

AOS 中基于最优帧长的链路自适应联合优化方法

刘庆利 郭梦田 商佳乐

(大连大学通信与网络重点实验室 辽宁 大连 116622)

摘要 针对 AOS 中数据传输误码率高的问题,导致系统吞吐量低的问题,提出基于最优帧长的链路自适应联合优化方法。该方法以系统吞吐量最大化为目标,联合可变帧长,自适应编码调制和混合自动重传请求技术进行优化,根据信道状态信息分配下一帧传输最佳的帧长和编码调制方式,并对出错数据进行纠错和重传,最终提升系统吞吐量。仿真验证表明,与 AMC-HARQ 和 AMC-ARQ 方法相比,该方法在保证系统误帧率的同时,提高了系统的吞吐量。

关键词 AOS 空间通信 最优帧长 自适应编码调制 混合自动重传

中图分类号 TN927 TP3 **文献标志码** A **DOI**:10.3969/j.issn.1000-386x.2024.04.017

LINK ADAPTATION JOINT OPTIMIZATION METHOD BASED ON OPTIMAL FRAME LENGTH IN AOS

Liu Qingli Guo Mengtian Shang Jiale

(Key Laboratory of Communication and Network, Dalian University, Dalian 116622, Liaoning, China)

Abstract Aimed at the problem of high data transmission error rate in advanced orbiting system (AOS), resulting in low system throughput, a link adaptive joint optimization method based on the optimal frame length is proposed. To maximize system throughput, the method was optimized by combining variable frame length, adaptive coding modulation and hybrid automatic repeat request technology, and it assigned the best frame length and coding modulation method for the next frame transmission according to the channel state information. In addition, error correction and retransmission of erroneous data were carried out to improve system throughput. Simulation verification shows that compared with the AMC-HARQ and AMC-ARQ methods, the system throughput is improved while ensuring the system error rate.

Keywords AOS space communication Optimal frame length Adaptive modulation and coding Hybrid automatic repeat request

0 引言

由于空间技术发展得越来越快,空间通信系统出现了一些复杂的飞行任务,为了满足航天器的飞行任务,空间数据系统咨询委员会(Consultive Committee for Space Data System, CCSDS)开发了高级在轨系统(Advanced Orbiting System, AOS)的建议书^[1-6]。AOS 能够支持多种数据业务,传输的数据量大,但是信号在传输过程中误码率高,导致系统的吞吐量较低。因此,

如何在复杂的通信环境中,在保证数据传输质量的同时,选择合适的通信方案来提高空间链路的吞吐量成为当前的研究热点。

AOS 空间链路相比于地面链路更为复杂,存在很大的时变性和复杂性,数据在传输过程中突发错误多、误码率高^[7-10],导致信号在传输过程中的传输效率低,使得系统的吞吐量性能不佳。针对以上存在的问题,系统在传输过程中保证信号的可靠性和提升吞吐量方面,当前很多相关研究。文献[11]提出了基于实时信道状态信息估计的混合自动重传请求(Hybrid

Automatic Repeat reQuest, HARQ) 速率自适应算法,通过动态规划的方法来求解最优速率,该算法有效地提升了系统的吞吐量性能。文献[12]为了提高系统的吞吐量,提出将自适应编码调制(Adaptive Modulation and Coding, AMC)与混合自动重传(HARQ)进行分离设计,使 AMC 模块和 HARQ 模块分别完成调整传输速率和合并传输资源的任务,但是由于系统的传输参数过多,加大了系统的优化难度。文献[13]提出了一种自适应帧长(Adaptive Frame Length, AFL)的方法,验证了在不同帧长下的系统吞吐量性能,根据误码率选择系统传输的帧长,从而提高了数据传输的可靠性,提高了传输速率。文献[14]为了提高系统的频谱效率,提出一种 AMC-ARQ 算法,利用重传减少出错的概率,在保证系统要求的误帧率的同时,改善了系统的频谱效率低的问题。文献[15]研究了 AMC-HARQ 相结合的算法在慢衰落信道下的吞吐量性能,结果显示该算法对比 AMC 算法提升了系统的吞吐量,但是由于采用固定帧长进行传输,在传输环境较差的情况下,传输方案的效果不佳。以上文献表明帧长的选取对系统吞吐量有一定影响,自适应编码调制和重传联合优化虽然能够提升系统的吞吐量,但没有考虑可变帧长对系统性能的影响。

