

LEO 卫星网络海量遥感数据下行的负载均衡多径路由算法

刘沛龙^{1,2,3}, 陈宏宇², 魏松杰⁴, 程浩⁴, 李帅⁴, 汪骏勇^{1,2,3}

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050; 2. 上海微小卫星工程中心, 上海 201203;
3. 中国科学院大学, 北京 101407; 4. 南京理工大学计算机与工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: LEO 卫星网络能够为各类用户提供全球无缝实时数据通信, 近年来得到了快速发展。与此同时, 空间数据源如遥感卫星的海量载荷数据下行体制依旧采用传统的存储转发方式, 如果将此类卫星接入配有星间链路的 LEO 卫星网络, 可以有效提高空间任务数据的实时性。但是需要为这种应用需求设计专门的卫星网络负载均衡路由算法。针对视频卫星实时直播的应用场景, 设计了一套并行链路不相交多径路由算法 SPEMR。OPNET 仿真结果表明 SPEMR 实现的多径方案的性能劣化指数为 0.32, 仅为 TLR 路由协议的 32%, 传统 DSP 方案的 21%, 具有相对更强的实时传输海量数据的能力。

关键词: LEO; 卫星网络; 多径; 遥感; 路由

中图分类号: TN927

文献标识码: A

Load balancing multipath routing protocol for mass remote sensing data downlink in LEO satellite network

LIU Pei-long^{1,2,3}, CHEN Hong-yu², WEI Song-jie⁴, CHENG Hao⁴, LI Shuai⁴, WANG Jun-yong^{1,2,3}

(1. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;
2. Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Shanghai 201203, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101407, China;
4. School of Computer Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: LEO satellite networks can provide seamless real-time data communication for all kinds of users, which developed rapidly in recent years. At the mean time, the massive payload data down-link system of space data sources, such as remote sensing satellites, still make use of traditional storage and forward mode. The real-time performance of space mission data will be improved effectively, if such satellites are connected to LEO satellite networks equipped with inter satellite links. However, it is necessary to design a specialized satellite network load balancing routing algorithm. Satellite parallel edge-disjoint multipath routing protocol (SPEMR) was designed for remote sensing satellite real-time down-link applications. OPNET simulation results indicate that the performance degradation index(DI) of the multipath scheme implemented by SPEMR is 0.32, which is only 32% of the TLR and 21% of the traditional DSP scheme. It is demonstrated that SPEMR has the better capability of transmitting massive data in real time.

Key words: LEO, satellite network, multipath, remote sensing, routing

1 引言

众所周知, LEO (low earth orbit) 卫星网络凭借其全球覆盖性、部署灵活性等诸多独特优势, 在全球通信系统中一直是地面网络的有效补充^[1]。随着航天技术的进步以及社会信息化程度不断提高, 致力于实现对流层以下任意节点间的数据通信的卫星网

络得到了快速发展, 以 OneWeb^[2]微小卫星通信星座为例, 单星能够实现 8 Gbit/s 吞吐量, 为地面用户提供互联网实时接入服务。

与此同时, 在天对地数据通信领域, 如遥感卫星、科学实验卫星等空间数据源节点, 仍然采用数据先存储, 在地面站可见弧段内再下行的传统体制。随着高分辨率、高光谱成像技术的进步, 遥感

卫星产生的数据量与日俱增^[3], 海量数据由于没有数据下行机会从而无法获取, 同时抢险救灾等突发重大事件的快速反应需求对遥感数据提出了难以实现的实时性要求。如 Google 公司 Skysat^[4] 视频卫星, 遥感数据存储 768 GB, 可以存储 90 s 分辨率为 1.1 m, 幅宽为 2.0 km × 1.1 km 的每秒 30 帧的视频数据。由于不具备星间链路, Skysat 只能在每次过地面站时通过 X 波段发射机以 470 Mbit/s 下行存储好的视频数据, 全部传送完星内存储数据需要 217 min, 而每次过境地面站只有最多 20 min 的时间。由此可见, 这种的传统存储转发下行的体制极大地限制了遥感卫星应用价值。

为了提高遥感数据的实时性, 可以将遥感卫星融入配置有星间链路 ISL (inter satellite link) 的 LEO 卫星网络^[5], 使其不受时间与空间约束地进行数据下行。LEO 卫星网络具有时延小、链路损耗低、覆盖范围广等优点, 相对于轨位资源紧张、链路损耗更大的 GEO 网络, 更适合此类任务。由于实时遥感数据对网络性能有特殊的明确的要求, 需要为其设计优化专用星间路由协议。

