

# 钻柱声传输的 OFDM 调制方法实现\*

王 强<sup>1</sup>, 李 成<sup>2</sup>, 丁天怀<sup>1\*</sup>

(1. 清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084;  
2. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 为提高油气开采过程中随钻测井(LWD)数据传输速率, 针对钻柱声传输技术中因周期性边界引起的色散和多重回波问题, 从数据通信的角度出发, 将正交频分复用(OFDM)多载波调制技术引入声传输系统, 并以钻杆为信道, 采用PC机结合FPGA模块和数据采集卡的形式, 搭建了数据传输实验平台。数据传输实验结果表明, 基于OFDM调制方式的短节钻杆声传输方案可实现160 bit/s的传输速率, 该方案同时可为后续的钻柱声传输设计与实验提供方法指导。

**关键词:** 随钻测井; 正交频分复用调制; 数字均衡; 时频同步; 声传输; 钻柱

中图分类号: TN91; TE38; TH6

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)04-0373-04

## Analysis of OFDM modulation method and experiment for acoustic transmission system along drill strings

WANG Qiang<sup>1</sup>, LI Cheng<sup>2</sup>, DING Tian-huai<sup>1</sup>

(1. Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;  
2. School of Instrumentation Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** In order to improve the data transfer rate of logging while drilling (LWD), an acoustic transmission scheme based on orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) multi-carrier modulation was proposed, at the angle of data communication, with considering the time dispersions and multiple echoes because of the periodic channel boundaries. The platform of acoustic transmission along the drill pipe was designed and built under the PC processing with interface of an FPGA breadboard and a data acquisition card. Experimental results show that the acoustic transmission scheme along the short drill pipe based on OFDM modulation technology has a reliable transmission of 160 bit/s transfer rate. Moreover, it provides a reasonable guidance for follow-up design and experiment research of acoustic transmission.

**Key words:** logging while drilling (LWD); orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) modulation; digital equalization; timing and frequency synchronization; acoustic transmission; drill string

## 0 引 言

油气开采过程中, 随钻测井(LWD)技术能够实现实时参数测量, 较真实地获取待测地层特性参数, 其中, 随钻测井技术的关键是实现井底与地面间的数据传输<sup>[1-2]</sup>。电缆、光缆等有线传输方式存在连接可靠性较差、结构复杂等不足, 因此近年来井下无线传输技术得到了迅速发展。泥浆脉冲和极低频电磁波地层传输

是传统的无线传输方式, 但是受到载波频率的限制, 传输速率不高, 已无法满足随钻测井技术发展过程中伴随的数据传输量增加的需求。基于油井钻柱的连续钢介质, 采用低频声波作为载波的无线传输技术因载波频率可为400 Hz~2 kHz, 理论传输速率可达100 bit/s, 且信道相对简单, 已成为当前随钻测井无线传输技术的研究热点<sup>[3-5]</sup>。

由多节钻杆和接箍构成的钻柱信道导致声波在传

收稿日期: 2011-11-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50905095)

作者简介: 王 强(1986-), 男, 江苏江阴人, 主要从事测控技术方面的研究。E-mail: wangqiang05@mails.tsinghua.edu.cn

通信联系人: 丁天怀, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: dlunj@mail.tsinghua.edu.cn

输过程中存在色散和多重反射回波,从而引起严重的码间干扰。正交频分复用(OFDM)是当前广泛应用于无线通信系统中的多载波调制技术,因其各子载波均为窄带传输,其符号宽度远大于单载波传输,可有效克服传输中的多径干扰<sup>[6]</sup>。

本研究针对钻柱信道的传输特性,将OFDM调制技术引入钻杆声传输系统,并采用PC机结合FPGA模块和数据采集卡的方式实现OFDM信号调制。

## 1 钻柱信道的传输特性

### 1.1 钻柱信道理论

钻柱是由多节钻杆和接箍交替连接组成的周期性管结构,如图1所示。

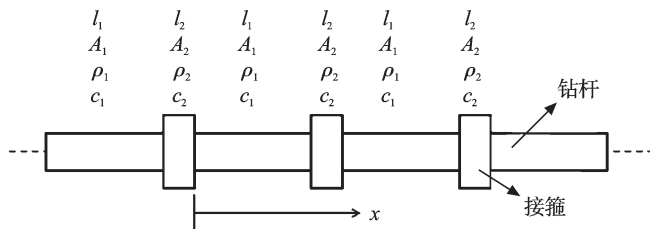


图1 由多节钻杆和接箍交替构成的钻柱信道

$l$ —钻杆和接箍的长度;  $A$ —钻杆和接箍的横截面积;  $c$ —声速;  $\omega$ —角频率;  $k$ —波数,  $k = \omega/c$ 。

