

低轨卫星通信网络中HARQ技术研究

张润馨¹, 张 顺¹, 马建鹏¹, 张 景², 吴云飞²

(1.西安电子科技大学, 陕西 西安 710071)

2. 中国电子科学研究院, 北京 100041)

摘 要: 探讨如何将HARQ技术进行进一步拓展, 使之适用于低轨卫星通信网络。首先对传统的HARQ技术进行阐述; 然后在此基础上, 分别对基于低密度奇偶校验码的HARQ方案和基于信息组校验码的HARQ方案进行研究, 并通过仿真分析方案的性能; 最后针对HARQ重传机制中的重传单元分析合适的反馈方案, 为低轨卫星通信网络中的HARQ技术研究提供一定的参考。

关键词: 低轨卫星; HARQ; LDPC; BCC

中图分类号: TN393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022047

Research on HARQ Technology in Low-Orbit Satellite Communication Network

ZHANG Runxin¹, ZHANG Shun¹, MA Jianpeng¹, ZHANG Jing², WU Yunfei²

1. Xidian University, Xi'an 710071, China

2. China Academic of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China

Abstract: How to extend the HARQ technique to made it suitable for LEO satellite communication network was explored. First the traditional HARQ technology was expounded. Based on this, the HARQ scheme based on low density parity check code (LDPC) and the HARQ scheme based on message group check code (BCC) were studied respectively, the performance of the schemes was analyzed through simulation. Finally, suitable feedback schemes were analyzed for the retransmission units in the HARQ retransmission mechanism, which provided some reference for the research of HARQ technology in LEO satellite communication networks.

Keywords: low-orbit satellite network, HARQ, LDPC, BCC

0 引言

卫星通信网络是实现全球无缝漫游移动通信必不可少的基础设施, 在许多新兴的通信服务中起着重要的作用, 如宽带广播、灾难救援、航空运输等。随着科学和技术的不断发展, 人们对卫星通信网络通信质量的要求越来越高, 其中高有效性和高可靠性是两个重要的要求^[1-3]。卫星通信网络信道所处的环境十分复杂, 存在大量的衰落、噪声和干扰, 这会严重影响卫星通信的质量。例如地面接收机周围的复杂环境会导致小范围的衰落, 接收端的移动导致较大的多普勒频移, 高层大气可能导致传输出现问题

等^[4-6]。此外, 通信距离远, 卫星信道的传输时延大, 长距离传输还会导致路径损耗, 这些因素都会影响卫星通信的传输质量。因此, 如何保证卫星通信的传输质量以满足用户的要求是一个值得关注的问题。

在地面部署中, 信道衰落等问题是通过混合自动重发请求 (Hybrid ARQ, HARQ) 技术处理的。作为一种基本的差错控制技术, HARQ相比于前向纠错 (Forward Error Correction, FEC) 技术和自动重传请求 (Automatic Repeat Request, ARQ) 技术, 能够保证传输有更高的可靠性和吞吐量, 这为保障卫星通信质量提供了基本的解

收稿日期: 2022-06-30; **修回日期:** 2022-09-26

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2021YFB2900502); 中央高校基本科研业务费 (No. XJS220107)

Foundation Items: National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB2900502), Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. XJS220107)

决方法^[7-8]。但是,传统的HARQ技术在卫星环境中存在一些问题。比如当卫星信道的质量很差时,信道的时延会很大,此时在卫星通信网络中使用传统的HARQ技术会导致接收端不能及时接收甚至无法接收ACK/NACK (Acknowledgement/Negative Acknowledgement) 消息,使发送端一直处于等待状态,信道无法进行正常通信^[9]。因此必须考虑设计更加适合卫星网络且更为有效的HARQ技术,以提高卫星移动通信系统传输的可靠性,保证业务的传输质量。

1 HARQ技术

移动通信系统受到各类随机噪声和信道随机变化的影响,难免发生传输错误。为了降低系统传输误码率,保证不同业务数据的传输质量,无线通信系统中一般会引入差错控制技术。传统的差错控制技术主要有FEC技术和ARQ技术。

FEC是一种前向纠错技术,其基本原理是发送端将信息数据与冗余纠错码一起发送,接收端接收到信号后,使用译码器进行处理,根据冗余部分进行差错检测、重构原始信息。FEC技术不要求检错重发,有恒定的通过量和时延,且实时性较好。但当其接收端译码错误时,会将错误的信息传输给用户,导致传输的可靠性差。此外,FEC所采用的纠错码冗余度大,导致编码效率低并且译码电路复杂。

ARQ是一种按需重传的机制,其基本原理是在信息码元中加入少量监督码元,接收端根据监督码元检查信息码元是否出错,如果检测到错误,则向发送端发送信号要求重新发送,直到接收端检测到没有错误为止。ARQ技术的差错控制能力强,当信道的误比特率较低时,ARQ性能良好。当信道的质量变差时,信息码元的出错率会增加,导致重发请求增多,有效传输速率也会迅速下降。此外,由于ARQ的时延可变,会使得通信的实时性变差,因此不适合提供实时服务。

HARQ是一种新的差错控制技术,它结合了FEC技术和ARQ技术的优点,能够有效克服FEC和ARQ的不足。与FEC技术相比,HARQ技术的传输误码率更低,传输可靠性更高。与ARQ技术相比,HARQ技术在保证相同传输质量的条件下,传输效率更高。

HARQ在具体应用中分为以下3种基本类型。

(1) I型HARQ

I型HARQ方式是FEC和ARQ的简单组合。I型HARQ使用一种能同时进行检错和纠错的冗余码。接收端收到第一次传输的信息后,按照与FEC技术相同的方式进行检错和纠错。如果第一次传输错误信息比特数较

