文章编号 1674-2915(2013)02-0171-08

RS码仿真与基于RiBM算法的硬件实现

张绍练[1,2],高世杰[1],吴志勇[1*]
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:分析了里德-所罗门码(RS码)的误码率性能,提出了一种基于RiBM算法的RS(15,9)译码器。该译码器采用流水线结构,通过RiBM算法求解关键方程,在此基础上将高斯加性白噪声(AWGN)引入光纤模拟大气激光通信系统,并在现场可编程门阵列(FPGA)平台上完成了测试。测试结果表明:提出的译码器译码速率达到1.11 Gbit/s,为Altera IP核的3.54倍。RiBM算法具有硬件复杂度低、关键路径延时短的优点,能满足系统译码的要求。

关 键 词:RS码;现场可编程门阵列(FPGA);RiBM算法;误码率;译码速率
中图分类号:TN918 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20130602.0171

Simulation of RS codes and hardware implementation based on RiBM algorithm

ZHANG Shao-lian[1,2], GAO Shi-jie[1], WU Zhi-yong[1*]
(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: wuzy@ciomp.ac.cn*

Abstract: To improve communication quality and meet the reliability requirement of data transmission, the Bit Error Rate(BER) performance of Reed-Solomon(RS) codes is analyzed, and a RS(15,9) hardware decoder based on Reformulated Inversionless Berlekamp-Massey(RiBM) algorithm is proposed. The decoder operates in pipeline architecture, and its key equation is resolved by the RiBM algorithm. On that basis, an atmospheric laser communication system is simulated by adding Additive White Gaussian Noise(AWGN) in a fiber, and it is tested on a Field Programmable Gate Array(FPGA) platform. The experimental result shows that decoding speed can be up to 1.11 Gbit/s, as 3.54 times as that of Altera's IP core. The RiBM algorithm has advantages of low hardware complexity and short critical path delay, and can meet the demands of the decoding system.

Key words: Reed-Solomon(RS) codes; Field Programmable Gate Array(FPGA); Reformulated Inversionless Berlekamp-Massey(RiBM) algorithm; Bit Error Rate(BER); decoding speed

收稿日期:2012-12-16;**修订日期**:2013-02-18
基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所创新工程资助项目(No. Y10532B110)

1 引 言

大气激光通信是利用激光束作为载体在大气中进行语音、数据、图像信息双向传送的一种技术,在解决“最后一公里”问题、应急通信等方面具有良好的应用前景[1]。大气对激光传输产生光强闪烁、波前畸变等影响,从而影响激光通信距离、误码率等工作性能,所以如何抑制大气信道影响是一个必须突破的技术难点[2]。大气激光通信系统的高实时性、高可靠性要求传输系统的误码率极低,为了保证相同的通信质量,采用信道编码所获得的增益可以提高通信距离,节省发射功率[3-5]。

1960 年,Reed 和 Solomon 应用 MS 多项式构造的 RS 码是性能优良的多进制 BCH(Bose Chaudhuri-Hochquenghem)码,为极大最小距离可分码(MDS 码)[6],相比于其它线性分组码,在同样的编码效率下,它具有较强的纠错能力。在现有的大气激光通信系统中 RS 码是最有效、应用最广的纠错编码之一,具有同时纠正随机和突发两种差错的能力。它通过高斯加性白噪声(AWGN)信道模拟大气激光通信信道,用 Simulink 仿真分析 2-PAM(Pulse Amplitude Modulation 脉幅调制)+RS 码在有无突发干扰情况下对大气激光通信系统误码率性能的影响,并用 RS 码直观地说明图像去噪的纠错能力。一般来说,对于定义在有限域 GF(2^m)符号位宽度为 m 的 RS 码,其码字长度 $n=2^m-1$,这类 RS 码称为系统码或全码[7]。全码的译码装置包括伴随式计算、关键方程求解、Chien 搜索、Forney 算法和错误求解 4 个部分,其中关键方程求解是 RS 译码过程中最复杂最重要的步骤。目前常见的求解算法,包括 iBM(Blahut)、iBM(Berlekamp)、Euclidean 和 Euclidean(folded)算法,都无法很好地满足大气激光通信系统对数据高速处理的要求[8]。高速的激光通信系统要求较高的 RS 码译码速率,因此提高求解速率对于硬件处理速率至关重要。

