

基于 BPSK 解调算法的随钻测量无线通信系统的搭建

宋雷震

(淮南联合大学 智能制造学院, 淮南 232038)

摘要: 地质勘测中, 确保勘测数据的精准并能够随时根据钻井情况调整姿势是钻井工程的技术关键。当前国内外随钻测量系统通信技术主要是基于脉冲数据传输方案, 这种技术传输性能弱、局限性大。引入随钻测量无线电磁传输技术解决钻井通信问题, 基于 BPSK (Binary Phase Shift Keying) 调制方案, 对通信传输系统进行优化, 并做通信实验测试。结果表明 BPSK 方案能很好提升信号宽带能力, 传输速率达到 100 bit/s, 误码率 $< 0.1\%$, 有效解决载波问题, 同时工频信号与噪声信号抗干扰能力进一步提升。研究内容对地质钻井平台精准控制具有较大意义。

关键词: BPSK 解调算法; 随钻测量; 无线通信

中图分类号: TP399 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2024)01-0151-06

Establishment of wireless communication system for measuring while drilling based on BPSK demodulation algorithm

SONG Leizhen

(College of Information Engineering, Huainan Union University, Huainan 232038, China)

Abstract: In the geological survey, to ensure the accuracy of the survey data and to be able to adjust the posture according to the drilling situation at any time are the key technical points in drilling engineering. At present, the communication technology of measuring while drilling at home and abroad is mainly based on pulse data transmission scheme, which has weak transmission performance and large limitations. Therefore, this study introduces the wireless electromagnetic transmission technology of measuring while drilling to solve the drilling communication problem. Based on the BPSK (Binary Phase Shift Keying) modulation scheme, this study optimizes the communication transmission system and conducts the communication experiment. The results show that the BPSK scheme can improve the broadband capability of the signal very well, with the transmission rate reaching 100 bit/s and the bit error rate solution being less than 0.1%, and hence can effectively solve the carrier problem. Meanwhile, the anti-interference ability of power frequency signal and noise signal is improved. The findings of this study are of great significance to the precise control of geological drilling platform.

Key words: BPSK demodulation algorithm; measurement while drilling; wireless communication

收稿日期: 2022-09-18

基金项目: 安徽省 2019 年自然科学重点项目(KJ2019A1000); 淮南联合大学 2021 年校级创新工作室项目(LZX2002)

作者简介: 宋雷震(1980-), 男, 黑龙江双鸭山人。硕士, 副教授, 主要从事电气自动化研究。E-mail: 56042485@qq.com。

现代化工业技术的快速发展,人们对不可再生能源的需求与日俱增,随着陆地石油、煤炭等资源逐渐枯竭,新的能源开发必然朝着更为广阔、神秘的大海进发,实时随钻测量技术正是要使用到的关键技术。随钻测量技术的通信传输基于钻机液脉冲无线传输技术,在当前能源开采中被大量应用,能够有效为地下钻井提供精准的信号定位^[1-2]。但是钻井液脉冲通信技术在应用中存在使用场景局限性问题,且对钻井液的使用也有要求,因为钻井液对通信传输有质量影响,容易造成信号衰减以及数据质量下降。随着通信技术的发展,可以通过对钻井通信信号进行 BPSK 算法调制优化处理,解决通信上的缺陷,在目前的地质勘探领域中具有重要研究价值与应用价值^[3]。

1 基于 BPSK 解调算法的随钻测量通信系统设计

1.1 发射端系统 BPSK 调制信号实现

电磁随钻测量无线通信系统主要有两部分构成,分别是信号发射器与信号接收器。信号接收器系统利用低频电磁波做为信号传输介质,经过系统调制处理后再由信号发射器发出,地面接收天线接收信号并处理解码为原始信号,获得信号控制数据^[4]。电磁波信号在地层传播受到电导率、磁导率、介电常数等参数影响,如式(1)所示:

$$k = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} = \alpha + j\beta \quad (1)$$

