

一种用于数字地震仪的低功耗 RS 编码方法

崔衣秀, 郝学元, 颜晓红

(南京邮电大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210003)

摘要:针对 RS(里德-所罗门)编码实现时所需功耗过高,导致其很难被应用到对功耗要求非常严格的环境中这一问题,文中在对影响编码实现功耗的各因素进行分析的基础上,提出一种适用于数字地震仪中的低功耗 RS 编码方法。该方法相比于传统的已提出的实现方法在计算复杂度、延迟及功耗等性能方面的优势均有明显提升。仿真结果表明,用此编码方法实现的 RS(31,27)编码,可以在满足数字地震仪对低功耗的要求下,达到数字地震仪对传输可靠性的要求。

关键词:里德-所罗门编码;数字地震仪;低功耗;低复杂度;可靠性

中图分类号:TH762.2;TN764

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2015)04-0121-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2015.04.028

A Method for Low Power RS Coding for Digital Seismograph

CUI Yi-xiu, HAO Xue-yuan, YAN Xiao-hong

(College of Electronic Science and Engineering, Nanjing University of Posts and
Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: To solve the problem that the RS coding has too high power consumption to be used in low power consumption system, a method for low power RS coding in digital seismograph is presented, on the basis of analyzing each factor which has influence on the coding power in this paper. Compared with the traditional proposed one, the method has low computational complexity, smaller delay and lower power consumption. The simulation results show that the RS(31,27) code realized by this coding method, can meet the requirements of digital seismic instrument on the transmission reliability in low power consumption condition.

Key words: Reed-Solomon code; digital seismograph; low power consumption; low complexity; reliability

0 引言

数字地震仪采用人工地震的方法进行石油勘探,目前在数字地震仪系统中,大部分采用差分编码的方式进行通信,由于这种传输方法,自身没有错误校验能力,系统可靠性差,特别是在野外施工时,经常遇到高压电线等强电磁干扰,从而造成数据传输错误^[1-2]。另外数字地震仪的供电方式一般采用蓄电池集中供电,所以要求系统具有较低的功耗。RS 纠错编码可以在一定程度上发现并纠正数据传输中发生的错误,从而改善数据传输的质量,成为数字地震仪传输系统的首选^[3-4]。但是 RS 编码的复杂度决定了其具有较大的功耗,这一点使其很难应用于采用蓄电池供电的地震仪^[5-6]。针对这个问题,文中对 RS 编码中的一些参数进行了探究^[7]。

首先,伽罗华域的大小对编码功耗和性能有很大的影响。一般的 RS 编码器采用线性反馈移位寄存器结构实现,乘法器及对应的本原多项式等参数对编码的功耗也均有影响。对一个确定的具有修正 t 个误码能力的 RS 码,需要 $2t$ 次乘法,所以乘法器决定了一部分编码器的功耗。本原多项式是影响功耗的又一因素,因其权重与编码的数组表示和对应常数乘法器的电路复杂度有直接的联系,因此本原多项式的选择对降低编码器的功耗很有必要。生成多项式的系数可以是对称和非对称的,对应于对称编码器和非对称编码器。对称编码器相比于非对称编码器只需一半数量的常数乘法器,所以一般的对称编码器的功耗要低于非对称编码器的功耗,但是当 t 较小时,情况恰好相反^[8]。文中在文献[8-10]提出的一系列方法的基础

收稿日期:2014-05-22

修回日期:2014-08-25

网络出版时间:2015-02-23

基金项目:国家“863”高技术发展计划项目(2011AA050526)

作者简介:崔衣秀(1990-),女,硕士研究生,研究方向为电子与通信;郝学元,高级工程师,研究方向为电子与通信;颜晓红,博士生导师,研究方向为物理电子学。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20150223.1235.017.html>

上,提出在 $t < 3$ 时,采用适当的伽罗华域,非对称编码结构和改进的伽罗华域乘法器来实现RS编码器的方法。仿真验证结果表明,此方法能有效提高系统的可靠性和功耗利用率。文中最后设计并用FPGA实现了RS(31,27)编码,将其应用于地震仪中。该设计相比于其他类似系统功耗明显降低,在满足系统对低功耗要求的同时又提高了系统可靠性。