为了适应硬件设计的需要,由 Berlekamp 和 Massey 最早提出的 BM 算法几经修改,主要有无逆 BM 算法(iBM)和重组的无逆 BM 算法(RiBM)。Dilip V. Sarwate, Naresh R. Shanbhag 于 2001 年提出 RiBM 算法[6],该算法的硬件结构可采用规整的脉动阵列并行实现,门限复杂度更低,控制结构更简单,能够实现的译码速率更高,从而符合大气激光通信系统对译码速率的要求。本文选用码长 $n=15$,信息长度 $k=9$,码率为 3/5 的 RS(15,9)码来降低误码率和设计难度;并对 RS(15,9)码用 Quartus Ⅱ完成了基于 RiBM 算法的译码器电路设计,最终在现场可编程门阵列(FPGA)平台上得以实现。

2 RS 码误码率性能分析及图像去噪

2.1 Simulink 仿真分析 RS 码误码率性能

对于强度调制/直接探测(IM/DD)的探测体制,理论和实验早已证明在弱起伏大气湍流下,大气激光通信信道是低频对数正态分布 + 高频高斯噪声的混合信道,在强起伏大气湍流下,其信道是低频负指数分布或低频 K 分布 + 高频高斯噪声信道,而不是单一的高斯噪声信道。可用 SDGN(Signal Dependent Gaussian Noise)模型模拟 FSO(Free Space Optical)信道[9]。为便于 Simulink 建模以及简化 Matlab 运算,将大气信道简化为 AWGN 信道。理想 AWGN 信道只有当信噪比 ≥ -1.6 dB 时,才可能实现无差错传输[10]。通过在 AWGN 信道中配置突发干扰所占比例 W,可近似模拟大气激光通信信道。

2-PAM + RS 码 AWGN 信道仿真模型如图 1 所示。数据源产生每帧 $1\,000 \cdot k \cdot \log_2(n+1) = 36\,000$ 个码元的伪随机二进制序列,经过 RS(15,9)编码、2-PAM 调制、受突发干扰的高斯信道、2-PAM 解调、RS(15,9)译码后统计编码前后的误码率。