基于以上研究,本文针对 AOS 空间通信系统中数据传输过程中误码率高,导致系统吞吐量低的问题,提出基于最优帧长的链路自适应联合优化方法(Link Adaptive joint Optimization Method based on Optimal Frame Length, LAOMOFL)。该方法以最大化系统吞吐量为目标,将自适应帧长(AMF)、自适应编码调制(AMC)和混合自动重传请求(HARQ)技术进行联合优化,系统根据信噪比预估当前的信道状态,为下一帧数据的传输选择最优的传输帧长和编码调制模式,再通过混合自动请求重传技术对传输出错的数据帧进行纠错和重传,以降低系统的误帧率和重传次数,提升 AOS 通信系统的传输性能。

1 联合优化原理框图

如图1所示,在本方案中,首先信源数据在发送端进行编码和调制,在无线信道中进行传输;数据在到达接收端后,会先对其进行检测解调和译码。自适应编码调制技术(AMC)是接收端在接收到数据后,根据通信过程中的信噪比来估计当前的信道状况,并通过反馈信道回传给发送端,发送端再根据收到的信息确定

传输下一帧数据时要选择的帧长和编码调制方式(MCS);混合自动重传请求技术(HARQ)是接收端在收到传输的数据时,首先将数据进行检验,如果发现错误对其进行纠错,在超出纠错范围后,将出错的数据帧丢掉,同时通过反馈信道向发送端发送 NACK 并请求重新传输该数据帧,直至达到系统设定的最大重传次数。

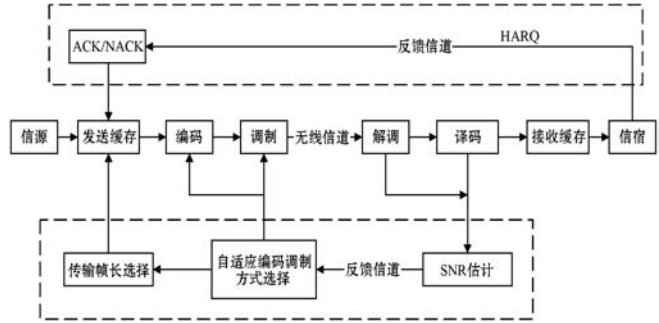


图1 基于最优帧长的链路自适应联合优化方法框图

2 联合优化方案

本文在自适应编码调制和混合自动重传请求技术联合优化的基础上,从提升系统吞吐量出发,考虑帧长因素对系统性能的影响,使用可变帧长传输数据,通过预估当前的信道状态,在下一帧传输时选取合适的帧长和编码调制方式,并利用混合自动重传技术来纠正和重传传输出错的数据帧,减少传输过程中数据帧出错的概率,提升系统的吞吐量。系统设定每个数据帧的最大重传次数为 N_{\max} ,在 N_{\max} 次重传之后系统误帧率不超过 F_{target} 。

2.1 信道模型

本文采用慢衰落信道作为信道模型,可以通过信道的信噪比 γ 来表示信道质量,由于信道状态随帧变化。因此,系统采用 Nakagami-m 信道模型表示信噪比,信噪比 γ 是一个随机变化的量,其概率密度函数可以用式(1)表示。

$$P_{\gamma}(\gamma) = \frac{m^m \gamma^{m-1}}{\bar{\gamma}^m \Gamma(m)} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}}\right) \quad (1)$$

