

文章编号: 2095-4980(2020)02-0222-06

基于不等差错保护喷泉码的 LTP 协议

曹浩男, 程子敬, 刘亚丽, 李 周, 赵 阳

(中国空间技术研究院 航天恒星科技有限公司, 北京 100091)

摘 要: Licklider传输协议(LTP)是深空通信中一个重要协议,但其自动重传(ARQ)机制无法满足传输时延的要求。为了利用喷泉码无需反馈的特点,降低LTP协议传输时延,同时满足LTP协议中红色数据和绿色数据不同可靠性的要求,将具有不等差错保护(UEP)特性的喷泉码引入LTP协议,得到具有不等差错保护特性的LTP(UEP-LTP)。对喷泉码不同的度分配不同的选窗概率,构造一个指数型的选窗概率函数并对该函数进行优化,由此获得性能更优的UEP-LTP(AUEP-LTP)。仿真结果表明,AUEP-LTP的红、绿色数据误码率可分别达到 $10^{-10.4732}$ 和 $10^{-3.6878}$,满足红、绿色数据不同可靠性要求,同时可减少LTP重传,提高协议性能,更适用于深空通信。

关键词: 深空通信; Licklider传输协议; 喷泉码; 不等差错保护; 可靠性

中图分类号: TN919.3

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019128

LTP based on Unequal Error Protection fountain code

CAO Haonan, CHENG Zijing, LIU Yali, LI Zhou, ZHAO Yang

(Space Star Technology Co., LTD., China Academy of Space Technology, Beijing 100091, China)

Abstract: The Licklider Transmission Protocol(LTP) is an important protocol in deep space communication, but its Automatic Repeat-reQuest(ARQ) mechanism cannot meet the transmission delay requirements. In order to take advantage of the fountain code without feedback and meet the different reliability requirements of red data and green data in the LTP, first of all, the fountain code with characteristics of Unequal Error Protection(UEP) is introduced into the LTP to obtain the LTP with characteristics of UEP(UEP-LTP). Then an exponential window selection probability function is constructed by assigning different selection probabilities of windows to different degrees of the fountain code, and the function is optimized to obtain an Advanced UEP-LTP(AUEP-LTP) with better performance. The simulation results show that the bit error rate of red data and green data of AUEP-LTP can reach $10^{-10.4732}$ and $10^{-3.6878}$ respectively, which can meet the different reliability requirements of red data and green data, reduce the retransmission of LTP and improve the performance, and is more suitable for deep space communication.

Keywords: deep space communication; Licklider Transmission Protocol; fountain code; unequal error protection; reliability

Licklider传输协议(LTP)是一种用于解决深空通信中通信不连续、上下行信道不对称等问题的协议^[1]。由于深空信道往返时延大、信道误码率高, LTP协议的自动重传(ARQ)机制会导致文件传输时延巨大。

2002年, Luby提出了喷泉编码,即Luby变换(Luby Transform, LT)码^[2],它将传统纠错码的处理对象拓展到数据分组,形成了一种高效可靠的前向纠错机制。喷泉码与低密度奇偶校验(Low-Density Parity-Check, LDPC)码^[3-4]等固定码率编码不同,其能够以无码率、随机编码的方式发送,且无需反馈重传和确认,大大减小了文件的传输时延。为满足不同可靠性业务的传输,具有不等差错保护(UEP)的喷泉码成为研究喷泉码的一个重要方向。2007年, RAHNAVARD N等^[5]首次实现了不等差错保护的喷泉码,在选取原始信息符号时增加重要信息比特(More

收稿日期: 2018-11-19; 修回日期: 2019-02-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91538202)

作者简介: 曹浩男(1993-),男,硕士,主要研究方向为深空通信网络、喷泉编码。email:jieans_cao@163.com

Important Bits, MIB)的选择概率,从而提高对 MIB 的保护程度。2009 年, VUKOBRATOVIC D 等^[6]采用扩展窗方法实现了喷泉码的不等差错保护,通过窗口包含使优先级越高的信息符号被包含的窗口越多,来增加对优先级高的信息符号的保护。2013 年, SORENSEN J H 等^[7]采用中间反馈消息解决低优先级数据冗余过大的问题。ZHANG F C 等^[8]提出了一种称为柔性孤子度分布的新的度分布,以满足具有不等差错保护的 LT 码的性能需求。

