

# The Application of Error-Correcting Code in the Wireless Laser Communication

Hengkuo Qu, Liang Yang, Jinli Tang, Yafeng Xie, Longchao Wei

The 27<sup>th</sup> Research Institute of CETC, Zhengzhou Henan

Email: 172507171@qq.com

Received: Nov. 19<sup>th</sup>, 2018; accepted: Nov. 29<sup>th</sup>, 2018; published: Dec. 6<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

Wireless laser communication refers to a technology of transmitting the information by laser carrier through the vacuum or atmosphere. In the laser communication the signal of receiver will become stronger or weaker, for falling under the atmosphere turbulence. So the error-correcting code was designed for the communication commonly. This article introduced the RS code, Turbo code and LDPC code. In the real system of wireless laser communication the RS code was used. At last of paper the result of experiment was showed between encoding and non-encoding. The result showed that the RS code can reduce the error-code-rate of system effectively.

## Keywords

Wireless Laser Communication, Atmosphere Turbulence, Error-Correcting Code, RS Code

---

# 纠错码在无线激光通信中的应用

屈恒阔, 杨 亮, 唐金力, 谢亚峰, 魏龙超

中国电子科技集团公司第二十七研究所, 河南 郑州

Email: 172507171@qq.com

收稿日期: 2018年11月19日; 录用日期: 2018年11月29日; 发布日期: 2018年12月6日

---

## 摘 要

无线激光通信是指以激光为载体, 在真空或者大气中传输数据的通信技术, 在无线激光通信链路中, 由于受到大气湍流的影响, 通信接收端收到激光信号起伏不定, 造成了误码的产生。链路设计中不采用纠错码很难保证低误码率的要求, 因此在无线激光通信中, 一般都采用纠错码。本文分析了几种常用的纠错码, 在此基础上设计了一种RS码, 并在实际的大气通信中加以应用, 给出了不加纠错码和采用纠错码的试验结果, 表明RS码能有效降低系统的误码率。

## 关键词

无线激光通信, 大气湍流, 纠错码, RS码

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

无线激光通信技术是指利用激光束作为载波在自由空间直接进行语言、数据、图像等信息传输技术。自由空间包括大气信道和真空信道。在真空信道中, 几乎不存在大气对通信链路的影响, 而大气信道存在了大气散射、大气吸收、大气湍流等现象, 对激光波段影响较大, 特别是大气湍流, 大气湍流造成了接收信号时强时弱, 是无线激光通信中误码产生的主要因素, 因此从无线激光通信技术发展的初期, 人们就针对无线激光通信的通信链路设计中增加纠错码进行了研究。

## 2. 大气湍流对激光通信的影响[1]

由于大气湍流影响, 到达接收端的光束波前幅度及相位发生畸变, 使光斑中心产生光漂移和扩散现象。对于较强湍流条件, 甚至产生光斑破碎和光斑空洞现象。大气湍流散斑效应引起光斑空间分布变化, 并将影响接收端接收探测器的效率。在弱湍流条件下, 链路距离  $L$ 、接收口径  $D$ 、大气折射率结构常数  $C_n^2$  对应关系满足以下公式:

$$\sigma_\beta^2 = \frac{1.093 \cdot L \cdot C_n^2}{D^{1/3}}$$

在无线激光通信系统, 系统衍射极限角  $\theta_{div\_min} = \frac{2.44\lambda}{D}$  所对应的最大分辨力为  $R_{max\_ss} = \theta_{div\_min}^{-1}$ 。由于受到大气层段到达角起伏湍流效应的影响, 激光通信系统的最大分辨力将会降低为:

$$R_{max\_sg} = \frac{R_{max\_ss}}{\sqrt{1 + \sigma_\beta^2 R_{max\_ss}^2}}$$

由此可见, 大气湍流散斑引起的分辨力下降将引起接收端信号光接收的功率, 接收功率会影响到整个通信系统的误码率。

在无线激光通信中一般采用纠错码技术来降低无线激光通信产生的误码。

## 3. 纠错码技术[2]-[9]

纠错码技术是通过在发送端传输的信息序列中加入一些冗余的监督码进行纠错。在发送端由发送设备按一定算法生成冗余码插入到要传输的数据流中, 接收端按同样算法对接收到的数据流进行译码, 根据接收到的码流确定误码的位置并进行纠错。最众多编码方法中, 应用较广泛的有 RS 码、Turbo 码和 LDPC 码等。

