

一种适合于深空星际互联网的传输控制协议

金凤林^{1,3} 刘炯² 崔玉萍²

(南京大学计算机科学与技术系 南京 210093)¹ (解放军西安通信学院 西安 710106)²
(解放军理工大学指挥自动化学院 南京 210007)³

摘要 目前国内外已经开展了大量针对同步卫星互联网的传输控制技术研究,提出了很多传输控制协议方案。然而,这些协议方案在信道条件更加恶劣的行星际互联网中的性能表现并不理想。针对深空通信信道特点,在 TP-Satellite 协议的基础上提出了 TP-Satellite+ 协议。仿真表明,TP-Satellite+ 协议在月球与地球之间的行星际互联网中,不仅能够有效对抗信道误码,节省反向链路资源占用,而且能缩短连接建立时间,提高行星际互联网的网络性能。

关键词 深空通信,行星际互联网,传输控制协议,TP-Satellite+

中图分类号 TN915.04 **文献标识码** A

Novel Transport Control Protocol for Deep-space Inter-planet Networks

JIN Feng-lin^{1,3} LIU Jiong² CUI Yu-ping²

(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)¹

(Xi'an Communication Institute, Xi'an 710106, China)²

(ICA of PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)³

Abstract Now, many international groups and researchers have studied the transport protocol for GEO IP networks, and many solutions have been proposed. However, due to the worse channel situation than that of GEO IP networks, the performance of these solutions degrades significantly in Inter-planet IP networks. A new transport protocol, TP-satellite+, was proposed for deep space Inter-planet IP networks. Simulation results show that TP-Satellite+ can resist the channel errors, reduce the setup time and the bandwidth used in the reverse path, enhance the performance of Inter-planet networks.

Keywords Deep space communication, Inter-planet networks, Transport control protocol, TP-Satellite+

从 20 世纪 90 年代末至今,国内外已经开展了大量针对同步卫星互联网的传输控制协议研究,提出了很多协议方案^[1-10]。目前,提出的传输控制协议有 STP、TCP-Peach、TCP Westwood、XCP、SCPS-TP、VCP、TCP-STAR 和 TP-Satellite 等。这些研究方案大致可以分为以下几类:1)修改 TCP 协议;2)修改其它层协议;3)采用代理方式;4)设计专门的传输控制协议。代理方案可以隔离地面网络和卫星网络,屏蔽卫星网络对地面网络的性能影响。设计专门的传输控制协议方案能够根据卫星网络的特点,从整体上提高网络传输性能。因此,将这两种方式结合起来已经成为卫星网络传输控制协议研究的主要途径。其中,专门的传输控制协议是影响卫星网络传输性能的关键,也成为研究的重点。

随着人类对太阳系空间探索的不断深入,构建包括月球、火星等天体的行星际互联网的深空通信已经越来越受到大家的关注。美国 NASA 从 1998 年起就开展了行星际互联网的研究计划^[11-17],我国于 2007 年成功发射了“嫦娥”1 号探月卫星,开始了深空探测的科学探索。

目前的传输控制协议大都是针对同步卫星网络提出的,

针对信道条件更加复杂的行星际互联网的传输控制协议还很少,具有代表性的是 2004 年提出的 TP-Planet 传输控制协议^[18]。

本文在 TP-Satellite^[19,20] 协议的基础上,针对行星际互联网的深空通信信道特点,提出了 TP-Satellite+ 协议。该协议不仅能够有效对抗高误码率和降低反向链路资源占用,而且能够缩短连接建立时间,在传播延时非常大的网络环境中迅速提升发送速率,提高网络的整体性能。

本文第 1 节分析、讨论星际互联网深空通信信道特点及其对传输控制协议的影响;第 2 节对提出的 TP-Satellite+ 协议进行描述和性能分析;第 3 节通过构建地球与月球的星际互联网的仿真环境,验证 TP-Satellite+ 协议性能;最后总结全文。

1 星际互联网链路特点及对传输控制协议的影响

同步卫星网络的链路一般情况下呈现莱斯信号分布特性,随机误码成为主导,随机误码率一般在 10^{-6} 左右,有时由于直射信号的遮蔽,会出现信号严重衰落而导致突发误码情

