

基于 NDN 的多层卫星网络分布式 动态路由方法

刘迪^{1,2}, 黄传河^{1,2}, 陈希^{1,2}, 李昕³

(1. 武汉大学计算机学院, 湖北武汉 430072; 2. 地球空间信息技术协同创新中心, 湖北武汉 430072;
3. 武汉大学测绘学院, 湖北武汉 430079)

摘要: 多层卫星网络的拓扑结构具有明显的时变特征, 难以提供持续且稳定的端到端路径, 导致高效路由问题面临着巨大的挑战. 将卫星网络设计为封闭的体系结构, 采用强管理或调度式控制策略会导致其无法自由、高效地实现与其它系统的协同组网. 基于 IP 的网络体系结构在应用于多层卫星网络时又存在路由效率不高的问题. 基于命名数据网络 NDN (Named Data Networking) 体系结构, 提出一种多层卫星网络分布式路由方法——SNDN (Satellite Named Data Networking). 根据链路切换的周期性和可预知性, 以时变图为建模工具, 设计一个能自适应稠密和稀疏场景的路由算法来动态地计算时间相关的最快路径并附加为源路由信息, 充分利用命名数据网络数据驱动的通信模式、数据包级的安全特性和逐跳转发的特点, 由节点在包转发的过程中动态地完成转发表 (FIB, Forwarding Information Base) 和请求状态表 (PIT, Pending Interest Table) 的构建. 可为面向未来空、天、地一体化协同组网的多层卫星网络路由研究提供一种新的思路. 通过仿真实验及对比分析, 验证了 SNDN 在路由效率和多播性能方面的优势.

关键词: 内容路由; 卫星路由; 时变转发表; 时变图算法

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)11-2769-10

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.11.026

Distributed Dynamic Routing Method for Multi-layered Satellite Networks Based on Named Data Networking

LIU Di^{1,2}, HUANG Chuan-he^{1,2}, CHEN Xi^{1,2}, LI Xin³

(1. Computer School of Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072;
2. Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan, Hubei 430072;
3. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079)

Abstract: Efficient routing is a challenging problem in multi-layered satellite networks where the time-varying topology leads to the absence of continuous and stable paths. Most previous researches either leverage IP architecture to achieve addressing and routing which usually leads to poor routing efficiency in such dynamic scenarios or design specialized architecture by using scheduling based control strategy which makes it hard to achieve efficient cooperative networking with other systems. In this paper, we propose SNDN (Satellite Named Data Networking), a distributed routing method with high routing efficiency and multicast performance. Specifically, we construct two schemes to generate the time varying FIB (Forwarding Information Base) and PIT (Pending Interest Table), and also design an efficient routing algorithm that can calculate the fastest time-related routes under both dense and sparse scenarios by using a time varying graph method. Nodes can generate FIB/PIT or update the entries concurrently with packet forwarding either by extracting the source routing information that attached in the selectors field of packet header or calculating by themselves if needed. Extensive simulation results verify the efficiency and performance of SNDN and demonstrate that it is a useful attempt on the routing problem of multi-layered satellite networks.

Key words: content routing; satellite routing; time-varying forwarding table; time-varying graph algorithm

1 引言

作为面向"SPACE 2.0"应用的首选组网方式^[1],多层卫星网络(MLSNs, Multi-Layered Satellite Networks)^[2]受到了广泛关注与投入^[3-5];同时,MLSNs被认为是天基综合信息网络的传输骨干^[6,7]和未来互联网络(NGN, Next Generation Network)的重要组成部分^[8]. MLSNs将有可能为大量的近地空间飞行器提供空地一体化通信服务. MLSNs拥有较为丰富的星间链路(ISLs, Inter-Satellite Links)和轨间链路(IOLs, Inter-Orbital Links)资源,能提供比单层卫星网络更高的通信容量、更大的覆盖范围,以及更强的可管理性和鲁棒性^[9]. 在MLSNs中,更高的节点密度和更频繁的链路切换也使得网络拓扑结构具有极为强烈的时变特性;复杂的空间无线通信环境、持续性端到端链路的缺乏及潜在的节点失效可能性(军事打击、星座建设与维护周期、星上资源约束等)又要求MLSNs具有异构、动态路由与延迟/分裂容忍网络(DTNs, Delay/Disruption Tolerant Networks)的特点,这使得MLSNs环境下的可靠、高效通信问题变得极具挑战性^[10].

为实现卫星组网通信,研究人员将卫星网络组织为一个相对独立、封闭的系统,采用“虚拟拓扑”或“虚拟节点”等手段来屏蔽节点的移动性. 这又导致卫星网络需要通过地面关口站利用BGP来实现与其它网络之间的互联互通. 这种方式存在较多的固有缺陷,难以满足未来空、天、地一体化大规模协同组网环境的需求^[9]. 基于IP的MLSNs体系结构由于受到IP的语义过载与“身份-位置”绑定特性等约束,需要通过上层来屏蔽链路切换导致的当前连接中断,借此实现所谓的“无缝切换”. 此外,无向路由方式也会导致“三角路由”、降低通信效率^[11]. 因此,在MLSNs这类节点高度移动的环境下,需要位置无关的通信模式来实现高效的通信^[12-14].

命名数据网络(NDN, Named Data Networking)通过解耦“内容-位置”的强绑定关系,提出一种以数据为中心(data-centric)的网络体系结构^[13](图1),能改善以主机为中心的网络体系结构在灵活性、可扩展性及安全性等方面的缺陷. 同时,得益于其灵活的通信模式(可利用多种网络协议和通信链路)和内在的数据包级的签名等安全机制,NDN已经展示出良好的发展前景,并在卫星网络与未来互联网集成和安全^[15]、车联网应用^[16]等领域开展了探索性研究工作.

NDN对所有资源进行命名,包含兴趣包(Interest Packet)和数据包(Data Packet)两种包结构,采用接收者驱动通信机制,包含内容提供者、用户和路由器这

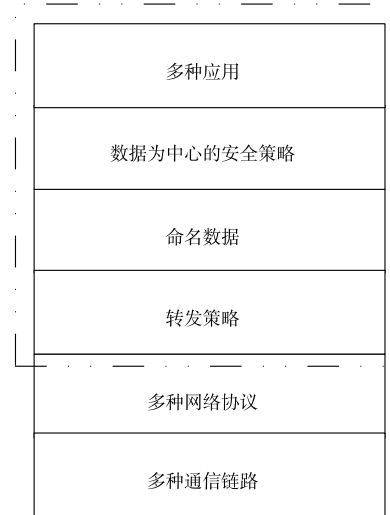


图1 NDN基本结构框图

三类参与对象,它们之间直接通过应用层的内容名字(Names)来进行通信. 节点通过内容缓存(CS, Content Store)、请求状态表(PIT, Pending Interest Table)和转发表(FIB, Forwarding Information Base)来控制包转发^[13,17,18].