本文研究并提出了一种 LEO 卫星网络并行链路不相交多径路由算法 SPEMR, 可以与其他卫星网络路由协议共用, 共享网络状态信息, 并在尽量减小对网络基本通信服务影响的基础上, 满足遥感视频数据实时下行的应用需求。考虑类铱星通信星座中的单颗视频卫星, 对灾害热点地区进行观测, 并通过星间链路下行到地面站。由于视频信息 (特别是高清视频) 占用较高的带宽, 可能带来网络拥塞以及分组丢失, 所以拟采用并行链路不相交多径路由方案进行实现。并行链路不相交多径路由可以充分地利用卫星网络链路带宽, 尤其在卫星链路剩余容量不足以支持单路径传输的时候, 多径并行的优势愈加明显^[6]。仿真结果表明, SPEMR 在大流量视频下行的场景下, 多径路由相对于传统的单源最短路径路由方案, 能够有效地防止拥塞, 降低网络端到端时延。SPEMR 的优势随着源数据量增大而愈加显著。

2 卫星网络多径路由协议研究现状

多径路由在无线 ad hoc 网络、无线传感网中研究较多, 主要是因为这类无线网络具有一定的广播特性, 网络节点可以通过监听临近节点的转发行为快速地发现多条可选路径, 且此类网络拓扑普遍不

稳定且不规律, 以按需形式建立的多条路径能够有效提高数据的可达率^[7]。与此不同, 卫星网络多径路由协议主要是针对卫星网络全球流量分布不均匀的特征, 利用卫星网络拓扑的规律性以及点到点之间天然的多径特征进行网络拥塞控制。最早的卫星多径路由方案是 2005 年的 CEMR (compact explicit multi-path routing)^[8] 首次提出采用多径源路由的方式, 利用 k -shortest 路径实现并行数据传输的思路, 但是并未详述具体实现方式。2009 年, ELB (explicit load balancing) 算法^[9] 提出利用多径方法均衡流量, 具体就是监控本地拥塞信息, 如果拥塞超过阈值, 通知临近的上流 (upstream) 卫星将通过本卫星拥塞信道的 $x\%$ 通过其他路径传递, 是一种被动的并行多径。以此为基础, 2014 年的 TLR (traffic-light-based intelligent routing)^[10] 将本地队列和卫星整体队列状态分为 3 档, 采用交通灯的“红绿灯”概念, 实现网络状态的标记。每个卫星在本地都有到网络中其他各点的双路径路由表, 一旦首要路径方向拥塞程度为红灯, 则选择次要路径转发, 如果 2 条路径都拥塞, 则把数据分组存入公共队列 (public queue), 等待任意一条路径恢复为非红灯后立即发出。ELB 以及 TLR 都是一种备份多径, 其分布式的路由方案能够让节点快速响应网络状态的改变, 但是缺乏全局最优的计算能力, 容易陷入次优方案甚至循环。2015 年的 TMPR^[11] 提出在任意 2 点之间建立多条可相交的管道 (tunnel), 不同的管道根据地面计算上注, 星上通过路径信息反馈的方法调整不同 tunnel 之上的流量分配。TMPR 虽然能够通过并行的多条链路实现流量分配, 但其链路是地面提前计算并上注, 不能反映网络的实际状态 (比如实时的排队时延), 且未详述地面计算多条 tunnel 的计算方法与计算目标。2017 年, Cheng^[12] 提出了一种分布式的自适应路由算法, 算法利用分布式的多径路由均衡网络拥塞, 实现有效的负载均衡。2017 年的 HGL (hybrid global-local load balancing routing)^[13] 是一种并行的被动多径路由。HGL 认为全球流量分布是准静态的, 根据准静态流量分布在地面上通过线性规划为每个卫星计算多径路由表, 以实现最小化整网链路代价的优化目标。一旦全球实时流量偏离预计流量模型, 可能导致某个卫星节点某条链路队列缓存超过阈值, 则分流 $\alpha\%$ 至其他链路。如果拥塞程度继续提高到第二阈值, 则通知上流多颗卫星分流流量的 $\beta\%$ 。HGL

实际上是一种并行多径，其优化算法建立在全球流量基本静态这一假设下，不适用于大尺度的动态流量环境。

综上，已有的卫星网络多径路由算法，并未考虑到点到点的突发大容量实时数传需求，而这类需求如前文所述，是急需满足的。为了满足这类数据传输需求，本文提出了一种并行链路不相交多径路由算法。

3 星间并行链路不相交多径路由算法

多径传输的思想被广泛应用于网络路由策略中，多径的基本传输策略是在源点宿点之间建立并维持多条链路的传输，而非传统的单条路径传输^[7]策略。

在多径路由策略中，源点与宿点之间存在多条传输路径，然而根据多径路由的分类，多条传输路径具有不同的实现方式。多径路由在路径利用率方面分为并行多径、主备多径。并行多径路由算法产生的源点和宿点间路径子图的最小割大于主备多径，故在承载海量数据流的同时能够更好控制网络拥塞，实现更小的端到端时延。多径路由在路径独立性方面分为节点不相交多径、链路不相交多径、链路相交多径。假设卫星网络星间链路每条链路有单独的发射机，拥有各自的 FIFO 缓存，则网络状态的最小单元是点到点的单向链路状态。本文选择并行链路不相交的多径路由方案，以专门服务高带宽遥感信息实时下行应用需求。