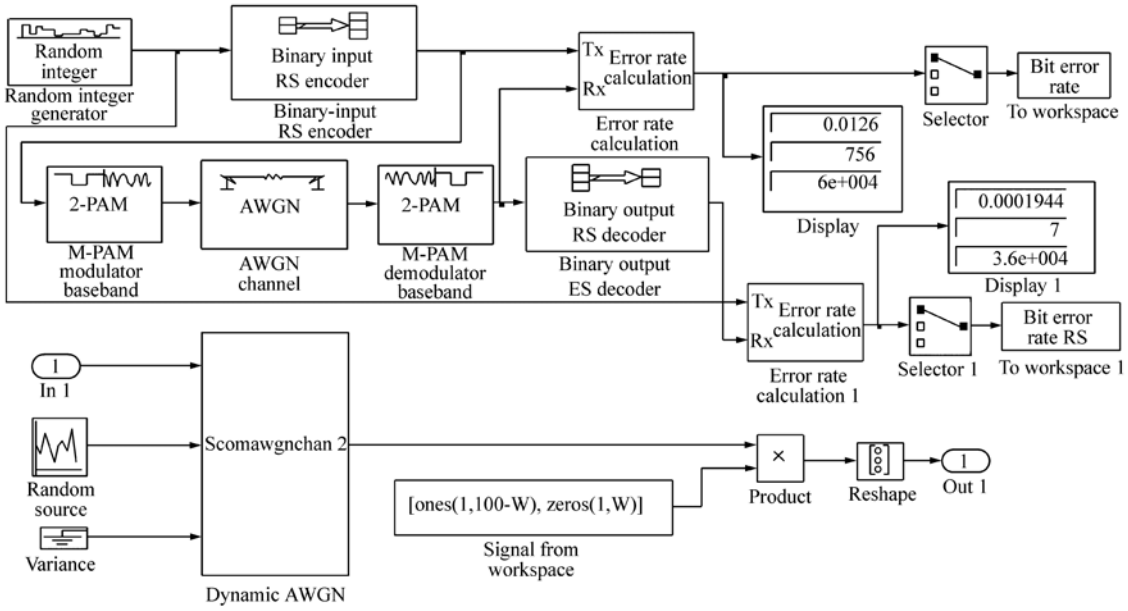


图 1　2-PAM + RS 码 AWGN 信道仿真模型

Fig. 1　Simulation model of 2-PAM + RS codes in AWGN channel

不考虑突发干扰,当信噪比为 4 dB 时输出误码率在 Display 上显示为 10^{-2},而通过 RS(15,9)码编码输出误码率在 Display1 上显示为 10^{-4},编码数据相比未编码数据误码率提高了 2 dB。

Simulink 仿真结果如图 2 所示。由图可知,误码率随着信噪比的增加而下降。在相同的信噪比下,有突发干扰的信道的误码率比无突发干扰的信道的误码率高。信道质量较差时,编码对于接收数据误码率改善不大。当信道信噪比大于 0 dB以后,编码后对于误码率的改善非常明显,可见 RS 编码在理论上对于通信系统性能的改善是非常可观的。

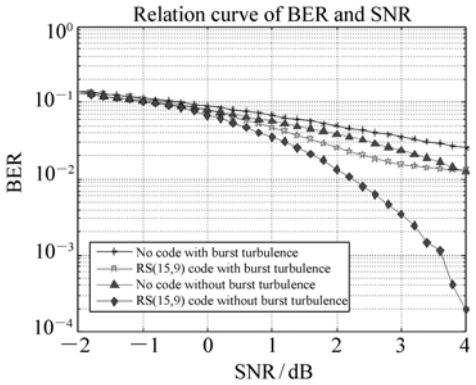


图 2　AWGN 信道 RS(15,9)编码前后有无突发干扰时的误码率与信噪比的关系

Fig. 2　Relationship between BER and SNR of fore-and-aft RS(15,9) encodings and with or without burst turbulences in AWGN channel

2.2　RS 码的图像去噪效果

为了更形象地观察 RS 码对信道传输性能的改善效果,将 RS 码对受高斯噪声污染的图像进行处理,如图 3 所示。由 Matlab 仿真可知,在相同的信噪比下,误码率随着编码效率的降低而减小。

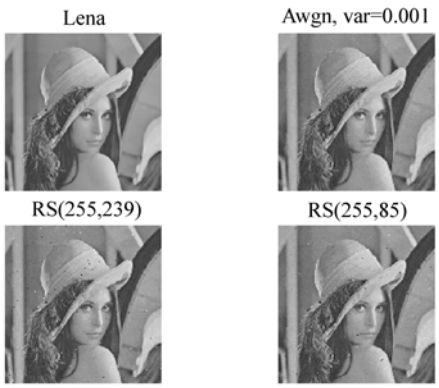


图 3　RS 码对图像的去噪效果

Fig. 3　RS's noise suppressing effect for figure

3 RS(15,9)编译码原理及流水线结构

3.1 RS编码

RS(15,9)码可纠正 $t=(n-k)/2=3$ 个错误[11]。信息多项式为 $m(x)=m_8x^8+m_1x+m_0$，其中 x 代表信息位，$m_i(i=0,\cdots,8)$ 代表信息值。码字生成多项式为：

$$g(x)=\prod_{i=0}^{5}(x-\alpha^i), \tag{1}$$

式中，α 代表生成元，则监督多项式表示为：

$$p(x)=x^6m(x)\bmod g(x), \tag{2}$$

最终码字多项式为 $U(x)=p(x)+x^6m(x)$。

硬件上通过6级4位二进制乘除法的线性反馈移位寄存器(LFSR)电路实现RS时域编码器。

3.2 RS译码

若码字中存在 v 个错误，位置分别在 $x^{j1},x^{j2},\cdots,x^{jv}$，错误位置号为 $\beta_i=\alpha^{il}$，则错误图样多项式表示为：

$$e(x)=e_{j1}x^{j1}+e_{j2}x^{j2}+\cdots+e_{jv}x^{jv}, \tag{3}$$

式中：$e_{ji}(i=1,\cdots,v)$ 代表错误值，$r(x)$ 表示受破坏的码字多项式，为发射多项式和错误图样多项式之和，即 $r(x)=U(x)+e(x)$。

