

多进制LDPC码混合重传联合设计与性能分析

王 政, 匡镜明, 费泽松, 王 华

(北京理工大学信息科学技术学院 北京 海淀区 100081)

【摘要】以下一代数字卫星战术数据链通信系统为背景,研究了低复杂度、简单实用多进制低密度校验(LDPC)码与混合自动请求重传(HARQ)技术的联合优化,并且与传统的二进制LDPC码HARQ方案进行了误帧率和吞吐量性能比较。基于C++的链路级仿真结果表明,多进制LDPC码HARQ技术能提供明显的性能改善,尤其是包含并和部分增益型HARQ。此外,多进制LDPC码HARQ在复杂度增加不大的情况下,可提供比二进制LDPC码HARQ更可观的性能增益。

关键词 混合重传; 低密度校验码; 卫星通信; 数据链
中图分类号 TN929.5 **文献标识码** A

Joint Design and Performance Analysis of Non-Binary LDPC Coded Hybrid ARQ

WANG Zheng, KUANG Jing-ming, FEI Ze-song, WANG Hua

(School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology Haidian Beijing 100081)

Abstract Joint design of non-binary Low Density Parity Check (LDPC) code and Hybrid Automatic Repeat Quest (HARQ) is presented for potential application in future satellite tactical data link system. The and performance comparison is evaluated with binary LDPC coded HARQ scheme in term of frame error rate and throughput. Link level simulation results using C++ show that non-binary LDPC code can be integrated into HARQ protocol successful with significant performance gain, especially for chase combining and partial incremental redundancy schemes. Furthermore, non-binary LDPC coded HARQ outperforms the binary one substantially with reasonable complexity increase.

Key words hybrid automatic repeat request; low density parity check code; satellite communication; tactical data link

数据链作为结合通信、指挥和控制功能于一体的技术手段在现代高技术战争中发挥着越来越重要的作用,是实现高速、准确和全方位打击的必要条件。目前大多数数据链的无线链路均采用UHF和HF频段,尽管HF频段可以实现超视距传输,但与卫星通信具有的成本与通信距离无关、通信质量好的特点相比,发展基于卫星载体的卫星数据链受到世界各国的广泛青睐。英国皇家海军在20世纪90年代初期已经开始了卫星数据链的可行性研究,利用卫星通信载体承载Link 16和Link 11数据链,并形成装备。随着卫星通信技术的快速发展,以及现代军事战争对高速图像和数据传输需求的日益增长,对卫星数据链能够承载的业务速率和业务质量提出了更高的要求。目前的数据链基本上以检错码、RS码和交织码为主要的差错控制技术,难以满足下一代卫星数据链对传输质量的要求。而在第二代的欧洲的数字视频广播标准DVB-S2

中^[1]采纳了低密度校验(Low Density Parity Check, LDPC)码为纠错编码方案,显著改善了业务传输质量和系统容量。

二进制LDPC码采用置信传播(Belief Propagation, BP)译码算法,可以得到接近香农限的性能^[2]。文献[2]将和积译码算法(SPA)推广到多进制LDPC码,仿真结果表明,多进制LDPC码的性能要优于二进制LDPC码^[3]。对于给定的译码器,当校验矩阵 H 的列重足够大、码长充分长时,LDPC码的性能可接近香农限。但是,列重增加的同时,会造成二分图中短环数目的增加,从而导致译码性能的下降。由于多进制LDPC码中的非零元素不止一个,可有效降低短环出现的概率,改善译码性能。

本文将多进制LDPC码与混合自动请求重传(Hybrid Automatic Repeat-Quest, HARQ)技术相结合,进一步提高了传输质量,可作为下一代卫星数据链链

路传输的候选方案。

1 HARQ原理

在现代数字通信系统中,为了保证信息在信道中可靠、有效地传输,通常要采用差错控制技术。差错控制方法一般分为两类,即自动重复请求(Automatic Repeat Quest, ARQ)和前向纠错(Forward Error Correction, FEC)技术。

FEC技术的优点是只需要一个前向信道,系统的传输效率高、传输时延小;缺点是当译码错误时,错误的信息也送给了用户。为了获得高可靠性,必须使用长码和纠错能力强的码字,这使得编、译码电路的复杂度提高。ARQ技术的算法简单,可靠性高,但必须设置一个反向信道,并且当信道质量较差时,由于经常处于重传状态而导致传输效率降低。

