

深空通信的级联码方案研究^①

张 勋^{②*} 曹 阳^{③*} 彭小峰* 任发韬* 陈 果* 罗运桓^{**}

(* 重庆理工大学电气与工程学院 重庆 400054)

(** 中国电信股份有限公司仙桃分公司 仙桃 433000)

摘 要 针对传统卢比变换-低密度奇偶校验(LT-LDPC)码不能有效解决深空通信中的通信中断与高通信误码率等问题,该研究采用弱鲁棒孤子分布以及改进型置信传播算法对 LT 码进行了优化,然后将优化的 LT 码(ILT)码与 LDPC 码级联生成 ILT-LDPC 码,并应用于深空通信中。通过模拟深空实验,从译码效率与译码开销两方面比较了 LT-LDPC 码与 ILT-LDPC 码的性能,同时从误码率与中断概率两方面比较了两者的性能。仿真结果表明,相比于 LT-LDPC 码,ILT-LDPC 码译码效率增大,译码开销下降,且在深空通信中,其通信误码率更低,信噪比阈值更高。因此,该级联码能提高深空通信数据的可靠性。

关键词 深空通信, ILT-LDPC 码, 译码效率, 译码开销, 误码率, 中断概率

0 引 言

深空通信具有距离远、信号弱、延时长、通信不稳定、数据量大等特点,故在深空通信过程中会出现传播延时长、通信链路易中断、通信误码率高、数据易丢失等问题。为了从深空中的低信噪比条件下准确恢复传输信息,信道编码由于其纠错检错的特性,可作为一种有效恢复信息的手段。传统的编码方式不能保证在深空中信息传输的可靠性^[1],而喷泉码作为一种无码率、无反馈信道的编码方式,可解决深空通信中信息丢失、反馈重传的问题,故不存在反馈拥塞问题^[2-5],同时其编译码复杂度低,可降低深空通信中的信息编译码时间,通信延时下降。喷泉码也具有恢复闪断数据的能力,有效改善了信号闪断等问题^[6]。

卢比变换(Luby transform, LT)码^[7,8]作为一类实用的喷泉码,是一种适用于删除信道的纠错编码方式。由于深空中的白噪声对通信过程有很强的干扰^[9,10],LT 码不具有抗干扰、抗误码性,而低密度奇

偶校验(low density parity check, LDPC)码作为一种基于稀疏校验矩阵的编码方式,其译码算法能并行运行,因而抗干扰能力强,故提出了卢比变换(LT)码与低密度奇偶校验(LDPC)码级联的方法^[11,12]。由于深空通信的不稳定性,卢比变换-低密度奇偶校验(LT-LDPC)码增大了通信成功率,但可能仍存在较高的通信中断概率与通信误码率。为进一步解决深空通信过程中遗留的问题,本文 LT 码的度分布与译码算法分别采用弱鲁棒孤子分布(weak robust soliton distribution, WRSD)以及改进型置信传播(improved belief propagation, IBP)算法,即优化的 LT(Improved LT, ILT)码,从而将 ILT 码与 LDPC 码级联,得到 ILT-LDPC 级联码方案。通过模拟深空通信环境,并通过实验仿真比较 LT-LDPC 码与 ILT-LDPC 码的通信性能。

1 LT-LDPC 级联码

1.1 LT 码编译码原理

LT 码作为喷泉码中一类实用的编码方式,其编

① 国家自然科学基金(61205106),重庆市教委科学技术项目(KJ1709205)和重庆市教委科学技术项目(KJ1500934)资助。
② 男,1992年生,硕士生;研究方向:信道编码;E-mail: 1437297890@qq.com
③ 通信作者,E-mail: caoyang@cqut.edu.cn
(收稿日期:2017-06-01)

译码过程中的度分布是影响性能的关键技术之一^[13]。好的度分布能让接收端用较少的编码数据包准确恢复原始数据包。因此,度分布的好坏对于 LT 码是至关重要的。

LT 码编码过程如图 1 所示,度的定义:每个编码数据包是由几个原始数据包经过异或运算得出的,且生成该编码数据包的原始数据包的个数叫做度,用 d 表示。在图 1 中,由 3 个原始数据包经过异或生成 1 个编码数据,故该编码数据包的度 $d=3$ 。

