

泥浆信道数据压缩和纠错联合编码研究

李 婷 史晓锋

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

摘要: 泥浆脉冲通信是无线随钻测井系统中主用通信方式,泥浆信道本身衰减较大,且信道噪声复杂。针对泥浆信道及噪声特性进行分析,提出了一种适用于泥浆脉冲信号的联合编码方法,其在对信号进行无损压缩的同时可针对突发错误和随机错误进行纠正,保证传输效率的同时降低系统误码率,且不会增加设备复杂度。最后以现场测井数据为基础,表明 LZW 的最大压缩比可达 3:1,并通过仿真实验证明该联合编码方法具有良好的抗噪声性能,能较好地重构测井数据,验证了其有效性。

关键词: 泥浆信道;RS 编码;LZW 压缩;信源编码;信道编码

中图分类号: TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Mud channel data compression and error correction coding research

Li Ting Shi Xiaofeng

(Electronic Information Engineering College, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Mud pulse signal communication is the main communication way of wireless logging with drilling system, but the mud channel attenuation is large, and the channel noise is complex. A joint coding method which is suitable for the mud pulse signal was proposed, after analyzing the mud channel characteristic and noise source, in addition to realizing lossless compression it can correct unexpected errors and random errors as well, the coding method guarantees the transmission efficiency and at the same time reduces the bit error rate, and will not increase the complexity of the equipment. Finally based on the field logging data, it shows that the maximum compression ratio of LZW is 3:1, and through the simulation experiment, the result proves its anti-noise effect, logging data can be well reconstructed, which verifies the effectiveness of the joint coding method.

Keywords: mud channel; RS coding; LZW compression; Source coding; channel coding

1 引言

无线随钻测量系统近年来得到了良好的发展,其广泛应用于实时钻井,可实时监测井下钻井地层及安全等状况,为定向井和水平井的钻进提供了良好的条件。无线传输按照介质的不同分为电磁波、声波和泥浆脉冲 3 种方式^[1]。电磁波受外界影响大,衰减快,不适用于远距离传输;声波只适用于含泥质的单矿物岩石,且需要压实校正;泥浆脉冲由于可靠性较高,易于工程操作,应用最为广泛^[2]。目前钻井技术的关键是井下随钻测量和井下信息传输,其中井下信息传输技术已经成为制约测井技术发展的瓶颈问题。如何实现高效可靠的传输成为随钻测量系统亟待解决的问题。传统方法是泥浆信号传输至地面进行滤波处理,实现噪声的滤除和信号的重构,常用的滤波方法有基于傅里叶变换的去噪法、FIR 数字滤波器和小波变换等^[3]。此类

方法对信源编码和信道编码的研究较少。本文主要讨论以泥浆脉冲为传输介质的无线随钻测量系统的一些信源信道编码理论和技术问题。在分析泥浆信道的基础上,提出了 LZW-RS 联合编码的方法,实现泥浆脉冲下数据的可靠高效的传输。

2 泥浆信道特性模型

通过泥浆脉冲的形式传递信号首先要分析泥浆信道本身给信号带来的衰减,泥浆信号的衰减与泥浆信号的工作频率、井深深度以及泥浆的密度等因素有关。泥浆脉冲信号符合指数衰减规律,泥浆压力脉冲波幅的衰减模型为:

$$P = P_0 * \exp\left(-\frac{x}{L}\right)$$

$$L = \frac{Vd}{2} \sqrt{\frac{2}{VW}} \quad v = \frac{\mu}{\rho} \quad \omega = 2\pi f$$

$$v = \sqrt{\frac{\frac{k_1}{\rho_m}}{1 + \alpha_s \left(\frac{K_1}{K_s} - 1\right) + \alpha_s \left(\frac{K_1}{K_s} - 1\right) \pm \frac{K_1 D}{E_c}}} \quad (1)$$

式中： P_0 为信源信号的脉冲幅度，Pa； x 为压力脉冲传输距离，m； L 为脉冲幅度衰减到 $1/e$ 距离，m； V 为信号的传输速度，m/s； d 为管路内径，m； ν 为运动粘度， m^2/s ； ρ 为钻井液密度， kg/m^3 ； ν 为钻井液粘度， $Pa \cdot S$ ； f 为脉冲信号的频率，Hz。

由上式分析可知信号频率与钻井液粘度对信号衰减有显著的影响，尤其是信号频率，频率越高信号衰减越大，随钻测量系统需要提供更多的能量来补偿信号衰减。此外，噪声是误码产生的主要原因，分为以下几类：1) 泥浆泵噪声。泵噪声为多频噪声，其基波频率与有用信号的基频很接近。2) 泥浆马达噪声。由泥浆马达噪声造成的压力变化对压力脉冲有极大影响。3) 涡轮转速的影响。涡轮转速信号的频率为 $0 \sim 20$ Hz，有用信号的频率集中在 $0.2 \sim 1.5$ Hz^[4]，二者有一定叠加。4) 其他噪声。其他噪声可以近似为白噪声。

