

反馈信道下基于 LT 码的空间网络广播传输策略设计

索龙龙^① 张更新^② 边东明^{*①} 吕 晶^① 谢智东^①

^①(陆军工程大学通信工程学院 南京 210007)

^②(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)

摘 要: 由于其特有的广域宽覆盖等特点, 数据广播业务一直是空间网络的主要业务。然而空地间信道由于受到远距离、天气变化及遮挡等因素影响, 数据传输时延长且丢包率较高。为进一步提高数据广播的性能, 该文将反馈信息与 LT 码相结合, 提出一种新的空间网络数据广播传输策略。与传统的数据广播策略相比较, 新的传输策略利用反馈信息估计信道丢包率, 并在此基础上引入信道状态矩阵和数据包选择权重向量, 设计了数字喷泉新的编码方法, 进而使得数据在重传阶段能够根据信道状态和重传概率实时调整。仿真结果表明, 新的数据广播策略能够实现传输较少数据包的基础上实现原始数据的可靠接收。

关键词: 空间网络; 广播策略; LT 码; 选择权重向量; 传输效率

中图分类号: TN938

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)06-1433-05

DOI: 10.11999/JEIT170820

Design of Efficient Broadcast Transmission Strategy for Spatial Networks Based on LT Codes with Feedback Channel

SUO Longlong^① ZHANG Genxin^② BIAN Dongmin^① LÜ Jing^① XIE Zhidong^①

^①(*Institute of Communications Engineering, Army Engineering University, Nanjing 210007, China*)

^②(*School of Telecommunication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003 China*)

Abstract: Since its wide coverage area, data broadcast is the major service of spatial system. However, due to the long distance and the complex, varied climate, data transmission suffers large round-trip-time and poor error performance. In order to achieve better performance, based on fountain codes and the feedback information, a novel and efficient data transmission strategy is proposed. Compared with typical protocols, the proposed strategy uses the feedback information to estimate the channel erasure probability. Besides, a weighted packet chosen vector is introduced into the fountain encoder to ensure the lost packets retransmitted in the order of the total consideration of their lost probability and the number of users which need a retransmission. Simulation results show that by the proposed scheme users can receive the data packets reliably while the total number of transmitted packets is less than the traditional protocols.

Key words: Spatial networks; Broadcast strategy; LT codes; Weighted chosen vector; Transmission efficiency

1 引言

通信, 顾名思义就是使得接收端正确接收到发送端传输的信息数据, 尤其在信息网络中, 文件、数据包的传输更需要保证其可靠接收, 因而数据的可靠传输策略备受关注。保证数据的可靠传输可以在不同层面实现: 一是物理层采用信道编码, 在比特级提高信息的准确传输能力; 二是在网络层或传

输层, 使用有效的可靠传输策略, 在分组级或数据包级实现分组或数据包的可靠传输。本文即是对网络层或传输层可靠传输策略进行研究, 实现分组级空间网络数据的可靠广播传输。

对于地面网络, TCP 协议中端到端的确认重发机制被广泛使用, 且证明其具有较好的性能^[1-3]。但是对于空间网络, 星地间信道由于受到远距离、天气变化及遮挡等因素的影响, 数据传输时延长且丢包率较高, 使得 TCP 协议中端到端确认重发机制性能急剧下降^[4-7], 尤其是在多用户量的广播系统。例如, 当一个系统有很多用户时, 高的丢包率会导致系统在较短时间内接收到大量的数据重传请求,

收稿日期: 2017-08-14; 改回日期: 2018-03-14; 网络出版: 2018-04-10

*通信作者: 边东明 bian_dm@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(91738201, 61571464, 61601511)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (91738201, 61571464, 61601511)

降低系统的传输性能。与此同时,空间系统长的传输时延以及大量数据重传的共同作用将使得全部数据包成功可靠传输的时延变长,甚至无法接受。

针对数据广播应用场景下 TCP 协议端到端确认传输的不足,Byers 等人^[8,9]提出了数字喷泉的概念。原始数据包经过编码后发送至接收端,而接收端错误接收的编码数据包直接丢弃,从而避免了请求重传的过程,因而解决了端到端确认传输带来的性能下降与大传输时延等问题。

在空间环境下,虽然数字喷泉有着端到端确认重传无法比拟的优势,但是现有空间系统一般均有反馈信道以保证传统端到端确认重传协议的正常运行,仅仅使用数字喷泉会带来已有资源(反馈信道)的浪费,而传统端到端确认重传协议却又存在固有的缺陷,因此探讨反馈信道下基于数字喷泉的数据广播传输协议具有十分深远的意义。