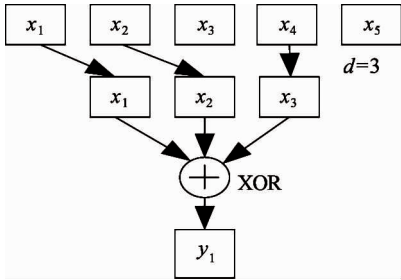


图 1 LT 编码示意图

若原信息由若干数据包组成,则 LT 编码步骤如下:

- (1) 由鲁棒孤子分布 $\mu(d)$ 随机选取一个度值 d 。
- (2) 从原信息的若干数据包中随机选取 d 个数据包,并将该 d 个原始数据包进行异或,生成一个编码数据包。
- (3) 重复这一过程,直到生成无限长的编码序列。

LT 码译码过程如图 2 所示。图 2 为二分图,上面 3 个节点为原始数据包,下面 4 个节点为编码数据包,该过程为 BP 算法。具体步骤如下:

- (1) 从图 2 下面 4 个节点中找到度为 1 的编码数据包,且 y_2 的值为 0,若未找到度为 1 的编码数据包,接收端继续接收编码数据包,直到度为 1 的编码数据包出现。
- (2) 度为 1 的编码数据包与原始数据包 x_i 相连,由编码原理知,相连的两者相等,从图 2(a)可得到, $y_2 = x_2$ 。
- (3) 其他与原始数据包 x_i 邻接的编码数据包 $y_j(i \neq j)$,存在 $y_j = x_i \oplus y_j$ 。
- (4) 将与原始数据包 x_i 邻接的所有边均移除。

(5) 重复①至④之间的过程,直到所有的原始数据包恢复出来或者没有度为 1 的编码数据包,从而译码结束。

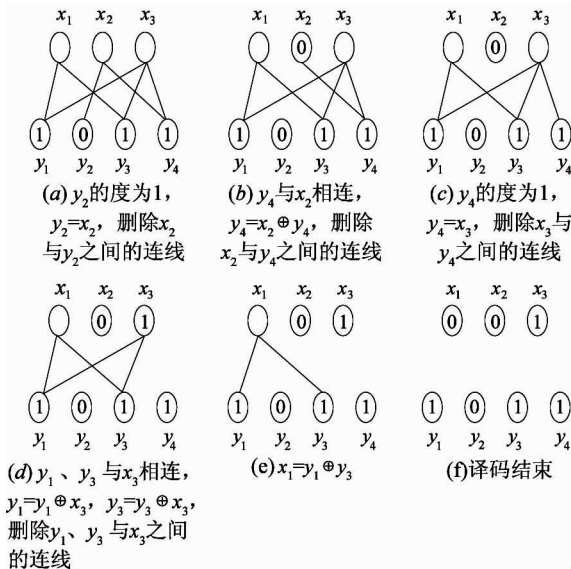


图 2 LT 译码示意图

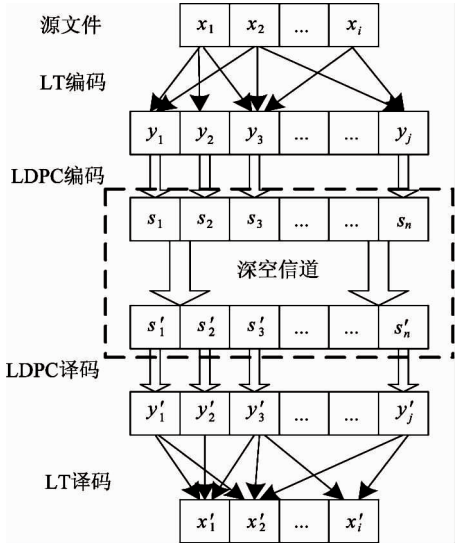


图 3 LT-LDPC 码编译码结构

1.2 LT-LDPC 码的构造

文献[3]的 LT-LDPC 码编译码结构图如图 3 所示,从图 3 中可以看出,源文件中的数据包由 LT 编码后再以 LDPC 码作为校验与检错手段,然后进入深空信道。

深空通信存在通信时延与低效率的反馈重传,而 LT 码无需反馈重传,只要接收到比源文件稍多的数据包即可完整恢复原文件,LDPC 码作为校验

与检错的手段,可提高成功译码的概率,进而 LT-LDPC 码提高了深空通信的通信成功率。

2 ILT-LDPC 级联码

由于深空通信的不稳定性,LT-LDPC 码不能较好地满足实验要求,可能存在较高的通信中断概率与通信误码率等问题,因此本文在 LT 码的基础上,将其进行优化,之后再与 LDPC 码级联,从而达到需求。