少,通过码字的纠错能力将错误信息比特纠正,本次传输成功;如果第一次传输错误信息比特数较多,超出码字的纠错能力,则有部分错误信息误码纠正,接收端要求发送端进行重传。发送端重传信息与第一次完全相同,这个过程与ARQ一样。I型HARQ方式与ARQ传输的不同之处在于,ARQ技术将之前未正确解码的信息直接丢弃,下一次只用重传的信息进行检错与纠错,而I型HARQ方式将之前每次未正确解码的信息缓存下来,和新重传的信息合并进行检错与纠错。由于每次传输都受到随机噪声的干扰,错误信息比特的位置可能有差异,将多次传输的信息合并可以明显提升纠错能力。因此,I型HARQ方式与ARQ相比,同等条件下可以降低重传次数。这种合并方式被称为软合并(Chase Combine, CC)^[10]。

(2) II型HARQ

I型HARQ的吞吐量在高信噪比的信道下会受到FEC编码器速率的限制,为了解决这一问题,提出了II型HARQ。II型HARQ属于递增冗余(Incremental Redundancy, IR)的HARQ机制,它在I型HARQ的基础上加入了组合译码^[11]。首次传输时,II型HARQ没有或只带有较少的冗余。如果第一次传输不成功,发送端将开始重传,但接收错误的数块不会被丢弃。重传的数块并不和第一次传送的数块完全一样,而是在第一次传送的数块的基础上新增了冗余信息。接收端将两次收到的数块合并,然后解码。如果第二次重传后仍然无法完全纠错,则再增加新的冗余进行新的重传,直到能够完全正确纠错或者达到重传次数上限。

II型HARQ通过增加冗余信息,降低了系统的编码速率,从而提高了系统的编码增益。此外,第一次传输的编码信息和后面每次重传信息合并后,新的编码块含有更多的冗余信息,检错和纠错能力更强,从而提升传输的可靠性。但II型HARQ存在一个很大的缺点,其只有首次传输包含信息比特,重发的数块只有冗余信息,所以每次重发的数块并不具备独立译码的能力。如果第一次传输的原始信息比特误码严重,即使经过多次重传也很难完全纠错。

(3) III型HARQ

为了克服II型HARQ的缺点,提出了III型HARQ,即部分冗余HARQ,III型HARQ同样是属于IR方式的HARQ。它与II型HARQ相似,但与II型HARQ不同的是,III型HARQ重传的数块中包含有系统信息位和打孔比特,因此,III型HARQ重传的数块可以自解码^[12]。对于III型HARQ,如果首次传输没有被正确接收,接收机会将收到的数块保存下来并要求发送端重新传输。由于重传数据具备自解码能力,可以先用新的重传数据独立

解码,如果重传数据有误码且不能独立纠错,则将之前收到的数据和重传数据合并,等效降低编码效率,提高纠错能力。

III型HARQ的重传数据块可以恢复出原始数据信息,但其过程也更为复杂,相比于II型HARQ在每次传输时只需进行一次译码,III型HARQ的接收端不仅需要接收到数据块进行译码,还有可能需要进行数据块之间的组合解码。

2 基于LDPC的卫星通信网络HARQ方案

2.1 卫星通信网络中的HARQ-LDPC方案

低密度奇偶校验码(Low Density Parity Check Code, LDPC)是一种前向纠错码,其校验矩阵为稀疏矩阵。准循环LDPC(Quasi Cyclic LDPC, QC-LDPC)是LDPC中重要的一类,它在左移或右移一定位数的符号位后仍为一个码字。QC-LDPC特殊的结构可以显著降低编码的复杂度^[13]。由于QC-LDPC的性能优良,本文考虑在卫星通信网络的HARQ-LDPC方案中采用QC-LDPC。

在卫星通信网络中,为了满足各种通信场景的需要,LDPC必须能够灵活地支持不同的码率和码长。此外,为了保证传输的可靠性,LDPC必须能够支持IR-HARQ^[14]。尽管LDPC采用的Raptor-Like结构能够在一定程度上增加校验比特,从而支持IR-HARQ和不同码率,但QC-LDPC离散的移位因子大小等也对可支持的信息块大小和码长存在一些限制,因此需要额外的措施实现速率匹配。考虑在卫星通信网络的HARQ-LDPC方案中通过循环缓存实现HARQ和速率匹配^[15],具体实现方法如下。

如图1所示,将编码比特存储在循环缓冲区,每次重传的数据块都是在循环缓冲区中读取对应的比特,且读取位置必须是移位因子 Z 的整数倍,就可以实现速率匹配。由图1可知,各个冗余版本的分布并不均匀, RV_2 更加靠

近循环缓存的末尾,使得 RV_0 和 RV_2 都可以独立译码^[16]。

卫星通信网络LDPC信息处理流程如图2所示。

2.2 卫星通信网络HARQ-LDPC性能仿真

本文将在卫星通信网络框架内进行HARQ-CC、HARQ-IR以及no HARQ的一系列仿真,并根据仿真结果进行性能对比。与蜂窝网、无线局域网等地面网络相比,卫星通信网络最大的特征是通信距离远、传播时延大。这导致接收端发送完一帧到接收确认帧ACK的时延很大,如果帧长太短,频繁的发送和接收ACK会导致系统传输效率很低。这就要求星地传输HARQ的数据单位明显长于地面无线网络,尽量减小ACK次数。为此,本文仿真中主要考虑了长帧和长HARQ媒体协议数据单元(Media Protocol Data Unit, MPDU)。具体仿真内容描述如下。