NDN现有的转发方式在拓扑结构稳定的场景下具有极大的优势,尤其在基于命名的内容分发应用方面^[11]. 但在MLSNs环境下,已有的静态映射与基于链路状态的路由机制^[13]和基于受控洪泛的兴趣包传播机制^[16]都难以直接应用,必须解决NDN转发流程面临的如下两项挑战:

(1) 自适应的FIB构建. NDN节点通过“红-黄-绿”三种基本的标识来区分接口的物理状态. 在MLSNs环境下,当链路产生切换操作后,节点将对应接口标注为红色,且只能在完成更新操作后才能恢复对应名字前缀的可用状态,这会产生过高的更新负载,影响转发性能. 因此,需要动态计算兴趣包的传输路径并自适应地构建FIB.

(2) 自适应的PIT构建. 现有的NDN中,数据包会沿着兴趣包的反向路径传输. 在MLSNs环境下,该反向路径可能需要进行调整,甚至可能反向路径根本就不存在. 节点会因为缺乏本地路由计算能力而导致对应的PIT记录因超时而删除,进而触发重传. 因此,需要根据实际情况按需、动态地计算数据包的传输路径并自适应地构建PIT.

为应对上述两项挑战,实现面向"SPACE 2.0"应用的MLSNs高效数据传输,本文探讨MLSNs中基于NDN体系结构的动态内容路由问题. 提出一种基于NDN的多层卫星网络分布式动态路由方法并命名为: SNDN(Satellite Named Data Networking).

2 相关研究工作

2.1 MLSNs 路由问题相关研究

要实现高效的组网通信,路由问题的有效解决都是前提与基础,这在 MLSNs 环境下变得尤为突出.在 LEO/MEO 两层卫星网络中,可利用卫星移动的可预测性,设计启发式算法来改善路由效率与性能^[3];也可利用卫星沿轨道运动的特点,利用地理信息系统来辅助提高路由性能^[19];还可以利用星、地协同通信的解决方案来改善路由效果^[20].同时,由于 MLSNs 的拓扑周期极短且不规则,这使得用于 LEO 环境下的 LAOR 协议变得效率低下^[21].为屏蔽网络拓扑结构时变对路由产生的影响,卫星分组与组管理(SGGM, Satellite Group and Group Manager)的方法被广泛采用^[4,5].但 SGGM 方法仍存在如下限制和可改进之处:首先,SGGM 方法不能精确捕获拓扑动态信息,这导致其不能精确地反映 LEO 层的拓扑变化,从而影响路由表的准确性.其次,不能实现动态路由,路由效率不高.同时,组管理卫星或其下行 IOLs 失效将导致整组丧失路由更新能力,进而导致在当前拓扑周期结束后整个组的通信陷入瘫痪状态.此外,系统的路由效率严重依赖于 MEO 层卫星及其下行 IOLs 的有效工作^[5].

从另一个角度来看,卫星轨道具有可预测性和周期性的特点.可预测性就意味着卫星之间的联络(contact)都是可以预知的,从全网的角度来看,联络拓扑(CT, Contact Topology)也可以预知.但由于受到各类约束,可能需要工作在 DTN 模式^[10],且并非所有联络机会都能被用来传输数据.因此,不能直接根据 CT 来执行数据传输^[22],可计算出全网的联络计划(CP, Contact Plan)并预存储在各节点处,在需要路由的时候直接执行本地查询操作^[23].为保障网络整体性能的均衡性,基于拓扑驱动,FCP(Fair Contact Plan)算法^[24]考虑所有节点对之间在时域上使用联络机会的公平性,经典的局部搜索算法和模拟退火算法^[25]可进一步精炼 FCP 方法构造出的 CP.同时,卫星轨道的周期性又意味着计算出的 CP 可以重复使用.但是,上述方法采用的是“预计算+查询”的策略,中间节点不具备动态路由计算能力,不能根据实际的包转发情况来进行自主路由决策.TDLP(Traffic-Driven Linear Programming)方法^[22]采用基于流量驱动的策略,其效果优于采用拓扑驱动策略的方法,但作为一种集中式方法,严重依赖于流量预测的准确性,在大规模应用场景下的可用性和路由效率还有待进一步论证与完善.

2.2 NDN 路由问题相关研究

NDN 采用基于链路状态的路由协议—NLSR^[13],NLSR 通过链路状态广播来创建网络拓扑和分发命名

对象的可达性.也即,节点一旦检测到链路的打开与关闭或映射关系的改变,将立刻向全网广播^[26],这种机制在 MLSNs 中将导致过高的更新负载,甚至不能正常工作(DTN).针对车联网环境下的链路拓扑特点,采用基于道路拓扑信息的兴趣包受控洪泛传播方法^[16]要求所有节点都工作在同构的广播方式,且并未处理数据包传输路径的时变问题,适用范围还有待进一步论证.

3 MLSNs 场景描述与时变图表示

3.1 MLSNs 场景描述

本文考虑一个拥有混合轨道的多层卫星网络场景,它既可以形成相对独立的天基互连网络,也可以作为空、天、地一体化网络的空中传输段,无需严格区分卫星的角色.基本要求如下:

(1) ISLs 和 IOLs 的数量不限,切换时刻可预知,且均为离散的时间点,要求所记录的每条链路的活跃时间至少可以完成两个 MTU 的传输.也即符合约束条件的全局 CT 已知.

(2) LEO 和 MEO 的运行周期要求满足: $T_L \times K_1 = T_M \times K_2 = T$, 其中 T_L 为 LEO 的运行周期, T_M 为 MEO 的运行周期, $K_1, K_2 \in \mathbf{N}^+$, T 为星座循环周期.轨道实际高度、倾角、形状等其它参数不限. CT 更新信息由 GEO 广播.

(3) 每颗卫星分配定长的名字,链路名为其两端卫星名的联合.所有卫星都运行集成了文中相关算法的 DEMO.

参考 2016 年开始建设的“ Iridium NEXT”^[27] 通信卫星系统和文献[3]所述的卫星参数来构建星座系统,基本参数如表 1 所示. (“ Iridium NEXT” 规划为 6×11 星座,但卫星星座存在建设周期问题,直接考虑其全覆盖的场景反而脱离实际,故本文仅配置 4×6 的 LEO 卫星)

表 1 星座参数表

轨道类型	卫星数量	轨道周期	轨道高度	轨道倾角	升交点赤经	真近角
MEO ^[3]	2 × 5	360min	10390km	45°/135°	间隔 72°	-
LEO ^[27]	4 × 6	100min	780km	86.4°	间隔 45°	间隔 60°

3.2 MLSNs 时变图表示与相关定义

MLSNs 的链路频繁切换,拓扑结构时变特征明显,符合时变网络(Temporal Networks)^[28]的特征.时变图(TVG, Time Varying Graph)模型^[29]能从图、节点和边等多个角度来刻画网络的“时变特征”,本文利用 TVG 模型来形式化 MLSNs,从边(链路)变化的视角来解决满足给定约束条件的动态路径计算问题,以支撑包转发及自适应的 FIB 和 PIT 构建.