1 地震数据采集系统中RS码的编码原理

RS(n, k)码,即RS(n, k, t),由 n, k 和 t 三个参数表示。其中, n 为码字长度, $n = 2^m - 1$, k 为信息长度,有 k 个符号,最多可以纠正 $t = (n - k)/2$ 个码元传输错误。RS码是线性分组码,编码效率定义为 $R = k/n$ 。

设 $GF(2^m)$ 上的本原元为 α , d 为偏移量, d 为 $\{0, 1, \dots, 2^m - 2\}$ 中的任意值,则生成多项式为:

$$g(x) = (x + \alpha^d)(x + \alpha^{d+1}) \cdots (x + \alpha^{d+2t-1}) \quad (1)$$

RS码的码字多项式、信息多项式分别为:

$$c(x) = c_0 + c_1x + \cdots + c_{n-1}x^{n-1} \quad (2)$$

$$m(x) = m_0 + m_1x + \cdots + m_{k-1}x^{k-1} \quad (3)$$

编码的过程即是根据 k 个信息码元及RS码的特性获得 $n - k$ 个校验码元的过程。构造码字多项式的方法如下:

首先将信息多项式左移 $r = n - k$ 位,得到 $x^{n-k}m(x)$,然后用 $x^{n-k}m(x)$ 除以生成多项式 $g(x)$ 得到商 $h(x)$ 和余式 $r(x)$:

$$x^{n-k}m(x)/g(x) = h(x)g(x) + r(x) \quad (4)$$

所得的余式 $r(x)$ 就是校验多项式:

$$r(x) = r_0 + r_1x + \cdots + r_{n-k-1}x^{n-k-1} \quad (5)$$

其次数为 $n - k$,然后令

$$c(x) = r(x) + x^{n-k}m(x) \quad (6)$$

即得到编码后的码字多项式。

1.1 伽罗华域

RS编译码过程中所有运算均是基于伽罗华有限域 $GF(2^m)$ 进行的,其中 m 为正整数。因为 $GF(2^m)$ 的复杂度为 $O(m)$ 或 $O(m^2)$ ^[8],所以寻找合适的 $GF(2^m)$ 对降低系统的功耗是非常有必要的。图1所示为在同一伽罗华域 $GF(2^8)$ 内具有相同编码效率 $R = 0.8$,不同 n, k 的RS编码的误码率与信噪比关系的MATLAB仿真图。

编码效率相同即每个信息码元的纠错能力是恒定的。尽管如此,从图中仍能看出:当误码率较低时, k 或 n 越大,编码的性能越好。同样,图2给出了当 t 固定时不同编码效率的RS编码的性能对比仿真图。当 t 固定时,较高的编码效率对应较大的 k ,所以拥有较大 k 值的编码纠错能力要强于 k 值较小的编码。但 k

值的增大也导致了 t/k 的比值变小,纠错能力曲线的斜率变小。但总体来说前者的影响要大于后者。还有一种具有对比意义的情况就是同一编码在不同生成域下的纠错性能对比。如图3所示为分别在 $GF(2^5)$ 、 $GF(2^6)$ 、 $GF(2^8)$ 内的RS(31,27)编码的纠错性能对比。由图可知,在较小的伽罗华生成域内的编码的纠错性能要稍强于较大的伽罗华生成域内的编码。一种可能的解释就是误码率较低时, t/k 的比值对较大的伽罗华生成域的编码影响更大。