HARQ可看成是在ARQ中引入一个FEC子系统,发送端发送的码字不仅能够检错,而且还具有一定的纠错能力。接收端收到编码的码字后,首先进行纠错,如果在纠错能力范围之内,则自动纠错;如果超过了码的纠错能力,但能检测出来,则接收端反馈给发送端一个NACK信号,要求重传。此过程一直持续到该码字被正确接收或达到最大重传次数。HARQ可根据信道环境灵活地调整有效编码效率,还可补偿由于采用自适应调制编码所带来的误码,是高速数据传输的基础技术之一^[4-6]。

2 多进制LDPC编译码原理

和二进制LDPC码类似,多进制LDPC编码的关键在于校验矩阵的构造。所谓多进制是指信息比特和码字都是定义在 $GF(q, q>2)$ 域上,遵从多进制域的运算准则。多进制LDPC码的双边图与二进制LDPC码的不同之处在于其变量点有 q 个可能取值,校验点的约束比二进制更复杂。

多进制LDPC编码的一个可选方法是用已构造的二进制校验矩阵,将矩阵中的非零元素随机地用 $GF(q)$ 域中的非零元素代替,该方法简单方便,但性能上不是最优的;其他的优化方法包括使校验矩阵边缘熵最大化方法和多进制PEG算法^[7-9]。

多进制LDPC码在 $GF(q)$ 上的SPA译码方法,其复杂度与 q^2 成正比,而采用傅里叶变换译码法在不降低译码性能的情况下可明显减少计算的复杂度^[7],本文采用的是FFT译码算法。

3 多进制LDPC码混合ARQ方案

本文在二进制LDPC码HARQ的基础上^[10],设计

了三种多进制LDPC码HARQ方案:

(1) Type I: 思想来源于3GPP TR 25.385^[7]定义的HARQ类型1。传送的码字先进行信道编译码,如果能够正确译码,则向发送端发送ACK信号,如果不能正确译码(多进制LDPC码和二进制LDPC码一样可以自检错),则向发送端发送重传请求信号NACK。然后发送端发送跟初始传送一样的信号,接收端仅通过重新接收的信号进行译码,初始传送出错的信号被丢弃。

(2) 包含并方案(Chase Combining, CC): 和I型类似,不同的是,出错的分组不被丢弃,重传和初始出错的码字进行软合并后进行译码,多进制LDPC码的软合并采用比特级对数似然比合并算法。

(3) 部分增量型(Partial Incremental Redundancy, PIR): 本文采用的LDPC码PIR方案不同于传统算法,本质上是一种部分CC重传方案,即将编码后的码字分成等长的等份 i (如 $i=4$),每份长度为 T 。当需要重传时,依次从第一等份开始重传,每次重传的码字并不相同,重传的码字和错误接收的码字进行软合并。

HARQ的性能主要用误帧率(Frame Error Rate, FER) F_{FER} 和归一化吞吐量两个指标来评价,其中归一化吞吐量的计算公式为:

$$\eta = \frac{K(1-F_{FER})}{\sum_{i=0}^L N_{trans,i}} = \frac{K(1-F_{FER})}{N + TN_{Avg.Repeat}} \quad (1)$$

式中 T 为每次重传得序列长度; K 表示信息序列长度; $N_{trans,i}$ 为码长; $N_{Avg.Repeat}$ 是平均重传次数。

4 仿真结果分析

4.1 三种HARQ方案的性能比较

本文根据多进制LDPC码联合HARQ方案,搭建了基于C++的链路仿真平台,并对其性能进行了仿真分析。

图1所示为码长400、码率0.25、二进制与八进制LDPC码联合HARQ误帧率。图1的结果表明不论二进制还是多进制LDPC码HARQ的FER性能总是优于非重传方式。随着重传次数的增加,FER性能在不断提高,这是因为随着重传次数的增加,分集增益在不断增加。I型FER性能最差是因为该方案将出错的接收码字完全丢弃,只是通过重传来提高可靠性,事实上出错的接收码字仍然带有部分可用信息,可用来改善译码性能。CC就是在I型的基础上采用了包含并的措施,从而显著地提高了译码可靠性。CC的FER性能要好于PIR,这是由于CC重传的比特数要多于PIR。

由于I型没有对错误接收的码字中的信息进行充

分的利用, CC和PIR的吞吐量性能总是优于I型, 如图2所示。此外, 在低信噪比时CC的吞吐量要优于PIR; 而在高信噪比时, CC的吞吐量要劣于PIR。在低信噪比时, CC可提供更多的冗余比特, 有利于译码的成功, FER性能更好, 相应的吞吐量较高; 而在高信噪比时, 两者的FER性能相当, 不需要额外的冗余比特来参与译码, 也就是说CC提供的冗余信息在高信噪比时存在浪费。