其色散方程<sup>[7]</sup>为:

$$\cos k(l_1 + l_2) = \cos \frac{\omega l_1}{c} \cos \frac{\omega l_2}{c} + M \sin \frac{\omega l_1}{c} \sin \frac{\omega l_2}{c} \quad (1)$$

式中,  $M = -(A_1/A_2 + A_2/A_1)/2$ 。

不同频率  $\omega$ , 波数  $k$  对应取实数或复数, 钻柱信道将表现出通阻带交替的梳状滤波特性。由于钻杆端面及接头的高反射性, 钻杆中的声波脉冲响应持续长达数百毫秒, 造成明显的多径干扰, 会极大地限制信道的传输能力<sup>[8]</sup>。

### 1.2 实验用钻杆信道传输特性测定

本研究采用单根钻杆作为实验信道, 对 100 Hz~5 000 Hz 步长为 100 Hz 的正弦波进行扫频激励。采集到的信号情况表明, 1.5 kHz~1.66 kHz 时正弦波形基本没有失真。

本研究通过冲击响应来进一步测定钻杆的频响, 其结果如图2所示。由图2可知, 该冲击响应下的频域分布与扫频测试结果一致, 在 1.5 kHz~1.66 kHz 频率范围内信道具有较好的传输通带。

单次脉冲下的时延扩展测试选用激励信号为脉冲宽度 100 ms 的正弦波(选用频响较好的 1.56 kHz 正弦波), 实验中可以看到很明显的时延扩展, 从脉冲结束到衰减完成约为 50 ms 左右。

传统的单载波调制码元宽度普遍比较窄, 会严重

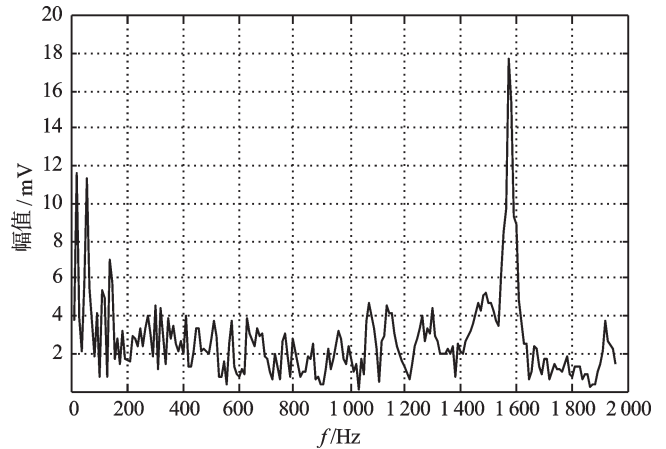


图2 冲击响应下的频域分布

影响传输过程中的可靠性, OFDM调制的子载波可以设置比单载波大得多的码元宽度, 扩展时延可作为码元宽度选取的依据。

## 2 OFDM数据调制的设计

根据实验测得的钻杆传输特性可知, 可靠的信号数据传输只能在有限的频带内实现, 并要受多重回波引起的码间干扰影响。正交频分复用(OFDM)是一种多载波调制技术, 将信道通带划分为多个正交窄带子信道, 输入的数据通过串并转换被加载到  $N$  个并行的子信道上, 如传输速率不变, 每个子载波码元长度可扩展为原来的  $N$  倍, 因此时延扩展的影响将被有效降低。若在信号中插入保护间隔, 则可以彻底去除码间干扰<sup>[9]</sup>。

### 2.1 OFDM的基本原理

本研究中 OFDM 的各子载波之间是正交的, 因此要求相邻载波的频差为  $\Delta f = 1/T$ ,  $T$  为码元宽度, 符合离散傅里叶变换(DFT)和反变换(IDFT)之间的参数对应关系, 使得 OFDM 完全可以由基于数字电路的快速傅立叶变换(FFT)来实现。

