

基于多级反馈式喷泉码的深空传输协议研究

陈康妮 钱丽萍 陈庆章

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)

摘要 针对深空环境中高误码率、长传输时延的通信特点,在传统喷泉码的基础上提出了一种基于多级反馈式喷泉码的深空通信传输协议。给出了基于多级反馈式喷泉码传输协议具体的编码结构和传输方案,从理论上分析了该传输协议与非反馈喷泉码传输协议的编码有效性和传输时间,并通过实验比较了上述两种传输协议以及基于喷泉码的译码转发传输协议在不同误码率和传输距离的深空通信环境下的传输性能。实验结果表明,基于多级反馈式喷泉码的传输协议提高了编码有效性,减少了文件传输时延。

关键词 深空通信,多级,反馈,喷泉码,传输时延

中图分类号 TN927 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.9.027

Multi-stage Feedback Fountain Code for Deep Space Transmission Scheme

CHEN Kang-ni QIAN Li-ping CHEN Qing-zhang

(College of Computer Science & Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract A transmission scheme of deep space communication based on multi-stage fountain code was proposed to cope with the high error rate and long propagation delay in deep space communications. In particular, the framework of coding and transmission were first presented, and then the coding efficiency and transmission time of this scheme were theoretically evaluated comparing to the present transmission scheme without feedback. Additionally, the performance of these two schemes and the decoding forward transmission scheme at difference bit error rates and transmission distances were analyzed. The results show that the proposed transmission scheme improved the coding efficiency and reduces the file propagation delay.

Keywords Deep space communication, Multi-stage, Feedback, Fountain code, Propagation delay

1 引言

深空探测是人类在新世纪的 3 大航天活动之一^[1],但遥远的通信距离严重地影响了数据传输的性能。为保障深空探测活动的顺利展开,围绕深空信息的处理和传输等通信技术的相关研究备受重视。传统的深空传输协议采用自动重传请求机制(ARQ)来保证数据的准确传输,但高误码率、长传输时延等通信特点使得深空的重传效率很低,并且重传机制需对每个丢失的数据包进行逐一确认反馈,容易引起“反馈风暴”^[2,3]。为了保证深空信息传输的可靠性,研究者将传统的前向纠错技术与深空传输协议相结合,通过传输冗余分组来保证信息传输的可靠性^[4-6]。前向纠错技术通过预估信道的丢包率来选取合适的编码率,若丢包率的估值小于实际信道误码率,则无法恢复出原始信息,过大则会引起不必要的冗余传输^[6]。

传统喷泉编码^[7-9]即非反馈喷泉码,因只需极少的反馈信息且无需预估信道丢包率的特点被广泛应用到深空通信中,其通过源源不断地产生编码包来确保目的节点能够成功译码出原始信息^[10,11]。LT(Luby Transform)码^[12]是第一种可实

现的喷泉码,具有简单的编译码方法以及较小的译码开销和计算复杂度^[13]。但是,由于深空环境高误码的特点,由源节点产生的编码包在传输过程中大量丢失,造成源节点大量的编码计算成为无效操作,更引发了目的节点译码失速的问题^[14]。为了弥补传输过程中丢失的编码包,需要源节点不断地补充更多的编码包,这大大增加了源节点的编码负担,严重影响了整体传输性能。

反馈式喷泉码利用反馈信息,调整源节点的度分布策略,以实现更低的译码开销和计算复杂度,目前的研究主要面向地面移动网络。文献[14]在 LT 码的基础上提出了一种转移 LT(Shifted LT, SLT)码,在编码过程中引入包含已译码信息的反馈,根据反馈信息,编码器对度分布进行调整,从而降低译码开销。文献[15]提出了一种应用于广播系统的新型 SLT 码,其利用有限的反馈来降低编码开销。文献[16]通过反馈信息,提出了一种新的度分布,该方法有效降低了译码开销和编码复杂度。文献[17-19]通过反馈信息,同时对编码结构和度分布函数做了改进。在地面网络中,源节点基于反馈信息能够灵活地调整编码策略,但在深空长传输时延的通信环境下,反馈信息往往因无法及时到达源节点而不能发挥作用。

到稿日期:2015-08-12 返修日期:2015-10-28 本文受国家自然科学基金(61379122,61572440),浙江省自然科学基金(LR16F010003)资助。
陈康妮(1990—),女,硕士生,主要研究方向为物联网通信技术,E-mail: conine_chen@163.com;钱丽萍(1981—),女,副教授,硕士生导师,主要研究方向为无线网络、认知无线网络、智能网络,E-mail: lpqian@zjut.edu.cn;陈庆章(1955—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为传感网、物联网、计算机网络及其应用。