### 3.1. RS 码

RS 码首先由 Reed 和 Solomon 于 1960 年构造出来, 是目前最为有效、应用最为广泛的差错控制编码

之一，是一类具有很强纠错能力的多进制 BCH 码，它不仅纠正突发错误，还可以纠正随机错误。

具有纠正  $t$  个错误的 RS 码由如下参数：每个符号比特数  $m$ ；每个符号可以看成是有限域中的一个元素；码长  $n = 2^m - 1$ ；信息段有  $k$  个符号；监督段有  $n - k = 2t$  个符号；最小码距离  $d = 2t + 1$ 。RS 码用于纠正的突发错误图样是：总长度为  $b_i = (t - 2i)m + 2i - 1$  比特的是  $i$  个突发。

RS 码的一个重要性质是：真正最小距离总是相同的。每种 RS 码都是一个最大距离的可分码，最小距离等于  $n - k - 1$ 。当省掉 RS 码的某些信息符号后，分组长度缩短，但是最小距离并不减小，故任何一种缩短的码仍是一个最大距离可分码。

RS 码的另一个重要形式是在其码字内的任何  $k$  个位置都是可用信息集合。 $(n, k)$ RS 码中，输入信息分成  $km$  比特一组，每组包括  $k$  个符号，每个符号由  $m$  比特组成。RS 码的编译码是基于组码元而不是单独的 0 或 1，这也是 RS 码纠错能力特别强的原因，这也使得 RS 特别适合处理突发错误。

### 3.1.1. RS 编码原理

RS( $n, k$ )码具有以下性质：

$n$  为码长， $k$  为信息位长， $n - k$  为校验位长。一般  $n = q - 1$ ， $n - k = 2t$ ， $q$  为有限域的阶数，是素数或素数的幂次，实用中一般取  $q$  为 2 的幂次。最小距离为  $d_{\min} = 2t + 1$ ， $t$  为设计的纠错能力。RS 码主要是围绕生成多项式构成的，其生成多项式为：

