

基于连通图的天地一体化测控通信网络仿真

李智远^{1,2} 李 晶¹ 张 剑¹

(宇航动力学国家重点实验室 西安 710043)¹ (西北工业大学电子信息学院 西安 710072)²

摘 要 以 GEO, MEO, LEO 卫星构建的空间异构网络为对象, 结合泛在网络的异构、自组织、自愈和协同等特性, 介绍了天地一体化测控通信网络的概念, 建立了基于“骨干、接入”模型的多层卫星网络, 探索了卫星网络被分割(不连通)情况下的测控通信网络路由技术。最后, 通过 OPNET 仿真软件对 CGR(连通图)路由算法、random 路由算法和 flood 路由算法在不同失效节点个数情况下的网络性能进行对比分析, 结果表明采用连通图路由算法的网络具有更好的自愈和抗毁能力。

关键词 天地一体化测控通信网络, 受限网络, 连通图, DTN 协议体系, CGR 协议

中图分类号 V416.6 **文献标识码** A

Simulation for Integrated Space-Ground TT&C and Communication Network Routing Algorithm

LI Zhi-yuan^{1,2} LI Jing¹ ZHANG Jian¹

(State Key Laboratory of Astronautic Dynamics, Xi'an 710043, China)¹

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)²

Abstract Based on space heterogeneous network set up by GEO, MEO, LEO satellites, considering the heterogeneity, self-organization, self-healing and cooperated abilities of the characteristic of ubiquitous network, this paper proposed the definition of integrated space-ground TT&C and communication network, built a multi-layer satellite network based on “backbone and access” models, and studied a routing technology when satellite network was divided. Finally, network performance was analyzed and simulated in the condition of different number of failed nodes under CGR, random and flood routing algorithms. It was verified that the network can be more self-healing and survivable when CGR routing algorithm is used.

Keywords Integrated space-ground TT&C and communication network, Constraint network, Contact graph, DTN protocol systems, CGR protocol

随着航天技术的快速发展和科学技术的不断进步, 航天器传输的信息呈现出复杂化、高交换量和高数据率的特点, 使得“测控网”“通信网”等专网概念愈渐弱化。我国“十三五”百大工程项目提出了建立“天地一体化信息网络”, 不仅能够推动国民经济的快速发展, 也是国防和国家安全的重要保证。如果利用天地一体化网络承载航天领域的测控通信技术, 将加速航天领域的网络化建设的步伐, 并且将引领整个航天事业走向一个崭新的阶段。

通过星间链路技术, 同时采用现有的路由技术, 可以实现天地互联互通的要求。但是, 卫星网络具有高延时、网络拓扑结构变化频繁等特点, 一旦网络中的某一个或若干节点失效, 测控通信网络将会出现高延时、高丢包率, 甚至造成整个网络的瘫痪。因此, 选择适合天地一体化测控通信网络的路由协议是其组网的关键技术之一。

考虑到路由性能和收敛上的局限, 对卫星网络路由技术的研究已经从原来的单层卫星网络, 发展成双层、多层的卫星网络。如文献[1]提出了针对双层 LEO/MEO 卫星网络的路

由协议 (Satellite Grouping and Routing Protocol, SGRP), 实现了最短时延路由以及对 LEO 层链路拥塞与卫星失效的快速反应机制。文献[2]也提出了针对双层 LEO/MEO 卫星网络的 QoS 路由算法, 在 HDRP 的基础上, 通过遗传算法、蚁群算法等进一步优化了卫星网络的路由性能。文献[3]利用 MEO 层重叠覆盖的特性, 允许一颗发生流量拥塞的 LEO 卫星同时向多个覆盖它的 MEO 卫星分配流量。文献[4]进一步提出了针对双层 LEO/MEO 卫星网络的流量平衡路由策略, 沿用将 LEO 层的流量分配到 MEO 层的思想, 计算并区分出需要转到 MEO 层的流量, 更好地提高了网络的性能。文献[5]提出了由 GEO, MEO 和 LEO 3 层卫星组成的卫星网络架构 (Multilayered Satellite IP Networks, MLSN) 的新型路由算法。但该方案要求卫星装备较多的链路收发设备, 造成卫星有效载荷和整体设计实现难度增加, 而且形成的多层网络结构非常复杂。以上研究均侧重于在卫星节点完好的情况下如何提高卫星网络的性能。但针对卫星网络中若干节点失效后, 选取最优的路由算法来提高网络性能的研究还鲜有提及。

