



## 天地一体化信息网络的体系结构与协议分析

刘立祥

(中国科学院软件研究所天基综合信息系统重点实验室,北京 100190)

**摘要:**天地一体化信息网络(space-ground integrated information network, SGIIN)作为未来信息获取、分发、传输和应用的核⼼基础设施,将对国民经济和社会发展起到非常⼤的作用。一体化网络的运行环境复杂和应用多样性,对一体化网络的网络架构和协议体系提出了⼤挑战。在分析天地一体化网络特点的基础上,提出了两级组网体系,将一体化网络分为一级⾻⼲网和二级接⼊网,给出了相应的体系架构。比较了不同的传输协议在空间环境下(如长时延、链路误码率⾼等特点)的性能,给出了量化分析结果;其次,在⾼度相同的卫星网络场景下,按照卫星网络传输任务的特点,分别从数据包转发、系统复杂度以及可移植性3个⽅⾯对不同的卫星网络路由算法进⾏性能分析。仿真和分析结果表明,基于CCSDS(consultative committee for space data systems)的协议体系可以作为未来天地一体化网络⾻⼲网络的协议体系。

**关键词:**多级网络体系;网络协议;⾻⼲网

中图分类号:TP393

文献标志码:A

文章编号:1673-825X(2018)01-0009-13

## Analysis of architecture and protocol of space-ground integrated information network

LIU Lixiang

(Key Laboratory of Space-based Integrated Information System, Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, P. R. China)

**Abstract:** As the core carrier of information acquisition, distribution, transmission and application in the future, space-ground integrated information network(SGIIN) will play a very important role in the development of national economy and society. Operation environment and the application of the diversity of SGIIN pose great challenge to network architecture and protocol system. On the basis of the characteristics of SGIIN, the two level network-backbone network and secondary access network architecture were proposed. Based on the architecture, the performance of the different transport protocols in the space environment (such as long delay, high link error rate) is firstly compared, and quantitative analysis results are given; secondly, based on the satellite network with the same height, according to the characteristics of satellite network transmission tasks, the routing algorithm performance of different satellite network is analyzed from the three aspects of data packets forwarding, system complexity and portability. The results of simulation and analysis show that the protocol system based on CCSDS(consultative committee for space data systems) can be used as the protocol system of the backbone network of future integration network.

**Keywords:** multilevel network architecture; network protocol; backbone network

收稿日期:2017-10-19 修订日期:2017-12-12 通讯作者:刘立祥 liulxdf@163.com

基金项目:国家自然科学基金(91438119)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (91438119)

# 0 引言

随着技术的发展和应用需求的多样化,功能单一、结构规则、运行依赖于地面、相互之间孤立的卫星系统已经不能满足人们对实时性、综合性的服务需求,而具有多种功能、轨道互补、智能性高、自主运行、便于扩展的异构卫星组网成为新的发展方向。

天地一体化信息网络<sup>[1]</sup> (space-ground integrated information network, SGIIN),简称一体化网络,由通信、侦察<sup>[2,3]</sup>、导航<sup>[4]</sup>、气象等多种功能的异构卫星/卫星网络、空间飞行器以及地面有线和无线网络设施组成,通过星间、星地链路将地面、空中用户、飞行器以及各种通信平台紧密联合。地面和卫星之间可以根据应用需求建立星间链路,进行数据交换<sup>[5]</sup>。它既可以是现有卫星系统的按需集成,也可以是根据需求进行“一体化”设计的结果,具有多功能融合、组成结构动态可变、运行状态复杂、信息交换处理一体化等功能特点<sup>[6]</sup>。这种高度综合性的异构网络系统打破了各自独立的网络系统间数据共享的壁垒,能够有效地综合利用各种资源(包括轨道资源、载荷资源、通信资源等),不仅可以为作战提供一体化的侦察、导航、作战指挥等服务,也可以为海-陆-空通信、海洋气象预报、导航、应急救援等提供全方位的支持<sup>[7]</sup>。

从网络特性看,一体化网络具有典型的大时空尺度属性,是一个大时空尺度网络,其网络特点具有如图 1 所示的鲜明特征。

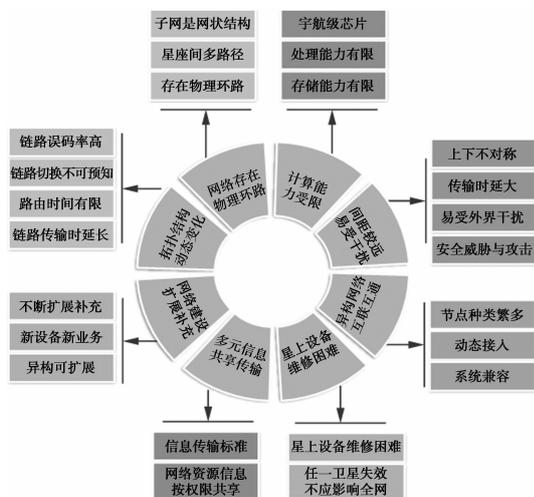


图 1 天地一体化网络特点

Fig. 1 Features of space-ground integrated information network

从组网模式来看,一体化网络包括全中继模式,所有卫星都是通过中继星(如天链)进行信息交互,星间不存在链路;部分中继模式,同类卫星之间有星际链路,异构卫星之间通过中继星进行互连;全连通模式,在可通信范围内卫星与卫星之间构成一个全连通网络。

## 1 目前研究的问题分析

1)组网对象较为简单。目前研究的大多是同种类的卫星构成的规则星座结构,但是天地一体化网络中卫星轨道的种类各异,包括单星、星座、编队等,还有些需要根据任务进行临时建立连接<sup>[8]</sup>。因此,需要研究复杂条件下的组网问题。

2)建链条件过于理想。目前考虑的建链条件过于简单(如可见即可通)、阈值限制以及按照拓扑图等理论基础上的最佳路径计算等,但实际上可见未必可通,应该全局考虑通信质量对路由的影响。

3)信息传输的优先级问题未作考虑。天地一体化网络作为军民两用网络,安全与隔离是非常重要的需求。因此,应该对传输信息进行分级和分类,要考虑信息的时效性、优先级等。

4)节点或链路故障重路由问题。重路由是通信网络或互联网需要具备的重要能力。重路由策略是当拓扑发生改变时,重新建立一条路径,信息从源端重传。这种方式简单但不适用于拓扑变化快的卫星网络,会造成系统效率低下的问题。应该根据链路或卫星的故障情况设计高效的重新路由策略,不从源端重传,减少卫星资源消耗,提高传输效率。

5)负载均衡问题。卫星网络用户分布不均匀,造成网络负载失衡,出现部分节点发生拥塞而其他节点未被充分利用的情况,增加了数据包的排队时延和丢失的概率,应该根据用户分布,应用需求平衡网络负载。

## 2 天地一体化信息网络协议体系

目前常用的网络协议体系包括 TCP/IP (transmission control protocol/internet protocol) 协议体系<sup>[9]</sup>、CCSDS (consultative committee for space data systems) 协议体系<sup>[10]</sup>、DTN (delay-tolerant networking) 协议体系和 SDN (software defined network) 协议体系,TCP/IP 协议簇在地面 Internet 网络得到广泛应用,但由于卫星网络与地面 Internet 的通信环境存在较大差别导致其无法直接应用于空间网络;