2.1 ILT 码

传统的 LT 码采用的度分布是鲁棒孤子分布 (robust soliton distribution, RSD),RSD 如下所示,设 RSD 为 $\mu(\cdot)$,参数 $c > 0, \delta \in [0, 1]$,且 $S = c \cdot \sqrt{k} \ln(\frac{k}{\delta})$,该度分布决定了 LT 码的复杂度为 $O(\ln(k/\delta))$,从而 RSD 表达式为

$$\mu(x) = \frac{\rho(x) + \tau(x)}{\beta}, \quad 1 \leq x \leq k \quad (1)$$

其中

$$\rho(x) = \begin{cases} 1/k, & x = 1 \\ 1/x^2 - x, & x = 2, \dots, k \end{cases} \quad (2)$$

$$\tau(x) = \begin{cases} \frac{S}{kx}, & x = 1, 2, \dots, (k/S) - 1 \\ \frac{S}{k} \log(S/\delta), & x = k/S \\ 0, & x > k/S \end{cases} \quad (3)$$

$$\beta = \sum_x [\rho(x) + \tau(x)] \quad (4)$$

在 LT 编码过程中,采用弱鲁棒孤子分布 (WRSD),会使 LT 码具有更高的译码效率^[14]。设 $\varepsilon > 0, D = \lceil 4(1 + \varepsilon)/\varepsilon \rceil$,且 $\mu = (\varepsilon/2) + (\varepsilon/2)^2$,则 WRSD 可表示为

$$R(x) = \begin{cases} \frac{S}{S+1}, & x = 1 \\ \frac{1}{(x-1)x(S+1)}, & 2 \leq x \leq D \\ \frac{1}{D(S+1)}, & x = D+1 \\ 0, & D+2 \leq x \leq k \end{cases} \quad (5)$$

设给定参数值 $c = 0.03, \delta = 0.1, \varepsilon = 0.05$,在不同的原始数据包数量条件下,通过模拟仿真,得出如图 4 所示的译码失败概率的仿真图。

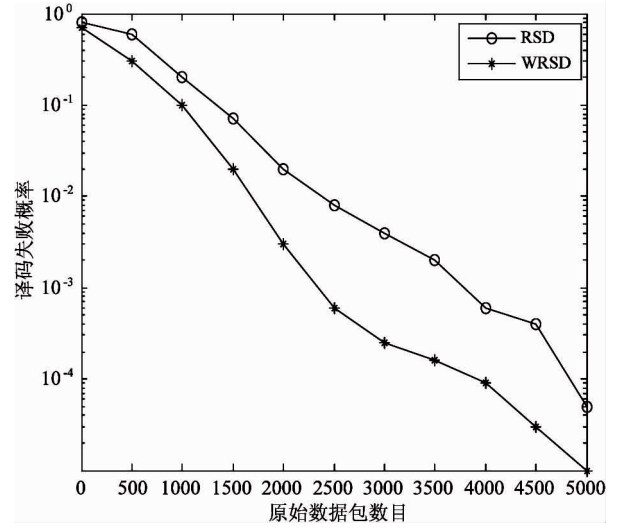


图 4 译码失败概率

由于 WRSD 比 RSD 具有更低的编码复杂度,从分析图 4 可知,当原始数据包数目相同时,在恢复相同数目的原始数据包的条件下,相比于 RSD,WRSD 的译码失败概率更低。因此,WRSD 可用较少的编码数据包覆盖整个原始信息。

传统 LT 码的置信传播 (BP) 译码过程如图 2 所示,若接收端没有度为 1 的编码数据包,且原始数据包还未完全恢复,则表明译码失败,这时可采用高斯消元 (GE) 法,带入生成矩阵可求得原始信息。

图 5 为 IBP 算法,首先开始执行 BP 译码,若译码失败,假设某个未恢复的原始数据包在接收端已知,能使译码持续进行,则该原始数据包被称为猜测节点。猜测集为猜测节点的集合,当猜测集中的猜测节点已知,则译码成功。获得猜测集后,BP 译码才算成功完成。任何的原始数据包可表示为 $a_0 \oplus a_1 b_1 \oplus \dots \oplus a_f b_f$,其中 $a_0, a_1, \dots, a_f \in [0, 1], b_1, b_2, \dots, b_f$ 表示猜测节点的值, f 表示猜测集中猜测节点的个数。在获得与猜测集相关的线性方程组后,可通过高斯消元 (GE) 法最终来确定猜测集中的值。IBP 算法能够成功译码的充分必要条件为猜测集中猜测节点的值唯一且已知。