目前不等差错保护和喷泉码的研究大都是面向普通信道上的多媒体传输^[9]或水下信道^[10]、传感器网络^[11-12]等方向,与深空通信环境差距较大。此外,部分研究通过采用中间反馈的方式改善 UEP 性能^[13-14],但这并不适用于深空通信。因此,本文设计了基于不等差错保护喷泉码的 LTP 协议(UEP-LTP),通过与或树(And-Or Tree)方法分析了 LT-LTP 和扩展窗方式的 UEP-LTP 的译码性能。在此基础上,设计了一个与度大小相关的指数型选窗概率函数,并选取合适的参数,得到性能更好的 AUEP-LTP。与或树仿真证明其较大地降低了红色数据的理论误码率,从而提升了通信性能。

1 LTP 协议与 LT 码

1.1 LTP 协议数据传输原理

LTP 协议基于 ARQ 的重传机制,提供可靠传输和不可靠传输 2 种传输服务,分别称为红色数据(R)和绿色数据(G),且这 2 种服务可以存在于同一个 LTP 数据块中。红色数据执行可靠传输,需要校验和重传;绿色数据则执行不可靠传输,如果绿色数据丢失或损坏,LTP 协议无需校验和重传该绿色数据,即可被丢弃。

从上层协议(Bundle 协议)接收的多个协议数据单元(Bundle)在汇聚层被封装为 LTP 数据块。同时又受底层链路服务的最大传输单元(MTU)的限制,一个数据块分为多个 LTP 数据段。由于 LTP 协议中数据流为单向传输,接收端将确认所接收 LTP 数据的完整性,并将该确认信息作为报告段,以独立的数据段类型排队返回发送端,在出现可用通信链路时,把等待的报告段传至发送端,并开启报告段计时器,以便在发送端未收到应答信息时可以自动重传数据段。当发送端接收到报告段后,即关闭红色部分结束(End of Red Part, EORP)计时器,第一次传输过程中丢失的 LTP 段和要发给接收端的报告段确认信息(报告确认段)将会在出现可用通信链路时,立即重新发送到接收端,接收端接收到报告确认段后将关闭报告段计时器。如果此时成功接收所有 LTP 段,则表明本次会话红色数据接收结束,如果还有丢失的 LTP 段,则继续确认重传直至成功接收所有 LTP 段。

而对于绿色数据,LTP 协议的处理则相对简单,由于无需校验、确认和重传,无论是正确接收或是被丢弃,发送端 LTP 引擎都不做任何处理,也不会对其进行存储,只要全部发送完毕,即结束传输。

1.2 LT 码的编译码原理

LT 码是由 Luby 采用 Tornado 码和 LDPC 码随机稀疏二部图的思想,基于删除信道研究出的一种具有实用性的喷泉码,其可以根据确定的数据产生任意的编码包,无需固定码率,适用于 LTP 协议所应对的深空通信场景。

LT 编码过程如图 1 所示,具体如下:

- 1) 按照度分布 $\Omega(d)$ 选择一个度 d ;
- 2) 从原始数据包 S_1, S_2, \dots, S_k 中随机选择 d 个数据包 $S(i_1), S(i_2), \dots, S(i_d)$;

3) 对选择的 d 个数据包按位异或,生成一个编码包并发送。
重复操作 1)~3)直至发送足够数量编码包。

LT 码在删除信道中的译码算法是一种置信传播(Belief Propagation, BP)算法,其原理是在二部图中不断寻找新的度为 1 的编码包与相关包进行异或运算,恢复原始信息。LT 码具体译码步骤如下:

1) 译码端在所有接收到的编码包 D_1, D_2, \dots, D_n 中寻找度为 1 的编码包,即找到一个 D_i ;如果没有度为 1 的编码包存在,则译码失败。

2) 找到度为 1 的编码包 D_i 后,直接令其对应的原始数据包 $S_i = D_i$ 。

3) 在 S_i 与 S_j 连接的其他接收到的编码包之间进行异或,相应编码包的度数减 1。

重复操作 1)~3)至全部原始数据包得到恢复。

从 LT 码的编译码过程中可以发现,合理的度分布函数能够保证喷泉码的优良性能。鲁棒孤波分布(Robust Soliton Distribution, RSD)是 Luby 提出的一种常用的度分布函数:

$$\Omega_{\text{RSD}}(i) = \frac{\Omega_{\text{SD}}(i) + \tau(i)}{\beta}, \quad 1 \leq i \leq k \quad (1)$$

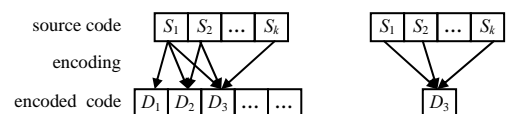


Fig.1 Encoding process of LT code
图 1 LT 码编码过程

$$\text{式中: } \Omega_{\text{SD}}(i) = \begin{cases} 1/k, & i=1 \\ 1/i(i-1), & i=2,3,\dots,k \end{cases}; \beta = \sum_{i=1}^k [\Omega_{\text{SD}}(i) + \tau(i)]; \tau(i) = \begin{cases} S/ik, & 1 \leq i \leq (k/s)-1 \\ \frac{S}{k} \ln \frac{S}{\delta}, & i = \frac{k}{S} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, k \text{ 为源数据包}$$

的数量, $S = c\sqrt{k \ln(k/\delta)}$ 为度为 1 的编码包的数量期望; δ 为接收到 n 个编码包时的译码失败概率; c 为 0 到 1 的常数。

2 基于不等差错保护喷泉码的 LTP 协议

将 LT 码引入到 LTP 协议(LT-LTP)中, 利用其无需反馈的特点, 取消了深空文件传输多次重传引入的额外延迟, 提高了文件传输效率。但由于 LTP 协议中的红色数据和绿色数据有不同的可靠性要求, LT 码这种均等差错保护的编码方式不适合 LTP 协议。事实上, LTP 协议中的红、绿色数据具有典型的 UEP 特点, 因此可以将 UEP 喷泉码代替 LT 码引入 LTP 协议中。

基于不等差错保护喷泉码的 LTP 协议(UEP-LTP)是将扩展窗式不等差错保护喷泉码^[6]对 LTP 协议保护^[15]。LTP 块分为 2 个窗口, 其中的红色数据即是 UEP 喷泉码中的 MIB, 绿色数据即是 UEP 喷泉码中的不重要信息比特(Less Important Bits, LIB)。由于 LTP 段中的报告段, 报告确认段等很小, 且数量很少, 仅考虑其中的数据段, 具体步骤如下:

- 1) LTP 协议将从上层 Bundle 协议中接收到的 Bundle 汇聚成 LTP 块;
- 2) 将 LTP 块按顺序分割成 LTP 段(LTP 块中红色数据在前, 绿色数据在后, 以 EORP 为界);
- 3) 将红色数据设为窗 1, 绿色数据设为窗 2, 所有 LTP 段作为 UEP 喷泉码编码的输入包, 进行 UEP 编码;
- 4) 对生成的 UEP 编码包进行传输;
- 5) 接收端接收到足够数量的编码包后启动 BP 译码, 恢复出原始 LTP 段。

UEP-LTP 性能的关键在于 UEP 喷泉码的特性, 良好的 UEP 喷泉码能够均衡地保证红绿色数据的可靠性。因此从优化 UEP 喷泉码的角度来优化 UEP-LTP。

