

伪随机序列编码脉冲信号在探地雷达中的应用研究

张群英* 方广有

(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

摘 要: 探测深度是探地雷达最为重要的指标之一,在一定分辨率情况下如何增加探测深度一直是国内外研究的热点问题。该文对伪随机序列编码脉冲信号在探地雷达中的应用进行了研究,分析了伪随机序列编码脉冲信号的特点以及探地雷达对发射信号的应用需求,介绍了一个采用 m 序列二相脉冲调制的探地雷达实验系统,给出了该系统的测试和实验结果并对实验结果进行了理论分析,实验结果与理论分析十分吻合。分析与实验结果表明:在同样条件下,伪随机序列编码脉冲探地雷达较传统的 Impulse 探地雷达可以实现更大的探测深度,可以满足考古、地质勘察等深层探测应用的需求。

关键词: 探地雷达; 冲激雷达; 伪随机序列; 非周期自相关函数; 冲激函数

中图分类号: TN959.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)02-0424-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00356

The Study of Pseudo Random Sequence's Application to GPR

Zhang Qun-ying Fang Guang-you

(The Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing, 100190, China)

Abstract: The sounding depth is one of the most important parameter of GPR (Ground Penetrating Radar), how to expand detectable range under a given resolution is a concern issue in the field of GPR all over the world. The application of Pseudo Random Binary Sequence (PRBS) to GPR is studied in this paper. The advantages of PRBS and the demands of GPR are analyzed. A GPR experiment system adopting m -sequence is described. Some experimental data of this system and the theoretical analysis are presented. The experiments results are very coincide with theoretical analysis. This PRBS GPR can achieve deeper detectable range than Impulse GPR under the same parameters is proved with the result of analysis and experiment, and it can meet the demands of the archaeology and geology's deep sounding.

Key words: Ground Penetrating Radar (GPR); Impulse GPR; Pseudo Random Binary Sequence (PRBS); Non-period correlation function; Impulse function

1 引言

探地雷达 GPR(Ground Penetrating Radar)由于无损、非介入探测的特点,在浅层地层结构探测、反恐维稳、地震、火灾、建筑物倒塌救援、雪崩救援、考古、地质勘察等方面的应用越来越广泛^[1-5]。

探测深度是探地雷达最为重要的指标之一,在一定分辨率情况下如何扩大探测深度一直是国内外研究的热点问题。为了提高探测深度,冲激脉冲(Impulse)体制的探地雷达通常采取的办法是增大发射机峰值功率和脉冲宽度。在探地雷达系统中,增大峰值功率往往会使得接收机处于饱和状态,存在较大的探测盲区;另一方面,增大脉冲宽度必然导致分辨率下降。采用具有大时宽带宽积的脉冲压缩

信号^[6-9]作为探地雷达的发射信号可以克服Impulse体制探地雷达的缺点,通过发射大脉宽的脉冲信号获得更深的探测深度,通过对回波信号进行脉冲压缩处理获得高分辨率,但探地雷达是一种准双站的探测雷达,发射天线和接收天线距离很近,在接收机中最大的干扰信号是来自于发射机的直耦波信号。另外由于受地下损耗介质的衰减,深层目标的回波信号往往远小于收发天线之间的直耦波信号。因此,探地雷达回波信号具有低信噪比和大动态范围的特点,这就要求脉冲压缩信号具有低旁瓣特性以避免深层目标的微弱信号淹没在强信号的旁瓣里。

本文对伪随机序列编码脉冲信号在探地雷达中的应用进行了研究。第 2 节分析了伪随机序列编码脉冲信号的特点以及探地雷达对发射信号的应用需求,第 3 节介绍了一个采用 m 序列二相脉冲调制的

2010-04-07 收到, 2010-07-15 改回

*通信作者: 张群英 qyzhang@mail.ie.ac.cn

探地雷达系统, 第4节给出了该套系统的测试和实验结果, 最后对实验结果进行了理论分析。

2 伪随机序列编码脉冲及探地雷达的需求

伪随机序列又称为伪噪声码, 具有良好的非周期自相关特征, 当序列长度 P 远大于 1 时, 自相关函数的主旁瓣比趋近于 \sqrt{P} , 自相关函数趋近于冲激函数。