式中: γ 是瞬时信噪比, $\bar{\gamma} = E(\gamma)$ 表示平均接收信噪比, m 为信道衰落参数,对应不同的衰落环境,当 $m=1$ 时,信道则表示为瑞利信道。 $\Gamma(m)$ 是伽马函数,可表示为 $\Gamma(m) = \int_0^{\infty} t^{m-1} e^{-t} dt$ 。

2.2 最优帧长的计算

系统的吞吐量性能可以表示为:

$$Th = \frac{l-h}{l} R_n (1 - FER) \quad (2)$$

式中: l 表示数据帧长; h 表示固定帧头; R_n 表示每符号对应比特数; FER 表示误帧率。误帧率可以表示为误码率 BER 的函数:

$$FER = 1 - (1 - BER)^l \quad (3)$$

把式(3)代入式(2)得到:

$$Th = \frac{l-h}{l} R_n (1 - BER)^l \quad (4)$$

由式(4)可以看出,吞吐量的大小与系统的误码率和传输帧长存在一定的关系,在系统的误码率给定时,会有一个帧长使得系统吞吐量达到最大,即最佳帧长。假设 d 表示数据帧的有效数据长度,将 d 代入式(4),求关于 d 的偏导:

$$\frac{\partial Th}{\partial d} = 0$$

可得:

$$d_{opt} = \frac{-h + \sqrt{h^2 - 4h/\ln(1 - BER)}}{2}$$

即最优帧长如式(5)所示。

$$l_{opt} = d_{opt} + h \quad (5)$$

2.3 联合状态下的传输模式

本文是在保证系统误帧率 F_{target} 的情况下,将系统吞吐量最大作为划分自适应编码调制方案的门限值的准则,设定 n 种编码调制组合方式,将这些组合方式称为传输模式,可表示为 $\{MCS1, MCS2, \dots, MCSn\}$ 。将系统的整个信噪比区间划分成 $n+1$ 个连续不重叠的子区间,子区间的边界点可用 $\{\gamma_n\}_{n=0}^{n+1}$ 表示,当 $\gamma \in [\gamma_n, \gamma_{n+1})$,信道处于状态 n ,选用传输模式 $MCSn$ 进行传输。当 $\gamma \in [\gamma_0, \gamma_1)$ 时,表示此时的信道条件比较恶劣,系统不进行传输。

系统在传输每一帧数据时,通过计算可以得到最优的传输帧长,但是在传输过程中如果采用过多的帧长传输数据,会系统在传输数据时频繁地切换帧长,从而增加系统的复杂度,所以需要限制传输帧长的数量。给系统设定 I 个传输帧长,用 $\{i_1, i_2, \dots, i_I\}$ 表示,将信噪比区间划分为 $I+1$ 个区间,不同的子区间对应不同的传输帧长。将编码调制模式和传输帧长联合后,新的传输方案可以表示为 $\langle MCSn, i_l, \gamma_{nl} \rangle$, 当信噪比 $[\gamma_{nl}, \gamma_{nl+1})$ 时,表示系统将选择 $MCSn$ 和 i_l 进行传输,这里用 (n, i) 来表示组合传输模式。如图2所示,表示在不同的信道条件下系统选用的编码调制模式和传输帧长组合传输示意图。

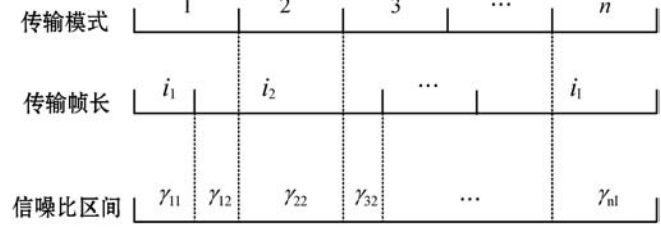


图2 编码调制模式和传输帧长组合传输示意图

2.4 联合优化原理

本文信道编码采用卷积码,采用曲线拟合法近似表示卷积编码下的误帧率曲线^[15],误帧率的近似表达式用式(6)表示。

$$FER(n, i, \gamma) \approx \begin{cases} 1 & 0 < \gamma < \gamma_p \\ a_{ni} \exp(-g_{ni} \gamma) & \gamma \geq \gamma_p \end{cases} \quad (6)$$