3 泥浆脉冲编解码方式

3.1 泥浆脉冲信号的编码

泥浆信号传输过程中可以通过增加信噪比的方式减小误码率，但是井下条件有限，工程实现比较困难；井下无线信道环境恶劣，通过检错重传的方式不能保证重传的数据误码率降低；信道编码能够降低误码率，但同时导致传输速率降低，因此编码时选取信源信道联合编码的方式^[5]。

信道编码拟采用非二进制 RS 编码^[6]，并结合 LZW 信源压缩算法来提高信息传输量。联合编码若采用先纠错后压缩的方式会造成 LZW 压缩码在传输过程受到干扰，尤其是在字典码的形成过程中会造成很大的误码，严重影响 LZW 解压时的重构过程。因此最终采用的方案是先对 Mary 码元进行 LZW 压缩，然后进行 RS 纠错编码。测井数据帧格式如下：

同	分	状	数	数	数
步	隔	态	据	据		据
头	码	码	1	2		n

3.1.1 Mary 编码

泥浆脉冲信号采用等间隔槽的 Mary 编码。Mary 码元属于混沌序列，混沌序列的特点是非周期性、长度无限、互相关函数为零、频带利用率高。其编码序列如图 1，利用 Mary 码可以提高数据传输率，但是其抗噪声性能不强，其平均误码率特点符合下式：

$$P_e \leq 1 - \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{X^2}{2}\right) \left[1 - \frac{1}{2}\alpha\right]^{M-1} dx$$

$$\alpha = \operatorname{erfc}\left[\frac{X}{\sqrt{2\pi}} + (1 - \beta_0)\right] \sqrt{E_s \cdot \nu / n_0} \quad (2)$$

式中： β_0 为序列的互相关系数， E_s/N_0 为信噪比大小。

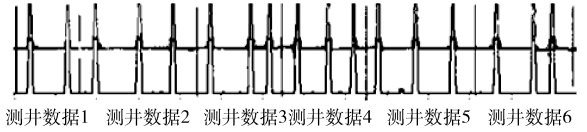


图 1 Mary 编码序列

3.1.2 LZW-RS 联合编码

测井数据的概率难以统计，井下传输的数据是多种数据的组合，每种数据都有其独立性，但在连续测井中，除了一些断层的地方，地质参数数据曲线往往具有连续性，相邻数据之间的差值不大，并且在一定的范围内，一些数据几乎不变，另一些是在随机缓慢变化。根据其特点，LZW 压缩适用于测井数据，可以提高测井数据的系统传输效率^[7]。

LZW 编码算法属于字典编码算法，相当于在字典中查找各种不同词条来构成信息输出序列^[8]，字典是由输入序列动态决定的。编码的过程实际就是一个加入词条和删除词条的过程^[9]。LZW 编码算法利用 Hash 函数建立一个大小为 256 的哈希表，以提高查找效率，LZW 压缩的数据输入格式为八位无符号整型数。

RS 码为前向纠错码，适合克服突发性错误，具有极强的随机错误和突发错误纠正能力^[10]。泥浆脉冲从井下传输的过程中难免被泵噪声、马达噪声、涡轮噪声等干扰，而 RS 码针对这种错误具有特别的优势，RS 编码虽然会产生延时，但是由于测井传输数据对实时性要求并不高，故可对压缩的 LZW 数据进行 RS 编码以降低其误码率。RS 码的校验生成多项式为：

$$G(x) = (x-1)(x-\alpha)(x-\alpha^2)\cdots(x-\alpha^{2^t-1}) \quad (3)$$

式中： t 为可以纠正码元的个数。

假设发送的信息码为 $m(x)$ ，编码之后的码组为 $T(x)$ ，则

$$T(x) = x^{n-k}m(x) + x^{n-k}m(x) \bmod G(x) \quad (4)$$

式中： n 为码元长度， k 为信息码元个数

根据现场测井经验可知，井深与纠错能力要求密切相关，本文根据不同的井深条件，采取 RS(31,15)或 RS(31,25)编码方式，从而提高发送码元的精确度。

3.2 泥浆脉冲解码

3.2.1 RS 译码

RS 译码先求得伴随多项式 $S(x)$ ，由 BM 迭代算法求出错误位置多项式 $\sigma(x)$ 和错误特征多项式 $E(X)$ ，得到纠错后的码字 $C(x)$ ^[11]，其中 τ 为传输过程中发生错码的个数， t 为 RS 码的纠错距离， n 为码元长度， $r(x)$ 为接收到的码字。

$$S(x) = S_1 + S_2x + S_3x^2 + \cdots + S_{2t}x^{2t-1} \quad (5)$$

$$\begin{cases} S_1 = r(\alpha) = e(\alpha) = e_{j_1}\beta_1 + \cdots + e_{j_r}\beta_r \\ S_2 = r(\alpha^2) = e(\alpha^2) = e_{j_1}\beta_1^2 + \cdots + e_{j_r}\beta_r^2 \\ S_{2^t} = r(\alpha^{2^t}) = e(\alpha^{2^t}) = e_{j_1}\beta_1^{2^t} + \cdots + e_{j_r}\beta_r^{2^t} \end{cases}$$

$$\sigma(x) = (1 - \beta_1 x)(1 - \beta_2 x) \cdots (1 - \beta_r x) \quad (6)$$

$$E(x) = e_{j_1} x^{j_1} + e_{j_2} x^{j_2} + \cdots + e_{j_r} x^{j_r} = [S(x)\sigma(x)] \bmod x^{2^r} \quad (7)$$

$$C(x) = r(x) + E(x) \quad (8)$$

3.2.2 LZW 解压缩

LZW 解压缩实际上就是压缩的逆过程^[12], 它的输入代码即为压缩算法的输出流, 根据输入代码动态生成字典串表, 如果在无误码的情况下, 解压缩的输出流为压缩算法的输入流。