CCSDS 协议体系是针对空间通信的特点制定了空间通信协议标准,CCSDS 的通信方案具有可行性,但是要对其路由、传输进行优化设计;DTN 协议体系是一类特殊的网络,很适合天基环境特点,但是由于加入了包裹层和汇聚层,导致了其协议体系与地面以及其他网络在兼容性上存在一定的问题;SDN 协议体系是一种新型网络技术,实现网络控制与转发能力分离,使得转发能力可以直接编程进行控制。SDN 技术可以增强控制层的智能边缘转发能力、骨干网络的高效承载能力以及网络能力的开放和协同。但其多域的组网以及大量转发设备的控制算法非常复杂,且还没有形成统一标准。

天地一体化信息网络是一个复杂的巨系统。从建设上看,这样的系统既包括已经建成的系统,又包含即将建设的系统,不同系统之间的运行模式、协议

体系都不尽相同。基于实际建设需求,利用 2 级网络架构来对系统进行构建,如图 2 所示。图 2 中,一级网络(骨干网络)节点主要是起到骨干传输作用的节点,包括骨干宽带卫星、中继星以及地面网络中的骨干路由器;二级网络(接入网络)节点是指完成具体任务如信息获取卫星、小卫星编队网络、专用星座、地面网络中的非骨干节点。通过这种组网模式的构建可以降低天基网络路由传输和接入的复杂度,提升信息传输效率。

对于骨干网络,为了更好地与异构网络进行互联互通,其协议体系结构采用标准的分层体系,对于接入网络,其协议体系可以采用专用或通用的体系,如非结构化的网络体系<sup>[11]</sup>。这主要是保证二级网络的高效性。天基网骨干网络和接入网络协议体系示意图如图 3 所示。

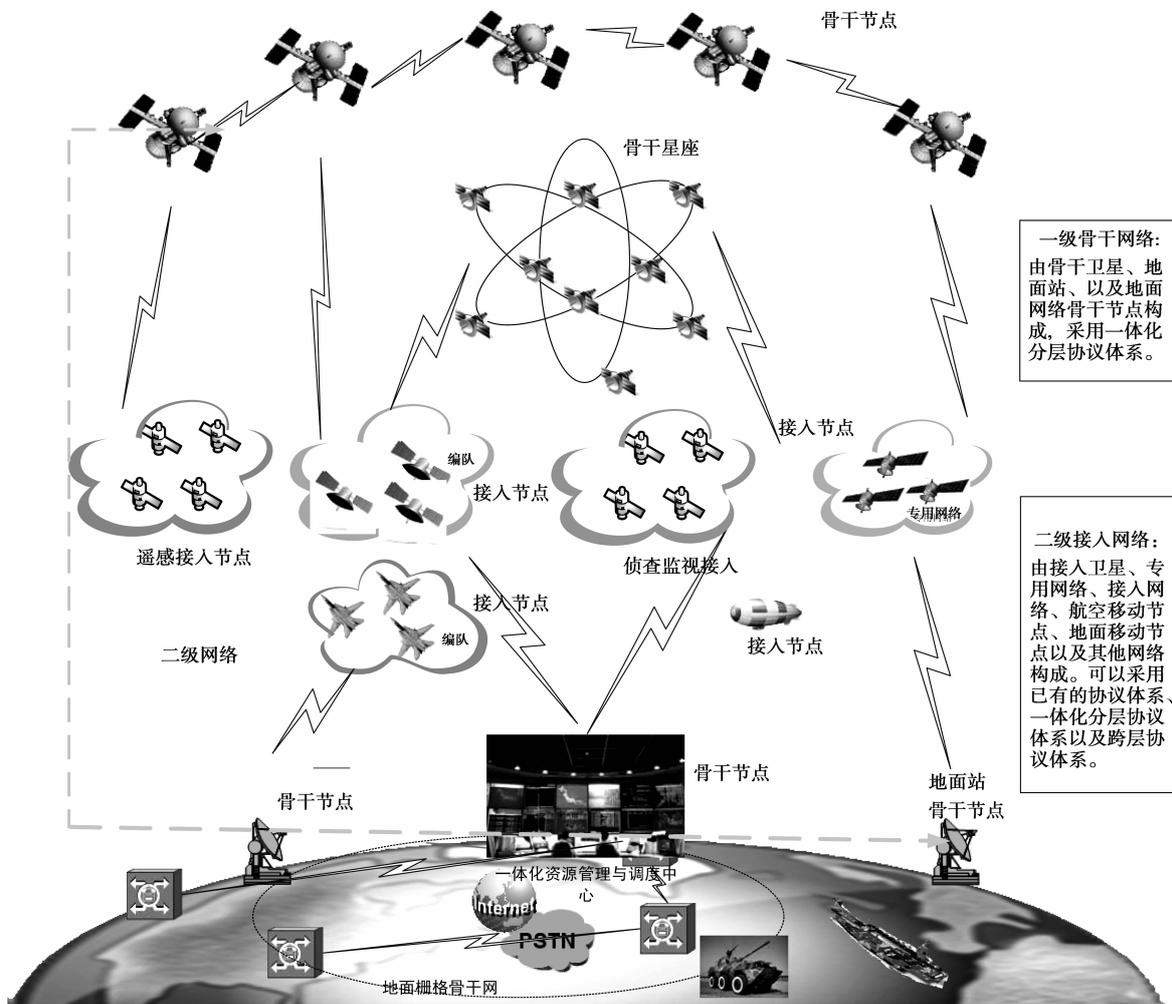


图 2 一体化网络两级架构示意图

Fig.2 Schematic diagram of two level architecture of space-ground integrated information network

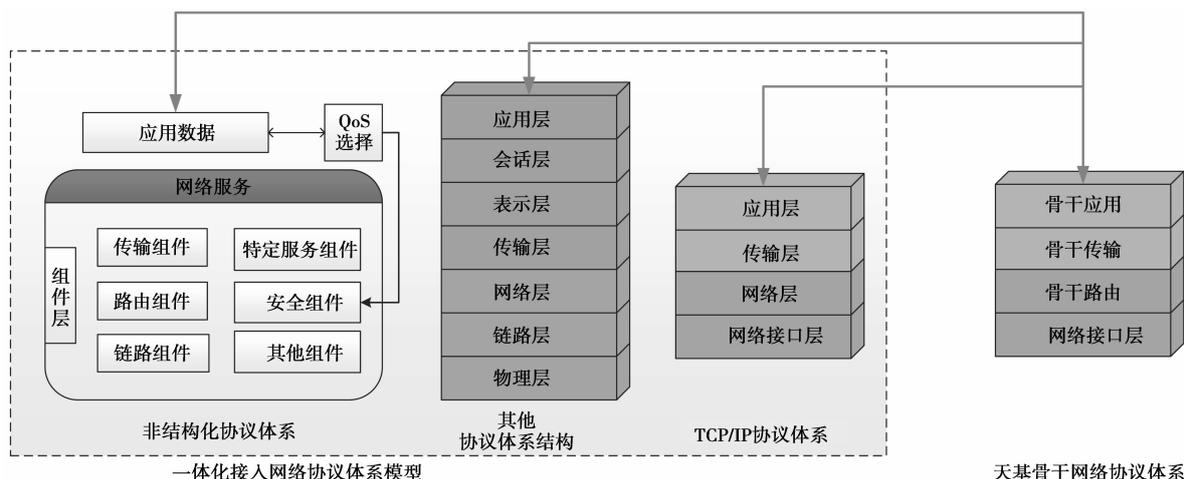


图 3 天基网骨干网络和接入网络协议体系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of space-based network backbone network and access network protocol system