式中: n 表示编码调制方式; i 表示帧长, a_{ni} 、 g_{ni} 、 γ_p 表示曲线拟合相关的参数,可以通过仿真估算得到。其中, γ_p 为选用组合传输模式 (n, i) 传输时的最低门限,当 $\gamma < \gamma_p$ 时,系统的误帧率为1。

编码调制方式和传输帧长的选择都与系统的瞬时信噪比有关,那么,每种编码调制方式 $MCSn$ 被选择的概率为:

$$P(n) = \int_{\gamma_n}^{\gamma_{n+1}} p_\gamma(\gamma) d\gamma \quad (7)$$

每种传输帧长 i 被选择的概率:

$$P(i) = \int_{\gamma_i}^{\gamma_{i+1}} p_\gamma(\gamma) d\gamma \quad (8)$$

根据式(7)和式(8)可以计算传输模式 $MCSn$ 和传输帧长 i 同时被选择的概率,如式(9)所示。

$$P(n, i) = P(n)P(i) \quad (9)$$

那么, $P(n, i)$ 表示传输一帧数据时组合传输模式被选择的概率。

每种组合传输模式 (n, i) 的平均误帧率表示为:

$$\bar{F}(n, i) = \frac{1}{P(n, i)} \int_{\gamma_{ni}}^{\gamma_{ni+1}} FER(n, i, \gamma) \cdot p_\gamma(\gamma) d\gamma \quad (10)$$

传输一帧数据所对应的传输字符数为:

$$S(n, i) = \frac{l_i}{R_{n,i}}$$

式中: $R_{n,i}$ 为组合传输模式 (n, i) 的每个字符所对应的比特数, l_i 为传输帧长。

数据帧在第 k 次重传时的平均误帧率可以计算为传输出错的数据帧比上传的总帧数,联合式(9)和式(10)可以得到:

$$\bar{F}_e = \frac{\sum_{k=1}^N R_{n,i} \cdot P(n, i) \bar{F}(n, i)}{\sum_{k=1}^N R_{n,i} \cdot P(n, i)}$$

重传过程中平均每帧所传输的符号数可表示为:

$$\bar{S}(n,i) = \sum_{k=1}^N P(n,i) \cdot \frac{l_i}{R_{n,i}}$$

平均吞吐量表示为系统正确传输的数据量比上传输的总时延,可表示为:

$$\overline{Th}(n,i) = \frac{P_{succ} d_i}{(1 - P_{succ}) T_{fail} + P_{succ} T_{succ}} \quad (11)$$

式中: $d_i = l_i - h$ 表示数据帧的有效长度; P_{succ} 表示一帧数据传输($N_{max} + 1$) 次后成功接收的概率; T_{fail} 为数据帧传输失败所用的平均时间; T_{succ} 表示传输成功的数据帧所用的平均时间,如式(12) - 式(14)所示。

$$P_{succ} = 1 - \bar{F}(n,i) \cdot \bar{F}_e^{N_{max}} \quad (12)$$

$$T_{fail} = \frac{[S(n,i) + N_{max} \bar{S}(n,i)]}{R_s} \quad (13)$$

$$T_{succ} = \frac{\sum_{k=1}^{N_{max}+1} P[k | succ] [S(n,i) + (k-1) \bar{S}(n,i)]}{R_s} \quad (14)$$

式中: R_s 表示符号传输速率; $P[k | succ]$ 表示一帧数据在第 k 次被成功接收的条件概率,如式(15)所示。

$$P[k | succ] = \begin{cases} \frac{1 - \bar{F}(n,i)}{P_{succ}} & k = 1 \\ \frac{\bar{F}(n,i) \bar{F}_e^{k-2} (1 - \bar{F}_e)}{P_{succ}} & k = 2, 3, \dots, N_{max} + 1 \end{cases} \quad (15)$$