为进一步提高数据广播的性能,本文将反馈信息与数字喷泉相结合,提出了一种新的卫星数据广播传输策略。与传统的数据广播策略相比较,新的传输策略利用反馈信息估计信道丢包率,其在此基础上引入信道状态矩阵和数据包选择权重向量,设计了新的数字喷泉编码方法,进而使得数据在重传阶段能够根据信道状态和重传概率实时调整,实现了传输较少数据包的基础上实现原始数据的可靠接收。

2 系统模型与传统的数据广播策略

2.1 系统模型

本文主要考虑典型的卫星数据广播系统。如图1所示,系统包括卫星 S 以及与卫星相连接的 M 个系统用户。卫星通过下行链路向 M 个用户分发数据包,每个用户通过星地上行链路,即反馈信道回传数据包是否成功接受的确认信息以及重传请求。为便于描述,记 M 个用户为 $\{D_1, D_2, \dots, D_M\}$,待广播的 K 个数据包为 $\{P_1, P_2, \dots, P_K\}$,卫星 S 与用户 D_j 间链路为 SD_j 。

2.2 典型数据广播策略

典型的可靠传输方法主要有:TCP 协议中采用的端到端确认机制以及数字喷泉机制。

2.2.1 端到端确认机制^[10-12] 端到端确认机制主要通过自动重传请求(Automatic Repeat reQuest, ARQ)的方式实现,即接收端检测数据包是否成功接收,然后返回成功接收确认(ACKnowledgement, ACK)或者接受失败确认(NACK),然后发送端根据返回的确认字符对没有被成功接收的数据包进行重新发送直到所有数据包成功接收为止。根据差错处

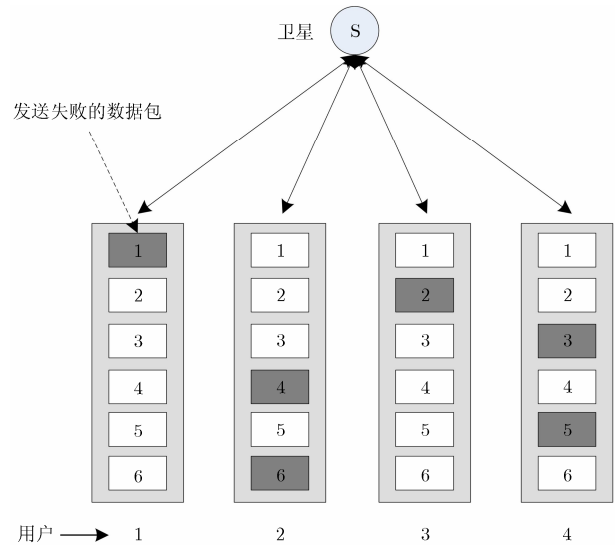


图1 卫星广播系统框架

理方式的不同,ARQ 又分为停等式(stop-and-wait)ARQ、回退 n 帧(go-back- n)ARQ, 以及选择重传(selective repeat)ARQ。在空间网络中,由于传输时延长,丢包率高,通常采用选择重传 ARQ (SR-ARQ),即当发送方接收到接收方的状态报告指示报文出错,发送方只发送传送发生错误的报文^[6,7]。

2.2.2 数字喷泉 与 ARQ 不同,数字喷泉的主要思想是:数据发送端对原始数据包进行编码,源源不断地产生编码数据包并进行广播传输,当用户接收到一定数量的编码数据包后即可成功恢复原始数据包。在此期间,错误接收的编码数据包直接丢弃,从而避免了请求重传的过程,只需要成功译码恢复原始数据后一次反馈信息即可实现原始数据的成功传输,因而解决了端到端确认传输带来的性能下降与大的传输时延等问题,其代价是需要成功接收的编码数据包数量要大于原始数据包数量。实现数字喷泉的编码方案一般也称作喷泉码,指的是一定数量的原始数据包可以产生无穷数量的编码数据包,因此也被称作无速率码。喷泉码不同的种类很多^[13-18],其中 LT(Luby Transform)码是第1种实用的也是研究最广泛喷泉码编码方案。理论上,当采用鲁棒孤波分布(Robust Soliton Distribution, RSD)时, $k + O(\sqrt{k \ln^2(k/\delta)})$ 个编码数据包能够以概率 $1 - \delta$ 成功恢复 k 个原始数据包。