4 仿真分析

仿真条件: 采样频率 $f=100$ Hz; 信号为 4000 m 井下采集所得; 信号长度为 10500; 调制方式为 BPSK 调制; 噪声为高斯白噪声。

4.1 数据压缩比

对 Mary 数据进行 LZW 压缩, 测井数据原始波形如图 2 所示, LZW 压缩之后的测井数据如图 3 所示。

压缩比 $P = \text{原始比特数} / \text{压缩数据比特数} = 2.75$ 。

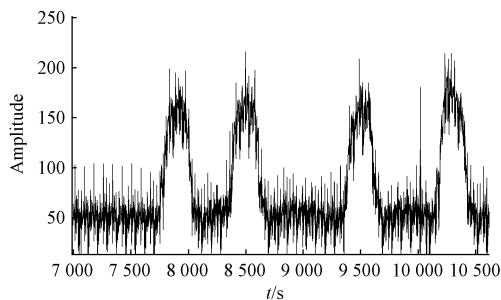


图 2 压缩前的测井数据

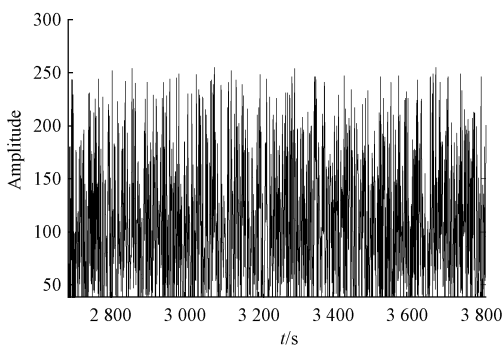


图 3 压缩后的数据

4.2 误码率分析

根据现场测井经验数据, 以井深为 1500 m 为阈值, 对井深进行判决, 当井深大于阈值时采用 RS(31,15), 当井深小于阈值时采用 RS(31,25)。高斯白噪声下二者的误码率对比如图 4 所示。

LZW 信号直接通过噪声信道受到干扰大, 误码率较高, 得到的数据可信度不高, 而加入 RS 编码保护之后, 其

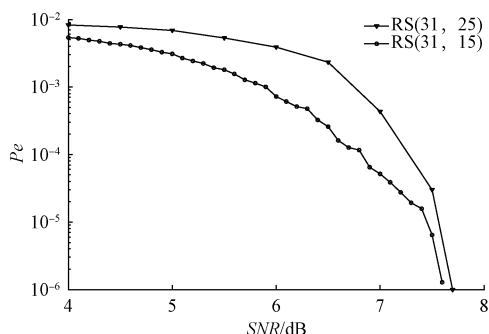


图 4 两种编码方式比较

误码率有了明显的下降, 并且不同程度的冗余度也对误码率有一定影响。在信噪比为 5.5 dB 时, LZW 解码能达到良好的重构性能, 如图 5 所示。

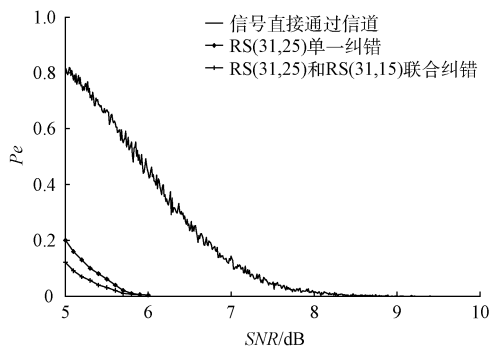


图 5 LZW 解码误码率对比图

5 结 论

本文介绍了 LZW 无损压缩和 RS 编码的联合算法, 并通过仿真验证表明:

1) 该算法在不增加系统复杂度的情况下实现了无损数据压缩, 压缩比为 2:1~3:1, 提高了数据传输效率。

2) 该算法适用于通信环境复杂的泥浆信道, 降低了误码率, 保证信道传输的可靠性。

参考文献

- [1] 陈文渊. 随钻测量系统信号测量的关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [2] 姜文奇. 无线传输数字试井系统关键技术研究[D]. 安徽: 中国科学技术大学, 2013.
- [3] 邹星, 吴建斌. 编码和扩频技术的应用研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(11): 46-51.
- [4] 涂兵. MWD 中泥浆脉冲信号辨识及地面适配技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2013.
- [5] 马会, 邝继顺, 马伟. 基于一位标识的测试向量混合编码压缩方法[J]. 电子与仪器测量学报, 2013, 27(4): 312-318.

(下转第 144 页)