为解决上述问题,本文针对深空环境提出了一种基于多级反馈式喷泉码的传输协议。本协议利用反馈信息,调整 LT 码的编码策略,实现多级编码方法,让中继参与到编码工作中,以提高整体传输性能。本文从理论和仿真实验两方面对基于多级反馈式喷泉码传输协议和非反馈喷泉码传输协议进行比较,证明了该传输协议能有效降低源节点的编码负担,缩短传输时延。

2 基于多级反馈式喷泉码的传输协议设计

深空中典型的多级网络包含一个信源节点、一个目的节点以及多级中继转发节点,如图 1 所示。

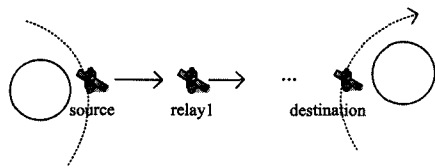


图 1 多级深空通信网络

在图 1 所示的通信网络中,非反馈喷泉码的源节点承担所有编码工作,中继负责数据的接收转发。但是深空高误码、长时延等通信特点延长了整体的传输过程,大大地增加了源节点的编码负担。因此,本文设计了一种基于多级反馈式喷泉码的传输协议,其特点是通过中继节点参与编码的方式来降低源节点的工作负担,提高信道利用率,缩短传输时间。

基于多级反馈式喷泉码的传输协议包括基于反馈的多级编码和中继补充编码两个步骤,如图 2 所示。

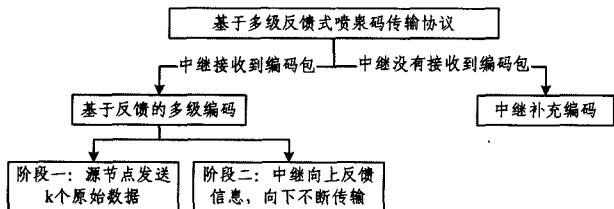


图 2 基于多级反馈式喷泉码传输协议框架

多级编码方案基于反馈信息,采用一种不完全编码方式,促使度 1 包在中继的积累,使得中继节点更加有效地参与到编码工作中。在此基础上,提出了中继补充编码方案。该方案通过中继重构编码产生新的编码包,以弥补在传输过程中丢失的编码包。

2.1 基于反馈的多级编码设计

(1) 阶段一

1)源节点发送 k 个原始数据包,有 $S_k = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_k\}$,发送完成后向下发送通知信息,通知下级中继进行反馈。

2)中继将接收到的度 1 包(度 1 包为包含一个原始数据包的编码包)不停地向下转发。中继接收到上级通知信息后,立即向上级中继反馈收到的数据包信息,并向下发送通知信息,以此类推。目的节点接收到通知信息后,也将自身已知信息向上反馈。节点接收到下级反馈信息后进入阶段二,并开始向下级节点发送阶段二编码包。下级节点接收到上级节点数据包后停止阶段一的反馈。阶段一的反馈和通知信息仅含有少量的数据包编号,数据长度短,则丢包率低,且被不停地反复发送,可以认为在传输延时后极短时间内必能被上级节点接收到,因此在协议中不考虑反馈信息丢失问题。

经过第一轮原始数据包的发送后,每一级中继都存储了一定量的度 1 包。基于反馈信息,每级节点都知道自己的下

级节点存储了哪些度 1 包。假设中继 1 存储了 r 个度 1 包,有 $S_r = \{b_1, b_2, b_3, \dots, b_r\}$,其中 $S_r \subseteq S_k$ (其他中继不进行表示);目的节点接收到 d 个度 1 包,有 $S_d = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_d\}$,其中 $S_d \subseteq S_r$ 。

(2) 阶段二

1)源节点根据 LT 码的 RSD(Robust Solution Distribution)分布产生编码包,但仅对后续节点未知的数据包进行编码,剩余未编码部分由后续节点负责完成。如果源节点产生的编码包 $X_n = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\} (n \leq k)$ 中有 $\{x_i, \dots, x_j\} \subseteq S_r$,则将 $\{x_i, \dots, x_j\}$ 的标识信息填入到编码包中,不做实际编码操作。如果选中的数据包都存储在中继,即 $X_n \subseteq S_r$,则源节点将会发送一个完全未编码的空包。为防止这一情况的发生,并加快中继的度 1 包的积累,源节点将选择一个中继节点未知的数据包填入到空包中。

2)中继节点检验是否能从新收到的编码包中获取“新的度 1 包”(源节点产生的完全编码的度 1 包、当前度值为 1 的未完全编码包以及只捎带了一个数据包的完全未编码的编码包),如果可行,则存储该度 1 包,并将信息反馈到上级节点。如果新收到的编码包中包含当前节点已知后续节点未知的数据包标识,则将数据包编入当前包,并向下游发送。如果新收到的编码包仍然是一个完全未编码包,则捎带一个后续节点未知的数据包。