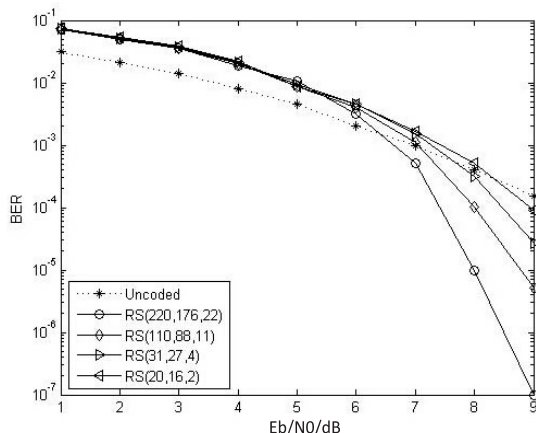


图1 $R = 0.8$ 时 $GF(2^8)$ 内不同编码的比较

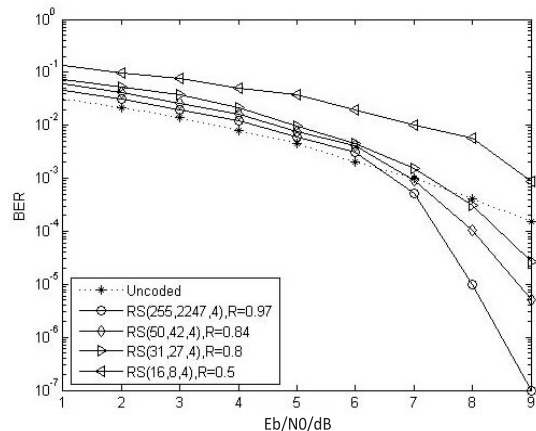


图2 $t = 4$ 时 $GF(2^8)$ 内不同编码的比较

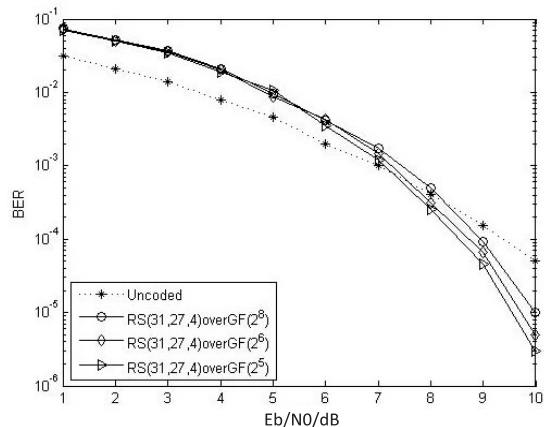


图3 不同生成域内同一编码纠错性能比较

图4所示为分别在 $GF(2^5)$ 、 $GF(2^6)$ 、 $GF(2^8)$ 内的RS(31,27)编码的功耗对比图。由图可以看出,RS(31,27)编码在 $GF(2^5)$ 域内的功耗最低。基于以上比较,可以得到这样的结论:在对码速要求相对较低的地震数据传输系统中,计算复杂度相对较低而性能较好的较小的伽罗华生成域就能满足要求。类似的结论在文献[8]中也有提及。

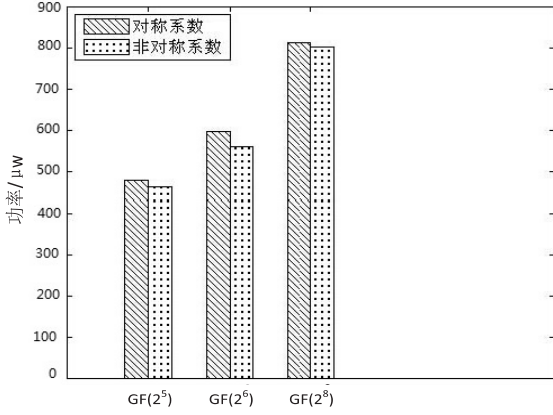


图4 不同生成域内同一编码的功耗比较

文献[9]中也提到相同的RS(n, k)在较小的伽罗华域内的功耗也有显著降低。综合考虑系统对可靠性、实时性及功耗的要求,设计中采用基于 $GF(2^5)$ 的RS(31,27)编码来完成地震仪中的信道编码。