假设数据  $d_i$  为矩形函数, 令  $f_i = i/T$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ , 如图3所示, 对  $S(t)$  离散采样, 有:

$$S_k = S(kT/N) = \sum_{i=1}^N d_i e^{j2\pi i k/N} \quad (1 \leq k \leq N) \quad (2)$$

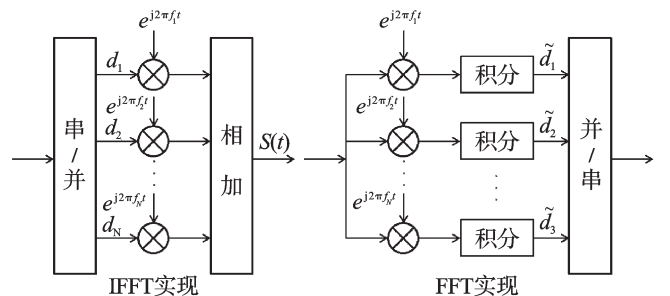


图3 OFDM原理框图

式(2)表明,  $S_k$  是对  $d_i$  进行  $N$  点的 IDFT 运算结果, 而  $d_i$  也可以由  $S_k$  的 DFT 变换结果得到, 即有:

$$d_i = \sum_{k=1}^N S_k e^{-j2\pi i k / N} \quad (1 \leq i \leq N) \quad (3)$$

式(2)和式(3)表明, OFDM 的调制与解调可分别由离散傅里叶变换(DFT)和反变换(IDFT)实现, 而实际系统中可采用 IFFT 和 FFT 分别实现 IDFT 和 DFT 运算, 且 FFT 有多种算法, 可以采用数字电路方便地实现。

## 2.2 OFDM 调制的设计与实现

基于上述工作原理, 本研究对用于钻杆声传输实验的 OFDM 调制进行了设计。

OFDM 系统原理框图如图 4 所示。

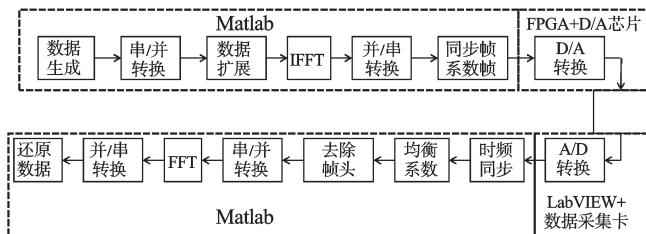


图4 OFDM 系统原理框图

系统采样频率为 10 kHz, 对应可分辨频段为 0~5 kHz, 因为钻杆信道可用通带为 1.5 kHz ~1.66 kHz, 数据在串并转换后需要将其他频率点置零, 进而后续的 IFFT 运算。本研究对各子载波采用二进制启闭键控(On-Off Keying, OOK)调制, 因其对频偏和相移都不太敏感, 比较适合传输速率比较低的钻柱低频声波数据传输。根据钻杆信道特性, 本研究选取码元宽度为 100 ms, 子载波 17 个, 其中 1 个作为导频, 其余 16 个用于数据调制, 即传输速率设为 160 bit/s。

10 kHz 的系统采样, 对应各子载波的整周期采样数小于 10, 若将幅度量化为 10, 17 个子载波需要的幅度量化为 170, 12 位(量化数为 4 096)的 D/A 转换能够满足分辨率要求。本研究采用 PC 端 Matlab、LabVIEW 结合硬件 FPGA 模块(FPGA 芯片为 EP2C35F484C6, 配备 12 位串行 D/A 转换芯片 TLV5616, 0~5 V)、数据采集卡(USB7360B, 10 kHz, 16 bit, -5 V~+5 V)实现。系统按照功能可划分为: 数据产生、OFDM 调制、D/A 转换、信号采集、OFDM 解调、数据还原分析等。