在该协议体系中,为了与地面及其他网络兼容,协议体系包含了常见的协议栈,还有一些针对天基骨干网专门设计的协议,如 BTP(bulk transfer protocol),BNP,BRP 以及宽带接入协议、安全认证协议等。在实际的传输过程中,可以根据具体的传输需求对该协议栈进行优化,以达到高效传输的目的。

接入网协议体系可以根据需要进行选择,可以是层次化协议,也可以是非层次化协议体系,如:①DTN 协议体系<sup>[12-13]</sup>;②TCP/IP 协议体系;③CCSDS 协议体系;④SDN 协议体系;⑤非层次化协议体系等。针对不同的需求,如果是深空网络节点,可以选择 DTN,地面可以选择 TCP/IP,卫星集群组网可以选择非层次化协议体系等。

### 3 传输和路由协议分析

为了获得不同协议的总体性能,本文重点分析前 3 类体系的空间网络协议,根据协议网络状态控制方式,进行分类比较,并推导出 TCP 协议组和单纯基于速率控制协议的理论边界。需要指出的是,这些理论结果适合于在协议达到稳定状态下,传输大文件的性能,但对小文件如命令或控制传输并不适用。推导的协议理论模型分别如下。

#### 3.1 基于拥塞控制的 TCP 协议

首先对运行在高误码链路上基于拥塞控制的协议(TCP-SACK, SCPS-VJ 和 SCPS-vegas-congestion)进行分析,推导出其最大理论吞吐量如(1)式所示。需要指出的是,(1)式需要假设系统已达到了稳定状态,传输文件的类型为大文件,而不是命令或者控制文件等小文件。

$$Bandwidth = 0.93 \times MSS/RTT \times \sqrt{p} \quad (1)$$

(1)式中: $MSS$  表示最大分段大小; $RTT$  表示往返时延; $p$  表示数据包错误率。

在实验中,用户数据包大小设置为 1 024 Byte。

在没有错误的环境下,最大吞吐量等于接收窗口除以  $RTT$ ,如(2)式表示。(2)式假设了大文件传输在慢启动的时间消耗很小。

$$\text{最大吞吐量} = (\text{窗口大小}/RTT) \quad (2)$$

TCP-SACK 测试窗口大小使用 250 KByte, 2.85 MByte 和 5.7 MByte,延迟分别对应 10 ms,250 ms 和 500 ms。并通过(2)式来进行计算。

为了计算包头开销对吞吐量的营销,假设包头开销设置为 58 Byte(TCP 包头为 20 Byte,IP 包头为 20 Byte,以太包头为 18 Byte)。因此,最大吞吐量需要除以  $1024/(1024 + 58)$ 。

#### 3.2 基于速率控制的协议

空间通信协议规范(space communications protocol specification,SCPS)纯速率控制选项不使用拥塞控制算法。发送速率取决于由用户与接收机缓存大小所定义的速率值。像 TCP 和 SCPS-VJ 测试,确认方式使用延迟 ACK。如前所述 SNACK 选项,也可在纯速率控制中使用。

SCPS 纯速率控制还有使用“严格延迟 ACK”的附加选项。ACK 每隔延迟 ACK 计时器定义的时间发送一次,而不是每个数据包或每隔一个数据包发送一个 ACK。在长延迟的环境中,经过较长的时间可能下一个数据包才能到达,使用延迟 ACK 计时器来触发 ACK 反馈是有益的。

针对基于速率控制的空间协议,首先通过对基

于速率控制的协议的一阶近似,将一个文件总的传输时间等于传输该文件初始数据包的时间加上重传丢包需要的时间,一个往返时延等于一个链接建立之初时的 3 次握手时间。可以得出,最大吞吐量等于总的文件大小除以总的传输时间。如果假设,每一次丢失的数据包固定在第一次重传,考虑到包头开销对吞吐量的影响,最大吞吐量将减少。因此,错误链路下基于速率控制的协议最大吞吐量,计算公式可以表示为

$$\text{吞吐量} = 1024 \times 8 \times \text{文件大小} / ((1024 + 58) / ((\text{文件大小} \times 8 \times p / P) + (\text{文件大小} \times 8 / R) + RTT)) \quad (3)$$

(3) 式中:  $R$  表示用户速率;  $p$  表示数据包错误速率;  $RTT$  表示往返时延。

利用推导出的理论模型(2)式与(3)式分别进行仿真,仿真场景设置为:传输文件数据量固定为 100 MByte,延迟从 10 ~ 500 ms 变化,链路速率设定为 100 Mbit/s,数据包大小为 1 024 Byte。仿真结果如图 4 所示。图 4 分别显示了基于速率控制的协议以及基于拥塞控制的 TCP 协议的理论吞吐量。图 4 给出了基于速率控制协议的吞吐量的理论上界,同时显示了 3 种不同延迟下 TCP 的理论吞吐量。可以看出,其吞吐量受链路错误的影响很大。因此,基于速率控制的协议在高带宽环境下比 TCP 协议性能具有较大的优势。

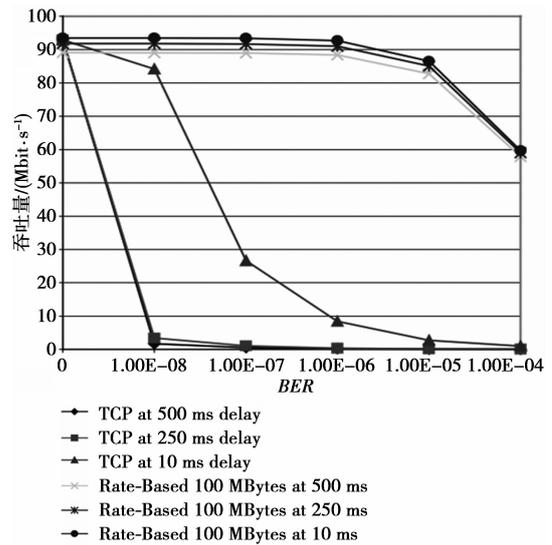


图 4 网络协议理论吞吐量对比

Fig. 4 Network protocol theory throughput comparison

### 3.3 传输协议仿真性能测试对比

#### 3.3.1 测试环境和协议配置

本文搭建的仿真测试环境如图 5 所示,测试床环境由 2 个分开的网络组成,分别代表地面和空间网络。2 个网络的连接通过多个虚拟电路,同时经过一个信道模拟器进行桥接,模拟器可以注入时间延迟和数据流随机比特错误。信道每一端网络由 1 个路由器和 1 个以太网交换机组成。该交换机用于进行 LAN 的服务。