本节介绍 SPEMR 路由算法实施细节。首先介绍卫星网络模型、路由算法设计约束、网络链路参数与状态感知，然后介绍链路不相交多径多条最短路径树的具体计算流程。

3.1 卫星网络模型

首先简要介绍本文所采用的卫星网络模型。模

型包含卫星节点、链路模型、网络流量这 3 个部分，需要分别说明。

在卫星节点方面，每颗卫星作为独立且一致的实体，其运动规律符合预设轨道参数，共同组成网络并参与网络行为。每个卫星节点单独收集网络状态并计算全局拓扑与路由表。数据分组转发中继方案由卫星节点根据其所执行的路由协议决定。

在链路模型方面，所有的卫星节点有能力与相邻卫星建立可靠的点到点双工星间链路 ISL，如图 1 所示，同轨卫星 ISL 为轨内链路，异轨卫星 ISL 为轨间链路。星间链路的有效时间根据卫星网络实际场景决定，如极轨卫星在极区与反向缝处，由于轨间卫星相对动态性过高，一般选择关闭轨间链路；又如卫星轨道维持或对地定向等姿态调整时期，会关闭动态性过大的星间链路。所有 ISL 的参数，包括速率、误码率等链路参数完全一致。

在网络流量部分，卫星作为网络中继节点，为数据源与宿点提供接入与数据转发功能。数据源和宿点可为本卫星载荷或其他航天器、网关、地面通信设备。本文假定卫星网络数据源为卫星对地成像载荷。网络中的数据以数据分组的无连接形式进行传递，每个数据分组具有固定的大小和结构，包括封头与数据两部分。其中封头内存储路由由辅助信息。

3.2 路由算法设计约束

在详细介绍路由算法之前，首先明确以下几条约束。

- 1) 卫星拓扑采用经典的时间片划分方法^[8,14]，将卫星网络分为多个静态拓扑，在一个时间片内不考虑拓扑变化。
- 2) 假设卫星状态是理想的，卫星失效的概率为 0%。
- 3) 卫星节点发射机 FIFO 缓存没有最大值，不存在网络分组丢失事件。

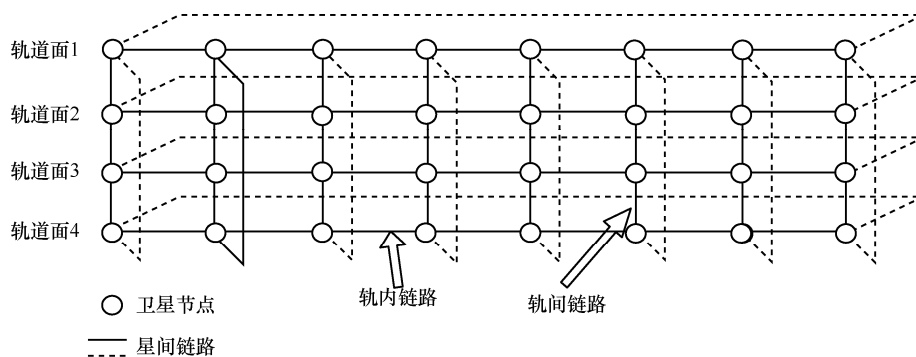


图 1 卫星网络星间链路示意

4) 数据链路层实现了纠检错, 网络层不存在误码问题。

经典的时间片划分方法简化了规律变化的卫星网络拓扑模型, 是基于数据分组形式卫星网络的主流拓扑建模方案。由于本文主要研究多径并行链路不相交路由大容量传输情景下的时延特征, 故忽略分组丢失、卫星节点失效、误码率对时延可能带来的影响。

3.3 网络链路参数与状态感知

在 SPEMR 中, 卫星节点计算出的多条最短路径树的有效性需要实时网络链路状态的支撑。特别需要说明的是, SPEMR 可以和其他路由协议共享网络链路状态, 以配合实现对不同数据流的网络 QoS 服务。

在网络链路参数方面, 设定从卫星 S_i 到 S_j 的链路 E_{ij} 的链路代价 C_{ij} 为

$$C_{ij} = D_{proj} + \frac{psize}{R_{ij}} + \frac{qsize(t)}{R_{ij}}, \quad i \neq j \quad (1)$$

其中, D_{proj} 为卫星 S_i 到 S_j 的传播时延 (在每个拓扑时间片内抽象为固定值), 具体值为星间距/光速; R_{ij} 为卫星 S_i 到 S_j 发射机的发送速率; $psize$ 为数据分组位数; $\frac{psize}{R_{ij}}$ 为数据分组传输时延; $qsize(t)$ 为发射机 FIFO 内已缓存的位数, 其中, $qsize$ 是时间 t 的函数, 为时间 t 实现的链路状态感知的结果值; $\frac{qsize}{R_{ij}}$ 为排队时延。