式中: μ 为磁导率; σ 为电导率; ϵ 为介电常数; ω 为角频率; j 为磁感应强度; α 为角度; β 为磁通系统数。

电磁随钻测量在目前地质钻井勘探中比较前沿,优势是信号稳定、精度高,对通信信号介质要求不高^[5-6]。在随钻无线通信系统中,发射器输出差分信号被地面天线两端接收,通信系统信号接收原理如图 1 所示。

随钻测量无线通信系统主要由井下发射系统与地面天线接收系统 2 个部分组成,其中发射装置包含 BPSK 解调模块功放电路组件^[7-8]。

发射系统工作原理:由发射端传感器接收采集信号,经由微控制器 MCU(Micro Controller Unit)处理信号,再由 BPSK 对信号调制处理发送给放大器,放大信号由天线发出。二进制键控信号(Binary Phase Shift Keying, BPSK)调制的工作原理是以不同相位正弦波表示 0 与 1 的二进制调制形式。信号处理中初始相位 0 的正弦波表示信号 0,初始相位为 180 正弦波表示为 1^[9]。调制后载波公式如下:

$$e_{\text{BPSK}}(t) = \cos(\omega_c t + \varphi_n), \varphi_n = \begin{cases} 0^\circ \\ 180^\circ \end{cases} \quad (2)$$

式中: ω_c 为载波信号的频率; φ_n 为第 n 个字符的绝对相位。

以不同初始相位来表示基带信号调制形式,二进制键控信号时间波形图如图 2 所示。

利用 MCU(Micro Controller Unit)数模转换器调制系统所需要的正弦波频率,其数字信号与模拟信号输出公式为

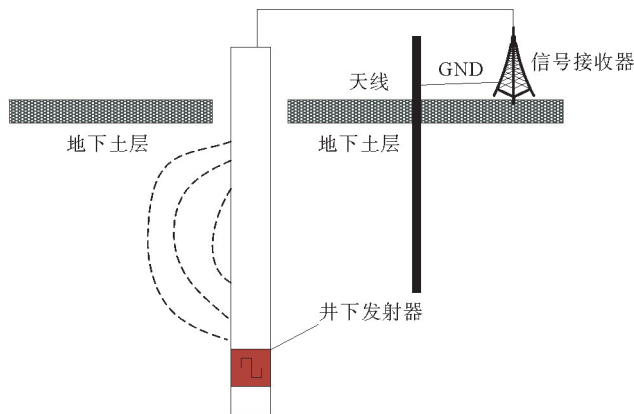


图 1 随钻测量无线电磁传输系统测量原理示意

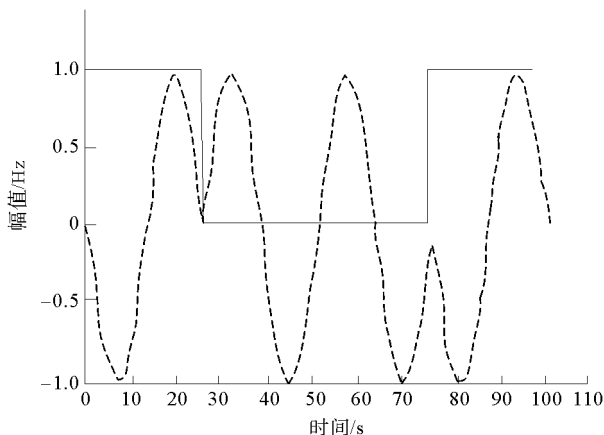


图 2 二进制键控信号波形
—— BPSK 信号; -- 基带信号

$$V_{\text{out}} = V_{\text{ref}} \times (\text{DAC12_x DAT}) / 4096 \quad (3)$$

式中: V_{out} 为数模转换器输出模拟信号; V_{ref} 为参考电压; DAC12_x DAT 为输入寄存器。

基于 MCU 完成对 BPSK 信号的调制处理, 需要实现数字基带信号的接收, 并对接收信号的数据帧头做处理, 控制数模转换器生成正弦波, 同时优化系统整体功耗等。考虑到钻井环境的复杂性, 特别是不同钻井下的电阻率存在差异, 电阻率过低, 电流会过大而损坏功放, 为确保功放发射信号的稳定, 对其增益倍数做有效调整。依据采样获得功放发射电流值对其倍数调节, 保持功放电流在 1~2 A 之间, 从而稳定发射机功率^[10-11]。