仿真条件如下。

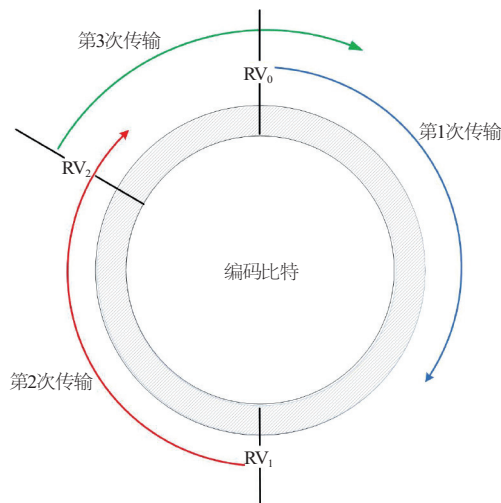


图1 卫星网络中的HARQ-LDPC传输规则

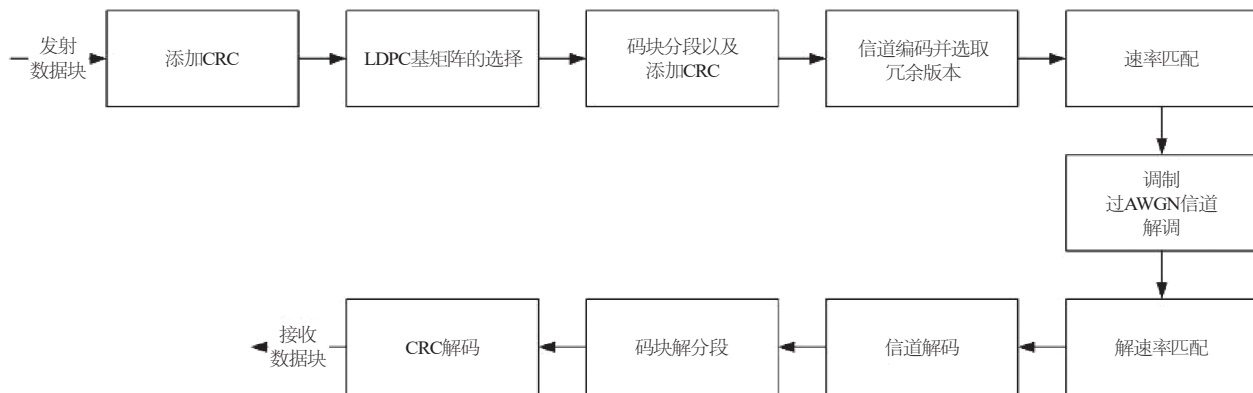


图2 卫星通信网络LDPC信息处理流程

- (1) 环境：卫星通信网络。
 - (2) 数据单元长度：分别为10 000、5 000。
 - (3) 目标码率：1/2。
 - (4) 信道：加性高斯白噪声（Additive White Gaussian Noise, AWGN）信道。
 - (5) 采样频率：20 MHz。
 - (6) 重传合并方式：对数似然比（Log-Likelihood Ratio, LLR）信息合并。
 - (7) 最大重传次数：20次。
- 在此仿真条件下，得到LDPC的编码参数见表1。

表1 MPDU长度为10 000时的编码参数

编码参数	参数值
CRC多项式选择	'24A'
CRC比特数	24 bit
码块数	2个
每个码块的校验比特数	24 bit
每个码块的“NULL”填充数	244个
扩展因子	240
分段后每个码块的比特数	5 280 bit
LDPC编码后每个码块的比特数	15 840 bit

评价性能的指标为吞吐量和误比特率。其计算方法如下。

吞吐量 $C=K/T=K \times f_s/S$ ，其中 K 为一个MPDU的比特数， T 为传输成功所需的总时间， f_s 为采样频率， S 为传输成功时发送的总符号数，且有 $S=I \times KR/M$ ，其中 I 为传输成功时所需要的总传输次数， R 为编码率， M 为调制阶数。平均吞吐量 $C_M=(P/P_I)MRf_s$ ，其中 P 为传输的MPDU

表2 MPDU长度为5 000时的编码参数

编码参数	参数值
CRC多项式选择	'24A'
CRC比特数	24 bit
码块数	1个
每个码块的校验比特数	0 bit
每个码块的“NULL”填充数	256个
扩展因子	240
分段后每个码块的比特数	5 280 bit
LDPC编码后每个码块的比特数	15 840 bit

数， P_I 为包括重传在内的总MPDU数。
误比特率 $\eta=1-K_r/K$ ，其中 K_r 为一个MPDU内成功传输的比特数。

根据以上配置，仿真结果及分析如下。

(1) HARQ-CC和HARQ-IR的吞吐量性能分析

HARQ-CC和HARQ-IR吞吐量仿真结果如图3所示。

通过图3可以看出，在信噪比（Signal to Noise Ratio, SNR）偏低时，HARQ-CC和HARQ-IR使用低阶调制的吞吐量更高。在信噪比较高时，HARQ-CC和HARQ-IR使用高阶调制的吞吐量更高。此外，在信噪比确定的条件下可以根据图3选择最优的调制方式，该结论可作为基线用于指导在不同信噪比下的调制方式的选择。