到稿日期:2012-04-12 返修日期:2012-08-05 本文受国防预研重点基金项目(9140A21050910JB8101)资助。

金凤林(1972-),男,博士生,副教授,主要研究方向为计算机网络、卫星通信,E-mail:fljin@sina.com;刘炯(1973-),男,博士,讲师,主要研究方向为计算机网络、智能信息处理;崔玉萍(1975-),女,硕士,讲师,主要研究方向为通信网管理。

况。同步卫星位于地球赤道上方,与地球表面的距离固定不变,传播延时在 250ms 左右。另外,卫星前向和反向信道带宽相差 10 倍左右。对于星际互联网来说,其信道特性与同步卫星网络的链路有很大差别,主要体现在以下几方面^[21,22]:

(1) 极长及变化的传播延时

从地球到月球的端到端往返传播延时(RTT, Round-Trip Time)为 2.6s 左右,最长时可达 3.4s,接近同步地球卫星网络的 10 倍。地球与太阳系其它行星的传播延时就更长,火星与地球之间的端到端往返传播延时在 8.5min 到 40min 之间。可以看出,行星际互联网信道的传播时延比绕地卫星网络的传播时延大得多,并且时延变化非常大。

(2) 极高的信道误码

行星际互联网属于深空通信范畴,由于空间干扰和衰减的影响,链路误码率极高,一般为 $10^{-3} \sim 10^{-2}$,有时可以达到 10^{-1} 。并且,由于受到空间电磁干扰和空间运动物体的影响,经常出现严重的突发误码情况。

(3) 严重的信道带宽不对称

由于受到卫星等航天器的功率限制,行星际互联网的双向链路带宽呈现出非常严重的不对称现象,前向和反向链路带宽往往相差百余倍,有时达到上千倍。

(4) 周期性的链路中断

由于地球和其它行星存在自转,地面站、卫星等航天器以及行星之间的通信链路具有周期性中断的特点。

(5) 极其有限的链路资源

由于传播距离非常远,空间干扰非常大,行星际互联网的链路资源非常有限,信道带宽非常小。

上述行星际互联网的链路特点严重影响了现有针对绕地网络传输控制协议的性能:1)传播延时特别长,使得 TCP、STP、TCP-Peach、TCP Westwood、XCP 和 TP-Satellite 等协议消耗非常长的时间等待连接建立的确认,同时也使得发送窗口增长非常缓慢;2)传播延时的巨大变化,使得采用等间隔发送分组数据的 TCP-Peach 和 TP-Satellite 协议对 RTT 的探测估计出现严重偏差,导致网络可能出现拥塞或者带宽资源浪费;3)极高的链路误码,使得 TCP、STP、TCP Westwood 和 XCP 协议已经无法正常传输数据,也使得 TCP-Peach 协议中,通过发送大量“dummy”分组数据探测网络链路状态的方法失去作用,同时也降低了利用高低优先级交替发送数据的 TP-Satellite 协议判断链路状态的准确性;4)信道带宽严重不对称,使得 TCP、TCP-Peach、TCP Westwood 和 XCP 协议的反向链路数据传输严重拥塞,导致前向链路吞吐量极低,甚至无法传输数据^[23]。

2 TP-Satellite+ 协议描述及性能分析

2.1 TP-Satellite+ 协议

论文提出的 TP-Satellite 协议在同步卫星网络中表现出了非常好的传输性能。因此,本文基于 TP-Satellite 协议,针对星际互联网的链路特性,对 TP-Satellite 协议进行了改进,提出了 TP-Satellite+ 协议,主要包括以下几方面:

(1) 存储链路通断和 RTT 变化周期,决定数据是否发送以及数据发送间隔。

(2) 省略连接建立过程,直接发送有效数据信息,减少连接建立等待时间。

(3) 采用三级优先级数据发送策略,仍然采用间隔发送的思想,即发送 1 个高优先级数据后,发送 2 个中等优先级数据,而后发送 1 个高优先级数据,接下来再发送 2 个低优先级数据。按照上述方式依次发送数据,高优先级数据仅占整个数据流的 1/3。