3 反馈信道下基于 LT 码的广播传输策略设计

在空间环境下,与端到端确认重传机制相比较,数字喷泉无需反馈确认,且用户只需要接收到一定数据量的编码数据包就可以成功恢复原始数据包等

特点，在空间网络的数据广播传输领域得到广泛应用^[19,20]。然而现有空间系统一般均有反馈信道以保证传统端到端确认重传协议的正常运行，仅仅使用数字喷泉会带来已有资源(反馈信道)的浪费，而传统端到端确认重传协议却又存在固有的缺陷，基于以上考量，本节结合反馈信道与 LT 码，设计了反馈信道下基于 LT 码的广播传输策略。为便于描述，新的策略记为 F-LT(Feedback-LT)。

本文提出的数据广播分发主要分为两个阶段：

阶段 1 源端 S 按照次序分发 K 个原始数据包至 M 个用户，每个用户独立接收数据包。当数据包没有成功接收时，返回相对应的 NACK。在这个阶段，每个数据包只广播一次，且根据每个用户反馈的 NACK 信息，源端能够获得每个用户的对原始数据包的接受状态，以及对信道信息进行估计，其具体实现方法如下：

当原始数据包发送完成后，根据每个用户反馈的 NACK 信息，源端首先建立一个状态矩阵(Status Matrix, SM)，状态矩阵主要用来表征源端与接收端之间数据包成功发送与否的状态信息。其构造定义如下：

定义 1 状态矩阵，是指一个 $\mathbf{F}_{K \times M} = [f_{i,j}]$ ，其中 $i = 1, 2, \dots, K$ ， K 为原始数据包个数； $j = 1, 2, \dots, M$ ， M 为用户数。当且仅当用户 D_j 返回数据包 P_i 的 NACK 信息时， $f_{i,j} = 1$ ；否则， $f_{i,j} = 0$ 。

基于状态矩阵 $\mathbf{F}_{K \times M}$ ，源端对任意星地链路 SD_j 的丢包率 P_{SD_j} 进行估计，表达式为

$$P_{SD_j} = \frac{\sum_{i=1}^K f_{i,j}}{K} \quad (1)$$

为方便表述，将所有链路丢包率表示向量形式：

$$\mathbf{P}_{SD} = [P_{SD_j}] \quad (2)$$

当阶段 1 完成后，源端进入阶段 2。

阶段 2 源端首先对原始数据包进行喷泉编码，然后再进行发送。当用户利用接收到的编码数据包成功恢复全部的原始数据包后，用户反馈一个成功接收所有数据包的确认字符 ACK，当源端接收到所有用户发送的 ACK 信息后，阶段 2 结束，此时代表所有用户成功接收到原始数据包，数据分发过程完成。

特别说明的是，鉴于不同用户所需要重传的数据包不同且每条链路的丢包率也不同，单纯地将所有原始数据包平等对待，显然是不恰当的。为提升数据分发性能，本文通过引入数据包选择权重向量，

并设计了新的喷泉编码方案。

定义 2 数据包选择权重向量 $\mathbf{Q} : \mathbf{Q} = [q_i]$ ，其中 q_i 为第 i 个数据包的选择权重，其表达式为

$$q_i = \frac{\sum_{j=1}^M f_{i,j} \cdot P_{SD_j}}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M f_{i,j} \cdot P_{SD_j}} \quad (3)$$

在数据包选择权重向量 \mathbf{Q} 的基础上，设计的新的喷泉编码方案中，每个编码数据包 y_i 的编码流程包括以下 3 个步骤：

(1) 根据给定的度分布 $(\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_K)$ ，随机选择编码数据包 y_i 的度 d_i ；

(2) 根据数据包选择向量 \mathbf{Q} ，随机选择 d_i 个不同的原始数据包作为编码数据包 y_i 的邻居；

(3) 编码数据包 y_i 的值为其 d_i 个邻居的异或。

通过引入数据包选择权重向量 \mathbf{Q} ，首先，对于所有用户成功接收的数据包，其对应的数据包选择权重 q_i 为 0，因此不会在阶段 2 再次广播分发；其次， P_{SD_j} 越大，数据包选择权重 q_i 越大，因此保证丢包率越高信道所需要重发的数据包更多次的重发；最后，对 $f_{i,j}$ 求和，保证了阶段 1 数据包 P_i 没有被成功接收的用户数越多，选择权重 q_i 越大，数据包 P_i 更多次的重发。