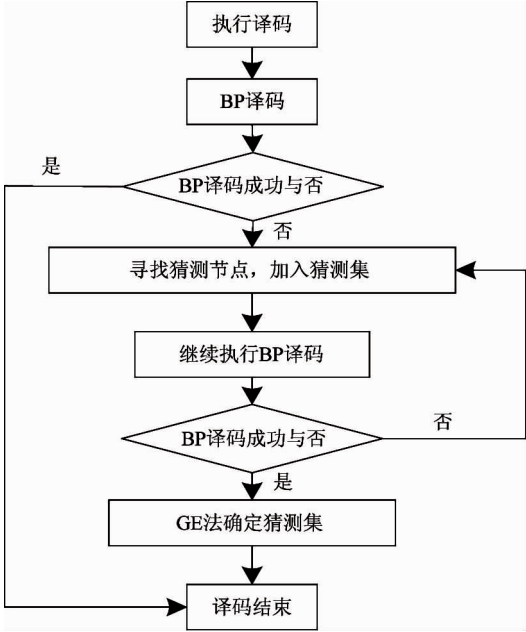


图 5 改进型置信传播 (IBP) 算法流程图

由文献[15]的仿真得出,IBP 译码算法性能要优于 BP 译码算法,且当译码开销较大时,IBP 译码算法性能接近于 GE 译码算法。

因此,将采用 WRSD 与 IBP 算法的 LT 码称为 ILT 码。

2.2 ILT-LDPC 码性能分析

假设实验中等效删除信道丢包率为 12%,译码效率 $\psi = \frac{n}{m \times (1 - 12\%)}$, n 表示恢复的原始数据包数目, m 表示发送的编码数据包数目, $m \times (1 - 12\%)$ 表示接收到的编码数据包数目。通过仿真得出不同级联码的译码效率与译码开销的比较图,如图 6(a)所示。从图 6(a)中可以看出,随着发送的原始数据包的增加,两种级联码的译码效率均逐渐增加,上升趋势都是逐渐增大,但 ILT-LDPC 码译码效率始终高于 LT-LDPC 码的译码效率,且高度差大约为 0.01 ~ 0.03。

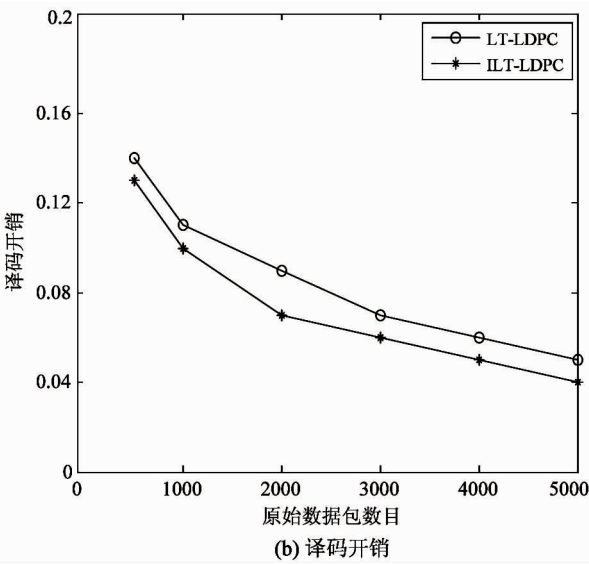
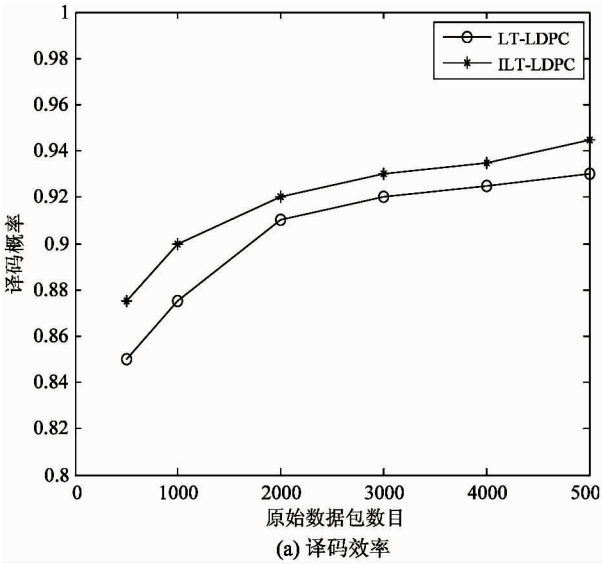