最后,根据式(9)和式(11)可以得到无线链路的吞吐量,如式(16)所示。

$$\overline{Th} = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I \overline{Th}(n,i) P(n,i) \quad (16)$$

3 系统优化流程

(1) 首先预测初始信道状态,分配传输模式和传输帧长。

(2) 判断是否传输出错,如果出错,跳至步骤(3);如果传输正确,跳至步骤(6)。

(3) 判断是否能够纠正错误,如果不能,跳至步骤(4);如果能够纠正错误,跳至步骤(6)。

(4) 判断是否超过设定的最大重传次数,如果没有超过,跳至步骤(5);如果超过,记录误帧率,跳至步骤(6)。

(5) 反馈当前信道 SNR 值,重新分配传输帧长和传输模式,重传数据帧。

(6) 结束。

系统流程如图 3 所示。

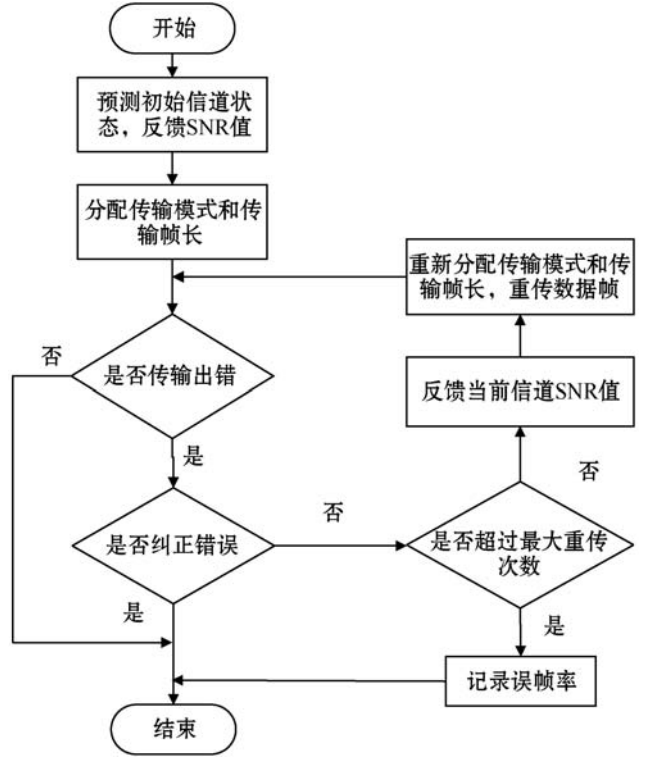


图 3 系统流程

4 仿真实验

本文通过 MATLAB 仿真了 LAOMOFL 方法的性能,仿真实验主要以 AOS 空间通信系统中数据传输的吞吐量和误帧率为测量指标。由于 AMC-ARQ 算法和 AMC-HARQ 算法在通信过程中均采用固定帧长进行传输,使得系统的传输效率不高,HARQ 相比 ARQ 具有纠错功能。本文的 LAOMOFL 是在 AMC-HARQ 的基础上改进的,因此本文将 LAOMOFL 方法与 AMC-ARQ,AMC-HARQ 两种算法进行对比。

4.1 仿真参数设置

建立仿真环境,Nakagami-m 信道衰落参数 $m = 1$,信源为随机产生的比特数据流。将系统允许的最大重传次数 N_{max} 设置为 3,目标误帧率为 0.001,采用卷积码进行信道编码,数据帧帧头的固定长度为 20 字节,设置系统采用的传输帧长为 4 种,传输模式为 7 种,如表 1 和表 2 所示。

表 1 传输帧长的选取

信噪比 SNR 区间	传输帧长
0.052 < SNR ≤ 0.514	112
0.514 < SNR ≤ 2.253	338
2.253 < SNR ≤ 6.576	725
6.576 < SNR	1 550