用 V 表示所有卫星节点, $E \subseteq V \times V$ 表示节点间的边, 则有图 $G = (V, E)$ 为该卫星网络的聚合图. 由于聚合图表示法会忽略边的时变信息, 因此, 进一步定义时变图 $\mathcal{G} = (G, V, T, \rho, \zeta)$. 其中, $T \subseteq \mathbf{T}$ 为该 TVG 的生命周期, 也即整个卫星星座的循环周期; $\rho: E \times T \rightarrow \{0, 1\}$ 表示在给定的时间点, 某条边是否存在; $\zeta: E \times T \rightarrow T$ 表示一个 MTU 在给定时间边上的传输延迟. 给定 $\mathcal{L} \in \mathbf{N}^+$ 表示离散时间点的标签值, 结合对边活跃时间的约束, 则有 $\mathcal{L}_{i+1} - \mathcal{L}_i \geq 2\zeta$. 时变图 \mathcal{G} 的第 \mathcal{L} 个静态实例为 $\mathcal{G}_{\mathcal{L}} = (V, E(\mathcal{L}))$. 其中, $E(\mathcal{L})$ 表示底层聚合图 $G = (V, E)$ 中拥有特定标签 \mathcal{L} 的边集(可能为空). 用 $|n|$ 表示图 G 中顶点的数量, $|m|$ 表示边的数量, $|\mathcal{L}|$ 表示标签的数量. 则图 \mathcal{G} 中边的数量(时间边)可以表示为 $|m_{\mathcal{L}}| = |m| \times |\mathcal{L}|$. 对 $\forall e \in E$, 若 $\rho_{[t_a, t_b]}(e) = 1$, 则有 $\forall t \in [t_a, t_b], \rho(e) = 1$. 在后续算法运行过程中, 可以使用 $\mathcal{G}' = \mathcal{G}_{[t_a, t_b]}$ 来表示 \mathcal{G} 在 $T' = T \cap [t_a, t_b]$ 上的子图.

定义 1 $P = \{(e_1, t_1), (e_2, t_2), \dots, (e_k, t_k)\}$ 称为图 G 中的一条时间相关的路径. 当且仅当在底层图 G 中存在一条边序列 $\{e_1, e_2, \dots, e_k\}$, 且对于所有 $i < k$, 须满足 $\{\rho(e_i, t_i) = 1 \wedge t_i + 1 \geq t_i + \zeta(e_i, t_i) \wedge \rho^{[t_i, t_i + \zeta(e_i, t_i)]}(e_i) = 1\}$.

这样即可保证路径上的边严格地按时间非递减排列(因为不能使用仅在过去某个时间存在的边来传输信息). 其中, t_1 为 P 的出发时间, t_k 为到达时间, 分别表示为: $d(P)$ 和 $a(P)$. 注意到, 由于存在传输延迟, 信息到达目的节点的实际时间为 $t_k + \zeta_k$. 用 \mathcal{P} 表示时变图 \mathcal{G} 中所有路径 P 的集合, 则 $\mathcal{P}_u \subseteq \mathcal{P}$ 表示从节点 u 出发、到 v 终止的所有路径集合. 如在一个静态实例 $\mathcal{G}_{\mathcal{L}}$ 中存在一条端到端的路径, 则称该路径为直接路径, 否则称为间接路径. 我们将路径传播时延定义为:

$$\zeta(P) = \sum_{1 \leq i \leq k} \zeta(e_i) \quad (1)$$

需要注意的是, 由于边和路径都是时间相关的, 即使边是无向边, P_{uv} 存在并不意味着 P_{vu} 也存在. 在如图 2 所示的简单例子中, 存在一条 u 到 v 的路径 $P_{uv} = \{(ua, 1), (av, 4)\}$, 但 $P_{vu} = \emptyset$. (" [1, 2)", "[4, 6)" 表示对对应边的活跃时间范围)

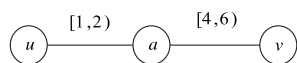


图2 时间相关的路径

定义 2 给定时间点 t 和 $d(P) \geq t$, 若节点 u 到 v 的一条时间相关的路径 P_{uv} 同时满足式(2)、式(3)的约束条件, 则称其为最先到达路径.

$$a(P) = \min_{P' \in \mathcal{P}} \{a(P')\} \quad (2)$$

$$\zeta(P) = \min_{P' \in \mathcal{P}} \{\zeta(P')\} \quad (3)$$

对于稀疏场景, 则可能在任意实例 $\mathcal{G}_{\mathcal{L}}$ 中都没有直接路径存在, 最先到达路径满足在最早的时间点到达, 且路径传输延迟最小; 若为稠密场景, 则可能在某个实例 $\mathcal{G}_{\mathcal{L}}$ 中存在直接路径, 最先到达路径的 $a(P)$ 值最小, 且满足所有边传输延迟累加和最小.

根据定义 2, 本文中的算法可以在时变图 \mathcal{G} 或 \mathcal{G}' 的基础上高效地计算出在 t 时刻, 从源节点 s 到任意 $v \in V \setminus \{s\}$ 的最先到达路径.

4 SNDN 转发流程

由于 FIB 和 PIT 中保存的映射关系都是与对应接口时间相关的. 因此, 要实现 SNDN 的高效路由, 必须首先解决 FIB 和 PIT 的自适应动态构建问题. 我们的主要思想是: 将 MLSN 的全局 CT 建模为 TVG, 由源节点动态地计算出当前最优路径, 并作为源路由信息附加在包头的选择字段. 正常情况下, 中继节点仅需根据自身邻接链路的状态来对源路由信息进行校验, 如符合则执行转发操作, 否则重路由或反馈 NACK.

4.1 FIB 构建流程

FIB 的创建与更新采用显式通告机制, 节点依靠链路状态算法获取接口状态, 并在需要时更新其“名字-接口”映射关系, 随后按照图 3 所示的流程转发. 但在 MLSNs 环境下, 由于节点拥有多条频繁切换的链路, 这导致“名字-接口”的映射关系也需要频繁更新, 且每跳都会执行该重复性的操作, 造成不必要的开销, 进而影响转发效率. 同时, 由于有全局 CT 的存在, 对于每个兴趣包, 事实上仅需源节点计算路由信息并附加在选择字段, 中继节点只在异常情况下才需执行该操作. 自适应 FIB 的详细构建流程如图 3 所示.