图 6 不同级联码的译码效率与译码开销

译码开销 $\varphi = \frac{m - k}{m}$, k 表示发送的原始数据包数目。从图 6(b)中可以看出,随着发送的原始数据包的增加,两种级联码的译码开销均逐渐减少,上升趋势都是逐渐下降,但 ILT-LDPC 码的译码开销始终低于 LT-LDPC 码的译码开销,且差值大约为 0.01 ~ 0.02。

因此,相比于 LT-LDPC 码,ILT-LDPC 码存在较高的译码效率以及较低的译码开销。

3 基于 ILT-LDPC 码的深空通信

ILT-LDPC 码的编译码系统框图如图 7 所示,该级联码系统是以 ILT 码作为外码,以 LDPC 码作为

内码。内码作用是对于从深空信道中接收到的二进制信息单元进行编译码,若译码成功,接收该二进制信息单元,若译码失败,放弃该二进制信息单元;外码的作用是将接受到的整个信息进行编码,不需要将错误信息反馈给外码编码器,只要外码译码器接收到比原始数据包稍多的编码数据包,就能成功恢复原始信息,而无需反馈重传,这一点符合深空通信延时极长,不能反馈重传的要求。LDPC 编码器、深空通信信道、LDPC 译码器这三部分可被看作为等效删除信道,如图 7 的虚拟框所示。因此,ILT 码可利用此等效删除信道在深空中进行信息传输,有效地解决信息丢失,通信中断以及通信误码等问题。

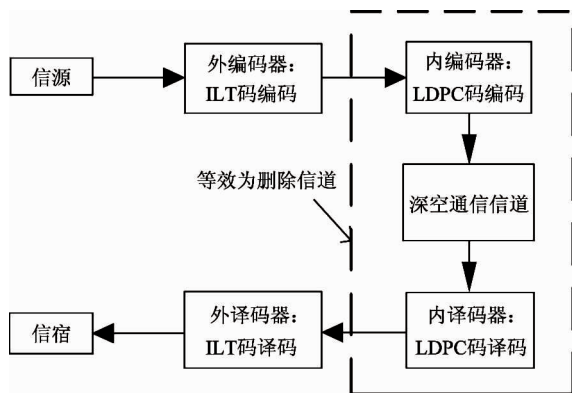


图7 ILT-LDPC 码系统框图

4 仿真结果及其分析

由于深空通信信道与加性高斯白噪声(AWGN)信道非常接近,故本文将深空通信信道等效为AWGN信道。模拟深空通信实验条件:地球上的通信实体与深空中飞行器之间的通信距离为30万公里,发射的信号为Ka频段的无线电信号,其频率分别为32GHz,飞行器上的接收天线直径大约为10m,LT码中的一些参数设置为 $c = 0.03$, $\delta = 0.1$, $\varepsilon = 0.05$,采用2/3码率(512,342)的LDPC码。对LT码、LDPC码、ILT码、LT-LDPC码以及ILT-LDPC码的误码率性能进行仿真,如图8所示。

从图8可以看出,当采用LT码时,随着信噪比的逐渐增加,其误码率逐渐下降,且下降趋势不明显;当采用ILT码时,与LT码相比,随着信噪比的增大,其误码率的下降趋势较大;当采用LDPC码时,与LT码与ILT码相比,随着信噪比的增大,其误码