(4) 改进数据丢失判断算法,提高链路传输状态判断的准确性。

TP-Satellite+ 协议的数据丢失判断算法的具体实现如图 1 所示。

```

Loss Distinction()
{
    if (lost_num == 1)
    {
        pri = 1;
        send(Missing_Data);
    }
    else
    {
        if (low_pri == lost_num)
            goto Congestion_Recovery();
        else if (low_pri == low_num)
        {
            if (low_pri + medium_pri == lost_num)
                goto Congestion_Recovery();
            else if ((medium_pri == medium_num) &&
                (low_pri + medium_pri < lost_num))
                goto Congestion_Recovery();
        }
        else
        {
            set(missing_packet priority);
            send(missing_packet);
            lost_num = lost_num - 1;
            wat(τ);
        }
    }
}

```

图 1 丢失判别算法

网络中分组数据分为 3 种优先级,当网络出现拥塞时,空间节点首先丢弃队列中低优先级分组数据;若队列中没有低优先级分组数据,则丢弃队列中的中等优先级分组数据;若两种分组数据都没有了,则开始丢弃高优先级分组数据。由此,根据网络拥塞的程度,数据的丢弃状况可以分为以下几种:

1. 网络拥塞轻微时,只有低优先级的数据包被丢弃。这样,应答信息中表示的丢失分组数据全部是低优先级数据,如式(1)所示:

$$low_pri = lost_num \quad (1)$$

2. 网络拥塞较重时,路由器队列中已没有低优先级的分组数据,此时开始丢弃中等优先级的分组数据。因此,应答信息中表示的丢失分组数据包括低优先级和中等优先级两种数据,如式(2)所示:

$$low_pri + medium_pri = lost_num \quad (2)$$

3. 网络拥塞严重时,路由器队列中已没有低优先级和中等优先级的分组数据,此时开始丢弃高优先级的分组数据。

因此,应答信息中表示的丢失分组数据表明,不仅中、低优先级分组数据丢失,而且丢失的分组数据量大于发送的低优先级和中等优先级两种分组数据量的总和,如式(3)所示:

$$\begin{aligned} low_pri &= low_num \\ medium_pri &= medium_num \\ low_pri + medium_pri &< lost_num \end{aligned} \quad (3)$$

当出现以上 3 种情况时,数据发送端认为网络出现了拥塞,则执行拥塞回避算法,将拥塞窗口值减半,并重发丢失数据。

在星际互联网中,误码导致数据丢失的可能非常大,但是即使网络拥塞导致单个分组数据丢失,拥塞状况也非常轻微,网络性能不会为此受到影响。

2.2 TP-Satellite+性能分析

2.2.1 传输时间分析

由于省略了连接建立过程,因此与 TP-Satellite 协议相比,TP-Satellite+协议节省了 1~1.5RTT 时间。若在地球与月球之间建立数据传输,则最少节省 2.6s、最长节省 5.1s 的传输时间;若在地球与火星之间建立数据传输,则最少节省 8.5min、最长节省 60min 的传输时间。若在 1Mbit/s 的链路上传输 1M 字节的文件,地球与月球之间将节省整个传输时间的 24%~39%,地球与火星之间节省的传输时间则更加明显,这对于带宽资源非常宝贵的星际互联网来说,是非常关键的环节。

2.2.2 丢失判断分析

星际互联网中,链路误码包括随机误码和突发误码两种。

对于随机误码来说,只有出现以下 3 种情况时才会出现误判:

- (1) 造成丢失的分组数据只有低优先级数据;
- (2) 造成全部低优先级分组数据丢失,以及部分中等优先级分组数据丢失;
- (3) 造成全部中、低优先级分组数据丢失,以及部分高优先级分组数据丢失。

出现第一种情况的误判概率如式(4)所示:

$$P_{fault_R1} = \sum_{i=2}^{cwnd/3} C_{cwnd}^i \cdot p_{FL} \cdot (1-p_{FL})^{cwnd-i} \quad (4)$$

出现第二种情况的误判概率如式(5)所示:

$$P_{fault_R2} = p_{FL}^{cwnd/3} \cdot \sum_{i=1}^{cwnd/3} C_{cwnd}^i \cdot p_{FL} \cdot (1-p_{FL})^{2/3 cwnd-i} \quad (5)$$

出现第三种情况的误判概率如式(6)所示:

$$P_{fault_R3} = p_{FL}^{2cwnd/3} \cdot \sum_{i=1}^{cwnd/3} C_{cwnd}^i \cdot p_{FL} \cdot (1-p_{FL})^{1/3 cwnd-i} \quad (6)$$