1.2 接收端系统 BPSK 解调信号实现

BPSK 解调过程有多种解调算法, 最经典的算法是相干解调, 相干解调算法的工作原理如图 3 所示。

带通滤波器对信号完成降噪处理, 锁相环实现信号相位差与本地载波的调整, 保障相位同步, 本地载波与同步相位处理信号相乘, 通过低通滤波器再次处理获得基带通信信号, 最后抽样判定器对基带信号做原始信号处理得到最终信号。

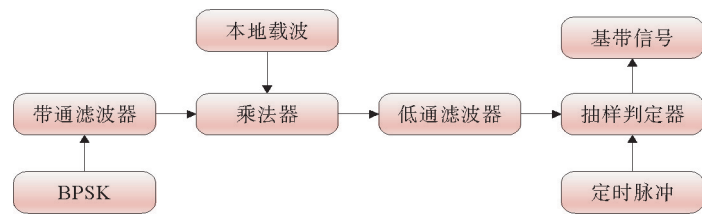


图 3 工作原理

相干解调算法在应用中存在缺陷, 例如对本地载波与相位同步要求较高, 即使是微小的误差也会影响解调效果; 当信号相位与本地载波相位相差 180° 时, 可能存在相位误同步问题, 基带信号与实际信号恰巧相反。考虑到此解调算法的问题, 分别对比了 2FSK (Frequency Shift Keying) 与 BPSK 两种解调优化形式。选择性能更优异的后者, 优化设计了一种前后码元的 BPSK 解调优化算法, 也被称作信号差分相干算法, 对原算法缺陷加以优化, 在原有算法中增加对延时信号的处理, 利用延时单元将滤波信号推迟 1 个码元周期获得延时信号, 再由乘法器处理, 按照原有思路处理得到更为准确的基带信号^[12]。带通滤波处理 BPSK 调节信号为

$$e_n(t) = \cos(\omega_c t + \varphi_n) \quad (4)$$

延迟 1 个码元周期信号为

$$e_{n-1}(t) = \cos(\omega_c t + \varphi_{n-1}) \quad (5)$$

2 个信号经乘法器运算为

$$e_{\text{mul}}(t) = 0.5 \times [\cos(2\omega_c t + \varphi_n + \varphi_{n-1}) + \cos(\varphi_n - \varphi_{n-1})] \quad (6)$$

通过低通滤波信号处理, 得到:

$$e_{\text{lef}}(t) = 0.5 \times \cos(\varphi_n - \varphi_{n-1}) \quad (7)$$

式中: e_n 为调节载波; e_{lef} 为低通滤波后的载波。

当结论显示两码元相同时, 得到 $e_{\text{lef}}(t) = 0.5$; 不同时, 得到 $e_{\text{lef}}(t) = -0.5$ 。

对数字低通滤波器进行数据采集分析, 分析工具为 FDATool (Filter Design & Analysis Tool), 将滤波技术指标数据输入信号工具进行 FIR (Finite Impulse Response) 滤波器的设计, 测试性能参数有零极点分布、幅度相应滤波器系数等, 图 4 为低通 FIR 滤波器性能仿真图。

由图 4 可知, 在 800 Hz 以内, 对滤波信号进行监测, 其变化为线性特征, 当在 800 Hz 处时得到幅度增益小于 -80 dB, 满足滤波器设计指标, 生成的低频滤波器为 31 阶偶对称系数, 符合系统设计要