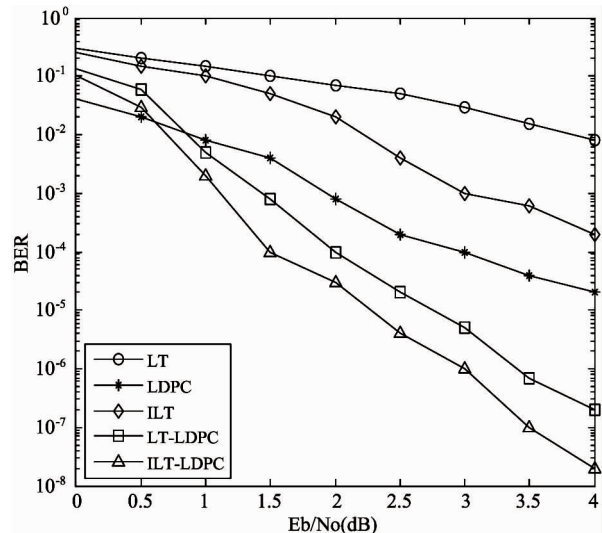


图8 不同码间的性能比较图

率的下降趋势更大,且下降趋势也逐渐增大。而采用级联码的误码率均低于LT码的误码率,与LDPC码相比,在低信噪比时,采用级联码的误码率都大于采用LDPC码的误码率,随着信噪比的逐渐增大,其误码率迅速下降,明显小于后者。当采用LT-LDPC码时,其误码率与采用LDPC码的误码率相同时的信噪比大约为0.8dB,且其误码率下降趋势明显;当采用ILT-LDPC码时,其误码率与采用LDPC码的误码率相同时的信噪比为0.6dB左右,与LT-LDPC码相比,有大约0.2dB的编码增益,同时,在任意信噪比的条件下,采用ILT-LDPC码的性能更好,且两者的编码增益逐渐增大,当误码率为 10^{-6} 左右时,编码增益大约为0.4dB。所以,采用ILT-LDPC码的误码率性能要优于LT-LDPC码的误码率性能。

深空通信的中断概率表达式如下^[16]:

$$P_{\text{out}} = \Pr\{\gamma < \gamma_{th}\} = \int_{\gamma_{th}}^{\infty} f(x) dx \quad (6)$$

其中

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left[-\frac{(\ln X - m_x)^2}{2\sigma_x^2}\right] \quad (7)$$

式(7)中, $X = -20 \log |x|$, x 、 m_x 、 σ_x 可参考文献[17]。

从图9可以看出,随着信噪比阈值的增大,深空通信的中断概率也随之增大,且ILT-LDPC码的中断概率曲线略低于LT-LDPC码的曲线,当阈值 $\gamma_{th} = 70\text{dB}$ 时,LT-LDPC码的中断概率为0,而ILT-LD-

PC 码的中断概率约为 0.1。

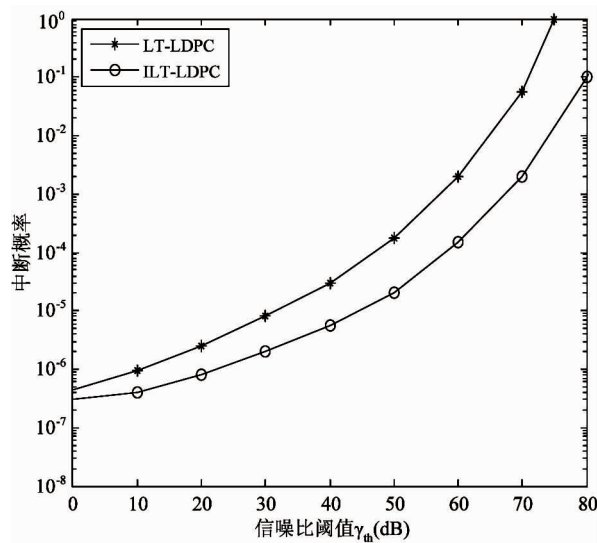


图 9 不同级联码间的中断概率比较图

由此可见,在深空通信中,采用 ILT-LDPC 码的误码率性能要明显优于 LT-LDPC 码的误码率性能,且前者完全中断时的阈值要高于后者,故 ILT-LDPC 码更适合深空通信的大数据传输,能有效解决通信过程中出现的相关问题。

5 结 论

本文以深空通信中存在的通信中断与高通信误码率等问题为出发点,结合 LT 码无需反馈重传的特点与 LDPC 码抗干扰和检错的能力,联合成为 LT-LDPC 码,提高了深空通信的通信成功率,由于深空通信的不稳定性,通信过程中仍可能存在较高的通信中断概率与通信误码率,为进一步解决深空通信中的遗留问题,本文将 LT 码进行优化,即在度分布与译码算法方面进行优化,得到 ILT 码,再将 ILT 码与 LDPC 码联合生成 ILT-LDPC 码,并将此级联码应用于深空通信中。在基于 ILT-LDPC 码的深空通信中,将 LDPC 编译码器与深空信道等效为删除信道,在此信道中进行模拟仿真,从译码效率与译码开销方面分析比较该级联码性能,从通信误码率与通信中断概率方面分析比较深空通信采用该级联码的通信性能,结果表明:与 LT-LDPC 码相比,ILT-LDPC