以上公式中, p_{FL} 为链路随机误码造成的分组数据丢失概率, $cwnd$ 为拥塞窗口值。

对于突发误码来说,其影响是造成连续多个分组数据的损坏。由于分组数据的发送是 3 种优先级交替发送,因此只有一个发送窗口的全部分组数据丢失,才会引起误判。在分析信道突发误码情况时,普遍采用一阶离散马尔可夫链模型开展研究。其模型包括“Good”和“Bad”两个状态,当信道处于“Good”状态时,数据可以无误地到达接收端;信道处于“Bad”状态时,数据全部会出现差错。

突发误码引起误判的概率如式(7)所示:

$$P_{fault_B} = p_{bb}^{cwnd} \quad (7)$$

式中, p_{bb} 为链路滞留于突发误码状态的状态转移概率。

若设置 $p_{FL} = 0.1$, $cwnd = 32$ 和 $p_{bb} = 0.8$, 则 TP-Satellite

协议的随机误码误判为 8.99%, 突发误码误判为 2.8%; TP-Satellite+协议的随机误码误判仅为 3.3%, 突发误码误判仅为 0.8%。可以看出, TP-Satellite+协议的误判可能在 TP-Satellite 协议的基础上进一步降低, 适合在随机误码和突发误码都非常严重的星际互联网中应用。

3 仿真实验

为了和目前提出的传输控制协议进行比较, 构建地球与月球之间的星际互联网仿真环境。网络拓扑结构如图 2 所示, 用户通过地面网关与绕月卫星相连, 绕月卫星则与月球表面的探测设备相连, 地面网关可以同时汇接多个连接。

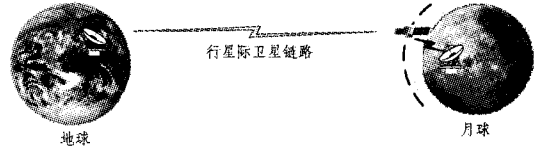


图 2 仿真拓扑结构

3.1 文件传输时间比较

为了比较各个协议传输大小相同的文件所需的时间, 设置 RTT 为 3s, 从地球到月球的前向传输链路带宽设置为 1Mbit/s, 从月球到地球的反向传输链路带宽设置为 150kbit/s。

分别传输 100k、500k、1M、2M 和 5M 字节大小的文件, 各个协议所需的时间如表 1 所列。从表中可以看出, TP-Planet 协议所用的传输时间最短, TP-Satellite+协议的传输时间次之。

表 1 文件传输时间比较

	100k	500k	1M	2M	5M
TP-Satellite+	6.18s	16.31s	28.03s	51.48s	121.80s
TCP Westwood	25.95s	87.71s	145.28s	211.77s	330.11s
TCP Peach	9.86s	19.28s	31.09s	54.70s	125.56s
TCP Reno	25.95s	65.74s	105.87s	160.36s	309.72s
TP-Planet	1.35s	10.73s	22.44s	45.88s	116.20s

由于 TP-Planet 协议是通过发送冗余的探测数据达到尽快提升发送窗口的目的, 因此前向链路的带宽资源消耗很大, 传输 100k 字节大小的文件就需要发送 70k 字节的探测数据, 实际传输带宽的利用率不到 59%。

3.2 RTT 变化对协议性能的影响

由于月球与地球之间的信息传输时延变化巨大, 为了分析传输时延对协议性能的影响, 我们设置 RTT 的变化范围为 1.6~3.4s, 其它设置不变。

不同 RTT 对传输控制协议前向链路吞吐量的影响如图 3 所示。从图中可以看出, 随着 RTT 的增加, 各个协议前向链路吞吐量都在减少, 而 TP-Satellite+和 TP-Planet 协议的吞吐量相对来说最高。

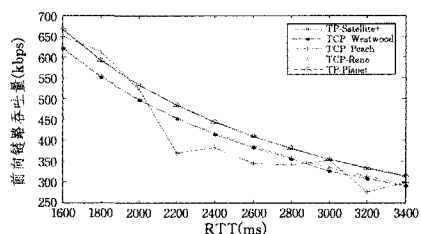


图 3 不同 RTT 情况下的协议前向吞吐量

不同 RTT 对传输控制协议的反向链路占用带宽的影响

如图 4 所示。从图中可以看出,随着 RTT 的增加,各个协议的反向链路占用的带宽不断减少,但 TP-Planet、TCP Westwood、TCP Peach 和 TCP-Reno 协议占用的带宽都大于 10kbit/s,而 TP-Satellite+协议的反向链路带宽仅有 1kbit/s 左右。

