

CRC 交织级联编码在 QPSK 通信系统中的应用研究

王晓玲

(苏州大学 电子信息学院, 江苏 苏州 215006)

摘 要: 主要研究循环冗余校验码(CRC)交织级联编码在正交相移键控(QPSK)通信系统的应用. 首先完成了基于 MATLAB/Simulink 的 QPSK 通信系统的仿真设计, 然后在 QPSK 系统中采用 CRC 进行信道编码, 通过测试发现, 系统接收和发送的信号波形一致, 说明系统仿真设计合理有效. 进一步将 CRC 编码和交织编码进行级联应用到 QPSK 系统. 对比误码率数据发现, CRC 编码能够有效降低系统误码率、改善系统的性能, 编码增益能达到 3 dB, 级联编码较 CRC 编码性能有进一步提高. 这给出了通信系统仿真设计的一种新方法, 为实验教学提供一种新思路.

关键词: CRC; 交织; QPSK; 误码率

中图分类号: TN935.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2018)05-0084-05

Research for Concatenation of CRC and Interleaver in QPSK Transmission System

WANG Xiao-ling

(School of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: We mainly make researches for CRC and interleaver in QPSK transmission system. We firstly design a QPSK transmission system based on MATLAB/Simulink platform, then CRC coding is applied in the QPSK transmission system. After debugging and testing, the received waveforms are consistent with the transmitted waveforms, which can indicate that the system design is effective. Further, we make concatenation CRC and Interleaver in QPSK system. According to data comparison, it can be concluded that CRC can decrease the symbol error rate and improve system reliability performance, up to 3 dB of the signal to noise ratio gain can be achieved. Concatenation coding can make a further performance improvement. This researches can give a new method for simulation design of communication system, and provides a new idea for experimental teaching.

Key words: CRC; interleaver; QPSK; symbol error rate

1 引言

在信息传送中, 信道编码是一种非常有效的能够提高信号传输稳定性的方式, 它在码元序列中增加一些监督位, 这些监督位可以去发现传输过程中产生的错误并且能够纠正这些错误, 提高系统误码率的代价就是带宽增大^[1-2]. 循环冗余校验码(Cyclical Redundancy Check, CRC)是保证通信系统数据传输的可靠性而广泛采用的信道编码技术, 在计算机网络中工作在数据链路层^[3-4]. CRC 码是线性分

组码中最重要的一个子类, 它具有编码简单、易于实现、检错能力强等优点. 交织编码是解决突发错误的一种技术, 通过交织可以将传输过程中产生的连续错误分散, 将 CRC 编码和交织编码结合在一起, 不但能解决随机性错误, 还能解决突发性错误^[5].

正交相移键控(Quadrature Phase Shift Key, QPSK)是一种频谱利用率高、抗干扰能力强、电路简单的数字调制方式, 被广泛应用于解决 QPSK 通信系统的可靠性问题^[6], 本文主要研究 CRC 交织级联编码在 QPSK 通信系统中仿真的新方法.

收稿日期: 2017-08-03; **修回日期:** 2017-09-12

基金项目: 苏州大学“十三五”省品牌专业培育项目(5831501216)

2 CRC 编码原理及 QPSK 性能指标

循环码是一种以代数学理论为基础的线性分组码,码长为 n 的 CRC 码 $C(x)$ 是由 k 位的信息码 $M(x)$ 和 r 位的校验码 $r(x)$ 构成的,也就是在所要发送的 k 位数据后面增加 r 位的冗余码,虽然增大了数据传输开销,但却可以进行差错检测和纠正^[7]. 如何生成校验码是 CRC 编码的关键问题,将直接影响 CRC 编码的检错性能,通常采用多项式的方法来完成循环冗余校验过程. 如果选定的生成多项式为 $G(x)$,在发送端,校验码 $r(x)$ 是对 $M(x) \cdot x^r$ 进行 $G(x)$ 的多位模 2 除法得到的余式,发送的 CRC 码多项式为 $C(x) = M(x) \cdot x^r + r(x)$;在接收端,对接收码 $R(x)$ 进行 $G(x)$ 的多位模 2 除法,如果传输没有误码,则余数为 0,如果余数不为 0 则可以检查出传输过程的错误,值得一提的是余数为 0 并不代表无传输差错,在某些特殊情况下, CRC 编码会发生漏检情况^[8],根据原理分析,采用 CRC 编码的通信系统可以降低系统误码率,但不能实现无误码传输. 因此,生成多项式 $G(x)$ 对 CRC 编码至关重要,生成多项式应满足余数循环规律、任何一位比特发生错误都应使余数不为零等要求,目前推荐使用的标准生成多项式 $G(x)$ 有 CRC-8、CRC-16、CRC-CCITT 和 CRC-32 等.