译码目的是从 $r(x)$ 中计算出 $e(x)$，进而纠正 $U(x)$。若 $v\leqslant t$，译码器能够正确译码。

本文通过采用四级流水线(pipeline)结构提高RS译码器处理速度：

3.2.1 一级流水：伴随式计算

根据 $S_i=r(\alpha^i)=\sum_{j=0}^{14}r_j(\alpha^i)^j$，采用高效的迭代算法(Horner准则)计算伴随式系数：

$$\begin{aligned}S_i=&\{[(r_{14}\cdot\alpha^i+r_{13})\cdot\alpha^i+r_{12}]\cdot\\&\alpha^i+\cdots+r_1\}\cdot\alpha^i+r_0,\\&i=0,1,\cdots,5.\end{aligned} \tag{4}$$

3.2.2 二级流水：关键方程求解

伴随多项式表示为：

$$S(x)=S_0+S_1x+\cdots+S_5x^5=\sum_{i=0}^{5}S_ix^i. \tag{5}$$

错误位置多项式定义为：

$$\sigma(x)=\prod_{j=1}^{v}(1-\beta_jx)=1+\sigma_1x+\sigma_2x^2+\cdots+\sigma_vx^v. \tag{6}$$

错误值多项式定义为：

$$\omega(x)=\omega_0+\omega_1x+\cdots+\omega_{v-1}x^{v-1}=S(x)\sigma(x). \tag{7}$$

这3个多项式的关系可通过关键方程描述：

$$S(x)\sigma(x)=\omega(x)\bmod x^{2t}. \tag{8}$$

3.2.3 三级流水：错码纠正

一旦 $\sigma(x)$ 和 $\omega(x)$ 从 $S(x)$ 中确定下来，可用Chien搜索算法 $\sigma(x)=0$ 找出错误位置 $x=\beta_i^{-1}$，并通过Forney算法计算出错误值：

$$e_{ji}=\frac{\omega(\beta_i^{-1})}{\sigma_{\mathrm{odd}}(\beta_i^{-1})},$$

$$\sigma_{\mathrm{odd}}(x)=\sigma_1x+\sigma_3x^3+\cdots+\sigma_{t_{\mathrm{odd}}}x^t_{\mathrm{odd}}, \tag{9}$$

式中，t_{odd} 表示不大于 t 的最大奇数。有限域的求逆运算采用ROM查表法实现。将FIFO(first-in first-out)里缓存的接收数据读出与计算得到的错误位置对应的错误值相减完成纠错过程。

3.2.4 四级流水：伴随式检验

对于纠错后码字再进行一次伴随式检验，若结果syndomes为0，则译码成功，否则说明译码失败。

四级流水结构中关键方程(8)的求解是决定RS译码速率的关键。本文采用RiBM算法设计译码电路。

4 RiBM算法电路设计

RiBM算法的硬件实现结构包括两个部分：一是控制单元CONTROL实现差值更新；二是10个功能相同的PE1计算单元串接实现多项式的脉动计算，如图4所示。

$PE1_i$ 两锁存器初始化值 $\bar{\delta}_i(0)$ 和 $\bar{\theta}_i(0)$：$PE1_0$ 至 $PE1_5$ 分别为 S_0 至 S_5；$PE1_6$ 至 $PE1_8$ 都为0；$PE1_9$ 为1。

CONTROL单元两锁存器初始化值：$\kappa(0)=0$；$\gamma(0)=1$。

运算过程：控制单元内计数器CNTR值 r 每个时钟上升沿加1，根据 $\kappa(r)$ 和 $\bar{\delta}_0(r)$ 计算MC (r)，并更新 $\gamma(r)$ 和 $\delta(r)$；从 $PE1_9$ 至 $PE1_0$ 依次计