伪随机序列编码脉冲是采用伪随机序列调相脉冲信号, 一般相位编码信号的复数表达式可写为

$$s(t) = a(t) \exp(j\phi(t)) \exp(j2\pi f_0 t) \quad (1)$$

其中 $u(t) = a(t) \exp(j\phi(t))$ 为信号的复包络函数, $\phi(t)$ 是相位调制函数,

$$\phi_i(t) = \frac{2\pi(i-1)}{M}, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

当 M 等于 2 时, $s(t)$ 即为二相编码信号。此时, 二进制相位序列 $\phi(t)$ 只有 0 或 π 两个取值, 也可用二进制序列 $\{c_k = \exp(j\phi(t)) = 1, -1\}$ 表示。

设二相编码信号的包络为矩形, P 为码长, T 为子脉冲宽度, $v(t)$ 为子脉冲函数, 则 $a(t)$ 可表示为

$$a(t) = \begin{cases} 1/\sqrt{PT}, & 0 < t < PT \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

二相编码信号的复包络可写成

$$u(t) = \begin{cases} 1/\sqrt{P} \sum_{k=0}^{P-1} c_k v(t - kT), & 0 < t < PT \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

二相编码信号复包络 $u(t)$ 的频谱为^[1]

$$U(f) = \sqrt{\frac{P}{T}} \text{sinc}(fT) \sum_{k=0}^{P-1} c_k \exp(-j2\pi f k T) \quad (5)$$

由式(5)可得出, 二相编码信号的频谱形状主要取决于子脉冲频谱; 二相编码信号的时宽(即信号持续期)为码长乘以子脉冲宽度: $\tau = PT$, 而其等效带宽近似为子脉冲带宽 $B = 1/T$, 时宽带宽乘积为

$$D = \tau B = PT \times 1/T = P \quad (6)$$

即, 二相编码脉冲信号带宽为子码元宽度 T 的倒数,

时宽带宽乘积为码长 P , 当码长 P 远大于 1 时, 自相关函数的主旁瓣比趋近于 \sqrt{P} 。

从上面的分析可以看出, 伪随机编码脉冲信号随着伪随机序列码长的增加, 自相关函数趋近于冲激函数, 具有很低的旁瓣, 这将利于深层目标微弱回波信号的检测, 同时信号的带宽不变, 可以满足探地雷达分辨率的需求。另外, 随着码长的加长, 可以实现以低功率发射长脉冲串类噪声信号, 提高探测信号能量, 从而提高探测距离。

伪随机编码脉冲信号回波处理方法有时间域处理方法和频率域处理方法两种。设离散后的回波信号为 $e(n)$, 发射信号为 $c(n)$, 时间域处理如式(7)所示, 即求两个信号的相关函数。频率域处理算法如式(8)所示, 即通过FFT、复乘、IFFT以及滤波等算法实现两个信号的相关^[10-12]。

$$f(n) = e(n) \otimes c(n) \quad (7)$$

$$f(n) = \text{IFFT}[\text{FFT}(e(n)) * \text{FFT}(c(n))] \quad (8)$$

3 伪随机序列编码脉冲探地雷达实验系统

伪随机编码脉冲探地雷达实验系统主要由信号源、发射机、接收机、数字采样示波器和收发天线组成, 为了不失真地发射和接收超宽带信号, 要求天线的工作带宽与中心频率之比不小于 1^[13,14]。实验中采用了带反射腔的 Bowtie 天线形式, 天线的中心频率为 300 MHz, 带宽为 400 MHz, 中心频率增益为 0 dB。回波处理算法采用时域处理方法。实验系统的照片如图 1 所示, 主要参数如表 1 所示。图 2 为发射信号波形, 图 3 为发射信号的自相关函数。