2.1 与或树分析法

Luby 研究了一种可用于分析喷泉码误码概率的与或树分析法^[16], 其可根据各编码符号和各信源符号与某个信源符号之间的关系, 分析出某个信源符号译码失败的概率。“与节点(AND Nodes)”、“或节点(OR Nodes)”和互相之间的连线组成一棵与或树。一棵与或树必有一个根节点, 且必须为“或节点”。“与节点”的全部子节点都是“或节点”, 其值由其全部子节点的值进行“与操作”所得; “或节点”的全部子节点也都是“与节点”, 其值由其全部子节点的值进行“或操作”得到。

采用 BP 译码算法时, 在算法的每次迭代中, 信息“0”或信息“1”首先通过编码符号传递给信源符号, 然后再从信源符号传递回编码符号。只有在信源符号未被成功恢复时, 它才对相邻的编码符号发送“0”。同理, 在一个编码符号不能将其相邻的信源符号恢复时, 它将对相邻的信源符号发送“0”。可以发现, 在喷泉码的迭代译码过程中, 信源符号执行“或操作”, 而编码符号执行“与操作”。

因此, 可以通过与或树构造出喷泉码的迭代译码过程, 与或树中的“与节点”就是喷泉码的编码符号(图 2 中的 e_1, e_2, e_3), “或节点”就是喷泉码的信源符号(图 2 中的 i_1, i_2, i_3, i_4)。

设 l 为迭代次数, $y_{l,j}$ 为与或树 $T_{n,j}$ 根节点取 0 的概率, 则有

$$\begin{cases} y_{0,j} = 1 \\ y_{l,j} = \delta_j \left(1 - \beta \left(1 - \sum_{k=1}^n q_k y_{l-1,j} \right) \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\delta_j(x) = e^{kp_j \varepsilon \mu(x-1)}$, k 为输入数据包数量, p_j 为双向图中一根线连接到第 j 个重要等级中某一元素的概率, ε 为编码冗余, 即输出 N 个编码包时, $\varepsilon = N/K$, μ 为编码包的平均度数; $\beta(x) = \frac{\Omega'(x)}{\Omega'(1)}$, $\Omega(x) = \sum_{d=1}^k \Omega_d x^d$ 为校验节点

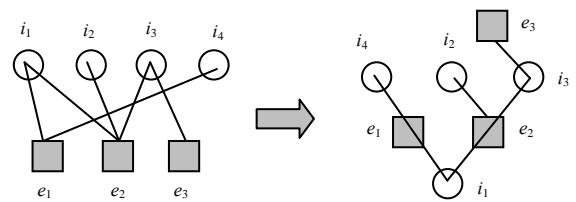


Fig.2 Nodes of And-Or tree
图 2 与或树中的节点

的度分布; q_k 为双向图中一根线连接到第 k 个重要等级数据的概率。

使用与或树方法分析 LT-LTP 和 UEP-LTP 方法的理论误码率。

对于 LT-LTP, 只有一个重要性等级, 即 $j=1$, 双向图中一根线连接到此等级中的某一元素的概率为 $p_1=1/k$, 连接到此等级中数据的概率 $q_1=1$, 根据式(2)可得 LT-LTP 迭代 1 次后的理论误码极限:

$$\begin{cases} y_0 = 1 \\ y_l = e^{-\varepsilon\Omega(1-y_{l-1})} \end{cases} \quad (3)$$

对于 UEP-LTP, 有 2 个重要性等级: 红色数据和绿色数据, 即 $j=R,G$. 设 θ_1 和 θ_2 分别为窗 1 和窗 2 的概率, α_1 和 α_2 分别为红色数据和绿色数据的比例, 则双向图中一根线连接到红色数据中的某一元素的概率为 $p_1=(\theta_1/\alpha_1k)+\theta_2/k$, 连接到绿色数据中某一元素的概率为 $p_2=\theta_2/k$; 连接到红色数据的概率 $q_1=\theta_1+\theta_2\alpha_2$, 连接到绿色数据的概率 $q_1=\theta_2\alpha_2$. 可得 UEP-LTP 迭代 l 次后的理论误码极限:

$$\begin{cases} y_{0,R} = 1 \\ y_{l,R} = e^{-\left(\frac{\theta_1}{\alpha_1}+\theta_2\right)\varepsilon\Omega\left(1-\left(\theta_1+\theta_2\alpha_1\right)y_{l-1,R}-\theta_2\alpha_2y_{l-1,G}\right)} \\ y_{0,G} = 1 \\ y_{l,G} = e^{-\theta_2\varepsilon\Omega\left(1-\left(\theta_1+\theta_2\alpha_1\right)y_{l-1,R}-\theta_2\alpha_2y_{l-1,G}\right)} \end{cases} \quad (4)$$

当 $\theta_1=0$ 时, UEP-LTP 退化为等差错保护的 LT-LTP。

2.2 UEP-LTP 和 LT-LTP 仿真结果

通过仿真分析 LT-LTP 和 UEP-LTP 的理论误码性能。假设 LTP 块中有 500 个源数据包, 其中前 100 个 LTP 段为红色数据包, 后 400 个数据包为绿色数据, 编码冗余度分别为 1.3 和 1.5, 使用鲁棒孤波分布对 LTP 段进行喷泉码编码, 迭代次数为 100。设置参数 $k=500, \alpha=0.2, \varepsilon=1.3, 1.5$, $\Omega(x)$ 为鲁棒孤波分布 ($c=0.1, \delta=0.05$), $l=100$, 对 UEP-LTP 进行仿真, 仿真结果如图 3 所示。

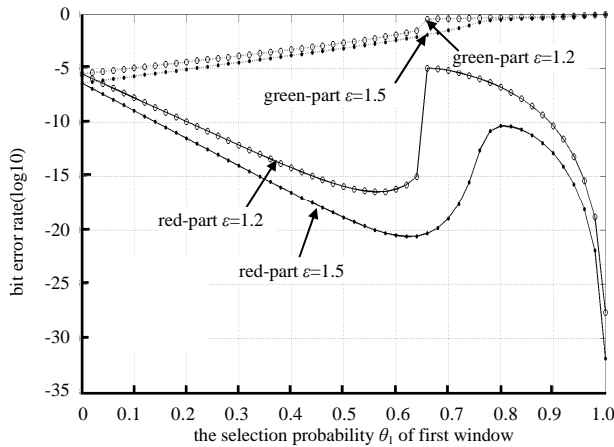


Fig.3 Comparison of performance of UEP-LTP under different selection probabilities of θ_1 first window
图 3 不同选择窗 1 的概率下 UEP-LTP 性能比较

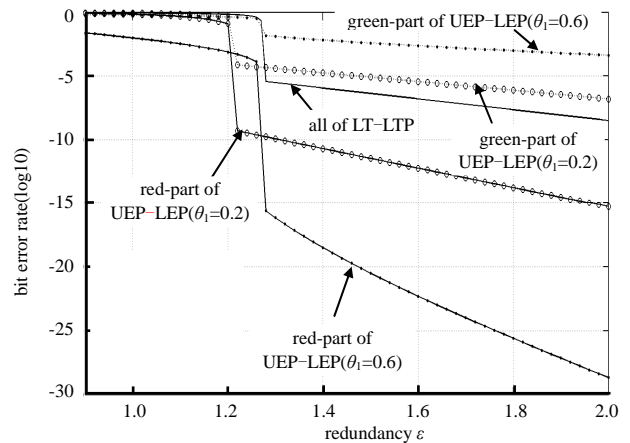


Fig.4 Comparison of performance of UEP-LTP under different redundancies
图 4 不同编码冗余度下 UEP-LTP 性能的比较

从仿真结果来看, UEP-LTP 可以对 LTP 协议中的红、绿色数据提供不同可靠性保证。总体上来看, UEP-LTP 的不等差错保护特性随 θ_1 的增加愈发明显, 当 $\theta_1=1$ 时, 不等差错保护特性达到一个极端, 即红色数据的理论误码率极低, 而绿色数据的理论误码率已经为 1。这是由于此时所有的数据都是从红色数据中选择, 所有的绿色数据都不选择。这也证明 θ_1 不能过大, 要均衡红、绿色数据的性能。