1.2 本原多项式与生成多项式

生成多项式的设计是RS编码设计的核心部分。生成多项式由本原多项式生成,不同的本原多项式可以生成同一个固定规则的有限域,不同的本原多项式导致乘法器复杂度不同,进而引起编码器的功耗也有所不同。运用文献[9]提出的寻找最低功耗的生成多项式的方法,通过实验发现,当本原多项式为 $p(x) = x^5 + x^2 + 1$ 时的功耗相对于本原多项式为 $p(x) = x^5 + x^3 + x^2 + x + 1$ 的功耗低约4%。

根据以上讨论,在RS(31,27)中选择本原多项式 $p(x) = x^5 + x^2 + 1, t = 2$,根据上面的本原多项式得到生成多项式的表示为:

$$g(x) = (x + \alpha^d)(x + \alpha^{d+1})(x + \alpha^{d+2})(x + \alpha^{d+3}) = g_0 + g_1x + g_2x^2 + g_3x^3 + x^4 \quad (7)$$

根据文献[5]中提出的方法:

Input: $g(x) = (x + \alpha^d)(x + \alpha^{d+1}) \cdots (x + \alpha^{d+2t-1})$,
 $l = 0, v = 0, S$ 为空集, d 为 $\{0, 1, \dots, 2^m - 2\}$ 中任意值
 Step1: for $i = 0$ to $2t - 1$
 begin
 for $j = 0$ to $2^m - 2$
 if $(g_i(d_j) \bmod \alpha^{2^m-1} = \alpha^0$ and d_j 不属于 S)
 $v = v + 1, d_v = d_j$;
 end
 $S = \{d_1, d_2, \dots, d_v\}$
 Step2: for $\beta = 0$ to v
 begin
 $g(x) = (x + \alpha^{d_\beta})(x + \alpha^{d_\beta+1}) \cdots (x + \alpha^{d_\beta+2t-1})$
 for $\theta = 0$ to $2t - 1$
 if g_θ 属于 R $l = l + 1$
 $d' = \operatorname{argmax}_l(d)$;
 end
 Output: d'

解得 $d = 7$,即根据 $d = 7$ 时所得生成多项式构造的编码电路的功耗最低。此时的生成多项式为:

$$g(x) = (x + \alpha^7)(x + \alpha^8)(x + \alpha^9)(x + \alpha^{10}) \quad (8)$$

2 RS(31,27) 编码电路及改进的低功耗编码方案

2.1 RS(31,27) 编码电路

编码电路结构的复杂度直接影响系统的功耗。在文献[9]中提出:当 $t > 2$ 时,采用对称编码电路时可简化编码电路结构,减少异或门的数量,从而达到减小功耗的目的;而当 $t = 2$ 时,采用非对称编码电路使得功耗最低。

从图4中也可以看出,当采用非对称编码时功耗为 $462 \mu W$,与采用对称结构编码时相比要节省 $16 \mu W$ 。本设计中 $t = 2$,所以采用非对称编码电路,以降低系统功耗,提高功率利用率。RS(31,27)编码电路如图5所示。

编码电路为多项式运算取余数的运算过程。图中编码器为 r 级编码器, $r = n - k = 31 - 27 = 4$,即含4个反馈系数。编码器的输入是 $\{m_{k-1}, m_{k-2}, \dots, m_0, 0, 0,$