(2) HARQ-CC和HARQ-IR在不同重传次数下的误码率性能分析

HARQ-CC和HARQ-IR误码率仿真结果如图4所示。

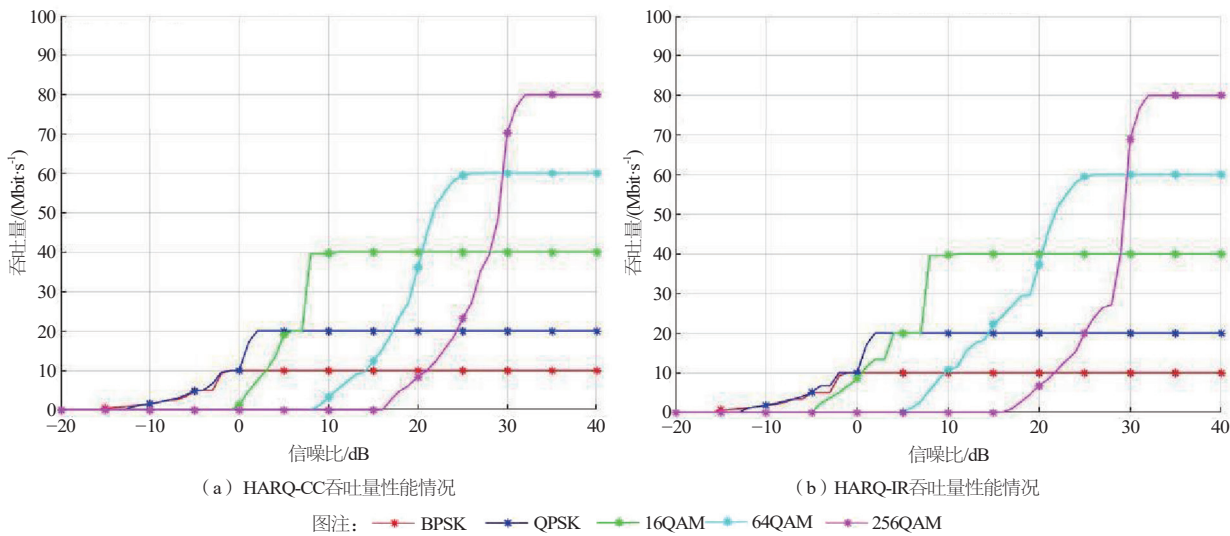


图3 HARQ-CC和HARQ-IR吞吐量仿真结果

通过图4可以看出,随着重传次数的增加,HARQ-CC和HARQ-IR的误比特率均在下降。对比图4(a)、图4(b)中的正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)仿真结果可知,HARQ-IR重传两次后误码率低于 10^{-6} ,而HARQ-CC需要重传3次误码率才会低于 10^{-6} 。因此,在低信噪比时,对于低阶调制,HARQ-IR所需的重传次数要略小于HARQ-CC。

(3) HARQ-CC和HARQ-IR在不同SNR下的误码率和吞吐量性能分析

高阶调制对信道要求过高,单独进行QPSK调制时,HARQ-CC和HARQ-IR在不同条件下的误码率性能分

析和吞吐量性能分析如图5所示。

通过图5可以看出,随着重传次数的增加,HARQ-CC和HARQ-IR的误码率都会减小,证明重传的有效性。在给出的几种信噪比情况下,HARQ-IR的误比特率收敛速度比HARQ-CC快,即HARQ-IR需要重传的次数更少。此外,HARQ-IR的吞吐量在信噪比 $-10 \sim 0$ dB范围内均略高于HARQ-CC。

