

基于有效信噪比的自动重传请求协议性能比较

余作奔,岑 岗,舒向宁,项阳阳,杨 昉,吴茗蔚

(浙江科技学院 信息与电子工程学院,杭州 310023)

摘 要: 对自动重传请求协议(ARQ)系统的重传能量进行分析,提出一个新概念——有效信噪比。以有效信噪比为基准,比较了 3 种校验码对 ARQ 系统误比特率、重传次数、吞吐量性能的影响。仿真结果表明,ARQ 系统的可靠性仅在中高传统信噪比下得到提高。在低传统信噪比下,重传导致 ARQ 系统实际的有效信噪比远大于无重传系统;在相同有效信噪比下,ARQ 系统的误比特率性能劣于无重传系统,此时不应使用 ARQ。混合 ARQ (HARQ)通过纠错码降低系统重传频率,可有效缓解该问题。

关键词: 有效信噪比;自动重传请求协议(ARQ);校验码;吞吐量

中图分类号: TN761.92

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2016)05-0361-06

Performance comparison of ARQ based on effective SNR

YU Zuoben, CEN Gang, SHU Xiangning, XIANG Yangyang,

YANG Fang, WU Mingwei

(School of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University of Science and Technology,
Hangzhou 310023, China)

Abstract: Retransmission energy of automatic repeat request(ARQ) is analyzed and the new concept of effective signal-noise ratio(SNR) is proposed. Based on the effective SNR, the accepted bit error probability(BEP), number of retransmissions and throughput of ARQ systems with three different channel codes are analyzed and compared. Simulation results show that the BEP is only improved by ARQ at high conventional SNR. At low conventional SNR, ARQ incurs more energy consumption due to retransmissions, resulting in an effective SNR higher than the retransmissionless system; at the same effective SNR, ARQ performs worse than the retransmissionless system. Therefore, ARQ should not be used at low conventional

收稿日期: 2016-07-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(61302112,61571316);浙江省“钱江人才计划”D类项目(QJD1402023);教育部留学回国人员科研启动基金项目(教外司留(2013)1792号);浙江科技学院“科大青年英才”项目(浙科院人(2014)9号);浙江科技学院大学生课外科技创新与实践项目(春萌计划)(浙科院团(2015)2号)

作者简介: 余作奔(1991—),男,浙江省温州人,硕士研究生,研究方向为车载通信。

通信作者: 岑 岗,教授,主要从事信息化教学与项目教学研究。

SNR. Using error correction code, hybrid ARQ (HARQ) lowers the number of retransmissions and alleviates this problem.

Keywords: effective signal-noise ratio (SNR); automatic repeat request (ARQ); check code; throughput

近年快速发展的信息通信行业,随着用户数量的急剧增加及通信网络规模的快速扩张等因素而消耗大量能源。据 Gartner 的调查显示,信息通信产业已成为全球第五大能耗产业^[1]。因此,绿色通信是信息通信行业的重要发展方向。

数据传输系统中常用的差错控制技术有前向差错控制(FEC)技术与自动重传请求(ARQ)技术。这两种技术的组合被称为混合 ARQ (HARQ)^{[2]777}。ARQ 技术采用简单的重传机制来降低系统的差错率,每次重传都需相同能耗。当信道差错率较大时,系统重传必然过于频繁,此时系统能耗将随重传次数增加而快速增加。传统信噪比是接收端输入处的单位比特能量与噪声功率谱密度的比值。该定义虽反映出系统的能耗要求但未体现系统的重传能耗。因此,在分析 ARQ 系统性能时使用传统信噪比不符合绿色通信的节能理念。

在分析 ARQ 系统的可靠性时,文献[2-8]都未考虑系统的重传能耗。文献[9]定义能效为能耗吞吐量与码字被正确接收的概率的乘积,其中能耗吞吐量为码字中负载的能耗与总能耗的比值。文献[10]基于能效的定义得出 ARQ 系统的能效与最大重传次数无关。虽然能效同时考虑了系统的能耗与可靠性,但未表明信噪比与可靠性的关系。本文提出一个新概念——有效信噪比,即接收端输入处的单位比特能量(考虑校验位与重传的开销)和噪声功率谱密度的比值。