目的节点在接收到一定数量的编码包后,进行定期译码,同时将译码信息反馈到上级中继,中继将接收到的反馈信息不断地反馈到上级中继。中继节点接收到来自目的节点的反馈信息后,不再对这些数据包进行编码。阶段二的反馈信息通过全双工模式发送一次,上级节点无需等待。

阶段二所有的反馈信息仅包含原始数据包编号,来自中继的反馈信息通知上级节点不需要再对该数据包进行编码;来自目的节点的反馈信息通知上级节点该数据包不再作为构建编码包的原始数据。由于反馈信息相对于编码包的数据长度短、丢包率低,且目的节点的反馈信息适度的丢失对阶段二整体的编码效率影响较小,因此在全双工模式下,协议不考虑反馈丢失问题。

以三级网络为例,源节点在阶段一发送一轮度 1 包(p_1-p_{10}),假设中继 1 收到 p_2, p_5, p_7, p_8, p_9 ,中继 2 收到 p_5, p_9 ,目的节点接收到 p_9 。源节点接收到反馈后开始编码,如产生一个度 4 包(p_1, p_2, p_5, p_7),由于中继 1 存储了 p_2, p_5, p_7, p_8, p_9 包,源节点根据中继 1 的反馈只对选中的度 4 包(p_1, p_2, p_5, p_7)中的 p_1 进行编码,剩余编码由后续中继节点负责。中继 1 接收到编码包后,同理,根据中继 2 的反馈,对接收到的未完全编码包(p_1, p_2, p_5, p_7)中的 p_2, p_7 进行编码。中继 2 对接收到的未完全编码的编码包进行如中继 1 的操作。如果选中的数据包存储在目的节点,则不对该数据包进行编码。基于反馈的多级编码的具体过程如图 3 所示,其中实线表示该数据包已编码;虚线表示该数据包未编码,且编码将由后续中继负责完成。

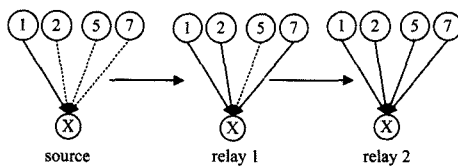


图 3 多级编码过程

采取多级编码方式会暂时降低编码包在传递过程中的平均度值,提升度 1 包的比例,促使原始包转移到中继,让中继能够更好地参与编码工作,以实现中继补充编码方案。在深空高误码率条件下,相比非反馈喷泉码在源节点产生完全编码包的方式,基于反馈的多级编码方式能明显提高源节点的编码效率。

2.2 中继补充编码设计

(1) 每级中继保存少量之前发送过的编码包,当发现在某一间隙内没有编码包到达,则在先前发送的编码包中随机选择一个编码包进行重构。

(2) 如果选中的编码包是一个未完全编码包或完全未编码包,则对未编码部分进行替换。如果选择的编码包是一个完全编码包,为避免发送重复包的出现,则对该包进行完全替换。

(3) 对编码包替换,即从当前中继已知的数据包中进行等概率抓取,并将相应的数据包标识信息填入到编码包中,按照多级编码方式进行传输。当可替换的数据包的数量小于需要替换的部分时,将产生一个度数更小的包。由于 RSD 分布的特性,高度数的包占比很小,因此对整体的度分布影响很小。

以三级网络为例,源节点在阶段一发送一轮度 1 包(p_1-p_{10}),假设中继 1 收到 p_2, p_5, p_7, p_8, p_9 , 中继 2 接收到 p_5, p_8, p_9 , 目的节点接收到 p_5 。如果中继 1 选择了一个度为 4 的未完全编码包(p_1, p_2, p_5, p_9)进行重构,其中 p_5, p_9 是未编码部分,中继 1 根据自身存储的编码包对未编码部分进行重构,形成新的编码包。假设中继 1 选择 p_7, p_8 对 p_5, p_9 进行替换,替换完成后,中继 1 需对未编码部分进行编码。中继 1 根据中继 2 的反馈,对编码包 p_7 进行编码,此时编码包(p_1, p_2, p_7, p_8)仍然是一个未完全编码的编码包,需要后续节点进行多级编码,以实现完整编码。具体编码重构过程如图 4 所示。