在网络状态感知方面, 如图 2 所示, 以文献[10]的轨道发言人信息交换模型为基础, 在每个轨道设置一个发言人, 发言人卫星可以将状态感知分组发送给所有同轨异轨 (一共 4 条) ISL, 在正常状况下, 非发言人只能将状态感知分组发往同轨 ISL, 而在链路断链情况下走数据分组路由方案传递状态告知分组。状态感知分为 3 个步骤: 1) 发言人收集轨道内网络链路状态并生成轨道信息分组 OIP (orbit information packet); 2) 发言人将本轨 OIP 发送给本地轨道以及其他轨道发言人; 3) 一旦某发言人得到其他轨道发言人发来的 OIP, 发言人对整网流量状态进行整理并将新接收的 OIP 分发给所有同轨卫星。为了防止状态感知分组的 loop 以及过时失效现象, 在状态感知分组内设置了存活时间 TTL 与更新版本 $Edge_ver$ (相对于单条链路来说, 每条

链路都有各自的一个状态版本号)。一旦某颗卫星收到其他卫星发出的 TTL 小于阈值的状态感知分组, 则对比 $Edge_ver$, 如果 $Edge_ver$ 高于星内存储的版本号, 则更新整网链路状态; 如果 $Edge_ver$ 版本号低于节点存储的链路版本号或 TTL 值超过阈值, 则销毁此状态感知分组。

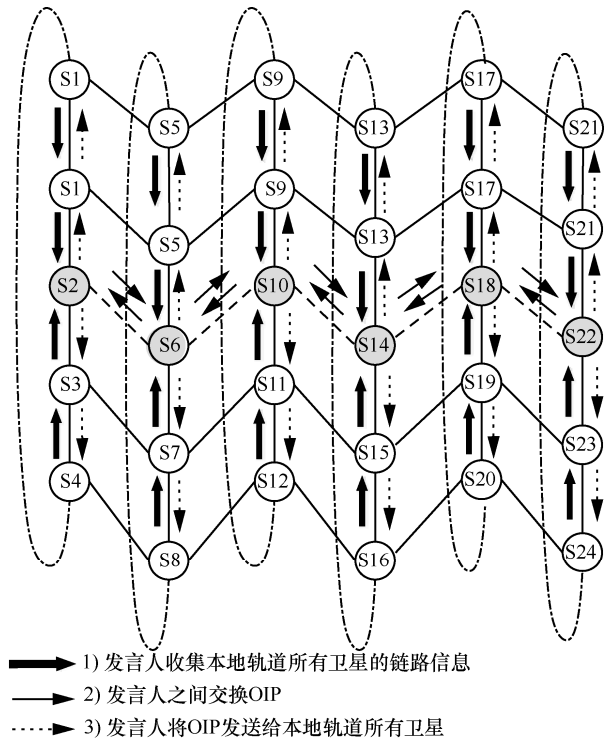


图 2 发言人链路信息收集机制

本文所述链路参数与网络状态感知方法为 SPEMR 作为实时大容量遥感数据下行的有效路由协议所需要的最低限度方案。优化链路参数设置以及提高状态感知频率, 会有助于提高网络负载均衡, 但是必定以星上处理时延以及处理功耗等开销作为代价。具体的指标衡量与选取, 需要在实际应用过程中综合考虑。

3.4 最短路径树更新

SPEMR 路由协议允许卫星以 T_u 为周期更新全网网络状态参数, 并以此为基础, 针对固定宿点计算 N_{path} 条最短路径树, N_{path} 为用户预设的多径数目。得到了 N_{path} 条最短路径树, 即可得到 N_{path} 条具体转发路径, 实现数据分组的转发操作。

计算链路不相交最短路径树的具体实现方法是 N_{path} 次迭代单源最短路径 (SSSP, single-source shortest paths) 算法。本文假定卫星网络不包含权值为负的链路, 本文选用 Dijkstra 路由算法作为

SPEMR 路由算法核心，计算流程伪代码如下所示。

- ```

 输入 源点 s ，宿点 d ，多径数目 N_{path}
 1) {if($s \neq d$ && $t = T_u$)
 2) {初始化网络拓扑;
 3) for($i = 1; i \leq N_{path}; i++$)
 4) {加载网络拓扑;
 5) 利用 Dijkstra 计算 SSSP;
 6) 更新第 i 条最短路径 (shortest
 path[i]);
 7) if(shortest path[i] 不存在)
 8) { $N_{path} = i - 1$;
 9) break; }
 10) 删除拓扑中已算得的最短 path[i]; } }

```

如伪代码所示，初始拓扑为加权有向图  $G=(V,E,C)$ ，其中，链路  $E_{ij}$  的权值即为  $C_{ij}$ 。每次计算完一棵最短路径树后，将此路径树中源点  $s$  到宿点  $d$  之间的最短路径上的所有链路  $E_{ij}$  以及相应的  $C_{ij}$  从拓扑中删除，再利用完成删除操作后的拓扑进行下一次的 shortest path 计算。如果计算得到的路径数目到达用户设置的路径数目上限  $N_{path}$ ，或经验证明不存在源点  $s$  到宿点  $d$  的可用路径，则退出算法。