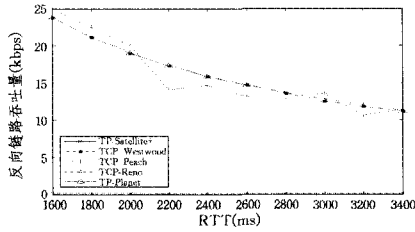


图 4 不同 RTT 情况下的协议反向占用带宽

3.3 链路误码对协议性能的影响

空间链路的误码对数据传输的影响很大,由于深空通信环境复杂,误码率高,因此,在仿真时设置 RTT 为 3s 的情况下,分组数据的丢包率为 $10^{-3} \sim 10^{-1}$ 。

不同链路误码率对传输控制协议的前向链路吞吐量的影响如图 5 所示。从图中可以看出,随着丢包率的增加,各个协议的前向链路吞吐量不断减少,而 TP-Satellite+协议的吞吐量下降最慢,直到丢包率达到 0.05 时,仍能够达到 200kbit/s。

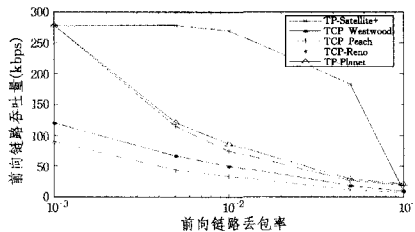


图 5 不同丢包率情况下的协议前向吞吐量

不同链路误码率对传输控制协议的反向链路占用带宽的影响如图 6 所示。从图中可以看出,随着丢包率的增加,各个协议的反向链路占用带宽都会由于前向链路吞吐量的减少而减少,但 TP-Planet、TCP Westwood、TCP Peach 和 TCP-Reno 协议占用的带宽都大于 TP-Satellite+协议的反向链路带宽。

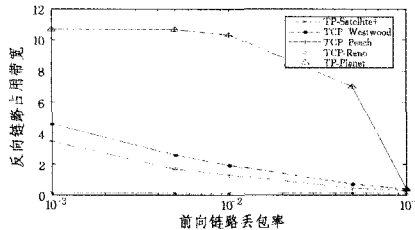


图 6 不同丢包率情况下的协议反向占用带宽

3.4 反向链路资源对协议性能的影响

由于受到空间设备发射功率等因素的影响,反向链路带宽资源非常有限,往往是前向链路的 $1/100 \sim 1/1000$ 。因此,在仿真时设置 RTT 为 3s 的情况下,反向链路带宽为 $20 \sim 5$ kbit/s。

不同反向链路可用带宽对协议前向链路吞吐量的影响如图 7 所示。从图中可以看出,随着反向链路可用带宽的减少,TP-Planet、TCP Westwood、TCP Peach 和 TCP-Reno 协议的前向链路吞吐量也在急剧减少,而 TP-Satellite+协议的前向链路吞吐量没有受到影响。

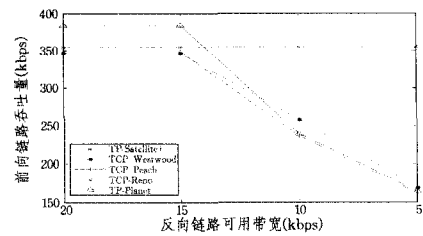


图 7 不同反向链路带宽情况下的协议前向吞吐量

不同反向链路可用带宽对协议反向链路占用带宽的影响如图 8 所示。从图中可以看出,在反向链路可用带宽少于 10kbit/s 后,TP-Planet、TCP Westwood、TCP Peach 和 TCP-Reno 协议的反向链路占用所有可用带宽,而 TP-Satellite+协议的反向链路占用带宽却非常少,仅为 1kbit/s 左右。