本研究比较了循环冗余校验码(CRC)、单奇偶校验码及(24, 12) Golay code^{[2]84}(以下简称格雷码)在加性高斯白噪声(AWGN)信道和瑞利衰落信道下对 ARQ 系统性能的影响。仿真结果表明,只有在中高传统信噪比下,ARQ 系统的可靠性才得到提升,而在低传统信噪比下应使用 HARQ。

1 系统模型

ARQ 有 3 种基本类型:停等式 ARQ,退 N 步 ARQ 及选择重传 ARQ。在停等式 ARQ 系统中,发送端发送一个码字而后等待接收端应答。若是肯定应答(ACK),则发送下一码字;若是否定应答(NAK),则重传该码字。而在退 N 步 ARQ 系统中,发送端连续发送码字,不必等待接收端的应答。当收到 NAK 时,发送端退回到 NAK 所对应的码字并重传该码字及其后所有已发码字。选择重传 ARQ 系统中的码字也是连续发送,但发送端仅重传与 NAK 相对应的码字。本研究以选择重传 ARQ 为例来仿真和分析 ARQ 系统的性能。

图 1 为 ARQ 系统框图。信源输出二进制信息序列,该序列被分成长度为 k 的消息分组而后根据一定的编码规则转换成码长为 n 的码字,这里 $n > k$ 。码字经调制、信道传输与解调后到达接收端。接收端计算接收码字的校正子。如果校正子为零,则通过反馈信道回应一个 ACK 并接收该码字;如果校正子不为零,则回应一个 NAK 通知发送端重传该码字。重传持续到该码字被成功接收或次数达到上限为止。

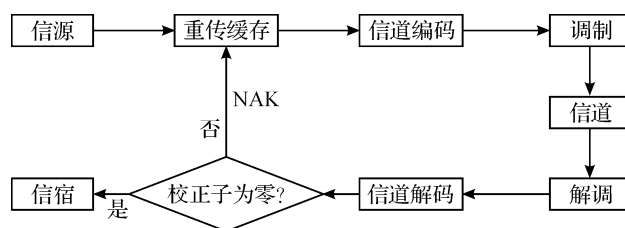


图 1 ARQ 系统框图

Fig. 1 ARQ system diagram

2 有效信噪比的定义及分析

令 L 表示 ARQ 系统成功接收一个码字所需传输次数,则 $E[L]$ 为成功接收一个码字所需平均传输次数,定义为发送端发送码字的总次数与接收端接收码字的总次数的比值。设一个码字被接收端成功接收的概率为 P 。当不设定重传次数的上限时,成功接收一个码字所需平均传输次数为^{[2]767}:

$$E[L] = P + 2P(1-P) + 3P(1-P)^2 + \cdots + lP(1-P)^{l-1} + \cdots = \frac{1}{P}。 \quad (1)$$

由式(1)可知,平均传输次数 $E[L]$ 与接收概率 P 成反比。当重传次数的上限为 M 时:

$$E[L] = \frac{P + 2P(1-P) + 3P(1-P)^2 + \cdots + MP(1-P)^{M-1} + M[P(1-P)^M + P(1-P)^{M+1} + \cdots]}{P + P(1-P) + P(1-P)^2 + P(1-P)^3 + \cdots + P(1-P)^{M-1}} = \frac{\frac{1 - (1-P)^M}{P} - M(1-P)^M + M(1-P)^M}{1 - (1-P)^M} = \frac{1}{P}。 \quad (2)$$

从式(2)中可以看出,系统成功接收一个码字所需的平均传输次数与重传次数的上限 M 无关,仅与接收概率 P 有关。根据仿真实验显示,系统的平均传输次数远小于 1 000。为使仿真结果更具对比性——码字经过重传都能被接收端接收。因此,本研究在仿真时设定重传次数的上限 M 为 1 000。