退出算法后，计算出的最短路径在周期  $T_u$  内有效。原始数据分组产生后，源点卫星根据链路流量分配算法，将选定的一条最短路径写入分组中，中继卫星节点读取分组中的路径，并根据路径转发。

### 4 仿真实验与结果分析

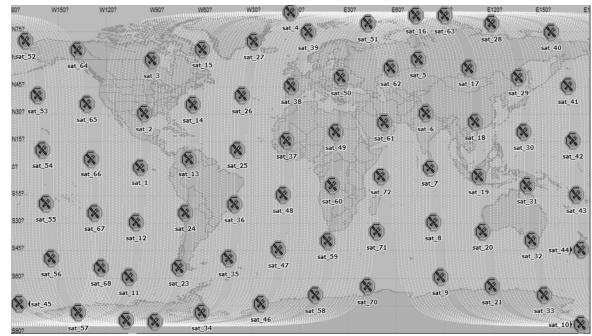
为了验证路由策略的有效性，本文采用 STK 设计了类铱星座的极轨道卫星星座，借鉴轨道信息，利用 OPNET 软件仿真一个时间片内的卫星网络，网络模型与节点模型如图 3 所示，对前文所述 SPEMR 算法在一定场景下性能进行验证和分析。

#### 4.1 星座参数

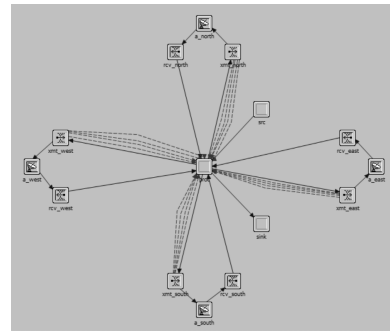
星座构型为 72/6/1 walker star，轨道倾角  $86^\circ$ ，轨道偏心率为 0，轨道高度 800 km。图 4 显示了卫星星座结构。极区与反向缝处不存在轨间链路，此外每颗卫星具有 2 条轨内链路、2 条轨间链路。

#### 4.2 网络参数与场景设置

假设全双工星间链路完全一致，网络链路状态更新周期  $T_u$  为 1 000 ms；仿真时长 60 s，单向星间链路设计容量为 260 Mbit/s。



(a) 网络模型



(b) 节点模型

图 3 OPNET 网络仿真模型

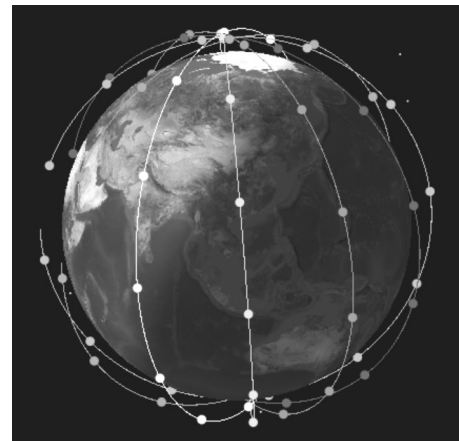


图 4 72/6/1 Walker Star 星座构型

本文构建了视频卫星实时下行视频数据的应用场景，假设  $(30^\circ W, 67^\circ S)$  的卫星对阿根廷布宜诺斯艾利斯进行视频成像，并向深圳进行数据传送（通过  $(110^\circ E, 20^\circ N)$  卫星），视频数据分组间服从指数分布，平均速率为 560 Mbit/s、370 Mbit/s、170 Mbit/s，一共 3 档。在此定义一个参数：卫星源节点数据传输压力为

$$P_s = \frac{R_s}{nR_c} \quad (2)$$

其中， $R_s$  为卫星源节点产生的信息源速率， $R_c$  为单

条星间链路单向传输速率， $n$  为星间链路数目。星间链路与信息源的速率绝对值没有意义，而  $P_s$  表征了其速率相对值，更能体现信息源的对卫星星间链路的负载压力。

为了尝试定量的表征多径与单径在不同网络流量下的性能变化，在此基础上定义性能劣化指数  $DI$ (degradation index)

$$DI = \frac{\frac{e_1}{P_{s_1}}}{\frac{e_2}{P_{s_2}}} \quad (3)$$

其中， $P_{s_1}$ 、 $P_{s_2}$  为 2 次实验的源节点数据传输压力，规定  $P_{s_1} \geq P_{s_2}$ ， $e_1$ 、 $e_2$  为选定的网络指标（根据需要指定，规定  $e$  越小则网络性能越佳）。性能劣化指数的意义在于定量表述了单位源节点数传压力下的网络性能，若在 2 个不同的数传压力场景下， $DI$  越小，则网络对大容量数传任务的承载能力越强，反之网络承载能力越差，网络性能随数传压力增大