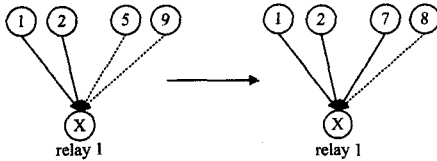


图 4 编码重构过程

中继补充编码方法以增加中继节点开销为代价,实现了对每一间隙丢失编码包的补充,降低了高丢包率引起的源节点的编码负担。但中继节点存储的度 1 包数量有限,且只对编码可替换部分进行重构,使得目的节点接收到相似编码包的比例提高,在一定程度上增加了译码开销。但是,在深空高误码率、长时延的通信条件下,其译码时间开销相比于总体传输时间开销影响非常小,后面的仿真实验中证明了这一点。

3 基于多级反馈式喷泉码传输协议的性能分析

3.1 编码有效性分析

在如图 1 所示的 $n-1$ ($n \geq 2$) 级转发中继构成的 n 级传输系统中,源节点发送 k 个原始数据包,深空信道误码率为 p_0 。假设数据包的大小为 L ,则链路丢包率 $p = 1 - (1 - p_0)^L$ 。采用非反馈喷泉码传输协议进行文件传输,目的节点通过置信传播^[20]译码算法,成功译码所需编码包数目为 $P = k(1 + \epsilon)$,其中 ϵ 为译码开销,则发包总量为

$$m = \frac{P}{(1-p)^n} = \frac{k(1+\epsilon)}{(1-p)^n} \quad (1)$$

在非反馈喷泉码传输协议中,考虑源节点发包总量为 m ,目的节点接收到 P 个编码包才能成功译码出 k 个原始数据,则其编码有效性为

$$C = \frac{P}{m} = \frac{P}{\frac{P}{(1-p)^n}} = (1-p)^n \quad (2)$$

在基于多级反馈式喷泉码的传输协议中,假设每级中继补充编码包的数目与丢失编码包的数目相等。目的节点成功译码所需的编码包的数量为 $P' = k(1 + \epsilon_1)$,其中 ϵ_1 为基于多级反馈式喷泉码传输协议的译码开销,则发包总量为

$$m' = \frac{P'}{(1-p)} + (n-1)p \frac{P'}{1-p} \quad (3)$$

其中, $p(n-1) \frac{P'}{(1-p)}$ 为所有中继节点补充发送的编码包总量,即中继节点增加的开销。

其编码有效性为

$$C' = \frac{P'}{m'} = \frac{(1-p)}{1+(n-1)p} \quad (4)$$

由式(2)和式(3)的比值,可以得到函数

$$f = \frac{C}{C'} = (1-p)^{n-1} (1+(n-1)p) \quad (5)$$

其中, $n \geq 2, 0 < p < 1$ 。

对 p 求导可得

$$f'(p) = np(1-n)(1-p)^{n-2} \quad (6)$$

当 $n \geq 2$ 时,对于任意 n ,式(6)恒小于 0,即 f 为 p 的递减函数,且当 $p \rightarrow 0$ 时,有最大值 $f_{\max} = 1$ 。这意味着 f 在 $0 < p < 1$ 区间恒小于 1。由此可推出,当 $n \geq 2$ 且 $0 < p < 1$ 时, $C < C'$ 恒成立,因此基于多级反馈式喷泉码传输协议的编码有效性高于非反馈喷泉码传输协议。

3.2 传输时间分析

考虑如图 1 所示的传输系统。在非反馈喷泉码传输协议中,中继主要承担数据转发工作,目的节点译码结束后,向源节点发送终止信号。假设各级传输的丢包率 p 和传输速率相等,目的节点需要接收 P 个编码包才能以较高的概率成功译码出 k 个原始数据包。因此,在非反馈喷泉码传输协议下,总传输时延包括源节点发送时延 T_{send} 和数据传播时延 T_{tran} ,则总传输时延为

$$T_{\text{total}} = \frac{P}{(1-p)^n} T_{\text{PDU}} + T_{\text{tran}} \quad (7)$$

其中, $P = k(1 + \epsilon)$, T_{PDU} 为一个数据包的发送时延。

在相同条件下,基于多级反馈式喷泉码传输协议的总传输时延包括源节点发送时延 T'_{send} 和数据传播时延 T_{tran} ,其中源节点发送时延主要包括阶段一中源节点发送和等待反馈时延 T_1 ,及阶段二中喷泉码的发送时延 T_2 ,则总传输时延为

$$T'_{\text{total}} = k \cdot T_{\text{PDU}} + 2t + \frac{P'}{(1-p)} T_{\text{PDU}} + T_{\text{tran}} \quad (8)$$

其中, $P' = k(1 + \epsilon_1)$ 。 $k \cdot T_{\text{PDU}} + 2t$ 为阶段一时延 T_1 ,其中 t 为两节点之间的传输时延。 $\frac{P'}{(1-p)} T_{\text{PDU}}$ 为阶段二延时 T_2 。