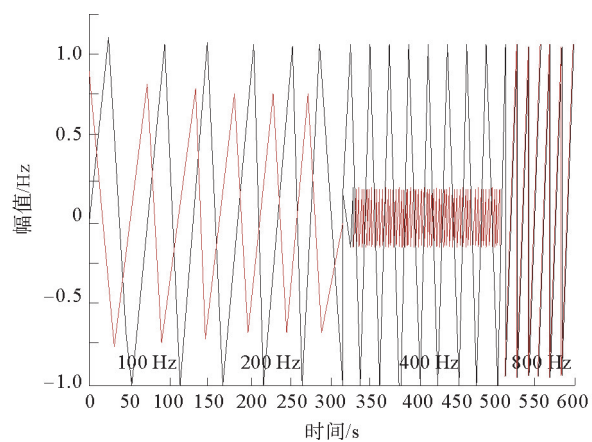


图 4 低通 FIR 滤波器性能仿真

— 滤波信号; — 原始信号

采取 BPSK 信号差分算法实现解调设计,并基于数字电路板 FPGA(Field Programmable Gate Array)实现设计功能。ADC(Analog Digital Converter)控制器负责模拟信号的采集,并将信号送到数据处理电路,在设计中采用 AD7980 型号的 ADC 控制器,具有高性能、低功耗的特点。为了让 ADC 正确采样信号,将信号输出参考电平提升一半,信号采样中不再是原始 $e_{\text{BPSK}}(t) = \cos(\omega_c t + \varphi_n)$ 信号,增加电平信号公式为: $e_{\text{BPSK}}(t) = 0.5 \times V_{\text{ref}} + \cos(\omega_c t + \varphi_n)$ 。由于信号改变会对解调产生影响,需要将信号还原为原始信号,所以 ADC 模块需要具备将抬升的信号还原为原始信号的能力,同时具备原始信号转换为其他补码的功能。

在整个 BPSK 信号差分调节算法中,延迟单元是系统设计的重要部分,为了能够在 FPGA 中实现信号解调,需要解决寄存器与延迟单元数据缓存的矛盾。因此,在设计中将码元周期采样次数设置为 80 次,并且每个数据为 16 bit,该种设计会占用大量的 FPGA 寄存器性能以及逻辑电路,使整个开发板电路效率降低,无法满足设计要求。因此,设计中在 FPGA 中设计集成的 RAM(Random Access Memory)解决此问题。乘法器的选择满足符号数运算即可,并在 FPGA 板中集成一个计算单元,降低资源的占用。FIR 数字滤波器的选择考虑到应用环境是对通信信号的处理,系统对信号延迟要求较高,同时 ADC 信号对数据处理要求高,选择并行结构 FIR 滤波器实现设计;最后抽样判定器主要对基带信号阈值判定与信号抽样,解码得出原始数据,设计中数据结构为 $\langle 1111110 + 24 \text{ bit 基带信号形式} \rangle$ 。

2 通信系统性能测试

基于 BPSK 解调算法的随钻测量无线通信系统性能测试主要包括两部分,首先是硬件电路的调试,其次是软件部分的调试。PCB(Printed Circuit Board)板电路走线测试中,检查电路板是否连通^[13-14],是否存在虚焊,确认完整后测量 PCB 板尺寸参数及电压系统供电参数(表 1、表 2)。

由表 1 可知,原始板与新板在尺寸参数中有所不同,新板的尺寸明显缩小,满足通信系统设计要求,提升系统空间布置效率。由表 2 可知,电源提供的电压满足系统供电要求,实际值基本接近理论值,电源纹波处于合理范围,对系统影响可控。根据官方芯片使用手册,可计算得出新旧发射板电路功耗数据。

为了更好地反应 BPSK 信号差分相干调节算法在 FPGA 板的应用效果,软件部分的数据测试基于仿真 modelsim 平台,搭建测试平台需要大量的 ADC 采样数据,利用 MATLAB 平台的数字基带信号产生离散正弦信号,并对它做量化处理,作为模拟 ADC 输出信号。

为确保数据测试精准,会在信号中加入不同强度的高斯白噪声来测试信号降噪比以及误码率。考虑到信号峰值的波动,会对相同降噪比下的不同信号幅度解码能力与误码率进行模拟。图 5 为不同信噪比与不同峰值对比图。