急剧劣化。

### 4.3 仿真实验结果

为了验证多径路由方案在视频数据实时下行场景下的性能优势，在不同路径数目（包含单一路径的传统模式）、不同源速率下，统计数据分组的端到端时延，即传播时延、发送时延、排队时延的总和（暂时忽略处理时延）。通过对比路径数目与时延状况，分析判断多径路由的适用范围与具体特性。

图 5~图 7 展示了在不同源数据速率下，传统 DSP (Dijkstra's shortest-path algorithm) 路由算法、TLR 路由算法、以及路径最大数目  $N_{path}$  为 2、3、4 时的 SPEMR 路由算法的端到端实时时延与平均时延。

如图 5 所示，在流量 560 Mbit/s 的情况下， $P_s$  为 0.53， $N_{path}$  值越大，则端到端时延均值越小，同时 TLR 路由算法由于分布式的分流作用，其平均端到端时延在仿真末期优于 DSP，达到 5.42 s。

如图 6 所示，在流量 370 Mbit/s 的情况下， $P_s$  为 0.36。与 560 Mbit/s 的情况类似，TLR 算法平均

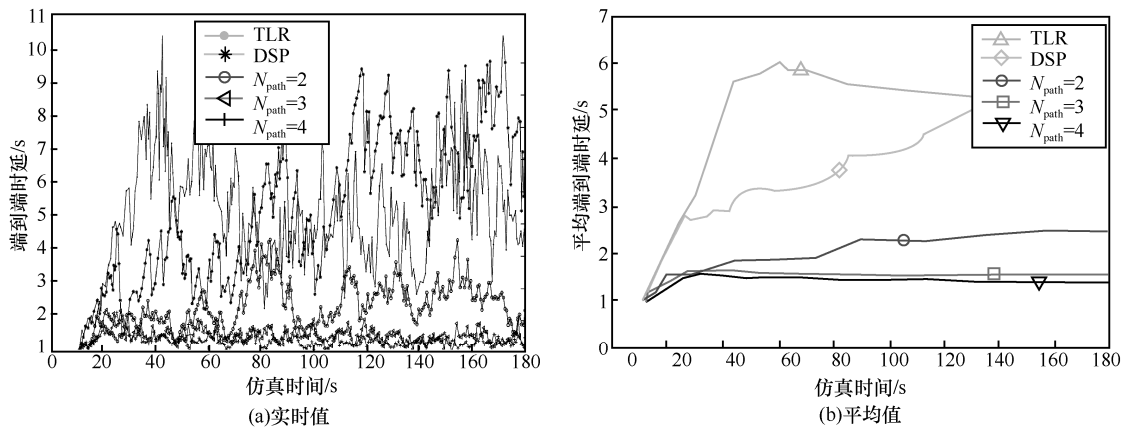


图 5 源速率为 560 Mbit/s 高清视频下行时延

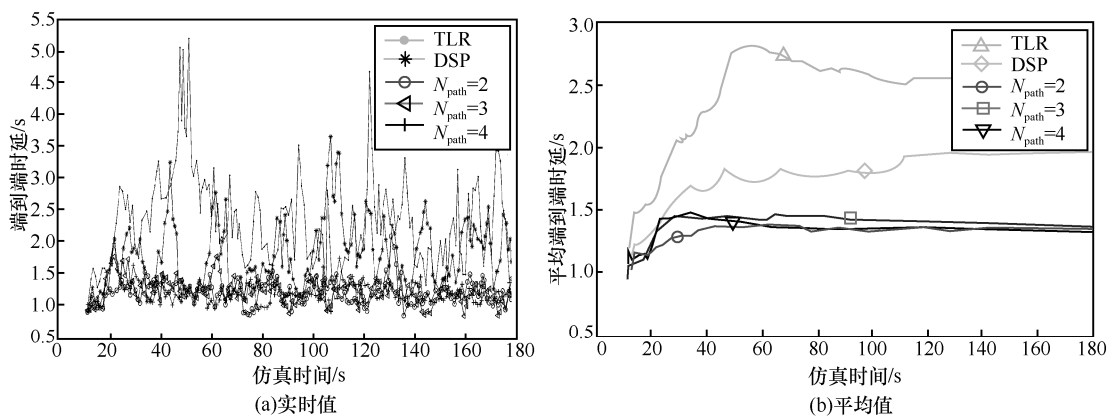


图 6 源速率为 370 Mbit/s 高清视频下行时延

时延最大, 达到 2 500 ms。但与 560 Mbit/s 的情况不同的是,  $N_{\text{path}}=2$  时平均端到端时延最小,  $N_{\text{path}}=3$  与  $N_{\text{path}}=4$  的性能几乎一致。