在多层卫星网络中, MEO 卫星之间、GEO 卫星与 MEO 卫星、MEO 卫星与 LEO 卫星、LEO 卫星之间都存在星际链路。系统实现的复杂度是多层卫星网络结构的主要缺点。为了克服多层卫星网络组网复杂的缺点, 简化卫星网络中路由的设计, 本文提出了基于“骨干、接入”模型 3 层卫星网络建立天地一体化测控通信网络的构想。针对测控通信网络的特点, 选取了几种与之相适应的路由算法。通过 STK 生成了 55 个卫星轨道数据并导入 OPNET 仿真软件, 建立了包括 55 个卫星节点的天地一体化网络。通过对几种路由算法在不同失效节点个数下的网络性能进行对比和分析, 从中选出一个最优的路由算法。

1 基于连通图的天地一体化测控通信网组网设计

网络拓扑是网络中节点连接的方式, 对于给定的一组网络节点, 所选取的网络拓扑决定了网络的复杂度、通信能力、抗毁性和可扩展性。而卫星的轨道特性决定了卫星网络拓扑的重要特性参数。总的来说, 卫星轨道越低, 覆盖范围越小, 卫星组网过程中的切换频率越高, 服务时间越短。但是信号的空间损耗和时延较小, 适合接入地面的多种业务。采用低轨道的星座有铱卫星系统 (Iridium)、Teledesic 通信星座系统等; 采用中轨道的星座有著名的北斗、GPS 和 GLONASS 导航系统等; 采用高轨道的星座多用于视频、多媒体、互联网等高速通信系统中; 而椭圆轨道星座常用于提供特定地区的服务。图 1 给出了一些典型卫星网络所采用的轨道。

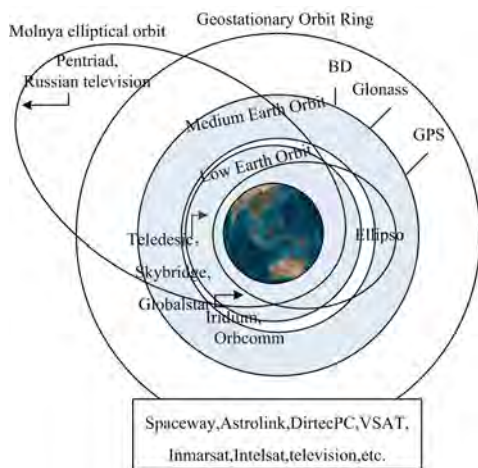


图 1 典型卫星网络轨道示意图

随着航天技术的不断发展, 卫星测控通信网络要求必须满足业务多样化、骨干传输可靠化、覆盖全球化的要求, 单层网络难以满足系统设计需求, 而多层卫星具有组网灵活、抗毁性强等优点, 能够实现各种轨道高度卫星的优势互补。

在多层卫星网络结构中, MEO 卫星与 MEO 卫星、GEO 卫星与 MEO 卫星、MEO 卫星与 LEO 卫星、LEO 卫星与 LEO 卫星之间都存在星际链路, 系统实现的高复杂度是多层卫星网络的主要缺点。这两个特点可以用来简化卫星网络中路由的设计。为了克服其冗余连接复杂性高的缺点, 可建立基于“骨干、接入”模型的多层卫星网络^[6-7], 如图 2 所示。

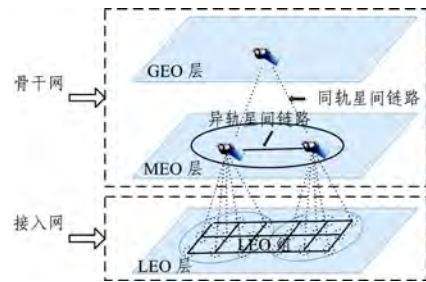


图 2 多层卫星网络结构图

2 天地一体化测控通信网络的路由算法设计

天地一体化测控通信网络, 是利用天地一体化信息网络的相关技术, 将各类航天器测控通信终端以及航天任务操作控制中心、运控中心、空间目标监视中心、用户等均作为标准网络节点, 按照标准化网络传输协议, 实现互联互通互操作的公共基础设施平台。天地一体化测控通信网络包括天基测控通信网和陆海基测控通信网。由于地面通信技术相对成熟, 本文提出的天地一体化测控通信网络只对于天基部分进行讨论和研究。天地一体化测控通信网络属于自组织网络, 它具有以下鲜明的特点: 在路径和链路特征上具有低数据率、高延迟, 可能不存在稳定的端到端的连接; 在网络体系结构上缺乏交互性; 端系统寿命有限、资源有限、低占空比操作。因此, 这类网络通常也被称为“受限网络”。