两种传输协议是在全双工模式下进行的,并且基于多级反馈式喷泉码的传输协议由于采用多级反馈方式,每级节点在接收到阶段一的反馈信息后立即进入阶段二,无需关心数据包在后续节点中的传输情况,因此阶段一的等待传输时间仅为一级的传输时延 $2t$ 。在该传输协议中,中继承担的编码工作

与源节点同步,因此在源节点的一个发送时隙重构编码包,不会产生额外的时间开销。

由式(7)、式(8)可知,发送时延严重影响了总传输时延。由此可以推出,当关系式(9)满足时,则有 $T'_{total} < T_{total}$,此时基于多级反馈式喷泉码传输协议的传输性能要优于非反馈喷泉码传输协议。

$$k \cdot T_{PDU} + 2t < \frac{PT_{PDU}}{(1-p)^n} - \frac{P'T_{PDU}}{(1-p)} \quad (9)$$

由式(9)可以看出,当该协议在阶段二获得的时间优势能够弥补阶段一的时间代价时,就能取得总体上的性能优势。

4 仿真结果和数值分析

在深空环境中,中继节点主要直接转发编码数据或者对编码数据进行译码再转发。因此本文通过 OPNET 构建仿真平台,在不同的深空通信环境下对 3 种典型的深空传输协议的传输性能进行比较,包括基于多级反馈式喷泉码传输协议、非反馈喷泉码传输协议^[9]以及基于喷泉码的译码转发传输协议^[21]。其中,基于多级反馈式喷泉码传输协议是本文提出的深空传输协议;非反馈喷泉码传输协议仅在源节点编码,目的节点译码,中继仅负责编码数据的转发;基于喷泉码的译码转发传输协议则需每一层中继节点首先对来自上一层节点的编码数据进行译码,然后对数据进行重新编码后转发至下一层节点。仿真实验以理想的深空多级通信网络为模型,假设每级传输时延为 1s(即每级通信距离约为地月通信距离)。模拟 10MB 数据在删除信道下的传输过程,分组长度为 10kB,分组数量 k 为 1000,基本传输速率为 1Mbps,假设每级中继之间的通信距离及丢包率相同。

4.1 传输性能分析

图 5、图 6 分析比较了在不同深空环境下,源节点总发包量的变化情况。如图 5 所示,当传输距离一定时,随着丢包率上升,非反馈喷泉码传输协议的源节点产生编码包的数量也大幅上升,使得整个传输过程都被拘束在源节点发包中。基于多级反馈式喷泉码的传输协议通过中继同步补充编码包,提高了编码包的产生效率,减轻了源节点的编码负担,受丢包率的影响较小。基于喷泉码的译码转发传输协议,每一跳中继节点都首先对来自上一层节点的编码数据进行译码,然后对数据进行重新编码后转发至下一层节点,其源节点总发包量受第一跳丢包率影响较大,后续传输距离和丢包率对源节点发包总量影响较小,源节点只需实现单跳的编码工作,发送编码包的数量明显少于另两种传输协议。同时,如图 6 所示,当丢包率一定时,传输距离越远,非反馈喷泉码传输协议的丢包情况越严重,源节点的发包总量呈指数增长;在基于多级反馈式喷泉码的传输协议中,每级中继都参与编码工作,使得源节点发送量变化较缓慢;在基于喷泉码的译码转发传输协议中,源节点发包量只受到第一跳丢包率的影响,并不受传输距离的影响,因此源节点的发包量基本上保持不变。

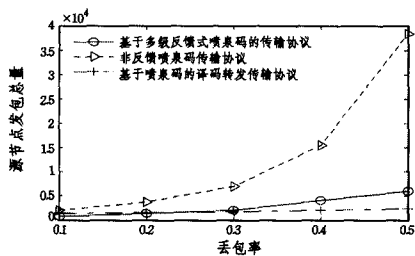


图 5 不同丢包率下的源节点发包总量

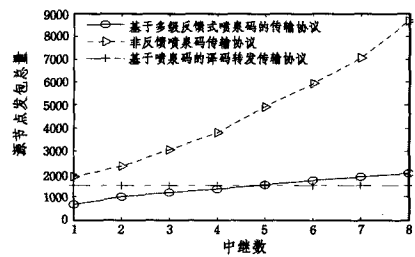


图 6 不同传输距离下的源节点发包总量

图 7、图 8 分析比较了在不同深空环境下,传输过程中总发包量的变化情况,其中总发包量为源节点发包总量与中继节点发包总量之和。从图 7 可以看出,基于多级反馈式喷泉码传输协议与基于喷泉码的译码转发协议由于中继参与编码的特性,受丢包率影响明显小于非反馈喷泉码传输协议。从图 8 可以看出,基于喷泉码的译码转发传输协议由于每一层中继节点需对上一层节点的编码数据进行译码,再重新编码转发至下一层节点,因此传输距离对基于喷泉码的译码转发协议的总发包量有很大的影响,传输距离越远,编译转发次数越多,使得总发包量急速上升。基于多级反馈式喷泉码的传输协议随着传输距离的增加,其总发包数量将好于非反馈喷泉码传输协议。