### 2.2.1 信号发送端设计

数据源部分采用  $m$  序列(又叫伪随机序列, 通过线性反馈移位寄存器产生)来模拟随机数(可作为传感器数据的模拟), 根据子载波数完成数据的串并转换, 每段数据加入前缀导频, 随后将每段 17 位数据(包括导频信息)扩展至 1 024 位, 用以进行后续的 IFFT 计算。IFFT 计算完成后, 再将数据转换成串行数据帧(数据

帧中每 1 024 个采样值代表 16 位数据, 采样值取整为 12 位, 以适应硬件的 12 位 D/A 芯片), 并在数据帧前段加上同步帧、系数帧。同步帧采用 1 560 Hz 的正弦波信号, 正弦信号长 768, 间隔 256, 总长度 1 024 个采样值; 系数帧则基于 17 位数据均为“1”的一段数据经 OFDM 调制而成, 即长度也为 1 024 个采样值。经过 OFDM 调制后的信号结构由同步帧、系数帧及数据帧(不限长度, 根据传送数据要求)构成。

本研究由硬件 FPGA 模块实现 D/A 功能, 将 PC 端调制好的数据传给 FPGA, 通过 FPGA 与外部 D/A 芯片接口实现数据的数模转换, 随后信号经功率放大器激励激励器, 将声波信号加载至钻杆端面实现 OFDM 调制信号的发送。

### 2.2.2 信号接收端设计

声波信号由钻杆另一端面的加速度计采集, 经电荷放大器后转化为电压信号, 完成 OFDM 调制信号的接收。数据采集卡采集电压信号至 PC 端, 由 Matlab 完成数据的同步、均衡、解调、还原。

信号时频同步通过对同步帧的处理实现, 将其与同频率、同长度正弦信号相乘以获取时间同步点(只有两信号时间点同步的情况下, 相乘才能得到最大值)。在获取时间同步点下, 进一步通过与参考信号相乘进行频率同步(对频率进行微调, 当频率一致时, 相乘才能得到最大值)。若有频率偏差, 则需进行插值处理。各子载波的幅频响应并不一致, 如果采用相同的判决准则, 就需要对各子载波进行信道均衡。OFDM 解调能够直接得到各子载波幅值大小, 只要得到信道均衡系数, 就能简单地实现数字信道均衡<sup>[10]</sup>。

本研究将系数帧进行 FFT 变换后, 可得到各子载波的幅频响应情况, 通过各子载波幅值与导频幅值相除得到均衡系数。这样, 在后续的数据帧经过 FFT 变换后, 数据与对应各子载波的均衡系数相乘, 完成信道均衡, 并与导频幅值比较、归一化后, 则可采取共同的判决逻辑(即, 大于 0.5 判断为“1”, 否则为“0”), 从而还原出数据。

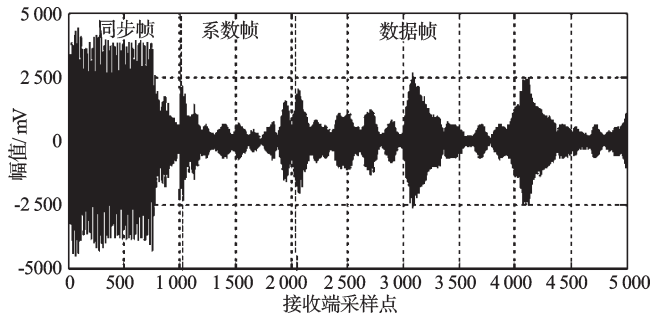
## 3 实验测试

本研究对设计的 OFDM 调制方法进行了传输实验测试, 开展了传输速率、准确性与可靠性的分析评价。调制信号经功率放大器(GF-300B, 最大功率 300 W)后激励激励器(JZ-20, 响应频率 5 Hz ~5 000 Hz)将声信号加载至钻杆(长 1.21 m)端面。接收端则由加速度计(BK4366, 响应频率 1 Hz ~8 000 Hz)检测到声信号后经电荷放大器(BK2635)转化为电压信号, 由数据采集卡将数据采集至 PC 机。