4 实验结果

采用上述实验系统在中国科学院电磁辐射与探测技术重点实验室沙坑中进行了实验, 在沙坑约 0.5 m 深埋放了两个半径 15 cm 的金属圆盘, 两个金属圆盘相距约 2 m, 对沙坑中密实的沙子采用 TDR 测试仪测得相对介电常数为 4, 沙坑深度约 1 m。实验示意图如图 4 所示, 实验采用点测的测试方式,



图1 试验系统照片

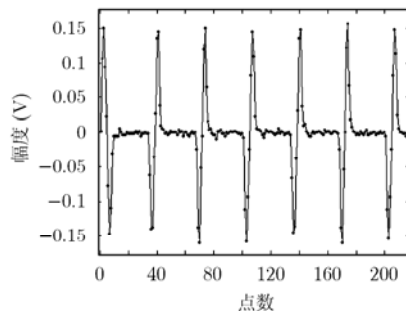


图2 发射信号波形

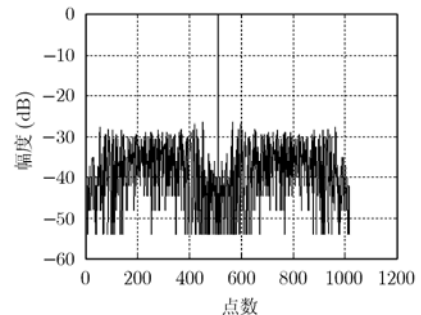


图3 发射信号自相关函数

表1 伪随机序列编码脉冲探地雷达实验系统主要参数

码长	127, 255, 511, 1023, 4095 可编程
子码宽度	3.3 ns
子码形式	Monocycle
中心频率	300 MHz
发射峰值功率	100 mW(max)可变
脉冲重复频率	1-10 kHz 可变
采样率	1.2 GHz
天线	33 cm 阻抗加载 Bowtie 天线

雷达从0点开始沿着x轴移动,测点之间间距10 cm,z轴对应沙坑的深度方向。

图5为采用m序列调制脉冲,码长为511,峰值功率100 mW的雷达图像,为了便于与实际目标埋放深度比较,纵坐标为深度方向的时延,单位为ns。从图4和图5可以看出,目标在图像中的位置与埋放的目标位置吻合,没有盲区,并且探测到了沙坑下面的水泥地面,目标图像边缘清晰,表明伪随机编码脉冲信号良好的自相关特性。

为了验证伪随机编码脉冲雷达的探测能力,将上述伪随机编码脉冲雷达与Impulse体制雷达的探测能力进行了比较实验,伪随机编码脉冲雷达采用

m序列调制,码长为511,Impulse体制雷达发射脉冲与伪随机编码脉冲雷达子脉冲相同,其他参数与伪随机编码脉冲雷达相同,如表1所示。图6-图10为发射峰值功率从100 mW-1 μW情况下,511点码长的编码脉冲雷达与冲激雷达探测结果的比较。为了便于比较,图像只截取了目标部分并进行了放大,图6-图10中横坐标表示采样道数,纵坐标表示深度方向采样的点数。图6(a)-图10(a)为511点码长的编码脉冲雷达的成像结果,图6(b)-图10(b)为Impulse体制雷达的成像结果。从图中可以看出当发射信号峰值功率小于630 μW,Impulse体制雷达探测不到目标,511点码长的编码脉冲雷达在发射信号峰值功率等于1 μW时仍能检测到目标。探测结果表明:在同样条件下,伪随机编码脉冲雷达探地雷达可以实现更大的探测深度。

图11是不同码长的发射信号在1 μW相同发射功率下的探测结果。图11(a)发射信号码长为511,图11(b)发射信号码长为1023,图11(c)发射信号码长为4095。图中横坐标表示采样道数,纵坐标表示深度方向处理的点数,图像采用了二倍插值。探测结果表明:在同样条件下,随着伪随机编码脉冲信号码长的增长,发射能量增加,发射信号自相关函数越趋近于冲激函数,越利于微弱信号的检测,雷达探测能力增加。