从图 5(a)可知输入信噪比均为 10 dB,但信号峰峰值存在差异,图 5(a)中的信号峰峰值为 0.5 倍的参考电压,可以发现相同信噪比不同信号峰值状态下信号峰值小时基带滤波器输出上升沿与下降沿均出现变缓,但对解调过程没有影响,能够得到正确调节信号;图 5(b)为不同信噪比相同峰值对比,当噪声增大时,基带滤波器输出信号上升沿与下降沿不明显,高低电平状态具有明显的波动,信号质量不佳,但输出结果仍旧可以获得正确调节信号。因此可得到输出的信噪比对信号有直接影响的结论,信噪比在 0.5 dB 以上可以解调正确信号,反之信号误码率增大,因此系统设计中 ADC 模拟信号降噪比应设置为大于某确切值。

表 1 PCB 板尺寸参数

			mm
发射板	长度	宽度	高度
原始发射板	265	24	10
新发射板	174	23	8

表 2 电压系统供电参数

电压型号	理论值/V	实际值/V	纹波峰峰值/mV
模拟正电压	5.0	4.97	235
模拟负电压	-5.0	-4.98	-235
数字电压	3.4	3.42	121

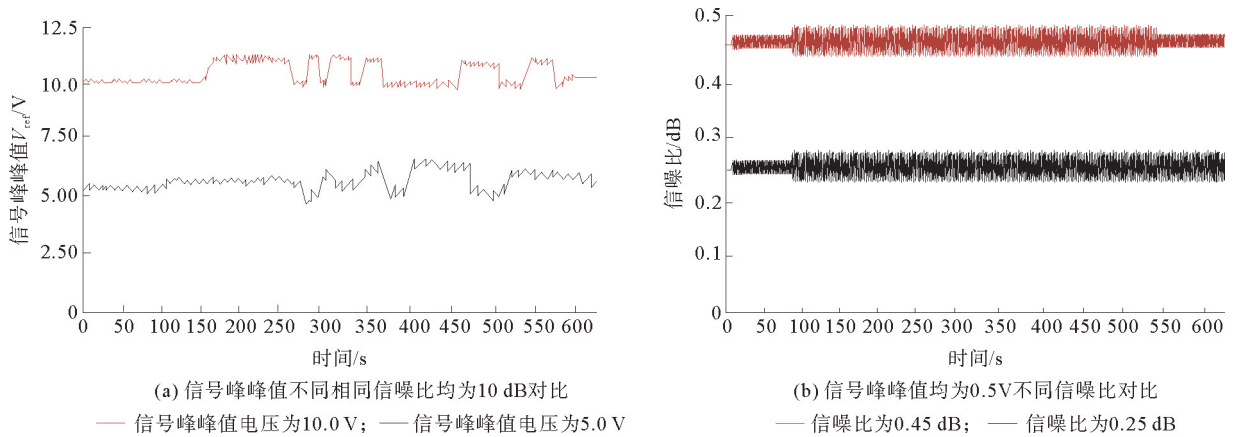


图 5 不同信噪比与不同峰值对比

利用示波器对发射电路输出信号进行测试,观察示波器主要参数的变化,图 6 为天线端接收端信号波形图。

从图 6 可以看出信号衰减程度不高,信噪比保持在较高水准。之后对接收到的 BPSK 信号参数进行测试,在发射板中重复发出 1 组数据“3DF6Ad4e”进行 1800 组数据测试,观察得知经过接收板调解出来的基带信号依旧能解调出原始数据,且信号误码率也满足设计要求。同时为了更好地显示 BPSK 信号传输方式的优势,与传统 2FSK 信号传输方式进行对比,如图 7 所示。

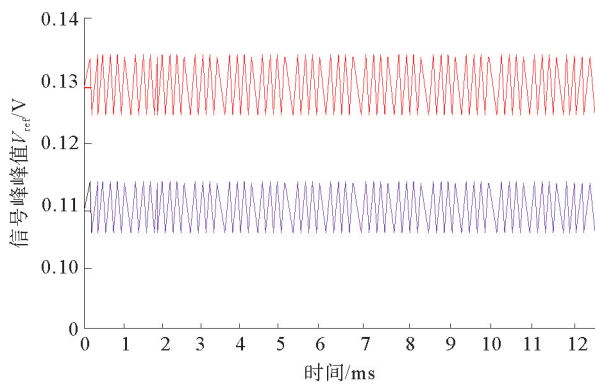


图 6 天线端接收信号端波峰(低信噪比)