AWGN 信道^{[2]11} 和瑞利衰落信道^[5] 下传统信噪比分别为:

$$\gamma = \frac{E_b}{N_0}, \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{2\sigma^2 E_b}{N_0}。 \quad (4)$$

式中: E_b 为发送端输出处的单位比特能量; $N_0/2$ 为噪声的双边功率谱密度; σ^2 为方差。由于传输一次 n 比特码字需 nE_b 能量,该码字含有 k 比特信息,考虑到校验位的开销,则传输一比特信息平均需 nE_b/k 单位比特能量。以此为背景,引入有效信噪比:

$$\gamma_e = \frac{n}{k} E[L] \gamma = \frac{n}{kP} \gamma。 \quad (5)$$

有效信噪比不仅考虑了校验位的开销而且还考虑了重传的开销。因此,相比于传统信噪比,有效信噪比更真实地反映了为达到给定误比特率所需的实际能耗情况,也更符合绿色通信的节能理念。

3 仿真结果的对比分析

现对前面所述的选择重传 ARQ 系统进行仿真,并根据仿真结果进行对比分析。系统采用二进制相移键控(BPSK)与相干解调。仿真实验选用的校验码为: CRC-4、单奇偶校验码及格雷码。为方便表述,当 ARQ 系统的校验码为 CRC-4、单奇偶校验码及格雷码时,分别简称: CRC-4 系统、单奇偶校验码系统及格雷码系统。需要说明的是,格雷码的信息位长度已确定($k=12$),为使 3 种校验码的仿真结果具有可比性,仿真时令 $k=12$ 。

3.1 误比特率

3.1.1 ARQ

图 2 显示了 AWGN 信道下 CRC-4 系统的误比特率和平均传输次数性能。

当传统信噪比高于 4 dB 时,信道的误比特率低于 10^{-2} ,使得 CRC-4 检出差错的概率较小。此时系统的误比特率低于 3×10^{-5} 。如图 2(b) 所示,系统的平均传输次数很少并趋向于 1。由式(5)可知,此时有效信噪比与传统信噪比的比值约为 n/k 。因此,基于有效信噪比的误比特率曲线右移幅度不明显并平行于传统信噪比下的误比特率曲线。此时 CRC-4 系统性能优于无重传系统。