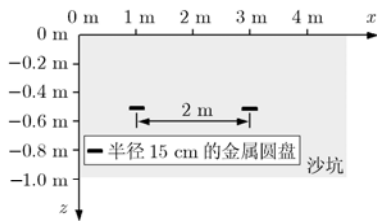


图4 实验示意图

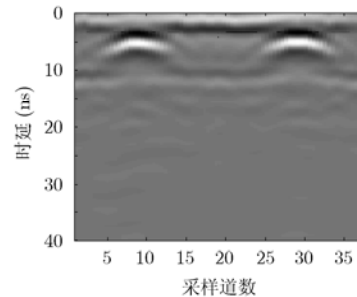
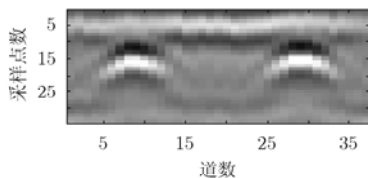
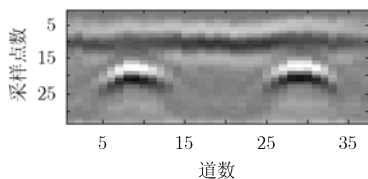


图5 实验结果

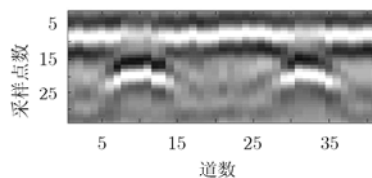


(a) 编码脉冲雷达

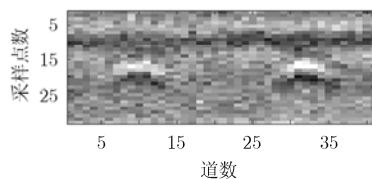


(b) Impulse 雷达

图6 峰值发射功率100 mW时两种雷达的探测结果

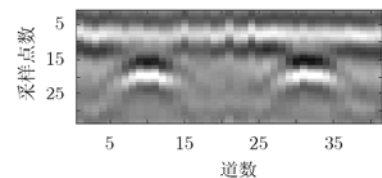


(a) 编码脉冲雷达

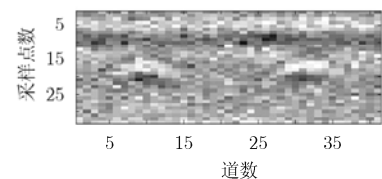


(b) Impulse 雷达

图7 峰值发射功率1 mW时两种雷达的探测结果



(a) 编码脉冲雷达



(b) Impulse 雷达

图8 峰值发射功率630 μW时两种雷达的探测结果

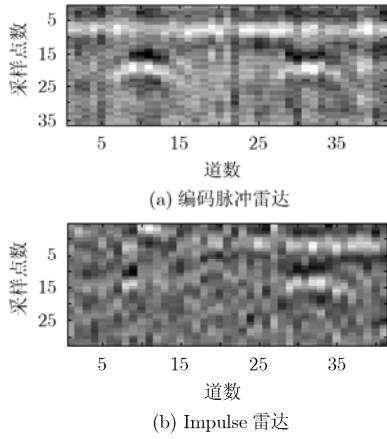


图 9 峰值发射功率 2.3 μW 时两种雷达的探测结果

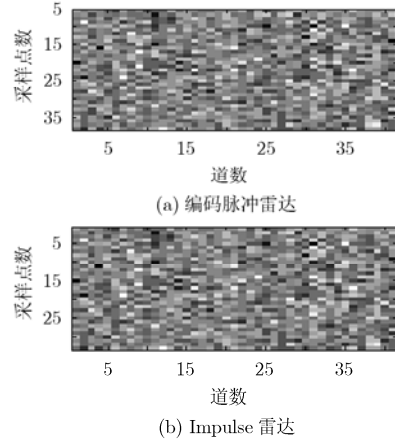


图 10 峰值发射功率 1 μW 时两种雷达的探测结果

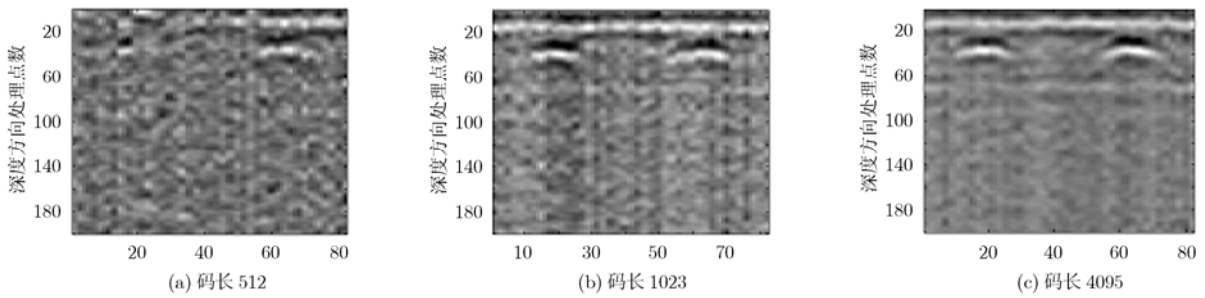


图 11 不同码长探测能力实验结果

5 实验结果分析

探地雷达系统增益定义 G_L 定义为^[1]

$$G_L = P - (S_{\min}) + G_a + G_p \quad (9)$$

其中 G_L 为雷达系统总增益, P 为发射机峰值功率, S_{\min} 为接收机灵敏度, G_a 为天线增益, G_p 为信号处理增益。

由雷达探测原理知, 为了实现对深度位于 R_{\max} 处的目标进行探测, 要求雷达系统应该具有的增益为^[1]

$$G_L = \left[\frac{e^{-4\alpha R_{\max}} \lambda \sigma_t}{(4\pi)^3 R_{\max}^4} \right]^{-1} \quad (10)$$