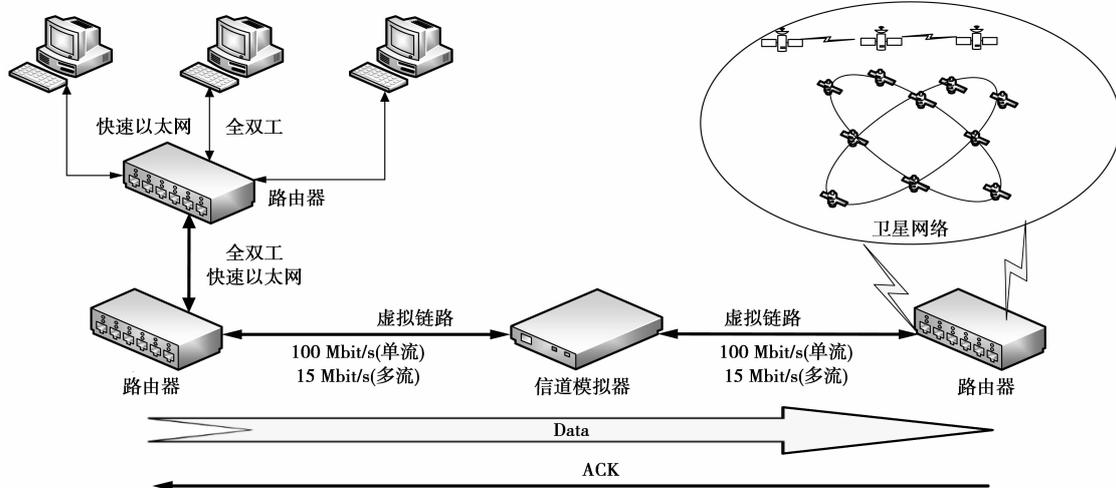


图 5 测试环境架构

Fig. 5 Test environment architecture

为了评估这些协议在空间环境的性能,包括长时延,链路易错的特点对性能的影响,将测试环境中的延迟  $RTT$  从 10 ~ 500 ms 进行变化,而 BER 设置

为(0 ~ 1E - 4)。具体参数配置如下。

单流测试中, TCP, SCPS-TP, MDP (multicast dissemination protocol) 和 MFTP (multiple fiel transfer

protocol) 协议用到的所有变量如下。

- 1) 文件大小: 100 KByte, 1 MByte, 10 MByte, 100 MByte;
- 2) 数据包大小: 1 024 Byte;
- 3) BER 大小:  $0, 1.00E - 08, 1.00E - 07, 1.00E - 06, 1.00E - 05, 1.00E - 04$ 。

选择 TCP\_SACK 来进行测试。对于 TCP\_SACK 测试, 缺省数值使用 Sun Solaris 7 Kernel 中的多数 TCP/IP 参数。

对于 SCPS 协议的测试共有 5 种选项, 分别如下。

- 1) Van Jacobson Congestion Control (SCPS-VJ), 每隔一个包确认一次;
- 2) Pure Rate Control (SCPS-Pure Rate Control, Option F2), 每隔一个包确认一次;
- 3) SCPS-Pure Rate Control, Option F0;
- 4) SCPS-Vegas-Congestion;
- 5) SCPS-Vegas-Corruption。

在进行多个数据流测试时, TCP-SACK, SCPS-VJ 和 SCPS-Vegas-Congestion 采用单个数据流测试中的数据包大小, 同时其他参数设置如下。

- ① 文件大小固定为: 50 MByte;
- ② 往返时延固定为: 500 ms;
- ③ BER 数值设置为  $0, 1.00E - 07$  和  $1.00E - 05$  3 种;
- ④ MDP 选项: 没有前向校验, 速率设置为 40 Mbit/s (服务器);
- ⑤ MFTP 选项: 最大数据单元设置为 1 472 (服务器)。

对于 SCPS-VJ 测试, 为了与 TCP 测试一致, 缺省延迟 ACK 定时器延迟设置为从 50 ~ 200 ms。其余 SCPS-TP 参数不变。SCPS 速率选择设置为 80 Mbit/s 和 100 Mbit/s。由于平均吞吐量大小比 100 Mbit/s 略高, 所以选择 SCPS 速率为 100 Mbit/s 作为测试。

对于 TCP-SACK 和 SCPS-VJ, 测试文件大小为 100 MByte, 误码率环境为  $1.00E - 05$ 。其余测试文件大小分别为 10 MByte, 1 MByte, 100 KByte。误码率环境设置为  $1E - 4$ 。

采用 SCPS-RI 1. 1. 62 版本进行 SCPS-Vegas-Congestion 测试, 采用版本 1. 1. 66 作为 SCPS-Vegas-Corruption 测试。这两者的区别在于 SCPS 版本 1. 1. 66 与 1. 1. 62 基本功能相似, 但是版本 1. 66 可以切换 2 种慢启动机制。

考虑到仿真时间的限制, Vegas 测试只采用 10

MByte 和 100 MByte 2 种文件大小, 2 种 Vegas 的最优速率分别设置为 60 Mbit/s、延迟设置为 500 ms, 以及 80 Mbit/s、延迟设置为 10 ms。

### 3.3.2 仿真结果

#### 3.3.2.1 基于拥塞控制的协议性能

图 6 显示了不同协议在延时 500 ms 时的情况下分别发送 10 MByte 和 100 MByte 文件大小的平均吞吐量。图 7 显示了不同 BER 环境下, 不同协议传输 10 MByte 文件的平均吞吐量。可以看出, 3 种基于拥塞的协议的总体特性相似。TCP-SACK 和 SCPS-VJ 都使用了 Van Jacobson Congestion Control 算法, 因此, SCPS-VJ 和 TCP-SACK 的总体特性相似。而 SCPS-Vegas-Congestion 性能略优于 TCP-SACK。

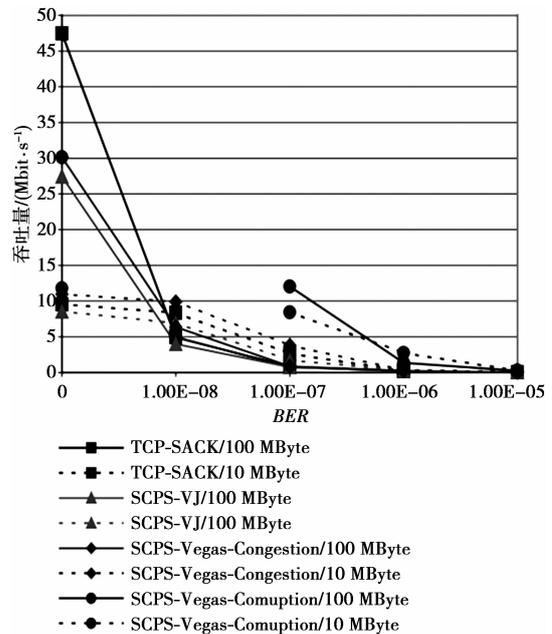


图 6 基于拥塞协议性能 (500 ms 时延)

Fig. 6 Performance based on congestion protocol (500 ms delay)

在无码率的环境下, 大的文件传输比小的文件传输具有较高的吞吐量, 这是因为慢启动在文件越多的情况下影响越小, 而在高误码率情况下, 小的文件传输比大的文件传输具有更高的吞吐量。对于 TCP-SACK 和 SCPS-VJ, 这是因为加性增乘性减拥塞控制算法的作用。每当错误发生时 SCPS-Vegas-Congestion 的窗口减少一半, 所以当网络中发生错误时, SCPS-Vegas-Congestion 的吞吐量下降比 SCPS-Vegas-Corruption 的吞吐量下降快。