从所需要的缓存大小上分析, I型方案没有将出错的码字保留, 一旦出错, 直接将其丢弃。该方案的接收端不需要缓存器, 仅需要在发射端存储整个码字。CC相比于I型仅仅是在接收端增加了对出错的码字进行存储的缓存器, 复杂度增加较少, 但是性能却得到了较大的提高, 因此CC在实际系统中较多被采纳; PIR的缓存器大小随着最大重传次数的增加而增大。在实际应用中, 最大重传次数、重传方案要根据具体的业务质量要求、信道环境进行综合考虑。

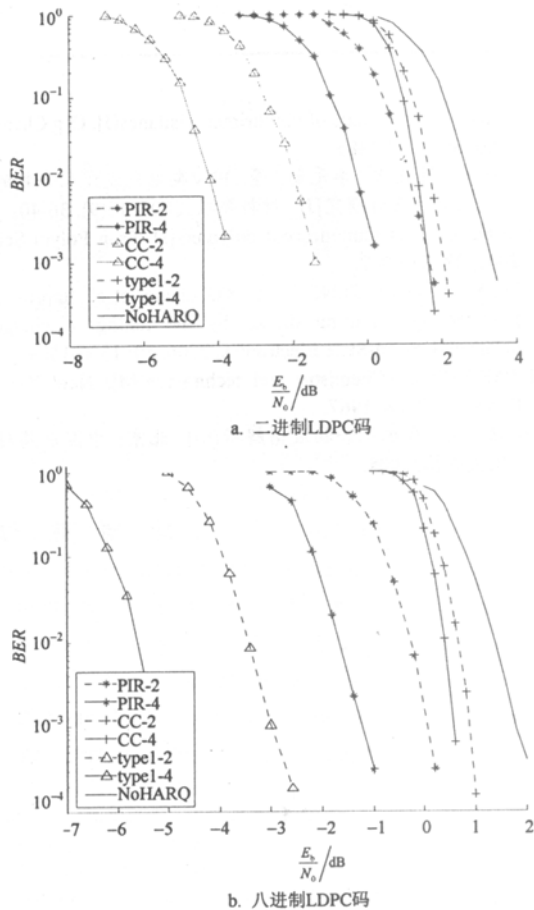


图1 码长400、码率0.25的二进制与八进制LDPC码联合HARQ误帧率

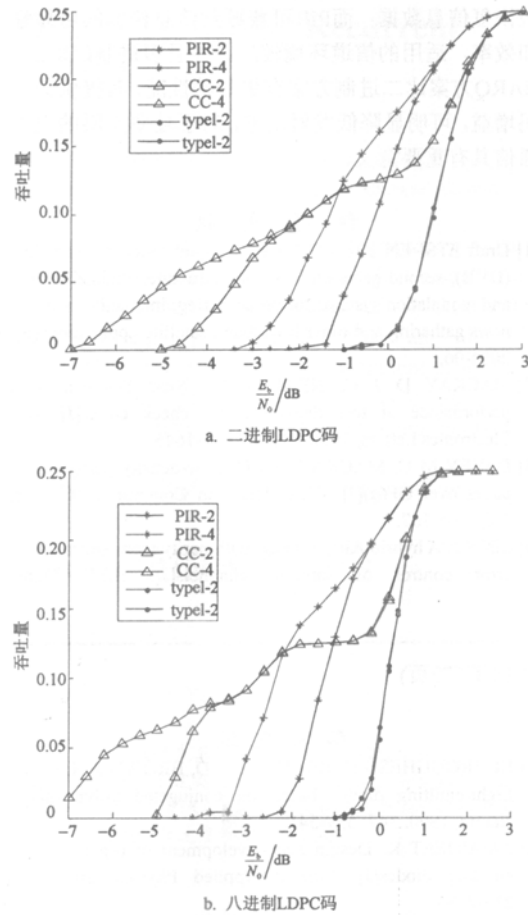


图2 码长400、码率0.25的二进制与八进制LDPC码联合HARQ吞吐量性能

4.2 多进制与二进制LDPC HARQ性能比较

作为比较, 本文对二进制LDPC码HARQ的性能进行了仿真。从图1a和图1b的对比来看, FER性能在 10^{-3} 时, 对于非重传方案, 多进制比二进制LDPC码有大约1.4 dB的编码增益; 在相同方案用相同最大重传次数时, 多进制HARQ比二进制也有大约1.5 dB的性能改善。比较图2a和图2b, 采用多进制LDPC码编码后, 其吞吐量性能要优于二进制LDPC码, 整体约有0.8 dB的增益, 两者性能曲线的趋势是一致的。