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

$$= a_{n-k}x^{n-k} + a_{n-k-1}x^{n-k-1} + \cdots + a_1x + a_0$$

$a$  为 GF( $q$ )域上本原多项式的根， $a$  的各次幂可构成扩域 GF( $qm$ )上的所有元素。

编码器结构示意图如图 1。

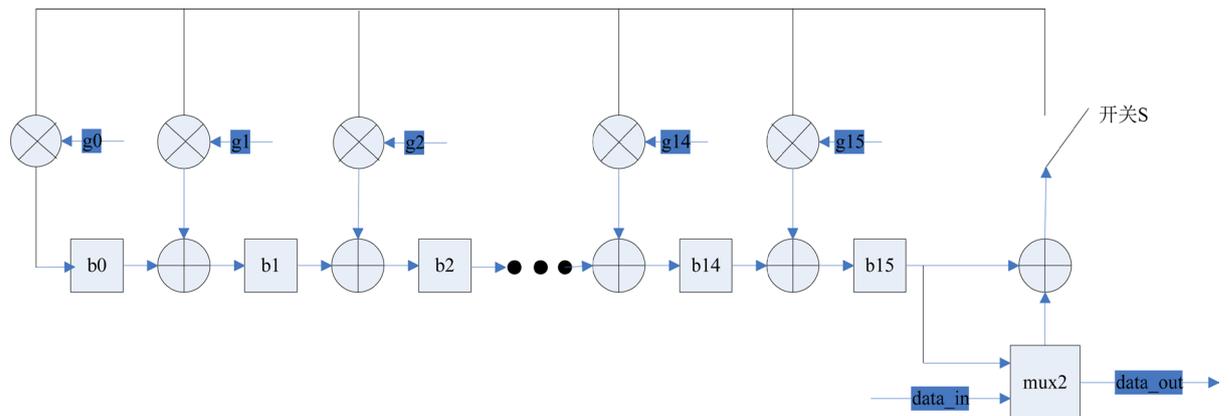


Figure 1. The sketch map of encoding  
图 1. 编码器示意图

### 3.1.2. RS 码译码原理

RS 译码分为以下几步：

- 第一步：计算多个伴随式值；
- 第二步：由伴随式值确定差错定位多项式；
- 第三步：求出错误位置值；
- 第四步：由所得的错误位置值计算错误值；

1) 伴随式的求解

设  $G(q)$  是 RS 码所在的伽罗华域(Galoisfield),  $n$  为 RS 码的编码长度,  $q$  是一个不为 1 的素数或者素数的幂,  $t$  为 RS 码的纠错长度, 则 RS 码的生成多项式为:

$$g(x) = (x - a^0)(x - a^1) \cdots (x - a^{2t-1})$$

由编译码理论可知, 对于以上式为生成多项式的 RS 码, 其校验矩阵为:

$$H = \begin{bmatrix} (a^0)^{n-1} & (a^0)^{n-2} & \cdots & (a^0)^1 & (a^0)^0 \\ (a^1)^{n-1} & (a^1)^{n-2} & \cdots & (a^1)^1 & (a^1)^0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ (a^{2t-1})^{n-1} & (a^{2t-1})^{n-2} & \cdots & (a^{2t-1})^1 & (a^{2t-1})^0 \end{bmatrix}$$

设接收到的码组为  $R(x)$ , 其系数矩阵为:  $R = [R_{n-1}, \dots, R_1, R_0]$ , 且设信道产生的错误码数

$$S_j = \sum_{i=1}^t E_i x_i^{j-1}, \quad j = 1, 2, \dots, 2t$$

### 2) 差错位置多项式的确定

鉴于非线性方程直接求解比较困难, 因此引入一个称为错误位置多项式的中间变量  $\sigma(x)$ , 先求出错误位置数  $x_i$ , 再求出  $E_i$ , 给出如下定义:

$$\begin{aligned} \sigma(x) &= (1 - x_1 x)(1 - x_2 x) \cdots (1 - x_t x) \\ &= 1 + \sigma_1 x + \sigma_2 x^2 + \cdots + \sigma_t x^t \end{aligned}$$

设  $x_1^\sigma, x_2^\sigma, \dots, x_t^\sigma$  是  $\sigma(x)$  的解, 由  $\sigma(x)$  的定义有

$$x_1 = (x_1^\sigma)^{-1}, x_2 = (x_2^\sigma)^{-1}, \dots, x_t = (x_t^\sigma)^{-1}$$

所以求错误位置就是求解错误位置多项式。

### 3) 关键方程的求解

关键方程的求解可通过 ME 迭代算法来实现。

ME 迭代算法可以简单描述为以下几个公式和约束条件的迭代。首先初始化:  $R_0(x) = x^{2t}$ ;  $Q_0(x) = S(x)$ ;  $L_0(x) = 0$ ;  $U_0(x) = 1$ ; 迭代后如果  $\deg(R_i(x))$  或  $\deg(Q_i(x))$  小于 8, 则算法迭代结束。此时  $\omega(x) = R_i(x)$ ,  $\sigma(x) = L_i(x)$ 。