其中 σ_t 为地下目标的雷达后向散射截面, σ_t 的单位是 m^2 , λ 为电磁波在介质中的波长。

对于沙坑中孤立的金属圆盘, 为了分析方便, 可以假设成介质球状目标。由电磁场理论知, 当介质球状目标的半径 a 与雷达信号波长 λ 满足关系式 $2\pi a / \lambda \approx 1$ 时, 介质球状目标的雷达散射截面积为 $\sigma_t = |\Gamma|^2 \lambda^2 / 4\pi$, 此时,

$$G_L = \left[\frac{|\Gamma|^2 e^{-4\alpha R_{\max}} \lambda^4}{256\pi^4 R_{\max}^4} \right]^{-1} \quad (11)$$

对于中心频率 300 MHz 的雷达系统, 对应沙子

中的波长约为 50 cm, 则由 $2\pi a / \lambda \approx 1$ 推出介质球半径为 13 cm。则当金属圆盘深度为 50 cm 时, 通过式(11)计算出 $G_L = 45.21$ dB, 即要探测到金属圆盘, 雷达系统增益要大于 45.21 dB。

在本文实验中, 接收机采用 Tektronix 的采样示波器 TDS6804B, 采样示波器的灵敏度为 500 μV, 对应灵敏度 $S_{\min} = -53$ dBm, 天线增益 $G_a = 0$ dB。

(c) 码长 4095
对于 Impulse 探测雷达, 当发射机峰值功率 $P = 1 \mu W = -30$ dBm, 由于没有处理增益, 系统增益 G_L 为, $G_L = P - (S_{\min}) + G_a + G_p = -30 - (-53) + 0 + 0 = 23$ dB, 远远小于 45.21 dB, 探测不到目标, 如图 10(b)所示。

对于伪随机编码脉冲雷达, 在同样 1 μW 发射机峰值功率下, 当采用码长 511 的伪随机序列, 处理增益为 27 dB, 系统增益 $G = 50$ dB, 可以探测到目标, 但图像信噪比低, 比较模糊, 如图 10(a)所示; 当采用码长 1023 的伪随机序列, 处理增益为 30 dB, 系统增益 $G = 53$ dB, 图像中目标清楚, 信噪比提高, 如图 11(b)所示; 当采用码长 4095 的伪随机序列, 处理增益为 36 dB, 系统增益 $G = 59$ dB, 图像信噪比得到更大的提高, 如图 11(c)所示。