在高 BER 环境下, SCPS-Vegas-Corruption 协议

的性能比基于拥塞协议性能高。但是性能仍然不如基于速率控制的协议。

### 3.3.2.2 基于速率控制的协议性能

本测试不涉及拥塞控制机制,当在网络中没有拥塞的情况下,只能进行单个数据流的测试。首先给出该网络场景下 3 类协议的基本参数配置。

在单流测试中协议的参数配置如下。

#### 1) SCPS 基于速率控制协议。

SCPS Pure-Rate Control (SCPS-Pure-Rate-2): 每隔一个包确认一次。

Pure-Rate Control (SCPS-Pure-Rate-F0): 延迟确认。

对于 SCPS-Pure-Rate-F2 测试,将 SCPS-RI 版本 1.1.51 中的延迟 ACK 定时器改为 50 ms。测试中最优速率为 80 Mbit/s。

当使用 SCPS-RI 1.1.51 版本进行 SCPS-Pure-Rate-F0 调整测试时,确认包并不是按照默认 ACK 定时器规定的每隔 200 ms 进行发送,而是确认包的延迟大于 200 ms。ACK 最短往返时间为 200 ms,最长可以在 1~2 s。由于接收端窗口更新的速率并不及时,从而 ACK 返回的速率减少了接收窗口的大小。

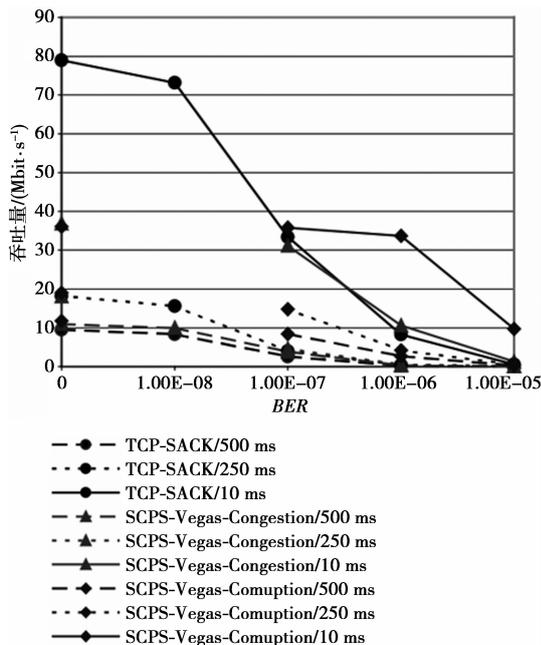


图 7 基于拥塞协议性能(10 MByte 文件传输)

Fig. 7 Performance based on congestion protocol (10 MByte file transfer)

#### 2) MFTP。

配置 MFTP 传输时应用的最大速率配置为 50 Mbit/s。此外,指明 2 个系统的单播地址。设置

MFTP 服务器一次传输一个文件,但是在起始传输时间时,需要传输修复数据去应答客户 NACKS 高达 100 次。

#### 3) MDP。

配置 MDP 使用单播地址传输时最优速率配置为 40 Mbit/s。服务器传输数据块不进行前向校验,并且重传其负载。

通过仿真测试,结果如图 8 和图 9 所示。

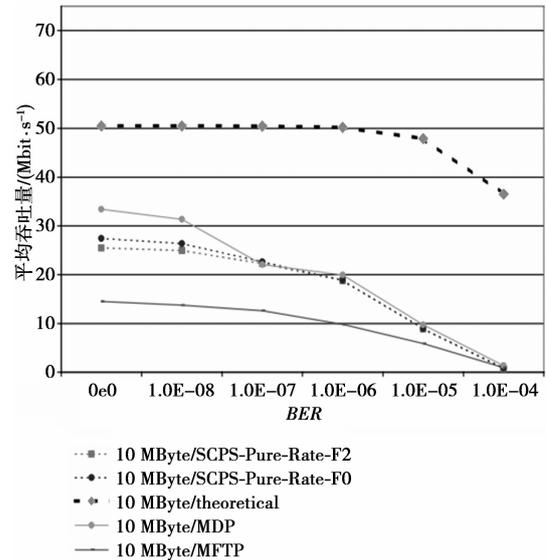


图 8 具有 500 ms 时延的 Rate-based 文件传输

Fig. 8 Performance based on congestion protocol (10 MByte file transfer)

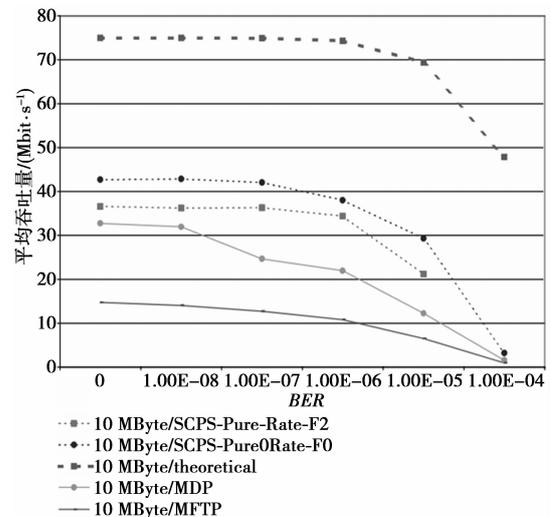


图 9 Rate-Based 平均吞吐量与 BER 的对比

Fig. 9 Comparison of Rate-Based average throughput with BER

图 8 显示了在 500 ms RTT 延时下不同基于速率控制协议的性能。当传输大文件时,可以看出,没有基于速率控制的协议可以与理论吞吐量吻合,这

个可能跟协议实现的机理有关。尽管所有基于速率控制协议的吞吐量实验结果略低于理论数值,10 MByte MFTP 在 3 种不同延迟下的曲线与理论数值曲线接近。在有 BER 和延迟的情况下,MDP 的性能大概有 35 Mbit/s,性能比 SCPS-TP 速率控制协议略好。但在高 BER 的环境下,吞吐量速率下降很快,与理论计算数值并不匹配。在低 BER 的环境下,与理论计算数值也不完全一致。尤其在高 BER 和高延时情况下,接收机变得超负荷,与发送方不能保持一致。

在图 9 中,相比于各自在 500 ms 时的吞吐量曲线,SCPS-Pure-Rate-F2 和 SCPS-Pure-Rate -F0 在 10 ms 时延情况下的曲线与相应的理论曲线非常接近。这更能说明这也许是个内存管理问题。另外,SCPS 在内核层的实施能够提升其性能。