### 4) 错误位置的确定

求得  $\sigma(x)$  后接下来就要求出它的根, 这个过程可以用钱搜索来实现。设

$$R(x) = r_{n-1}x^{n-1} + r_{n-2}x^{n-2} + \cdots + r_1x + r_0$$

为了要检验第一位  $r_{n-1}$  是否错误, 相当于译码器要确定  $\alpha^{-(n-1)}$  是否是错误位置数, 这等于要校验  $\alpha^{-(n-1)}$  是否是  $\sigma(x)$  的根。若是, 则有:

$$\sigma(\alpha^{-(n-1)}) = \sigma(\alpha) = 1 + \sigma_1 \alpha + \sigma_2 \alpha^2 + \cdots + \sigma_t \alpha^t = 0$$

所以得到了  $\sigma(x)$  后, 为了译  $r_{n-1}$ , 译码器首先验证  $\sigma_1 \alpha + \sigma_2 \alpha^2 + \cdots + \sigma_t \alpha^t = -1$  是否成立, 若成立则  $\alpha$  是错误位置数,  $r_{n-1}$  码元是错误码元; 否则  $r_{n-1}$  是正确的。

同理为了译  $r_{n-1}$ , 译码器必须验证  $\sigma_1 \alpha^l + \sigma_2 \alpha^{2l} + \cdots + \sigma_t \alpha^{tl} = -1$  是否成立, 若是则  $r_{n-1}$  是错误码元, 若不成立, 则  $r_{n-1}$  不是错误码元。

这样一次对每一个  $r(l=1,2,\dots,n)$  进行检验, 就求得了  $\sigma(x)$  的根, 这个过程称为钱搜索。

5) 差错幅值的求解

差错幅值的求解通过 Forney 算法来实现。Forney 算法描述如下:  
若实际产生错误个数  $\gamma \leq t$ ; 则

$$s_t = \sum_{k=1}^{\gamma} Y_k x_k^i$$

$$-\sigma'(x_i^{-1}) x_i^{-1} = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{\gamma} (1 - x_j x^{-1}), \text{ 同时得到}$$

$$Y_i x_i x_i^{-1} (-\sigma'(x_i^{-1})) (x_i^{-1}) = \omega(x_i^{-1})$$

$$\text{所以错误值为 } Y = \frac{-x_i \omega(x_i^{-1})}{\sigma'(x_i^{-1})}。$$

3.2. Turbo 码

Turbo 码是 C. Berrou 等人提出了一种新型的纠错码。它采用一种并行级联的方法实现了长码的编码, 同时构造了相应的解码器来完成长码的解码, 是一种实用的纠错码, 它的性能非常逼近香农的性能界, 使其在较低的信噪比条件下仍能够保持良好的性能。目前 Turbo 码在 CDMA 的应用得到各国学者的重视, Turbo 迭代的思想已经渗透到物理链路层先进的信号处理技术的各个领域, 它域调制、均衡、空时编码和 OFDM 相结合极大的促进了技术的进步和发展。