设置 $\theta_1=0.2, 0.6$, 对不同编码冗余度下的 UEP-LTP 性能进行仿真。在此次仿真中加入 LT-LTP 在不同编码冗余度下的理论误码率性能作为对比, 仿真结果如图 4 所示。

从仿真结果看, $\theta_1=0.2$ 时, UEP-LTP 达到译码门限时的编码冗余度为 1.23, 红色数据的理论误码率为 $10^{-9.2946}$, 绿色数据的理论误码率为 $10^{-4.1309}$; $\theta_1=0.6$ 时, UEP-LTP 达到译码门限时的编码冗余度为 1.29, 红色数据的理论误码率为 $10^{-15.6312}$, 绿色数据的理论误码率为 $10^{-1.8390}$ 。LT-LTP 在达到译码门限的编码冗余度为 1.28, 理论误码率为 $10^{-5.4287}$ 。

综上所述,无论是 UEP-LTP 还是 LT-LTP,理论误码率都随编码冗余度的增加而降低,在达到译码门限后有巨大降低。同时也可看出,UEP-LTP 的绿色数据理论误码率相对于 LT-LTP 有所降低,而红色数据理论误码率有很大提升,符合 LTP 协议对红、绿色数据可靠性的要求。相对于 $\theta_1=0.2$,当 $\theta_1=0.6$ 时,不仅译码门限有所提高,且不等差错保护特性过强,使得绿色数据的理论误码率超过 0.01,已经失去编码保护的意义。

2.3 改进的 UEP-LTP

UEP-LTP 将不同可靠性要求的数据分为不同的嵌套窗,然后按照不同的选窗概率 θ_j 来达到 UEP 的优化效果。这种方法本质上是通过提高编码过程中高可靠性要求数据的选取概率来提升红色数据的译码性能。

事实上,根据喷泉码 BP 译码的特性,译码过程总是从度为 1 的数据包开始译码,然后部分数据包的度减 1,产生新的度 1,继续译码直至没有度 1 的包或全部数据包译码完成。由于 BP 译码过程总是先将度 1 的数据包译码成功,即按照度由小到大的次序来译码,因此即使 BP 译码过程中译码失败,也会有一部分低度数的编码包被译出。因此可以将低度数的编码包优先选择红色数据,高度数的编码包优先选择绿色数据,这样即使译码过程中断,也能优先保证红色数据(低度编码包)优先译出。

改进的 UEP-LTP(AUEP-LTP)依然沿用 UEP-LTP 中关于扩展窗的设计,将 LTP 块分为 2 个窗,窗 1 仅包含红色数据,窗 2 包含 LTP 块中的所有数据。从上述分析中可得,AUEP-LTP 的设计主要参数是不同度值时的窗口选择概率。

假定在编码包度为 d 时选择窗 1 的概率为 $\theta_1(d)$,则选择窗 2 的概率为 $\theta_2(d)=1-\theta_1(d)$ 。当 d 增加时, $\theta_1(d)$ 应该随之下降,且下降速度不能太慢,否则出现由于选择窗 1 概率过高,导致绿色数据译码性能不足的问题。为简化计算,构造 $\theta_1(d)$: $\theta_1(d)=A\exp\left(-\frac{d-1}{B}\right)$ 。其中, $A(0\leq A\leq 1)$ 表示选择窗 1 的整体概率, A 越大,则 AUEP-LTP 整体编码过程中选择窗 1 的概率越大,UEP 特性越明显; $B(B>0)$ 表示 $\theta_1(d)$ 随度 d 的增加而下降的速度, B 越大,则下降越慢,UEP 特性越明显。特殊地,当 $A=0$ 时,AUEP-LTP 退化为等差错保护的 LT-LTP。

AUEP-LTP 虽然沿用了 UEP-LTP 的扩展窗设计,但其编码过程与 UEP-LTP 有较大不同。具体如下:

- 1) 根据度分布随机选取一个度数 d ;
- 2) 由度数 d 计算窗 1、窗 2 的选取概率 $\theta_1(d),\theta_2(d)$;
- 3) 分别以概率 $\theta_1(d),\theta_2(d)$ 选取窗 1、窗 2,并在选到的窗中等概率地随机选取一个符号;
- 4) 重复 3),直到选出 d 个符号,并将它们逐个异或,得到一个编码符号;
- 5) 不断重复 1)~4),直到编码完成。

UEP-LTP 中选择数据的方法是确定一个窗之后,全部的 d 个数据包均选自于该窗,而 AUEP-LTP 的编码过程中则是按照概率选择 d 次窗,每次只选择一个数据包。这样的选择方法可以避免在一次编码迭代中仅包含一个窗口的数据,保证编码过程的覆盖性。

依然设 $k=500$, $\Omega(x)$ 为鲁棒孤波分布($c=0.1,\delta=0.05$), $\alpha=0.2,l=100$,并分别设置参数 A 和 B ,对 AUEP-LTP 进行仿真,仿真结果如图 5 所示。

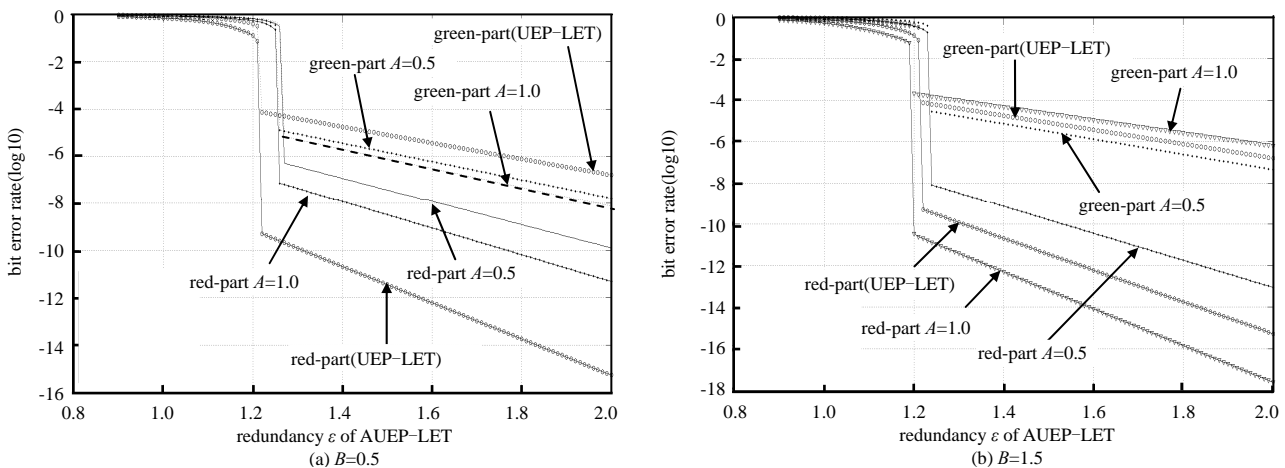


Fig.5 Comparison of performance of AUEP-LTP under different redundancies and parameters A and B

图 5 在不同的 A,B 时 AUEP-LTP 不同编码冗余度的性能比较

从仿真结果可以看出, AUEP-LTP的理论误码率性能与参数 A, B 的设置有很大关系, 符合前文中对 A, B 取值的理论分析。当 $A=1.0, B=1.5$ 时, AUEP-LTP的理论误码率性能更优于 UEP-LTP, 达到译码门限的编码冗余度为 1.20, 红色数据的理论误码率为 $10^{-10.473^2}$, 绿色数据的理论误码率为 $10^{-3.687^8}$ 。

因此在设置合适的参数情况下, 采用 AUEP-LTP 的方法不仅降低了红色数据的理论误码率, 而且在一定程度上降低了达到译码门限的编码冗余度, UEP 性能得到优化。