表 2 传输模式的选取

编码调制模式	调制方式	码率	传输速率	信噪比 SNR 区间
1	BPSK	1/2	1/2	$0.22 < SNR \leq 1.18$
2	QPSK	1/2	1	$1.18 < SNR \leq 2.49$
3	QPSK	3/4	3/2	$2.49 < SNR \leq 4.83$
4	16-QAM	1/2	2	$4.83 < SNR \leq 7.35$
5	16-QAM	3/4	3	$7.35 < SNR \leq 15.97$
6	64-QAM	3/4	9/2	$15.97 < SNR$

4.2 仿真结果及分析

如图 4 所示,随着误帧率的减小,各个帧长下的系统吞吐量都呈增加趋势,并分别在达到峰值之后呈现稳定状态。不同的传输帧长,系统的吞吐量也不一样。误帧率高时,信道条件差,传输帧长小的系统吞吐量较大,这是因为系统的误码率高,采用较小的帧长进行传输可以减少数据在传输过程中出现错误的概率。系统误帧率小的时候,表示信道条件好,采用较大的帧长传输数据,可以提升系统传输的速率,从而提升系统的吞吐量。由此可以得到,吞吐量的大小与帧长的选取有一定关系,在给定误帧率的情况下,存在一个使得系统吞吐量达到最大的帧长。因此,在不同的误帧率下,选取不同的帧长进行传输,可以提高系统的吞吐量。

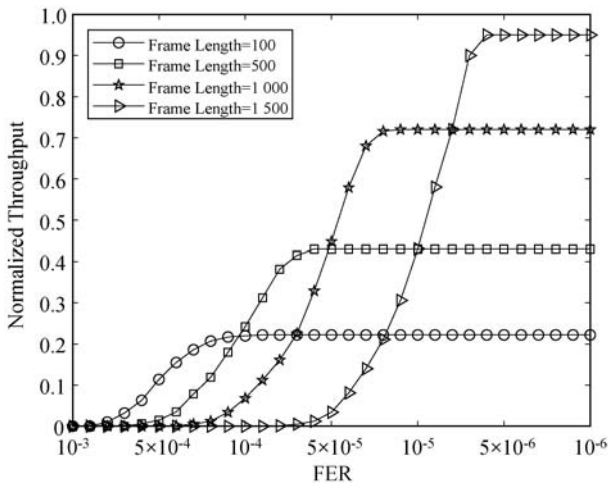


图 4 不同帧长与吞吐量的关系

下面分析系统使用不同的最大重传次数对系统吞吐量的影响。如图 5 所示,在低信噪比条件下,不同重传次数下的吞吐量均为零,即信道状况恶劣的时候,没有数据进行传输。在信道质量较好的情况下,增大最大重传次数可以有效地提高吞吐量,但随着信噪比的升高,吞吐量的增长趋势放缓,不同重传次数的吞吐量逐渐趋于一致。由此可见,在信噪比较低的情况下,可以通过增加系统的重传次数来提升吞吐量,但信道条件好时,增加系统的重传次数对吞吐量的提升效果不