由此可见, 多进制LDPC码可像二进制LDPC码一样通过引入HARQ来提高信息传输的可靠性。

5 结论

本文根据多进制LDPC码的特点设计了简单实用的HARQ方案。仿真结果表明, CC和PIR方案带来的性能改善明显: CC可在信道质量较差的情况下有

效恢复信息数据;而PIR可兼顾到信息传输的可靠性和效率,适用的信道环境较广。并且多进制LDPC码 HARQ方案比二进制方案有更好的性能,其提供的编码增益,可明显降低发射功率,对于功率受限的卫星通信具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Draft ETSI EN 302 307 V1.1.1. Digital video broadcasting (DVB), second generation framing structure, channel coding and modulation systems for broadcasting, interactive services, news gathering and other broadband satellite applications[S]. 2004-06.
- [2] MACKAY D J C, NEAL R M. Near Shannon limit performance of low density parity check codes[J]. IEE Electronics Letters, 1996, 32(8): 1645-1646.
- [3] DAVEY M C, MACKAY D J C. Low-density parity check codes over GF(q)[J]. IEEE Trans on Commun Lett, 1998, 2(6): 165-167.
- [4] LIN S P. A hybrid ARQ scheme with parity retransmission for error control of satellite channels[J]. IEEE Trans.

- Communications, 1982, 30(7):1701-1719.
- [5] WANG Y M, LIN S. A modified selective -repeat Type-II hybrid ARQ system and its performance analysis[J]. IEEE Trans. Communications, 1983, 31(8): 593-607.
- [6] CHASE D. Code combining—A maximum likelihood decoding approach for combining an arbitrary number of noisy packets[J]. IEEE Trans. Communications, 1985, 33(5): 385-393.
- [7] 代凤艳, 王琳, 肖娟. 多进制(Q-ary)LDPC码的编译码原理[J]. 无线通信技术, 2004, (3): 1-4.
- [8] Mackay D. Good error correcting codes based on very sparse matrices[J]. IEEE Trans Information Theory, 1999, 3: 399-431.
- [9] LI Yong, WANG Lin, CHEN Jun-bin. The design and simulation of q-ary LDPC codes based on the PEG algorithm[C]//Proceedings of 2005 IST Mobile and Wireless Communications Summit. [S.l.]: [s.n.], 2005: 19-23.
- [10] 3GPP TR 25.385. Report on hybrid ARQ Type II/III (Release 200)[S]. 2005.

编辑 漆蓉

(上接第672页)

参 考 文 献

- [1] BURROUGHES J H, BRADLEY D D, BROWN A R, et al. Light-emitting diodes based on conjugated polymers[J]. Nature, 1990, 347: 539-541.
- [2] AMARJEET K. Design and development of organic light emitting diodes[J]. Current Applied Physics, 2003, 3: 215-218.
- [3] ZHANG C, BRAUN D, HEEGER A J. Light-emitting diodes from partially conjugated poly (p-phenylene vinylene)[J]. J Appl Phys, 1993, 73: 5177-5178.
- [4] GAUSTAFSSON G, CAO Y, TREACY G M et al. Flexible light-emitting diodes made from soluble conducting polymers[J]. Nature, 1992, 357: 477-478.
- [5] BABUDRI F, FARINOLA G M, LOPEZ L C, et al. A Synthetic strategy leading to monodisperse PPV oligomers

- by coupling reactions of vinyltrimethylsilanes[J]. Org Chem, 2000, 66: 3878-3885.
- [6] 凌味未, 唐先忠, 李元勋, 等. PPV类电致发光聚合物的合成及分子设计研究[J]. 材料导报, 2005, 19(9): 36-40.
- [7] LENI A. Electroluminescent polymers[J]. Prog Polym Sci, 2003, 28: 875-962.
- [8] QUAN Shan-yu, TENG Feng, XU Zheng, et al. Improved polymer light-emitting diodes by the tuning of charge balance[J]. Solid-State Electronics, 2006, 50: 1506-1509.
- [9] PARAFFINS. Chemistry and technology[M]. New York: Pergamon Press, 1967.
- [10] 姚新生. 有机化合物波谱解析[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2004.

编辑 张俊