(4) HARQ-CC在不同调制方式和不同目标传输次数下的吞吐量性能分析

HARQ-CC在不同调制方式和不同目标传输次数下的吞吐量仿真结果如图6所示。

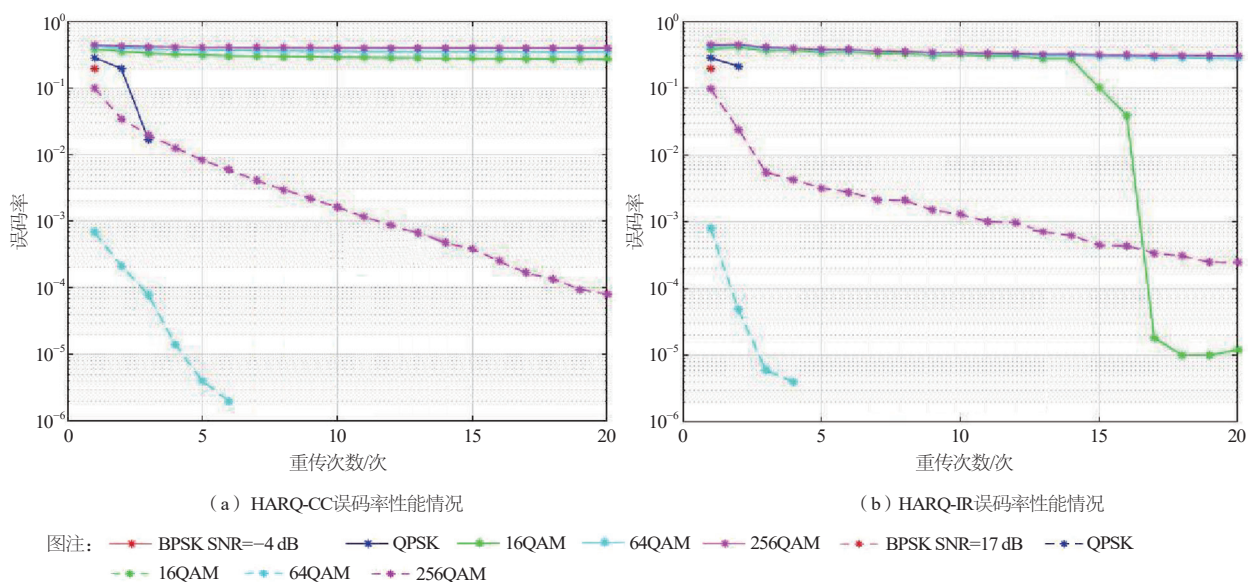


图4 HARQ-CC和HARQ-IR误码率仿真结果

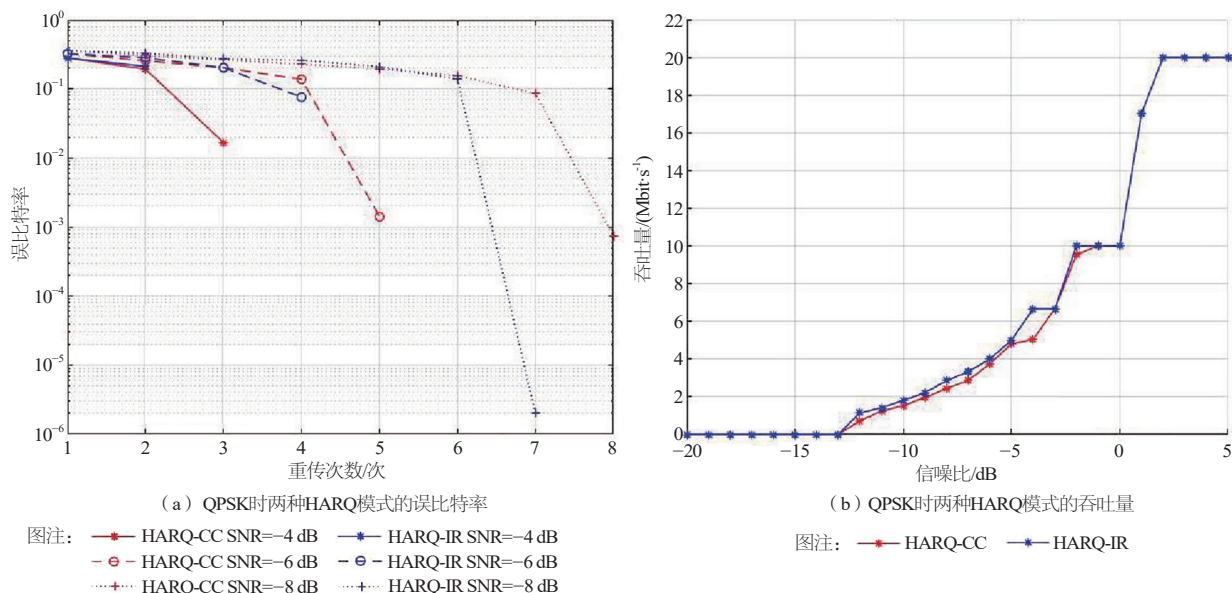


图5 HARQ-CC和HARQ-IR在不同条件下的误比特率性能分析和吞吐量性能分析仿真结果

(5) HARQ-IR在不同调制方式和不同目标传输次数下的吞吐量性能分析

HARQ-IR在不同调制方式和不同目标传输次数下的吞吐量仿真结果如图7所示。

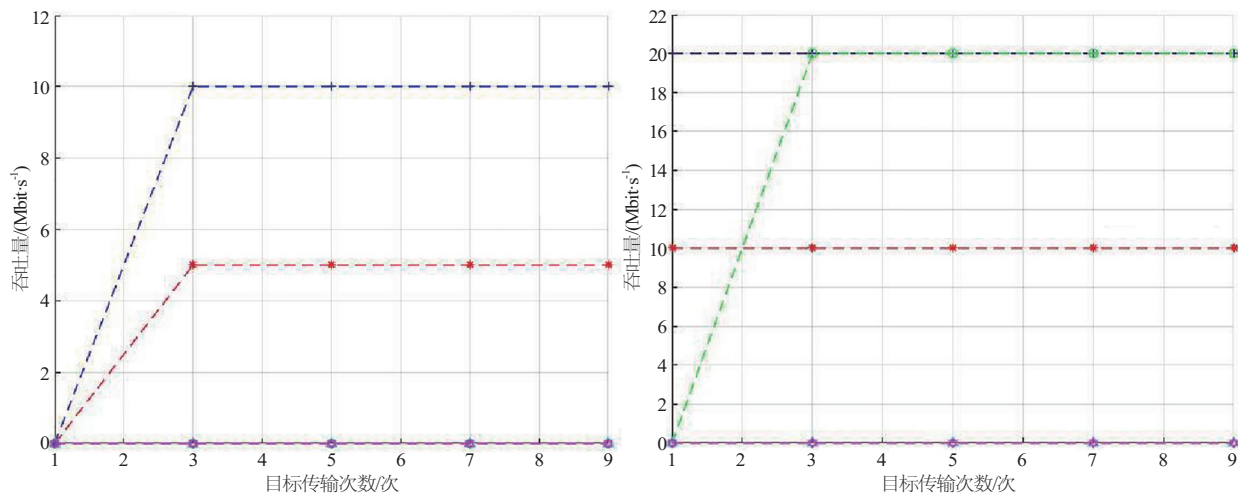
从图6、图7中可以确定HARQ-CC合并和HARQ-IR合并的最优调制方式，而无HARQ机制在每种信噪比下的最优调制方式与HARQ-CC最优调制方式相同。值得注意的是，对于高阶调制（如64QAM与256QAM），目标传输次数对吞吐量没有影响。产生这一现象的原因是高阶调制的误码率较高，增加目标传输次数虽然可以有效降低丢包率，但是随着每个包的平均传输次数增加，传输

效率也会降低，所以目标传输次数对吞吐量没有影响。

3 基于BCC的卫星通信网络HARQ方案

信息组校验码（Block Check Character, BCC），也称为异或校验。BCC在纵向奇偶校验中校验数据块^[17]，其校验位为8位数据。具体算法是以字节为单位，对发送信息的数据按顺序进行异或，最后所得的结果即为异或校验码。数据比特经BCC编码器编码后，信息比特与冗余比特没有明显的区分。