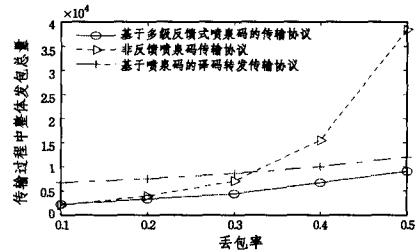


图 7 不同丢包率下的传输过程中的总发包量

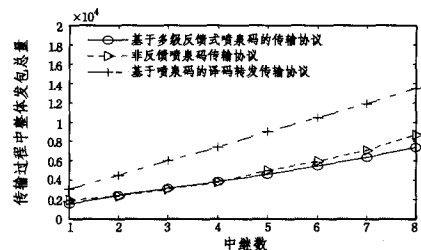


图 8 不同距离下的传输过程中的总发包量

图 9 分析比较了在传输距离一定,每级时延分别为 1s、5s、10s 的深空环境下,丢包率对不同传输协议的传输时间的影响。在每级时延为 1s 时,基于多级反馈式喷泉码传输协议的传输时间性能最好。在每级时延为 5s 时,当丢包率达到 16% 后,基于多级反馈式喷泉码的传输协议具有更好的时间性能。每级传播时延较小时,基于多级反馈式喷泉码传输协议在传输时间上拥有较明显的优势,因为其在阶段一付出的时间代价远小于阶段二节约的传输时间。在每级时延为 10s 时,基于多级反馈式喷泉码传输协议在阶段一花费的时间代价增大,直到丢包率达到 22% 后,非反馈喷泉码的源节点需要发送的编码包急速增加,延长了传输时延,因此基于多级反馈式喷泉码的传输协议渐渐地显示出优势。基于喷泉码的译码转发传输协议由多组单跳的编译码过程组成,虽然受丢包率影响较小,但信道利用率低,在时间性能上不具有优势。基于图 9 的结果,可以发现基于多级反馈式喷泉码的传输协议更加适用于高误码率的深空通信环境。

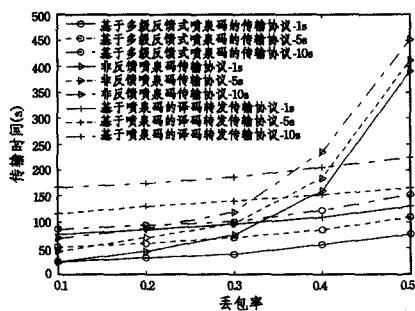


图9 不同时延和丢包率下的传输时间

图10分析比较了在丢包率为20%，每级传输时延分别为1s、5s、10s的深空环境下，传输距离对不同传输协议的传输时间的影响。在每级时延较小时，传输距离越远，基于多级反馈式喷泉码的传输协议在传输时间上的优势越显著。在每级传输时延较大时，随着传输距离越来越远，基于多级反馈式喷泉码的传输协议在传输时间上逐渐显示出优势。基于图10的结果，可以发现基于多级反馈式喷泉码的传输协议更加适用于远距离的深空环境。

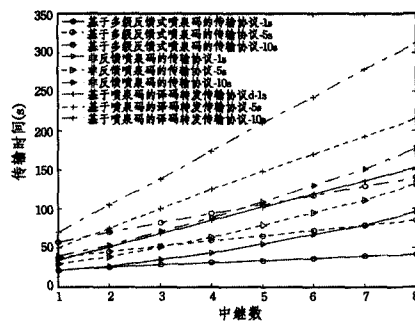


图10 不同时延和传输距离下的传输时间

4.2 编码有效性分析

从图7—图10可以看出，不同协议时间性能的变化基本与其发包总量的变化趋势吻合，在深空高误码率、长传输时延条件下，减少编码包发送量是提高时间性能最关键的因素，因此图11、图12对协议的编码有效性进行分析。

图11分析了在传输距离一定时，每级时延为5s的深空环境下，不同丢包率对不同传输协议的编码有效性的影响。从图中可以看出，基于多级反馈式喷泉码传输协议的编码有效性从整体上比非反馈喷泉码传输协议高出10%左右。在基于喷泉码的译码转发传输协议中，总发包量的起点高于另两种传输协议，且随着丢包率的增大，总发包量也逐渐缓慢增加。因此，基于喷泉码的译码转发传输协议的编码有效性从整体上低于另两种协议。本文提出的传输协议在较大程度上减少了发包总量和丢包数目，能够弥补因冗余编码导致目的节点译码开销增加的代价。