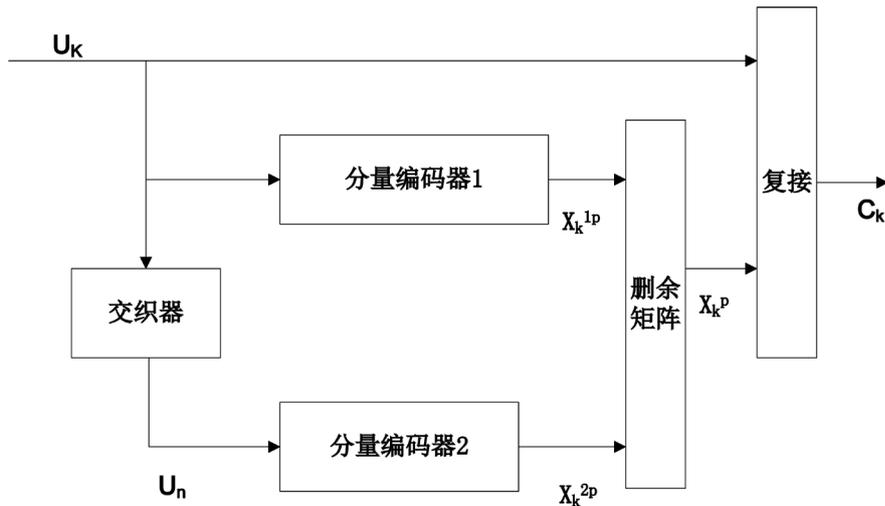


Figure 2. The sketch map of turbo encoding  
图 2. Turbo 码编码框图

图 2 表示了经典的 Turbo 码编码框图, 它主要由分量编码器 1、分量编码器 2、交织器以及删余矩阵和复接器构成。分量编码器一般选择为递归系统卷积码(RSC), 通常两个分量编码器采用相同的生成矩阵。因此 Turbo 码又被称为并行级联卷积码。

在 Turbo 码编码过程中, 两个分量编码器的输入序列是相同的, 长度为 N 的信息序列  $\{u_k\}$  在送入第一个分量编码器进行编码的同时作为系统输出  $\{x_k^s\}$  直接送自复接器, 同时  $\{u_k\}$  经过交织器 I 后的交织序

列  $\{u_n\}$  送入第二个分量编码器。其中,  $n = I(k)$ ,  $0 \leq n, k \leq N-1$ 。  $I(\cdot)$  为交织映射函数,  $N$  为交织深度, 即为信息序列长度。两个分量编码器输入序列仅仅是码元的输入顺序不同。两个分量编码器输出的校验序列分别为  $\{x_k^{1p}\}$  和  $\{x_k^{2p}\}$ 。为了提高码率和系统频谱效率, 可以将两个校验序列经过删余矩阵删余后, 再与系统输出  $\{x_k^s\}$  一起经过构成码字序列  $\{c_k\}$ 。

交织器和分量码的结合可以确保 Turbo 码编码输出码字具有较高的汉明重量。在 Turbo 编码器中交织器的作用是将信息序列中的比特顺序重置。当信息序列经过第一个分量编码器后输出的码字汉明重量较低时, 交织器可以使交织后的信息序列经过第二个分量编码器编码后以很大的概率输出高重码字, 从而提高码字的汉明重量; 同时好的交织器还可以有效的降低校验序列间的相关性。通过交织, 编码序列在长为  $2N$  或  $3N$  比特的范围内无记忆性, 从而由简单短码构造近似随机长码。交织器实际上是一个一一映射函数, 作用是将输入信息序列重的比特位置进行重置, 以减小分量编码器输出校验序列的相关性和提高码重。因此, 交织器设计的好坏在很大程度上影响 Turbo 码的性能。删余矩阵的作用是提高编码效率, 其元素取自集合  $\{0, 1\}$ 。矩阵重每一行分别余两个分量编码器对应, 其中“0”表示相应位置上的效应比特被删除, 而“1”则表示保留相应位置的效应比特。

### 3.3. LDPC(低密度奇偶校验)码

LDPC 码是 Gallager 于 1962 年提出的一种性能接近于香农限的好码, 限于当时计算机水平和硬件技术 LDPC 码在很长一段时间内一直未受到人们重视, 直到 Berrou 等人提出 Turbo 码后, LDPC 码才重新引起人们的研究兴趣并成为研究的热点。计算机仿真结果表明, 最好的非规则 LDPC 码(长度为  $10^6$ )可获得在  $BER = 10^{-6}$  时仅偏离容量 0.13 dB 的性能, 优于迄今所知道的最佳 Turbo 码, 当码长为  $10^7$  码率为 1/2 时, 其性能距香农限只差 0.04 dB。