2.1 天地一体化测控通信网络的路由算法介绍

目前, 天地一体化网络的地基部分广泛使用的通信协议为 IP 协议族。对于天基网络协议的研究, 目前主要有 3 类协议体系, 分别是: 空间数据系统咨询委员会 (Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS) 协议体系、空间 IP 协议体系、DTN 协议体系。但在空间通信条件下, DTN 协议明显好于其他两种协议。相关研究已经验证了 DTN 相关协议在空间通信中的有效性和优越性^[8-9]。

针对 LEO 卫星网络的连通中断特性, 我们需要基于 DTN 协议体系设计网络的路由策略。现有的基于 DTN 协议提出的路由算法有 MED 算法、ED 算法、Epidemic 算法、Spray-and-wait 算法、Flooding 算法等。但 MED 算法、ED 算法、Epidemic 算法并不适合通信资源宝贵、缓存空间有限的卫星网络^[10]。Spray-and-wait 算法基于泛洪策略, 传输延迟小, 可扩展性强, 其网络性能不因网络的规模和节点密度的改变而产生较大影响。Flooding 算法^[11]的基本思想是将数据发送给最早遇到的 N 个节点, 相当于每经过 1 跳, 数据就复制 N 份, 且规定每个节点的每份数据只能接收 1 次, 直到目的节点收到数据。该协议突出的优点是不要维护网络的拓扑结构、无需查找路由表和相关路由的计算, 但存在路由信息内爆、网络资源利用不合理等缺点^[12-13]。

文献[14]提出了 DTN 网络中基于传递效用的路由算法。该算法是一种改进的 Spray-and-wait 算法, 降低了网络开销, 提高了报文递交率, 但网络延迟比较大。文献[15]针对卫星网络的确定动态拓扑特性提出了演化图模型, 针对不同最优目标提出了相应的路径计算算法。文献[16]将演化图模

型应用于导航星座网络的路由计算,并通过仿真分析了采用最早到达路径算法的网络时延性能。但是,演化图模型算法计算路径的数量受限,没有考虑到链路资源,容易在大网络负载时产生网络拥塞。为了提高网络性能,DTN 协议体系中又提出了一种连通图路由(Contact Graph Routing, CGR)算法^[17],该算法是针对节点规律性移动的网络,利用节点间连通状态的规律性变化建立网络拓扑图。目前,将 CGR 路由算法模型应用到空间信息网络的相关研究还比较少,本文拟将 CGR 路由算法应用到测控通信网络的接入层。

2.2 CGR 路由算法的概述

CGR 假定链路的连接机会是计划好或者规划好的,而不是通过预测或发现的。对于基于连通图的路由方法,首先需要节点中保存了准确的连通信息,这些信息由网络中的连通计划而来。一个连通计划应包含表 1 所列的要素。

表 1 连通计划要素

算法	帧率/fps
源节点	一条链路中发送数据的节点
目的节点	一条链路中接收数据的节点
开始时间	源节点可以向目的节点发送数据的开始时间
结束时间	源节点可以向目的节点发送数据的停止时间
数据速率	一条链路的数据传输速率,可由数据大小除以传输时长得到
链路距离	发送节点与接收节点之间的距离

连通计划由节点互相发送连通消息得到,由此可以获得对应连通的数据传输速率,结合连通的时间跨度,可以获得该条链路的数据容量。数据容量和传输速率可以作为限制条件在路由计算过程中使用,比如当前节点准备发送给某节点的数据量不能超过该条连通的数据容量,否则有些数据包必然来不及发送,这时再做其他处理也会影响效率。

每一个连通计划都准确地反映了网络中一条链路的连通情况,根据连通存在的时间,可将所有的连通计划转化为多个不同时期的网络拓扑图。卫星节点可基于已知的当前网络拓扑来计算路由,由于网络拓扑的高可靠性,本文提出的自组织卫星网络能够脱离一般移动网络的性能限制,实现数据在卫星网络中的高效率传输。