对于基于BCC的HARQ重传，主要考虑基于比特级别的合并方案，即每次传输时接收端都会解调出传输

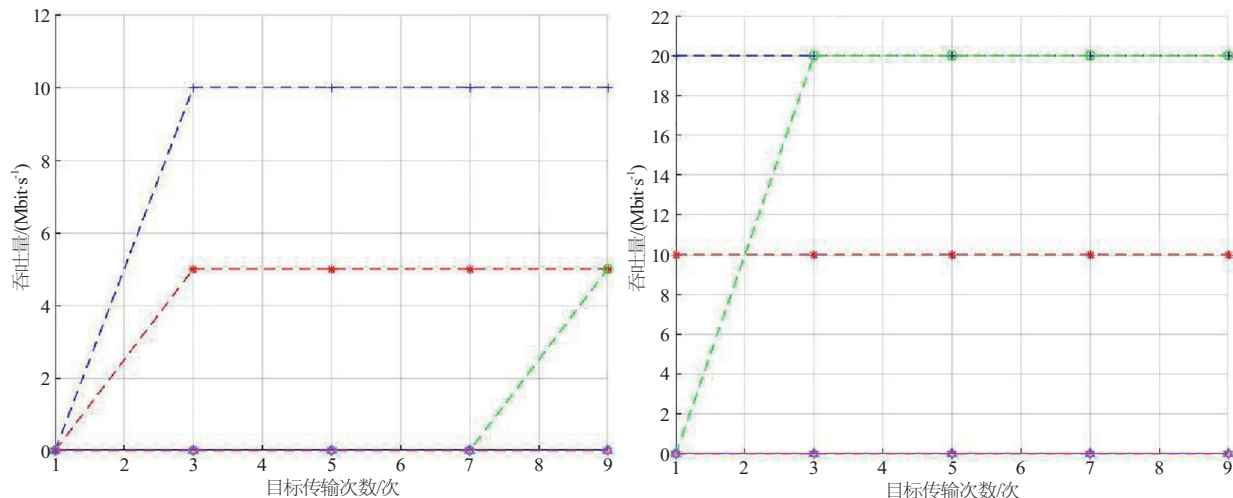


(a) 信噪比-2 dB时不同传输次数限制的吞吐量

(b) 信噪比6 dB时限制不同传输次数的吞吐量

图注：-●- BPSK -+- QPSK -○- 16QAM -△- 64QAM -★- 256QAM

图6 HARQ-CC的吞吐量仿真结果



(a) 信噪比-2 dB时不同传输次数限制的吞吐量

(b) 信噪比6 dB时不同传输次数限制的吞吐量

图注：-●- BPSK -+- QPSK -○- 16QAM -△- 64QAM -★- 256QAM

图7 HARQ-IR的吞吐量仿真结果

的比特LLR,并将相应的LLR相加,从而得到新的LLR值。比特级合并不仅可以用于HARQ-CC合并方案,还可以用于HARQ-IR合并方案。这是因为无论是CC合并还是IR合并,只需将每次重传数据计算出来的每个比特的LLR进行简单的相加。需要注意的是,由于每次传输的冗余信息不同,某次重传可能没有某些比特的任何信息,本次将这些比特对应的LLR设为0即可。

为了对比不同重传合并方式的效果,本文选择对CC合并方式和IR合并方式进行仿真。其结果如图8所示。

从图8可以看到,在同种调制方式和相同信噪比条件下,BCC-CC合并的吞吐量总是低于BCC-IR合并的吞吐量,也就是说BCC-IR合并的效果优于BCC-CC合并,这

表明每次重传时补充上的打孔比特能够帮助信息的传输。值得注意的是,在现有通信系统中,BCC编码已经有了应用,但关于BCC的HARQ重传机制目前还没有应用。

4 HARQ反馈

重传单元是HARQ传输机制中至关重要的部分,本文对传输单元中的物理层(PHY)单元和MAC层单元进一步分析。

基于物理层的反馈方案示意图9所示。

物理层单元的一般过程如下。

(1) 检查HARQ单元是否在物理层侧成功传输(ACK/NACK判定);