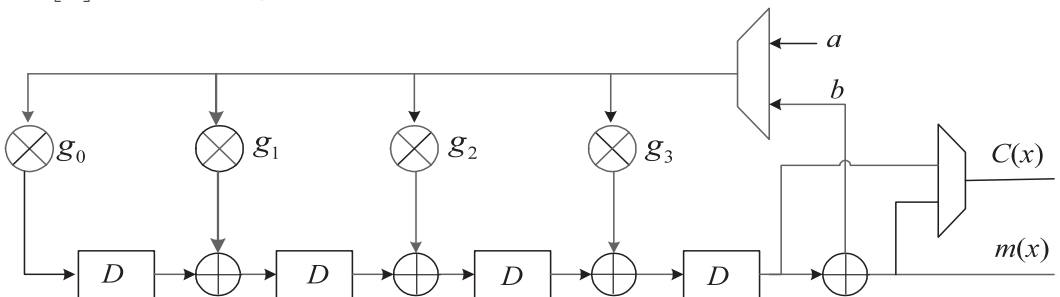


图5 RS(31,27) 编码电路

..., 0}, 在起始信息位到 m_0 , 二选一控制器控制 27 个字节信息位直接输出, 当 m_0 进入编码器以后, 数据输入停止, 此时二选一控制器依次输出移位寄存器的数据, $r = n - k = 4$, 即 4 个字节的监督位。编码电路主要由伽罗华域加法器、伽罗华域乘法器和移位寄存器构成。编码器设计中, 域多项式加法器就是将域上两个多项式的对应系数异或, 实现比较容易, 相比之下域多项式的乘法器的实现复杂得多, 因此域多项式的乘法器是设计的关键。文中采用标准基乘法器简化硬件设计。

2.2 伽罗华域标准基乘法器

标准基乘法器不需要基的转换, 可以在任何系统中使用, 加之其规则简单, 可以很容易地扩展到高阶有限域。要得到 A, B 在 GF 域的乘积, 首先将 A, B 多项式相乘, 然后再将二者的乘积模上本原多项式即可^[10]。

假设 C 表示元素 A 和元素 B 相乘的结果, 则有:

$$C(x) = A(x)B(x) = (A_4x^4 + A_3x^3 + \cdots + A_0)(B_4x^4 + B_3x^3 + \cdots + B_0) = C_8x^8 + C_7x^7 + \cdots + C_0 \quad (9)$$

计算过程和普通多项式的乘法运算一致, 因为 α 是本原多项式 $p(x) = x^5 + x^2 + 1$ 的根, 则 $\{1, \alpha, \dots, \alpha^4\}$ 是 GF(2^5) 的一组基底, 有限域上的任意一个元素都可以通过这组基底表示^[11], 则有:

$$p(\alpha) = \alpha^5 + \alpha^2 + 1 = 0$$

$$\alpha^5 = \alpha^2 + 1$$

从而依次有:

$$\alpha^6 = \alpha^3 + \alpha$$

$$\alpha^7 = \alpha^4 + \alpha^2$$

$$\alpha^8 = \alpha^3 + \alpha^2 + 1$$

(10)

将式(10)代入式(9)得到标准基表示的结果:

$$C(x) = C_4'x^4 + C_3'x^3 + C_2'x^2 + C_1'x + C_0' = (C_4 + C_7)x^4 + (C_3 + C_6 + C_8)x^3 + (C_2 + C_7 + C_8)x^2 + (C_1 + C_6)x + C_0 + C_5 + C_8 \quad (11)$$

例:

$$C_0' = A_0B_0 + A_4B_1 + A_3B_2 + A_2B_3 + A_1B_4 + A_4B_4$$

由此得到的是通用伽罗华域乘法器^[12], 由于在 RS 编码生成多项式中 $g(x)$ 是已知的, 即 $A(x)$ 是已知的。因为: $0 \& 1 = 0, 1 \& 1 = 1$, 则表达式 $C(x)$ 可完全由 $B(x)$ 表示^[13]。

例: $A = \alpha^{19} = 6$ 其二进制表示为 00110, 代入得: $C_0' = B_3 + B_4$ 。

依次类推可得:

$$\alpha^{19}B = \begin{bmatrix} C_0' \\ C_1' \\ C_2' \\ C_3' \\ C_4' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_3 + B_4 \\ B_0 + B_4 \\ B_0 + B_1 \\ B_1 + B_2 + B_4 \\ B_2 + B_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

由(12)式可知该式的乘法运算共需 6 个异或门。

3 RS 码编码的仿真测试

根据以上理论, 给出 RS(31, 27) 编码器硬件设计仿真^[14]。文中采用 Altera 公司的 CycloneIII 系列 EP3C40F484C8 器件实现 RS(31, 27) 编码器, 将 Verilog 代码导入 Modelsim 中进行了仿真。如图 6 所示, 编码器在输入管脚依次输入 27 位信息序列, 输出端在输出信息序列的最后还输出了监督序列, 监督序列依次为 $\{1b, 01, 1a, 17\}$, 图中白色线框区域内即为监督序列。