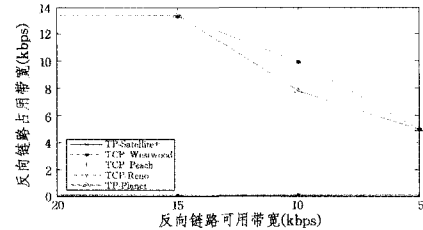


图 8 不同反向链路带宽情况下的协议反向占用带宽

结束语 本文针对深空通信网络的误码率特别高、传播延时特别长的特点,对 TP-Satellite 协议的连接建立和数据发送策略进行了改进,提出了 TP-Satellite+协议。仿真表明,TP-Satellite+协议能够明显缩短文件传输的时间,有效对抗高信道误码,节省反向链路的带宽占用,避免反向链路资源受限带来的不利影响。

参考文献

- [1] Caini C, Cornice P, Firrincieli R, et al. TCP, PEP and DTN performance on disruptive satellite channels [M]. International Workshop on Satellite and Space Communications, IWSSC 2009; 371-375
- [2] Ruhai S, Wang Ho-ran. Protocol Testing of SCPS-TP over NASA's ACTS Asymmetric Links [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(2): 790
- [3] Obata H, Tamehiro K, Ishida K. Experimental evaluation of TCP-STAR for satellite Internet over WINDS [C] // 2011 10th International Symposium on Autonomous Decentralized Systems (ISADS). 2011; 605-610
- [4] Qu Jing-yao. An enhanced TCP Vegas algorithm based on route surveillance and bandwidth estimation over GEO satellite networks [C] // Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2010 International Conference. 2010; 464
- [5] Akyildiz I F. TCP-Peach: a new congestion control scheme for satellite IP networks [J]. IEEE/ACM Trans. Networking, 2001, 9; 307-321
- [6] Casetti C. TCP Westwood: bandwidth estimation for enhanced transport over wireless link [C] // Proc. Mobicom 2001. 2001
- [7] Roseti C, Luglio M, Zampognaro F. Analysis and performance evaluation of a burst-based TCP for satellite DVB RCS links [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2010, 18(3): 911

(下转第 80 页)

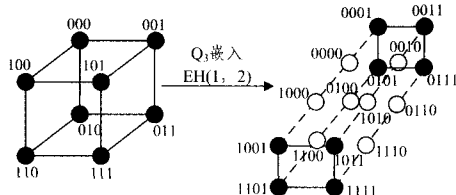


图2 超立方网络 Q_3 到交换超立方网 $EH(1,2)$ 的嵌入映射图

结束语 交换超立方网络作为超立方网络的一个变体结构,通过移去超立方网络的部分连接边提高了网络的扩展性,使得当网络的规模增大时无需增加过多的开销就可灵活地在原有网络的基础上进行扩展。本文对 E-2DMesh 网络和超立方网络到交换超立方网络的嵌入问题进行了研究,证明了当 $\max(s, t) < 7$ 时,不存在 $\text{dilation} = 1$ 的 $EM(2^m, 2^n)$ 到 $EH(s, t)$ 的嵌入映射 ($m + n \leq s + t + 1$), 并对 $EM(2^s, 2^t)$ 嵌入到 $EH(s, t)$ 给出了具体的嵌入映射构造,使得 $\text{expansion} = 2$, $\text{dilation} = 4$, $\text{load} = 1$ 。与此同时,也证明了当 $\min(s, t) > 1$ 时,不存在 $\text{dilation} = 1$ 的 Q_n 到 $EH(s, t)$ 的嵌入映射 ($n = s + t$), 并给出了具体的嵌入映射构造,使得 $\text{expansion} = 2$, $\text{dilation} = 3$, $\text{congestion} = 1$, $\text{load} = 1$ 。网络的嵌入问题,是网络分析中难度很大的课题,本文仅得到了 E-2DMesh 网络和超立方网络嵌入到交换超立方网络的部分结果,关于其它网络模型嵌入到交换超立方网络,将在以后进行进一步的研究。

参考文献

[1] Zhang Peng, Powell R, Deng Yue-fan. Interlacing Bypass Rings to Torus Networks for More Efficient Networks [J]. IEEE Trans. on parallel and distributed system, 2011, 22(2): 287-295
 [2] Wang Chao, Zhang Jun-neng, Zhou Xue-hai, et al. A Flexible High Speed Star Network Based on Peer to Peer Links on FPGA [C]//IEEE 9th International Symposium. on Parallel and Distributed Processing with Applications. Hefei, China, 2011: 107-112