明显,因为在信噪比低的时候,提高系统吞吐量是通过牺牲系统传输时间来实现的,因此要选择合适的最大重传次数。

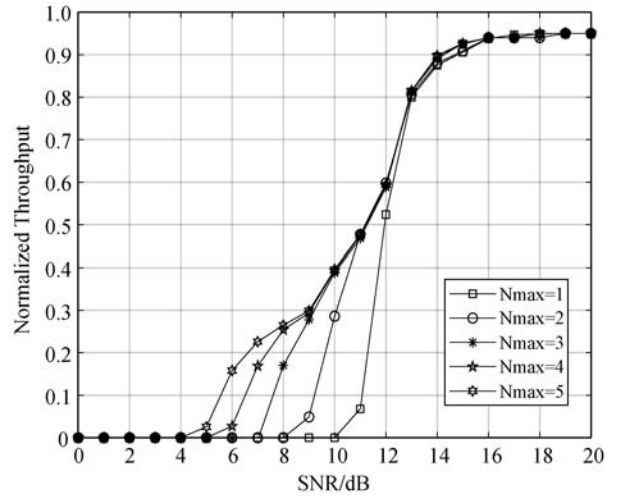


图 5 不同最大重传次数下的系统吞吐量

如图 6 所示,将 LAOMOFL 方法与固定帧长的 AMC-HARQ 和 AMC-ARQ 的误帧率进行对比。可以看出,随着信噪比的增加,四种方法的系统平均误帧率都越来越小。AMC-ARQ 的误帧率始终比 AMC-HARQ 的高,这是因为 HARQ 相比于 ARQ 具有纠错的功能,降低了系统的误帧率。图中帧长为 50 的 AMC-HARQ 的误帧率最低,因为在相同的信噪比下,传输帧长越小,传输出错的概率越低,但传输效率也低,所以在低信噪比条件下,LAOMOFL 的平均误帧率趋向于传输帧长为 50 的 AMC-HARQ 的误帧率。当系统信噪比越来越大时,代表信道条件越来越好,LAOMOFL 系统会选择大的帧长进行传输来提高传输效率,所以高信噪比下 LAOMOFL 的平均误帧率趋向于传输帧长较大的系统的误帧率。

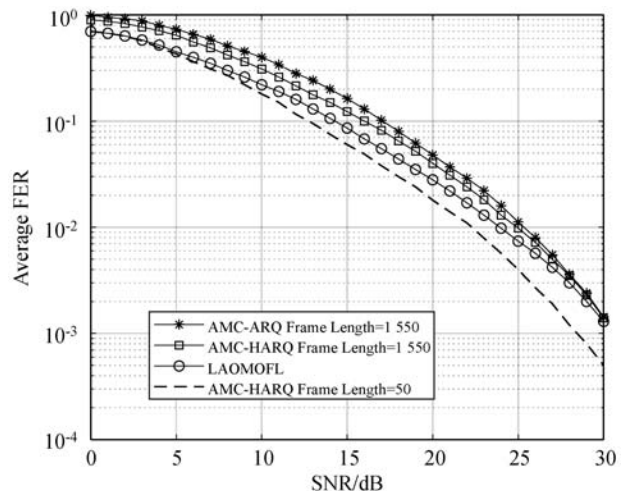


图 6 不同信噪比下的平均误帧率

如图 7 所示,将 LAOMOFL 方法和固定帧长为 1550 的 AMC-HARQ 和 AMC-ARQ 两种方法的吞吐量进行

对比。三种方法的吞吐量都随着信噪比的增加而增长,LAOMOFL方法的吞吐量始终高于两种帧长方法的吞吐量,这是由于系统在传输时自适应地选择传输帧长,可以降低传输过程中出错的概率,也提高了传输效率。在高信噪比的时候,三种方法的吞吐量逐渐相等,这是由于在信道质量好的时候,系统传输过程中很少出错,LAOMOFL会选择较大帧长进行传输,与固定帧长系统的传输帧长相近,因此相比固定帧长传输的系统吞吐量效果提升不明显。