### 3.3.2.3 多业务流时基于拥塞控制的协议性能

在单流实验中,单个流可以利用全部带宽。在多流实验中,三对流竞争可用的带宽。对于这些测试,在路由器的 ATM(asynchronous transfer model)接口上将带宽设置为 15 Mbit/s。在时间限制上只允许一个有限的测试子集在具有 500 ms RTT 时延上运行,该子集的 BER 分别为 0,1.00E-07 和 1.00E-05,和一个大小为 50 MByte 的单独文件。如图 10 所示,与单流测试相似,SCPS-Vegas-Congestion 的表现仅比 TCP-SACK 好一点,而 TCP-SACK 的表现又比 SCPS-VJ 在 0 和特定 BER 同时具有 500 ms RTT 时延情况下好一点点。在 BER 为 1.00E-07 和 1.00E-05 情况下,在多流测试下的每一对流的吞吐量具有与单流情况下几乎完全相似的性能。这是因为错误对吞吐量的影响远比拥塞对吞吐量的影响大。

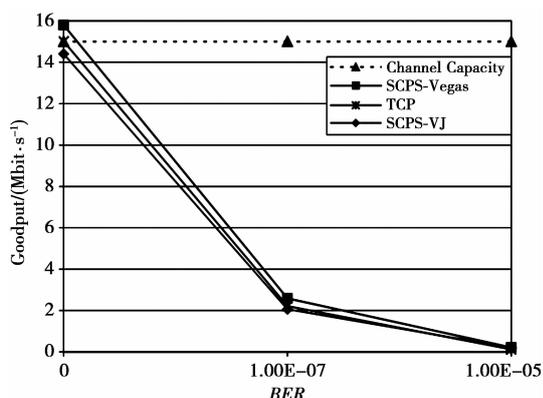


图 10 多个数据流吞吐量随着 BER 的变化

Fig. 10 Throughput of multiple data streams varies with BER

需要注意的是,所有的平均吞吐量可能会超过网络容量。这是因为三对流的随机偏移开始次数,这里每个数据流都以随机的时间间隔开始,使各自的流传输和完成时对可用信道带宽的利用率都不同。在任意子集的全体平均吞吐量能够超过 15 Mbit/s,尤其在第一个和最后一个传输没有太多交叠的情况下。

图 11 显示了每个 TCP-SACK 流测试组中的 30 次测试的吞吐量。测试反映了每个收发机组在 BER = 0 情况下的特性,相同的结果也发生在 SCPS-VJ 和 SCPS-Vegas-Congestion 测试中。对每组测试数据进行分析后发现,SCPS-Vegas-Congestion 测试中没有一个流的吞吐量低于 3 Mbit/s。然而在 TCP-SACK 和 SCPS-VJ 的测试中,30 次测试中有 20 次测试的吞吐量低于 3 Mbit/s。尽管在 TCP-SACK 和 SCPS-VJ 测试中吞吐量分别是 2.3 Mbit/s—7.9 Mbit/s 和 1.9 Mbit/s—7.5 Mbit/s,相应地在 SCPS-Vegas-Congestion 的流测试中,最小吞吐量和最大吞吐量分别为 3.2 Mbit/s 和 9.5 Mbit/s。

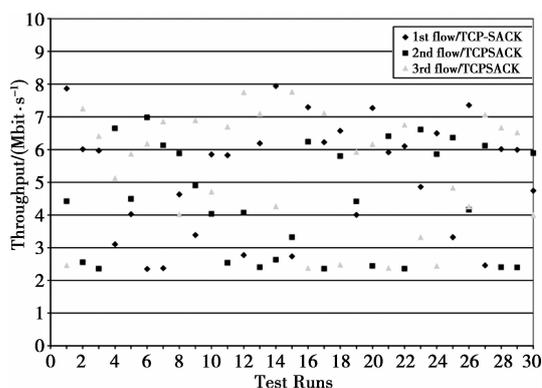


图 11 分别多流传输时各自吞吐量

Fig. 11 Respective throughput of multi stream transmission

对以上的结果进行分析可知:

1) 在空间环境中,多个数据流和单个数据流测试结果显示 SCPS-Vegas 对 TCP 的增强可以提供性能改进。

2) 在高 RTT 延迟下,即在具有高 RTT 延迟的错误敏感环境下,基于速率控制的协议性能是显著下降的。现有拥塞的传输协议虽然能满足大多数任务需求,但是仍需要对其进行修改和优化。

## 3.4 天基网络路由协议性能分析

### 3.4.1 主要路由算法比较

目前卫星网络路由协议充分利用卫星网络拓扑变化的周期性和可预知性,减少路由协议对网络资

源的消耗,这样处理后果是路由协议受限于卫星网络拓扑,一旦卫星网络拓扑结构发生变化,如加入新节点、新轨道、新星座,则路由协议需要作出较大改变,扩展性并不强。

表 1 是对几种典型卫星网络路由算法与地面无线传感器网络路由算法的比较。其中, $N$  为网络中节点数量, $e$  为通信链路数量。抗毁性是指当网络中某链路或者节点失效后,路由能否快速作出反应,选择新的路径。对于基于快照序列的卫星网络路由算法、Ekici 分布式卫星网络路由算法、AODV、DREAM 等路由协议,当发生链路或者节点失效时,均需要重新寻找路径,产生大量网络控制信息,而基于地理位置信息抗毁性路由协议在链路或者节点发生失效后能够在本地快速做出反应,选择新的路径。

### 3.4.2 性能指标分析

在高度基本相同的卫星网络场景下,按照卫星网络传输任务的特点,针对卫星网络路由算法分别从数据包转发、系统复杂度以及可移植性 3 个方面进行性能分析,对卫星网络路由算法进行比较。数据包转发方面主要包括延时、健壮性、稳定性、正确性、公平性和最优性等性能指标;系统复杂度方面主要包括卫星网络节点计算与存储复杂度、对地面基站的复杂度要求等性能指标。具体对比参见表 2—表 4。

基于离散拓扑序列的卫星网络路由算法首先会建立卫星节点间的虚链路,选取备选路径中延时小和切换次数少的路径作为最优路径,理论上时延抖动偏小,但网络实际运行过程中,延迟小和切换次数少可能是 2 个相互冲突的条件,所以使用基于离散

拓扑序列的路由算法的卫星网络实际运行过程中延迟抖动往往比理论分析要大。

基于地理位置的卫星网络路由算法没有采用虚连接方式,由于选路存在不确定性,延时抖动不能保证。时延抖动相对严重。其中,基于地理位置的分布式抗毁路由算法在 Ekici 分布式卫星网络路由基础上,优先选择地理位置更接近目标的邻居作为下一跳,能获得较好的端到端时延结果。

基于离散拓扑序列的卫星网络路由算法采用虚通道机制,面向连接的传送方式比较稳定,但路由表无法根据网络实际情况实时更新,在链路状态发生变化时,需要首先由地面站节点重新计算路由,然后根据卫星拓扑结构变化选择合适时间向上发送路由信息,更新星上路由表,健壮性不够好。基于快照的卫星网络路由算法在 ATM 机制的基础上加入了备选路径处理,卫星优化切换时路径选取,算法稳定性加强,但是由于备选路径有限,如果备选路径全部失效,路由表仍然需要延迟更新,而且由于卫星需要存储大量备选路径,极大地增加节点存储复杂度,算法健壮性仍然较差。目前,基于离散拓扑序列的卫星网络路由算法由于无法实时获取网络状态,所以往往不考虑公平性等需要实时信息的性能指标,仅将最短延迟和最少切换次数作为路由决策标准,在网络负载较重情况下性能不佳,在同一时间片内很可能出现网络中部分卫星负载很重,而另外一部分卫星基本没有网络负载。虽然时间片间路由算法能够根据获取信息进行相应调整,但是需要等待时间片时间,所以反应速度较慢。