LDPC 码的特点是: 性能优于 Turbo 码, 具有较大灵活性和较低的差错平底特性; 译码复杂度低于 Turbo 码, 且可实现完全的并行操作, 在编码器和译码器之间不需要交织器, 硬件复杂度低, 因而适合硬件实现; 吞吐量大, 适合高码率的应用, 极具高速译码潜力。此外, LDPC 码在干扰、衰落等原因引起的突发误码情况下有更优良的性能。但 LDPC 码在硬件实现上难点是它的不规则结构, 大部分的 LDPC 码的结构都是非常随机的, 使得它的编码器要比 Turbo 码的复杂一些。另一个缺点是不能灵活地改变码率和码长, 要改变通常需要重新构造奇偶校验矩阵和相应地生成矩阵, 使得硬件改动困难。

图 3 给出了 4 种不同的帧长, 即  $N = 2048$  bits、 $N = 1024$  bits、 $N = 512$  bits、 $N = 256$  bits, 它们的码率  $R$  都为 1/2, (3, 6)规则的 LDPC 码。图 3 可以很明显的看出: 在相同码率的情况下, 随着码长的增加性能会越来越好, 这是码字间的码距随着码长的增加而增大的结果。

高速 LDPC 编译码器硬件实现的关键在于码结构以及译码算法的选取。为适合高速硬件实现, 一般应选用准循环结构的 LDPC 码。准循环结构使得编码器可以用移位寄存器快速实现, 而译码器高速实现的关键是并行度的选取以及译码算法的选取。

## 4. RS 码在无线激光通信链路中的应用

通过对上述几种纠错码的分析, 设计了一套无线激光通信设备, 在链路中采用 RS (255.239)码型, 通信速率为 256 kbps, 通信距离 3 km, 进行了实际的试验, 分别采用未加纠错码和增加纠错码两种体制, 记录了实际的误码率。在实际的试验过程中, 可以采用增加人为的误码, 使系统产生需要的误码。结果如下:

从图 4 可以看出, RS 码在小于  $10^{-4}$  时, 基本上可以完全进行纠错, 而使系统的误码率基本上为 0, 上述试验排除了通信链路中光遮挡的情况。