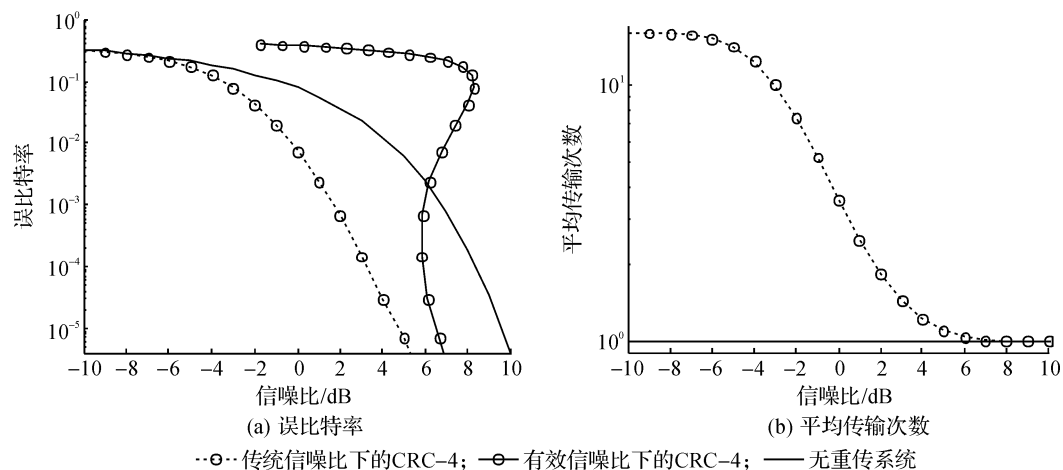


图 2 AWGN 信道下 CRC-4 系统的性能

Fig. 2 Performance of ARQ with CRC-4 over AWGN channel

当传统信噪比低于 -5 dB 时,信道的误比特率高于 2×10^{-1} ,使得 CRC-4 能检出较多差错模式。此时系统的平均传输次数约为 16 次,因而基于有效信噪比的误比特率曲线右移幅度较大。从图 2(a) 中可以发现,以传统信噪比为准比较时,CRC-4 系统与无重传系统的误比特率几乎相同,然而 CRC-4 系统需大量重传能耗。因此,可说明 ARQ 系统的可靠性只有在中高传统信噪比下才能得到提高。在低传统信噪比下,系统重传过于频繁所需能耗远大于无重传系统且可靠性较低,此时不应使用 ARQ。

值得关注的是,在 $-5 < \gamma < 5$ dB 范围内,随着传统信噪比的增加,CRC-4 系统的平均传输次数快速减小,系统的误比特率曲线右移幅度快速变慢并呈反 S 形。在 $5.8 < \gamma_e < 8$ dB 范围内,CRC-4 系统的有效信噪比与误比特率不是单映射。因此,当有效信噪比固定时,可选择较高的传统信噪比来降低系统误比特率与重传次数。

如图 3 所示,单奇偶校验码系统也有上述相似特性。相对 CRC-4 而言,单奇偶校验码的检错能力较差,有效信噪比下的误比特率曲线无反 S 形。

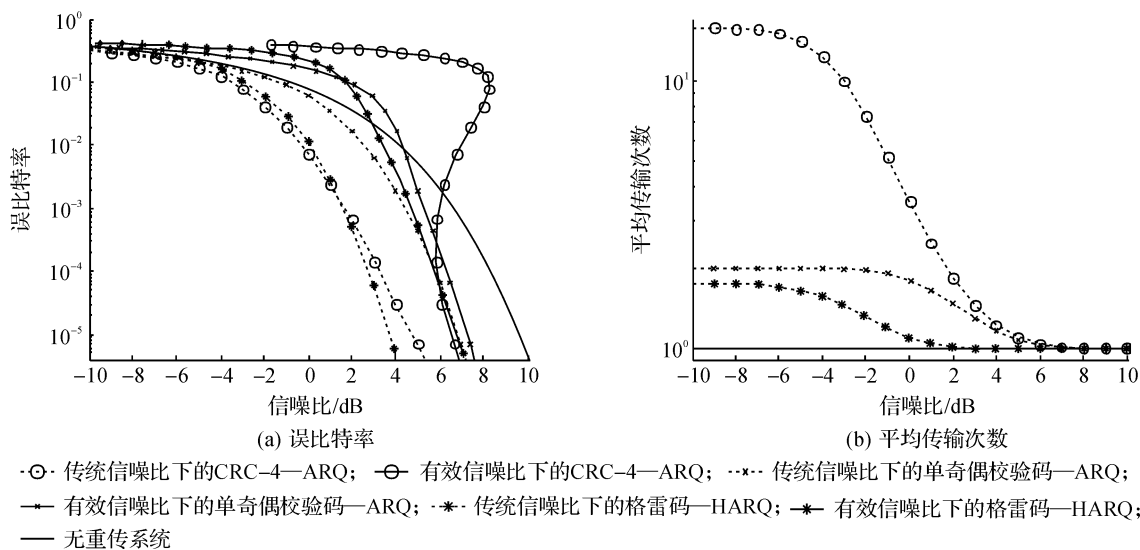


图 3 AWGN 信道下 CRC-4,单奇偶校验码及格雷码系统的性能

Fig. 3 Performance of ARQ with CRC-4, parity check code and Golay code over AWGN channel