为更好地说明新的数据广播分发策略的工作流程，下文立足于图 1 所示的系统框架给出其简单的工作过程。

在阶段 1，源端 S 将 6 个原始数据包广播分发至 4 个用户，其中每个用户都存在未成功接收的数据包(图 1 中深色表示未成功接收的数据包)。

阶段 1 完成后，根据反馈信息，就可以获得状态矩阵 \mathbf{F} ：

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

则，根据式(2)，估计的链路丢包率为

$$\mathbf{P}_{SD} = \begin{bmatrix} \frac{1}{6} & \frac{1}{3} & \frac{1}{6} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据定义 2，可以计算得到数据包的选择权重向量 \mathbf{Q} 为

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \frac{1}{10} & \frac{1}{10} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} \end{bmatrix} \quad (6)$$

此时，源端 S 进入阶段 2，首先在新的喷泉编

码方案下,对所有的原始数据包进行喷泉编码,产生编码数据包 y_i ,然后广播分发 y_i 。由于 y_i 能够源源不断地产生,因此,只要产生编码数据包 y_i ,就将其发送,而不必等待产生一定数量的编码数据包;同时用户接收到编码数据包后即可进行译码,当所有数据包被成功回复后,向源端 S 发送成功接收确认 ACK,当源端收到 4 个用户返回的 ACK 消息后,数据分发完成,整个数据分发流程结束。

4 仿真与分析

本节以所有用户成功接收所有原始数据包时源端平均发送数据包的数量为衡量指标,对 SR-ARQ,采用 LT 码的数字喷泉,和采用 LT 码的新策略的数据广播传输性能进行了仿真比较。仿真中,LT 码和新的策略均采用文献[13]提出的鲁棒孤波分布(Robust Soliton Distribution, RSD),为使得仿真更具有广泛性,采用了 3 组不同的相关参数(详见表 1),源端平均发送数据包的数量通过 200 次独立蒙特卡洛试验仿真得到。此外,文章所研究的数据可靠传输策略主要针对网络层(或分组级),因此物理信道参量(例如发送接收信噪比,带宽、环境等因素)最终体现到网络层(或分组级)的参量为丢包率。

首先本文仿真了源端广播分发 500 个原始数据包到不同数量用户数下 3 种策略的性能。本次仿真中所有链路的丢包率一致,设为 0.05,用户数分别为 2, 4, 6, 8, 10, 仿真结果如图 2 所示。结果表明,

相比较 SR-ARQ 和数字喷泉,新的策略整体上性能最佳,保证了源端平均发送数据包的数量最少,且随着用户数的增加,性能改善得越明显;同时与数字喷泉一样,新策略的数据广播性能与所采用的度分布关系紧密,且呈现出采用同一度分布,数字喷泉性能越好,新策略的性能也越好,其原因主要在于新策略与数字喷泉的编码策略基本类似,主要创新在于传输策略中各链路的信道状态量化及在编码时进行数据包权重划分,因此度分布对数字喷泉和新策略带来的影响趋势相同。

其次,本文给出了源端广播分发 500 个原始数据包到 6 个用户数下 3 种策略随着丢包率变化性能的变化曲线。如图 3 所示,结果表明,与 SR-ARQ 和数字喷泉相比,新的策略在不同丢包率概率下,源端所需要发送数据包的平均数量最少,且随着丢包率的增加,性能优势更明显;与图 2 结果类似,新策略的数据广播性能与所采用的度分布关系紧密,呈现出数字喷泉相一致的变化曲线。

最后比较了用户数为 6,丢包率为 0.05 原始数据包个数分别为 100, 200, 300, 400, 500 时,不同策略的传输增益。结果如图 4 所示,为了更明显地对比不同策略的性能指标,与图 2、图 3 不同的是,纵轴采用了源端平均发送数据包的冗余占比,而不是总数量。结果表明,三者共有的特征为发送的冗余占比随着原始数据包数量的上升而趋于稳定;三者相比,新的策略性能最佳,成功广播分发时所需要的冗余数据包最少;且与图 2、图 3 结果类似,新策略的数据广播性能与所采用的度分布关系紧密,呈现出数字喷泉相一致的变化曲线。