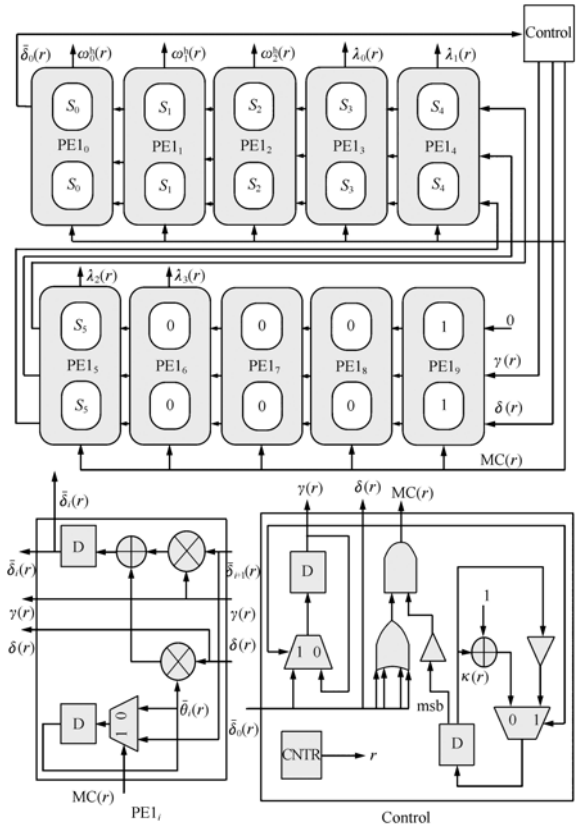


图 4　脉动 RiBM 算法结构,PE1 计算单元和控制单元

Fig. 4　Skematic of homogenous systolic RiBM architecture, PE1 processor and CONTROL block

算 $\overline{\theta}_i(r)$ 和 $\overline{\delta}_i(r)$,并最终更新 $\overline{\delta}_0(r)$,进入下一轮迭代。

迭代 6 次后, $PE1_3$ 至 $PE1_6$ 的 $\overline{\delta}_i(6)$ 为错误位置多项式 $\lambda(x)$ 系数,$PE1_0$ 至 $PE1_2$ 的 $\overline{\delta}_i(6)$ 为错误值多项式 $\omega^h(x)$ 系数。由 Chien 搜索算法 $\lambda(x)=0$ 计算出错误位置 $x=\beta_i^{-1}$,Forney 算法公式(9)修正为:

$$e_{ji}=\frac{\beta_i^{2t}\omega^h(\beta_i^{-1})}{\lambda_{\text{odd}}(\beta_i^{-1})},$$

$$\lambda_{\text{odd}}(x)=\lambda_1 x+\lambda_3 x^3+\cdots+\lambda_{odd}x^{t_{\text{odd}}},$$

$$t_{\text{odd}}=t=3. \qquad (10)$$

由图 4 可见,RiBM 算法对 RS(15,9)码电路需要 22 个锁存器,20 个有限域乘法器,12 个选通门,10 个有限域加法器,只需要 6 个周期就完成关键方程求解,关键路径延时 $T_{\text{mult}}+T_{\text{odd}}$($T_{\text{mult}}$表示乘法器处理延时,$T_{\text{odd}}$表示加法器处理延时)。RiBM 算法能工作在很高的频率上,数据吞吐量得到了极大的提高,在 FPGA 的实现上具有很强的灵活性和通用性。

5　RS 码的算法仿真与 FPGA 实现

5.1　基于 Altera IP 核与基于 RiBM 算法的 RS(15,9)译码器的时序仿真与比较

系统整体实现在 Quartus Ⅱ中完成。采用 Altera 公司 Cyclone 系列的 EP1C3T144I7 芯片进行编译,该芯片共有 2,910 个逻辑单元,59,904 bit的存储单元,可用 IO 引脚 104 个。采用 Quartus Ⅱ自带的 Altera IP 核实现的 RS 译码器,基于 Avalon-ST 深度为三码长的流水线结构,运用修正的欧几里德算法 MEA(modified Euclidean algorithm)求解关键方程[12]。两种方法实现的 RS(15,9)译码器的编译报告如表 1 所示。