表 1 路由算法比较

Tab. 1 Comparison of routing algorithms

类别	基于位置信息 抗毁性路由	基于快照序列的卫 星网络路由算法	Ekici 分布式卫星 网络路由算法	AODV	DREAM
支持位置传播	是	否	否	否	是
借助位置信息发送数据	是	否	是	否	是
路由种类	按需/主动方式	主动方式	按需方式	按需方式	主动方式
对移动性敏感	否	是	否	否	否
选路原则	距离最短	最短路径	距离最短	最短路径	最短路径
路由环	无	无	无	无	无
最坏情况	无	无	无	全网洪泛	无
多接收方	不是	不是	不是	不是	不是
多路径	不是	是	不是	不是	不是
存储复杂度	0	$O(N)$	$O(N)$	$O(e)$	$O(N)$
通信复杂度	$O(N)$	$O(N)$	$O(N)$	$O(2N)$	$O(e)$
抗毁性	支持	不支持	不支持	不支持	不支持
地面基础设施依赖性	否	是	是	否	否
对网络拓扑结构要求	部分要求	要求	要求	不要求	不要求

表 2 卫星网络路由算法数据包转发对比

Tab.2 Comparison of routing algorithms for packet transmission in satellite networks

卫星网络路由算法	性能	时延抖动	稳定性和健壮性	公平性和最优性
基于 ATM 的卫星网络路由算法	较差	选取备选路径中延时小和切换次数少的路径为最优路径,理论上时延抖动偏小;但在特殊情况下,这 2 个因素很可能冲突,此时并不能保证时延抖动	采用虚通道机制,面向连接的传送方式比较稳定。但路由表的更新存在及时性问题,在卫星与地面通信困难时或刚刚恢复时路由表新旧容易引发问题;在卫星链路失效或被控制时,需要地面做出快速反应,重新计算后再更新星上路由表,健壮性不够好	地面根据网络拓扑计算后返回卫星的最优路径,一般不太考虑公平性,但考虑使延时小和切换次数少,该最优路径没有考虑实时情况,不一定最优
基于离散拓扑序列的卫星网络路由算法	较好	本质上与基于 ATM 的寻路一致,但是引入了流量约束机制,采用迭代算法计算全局最优路径,保证网络的空余容量,因此很大程度上减小了时延抖动	问题与基于 ATM 机制的一样,对于特殊情况的处理不够及时,对健壮性需要进一步加强	同基于 ATM 机制一样,但引入了流量约束,比其公平性和最优性要适宜一点
基于快照的卫星网络路由算法	一般	依然使用面向虚连接方法,选取切换次数少的路径,但拥有流量平衡机制和备选路径优化处理,时延抖动较小	在 ATM 机制的基础上加入了备选路径处理,卫星优化切换时路径选取,加强了稳定性;由于路由表数据量有限,而且延迟问题依旧存在,健壮性仍然不够好	引入备选路径处理,优化切换时路径选取,避免严重的错误,缓解了那种情况下最优性的严重下降
基于 IP 的卫星网络路由算法	好	没有采用虚连接方式,由于选路存在不确定性,对于延时抖动不能保证。但正因为考虑了故障和流量信息,一定程度上缓解了时延抖动	面向非连接传送方式,稳定性不够。实时寻路,根据不同情况选择,对于特殊情况发生时的反应较快,增强了算法的健壮性。但同时它对地理位置的依赖也是比较高的,局部处理并不能解决全局的问题	根据实时情况选择通路,重视效率,局部处理公平性和最优性,但局部最优也许并非全局最优
基于地理位置的卫星网络路由算法	好	寻路存在不确定性,但考虑在极地和缝的特殊传输处理后,实时寻路的方案在发生特殊情况时的时延抖动被大大减小	与基于 IP 的卫星网络路由算法基本一致,同时引入球面空间和极地处理,使卫星考虑路径更实际。但分布式的特点依旧决定了它的处理措施并不一定能解决全局的情况	同基于 IP 的卫星网络路由算法基本一致,考虑球面和极地处理后,进一步加强了最优性
基于地理位置的分布式抗毁路由算法	好	同样继承了实时寻路的特性,在 Ekici 分布式卫星网络路由基础上,充分考虑链路传输的权值比较,优先传输轨道面间传输,尽量减小了发生大的延时抖动的机会	实时掌握临近四个节点的卫星状况,力求最快的处理好特殊情况,具有很好的健壮性。同时虽然采用面向非连接,但是引入权值比较法,抗毁性的引入使传输稳定性更好	继承了基于 IP 的卫星网络路由算法的特点和缝与极地的处理,引入权值判定机制,加强了最优性

表 3 系统复杂度对比  
Tab.3 Comparison of system complexity

卫星网络路由算法	卫星网络路由算法	卫星网络路由算法	卫星网络路由算法	卫星网络路由算法	卫星网络路由算法	
卫星网络路由算法		卫星网络路由算法		卫星网络路由算法		
卫星网络路由算法		卫星网络路由算法		卫星网络路由算法		
基于 ATM 的卫星网络路由算法	需要地面基站根据卫星网络的离散拓扑序列来计算每个间隔时间内的点到点卫星的最优路径,并上传至各个卫星。在发生故障状况时也需要重新计算。复杂度高	卫星存储复杂度较高,需要存储到各个卫星的最优路径,而且必须不断更新。但计算复杂度较低,只需按标签转发,路由表的计算靠地面完成	基于离散拓扑序列的卫星网络路由算法	基于 FSA 的卫星网络路由算法	同基于 ATM 的卫星网络路由算法类似,不过采用了线性回归与迭代计算,地面基站的复杂度稍减	与基于 ATM 的卫星网络路由算法一致,卫星计算复杂度较低,存储复杂度较高
基于快照的卫星网络路由算法	与基于 ATM 的卫星网络路由算法一致,复杂度高	引入备选路径处理后,改用程序存储模型,数据量的加大的同时,存储复杂度减缓,计算复杂度依旧较低	基于 IP 的卫星网络路由算法	由于卫星节点自己采取实时传送,只需要最初时由地面计算卫星轨道特征,给卫星上传一次即可。地面基站复杂度低	由于卫星节点必须对数据包进行实时传输,因此卫星计算复杂度稍高,尤其当发生特殊状况时。但由于不存路由表,故存储复杂度很低	
基于地理位置的卫星网络路由算法	Ekici 分布式卫星网络路由算法	与基于 IP 的卫星网络路由算法一致,地面基站复杂度低。	与基于 IP 的卫星网络路由算法一致,卫星存储复杂度低,但计算复杂度稍高。	基于地理位置的分布式抗毁路由算法	与基于 IP 的卫星网络路由算法一致,复杂度低。另外引入校准机制,增强有效性的同时不影响地面复杂度	引入权值比较后,卫星计算复杂度较高,但依旧只是比较选择的工作,绝对量并不大。存储复杂度依旧很低