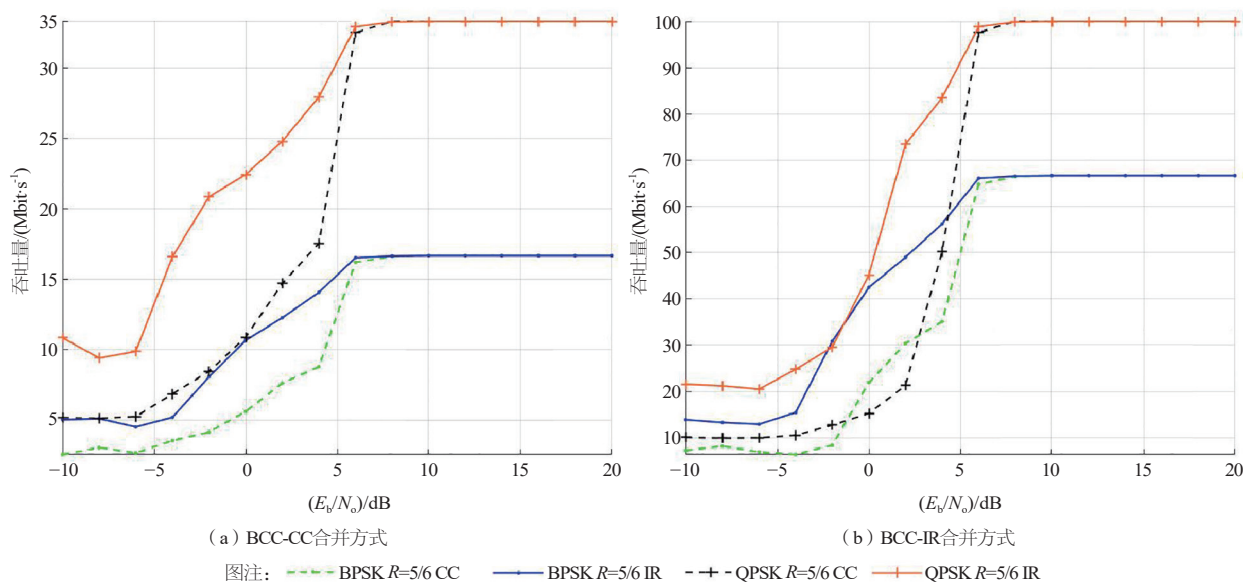


图8 BCC-CC合并方式和BCC-IR合并方式吞吐量仿真结果

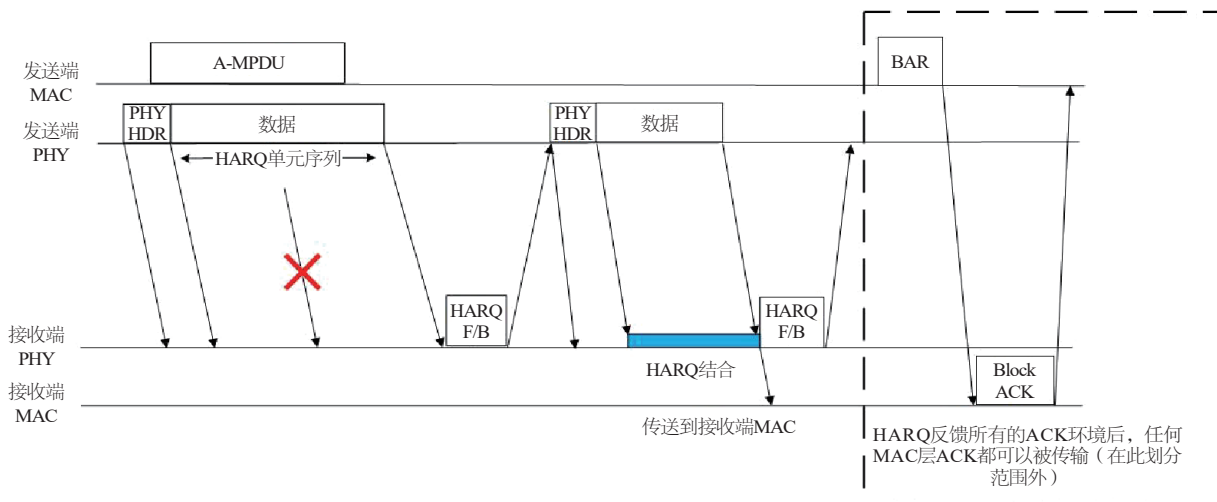


图9 基于物理层的反馈方案

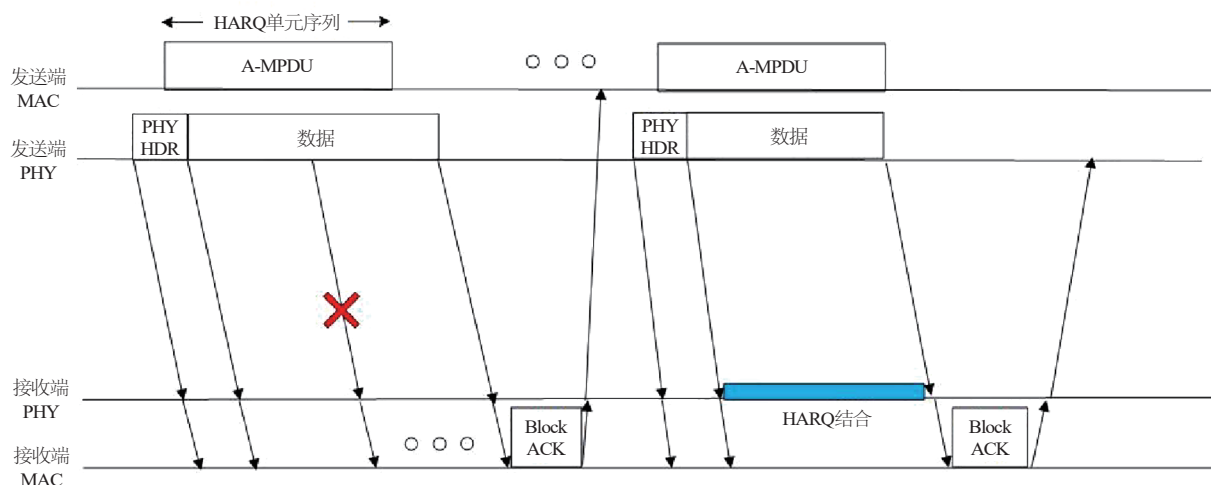


图10 基于链路层的反馈方案

(2) 检查HARQ传输和HARQ错误;

(3) 定义HARQ反馈机制和一个新的HARQ反馈框架结构。

物理层单元的开销/缓冲区问题如下。

(1) 信令开销

在一个物理层报头上可能需要一些信令开销，如对发送端和接收端之间的某些过程进行协商，则可能会减少这种信令开销。例如，一个新的数据不允许包含在重新传输的协议数据单元（Presentation Protocol Data Unit, PPDU）中，HARQ单元在跟随PPDU时不能切换顺序。

(2) 反馈开销

需要定义一个新的HARQ反馈框架结构和一种指示需要重传单元的方法。如果在一个PPDU中有很多单元，HARQ反馈应该包含很多信息。因此，为了减少反馈的大小，可以用多个码字定义HARQ单元。

基于链路层的反馈方案示意图10所示。

MAC层单元的一般过程^[18]如下。

- (1) 根据MAC层在每个MPDU中使用循环冗余校验（Cyclic Redundancy Check, CRC）确定HARQ ACK/NACK。
- (2) 在MPDU基础上进行HARQ错误检查。
- (3) 现有的块确认（Block ACK）可以用作HARQ反馈。
- (4) 采用MAC填充对齐MPDU和码字的边界。
- (5) 使用额外的MAC填充，可以使MPDU和码字对齐，这样重传过程相对简单，但会造成额外的开销。
- (6) 如果没有额外的MAC填充，MPDU和码字之间的映射信息会导致额外的开销。