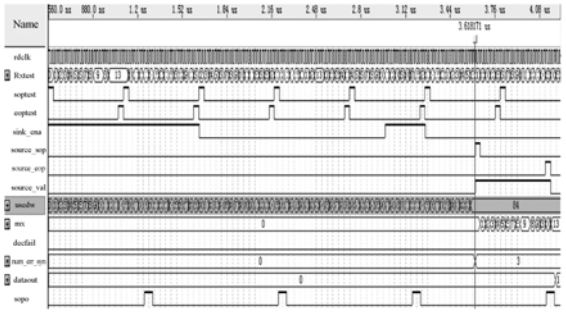
表 1　RS(15,9)译码器在 EP1C3T144I7 芯片中的编译报告

Table 1　Compilation report of RS(15,9) decoders in EP1C3T144I7 device

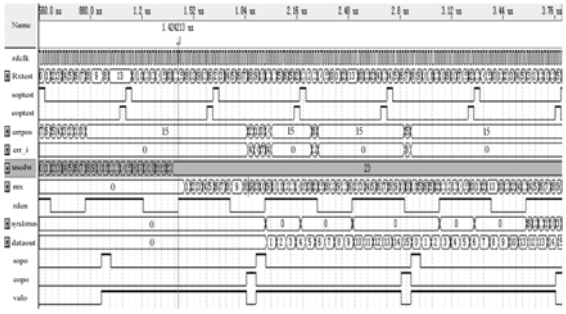
RS(15,9) decoders based on	Total logic elements	Total memory bits	Total pins
Altera's IP core	1,041 (36%)	1,728 (3%)	73 (70%)
RiBM algorithm	1,108 (38%)	192 (<1%)	56 (54%)

基于 RiBM 算法的译码器与基于 Altera IP 核的译码器相比,虽然使用的逻辑单元多一些,但是占用的存储单元比特和引脚却少得多,总体上看耗费的硬件资源并不多,说明 RiBM 算法硬件复杂度低。系统频率达到 55.5 MHz,保证了译码效率。RS(15,9)译码器经过逻辑综合、布局布线后的时序仿真如图 5 所示。

在图 5(b)中验证:(1)输入 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 9 8 13 13 13,输出 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 9 8 9 3 10,纠错 $e(x)=7+14x+4x^2$;(2)输入 13 10 11 12 13 14 15 0 13 15 8 12 9 13 6,输出 9 10 11 12 13 14 15 0 1 15 8 12 9 13 6,纠错 $e(x)=12x^6+4x^{14}$;(3)输入 2 3 4 5 6 7 8 9 10 13 11 5 6 5 2,输出 2 3 4 5



(a) 基于Altera TP核
(a) Based on Altera TP core



(b) 基于RiBM算法
(b) Based on RiBM algorithm

图5 RS(15,9)码译码器仿真
Fig. 5 Simulation of RS(15,9) decoder

6 7 8 9 10 5 11 5 6 5 2,纠错 $e(x)=8x^5$;(4)输入 13 12 13 14 15 0 1 2 13 13 0 12 2 4 13,输出不变,而 syndomes =6 12 11 1 10 3,伴随式不为0,说明译码失败。

可见RS(15,9)码能纠正1到3个错误,说明RiBM算法正确。结合改进的隔列交织方式,使信道更加离散化,能够承受13-18的突发误码[13]。

从图5(a)和图5(b)中标记的usedw可知,基于Altera IP核的RS(15,9)译码器,FIFO需要缓存85个时钟周期才能实现译码;而基于RiBM算法的RS(15,9)译码器,由于关键路径延时短,FIFO只需要缓存24个时钟周期就可实现译码,译码速率提高到IP核的85/24≈3.54倍。译码速率为:

$$v=\frac{n\times m}{T_{\mathrm{clk}}\times N_{\mathrm{FIFO}}}\times N_{\mathrm{parallel}}=\frac{15\times 4\ \mathrm{bit}}{36\ \mathrm{ns}\times 24}\times 16\approx 1.11\ \mathrm{Gbit/s}\ ,\quad (11)$$