3 结论

本文在深空通信 LTP 协议的基础上, 加入 LT 码和扩展窗方法的 UEP 码的编码保护, 获得了无需反馈的 LT-LTP 和 UEP-LTP。通过对其进行与或树仿真分析, 证明了采用 UEP-LTP 时不仅能减小深空通信中文件传输的时延, 还可以根据 LTP 业务的需要, 有效保证红色数据的高可靠性。本文还从编码过程中度的大小与译码概率的关系出发, 提出一种 AUEP-LTP 的编码方式, 通过对不同的度分配指数型选择窗的概率, 降低编码冗余, 提高红色数据的译码性能, 并通过与或树分析方法仿真证明 AUEP-LTP 具有更优的性能, 更适用于深空通信。

参考文献:

- [1] RAMADAS M, BURLEIGH S, FARRELL S. Licklider transmission protocol-specification[J]. IRTF, 2008, 4(6):208-304.
- [2] LUBY M. LT codes[C]// 2002 IEEE Symposium on Foundations of Computer Science(FOCS). Vancouver, Canada: IEEE, 2002:271-282.
- [3] 谢学东, 许翠玲, 汪新飞. 高码速率遥感卫星 LDPC 译码模块设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(3):377-381. (XIE Xuedong, XU Cuiling, WANG Xinfei. Design of high code rate LDPC decoding module of remote sensing satellite[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017, 15(3):377-381.)
- [4] 闫峥, 王梦源. 空间通信中调制与编码热点技术探析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(5):736-739. (YAN Zheng, WANG Mengyuan. Hot technology analysis of modulation and coding in space communication[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015, 13(5):736-739.)
- [5] RAHNAVARD N, VELLAMBI B N, FEKRI F. Rateless codes with unequal error protection property[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(4):1521-1532.
- [6] VUKOBRATOVIC D, STANKOVIC V, SEJDINOVIC D, et al. Scalable Video multicast using expanding window fountain codes[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2009, 11(6):1094-1104.
- [7] SORENSEN J H, POPOVSKI P, OSTERGAARD J. UEP-LT codes with intermediate feedback[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(8):1636-1639.
- [8] ZHANG F C, DUAN X Y, DONG M. Construction of LT codes with unequal erasure protection for rateless data transmission[C]// Tenth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks. Bhopal, India: IEEE, 2013:1-5.
- [9] WU Kesong, CAO Xianbin, CHEN Zhifeng, et al. Adaptive mobile video delivery based on fountain codes and DASH: a survey[J]. ZTE Communications, 2018, 16(3):9-14.
- [10] ZHAO D, WEN J, SI J. A UEP-LT codes design with feedback for underwater communication[J]. Journal of Sensors, 2016: (2016):1-8.
- [11] ZHAO T, XIE Y, LIU X, et al. Research on novel fountain code for UAV formation flight control in UV communication[C]// 2017 7th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies(MAPE). Xi'an, China: [s.n.], 2017:120-123.
- [12] YI B S, YAO W Q, LI W Z. Study on effective transmission scheme based on fountain codes in wireless multimedia sensor network[C]// The 3rd International Conference on Wireless Communication and Sensor Networks(WCSN 2016). Wuhan, China: [s.n.], 2016:603-606.
- [13] YUAN L, LI H, WAN Y. Performance analysis of EWF codes with intermediate feedback[C]// 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Shanghai, China: IEEE, 2016.
- [14] KEYAN D, LEI Y, YI W, et al. Expanding window fountain codes with intermediate feedback over BIAWGN channels[J]. IET Communications, 2018, 12(8):914-921.
- [15] SHI L, JIAO J, SABBAGH A, et al. Integration of Reed-Solomon codes to licklider transmission protocol(LTP) for space DTN[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2017, 32(4):48-55.
- [16] LUBY M, MITZENMACHER M, SHOKROLLAHI A. Analysis of random processes via and-or tree evaluation[C]// The 9th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms. USA: SIAM, 1998:364-373.