交织是指先对经信道编码的信息序列重新排序,再将重新排序的信息序列调制发送;接收端对接收到的信息序列解交织后再信道译码. 这使信道的突发错误在时间上扩散,从而使译码器可将其视为随机错误处理^[9]. 常用的两种交织器有矩阵交织器 (Matrix Interleaver) 和卷积交织器 (Convolutional Interleaver),本文选用矩阵交织器. 如发送的数据

帧为 9 位, $A = (a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_6 \ a_7 \ a_8 \ a_9)$, 矩阵交织器按照行的形式读入矩阵,假设生成矩阵为 3 行 3 列,生成矩阵为

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & a_9 \end{bmatrix}$$

出信息 $A * = (a_1 \ a_4 \ a_7 \ a_2 \ a_5 \ a_8 \ a_3 \ a_6 \ a_9)$ 并发送到信道中进行传输. 假如传输过程发生突发错误: $a_2 \ a_5 \ a_8$ 错误地接收成 $b_2 \ b_5 \ b_8$, 即接收信息为 $A * _r = (a_1 \ a_4 \ a_7 \ b_2 \ b_5 \ b_8 \ a_3 \ a_6 \ a_9)$, 在接收端接收信息经过解交织,得到 $A_r = (a_1 \ b_2 \ a_3 \ a_4 \ b_5 \ a_6 \ a_7 \ b_8 \ a_9)$, 3 个连续的错误就被分散成 3 个随机错误,降低纠错编码纠错能力的要求,有助于进一步提高系统可靠性.

QPSK 调制解调是利用载波的四种不同相位差来表征输入的数字信息,是四进制相移键控,如四种载波相位分别为 $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$, 载波相位相互正交,因此 QPSK 属于正交振幅调制 (Quadrature Amplitude Modulation, QAM). QPSK 信号的产生方法有正交调相法和相位选择法,在接收端,由于 QPSK 信号可以看成是两个正交 2PSK 信号的叠加,所以用两路正交的载波进行相干解调,信号在传输过程中受到噪声或者多径效应影响会出现误码^[10-11]. QPSK 通信系统是采用 QPSK 调制解调的系统,系统框图如图 1(a) 所示,包括发送的二进制信号、QPSK 调制、信道、QPSK 解调和信号输出等模块. 为提高 QPSK 通信系统的传输可靠性,采用 CRC 编码系统框图如图 1(b) 所示,增加 CRC 编码和 CRC 解码两个模块;将 CRC 编码与交织编码进行级联的系统框图如图 1(c) 所示,增加交织和解交织两个模块.

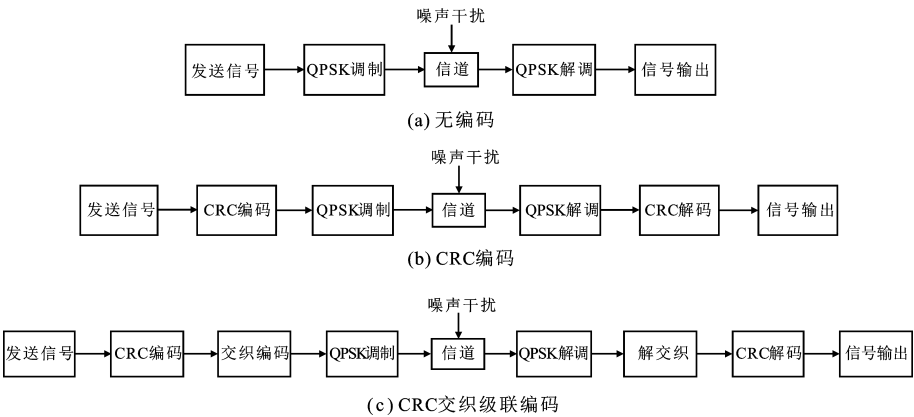


图 1 QPSK 通信系统框图

3 系统仿真设计

根据图 1 所示的 QPSK 通信系统框图,基于 MATLAB/Simulink 平台设计分别仿真设计无编码和 CRC 编码的 QPSK 通信系统模型^[12-13],本节重点阐述系统仿真设计.

3.1 无编码的 QPSK 系统

根据数字通信系统模型,得出 QPSK 调制解调的仿真模型如图 2 所示,包含二进制信号发生器模块、调制模块、信道模块、解调模块、错误率统计模块和显示模块.