式中:n 为码长,m 为码字位数,T_{clk} 为时钟周期,N_{FIFO} 为FIFO缓存周期数,N_{parallel} 为并行通信总数[14]。

5.2 RS码的FPGA实现

设计了大气信道模拟板产生高斯噪声,并配置选通门模拟大气激光通信信道。硬件平台与示波器显示如图6所示。

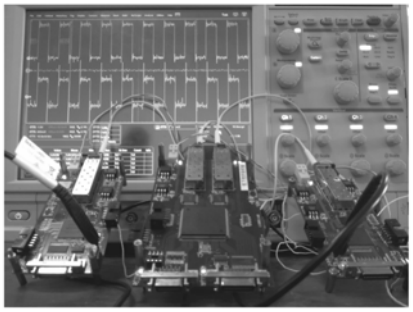


图6 硬件平台与示波器显示
Fig. 6 Hardware platform and oscillograph display

在自制光纤通信电路板上,发送板(左)产生4位循环计数数据流A,写时钟周期为60 ns,经FIFO以周期36 ns的读时钟读取,经RS(15,9)码编码后数据流为B,FPGA再通过National Semiconductor公司的DS92LV2421并串转换芯片将B发送到光纤。大气信道模拟板(中)调用Xilinx公司的AWGN Core 1.0[15]产生高斯噪声,通过周期 T 可控的选通门控制引入B的误码个数,从而模拟大气激光通信系统中的随机噪声,并将相加生成的误码数据流C发送给光纤。接收板(右)的DS92LV2422串并转换芯片从光纤接收C,通过基于RiBM算法的RS(15,9)译码器纠错,还原为数据流D,经FIFO以周期为60 ns的写时钟读取,恢复出原始数据流E。示波器显示为 $T=5$ 时A与E的最高位MSB(most significant bit)比较,可见数据能完全恢复,每个码字成功纠错3个错误。

译码前后的系统延时及其数据比较如图7所示(为方便观察,将示波器反色显示)。图7显示为 $T=0$,即不引入噪声时接收的C与译码后的D的MSB比较,可见译码延时868 ns,约24.1个读时钟周期(36 ns),表明实测与仿真结果符合。

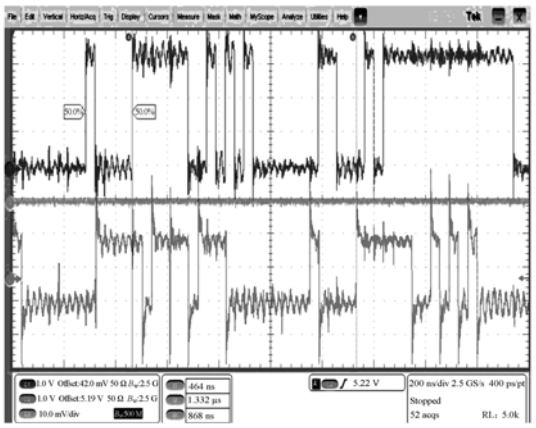


图 7　译码前后的系统延时及其数据比较

Fig. 7　System delays and data comparison of fore-and-aft decodings

6　结　论

通过 Simulink 仿真分析了 RS 码对大气激光通信系统误码率性能的影响,并在阐述 RS(15,9)码编译码原理的基础上给出其 Quartus II 电路设计方案,译码器采用流水线结构,采用 RiBM 算法求解关键方程。RiBM 算法是一种脉动阵列式的并行结构,具有低复杂度、高速译码的优点。设计的 RS(15,9)码译码器能对每个码字(15 个码元)中的不大于 3 个码元的错误进行纠正,译码速率达到 1.11 Gbit/s,为 Altera IP 核的 3.54 倍,满足大气激光通信系统高速率、高可靠性和高实时性的信息传输要求。最后在 FPGA 上实现了 RS 码在大气激光通信系统中的应用,表明采用 FPGA 实现该译码算法在工程上具有可行性。

参考文献:

[1] 杜安源,柯熙政. 大气激光通信系统中 RS 码的研究与实现[J]. 光电工程,2004(增 1):44-47.
DU A Y,KE X ZH. Study and implementation of Reed-Solomon code in an atmospheric laser communication systerm[J]. *Opto-Electronic Eng.*,2004(Suppl 1):44-47. (in Chinese)

[2] 付强,姜会林,王晓曼,等. 空间激光通信研究现状及发展趋势[J]. 中国光学,2012,5(2):116-125.
FU Q,JIANG H L,WANG X M,*et al.*. Research status and development trend of space laser communication[J]. *Chinese Optics*,2012,5(2):116-125. (in Chinese)