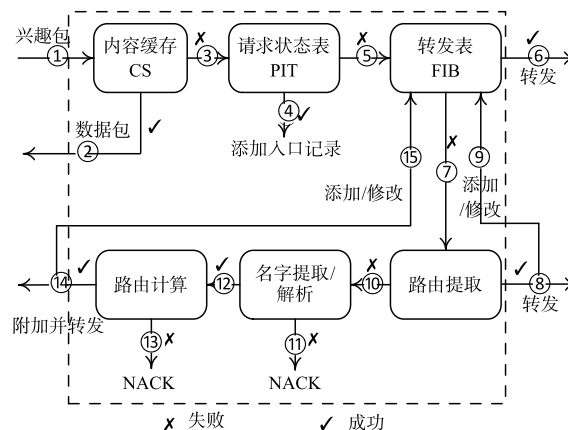


图3 自适应的FIB构建流程

当节点收到兴趣包后, 会沿着流程①-⑥执行, 如 FIB 查找未命中, 则转入流程⑦, 试图从兴趣包的选择字段提取源路由信息, 以确定转发接口. 如提取成功, 则进入流程⑧, 结合自身邻接链路信息和源路由信息执

行转发操作,然后转入流程⑨,向 FIB 中添加或修改“名字—接口”的映射记录;如未成功,则进入流程⑩,试图通过解析兴趣包中的名字字段或从全局名字解析系统获取内容提供者^[11].如未成功,则说明无可用内容与该兴趣包匹配,返回 NACK;如成功,则进入流程⑫,根据反馈的内容提供者(卫星节点)名字来执行动态路由计算操作.如计算成功,则将结果附加在选择字段并转发,然后进入流程⑮(操作同⑨);如否,则说明当前无满足约束条件的路径可用,节点向上反馈 NACK.在这个包转发与 FIB 构建的流程中,时间相关的路径计算是亟需解决的核心问题.

4.2 PIT 构建流程

按照如图 3 所示的 NDN 节点转发流程,如果有数据包满足对应的兴趣包,则其会沿着兴趣包的反转路径传输.因此,节点在转发兴趣包的同时,也完成了 PIT 的创建与更新操作.但根据图 3 所示,在具有 DTN 特征的 MLSNs 环境下,兴趣包传输路径的反转路径可能需要部分调整或根本不存在;即使在稠密场景,也可能由于链路切换而导致这种现象.这就意味着,PIT 需要根据实际情况自适应地调整.不同于 IP 包结构,NDN 中的转发节点可以通过包头的名字字段明确地知道当前包的语义信息,可以无需覆盖层而内在地支持内容级别的重路由与多播.这一内在特性也意味着,即使当前节点的 PIT 需要更新,数据包也不用回退到出发点,仅需执行本地重路由即可,这在保障路由效率的同时,也能减少不必要的重传流量.自适应 PIT 的详细构建流程如图 4 所示.

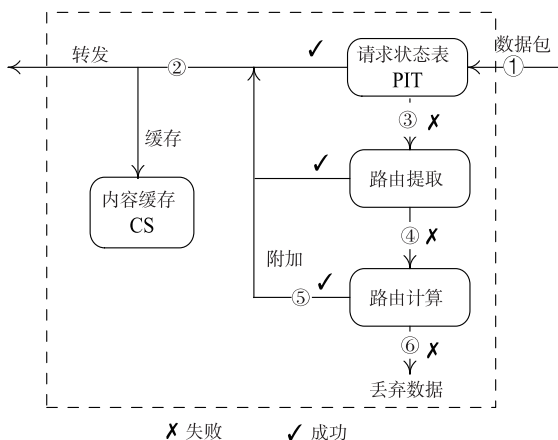


图4 自适应的PIT构建流程

在数据包到达某节点时,如 PIT 中记录的兴趣包入口链路仍有效,则按照流程①—②完成正常转发与缓存(由缓存策略控制);如对应的入口链路已失效,则转入流程③,试图从数据包的选择字段提取附加的源路由信息,如提取成功,则表明已有前跳节点完成了重路由操作,其仅需根据提取结果并结合自身当前邻接链

路信息完成验证后转发;如提取或验证失败,则转入流程④,执行动态路由计算操作.如计算成功,则转入流程⑤,将源路由信息附加在选择字段并转发数据包;如果路由计算也失败,则表明当前无满足条件的可用路径存在,节点丢弃该数据包,内容请求节点会进入超时处理流程.

5 动态路由算法

5.1 算法思想

根据定义 2,算法的目标是在时变图中计算出当前时刻从源节点出发,能最快到达目的节点的路径.算法的主要思想为:从源节点出发,逐一将邻居节点加入队列,然后执行放松操作,通过队列管理与路径生命期约束来控制算法收敛.通过迭代控制来自动识别连通路径和 DTN 路径,也即:如果有满足生命期约束的端到端连通路径存在,则一次迭代即可计算出(类 Dijkstra);如否,则计算 DTN 路径(TVG),仍然通过放松操作来确保所计算出路径的最先到达特性.

5.2 算法描述

给定一个时变图 \mathcal{G} ,一个源节点 $s \in V$,一个开始时间 $\mathcal{L}_{\min} \leq t_{\text{start}} \leq \mathcal{L}_{\max}$,按时间点递增,迭代地遍历所有 $v \in V \setminus \{s\}$,再结合边权值放松的方法来处理相交边,即可高效地构造出由源节点 s 出发且符合定义 2 的最先到达路径.

最先到达路径算法

输入:时变图 \mathcal{G} ,源节点 $s \in V$,目的节点 $d \in V \setminus \{s\}$ 开始时间 t_{start} 满足 $\mathcal{L}_{\min} \leq t_{\text{start}} \leq \mathcal{L}_{\max}$,路径最长持续时间 TTL.

输出:对目的节点 d ,输出从 t_{start} 开始且满足 TTL 约束条件的最先到达路径,输出形式为 $(p[v], a[v])$.其中, $p[v]$ 为节点 v 在路径 P 上的前驱节点, $a[v]$ 为经过节点 v 的时间点.将 (s, d) 之间的所有 $(p[v], a[v])$ 对串接起来就构成了 P 的前驱时间节点集—源路由).

```

1: //Initialization
2:  $t \leftarrow t_{\text{start}}, \mathcal{L}'_{\max} \leftarrow \text{TTL} + t_{\text{start}} + 1$ 
3: for each  $v \in V \setminus \{s\}$  do
4:    $p[v] \leftarrow \emptyset$ 
5:    $a[v] \leftarrow \infty$ 
6:    $d[v] \leftarrow \infty$ 
7: end for
8:  $d[s] \leftarrow 0$ 
9: Initialize queue  $Q$ 
10: In-queue ( $Q, s$ )
11: //前驱时间节点与延迟计算
12: while  $d \notin Q$  and  $t \neq \mathcal{L}'_{\max}$  do
13:   for each  $u \in Q$  do
14:     Out-queue ( $Q$ )
15:     for each  $(u, v) \in E(t)$  do