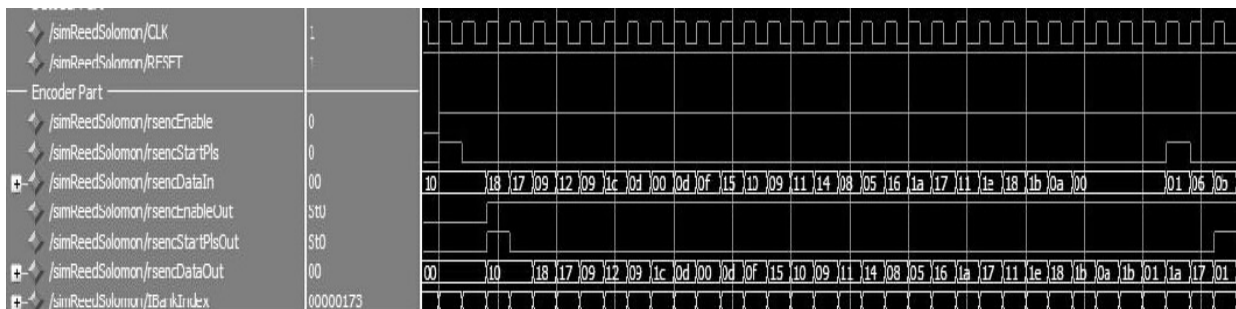


图 6 RS(31, 27) 编码器输入输出序列

4 结束语

文中从低功耗条件出发, 从伽罗华域、生成多项式和乘法器设计等方面, 讨论了影响 RS 编码的几个关键问题, 并提出一种适用于对功耗要求较高的地震仪的 RS 编码方法。该方法在 $t < 3$ 条件下, 采用非对称

编码结构和改进的伽罗华域乘法器, 相比于采用对称编码结构的编码器功耗明显降低, 且减少了实现中与门的个数, 降低了计算复杂度。最后设计并用 FPGA 实现了 RS(31, 27) 编码, 该编码与同类编码相比, 功耗明显降低。实验结果表明, 该设计非常适合应用于地

(下转第 129 页)

参考文献:

[1] Khandani A K. Two-way (true full-duplex) wireless[C]//Proc of 13th Canadian workshop on information theory. Canada:IEEE,2013;33-38.

[2] 李根. 无线中继通信系统的容量优化技术研究[D]. 北京:北京邮电大学,2012.

[3] Cheng Zhiyu,Devroye N. Two-way networks;when adaptation is useless[J]. IEEE Transactions on Information Theory,2014,60(3):1793-1813.

[4] 刘进芬. 协作通信中网络编码技术的研究[D]. 南京:南京邮电大学,2013.

[5] 赵明峰,周亚建,原泉,等. 物理层网络编码研究进展[J]. 计算机应用,2011,31(8):2015-2020.

[6] Katti S,Gollakota S,Katabi D. Embracing wireless interference: analog network coding [C]//Proc of ACM SIGCOMM. [s. l.]:ACM,2007;397-408.

[7] 鲍晶晶,赵兴华. 异步 OFDM 空时协同分集方案[J]. 通信技术,2011,44(7):7-9.

[8] Li Zheng, Xia Xianggen, Lee M H. A simple orthogonal space-time coding scheme for asynchronous cooperative systems for frequency selective fading channels [J]. IEEE Transactions on Communications,2010,58(8):2219-2224.

[9] 季彦呈,高洋,葛建华. 无线网络中的一种异步差分空时

协作方案[J]. 西安电子科技大学学报,2009,36(1):74-79.

[10] Zhong Z,Zhu S,Nallanathan A. Distributed space-time trellis code for asynchronous cooperative communications under frequency-selective channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2009,8(2):796-805.

[11] 高贞贞,朱世华,徐静. 放大转发异步协作通信系统中的差分空时频传输方案[J]. 西安交通大学学报,2009,43(6):62-66.