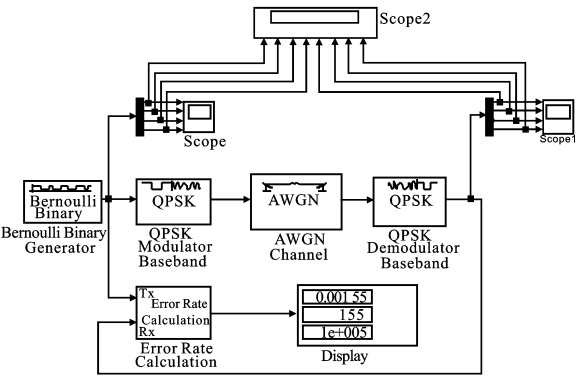


图 2 无编码的 QPSK 通信系统仿真模型
各模块具体设置如下. (1)贝努利二进制信号发生器(Bernoulli Binary Generator):该模块用来产

生随机二进制数 0 和 1,0 出现的概率(Probability of a zero)设置为 0.5,随机数种子(Initial seed)设置为 61,采样时间(Sample time)设置为 0.000 1,表示信息速率为 10 000 b/s,选择帧格式输出模式(Frame-based outputs),每帧抽样点(Sample per frame)为 4. (2)QPSK 调制模块(QPSK Modulator Baseband):输入数据类型(Input type)设置为 Integer,相位偏移角为 $\pi/4$,符号样本采用默认值. (3)信道模块(AWGN Channel):采用的是高斯白噪声信道,模式选择 Signal to noise ratio(SNR),信噪比的大小根据输入的 SNR 值决定,输入的信号功率为 1 W. (4)QPSK 解调模块(QPSK Demodulator Baseband):QPSK 解调模块与调制模块相对应,所以解调模块的参数设置和调制模块也是一样的. (5)错误率统计模块(Error Rate Calculation):接收时延和计算时延都设置为 0;计算模式选择为帧计算模式(Entire frame),其他采用默认值. (6)显示模块:Display 显示器用于显示错误统计模块的数据,Scope 示波器用于显示信号的波形.

3.2 CRC 编码的 QPSK 系统

采用 CRC 编码的 QPSK 调制解调仿真模型如图 3 所示,包括信号发生模块、CRC 编码模块、调制模块、信道模块、解调模块、CRC 解码模块、错误率统计模块和结果显示模块.

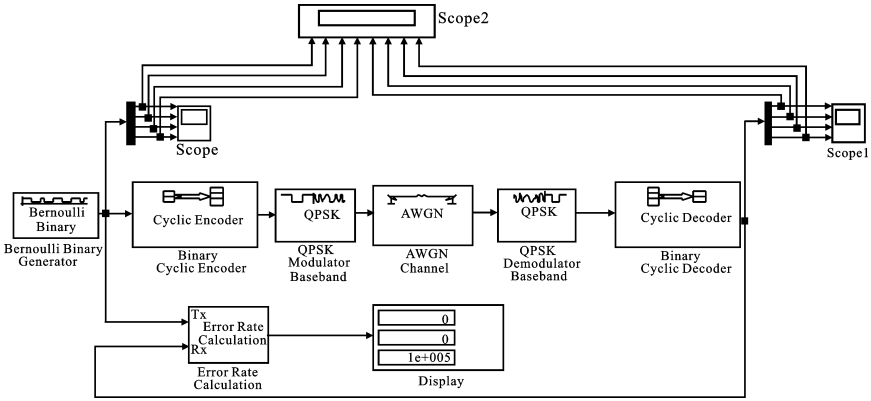


图 3 CRC 编码的 QPSK 通信系统仿真模型

本模型在无编码 QPSK 通信系统基础上增加 CRC 编码模块和 CRC 解码模块,编码解码模块的具体设置如下. (1)CRC 编码器(Binary Cyclic Encoder):设置码字长度为 7,表示编码过后输出信号的码字长度;其中信息位的长度设置为 4,也就说明校验位是 3 位. (2)解码模块(Binary Cyclic Decoder):CRC 解码模块和编码模块相对应,参数设置参考编码器参数,输出码组长度设为 7,信息位长度设

为 4. 其他模块功能和设置与无编码 QPSK 通信系统一致.

3.3 CRC 交织级联编码的 QPSK 系统

采用 CRC 交织级联编码的 QPSK 调制解调仿真模型如图 4 所示,包括信号发生模块、CRC 编码模块、交织模块、调制模块、信道模块、解调模块、解交织模块、CRC 解码模块、错误率统计模块和结果显示模块.