根据已有连通图路由的思想,我们建立由节点结构构成的连通图,一个节点结构对应网络拓扑中的一个节点,每个节点结构包含节点 ID、有效字段、满字段、连通计划列表。在节点结构中,有效字段在卫星收到失效信息或满信息后会被更改,指示对应节点不可用,其可作为路由计算中的判断条件来降低算法的复杂度。满字段在本地节点存储队列的剩余空间变化时会被更改,可作为判断是否发送满消息的标准。有效字段和满字段都可以表示该节点不能计算路由,但节点在计算路由时不能认为自己无效,因此做出区分。

2.3 CGR 路由算法的原理

图 3 所示是 CGR 路由算法的处理流程。该算法依赖于连通计划生成网络的连通图,并在网络开始转发数据之前将连通计划信息发送给所有节点。随着时间的推移,CGR 通过连通计划信息来更新连通图,如加入未来的连通计划或去除已过期的连通计划。在每个节点中,CGR 使用一种检查可用连通的算法,并在连通图的基础上计算当前可以转发的邻居节点,同时,根据系统的优化要求来选择数据的下一跳节点。

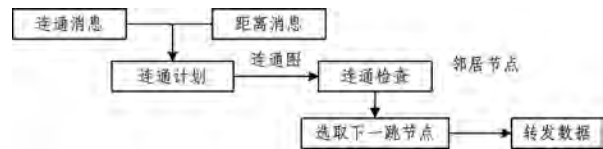


图 3 连通图路由流程

CGR 计算的路径相当于 C++ 语言中容器的链表,该链表的第一个连通是从源节点开始,依次选择最优的中间节点,依次连通,直至到达目的节点为止。通过记录路径上已有的节点,可以避免产生环路。

根据连通图路由的思想,建立由节点结构构成的连通图,一个节点结构对应网络拓扑中的一个节点。每个节点结构包含节点 ID、有效字段、满字段、连通计划列表 xmt 。对于节点 D ,该结构的节点 ID 为网络中节点 D 的唯一标识;有效字段指示节点 D 当前是否可用,字段为 0 时表示该节点失效,默认值为 1;满字段指示节点 D 的本地存储资源是否耗尽,值大于 0 时表示该节点的存储队列已满,默认值为 0;连通计划表 xmt 是以节点 D 为目的节点的所有连通计划组成的列表,它们以连通的结束时间降序排列,显然具有不同节点 ID 的节点结构包含的连通计划互不相同。网络中所有节点的节点结构即构成符合要求的连通图。

3 网络场景建立与路由算法的仿真结果与分析

3.1 基于 OPNET 的网络仿真场景的建立

在网络仿真工具方面,NS-2 是使用得非常广泛的一个开源网络仿真工具,但 NS-2 对卫星网络的支持非常有限,不支持 walker delta 星座模型。而 OPNET Modeler 可用于建立无线网和卫星通信网的模型,并且有比较全面的支持。因此,本文采用 STK8.0 软件导入卫星的轨道参数,并通过 OPNET 软件进行仿真实验。实验中,共有 55 个卫星节点、3 个地面站节点,它们组成了测控通信网络。采用的卫星轨道数据如表 2 所列。

表 2 测控通信网络的卫星轨道数据

	GEO	MEO	LEO
卫星数目	3	16	36
轨道高度/km	35863	21528	1400
轨道倾角	—	55	52
轨道周期/min	1440	773.2	113.6
轨道数目	1	4	6
星座类型	—	walker delta	walker delta

我们虽然使用了 walker delta 星座,但在设计路由的过程中并没有考虑卫星星座的特点,因此其适用范围不局限于具体的卫星星座类型。



图 4 基于 OPNET 的网络场景图

由于 GEO 卫星与地面站的可见时间最长,星地链路十分

稳定,因此 GEO 卫星可作为骨干网和接入网的连接节点,相当于骨干网和接入网的“网关入口”。因此,设计 LEO 层卫星网络的路由算法时,可以将 GEO 卫星考虑在内。因此,根据表 2,通过在 STK 中设定相应的参数,可批量生成格式为 .sa 的卫星星座轨道,并通过 OPNET 导入 STK 轨道,生成由 3 颗 GEO 卫星、16 颗 MEO 卫星、36 颗 LEO 卫星以及 3 个地面测控站节点组成的网络场景,如图 4 所示,该场景也可以用于生成网络的连通计划。