```

```

16:   if  $p[v] = \phi$  then
17:      $p[v] \leftarrow u$ 
18:      $a[v] \leftarrow t$ 
19:      $d[v] = d[u] + \zeta(u, v)$ 
20:   else if  $a[v] = t$  then
21:     Relax( $u, v, d[v]$ )
22:   end if
23:   In-queue( $Q, v$ )
24: end if
25: end for
26: end for
27:  $t++$ 
28: end while

```

算法第 1 到 10 行为初始化操作,主要完成迭代次数控制,相关变量以及优先级队列的初始化(第 9, 10, 14, 21, 23 行的队列管理与边放松操作采用与利用斐波拉契堆实现的 Dijkstra 算法相同的方式). 算法第 12 到 28 行为一次完整的迭代过程,完成一个静态实例 \mathcal{G}_x 的遍历操作. 优先级队列按照 $d[v]$ 值来管理,可保证每次出队的 u 为当前最快到达节点. 算法第 21 到 22 行的放松操作用于判断同一个 \mathcal{G}_x 中相交边的传输延迟,这一操作对于稠密场景下的 MLSNs 尤为重要. 如果省略该操作,虽然可降低算法时间复杂度,但是会因为贪心策略的存在而导致 MEO 卫星过热现象的出现,进而导致网络流量分布不均衡.

定理 按要求给定输入参数,最先到达路径算法能正确地输出 s 到 d 的最先到达路径.

证明: 要保证算法的正确性,必须确保在第 12 行到第 28 行的 while 语句每次开始循环之前,对于所有 $v \in Q$, 都有 $d[v] = \zeta(s, v)$. 也即,须要证明在 $\forall u \in V$ 被加入队列 Q 时,式(4)都成立.

$$d[u] = \zeta(s, u) \quad (4)$$

在 $t = t_{\text{start}}$ 时刻,有 $Q = \{s\}$, 故 $d[s] = \zeta(s, s) = 0$ 必定成立.

在此后的迭代过程中,假设在时间点 t , 节点 u 是第一个加入 Q 后使得式(4)不成立的节点,此时一定有 $u \neq s, Q \neq \phi$, 因此,必定存在从 s 到 u 的路径,其中必包含一条最先到达路径 $p_{(s,u)}$. 否则,根据非路径性质将有 $d[u] = \zeta(s, u) = \infty$, 而这又违反了我们的假设.

进一步假定此时存在另外一条 s 到 u 的路径 p' 满足 $a(p') < a(p)$, 也即 $d'[u] < d[u]$, 则在 $t' < t$ 时刻,对于 $w \in Q, u \notin Q$, 必定存在一条时间边 (w, u, t') , 因此算法在 $t' < t$ 时刻会将 u 加入队列 Q , 这又与我们的最初假设相矛盾.

由此可断言,在节点 u 加入 Q 时,一定有 $d[u] = \zeta(s, u)$.

在算法终止时刻,有 $Q = \phi$, 这就说明所有节点都

入队和出队过一次. 因此,对于所有 $u \in Q, d[u] = \zeta(s, u)$ 都成立. 算法的正确性能够得到保证,证毕.

5.3 复杂度分析

考虑在最坏的情况下,算法需迭代到 L'_{max} 才将所有节点加入 Q 中,因此,第 12 行到第 28 行的 while 循环会被执行 $O(L'_{\text{max}})$ 次. 在每次迭代过程中,算法会遍历 $O(n)$ 个节点,每个节点都必须在其数组中查找与当前时刻对应的所有标签值;采用斐波拉契堆来实现优先级队列 Q , 则第 21 行的放松操作加上队列管理的复杂度为 $O(n \log n)$. 因此,一次迭代的整体复杂度为 $O(n^2 \log n (1 + 2 + \dots + L'_{\text{max}})) = O(n^2 (\log n) (L'_{\text{max}})^2)$. 由于在算法执行过程中,每条时间边最多被访问一次,故额外的累加因子为 $O(m_x)$. 综上所述,算法的时间复杂度为 $O(n (\log n) (L'_{\text{max}})^3 + m_x)$.

考虑实际的路由计算,若在给定时刻的 \mathcal{G}_x 为连通子图(即存在直接路径),则算法经过一次迭代即可收敛,时间复杂度为 $O(n (\log n) + m)$; 若 \mathcal{G}_x 均不连通(即 DTN 模式),通过第 2 行的 TTL 值可以控制 L'_{max} 为一个很小的自然数,从而可让算法也只需迭代几次就收敛. 依据为,路由计算是针对每个包进行的,大量迭代而计算出一条延迟过大的路径对于一个包来说并无实际意义. 因此,算法完全可以在子图 $\mathcal{G}' = \mathcal{G}_{[t_a, t_b]}$ 上运行,从而将复杂度控制在 $O(n (\log n) + m_x)$.

6 仿真实验与结果分析

6.1 仿真场景与参数说明

在 ndnSIM 中搭建一个以第 3 节所述的 MLSN 为天基传输骨干的仿真环境,添加“资源三号”卫星^[30],模拟用户通过 MLSN 实时下载其拍摄影像资料的场景. 每颗卫星同时最多维持 1 条 IOL 和 4 条 ISL, ISL 和 IOL 的带宽为 1Gbps, LEO 卫星对地链路带宽为 1.2Gbps^[31], 用户同一时刻只能通过一颗 LEO 卫星访问 MLSN. 为准确评估路由性能,将节点 CS 功能关闭. 在“资源三号”的一个轨道周期内,其与其它通信卫星的联络时间统计情况如图 5 所示.

可见,它与 34 颗卫星中的 29 颗都存在建立链路的机会,与 LEO 卫星的联络最长可持续 939 秒,最短也达到 177 秒. 我们可以据此拟定最优传输路径,作为对比分析的参考基准,将其表示为 PHY. 此外,为评估 SNDN 方法在路由效率和传输时间这两方面的性能,我们还与 TDLP 方法^[22]进行横向对比与分析.

在仿真过程中,我们将“资源三号”的待传数据总量控制在 700GB ($R=1$) 至 70GB ($R=0.1$) 之间变化, R 为网络负载调节因子. 当 $R=1$ 时,“资源三号”能在一个轨道周期内排空其数据(不考虑其星地链路),这也是其极限传输能力. 针对不同网络负载下的传输时间、