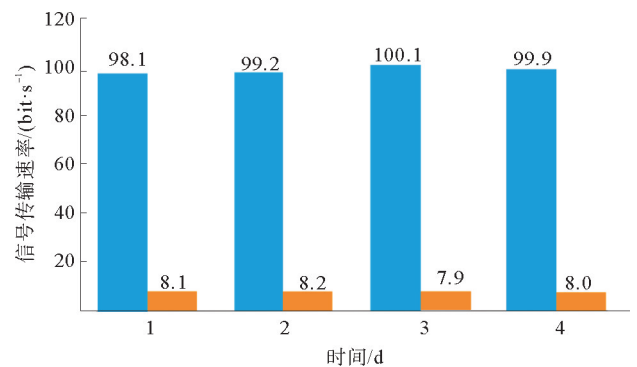


图 7 BPSK与2FSK信号传输速率对比

■ BPSK调制; ■ 2FSK调制

从图 7 可以看出,经过改进 BPSK 信号调制下的无线电磁随钻通信系统带宽能力得到了明显提升,传统 2FSK 调制信号传输最高只能到 8.2 bit/s,改进的 BPSK 信号调制系统信号传输达到了 100.1 bit/s,通信传输性能提升了 11 倍以上。

图 8 是 BPSK 与 2FSK 2 种调试方式误码率对照图。由图 8 可知,BPSK 解调的误码率明显低于 2FSK 调制,能够获得更准确的信号数据,2FSK 误码率<2%,BPSK 误码率<0.1%。

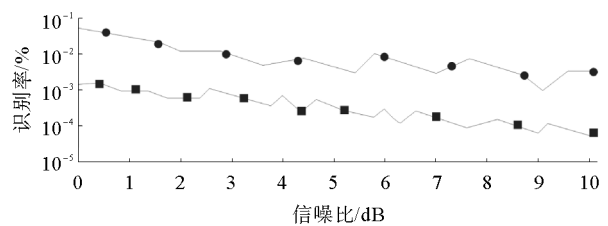


图 8 信误码率对比

● BPSK调制; ■ 2FSK调制

3 结束语

通过对传统的随钻测量无线电磁传输技术的研究发现,实际钻井工况中容易受到地层复杂情况的影响,电阻率容易产生变化,导致信号传输效率降低、带宽要求增大,同时低频信号传输率较低、系统误码率较高,原始信号数据解调效果不佳,于是提出基于 BPSK 解调优化信号,对特定的信号帧头以及前后码元

之间的关联进行 BPSK 解调,搭建基于 BPSK 解调算法的随钻测量无线通信系统,并引入 modelsim 平台对设计的 FPGA 板进行性能仿真测试。最终测试结果表明,基于 BPSK 信号通信系统在信号传输效率、信号稳定性均有显著提升,优于传统 2FSK 信号方式,误码率 $<0.1\%$,信号传输性能相比 2FSK 方式提升 11 倍,带宽要求明显下降,能够满足随钻测量无线通信系统设计要求。但是研究也存在不足,例如发射端硬件性能一般,若升级性能测试会更好;且性能测试是在设定工况条件下完成,需要后期实地测试,提升系统设计的可靠性。

参考文献(References):