6 结论

本文通过理论分析、实验以及对实验结果的分析,得出用伪随机序列编码脉冲信号的探地雷达比常规Impulse体制的探地雷达具有更强的探测能力,伪随机序列编码脉冲信号既保持了子脉冲信号探测的分辨率,又可以实现以低功率发射长脉冲信号,提高探测信号能量,提高探测距离;利用伪随机序列编码信号非周期自相关性好,伪随机序列编码脉冲技术可以实现微弱信号检测,可以满足考古、地质勘察等深层探测应用的需求。

参 考 文 献

- [1] Daniels D J. Ground Penetrating Radar. The Institute of Engineer Engineers, London, United Kingdom, Michael Faraday House, 2004: 3-4.
- [2] Charlotte Corbel, Svein-Erik Hamran, and Richard Ney, *et al.*. The WISDOM UHF GPR on ExoMars mission. 11th International Conference on Ground Penetrating Radar, Columbus Ohio, USA, June 19-22, 2006: 15-20.
- [3] Aftanas Michal. Imaging of the building contours with through the wall UWB radar system. *Radio Engineering*, 2009, 18(3): 258-264.
- [4] Kazunori Takahashi and Motoyuki Sato. A hand-held dual-sensor system using impulse GPR for demining. Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Ultra-Wideband (ICUWB2008), Germany, September 10-12, 2008: 157-160.
- [5] Andreas Loizos and Christina Plati. Ground penetrating radar: a smart sensor for the evaluation of the railway trackbed. Instrumentation and Measurement Technology Conference — IMTC 2007 Warsaw, Poland, May 1-3, 2007: 1-6.
- [6] Zetik R, Sachs J, and Thomä. R S. UWB short-range radar sensing—The architecture of a baseband, pseudo-noise UWB radar sensor. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2007, 4: 39-45.
- [7] Sachs J and Badstübner A. High resolution non-destructive testing in civil engineering by ultra-wideband pseudo-noise approaches. Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Ultra- Wideband (ICUWB2008), Germany, September 10-12, 2008: 137-140.
- [8] Yoshiyuki Tomizawa and Ikuo Arai. Coded pulse signal subsurface radar. *Electronics and Communications in Japan*, 2002, Part 1, 85(2): 8-16.
- [9] Ana Vazquez Alejos and Dawood Muhammad, *et al.*. Ground Penetration Radar using Golay Sequence. 2007 IEEE Region 5 Technical Conference, Fayetteville, AR, April 20-21, 2007: 318-321.
- [10] Ing. Michal Aftanas. Through wall imaging using M-sequence UWB radar system. [Ph.D. dissertation], Technical University at Kosice, 2007.
- [11] Bianchi C, Sciacca U, and Zirizzotti A, *et al.*. Signal processing techniques for phase-coded HF-VHF radars. *Annals of Geophysics*, 2003, 46(4): 697-705.
- [12] 张群英, 方广有, 尹肖飞. 一种伪随机序列在探地雷达应用中回波数据预处理方法. 中国专利, 200810227477.8, 2008.
Zhang Qun-ying, Fang Guang-you, and Yin Xiao-fei. An Pre-processing algorithm of Pseudo random sequence's echo in GPR. China Patent 200810227477.8, 2008.
- [13] Ming Yan, Mao Tian, and Lu Gan, *et al.*. Impulse ground penetrating radar hardware system design, Proceedings of 6th International Conference on ITS Telecommunications, Taiwan, June 26-30, 2006: 1244-1247.
- [14] Aftanas M, Rovnakova J, and Riskova M, *et al.*. An analysis of 2D target positioning accuracy for M-sequence UWB radar system under ideal conditions. Proceedings of 7th International Conference Radioelektronika, Brno, Czech Republic, Apr. 2007: 189-194.

张群英: 女, 1972年生, 研究员, 研究方向为雷达系统设计、雷达信号产生、信号处理技术。

方广有: 男, 1963年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为电磁场与微波技术、超宽带微波探测技术。