[3] 王怡. 大气无线激光通信信道编码[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2006.
WANG Y. Atmospheric optical wireless communication system channel coding[D]. Harbin:Harbin Engineering University,2006. (in Chinese)

[4] 李进,吕增明,陶宏江,等. 适于高速 CCD 图像数据光纤传输的纠错技术[J]. 光学 精密工程,2012,20(11):2548-2558.
LI J,LÜ Z M,TAO H J,*et al.*. Error correction technology for CCD image using high speed optical fiber transmission[J]. *Opt. Precision Eng.*,2012,20(11):2548-2558. (in Chinese)

[5] 杨剑,韩建栋,秦品乐. 视觉测量中可纠错的编码点识别及提取[J]. 光学 精密工程,2012,20(10):2293-2299.
YANG J,HAN J D,QIN P L. Correcting error on recognition of coded points for photogrammetry[J]. *Opt. Precision Eng.*,2012,20(10):2293-2299. (in Chinese)

[6] 王新梅,肖国镇. 纠错码—原理与方法[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2001.
WANG X M,XIAO G ZH. *Errorcorrecting Code-Theory and Method*,*Revised Edition*[M]. Xi′an:University of Electronic Science and Technology of Xi′an,2001. (in Chinese)

[7] 赵旸,耿相铭. RS(16,12)缩短码编译码原理及性能分析[J]. 通信技术,2012,45(02):49-50.
ZHAO Y,GENG X M. Encoding and decoding algorithm for RS(16,12) shortened codes and its performance analysis [J]. *Communications Technology*,2012,45(02):49-50. (in Chinese)

[8] DILIP V S,NARESH R S. High-speed architectures for reed-solomon decoders[J]. *IEEE T. VLSI SYST.*,2001,9(5):641-655.

[9] KHAN M N,COWLEY W G. Signal dependent Gaussian noise model for FSO communications[C]//Communications Theory Workshop(AusCTW),2011 Australian,Jan. 31-Feb. 3,2011,Melbourne,Australia. 2011:142-147.

[10] 殷致云. FSO广义信道特性研究[D]. 西安:西安理工大学,2009.
YIN ZH Y. Research on the characteristics of FSO generalized channel[D]. Xi′an:Xi′an Technology University,2009. (in Chinese)

[11] Bernard Sklar,徐平平,宋铁成,等. 数字通信—基础与应用[M]. 2版. 北京:电子工业出版社,2002.
BERNARD S,XU P P,SONG T CH,*et al.*. *Digital Communications-Fundamentals and Applications*[M]. 2nd ed. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2002. (in Chinese)

[12] 刘学,苏建峰,孙婷. 基于Altera IP核的RS译码器的设计与实现[J]. 时间频率学报,2010,33(1):28-31.
LIU X,SU J F,SUN T. Design and implementation of a RS DECODER BASEd on Altera′s IP core [J]. *J. Time and Frequency*,2010,33(1):28-31. (in Chinese)

[13] 魏强. 大气激光通信高速信道RS+交织复合码的FPGA实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
WEI Q. FPGA realization of fast channel RS + interleaving composite coding in atmospheric optical communication[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2010. (in Chinese)

[14] National Semiconductor Corporation 301101. DS92LV2421/DS92LV2422 10 to 75 MHz,24-bit Channel Link II Serializer and Deserializer[EB/OL]. [2010-05-25] http://www.national.com.

[15] DONG U L,WAYNE L,JOHN D V,*et al.*. A hardware gaussian noise generator using the wallace method[J]. *IEEE T. VLSI SYST.*,2005,13(8):911-920.

作者简介:

张绍练(1986—),男,贵州瓮安人,硕士研究生,2010年于中国科学技术大学获得学士学位,2013年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事大气激光通信信道编码方面的研究。E-mail:zsllck@mail.ustc.edu.cn

吴志勇(1965—),男,内蒙通辽人,学士,研究员,博士生导师,1989年于长春理工大学获得学士学位,主要从事光电测控设备总体技术、视频调光调焦技术和光纤通讯技术的研究。E-mail:wuzy@ciomp.ac.cn

高世杰(1979—),男,吉林抚松人,博士研究生,助理研究员,2000年于哈尔滨理工大学获得学士学位,2003年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事高速光通信技术的研究。E-mail:yoursjohn@163.com