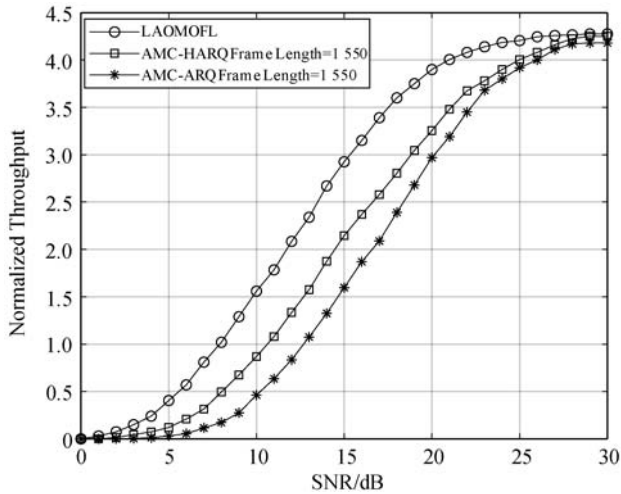


图7 吞吐量性能比较

5 结 语

本文针对AOS空间通信系统的特点,提出基于最优帧长的链路自适应联合优化方法。该方法将可变帧长,自适应编码调制和混合自动重传请求技术进行联合优化,以最大化系统吞吐量为目标,自适应地选择下一帧传输的帧长和编码调制模式,利用混合自动重传对传输出错的数据进行纠错和重传。仿真验证表明该方法在满足系统设定的误帧率的同时,可以有效提升系统的吞吐量。

参 考 文 献

[1] CCSDS. AOS space data link protocol: ISO22666:2015[S/OL]. [2020-12-31]. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:22666:ed-3:v1:en>.

[2] Rich T M. A multi-center space data system prototype based on CCSDS standards [C]//IEEE Aerospace Conference, 2016:1-6.

[3] CCSDS. Space data link protocols summary of concept and rationale[EB/OL]. [2020-12-31]. <http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18/2014/02.17.18.56/doc/CCSDS%20130.2-G-2.pdf>.

[4] 戴昌昊,张德智,胡倩,等.一种基于CCSDS AOS协议的分包遥测调度算法[J].测控技术,2017,36(9):47-49.

[5] 龙吟,朱珂,陈淞,等.面向高级在轨系统的动态服务质量保证方法研究[J].飞行器测控学报,2016,35(2):161-168.

[6] 戴昌昊,曾贵明,梁君,等.基于业务流量预测的AOS自适应帧生成算法[J].计算机测量与控制,2017,25(4):176-178,196.

[7] 兰天,张剑. CCSDS标准信道码技术[J].指挥信息系统与技术,2017,8(6):82-86.

[8] 李林涛,刘昊,张舒义,等.基于CCSDS标准的串行级联卷积码高速并行译码方法[J].北京理工大学学报,2018,38(7):733-738.

[9] 张颖,熊蔚明,王竹刚.近地卫星Ka频段数传链路抗雨衰自适应模式设计[J].国防科技大学学报,2019,41(6):149-155.

[10] 李松,王成华,朱秋明,等.基于CCSDS的自适应传输系统设计及实现[J].航空兵器,2017(1):83-88.

[11] 章俊伟,卞金来,丁良辉,等.慢衰落信道下并行HARQ系统的速率自适应算法[J].计算机工程,2020,47(2):201-211.

[12] Jabi M, Szczecinski L, Benjillali M, et al. AMC and HARQ: How to increase the throughput[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(7):3136-3150.

[13] 李江,左巍.基于COBS串行通信协议的自适应最优帧长分析[J].计算机与现代化,2013(3):116-120.

[14] 杨香玉.无线系统中基于自适应编码调制的跨层设计[D].西安:西安电子科技大学,2015.

[15] Sassioui R, Jabi M, Szczecinski L, et al. HARQ and AMC: Friends or Foes? [C]//IEEE Global Communications Conference//2017:1-7.

(上接第95页)

[10] Huang C, Naghdy F, Du H. Delta operator-based fault estimation and fault-tolerant model predictive control for steer-by-wire systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2018, 26(5):1810-1817.

[11] 杜明志,孙跃东.线控转向系统前轮主动转向控制策略研究[J].汽车实用技术,2020,45(17):38-43.

[12] 张雨新,孙达明.基于PID模糊控制器的闭式泵控系统特性研究与分析[J].中国农机化学报,2019,40(11):150-154.

[13] 从光好.线控转向路感模拟及传动比特性研究[D].合肥:合肥工业大学,2017.

[14] 杨智宇,宗群.交通路网最优路径的搜索仿真研究[J].计算机应用与软件,2017,34(7):19-23,60.

[15] 赵林峰,陈无畏,王俊,等.基于可拓滑模线控转向控制策略研究[J].机械工程学报,2019,55(2):126-134.