如图 7 所示, 在流量 170 Mbit/s 的情况下,  $P_s$  为 0.16。此时网络平均时延随路径数目降低而提高, 传统的 DSP 以及双路径 SPEMR 在平均时延与时延抖动上都具有优势, 而在 SPEMR 中,  $N_{\text{path}}=4$  的情况下, 由于多径不相交性导致的非最优路径的性能劣化, 使该状态下的平均端到端时延与时延抖动劣于其他多径方案。

#### 4.4 仿真实验结果分析

简单的实验表明, 随着  $P_s$  的提高, 不论多径还是单径路由, 网络时延的均值和抖动都不可避免地发生劣化 (若考虑约束星内存储容量, 则可能发生分组丢失), 但是多径路由的劣化程度远小于单径路由。对比图 7 和图 5, 以 DSP、TLR 以及四路径的 SEPMPR 3 种路由方法为例, 以 560 Mbit/s 以及 170 Mbit/s 两次传输结果作为参考, SEPMPR 方案的性能劣化指数  $DI$  为 0.32, TLR 的  $DI$  为 1.00, 而 DSP 的  $DI$  为 1.47。可见 TLR 路由算法以及传统 DSP 算法耐受大容量负载的能力劣于 SEPMPR 方案。

若将问题进行一般化讨论, 即在既定流量的情况下, 网络中  $N_{\text{path}}$  的值为多少, 能够实现最小的平均时延。对比图 6 和图 7 可知,  $N_{\text{path}}$  的值并非越大越好 ( $P_s$  为 0.36 时,  $N_{\text{path}}=2$  使网络平均端到端时延最小), 而是在每个流量情况下, 都有相应的最佳链路数目  $N_{\text{best}}$ 。如果开发  $N_{\text{best}}$  估计算法, 使源节点尽快地得到  $N_{\text{best}}$  的值, 则有利于提高网络传输质量。预期可以实现主动式计算、被动式调整以及混合式求解共 3 种方案。被动式调整方法即源节点遍历  $N_{\text{path}}$  可能的取值范围, 并选择最优的  $N_{\text{path}}$ , 主动

式方案为根据卫星网络整网拓扑状态、源宿节点地理位置、数据传输压力  $P_s$  等一系列参数, 通过大量实验得到  $N_{\text{best}}$  模糊经验函数。缩小  $N_{\text{path}}$  的选取范围, 尽快确立路由参数, 使网络性能快速收敛至最佳值。

## 5 结束语

LEO 卫星网络能够提供优良的全球接入, 无缝的数据通信。随着科技发展, 空间段海量数据下行瓶颈已经成为约束空间应用的主要因素之一, 若将其接入配置有 ISL 的 LEO 卫星网络, 则能有效提高空间任务的效能。调研工作结果表明, 目前, 国内外并无针对满足对此类海量数据的实时下行需求而专门设计的星间网络协议。事实证明, 根据 LEO 卫星网络的运行特点、网络结构优化设计合适的路由传递策略具有现实意义。

本文针对前述应用需求, 为了降低海量空间数据实时下行的网络拥塞与数据时延, 设计了一套并行链路不相交多径路由算法 SPEMR。SPEMR 规定, 网内所有卫星周期性播发链路状态, 每颗卫星在一个链路状态有效时间段内迭代计算到宿点的多条链路不相交最短路径, 并根据多条最短路径树进行数据分组的并行转发。为了验证 SPEMR 相对于传统单径路由协议的优势, 进行了 3 档高速数据下行的实验, 仿真结果表明, 对比数传压力  $P_s$  为 0.53 和 0.16 的 2 种情景, DSP 路由的性能劣化指数  $DI$  为 1.47, 高于  $DI$  为 1.00 的 TLR 方案以及  $DI$  为 0.32 多径方案, 初步验证了 SPEMR 的性能优势。

由于路径数目对 SPEMR 的性能也有一定的影响, 故研究在既定场景中的最优多径数目  $N_{\text{best}}$  快速计算方案是有意义的。本文预期了主动式计算、被