3.1.2 HARQ

格雷码是一种纠错码,该码能检出绝大多数差错模式并纠正所有含 4 个或更少错误的差错模式。从纠错的意义上来说,格雷码系统是一个 HARQ 系统。在格雷码系统中,接收端接收到码字后先予以纠正,

未能纠正才请求重传。因此,令 $P_d + P_{co} + P_{no} = 1$ 。其中 P_d 为检出差错的概率(即请求重传的概率), P_{co} 为纠正差错的概率, P_{no} 为未能检出差错的概率,其中 $P_{no} \ll 1$ 。

图3比较了CRC-4、单奇偶校验码及格雷码系统的误比特率和平均传输次数性能。如图3(a)所示,在 $\gamma < 2$ dB 范围内,格雷码与CRC-4系统的误比特率相近。但以有效信噪比为基准比较时,格雷码系统的性能优于CRC-4系统。如图3(b)所示,格雷码系统的平均传输次数明显少于CRC-4系统,即 P_d 较小。由 $P_d + P_{co} + P_{no} = 1$ 可知, P_{co} 较大。因此可说明,格雷码具有很强的纠错能力并能有效减少系统的平均传输次数。

图4比较了瑞利衰落信道下CRC-4、单奇偶校验码及格雷码系统的误比特率与平均传输次数性能。由于瑞利衰落信道的信噪比等价于不同AWGN信道的平均信噪比,因而这3种校验码在瑞利衰落信道下所表现的性能与在AWGN信道下所表现的性能很相似。

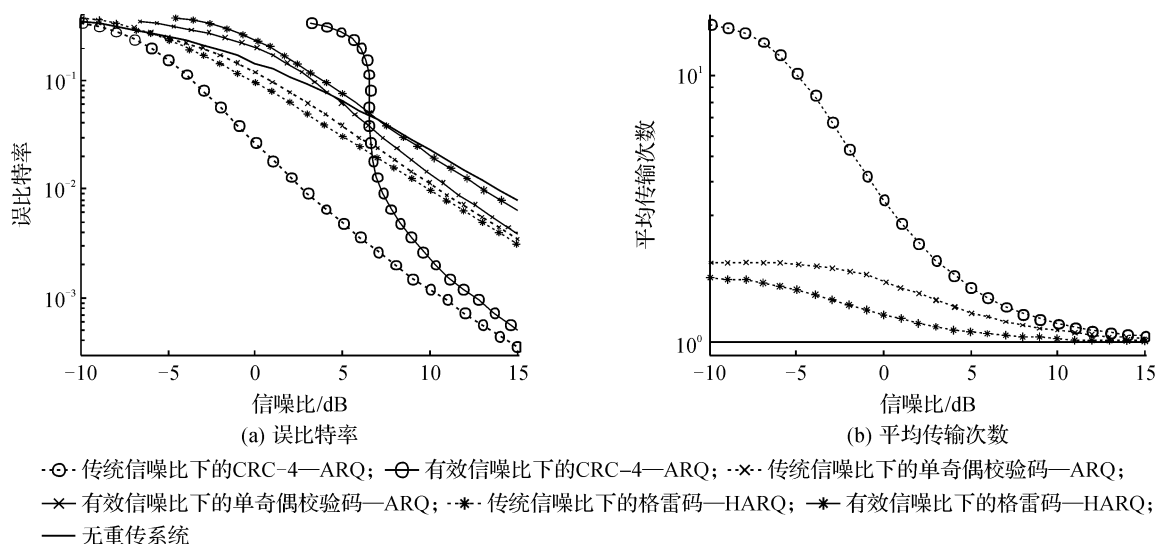


图4 瑞利衰落信道下CRC-4、单奇偶校验码及格雷码系统的性能

Fig. 4 Performance of ARQ with CRC-4, parity check code and Golay code over Rayleigh fading

