrating radar[J]. Proc. of SPIE，2020，11718：117180G.

作者简介：

黄 维(1985—)，男，广西自治区都安县人，高级工程师，主要从事电网人工智能技术研究。