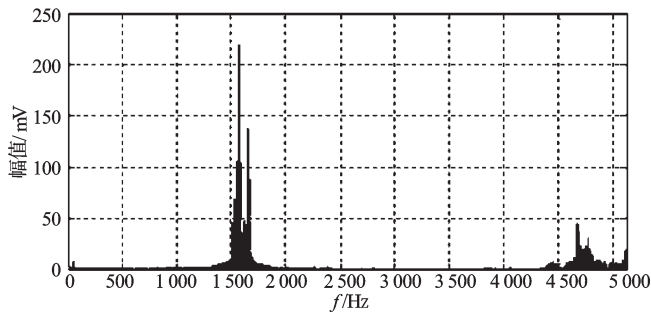
根据上述OFDM实现方案,传输速率为160 bit/s;本研究将测试数据包单个长度设为256 bit,由m序列生成的多个不同伪随机序列组成不同的测试数据包来测试传输的准确性;对单个数据包长时间重复循环发送,用以测试传输的可靠性。

接收端采集的数字信号波形如图5所示。

时域波形对应调制信号也分为:同步帧、系数帧、数据帧,受到信道多径干扰的影响,同步帧0幅值的间隔段有了明显的干扰。解调后波形实际上就是接收信号的频谱图,可以看到能量主要集中在载波频段。



(a) 接收信号时域波形



(b) 接收信号解调后波形

图5 接收信号时域与解调后波形

由采集到的同步帧和系数帧波形,本研究进行时频同步及均衡系数获取(系数获取值[0.66, 0.51, 0.68, 0.71, 0.57, 0.5, 0.48, 0.38, 0.298, 0.24, 0.21, 0.2, 0.23, 0.28, 0.36, 0.44])。本研究对长度均为256 bit的15个不同数据包进行传输测试,实验结果如表1所示。总计数据量3 480 bit,总计误码数为3 bit,误码率为 $8.62 \times 10^{-4}$ 。同时,本研究进行的长时间(单次1 h以上)可靠性传输测试数据传输误码率均低于 $10^{-4}$ 。

表1 各数据包传输情况

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
误码数	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0

实验结果表明,本研究设计的用于钻杆声传输的DFDM调制方法能够以 $10^{-4}$ 误码率和160 bit/s传输速率实现准确可靠的数据传输。

## 4 结束语

针对钻柱信道存在的多径干扰和色散问题,本研究采用OFDM调制技术,根据信道传输特性确定OFDM调制参数,并结合FPGA、数据采集卡和计算机,设计了OFDM数据传输实验平台,实现了OFDM信号的时频同步和信道均衡。

数据传输实验结果表明,该系统能够在160 bit/s传输速率条件下以 $10^{-4}$ 误码率进行可靠传输,有效地克服了钻柱声传输中的多径干扰,并提高了数据传输速率,为后续钻柱声传输的现场应用研究提供了方法指导。

### 参考文献(References):

- [1] 牛林林. 随钻测井的数据传输[J]. 国外测井技术, 2009(6):7-12.
- [2] 李志刚,管志川,王以法. 随钻声波遥测及其关键技术分析[J]. 石油矿场机械, 2008, 37(9):6-9.
- [3] DOUGLAS S D. Acoustical properties of drilling strings [J]. **Journal of the Acoustical Society of America**, 1989, 85(3):1048-1064.
- [4] GAO L, FINLEY D, GARDNER W. Acoustic telemetry can deliver more real-time downhole data in underbalanced drilling operations [C]. SPE Drilling Conference. Miami: SPE 98948, 2006.
- [5] 李成,丁天怀. 不连续边界因素对周期管结构声传输特性的影响[J]. 振动与冲击, 2006, 25(3):172-175.
- [6] JOSIAM K, RAJAN D. Bandwidth efficient channel estimation using super-imposed pilots in OFDM systems [J]. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, 2007, 6(6):2234-2246.
- [7] FLAVIO P, MASSIMO M. Reflection of drill-string extensional waves at the bit-rock contact [J]. **Journal of the Acoustical Society of America**, 2002, 111(6):2561-2565.
- [8] GAO L, GARDNER W, ROBBINS C. Limits on Data Communication along the Drill String using Acoustic Waves [R]. SPE 95490, 2005:1-6.
- [9] 焦胜才,陈德荣. OFDM技术及其应用[J]. 通信技术, 2003(7):20-21.
- [10] 李倩然,周南. 基于频域滤波数字均衡器的设计[J]. 电子设计工程, 2011, 19(2):162-164.

[编辑:罗向阳]