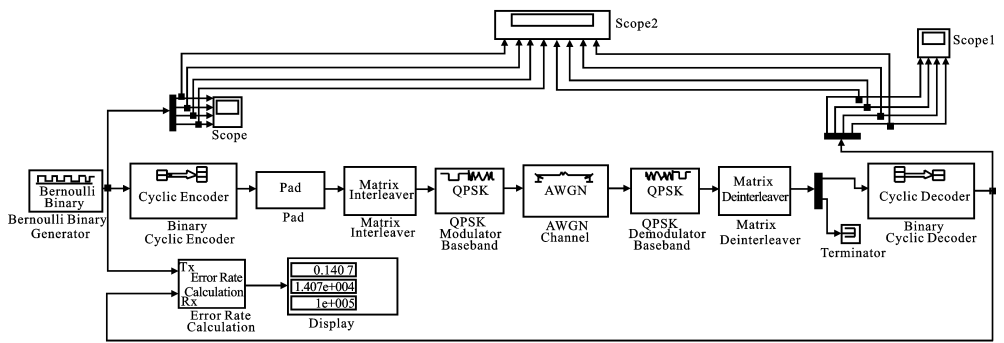


图 4 CRC 交织级联编码的 QPSK 通信系统仿真模型

本模型在 CRC 编码的 QPSK 通信系统基础上增加交织模块和解交织模块,交织模块包括填充器 Pad 和矩阵交织器(Matrix Interleaver),解交织模块包括矩阵解交织器(Matrix Deinterleaver)和分路器(Demux),具体设置如下. (1)填充器(Pad):功能是进行填充零操作,将 CRC 编码输出的 7 位信号通过补零成 8 位信号,即设置 Pad value 为 0,Cloumn size 为 8. (2)矩阵交织器(Matrix Interleaver):设置矩阵行和列分别为 2 和 4. (3)矩阵交织器(Matrix Interleaver):同样设孩子矩阵行和列分别为 2 和 4. (4)分路器(Demux):功能是将填充的 0 分离恢复出 7 位 CRC 编码信号送入 CRC 解码模块. 其他模块功能和设置与 CRC 编码 QPSK 通信系统一致.

4 结果分析

设置仿真时间为 10 s,分别运行图 2、图 3、图 4 所示的两个仿真模型,改变高斯白噪声信道的信噪

比,比较不同信噪比情况下的误码率. 由于 Bernoulli Binary Generator 的采样时间设置为 0.000 1,所以 10 s 传输的总码元数目为 100 000 个. 分别从波形观测和误码率对比两方面进行结果分析.

4.1 波形观测

图 5 所示为在信噪比为 10 时,QPSK 调制下循环码编码前后的波形对比,图 5(a)是编码前的信号波形即系统发送信号波形,图 5(b)是解码后的信号波形即系统接收信号波形,对比发送信号和接收信号的波形. 通过观察,两点波形一致,说明系统仿真设计合理有效,在此基础上进行数据分析具有有效性.

4.2 误码率分析

改变仿真模型中 AWGN Channel 的信道比 SNR,分别设置为 0~10,运行仿真模型,统计误码率如表 1 所示.

表 1 无编码和 CRC 编码的 QPSK 系统的误码率

S/N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
无编码	0.290 9	0.243 2	0.196 3	0.150 3	0.109 4	0.073 73	0.045 19	0.024 33	0.011 49	0.004 8	0.001 55
CRC	0.142 5	0.105 7	0.072 94	0.045 29	0.025 29	0.012 07	0.004 61	0.001 28	0.000 36	0.000 04	0
CRC 交织	0.140 73	0.104 85	0.072 43	0.044 49	0.023 73	0.011 25	0.004 12	0.001 18	0.0001 8	0	0

根据表 1 所示的数据结果绘制未编码、CRC 与 CRC 交织的 QPSK 通信系统的误码率数据图,如图 6 所示,图中 x 横坐标代表高斯白噪声信道的信噪比,纵坐标代表误码率,可以观察出在相同信噪比的环境下,CRC 编码过后误码率明显被改善,误码率在 10^{-3} 数量级编码增益大约为 3 dB,其代价为系统带宽增加,CRC 交织较 CRC 编码系统性略有提高,本研究说明交织技术在不增加系统带宽的情况下可以提高系统传输质量. 分析表 1 中的具体数据发现,信噪比大时采用 CRC 编码系统性能提升更明显. 由于本系统采用的是高斯白噪声信道,交织编码并未

对系统性能有大幅改善,交织技术对瑞利衰落信道、莱斯信道效果更佳^[12],今后可以做进一步研究.