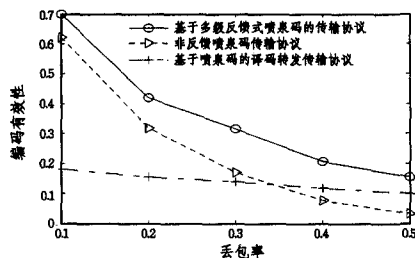


图11 不同丢包率下的编码有效性

图12分析了在丢包率为20%时，每级时延为5s的深空环境下，不同传输距离对两种传输协议的编码有效性的影响。从图中可以看出，非反馈喷泉码传输协议的下降速度明显快于基于多级反馈式喷泉码传输协议的。从中可以说明，随着传输距离越来越远，非反馈喷泉码传输协议中源节点的编码开销越来越大，使得整体传输的编码开销也越来越大，最终导致编码有效性快速下降。基于喷泉码的译码转发传输协议整体发包总量高于另两种传输协议，使得编码有效性从整体上低于另两种传输协议。

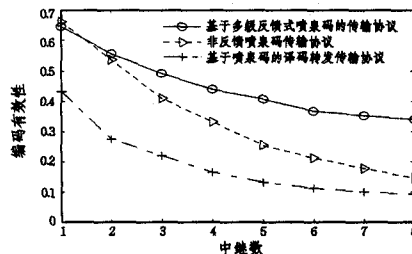


图12 不同传输距离下的编码有效性

结束语 (1)提出了一种针对深空环境高误码率、长时延

通信特点的基于多级反馈式喷泉码的深空传输协议，相比非反馈喷泉码传输协议和基于译码转发传输协议，其在一定程度上降低了源节点编码负担，提升了时间性能。通过多级编码中的阶段一来加快原始数据包在中继节点中的传递与积累，使得中继节点在阶段二具备参与到编码工作中的能力；通过中继补充编码实现了中继节点对传输过程中损失编码包的补充，减轻了源节点的编码负担。

(2)最终仿真实验表明，基于多级反馈式喷泉码的传输协议具有较高的编码有效性，能够有效降低发包总量，从而缩短传输时间，时间性能随着丢包率和传输距离的提升相比另两种协议更有优势，因此比非反馈喷泉码更适用于高误码率、长传输时延的深空环境。

参考文献

- [1] Zhang Nai-tong, Li Hui, Zhang Qin-yu. Thought and Developing Trend in Deep Space Exploration and Communication[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(4): 786-793(in Chinese)
张乃通, 李晖, 张钦宇. 深空探测通信技术发展趋势及思考[J]. 宇航学报, 2007, 28(4): 786-793
- [2] De C T, Liva G, Calzolari G P. Reliability options for data communications in the future deep-space Missions[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(11): 2056-2074
- [3] Ying Ting. A Novel Rateless Coding Scheme with Gradually Incremental Degree under Feedback[D]. Hangzhou: Zhengjiang University, 2014(in Chinese)
应挺. 带反馈的数字喷泉码技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014
- [4] CCSDS. Erasure correcting codes for use in near-earth and deep-space communications[EB/OL]. (2011-10-15)[2015-04-27]. <http://ccsds.org>
- [5] De C T, Marchese M. Reliable data delivery over deep space networks; benefits of long erasure codes over ARQ strategies[J]. IEEE Wireless Communications, 2010, 17(2): 57-65
- [6] Jiao Jian, Zhang Qin-yu, Li An-guo. Research on Packets Interleaving File Delivery Protocol in Deep Space Communication[J].