表 1 仿真所用 RSD 度分布参数

度分布	相关参数
RSD1	$c1 = 0.01, \delta1 = 0.05$
RSD2	$c2 = 0.01, \delta2 = 0.10$
RSD3	$c3 = 0.05, \delta2 = 0.05$

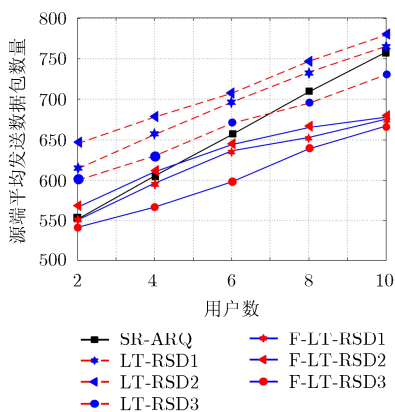


图 2 不同用户数下 3 种方法性能比较

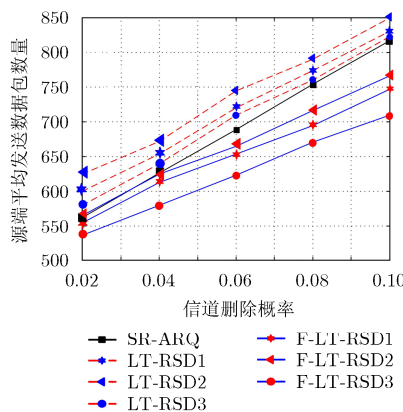


图 3 不同信道丢包率下 3 种方法性能比较

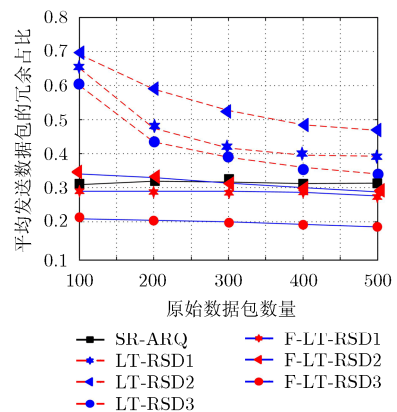


图 4 不同原始数据包数量下 3 种方法性能比较

5 结论

本文对空间网络中广播业务下数据可靠传输分发策略进行了分析研究,为解决传统端到端确认重

发机制在空间网络效能低, 以及数字喷泉没有有效利用现有系统的有效资源等问题, 本文将反馈信息与喷泉码相结合, 提出了一种新的卫星数据广播传输策略。与传统的数据广播策略相比较, 新的传输策略利用反馈信息估计信道丢包率, 其在此基础上引入信道状态矩阵和数据包选择权重向量, 设计了新的喷泉码编码方法, 进而使得数据在重传阶段能够根据信道状态和重传概率实时调整。仿真结果表明, 新的数据广播策略性能优于传统的端到端确认重发机制以及数字喷泉方法, 能够实现传输较少数据包的基础上实现原始数据的可靠接收。