MAC层单元的开销/缓冲区问题如下。

(1) 信令开销

PHY头需要包含MPDU与LDPC码字之间的映射信息。有了额外的MAC填充，只需要码字数字信息将某个MPDU映射到码字。如果没有额外的MAC填充，则需要额外的指示，因为一个码字可以与两个或多个MPDU相关，反之亦然。

(2) 反馈开销

现有的Block ACK框架可以被利用作为HARQ反馈。

参考文献：

- [1] GIORDANI M, ZORZI M. Satellite communication at millimeter waves: a key enabler of the 6G era[C]//Proceedings of 2020 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 383-388.
- [2] 徐峰. 卫星通信的重要[J]. 无线互联科技, 2014(2): 40-42.
- [3] XU F. Importance of satellite communication[J]. Wireless Internet Technology, 2014(2): 40-42.
- [4] 徐小玲, 崔维嘉, 王大鸣, 等. 适用于GEO卫星通信的单层重传机制[J]. 信息工程大学学报, 2016, 17(3): 261-265.
- [5] XU X L, CUI W J, WANG D M, et al. Single layer HARQ for mobile GEO satellite communication system[J]. Journal of Information Engineering University, 2016, 17(3): 261-265.
- [6] 张忠超, 吴久银, 张强龙. 卫星通信系统中应用HARQ的性能分析[J]. 无线通信技术, 2010, 19(4): 25-30.
- [7] ZHANG Z C, WU J Y, ZHANG Q L. Analyze the performance of HARQ in satellite communication system[J]. Wireless Communication Technology, 2010, 19(4): 25-30.
- [8] 余英. 太阳活动对卫星通信的影响[J]. 广播与电视技术, 2000,

- 27(12): 120-124.
- YU Y. Influence of solar activity on satellite communication[J]. Radio & Tv Broadcast Engineering, 2000, 27(12): 120-124.
- [6] WELLING D T. The long-term effects of space weather on satellite operations[J]. Annales Geophysicae, 2010, 28(6): 1361-1367.
- [7] LIN S, YU P. A hybrid ARQ scheme with parity retransmission for error control of satellite channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 1982, 30(7): 1701-1719.
- [8] PAPALEO M, NERI M, VANELLI-CORALLI A, et al. Using LTE in 4G satellite communications: increasing time diversity through forced retransmission[C]//Proceedings of 2008 10th International Workshop on Signal Processing for Space Communications. Piscataway: IEEE Press, 2008: 1-4.
- [9] 付晓, 胡江江. 适用于卫星通信的HARQ使用方法: CN114389670A[P]. 2022-04-22.
- FU X, HU J J. HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) using method suitable for satellite communication: CN114389670A[P]. 2022-04-22.
- [10] 周祖荣, 范丽辉. 基于LTE的HARQ技术的研究[J]. 科技信息, 2010(36): 489-490.
- ZHOU Z R, FAN L H. Research on HARQ technology based on LTE[J]. Science & Technology Information, 2010(36): 489-490.
- [11] KALLEL S. Analysis of a type II hybrid ARQ scheme with code combining[J]. IEEE Transactions on Communications, 1990, 38(8): 1133-1137.
- [12] KALLEL S. Complementary punctured convolutional (CPC) codes and their applications[J]. IEEE Transactions on Communications, 1995, 43(6): 2005-2009.
- [13] WANG Y G, YEDIDIA J S, DRAPER S C. Construction of high-girth QC-LDPC codes[C]//Proceedings of 2008 5th International Symposium on Turbo Codes and Related Topics. Piscataway: IEEE Press, 2008: 180-185.
- [14] 华为云论坛. 5G NR QC-LDPC简介[EB]. 2021.
- Huawei Cloud Forum. Introduction of 5G NR QC-LDPC[EB]. 2021.
- [15] 徐俊, 许进, 袁志锋, 等. 一种LDPC码的有限长度循环缓存的速率匹配方法: CN101188428A[P]. 2008-05-28.
- XU J, XU J, YUAN Z F, et al. Speed matching method of limited length circular buffer of LDPC code: CN101188428A[P]. 2008-05-28.
- [16] LIANG C Y, LI M R, LEE H C, et al. Hardware-friendly LDPC decoding scheduling for 5G HARQ applications[C]//Proceedings of ICASSP 2019 - 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1418-1422.
- [17] LAWRENZ W. CAN system engineering: from theory to practical applications[M]. Heidelberg: Springer, 1997.
- [18] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access: packet data convergence protocol specification: TS 36.213[S]. 2019.

[作者简介]



张闰馨 (2001-), 女, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为空间信息网络、物联网等。



张顺 (1985-), 男, 博士, 西安电子科技大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为毫米波大规模MIMO智能组网、空间信息网络、新一代短距无线通信、智能超表面辅助组网技术以及无线组网验证平台等。



马建鹏 (1990-), 男, 博士, 西安电子科技大学副教授, 主要研究方向为毫米波大规模MIMO网络、空间信息网络、下一代无线局域网、特种通信网络的物理层和链路层理论与工程应用等。



张景 (1974-), 男, 中国电子科学研究院研究员级高级工程师, 主要研究方向为基于5G移动通信技术体制的卫星无线接入网技术、基于4G/5G技术体制的时敏专网、移动边缘计算技术在行业专用中的应用等。



吴云飞 (1992-), 男, 中国电子科学研究院工程师, 主要研究方向为天基边缘计算技术、星地融合网络接入技术、卫星物联网传输技术等。