实际使用的联络时间、不同用户分布和不同网络负载率情况下的多播路由性能及 PIT 汇聚性能等指标进行详细的分析与对比。

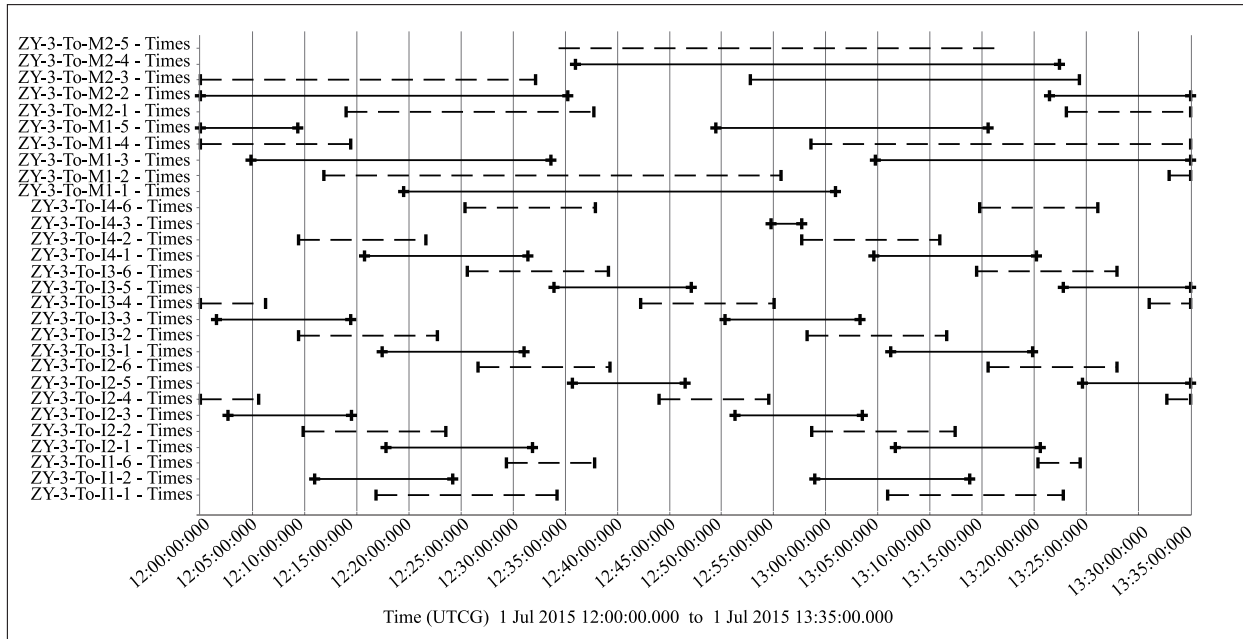


图5 “资源三号”单轨道周期联络时间统计

6.2 传输时间分析

我们首先分析不同 R 下的传输时间,并与 TDLP 方法及 PHY 进行对比,该指标对应着网络吞吐量性能.相关仿真运行结果如图 6 所示.

在 $R=1$ 时,PHY 能在第 5968 秒时完成所有数据传输,接近于“资源三号”的轨道周期(5684s),这也是当前场景下的极限传输能力.当网络负载率在 $0.1 \leq R \leq 0.8$ 这个区间变化时,SNDN 能维持接近于 PHY 的性能.这也表明,在这个区间内 SNDN 的路由选择策略能较好的贴合链路实际情况;当 $R > 0.8$ 以后,SNDN 排空最后 20% 的流量耗费了将近 0.6 个轨道周期的时间(3363s).这与 SNDN 目前仍以 CT 为路由计算依据,未考虑网络实时流量分布信息有关.而 TDLP 方法则在 $R > 0.4$ 以后就出现了性能上的快速衰减,最终耗费了 1.82 个轨道周期的时间(10344s)才排空所有流量.即使在 $R=0.1$ 这样轻负载的情况下,TDLP 也耗费了 0.62 个轨道周期(3524s)才排空网络流量,这与其对稠密场景的应对能力有限及网络体系结构上的限制有关.但同时也应注意到,TDLP 方法得益于其对网络流量分布情况的考虑,在 $0.8 \leq R \leq 1$ 这个负载区间内的性能衰减相对平缓,这也说明了流量分布信息对路由性能的重要性.

6.3 路由效率分析

接下来我们对比不同 R 下,几种策略之间排空网络流量所使用的实际联络时间总量.该指标可反映路由效率,也即给定网络流量,如果能用较少的联络时间完成

排空,则表明路由算法对联络机会(链路)的选择策略较优.该指标同时也能反映不同方法的重路由性能与能耗效果.仿真运行结果如图 7 所示.

在 $0.1 \leq R \leq 0.3$ 区间,额外联络时间的消耗主要由星间链路切换而引发的重传导致,几种方法使用的联络时间较为接近.随着 R 逐步增加,PHY 方法的性能急剧衰减,这与其性能优先的贪心策略有关.TDLP 方法则表现出极为规律的线性关系,这同样是受益于其流量感知策略的介入,因而能避免选择超过实际流量需求的联络机会参与传输.当 $R \geq 0.5$ 以后,负载的增加会导致重传次数的增加,SNDN 名字感知的逐跳转发特性开始产生作用,尤其是在 $0.5 \leq R \leq 0.8$ 这个区间内性能优势更加明显.当 $R > 0.8$ 以后,同样受限于没有考虑转发策略层的因素,SNDN 方法的性能衰减较为明显,在满负载的情况下比 TDLP 方法多使用了 201 秒的联络时间.

6.4 多播路由性能

接下来对仿真场景稍作改变,考虑有 N 个彼此间无直接链路的用户节点,模拟它们实时从“资源三号”下载数据的应用场景.也即多个用户各自通过 LEO 卫星,借助于 MLSN 来下载相同数据(顺序下载),以此评估 SNDN 的多播路由性能.

改变 N 和 R ,对比分析 SNDN 方法在不同组合情况下的传输时间,具体考察如下几种场景.

场景 1 用户分布在同一 LEO 轨道下,不同 R 下的多播路由性能仿真结果如图 8 所示.

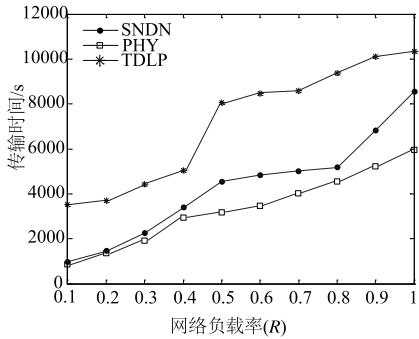


图6 不同网络负载情况下的传输时间对比

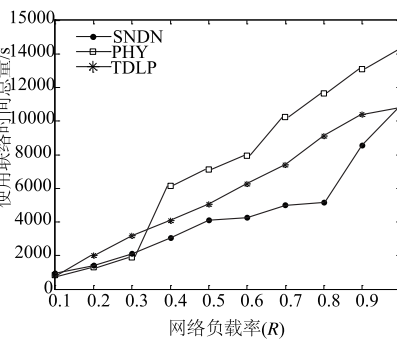


图7 不同网络负载情况下实际使用的联络时间对比

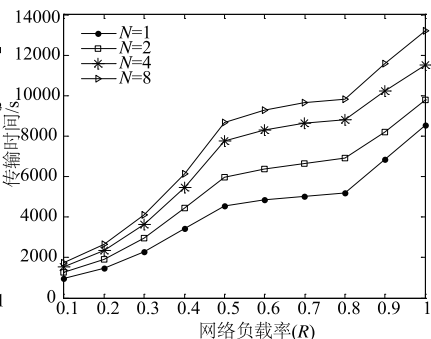


图8 不同网络负载情况下的多播传输时间对比(场景1)

可以发现,在各种 R 情况下,总传输时间并未随用户接收数据总量成倍增加,仅需多付出不到 30% 的额外传输时间消耗即可获得 2 倍的数据量. 且随着用户数 N 的增加,增长率还会降低. 这主要得益于 PIT 的内置多播特性和较好的用户分布特点. 值得注意的是,当网络负载率 $R \geq 0.8$ 以后,随着多播用户数的增加,性能衰减率还会降低,这与单播情况下有所区别.