参考文献

- [1] 王志明, 曾孝平, 刘学, 等. 一种异构网络 TCP 拥塞控制算法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(4): 780-786. doi: 10.11999/JEIT150774.
WANG Zhiming, ZENG Xiaoping, LIU Xue, et al. TCP congestion control algorithm for heterogeneous networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(4): 780-786. doi: 10.11999/JEIT150774.
- [2] SARVI B, RAABIEE H R, and MIZANIAN K. An adaptive cross-layer error control protocol for wireless multimedia sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2017, 56: 173-185.
- [3] 陈依群, 翁亮, 顾尚杰, 等. 分离 TCP 拥塞控制和可靠传输机制[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(6): 765-768.
CHEN Yiqun, WENG Liang, GU Shangjie, et al. Decoupling congestion control mechanism from transport control protocol[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2000, 34(6): 765-768.
- [4] 张民, 罗光春, 王俊峰, 等. 空间信息网络可靠传输协议研究[J]. 通信学报, 2008, 29(6): 63-68.
ZHANG Min, LUO Guangchun, WANG Junfeng, et al. Reliable transmission control protocol for spatial information networks[J]. *Journal on Communications*, 2008, 29(6): 63-68.
- [5] SANNI M L, ADEROUNMU G A, BELLO S A, et al. An improved packet resequencing model for selective repeat request protocol in data communication networks[C]. 12th IEEE Symposium on Computers and Communications, Aveiro, Portugal, 2007: 375-380. doi: 10.1109/ISCC.2007.4381631.
- [6] 胡建军, 郭显, 高翔. 卫星链路上的 SR 协议性能分析[J]. 电子技术应用, 2011, 37(9): 126-128.
HU Jianjun, GUO Xian, and GAO Xiang. Analysis about performance of SR protocol on satellite Link[J]. *Application of Electronic Technique*, 2011, 37(9): 126-128.
- [7] 赵静, 张来保, 张健. 连续重传协议和选择重传协议的性能分析[J]. 通信技术, 2003, 36(1): 70-72.
ZHAO Jing, ZHANG Laibao, and ZHANG Jian. The performance difference analysis between go back protocol and selective repeat protocol[J]. *Communications Technology*, 2003, 36(1): 70-72.
- [8] BYERS J M, LUBY M, MITZENMACHER M, et al. A digital fountain approach to reliable distribution of bulk data[J]. *ACM SIGCOMM*, 1998, 28(4): 56-67.
- [9] BYERS J W, LUBY M and MITZENMACHER M. A digital fountain approach to asynchronous reliable multicast[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2002, 20(8): 1528-1540. doi: 10.1109/JSAC.2002.803996.
- [10] 王凯东, 田斌, 易克初. 宽带卫星网络 TCP 性能分析[J]. 计算机学报, 2005, 28(8): 1360-1366.
WANG Kaidong, TIAN Bin, and YI Kechu. Performance analysis of TCP for broadband satellite networks[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2005, 28(8): 1360-1366.
- [11] 许辉. 宽带卫星 IP 通信网络中的可靠传输技术研究[D]. [博士学位论文], 电子科技大学, 2008: 13-15.
XU Hui. Research on the reliable transport technologies in the broadband satellite IP communication networks[D]. [Ph.D. dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2008: 13-15.
- [12] 顾明, 张军. 适用于卫星网络的 TCP 跨层改进机制[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(8): 1815-1819.
GU Ming and ZHANG Jun. A cross-layer mechanism to improve TCP performance in satellite networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(8): 1815-1819.
- [13] LUBY M. LT codes[C]. 43rd IEEE Symposium on Foundations of Computer Science, Vancouver, Canada, 2002: 271-280. doi: 10.1109/SFCS.2002.1181950.
- [14] SHOKROLLAHI A. Raptor codes[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(6): 2551-2567. doi: 10.1109/TIT.2006.874390.
- [15] LUBY M, MITZENMACHER M, SHOKROLLAHI A, et al. Efficient erasure correcting codes[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2001, 47(2): 569-584. doi: 10.1109/18.910575.
- [16] YUAN Xiaojun and LI Ping. On systematic LT codes[J]. *IEEE Communications Letters*, 2008, 12(9): 681-683. doi: 10.1109/LCOMM.2008.080825.
- [17] SORENSEN J H, POPOVSKI P, and OSTERGAARD J. Design and analysis of LT codes with decreasing ripple size[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2012, 60(11): 3191-3197. doi: 10.1109/TCOMM.2012.091112.110864.
- [18] ZHANG Huazi, SUN Kairan, HUANG Qiuyuan, et al. FUN coding: Design and analysis[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2016, 24(6): 3340-3353. doi: 10.1109/TNET.2016.2516819.
- [19] 朱宏鹏, 张更新, 李广侠. 卫星数据广播分发系统中 LT 码的研究[J]. 通信学报, 2010, 31(7): 122-137.
ZHU Hongpeng, ZHANG Gengxin, and LI Guangxia. Research of LT code in satellite data broadcasting system[J]. *Journal on Communications*, 2010, 31(7): 122-137.
- [20] 秦营营. 深空通信中传输层协议的研究[D]. [硕士学位论文], 哈尔滨工业大学, 2010: 4-6.
QIN Yingying. A protocol study of transport layer in deep space communication[D]. [Master dissertation], Harbin Institute of Technology, 2010: 4-6.

索龙龙: 男, 1989年生, 博士生, 研究方向为卫星通信、导航, 空间信息网络组网与传输。
张更新: 男, 1967年生, 教授, 研究方向为卫星通信、空间信息网络组网与传输。
边东明: 男, 1975年生, 副教授, 研究方向为卫星通信、空间信息网络组网与传输。
吕晶: 男, 1965年生, 教授, 研究方向为卫星通信与卫星导航。
谢智东: 男, 1984年生, 讲师, 研究方向为卫星通信、空间信息网络组网与传输。