[12] 孙德春,熊海良,李晓辉,等. 基于单载波频域均衡的异步空时协作传输机制[J]. 电子学报,2011,39(4):780-784.

[13] Guo X,Xia X G. Distributed linear convolutive space-time codes for asynchronous cooperative communication networks [J]. IEEE Trans on Wireless Communications,2008,7(5):1857-1861.

[14] Li Z,Xia X G,Li B. Achieving full diversity and fast ML decoding via simple analog network coding for asynchronous two-way relay networks[J]. IEEE Transactions on Communications,2009,57(12):3672-3681.

[15] Zhang W,Gao F,Yin Q,et al. Space-frequency convolutional coding for frequency-asynchronous AF relay networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2012,61(5):2412-2418.

(上接第124页)

震仪中。文中对低功耗 RS 码的设计也起到了很好的指导作用。

参考文献:

[1] 刘振武,撒利明,董世泰,等. 地震数据采集核心装备现状及发展方向[J]. 石油地球物理勘探,2013,48(4):663-675.

[2] 罗福龙. 地震勘探仪器技术发展综述[J]. 石油仪器,2005,19(2):1-5.

[3] 曹雪虹,张宗橙. 信息论与编码[M]. 北京:清华大学出版社,2009.

[4] 李韬,王平. 控制网络通信中差错控制系统的研究与实现[J]. 微机发展(现更名:计算机技术与发展),2003,13(8):48-50.

[5] 汪海山,马骋,贾惠波. 低复杂度 Reed-Solomon 解码器在地震勘探仪器中的应用[J]. 仪器仪表学报,2010,31(7):1632-1637.

[6] 温明才,刘峰. 基于喷泉码的不等差错保护技术实现[J]. 计算机技术与发展,2011,21(4):69-72.

[7] 杜传报,王欣,张鹏. 基于 RS 码的跳频信号发生器的设计[J]. 计算机技术与发展,2012,22(1):195-197.

[8] Biard L,Noguet D. Choice and implementation of a Reed-Solomon code for low power low data rate communication

systems[C]//Proc of radio and wireless symposium. Long Beach,CA:IEEE,2007;365-368.

[9] Truong Trieu-Kien,Jeng J H,Hung King-Chu. Inversionless decoding of both errors and erasures of Reed-Solomon code [J]. IEEE Transactions on Communications,1998,46(8):973-976.

[10] Zhang Wei,Wang Jing,Zhang Xinmiao. Low-power design of Reed-Solomon encoders[C]//Proc of 2013 IEEE international symposium on circuits and systems. Beijing:IEEE,2013;1560-1563.

[11] Wu Xiaojun,Shen Xianghui,Zeng Zhibin. An improved RS encoding algorithm[C]//Proc of 2012 2nd international conference on consumer electronics, communications and networks. Yichang:IEEE,2012;1648-1652.

[12] Ren Zhigang,Yao Dongping. An improved high-speed RS encoding algorithm[C]//Proc of 2009 3rd IEEE international symposium on microwave, antenna, propagation and EMC technologies for wireless communications. [s. l.]:IEEE,2009;521-523.

[13] 谭思炜,潘红兵. 基于 RS 码的可重构有限域乘法器的设计与实现[J]. 计算机应用与软件,2011,28(8):281-283.

[14] 付兴,樊孝明. 一种低复杂度 RS 编码器的 FPGA 实现[J]. 电视技术,2011,35(9):50-53.

一种用于数字地震仪的低功耗RS编码方法

作者：[崔衣秀](#)，[郝学元](#)，[颜晓红](#)，[CUI Yi-xiu](#)，[HAO Xue-yuan](#)，[YAN Xiao-hong](#)

作者单位：[南京邮电大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京, 210003](#)

刊名：[计算机技术与发展](#)

英文刊名：[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：2015(4)

引用本文格式：[崔衣秀](#).[郝学元](#).[颜晓红](#).[CUI Yi-xiu](#).[HAO Xue-yuan](#).[YAN Xiao-hong](#) 一种用于数字地震仪的低功耗RS编码方法[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2015(4)