场景 2 用户均匀分布在不同 LEO 下方时,不同 R 下的多播路由性能仿真结果如图 9 所示.

可以发现,多播传输时间的增加就不像“场景 1”那样具有线性特征. 具体表现为,在 $R < 0.8$ 的较低负载情况下,需多付出 40% ~ 50% 的额外传输时间消耗方可获取 2 倍的数据量(不同用户数情况下略有差别); 而当 $R \geq 0.8$ 以后,却降低为 30% ~ 38%. 这表明,由于多播收益的存在,网络负载的增加对性能衰减的影响程度会有所减轻. 同时也注意到,在 $N = 8$ 的情况下,随着网络负载的增加,传输时间的变化有部分波动,这与用户数较多且分布在不同轨道造成的路径多样性有关. 这种现象也与 MLSNs 的动态场景相匹配.

场景 3 用户随机分布时,不同 R 下的多播路由性能仿真结果如图 10 所示.

可以发现,当用户变为随机分布后,各种网络负载情况下的传输时间与前两种场景相比,总体上都有较大的增加. 这与用户数较少且随机分布造成的路径重合率低有关. 具体表现为,在 $N = 2$ 的情况下, $R \leq 0.8$ 时

需多付出 80% 的额外传输时间才能获取 2 倍的数据量. 在 $R > 0.8$ 以后,比率为 60%, 这与前两种场景的变化规律相似. 在 $N = 4$ 和 $N = 8$ 的情况下,传输时间的增长率在 15% ~ 33% 之间变化. 这表明:在用户随机分布的情况下,用户数越多,多播收益率也就越高.

6.5 PIT 汇聚性能

NDN 内在的多播支持仅需依靠 PIT 汇聚即可实现,不仅没有任何的额外消耗,而且汇聚后还能减少 PIT 表项的条目,在加速兴趣包处理效率的同时,还能大幅度地减少数据包的传输总量. 以 6.4 节的“场景 1”为例,对各节点在不同 R 下的 PIT 汇聚率进行汇总与分析, K 表示汇聚度,其值越大表明多播收益率越高(本场景只有 4 个不同用户,故 K 在 1 至 4 之间取值). 不同 R 下的 PIT 汇聚情况对比统计结果如图 11 所示.

可以发现,在不同 R 情况下,汇聚度 $K = 2$ 和 $K = 3$ 的 PIT 条目占比加起来均超过 50%, 汇聚度 $K = 4$ 的 PIT 条目占比在 19.3% 至 13.4% 之间变化, 仅有 21.3% 至 31.7% 的 PIT 未产生汇聚. 这表明大多数的数据包都从 PIT 汇聚中获益,这在减少网络流量的同时,也能降低总的传输时间需求. 值得注意的是,在 $R = 1$ 的满负载情况下,未产生汇聚的 PIT 记录占比超过了其它三种情况,达到 31%. 这也表明,虽然在大多数负载率情况下,不同汇聚度的 PIT 占比率与网络负载并无直接关联,但在满负载情况下,影响还是客观存在的.

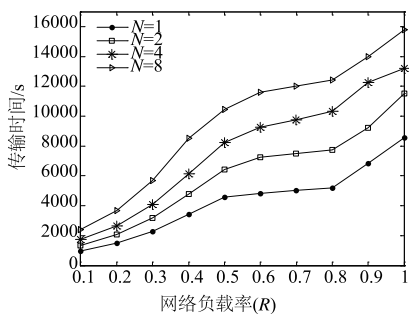


图9 不同网络负载下的多播传输时间对比(场景2)

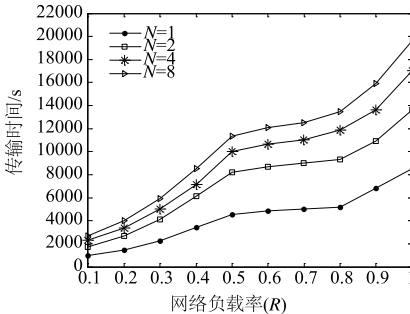


图10 不同网络负载下的多播传输时间对比(场景3)

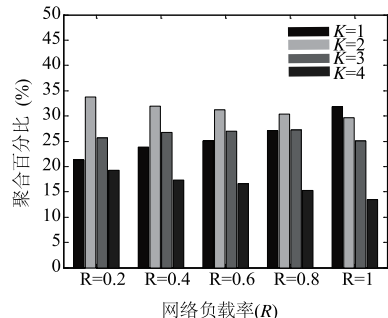


图11 不同负载率下的PIT汇聚情况对比

7 结束语

本文基于 NDN 网络体系结构和源路由的思想,提出了一种用于 MLSNs 的分布式动态路由方法并命名为 SNDN. 首先提出了 FIB 和 PIT 的自适应动态构建方案;接下来将 MLSNs 的全局 CT 建模为时变图并设计了一个高效且可自适应稠密和稀疏混合场景的最先到达路径算法,并证明了其正确性、开展了复杂度分析. 该算法可为 FIB 和 PIT 的自适应动态构建与包转发提供依据. 同时,我们也意识到,本文提出的算法虽然较好的控制了时间复杂度,但由于 MLSNs 的链路切换十分频繁(图 5),算法对 CT 的优化程度及链路层执行的忠实度较为敏感,这将直接影响其实用性. 因此,下阶段的工作还须跨层考虑 CT 时变(局部更新)情况下的路由优化问题,以进一步提高路由效率与性能. 最后,我们设置了仿真运行场景并从传输时间、路由效率、多播性能及 PIT 汇聚性能等方面对 SNDN 方法进行了详细的分析并与 TDLP 方法进行了对比,验证了 SNDN 在 MLSNs 场景下的路由效率与转发性能,尤其是在多播支持方面较现有方法具有更好的效果.