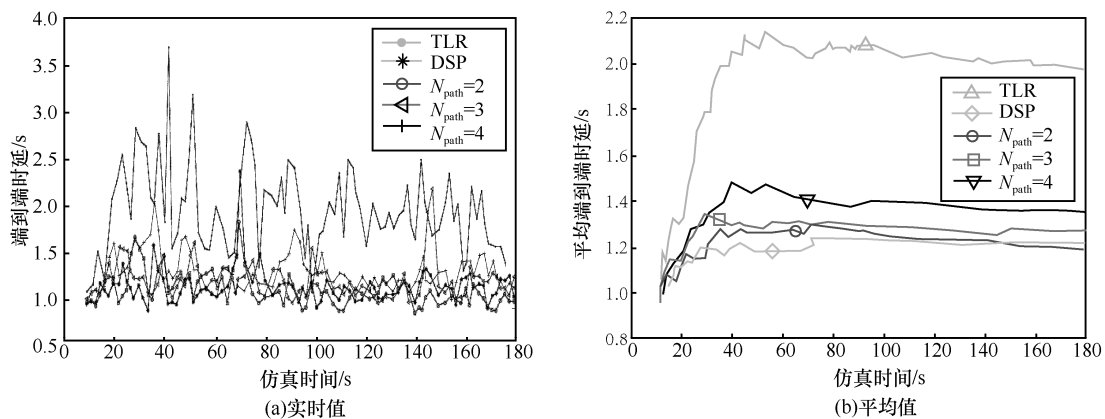


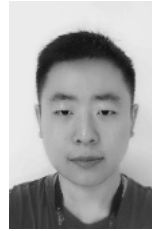
图 7 源速率为 170 Mbit/s 高清视频下行时延

动式调整以及混合式求解共 3 种方案, 未来将致力于通过大量的仿真实验, 实现 SPEMR 路由协议数学模型的进一步完善。

### 参考文献:

- [1] WU W W, MILLER E F, PRITCHARD W L, et al. Mobile satellite communications[J]. Proceedings of the IEEE, 1994, 82(9):1431-1448.
- [2] ARBINGER C, BASKCOMB S, BERDERMANN J, et al. Air meets space: shaping the future of commercial space traffic: I. study introduction and initial results[C]//International Astronautical Congress. 2016.
- [3] 李媛媛. 陆地遥感卫星高光谱图像无损压缩研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2016.  
LI Y Y. Research on lossless compression of hyperspectral image of land remote sensing satellite[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016.
- [4] D'ANGELO P, KUSCHK G, REINARTZ P. Evaluation of Skybox video and still image products[J]. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2014, XL-1(1):95-99.
- [5] 张晟宇, 胡海鹰, 张传鑫, 等. 智能化遥感卫星在空间信息网络中的服务框架设计[C]//第一届“空间信息网络”主题学术论坛, 2016.  
ZHANG S Y, HU H Y, ZHANG C X, et al. Research on lossless compression of hyperspectral image of land remote sensing satellite[C]//The First “Spatial Information Network” Academic Forum, 2016.
- [6] 朱安顺. 基于最优化模型的星间多路径可靠传输的研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.  
ZHU A S. Research on lossless compression of hyperspectral image of land remote sensing satellite[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2016.
- [7] 苏运坤. 异构无线网络并行传输的多路径路由技术[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.  
SU Y K. Heterogeneous wireless networks multi-path routing technology for concurrent transmission[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.
- [8] BAI J, LU X, LU Z, et al. Compact explicit multi-path routing for LEO satellite networks[C]// The Workshop on High Performance Switching & Routing. 2005:386-390.
- [9] TALEB T, MASHIMO D, JAMALIPOUR A, et al. Explicit load balancing technique for N GEO satellite IP networks with on-board processing capabilities[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2009, 17(1):281-293.
- [10] SONG G, CHAO M, YANG B, et al. TLR: a traffic-light-based intelligent routing strategy for N GEO satellite IP networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(6):3380-3393.
- [11] HU G, WU Z, JIN F, et al. Tunneling-based multi-path routing mechanism in packet-switched non-geostationary satellite networks[C]// International Conference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing. 2015:729-742.
- [12] CHENG H, LIU M, WEI S, et al. A distributed algorithm for self-adaptive routing in LEO satellite network[M]// Space Information Networks. 2017.
- [13] LIU Z, LI J, WANG Y, et al. HGL: a hybrid global-local load balancing routing scheme for the Internet of Things through satellite networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2017, 13(3).
- [14] LI C, LIU C, JIANG Z, et al. A novel routing strategy based on fuzzy theory for N GEO satellite networks[C]// Vehicular Technology Conference. 2015:1-5.

### 作者简介:



刘沛龙 (1989-), 男, 天津人, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所、中国科学院大学博士生, 主要研究方向为基于激光星间链路的卫星网络路由协议、基于片上系统 SOC 的微纳卫星星载计算机工程实现。



陈宏宇 (1976-), 男, 山西大同人, 博士, 上海微小卫星工程中心研究员、主要研究方向为先进微纳卫星总体技术、航天器轨道姿态控制技术、先进电子学设计技术以及星座组网技术。



魏松杰 (1977-), 男, 黑龙江佳木斯人, 博士, 南京理工大学副教授, 主要研究方向为计算机系统及网络安全、网络数据分析与监控、异常事件检测与仿真、网络协议设计与分析、网络服务与云计算。



程浩 (1976-), 男, 江西赣州人, 南京理工大学硕士生, 主要研究方向为计算机网络仿真、卫星网络路由技术。

李帅 (1994-), 男, 江苏盐城人, 南京理工大学硕士生, 主要研究方向为密码学、计算机网络技术与应用、网络安全技术。

汪骏勇 (1991-), 男, 上海人, 中国科学院微系统与信息技术研究所博士生, 主要研究方向为卫星网络技术、卫星星座任务规划技术。