5 结束语

为了完成 QPSK 通信系统的设计,在研究阶段引入计算机仿真技术,本文完成了基于 MATLAB/Simulink 的 QPSK 通信系统的仿真设计,并将 CRC 编码应用到 QPSK 系统中,通过观察发现,系统接收信号和发送信号的波形一致,说明系统仿真设计合理有效,在此基础上的数据分析具有有效性. 分析误码率数据结果发现,以带宽增大为代价的 CRC 编

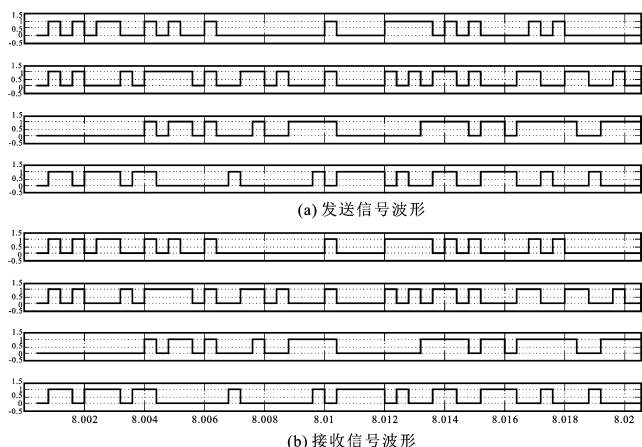


图5 在QPSK调制下循环冗余编码前后的信号波形对比

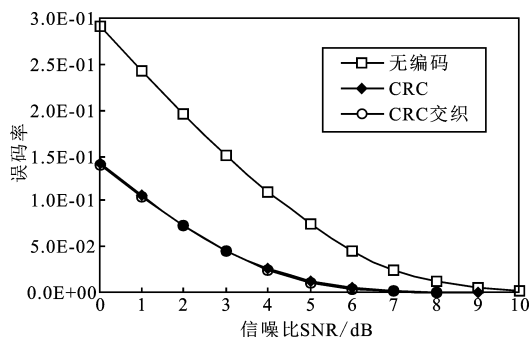


图6 无编码和CRC编码的QPSK系统的误码率

码能够有效降低系统误码率,改善系统的性能,增强传输的可靠性,误码率在 10^{-3} 数量级编码增益大约为3 dB,实验表明交织技术在不增加系统带宽的情况下提高传输质量.本文研究将CRC编码和交织编码级联应用到QPSK通信系统并进行结果分析得出结论,本文给出了通信系统仿真设计的一种新方法,并为实验教学提供一种新思路.

参考文献:

- [1] 樊昌信,曹丽娜. 通信原理[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [2] Moon T K. Error correction coding: mathematical methods and algorithms[M]. New York, NY, USA: Wiley-Interscience, 2005.

- [3] Tsimbalo E, Fafoutis X, Piechocki R J. CRC error correction in IoT applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017,13(1): 361-369.
- [4] Choo L C, Lei Z. CRC codes for short control frames in IEEE 802.11ah[C]//2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall). Vancouver, BC, 2014: 1-5.
- [5] 樊婷婷,杨维,许昌龙. 基于Polar码的BICM系统在AWGN信道中的性能[J]. 东南大学学报(自然科学版),2016,46(1):18-22.
- [6] 王永建,赵洪林,李明江. 相位噪声对QPSK系统性能的影响分析[J]. 南京航空航天大学学报,2010,55(1):68-71.
- [7] Kuvaja V. Identification of error correction codes in signals intelligence [D]. Espoo, Finland: Aalto Univ, 2015.
- [8] El-Khamy M, Lee J, Kang I. Detection analysis of CRC-assisted decoding[J]. IEEE communications letters, 2015,19(3):483-486.
- [9] Mike J. Classification of error correcting codes and estimation of interleaver parameters in a noisy transmission environment[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2017,33(99):1-16.
- [10] Yang F, Zhang W, Peng L. Research on BER of QPSK signal using APD statistical method[C]//2013 5th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. Chengdu, 2013:559-562.
- [11] Pires J J P, Cancela L G C. Investigating the impact of coherent multipath interference on optical QPSK systems[C]// 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC), Paris, France, 2017: 1-6.
- [12] 应鹏魁,吴乐南. RS编码的EBPSK调制解调器性能仿真[J]. 系统仿真学报,2012,24(11):2404-2409.
- [13] 李冬霞,叶倩文. 循环冗余码仿真实验系统设计[J]. 武汉大学学报(理学版),2012,58(sup2):228-232.

作者简介:

王晓玲 女,(1981-),硕士,副教授.研究方向为计算机通信技术、光网络通信. E-mail:wangxl2012@suda.edu.cn.