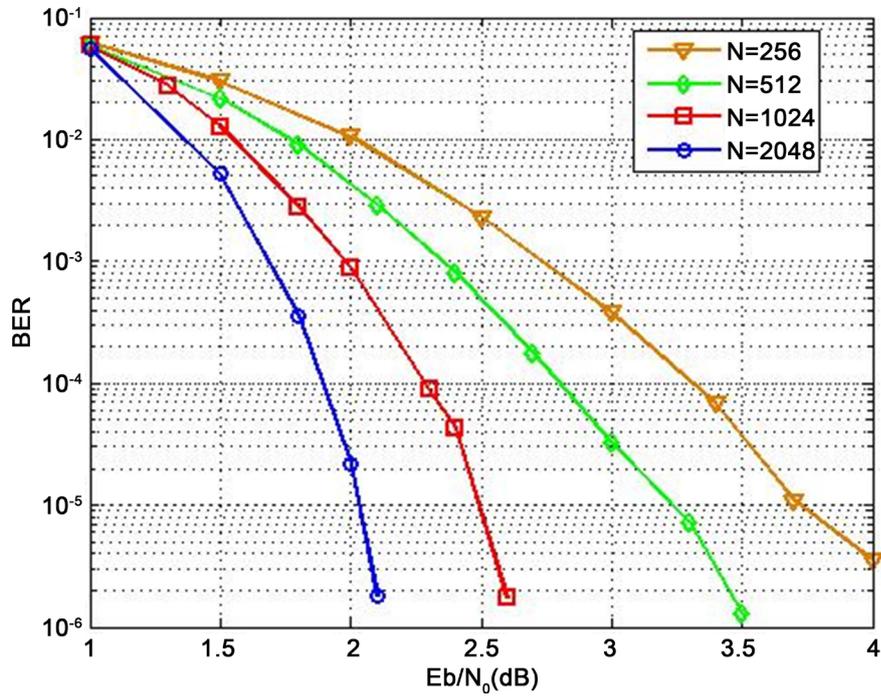


Figure 3. The compare of difference frame

图 3. 不同帧长的性能比较

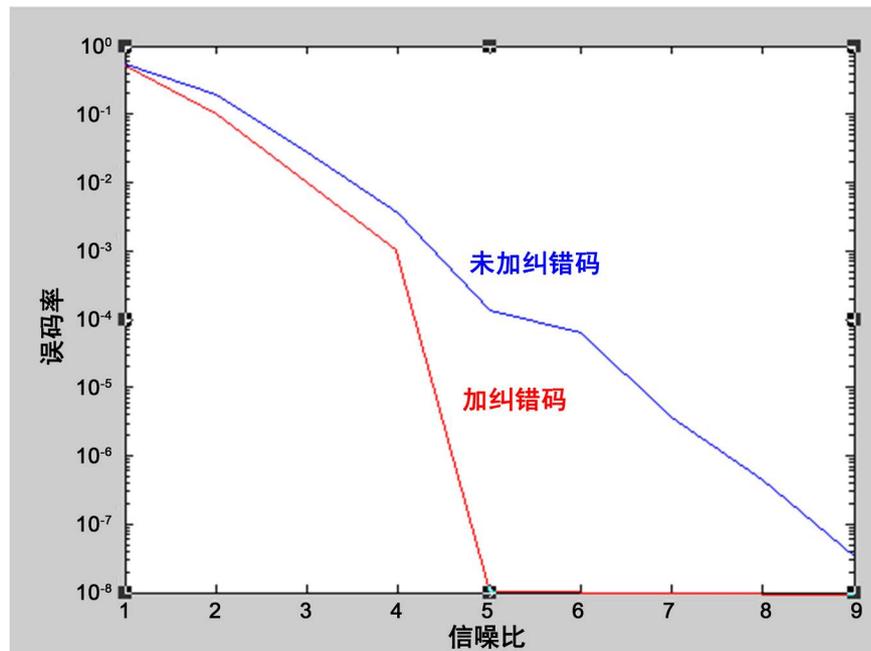


Figure 4. The error-code-rate between encoding and nun encoding

图 4. 未加 RS 码与增加 RS 码误码率对比图

### 5. 结论

本文分析了大气湍流对激光通信的影响，并分析了儿种常用的纠错码码型，重点分析了 RS 码的编码与解码过程，并在此基础上设计了一套无线激光通信端机，采用 RS (255.239)码型，在误码率小于  $10^{-4}$

时基本上可以把误码全部纠错,使误码率达到 0。通过对实际的试验表明了 RS 码可以有效降低通信误码率。

## 参考文献

- [1] 饶瑞中. 光在湍流大气中的传输[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2005.
- [2] 强世锦, 荣健. 基于无线激光通信仿真系统的纠错码性能比较[J]. 光通信研究, 2008(3): 17-18.
- [3] 何晓垒, 熊汉林, 雷利娟. 基于无线激光通信系统的 FEC 应用研究[J]. 信息通信, 2010(4): 36-38.
- [4] 张吾进, 毛倩. 基于 Turbo 码的纠错加密联合编码方案[J]. 无线电通信技术, 2012, 38(5): 29-32.
- [5] 高雨明, 费强. 前向纠错码技术分析及其应用[J]. 邮电设计技术, 2010(9): 63-66.
- [6] 徐建武, 王红星, 胡昊. Turbo 乘积码技术及其性能研究[J]. 现代电子技术, 2008(15): 21-26.
- [7] 雷婷, 张建志. LDPC 编译码算法分析[J]. 无线电工程, 2012, 42(10): 8-10.
- [8] 贾科军, 柯熙政, 彭铎, 陈海燕. 无线激光通信系统中  $\pi$  旋转 LDPC 码的设计与性能分析[J]. 兰州理工大学学报, 2008, 34(4): 109-103.
- [9] 赵旻, 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(2): 49-52.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5450, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [oe@hanspub.org](mailto:oe@hanspub.org)