基于地理位置的卫星网络路由算法采用实时寻路,根据收集到的卫星网络实时状况选择数据传输路径,对网络状况实时变化反应灵敏。但是由于分布式特性,很难使用全局信息进行路由判断,而是使用局部信息选取最优路径,这种路由选择方式无法保证全局最优。基于地理位置的卫星网络路由算法根据实时情况选择通路,重视效率,局部处理公平性和最优性,能够获得较好的公平性。

基于离散拓扑序列的卫星网络路由算法需要地面站根据卫星网络的离散拓扑序列计算每个时间间隔内的卫星网络的最优路径,并上传至网络中的所有卫星。当网络发生故障的时候,地面站无法及时获取信息,在发生故障状况时也需要重新计算,计算复杂度高。对于卫星节点,由于要存储大量路由表,存储复杂度高,但只需按标签转发,路由计算复杂度低。

基于地理位置的卫星网络路由算法地面站不需要预先计算路由表,各个卫星节点实时计算数据传输路径,地面基站计算复杂度以及存储复杂度都降

低。卫星节点由于不需要接收与存储地面站发送给卫星的路由信息,网络数据传输负担以及卫星节点存储负担均明显降低。但卫星节点需要实时计算数据传输路径,因此卫星计算复杂度较高。随着计算附加条件增加及卫星网络环境的复杂度提高,卫星节点计算复杂度明显上升。

基于离散拓扑序列的卫星网络路由算法,卫星节点需要不断接收地面站发送来的路由信息与网络负载。对于地面站节点,当新加入或者移出卫星或卫星系统,地面站需要重新计算整网路由,对地面站计算能力要求很高。同时由于是地面站集中控制,所以算法移植性很好,卫星网络系统的改变仅需要对地面站中央控制节点作出反应,其余卫星节点不需要做任何改变。

基于地理位置的卫星网络路由算法可以不预先计算路由表,各卫星节点实时计算并传输数据信息,地面站不需要进行大量计算得出整网路由信息,并将大量路由信息发送到每个卫星节点,网络负担轻。

但是传统的基于地理位置的卫星网络路由算法都考虑某一个特定网络模型,而且卫星逻辑地址是按照特定系统与地球表面所决定的,如 Iridium 和 Tele-desic 系统,当新增或者减少卫星导致卫星星座不是预先设定规则星座时,路由算法可能无法正常工作。

如果组成的新系统网络拓扑不够规则,无法满足算法预先设计好的规则拓扑,则路由算法根本无法运行,因此可移植性较差。而基于地理位置的分布式抗毁路由算法充分考虑了不同的网络拓扑变化对路由的影响,具有较好的可移植性。

表 4 算法可移植性对比

Tab. 4 Comparison of algorithm portability

卫星网络路由算法	网络负担	可移植性
基于 ATM 的卫星网络路由算法	路由表的不断更新要长期占用网络带宽,尤其是网络发生故障或改变时,网络负担重	当新增/减少卫星,或移植到另外的卫星系统中运行时,只需由大型基站重新计算,可移植性较好
基于离散拓扑序列的卫星网络路由算法	同基于 ATM 的卫星网络路由算法一致,网络负担重	同基于 ATM 的卫星网络路由算法一致
基于快照的卫星网络路由算法	同基于 ATM 的卫星网络路由算法一致,但引入存储模型后,网络负但在时间上均衡少许。	同基于 ATM 的卫星网络路由算法一致
基于 IP 的卫星网络路由算法	卫星不存路由表,不会造成更新所导致的数据业务,网络负担轻	由于卫星逻辑地址是按照特定系统与地球表面所决定的,当新增/减少卫星时,会引发特殊问题;而当移植到另外系统时,如果不够规则,根本不可运行。因此可移植性较差
基于地理位置的卫星网络路由算法	Ekici 分布式卫星网络路由算法	同基于 IP 的卫星网络路由算法一致,可移植性较差
	基于地理位置的分布式抗毁路由算法	同基于 IP 的卫星网络路由算法一致,可移植性较差

### 4 总 结

本文总结和讨论了天地一体化信息网络的特点和主要研究问题。重点分析了一体化网络的协议体系并进行了比较分析,通过对不同的协议体系分析,我们认为,CCSDS 协议体系可以作为未来天基骨干网的协议体系。但是,其中的传输层、网络层以及链路层的功能都要进行适应性改造和优化以满足天地一体化信息网络传输的要求。另外,对一体化网络的路由问题进行了深入地讨论,比较分析了主流的路由机制与优缺点。

#### 参考文献:

[1] 刘立祥. 天地一体化网络[M]. 北京:科学出版社,2015.  
LIU L X. Space-ground integrated network [M]. Beijing: Science Press, 2015.

[2] DU J, JIANG C, WANG J, et al. Stability analysis and resource allocation for space-based multi-access systems [C]// IEEE Global Communications Conference. San Diego, CA, USA:IEEE, 2015:1-6.  
[3] 刘春保. 2015 年全球导航卫星发展回顾[J]. 国际太空,2016(2):29-35.  
LIU C B. 2015 year in review: global navigation satellites [J]. Space International, 2016(2):29-35.  
[4] 刘春保. 2016 年国外导航卫星发展回顾[J]. 国际太空,2017(2):34-42.  
LIU C B. 2016 year in review: Foreign navigation satellites[J]. Space International, 2017(2):34-42.  
[5] HE J F, JIANG Y, ZHANG G X, et al. Topology and route production scenario of walker satellite constellation network with inter-satellite link[J]. Journal of PLA University of Science & Technology,2009,10(5):409-413.  
[6] 卢勇,赵有健,孙富春,等. 卫星网络路由技术[J]. 软

- 件学报,2014,25(5):1085-1100.
- LU Y, ZHAO Y J, SUN F C, et al. Routing techniques on satellite networks[J]. Journal of Software, 2014, 25(5):1085-1100.
- [7] JIN X, ZHANG P, YAO H. A communication framework between backbone satellites and ground stations[C]// International Symposium on Communications and Information Technologies. Qingdao, China:IEEE,2016:479-482.
- [8] 刘基余. 北斗卫星导航系统的现况与发展[J]. 遥测遥控,2013,3(34):1-8.
- LIU J Y. Status and Development of the Beidou Navigation Satellite System[J]. Journal of telemetry, tracking and command, 2013, 3(34): 1-8.
- [9] Space communications protocol standards (SCPS) [EB/OL]. [2017-08-08]. <http://www.scps.org>.
- [10] CERF V, BURLEIGH S, HOOKE A, et al. Delay-tolerant networking architecture: IETF RFC 4838, informational[S]. [S.l.]: Network Working Group, 2007.
- [11] CHIANG M, LOW S H, CALDERBANK A R, et al. Layering as optimization decomposition: a mathematical theory of network architectures[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1):255-312.
- [12] SABBAGH A, WANG R, ZHAO K, et al. Bundle protocol over highly asymmetric deep-space channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(4):2478-2489.
- [13] 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.

#### 作者简介:



刘立祥(1973—),男,中国科学院软件研究所天基综合信息系统重点实验室研究员,博士,主要研究方向包括:新型网络技术,天地一体化组网技术等,先后主持了多项863卫星组网相关课题,973信息栅格研究项目、中科院支撑技术项目和自然科学基金项目,在国内外重要学术期刊和会议上发表论文60余篇。E-mail: liulxdf@163.com。

(编辑:魏琴芳)