- Journal of Astronautics, 2010, 31(11): 2584-2590 (in Chinese)
 焦健, 张钦宇, 李安国. 深空通信文件传输协议的交织技术研究[J]. 宇航学报, 2010, 31(11): 2584-2590
- [7] Mackay D J C. Fountain codes[J]. IEE Proceedings Communications, 2005, 152(6): 1062-1068
- [8] Byers J W, Luby M, Mitzenmacher M, et al. A digital fountain approach to reliable distribution of bulk data[C]// ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1998, 28(4): 56-67
- [9] Byers J W, Luby M, Mitzenmacher M. A digital fountain approach to asynchronous reliable multicast[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(8): 1528-1540
- [10] Garramone G, De C T, Matuz B, et al. Erasure codes for space communications: Recent findings and new challenges[C]// Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS) and 12th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC). 2012: 29-35
- [11] Zhu Kai-yan, Wang Hong-yu, Sun Wen-zhu, et al. A Distributed Fountain Code for Cooperative Communications[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(7): 1249-1255 (in Chinese)
 祝开艳, 王洪玉, 孙文珠, 等. 一种分布式喷泉码在协作通信中的应用[J]. 电子学报, 2014, 42(7): 1249-1255
- [12] Luby M. LT codes[C]// Proc of 43rd Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Society. 2002: 271-271
- [13] Cao Rui, Yang Liu-qing. Decomposed LT codes for cooperative relay communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(2): 407-414
- [14] Sorensen J H, Koike-Akino T, Orlik P. Rateless feedback code [C]// The 2012 IEEE International Symposium on Information Theory. 2012: 1767-1771
- [15] Yu Jia-qi, Zhong Jie, Zhao Min-jian, et al. Novel LT coding scheme with limited feedback in broadcast systems[C]// The 2012 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). 2012: 1-5
- [16] Hagedorn A, Agarwal S, Starobinski D, et al. Rateless coding with feedback[C]// International Conference on Computer Communications. 2009: 1791-1799
- [17] Xiao Jun-yuan, Li Ping. Doped accumulate LT codes[C]// IEEE International Symposium on Information Theory. 2007: 2001-2005
- [18] Ying Ting, Xie Lei, Chen Hui-fang. A novel rateless coding scheme with gradually incremental degree under feedback [C] // IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC). 2014: 575-580
- [19] Kokalj-Filipovic S, Spasojevic P, Soljanin E, et al. Arq with doped fountain decoding [C] // International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications. 2008: 780-784
- [20] Shokrollahi A. Raptor codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(6): 2551-2567
- [21] Gu Shu-shi, Jiao Jian, Yang Zhi-hua, et al. Relay cooperation fountain codes for deep space communications[J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(8): 1696-1701 (in Chinese)
 顾术实, 焦健, 杨志华, 等. 面向深空通信的中继协作喷泉码设计[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(8): 1696-1701

(上接第 123 页)

LabTS-CLU 算法明显优于基于 k-means 的聚类算法。另一方面, 实验结果还表明, 数据量是影响 LabTS-CLU 算法效率的主要因素, 维度对其影响不大。

参 考 文 献

- [1] Fravolini M L, Cascianelli S, Pier Giorgio Fabietti. A Learning Strategy for the Autonomous Control of Type 1 Diabetes[J]. Applied Artificial Intelligence, 2015, 29(6): 531-562
- [2] Goodwin G C, Mediolani A M, Carrasco D S, et al. YongjiFu: A fundamental control limitation for linear positive systems with application to Type 1 diabetes treatment[J]. Automatica, 2015, 55: 73-77
- [3] Kellner D, Klappstein J, Dietmayer K. Grid-based DBSCAN for clustering extended objects in radar data[C]// 2012 IEEE Conference on Intelligent Vehicles Symposium. 2012: 365-370
- [4] Aghabozorgi S R, WahTeh Y. Clustering of large time series datasets[J]. Intelligent Data Analysis, 2014, 18(5): 793-817
- [5] Li Bin, Tan Li-xiang, Zhang Jing-song. Time series symbolic methods facing data mining[J]. Journal of Circuit and Systems, 2000, 5(2): 9-14 (in Chinese)
 李斌, 谭立湘, 章劲松. 面向数据挖掘的时间序列符号化方法研究[J]. 电路与系统学报, 2000, 5(2): 9-14
- [6] Li Ai-guo, Qin Zheng. On-line segmentation of time-series data [J]. Journal of Software, 2004, 15(11): 1671-1679 (in Chinese)
 李爱国, 覃征. 在线分割时间序列[J]. 数据软件学报, 2004, 15(11): 1671-1679
- [7] Keogh E, Kasetty S. On the need for time series data mining benchmarks: A survey and empirical demonstration[J]. Data Mining and Knowledge Discovery, 2003, 7(4): 349-371
- [8] Tewari G, Snyder J, Sander P V. Signal-specialized parameterization for piecewise linear reconstruction[C]// Proceedings of the Eurographics Symposium on Ueometry Processing. New York, USA, 2004: 55-64
- [9] Tseng Y J, Ping Xiao-ou, Liang J D, et al. FeipeiLai: Multiple-Time-Series Clinical Data Processing for Classification With Merging Algorithm and Statistical Measures[J]. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 2015, 19(3): 1036-1043
- [10] Sitaram R, Zhang H, Guan C, et al. Temporal classification of multi-channel near-infrared spectroscopy signals of motor imagery for developing abrain-computer interface[J]. NeuroImage, 2007, 34(4): 1416-1427
- [11] Yin Z, Zhang J. Identification of temporal variations in mental workload using locally-linear embedding based EEG feature reduction and support vector machine based clustering and classification techniques [J]. Comput. Methods Programs Biomed., 2014, 115(3): 119-134