参考文献

- [1] Sacchi C, Bhasin K, Kadowaki N, Vong F. Toward the "space 2.0" Era [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(3): 16–17.
- [2] Lee J, Kang S. Satellite over satellite (SOS) network: A novel architecture for satellite network[A]. *Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*[C]. Tel Aviv: IEEE, 2000. 315–321.
- [3] Liu H Y, Sun F C. Routing for predictable multi-layered satellite networks[J]. *Science China Information Sciences*, 2013, 56(11): 1–18.
- [4] Yi X Q, Sun Z L, Yao F, Miao Y. Satellite constellation of MEO and IGSO network routing with dynamic grouping [J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2013, 31(6): 277–302.
- [5] Lu Y, Zhao Y, Sun F, et al. A survivable routing protocol for two-layered LEO/MEO satellite networks[J]. *Wireless networks*, 2014, 20(5): 871–887.
- [6] 闵士权. 我国天基综合信息网构想[J]. *航天器工程*, 2013, 22(5): 1–14.
MIN Shiquan. An idea of China's space-based integrated information network [J]. *Spacecraft Engineering*, 2013, 22(5): 1–14. (in Chinese)
- [7] 李德仁, 沈欣, 龚健雅, 张军, 陆建华. 论我国空间信息网络的构建[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2015, 40(6): 711–715, 766.
LI Deren, SHEN Xin, GONG Jianya, ZHANG Jun, LU Jianhua. On construction of china's space information network[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(6): 711–715, 766. (in Chinese)
- [8] Sastri Kota, Giovanni Giambene, Sooyoung Kim. Satellite component of NGN: Integrated and hybrid networks[J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2011, 29(3): 191–208.
- [9] Sacchi C, Bhasin K, Kadowaki N, Vong F. Technologies and applications of future satellite networking [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(5): 154–155.
- [10] Amin R, Ripplinger D, Mehta D, Cheng B N. Design considerations in applying disruption tolerant networking to tactical edge networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(10): 32–38.
- [11] Gao Z Y, Venkataramani A, Kurose J, Heimlicher S. Towards a quantitative comparison of location-independent network architectures [J]. *Acm Sigcomm Computer Communication Review*, 2014, 44(4): 259–270.
- [12] Sharma A, Tie X, Uppal H, Venkataramani A, Westbrook D, Yadav A. A global name service for a highly mobile internet network [J]. *Acm Sigcomm Computer Communication Review*, 2014, 44(4): 247–258.
- [13] Zhang L, Afanasyev A, Burke J, Jacobson V, Crowley P, Papadopoulos C, Wang L, Zhang B. Named data networking [J]. *Acm Sigcomm Computer Communication Review*, 2014, 44(4): 66–73.
- [14] Venkataramani A, Kurose J F, Raychaudhuri D. Mobility-First: A mobility-centric and trustworthy internet architecture [J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2014, 44(3): 74–80.
- [15] Fotiou N, Thomas Y, Siris V A, Polyzos G C. Security requirements and solutions for integrated satellite-terrestrial Information-Centric Networks [A]. *Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 13th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC)* [C]. Livorno: IEEE, 2014. 106–113.
- [16] Grassi G, Pesavento D, Pau G, Lixia Z, Fdida S. Navigo: Interest forwarding by geolocations in vehicular Named Data Networking [A]. *IEEE 16th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)* [C]. Boston: IEEE, 2015. 1–10.
- [17] Yi C, Afanasyev A, Wang L, Zhang B, Zhang L. Adaptive forwarding in named data networking [J]. *Acm Sigcomm Computer Communication Review*, 2012, 42(3): 62–67.
- [18] Yuan H, Crowley P. Scalable pending interest table design: From principles to practice [A]. *IEEE Conference on Computer Communications* [C]. Toronto: IEEE, 2014. 2049–2057.
- [19] Xianqing Yi, Zhenwei Hou, Tao Zhong, Yaohong Zhang,

- Zhili Sun. Route strategy of satellite network in GNSS based on topology evolution law [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2014, 25(4): 596 – 608.
- [20] Go K-C, Kim J-H, Cha J-R, Jo B-G, Kim K-K. Challenges and solutions for routing in converged satellite and terrestrial networks [A]. *IEEE Military Communications Conference* [C]. San Diego: IEEE, 2013. 1838 – 1843.
- [21] F Long, N Xiong, A V Vasilakos, L T Yang, F Sun. A sustainable heuristic QoS routing algorithm for pervasive multi-layered satellite wireless networks [J]. *Wireless Networks*, 2010, 16(6): 1657 – 1673.
- [22] J Fraire, J Finochietto. Design challenges in contact plans for disruption-tolerant satellite networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(5): 163 – 169.
- [23] C Caini, M Marchese. Delay-and disruption-tolerant networking (DTN): an alternative solution for future satellite networking applications [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99(11): 1980 – 1997.
- [24] Fraire J A, Madoery P G, Finochietto J M. On the design and analysis of fair contact plans in predictable delay-tolerant networks [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(11): 3874 – 3882.
- [25] J Fraire, P Madoery, J Finochietto. Routing-aware fair contact plan design for predictable delay tolerant networks [J]. *Ad-Hoc Networks*, 2015, 25(B): 303 – 313.
- [26] Hoque A K M, Amin S O, Alyyan A. NLSR: Named-data link state routing protocol [A]. *ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking* [C]. Hong Kong: ACM, 2013. 15 – 20.
- [27] Gunter I. Iridium-NEXT [EB/OL]. http://space.skyrocket.de/doc_sdat/iridium-next.htm.
- [28] P Holme, J Saramäki. Temporal networks [J]. *Physics Reports-Review Section of Physics Letters*, 2012, 519(3): 97 – 125.
- [29] A Casteigts, P Flocchini, W Quattrociocchi, N Santoro. Time-varying graphs and dynamic networks [A]. *10th International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless (ADHOC-NOW)* [C]. Paderborn: SPRINGER-Lecture Notes in Computer Science, 2011. 346 – 359.
- [30] 国家测绘地理信息局. 资源三号卫星技术参数 [EB/OL]. <http://sjfw.sasmac.cn/index/wxcp.jsp>.
- [31] Y Rahmat-Samii, A C Densmore. Technology trends and challenges of antennas for satellite communication systems [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(4): 1191 – 1204.

作者简介



刘迪男, 1980年出生, 湖南常德人, 武汉大学计算机学院博士生, 主要研究方向为空间信息网络、命名数据网络 (NDN).
E-mail: liudi611@whu.edu.cn



黄传河 (通信作者) 男, 1963年出生, 湖北随州人, 武汉大学教授、博士生导师, 主要研究方向为计算机网络 (移动互联网、移动 Ad Hoc 网络、无线传感器网络、未来互联网)、物联网、网络安全、高性能计算。
E-mail: huangch@whu.edu.cn



陈希男, 1988年出生, 江苏南通人, 武汉大学计算机学院博士生, 主要研究方向为空间信息网络、无线网络 MAC 协议设计与优化。
E-mail: chenxi_cs@whu.edu.cn



李昕男, 1989年出生, 河南信阳人, 武汉大学测绘学院博士生, 主要研究方向为高精度定位数据处理。
E-mail: whuxin@hotmail.com