[3] Jha S K, Jana P K. A New Distributed Approach for Building Balanced Ring for Fault Tolerance in Mesh Architecture [C]// Proceedings of International Conference on Methods and Models in Computer Science. Dhanbad, India, 2009: 1-4
 [4] Kini N G, Kumar M S, Mruthyunjaya H S. A Torus Embedded Hypercube Scalable Interconnection Network for Parallel Architecture [C]// IEEE International Advance Computing Conference. Patiala, India, 2009: 858-861
 [5] Peter K K, Hsu W J, Pan Y. The exchanged hypercube [J]. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2005, 16(9): 866-874
 [6] Shen X J, Liang W F, Hu Q. On Embedding Between 2D Meshes of Same Size [J]. IEEE Trans on Computer, 1997, 46(8): 880-889
 [7] Chen Y W, Shen H. Embedding Mesh and tori on double-loop networks of the same size [J]. IEEE Trans. on Computer, 2011, 60(8): 1157-1168
 [8] Bettayeb S, Miller Z, Sudborough I H. Embedding grids into hypercubes [J]. Journal of computer and System Sciences, 1992, 45(3): 340-366
 [9] Mihem R G, Hwang G Y. Embedding rectangular grids into square grids with dilation two [J]. IEEE Trans computers, 1990, 39(12): 1446-1455
 [10] Miller Z, Pritikin D, Sudborough I H. Near embeddings of hypercubes in Cayley graphs on the symmetric group [J]. IEEE Trans Computers, 1994, 43(1): 13-22
 [11] Chen Xiao. Fault-tolerant adaptive and shortest routing in 2-D extended meshes using faulty-block-information [C]// 2000 International Workshops on Parallel Processing Proceedings. Toronto, Canada, 2000: 267-274
 [12] Ranka S, Wang J, et al. Embedding Meshes on the Star Graph [C]// IEEE Conference on Supercomputing. New York, USA, 1990: 476-485

(上接第 40 页)

[8] Ge F, Tan L, Kennedy R A. Stability and throughput of FAST transfer control protocol traffic in bi-directional connections [J]. IET Communications, 2010, 4(6): 639
 [9] Abrantes F, Jo T A, Ricardo J M. Explicit congestion control algorithms for time varying capacity media [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2011, 10(81)
 [10] Li Xiao-long, Yousefi'zadeh H. Analysis, simulation, and implementation of VCP; A Wireless Profiling [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2010, 18(5): 1345
 [11] Hogie K. Link and routing issues for internet protocols in space [C]//IEEE Aerospace Conference. 2001
 [12] Rash J. Internet data delivery for future space missions [C]// ESTC 2002 Proceedings. 2002
 [13] Frank L. Test plan for the demonstration and characterization of IP-based communications with the UoSAT-12 Spacecraft [M]. 2000
 [14] Rash J. Presentation summarizing OMNI concepts, technical details, demonstrations, and test results [OL]. <http://ipinspace.gsfc.nasa.gov/>
 [15] Wood L. Using Internet nodes and routers onboard satellites—submitted [J]. International Journal of Satellite Com-

munications and Networking, 2007; 25(2): 195-216
 [16] Bashim K. Advanced communication and networking technologies for Mars exploration [C]// 19th Annual AIAA International Communications Satellite Systems Conference. 2001
 [17] Bhasin K. Space Internet Architectures and technologies for NASA enterprises [C]// Aerospace Conference. IEEE Proceedings. 2001
 [18] Akan O B. TP-Planet: a reliable transport protocol for InterPlanetary internet [J]. IEEE J. Select. Areas Commun, 2004, 22: 348-361
 [19] 刘炯, 曹志刚. 一种适合卫星网络的拥塞控制算法 [J]. 宇航学报, 2007, 28(3): 689-693
 [20] Liu Jiong, Cao Zhi-gang, Kahan M J. TP-Satellite: a new transport protocol for satellite IP networks [J]. IEEE J. AES, 2009, 45(2): 502-515
 [21] 叶建设, 宋世杰, 沈荣骏. 深空通信 DTN 应用研究 [J]. 宇航学报, 2010, 31(4): 941-949
 [22] Akan O B, Fang J, Akyildiz I F. Performance of TCP protocols in deep space communication networks [J]. IEEE Commun. Lett., 2002, 6(11): 478-480
 [23] 王金苗, 许鹏文. 卫星网络可靠传输协议 ACK 机制研究与性能分析 [J]. 计算机科学, 2011(10A): 271-273