3.2 吞吐量

图5比较了瑞利衰落信道下CRC-4系统与单奇偶校验码系统的吞吐量(throughput)与有效吞吐量(goodput)性能。吞吐量定义为单位时间内被成功接收的总信息比特数与单位时间内发送码字的总比特数的比值^{[2]767}。有效吞吐量定义为单位时间内被成功接收的总正确信息比特数与单位时间内发送码字的总比特数的比值。

如图5所示,当 $-5 < \gamma < 7$ dB 时,两系统的吞吐量与有效吞吐量都快速上升并趋于重合。若吞吐量的上升速度过快(如CRC-4系统的吞吐量),则有效信噪比下的误比特率曲线呈反S形;当 $\gamma < -10$ dB 时,CRC-4系统的吞吐量约为0.08,而有效吞吐量接近于零。较高的重传次数和误比特率便是较低的吞吐量与有效吞吐量的表现。在AWGN信道中,也有类似的特性。

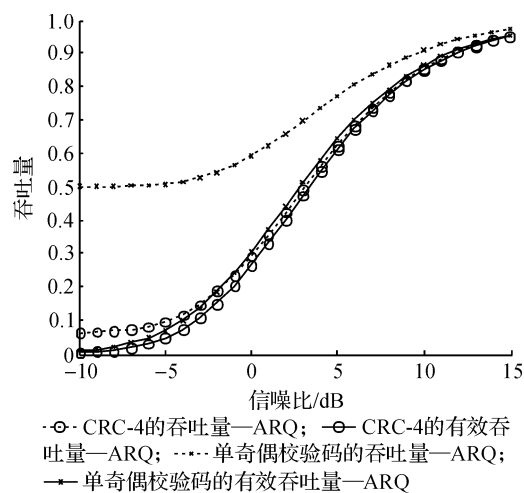


图5 瑞利衰落信道下CRC-4与单奇偶校验码系统的吞吐量性能

Fig. 5 Throughput performance of ARQ with CRC-4 and parity check code over Rayleigh fading

4 结 语

本研究分析并比较了两种 ARQ 系统及一种 HARQ 系统的性能。仿真结果表明,在中高传统信噪比下,ARQ 系统的可靠性相比无重传系统有所提高;但在低传统信噪比下,ARQ 系统所需能耗远大于无重传系统且可靠性较低,HARQ 通过纠错码能有效降低系统的重传频率,此时应使用 HARQ。

参考文献:

- [1] 朱近康,许莉. 绿色蜂窝网络的频谱效率与能效函数[J]. 通信学报, 2013,34(1): 1.
- [2] 林舒. 差错控制编码[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [3] MAI V V, PHAM A T. Cross-layer designs and analysis of adaptive-rate transmission and ARQ for free-space optical communications [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(1): 1.
- [4] PARTHASARATHY S, KIRSTAEDTER A, GIGGENBACH D. Simulative performance analysis of ARQ schemes for free-space optical inter-HAP channel model [C]// Proceedings of IEEE Photonic Networks. [S. l.]: IEEE, 2015: 1.
- [5] WU M W, KAM P Y. ARQ with channel gain monitoring [J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(11): 3344.
- [6] 龚天富,徐开来,刘洪,等. ARQ 通信系统的性能优化与帧长度的动态选择[J]. 计算机应用,1994(3):24.
- [7] 王单,王新梅. 基于 II 型 H-APQ 系统速率可变低密度校验码的设计与研究[J]. 通信学报,2006,27(1):59.
- [8] 薛英健,项海格. 低密度校验码编码系统混合 ARQ 协议设计[J]. 北京大学学报(自然科学版),2004,40(3):361.
- [9] SANKARASUBRAMANIAM Y, AKYILDIZ I F, MCHUGHLIN S W. Energy efficiency based packet size optimization in wireless sensor networks [C]// Proceedings of IEEE Internal Workshop on Sensor Network Protocols and Applications. [S. l.]:IEEE, 2003: 1.
- [10] 田真,袁东风,梁泉泉. 无线传感器网络差错控制技术的能效分析[J]. 通信学报, 2008,29(11): 77.