码的性能有较大提升,且在深空通信中,其通信性能亦有较好的提升。下一步的准备工作是研究 LT 码新的构造方法。

参考文献

- [1] 翟政安,罗伦,时信华. 深空通信信道编译码技术研究[J]. 飞行器测控学报, 2005, 24(3): 1-5
- [2] Byers J W, Luby M. A digital fountain approach to asynchronous reliable multicast[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2002, 20(8): 1528-1540
- [3] 焦健,张钦宇,李安国. 面向深空通信的喷泉码编码设计[J]. 宇航学报, 2010, 31(4): 1156-1161
- [4] 顾术实,张钦宇,焦健. 一种适用于深空通信的有限随机性喷泉码算法[J]. 宇航学报, 2011, 32(12): 2545-2549
- [5] 李云鹤,顾术实,焦健,等. 面向火星临近空间的分布式中继纠错编码机制研究[J]. 宇航学报, 2013, 34(7): 963-970
- [6] 吴伟仁,林一,节德刚,等. 喷泉码的遥测抗闪断技术应用研究[J]. 宇航学报, 2013, 34(1): 86-91
- [7] Luby M. LT codes[C]. In: *Proceedings of the 43rd Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS'02)*. Vancouver, Canada, 2002. 271-280
- [8] Mackay D. Fountain codes[J]. *IEEE Communications Proceedings*, 2005, 152(6): 1062-1068
- [9] 高自新,吴新华. 无线衰落信道的空时编码技术研究[J]. 无线电通信技术, 2011, 37(1): 30-33
- [10] 雷婷,张建志. LDPC 编译码算法研究[J]. 无线电工程, 2012, 42(10): 8-9,26
- [11] 李晖,姚文顶,陈立甲,等. 深空通信中喷泉码技术研究[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(1): 40-44
- [12] 赵大恒,李旭东,李春祯. LT 码在深空通信中的应用研究[J]. 无线电通信技术, 2015, 41(6): 92-96
- [13] 雷维嘉,谢显中,李广军. 采用数字喷泉码的无线协作中继方案及其性能分析[J]. 电子学报, 2010, 38(1): 228-233
- [14] Shokrollahi A. Raptor codes[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(6): 2551-2567
- [15] 何秀慧,蒋敏兰. 一种改进的 LT 码置信传播译码[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(14): 109-111
- [16] Pantelis D A, Athannios P, Massimo B. Cooperative deep space communications at Ka band _ outage performance analysis[C]. In: *Proceedings of the 2nd Interna-*

tional Conference on Advances in Satellite and Space
Communications, Athens, Greece, 2010. 5-10

[17] International Telecommunication Union. R P. 618-9-2007

Propagation data and prediction methods required for the
design of earth-space telecommunication systems [S].

USA: Hans Publishers, 2007

Research on a concatenated code scheme for deep space communication

Zhang Xun^{*}, Cao Yang^{*}, Peng Xiaofeng^{*}, Ren Fatao^{*}, Chen Guo^{*}, Luo Yunhuan^{**}

(^{*} School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054)

(^{**} China Telecom Corporation Ltd. Xiantao Branch, Xiantao 433000)

Abstract

In view of the problem that traditional Luby transform-low density parity check (LT-LDPC) codes can not effectively solve the communication interrupt and the higher communication bit error rate of deep space communications, this study uses the weak robust soliton distribution and the improved belief propagation algorithm to optimize LT codes to create improved LT (ILT) codes, and then, combines the ILT codes with LDPC codes to form ILT-LDPC codes and applies them to deep space communications. By deep space simulation, the performance of LT-LDPC codes and ILT-LDPC codes is compared from the two aspects of decoding efficiency and decoding overhead, and also from the bit error rate and the outage probability. The simulation shows that compared with LT-LDPC codes, ILT-LDPC codes have higher decoding efficiency and lower decoding overhead, and the communication bit error rate is lower, while the threshold of signal to noise ratio is higher. Therefore, concatenated codes can improve the reliability of deep space communication data.

Key words: deep space communication, ILT-LDPC code, decoding efficiency, decoding overhead, bit error rate, outage probability