- [1] 吴佩军,侯进,吕志良,等.一种基于星座图恢复的多进制相位调制信号识别算法[J].电讯技术,2019,59(5):549-555.
WU Peijun,HOU Jin,LYU Zhi-liang,et al. Multi-phase modulation recognition based on constellation recovery[J]. Telecommunication Engineering,2019,59(5):549-555.
- [2] 蒋亮亮,江虹,曾冈.基于混沌 Duffing 振子的 BPSK 信号 K-means 聚类解调方法[J].计算机应用研究,2019,36(2):562-565.
JIANG Liangliang,JIANG Hong,ZENG Min. K-means clustering demodulation method for BPSK signal based on chaotic Duffing oscillator[J]. Application Research of Computers,2019,36(2):562-565.
- [3] 田万平,向亚丽,颜冰,等.基于粒子群优化算法的 BPSK 信号随机共振研究[J].海军工程大学学报,2021,33(2):71-77.
TIAN Wanping,XIANG Yali,YAN Bing,et al. Research on stochastic resonance of BPSK signal based on particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Naval University of Engineering,2021,33(2):71-77.
- [4] 胡国兵,吴珊珊,陈正宇,等.基于 GP 分布拟合检验的 LFM/BPSK 处理结果可信性评估[J].电子学报,2019,47(1):66-72.
HU Guobing,WU Shanshan,CHEN Zhengyu,et al. Credibility evaluation for processing results of LFM/BPSK signals based on goodness-of-fit test of generalized pareto distribution[J]. Acta Electronica Sinica,2019,47(1):66-72.
- [5] 石智军,姚克,田宏亮,等.煤矿井下随钻测量定向钻进技术与装备现状及展望[J].煤炭科学技术,2019,47(5):22-28.
SHI Zhijun,YAO Ke,TIAN Hongliang,et al. Present situation and prospect of directional drilling technology and equipment while drilling measurement in underground coal mine[J]. Coal Science and Technology,2019,47(5):22-28.
- [6] CHARLES S,VIJAYA J D. Acoustic analysis using sound level meter to determine the period of usage of the spindle bearing of a radial drilling machine[J]. Archives of Acoustics,2019,44(3):505-510.
- [7] 鲍克勤,倪蓉,张雪健.基于优化解调算法的光纤传感器交叉敏感问题研究[J].光通信技术,2020,44(3):17-21.
BAO Keqin,NI Rong,ZHANG Xuejian. Research on cross-sensitivity of optical fiber optic sensor based on optimized demodulation algorithm[J]. Optical Communication Technology,2020,44(3):17-21.
- [8] 李攀攀,冯莉芳,黄顺义.新型可见光成像通信信号解调方案研究[J].光学学报,2021,41(23):68-74.
LI Panpan,FENG Lifang,HUANG Shunyi. New type of optical camera communication signal demodulation scheme[J]. Acta Optica Sinica,2021,41(23):68-74.
- [9] TAO J,ZHANG C,ZHU R. Gravel roundness quantitative analysis for sedimentary microfacies of fan delta deposition,Baikouquan Formation,Mahu Depression,Northwestern China[J]. Open Geosciences,2020,12(1):1630-1644.
- [10] 孙杉杉,杨雄,王海勇,等.小型化光纤光栅解调系统设计及寻峰算法的模拟评测[J].应用光学,2020,41(3):618-625.
SUN Shanshan,YANG Xiong,WANG Haiyong,et al. Design of miniaturized fiber grating demodulation system and simulation evaluation of peak-detection algorithm[J]. Journal of Applied Optics,2020,41(3):618-625.
- [11] 李泉新,褚志伟.矿用泥浆脉冲无线随钻测量信号发生装置设计[J].工矿自动化,2019,45(8):32-37.
LI Quanxin,CHU Zhiwei. Design of signal generator for mine-used mud pulse wireless measurement while drilling[J]. Industry and Mine Automation,2019,45(8):32-37.
- [12] 陈龙.基于直流载波的矿用随钻测量装置研制[J].电子设计工程,2020,28(15):157-160.
CHEN Long. Design of mine MWD device based on DC power line carrier[J]. Electronic Design Engineering,2020,28(15):157-160.
- [13] 袁晓莉.井下随钻通信系统的研究与设计[J].信息通信,2015(8):73.
YUAN Xiaoli. Research and design of underground drilling communication system[J]. Information & Communications,2015(8):73.
- [14] 刘均锋,唐健.灌浆工程钻孔施工随钻参数采集检测与监控系统探究[J].四川地质学报,2022,42(S1):131-134.
LIU Junfeng,TANG Jian. Research on the acquisition,detection and monitoring system of drilling parameters while drilling in grouting engineering[J]. Acta Geologica Sichuan,2022,42(S1):131-134.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)