3.2 CGR 路由算法的实现

CGR 中没有路由表,因为不同时刻到达的转发路径存在很大差异。因此,CGR 会根据当前的连接关系计算转发路径。它的一个关键的优点是它基于准确的网络拓扑信息,可以做出高可信度的路由计算^[18]。有了完整的连通图后,通过递归检查每条连通,即可找到符合要求的从当前节点到目的节点的可用路径。该算法实现的伪代码如下。

算法 1 CGR 路由算法

输入:联系图 G,不可达节点集合 exclude,当前数据包 B,目的节点 D,
当前路径参数,跳数限制 shortest
输出:由可用路径下一跳节点组成的集合 proximate
将 B 的上一跳节点和失效节点加入 exclude,清空 proximate;
Routing(D, 路径参数){
将 D 加入 exclude,保留当前路径参数;
for(m ∈ D_{next}){

```

    读取路径参数;
    if(m 过期或数据 B 过期) continue;
    if(D 就是数据 B 的目的节点)
    将 m 的开始时间和结束时间更新为当期路径参数;
    else{
        if(m 的源节点就是当前节点){
            if(m 的剩余容量不足够发送 B) continue;
            if(D 已经在 proximate 中){
                保留较短的路径信息;continue;
            }
            保留当前路径信息;
            将 D 加入 proximate,并更新跳数限制 shortest;
        }
        else{
            if(m 的源节点在 exclude 中) continue;
            更新当前路径信息;
            if(当前路径的跳数达到 shortest) continue;
            else{
                调用函数 Routing(m 的源节点, 路径参数);
            }
        }
    }
}
将 D 从 exclude 中取出,重置当前路径参数;
CGR 路由算法的流程图如 5 图所示。

```

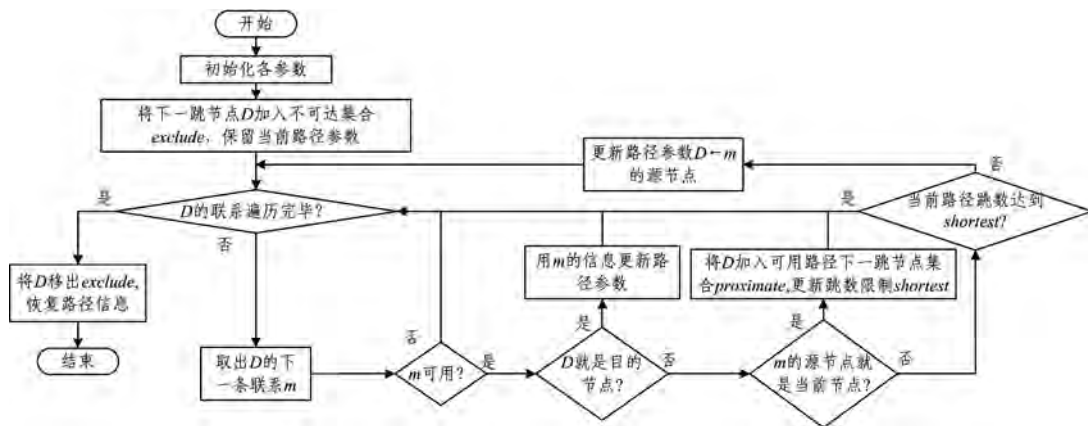


图 5 CGR 路由算法的流程图

4 实验结果及分析

针对本文对路由性能的要求,仿真过程中主要考查采用 CGR 算法,在节点发生故障时,其本身通信能力的变化特点。仿真实验中,共有 55 个卫星节点、3 个地面站节点。将选取同样基于 DTN 协议提出的 Flood 算法、Spray-and-wait 算法和 Random 算法作为对比实验。在这 3 种对比算法中,除路由算法外,均采用相同的参数和机制。另外,本文还采用了一种随机路由,使卫星随机决定某个数据是否发送给遇到的节点。

图 6 显示了基于连通图路由的网络与多种网络的收包率。每次仿真的各节点参数相同,选取某一节点进行发包,其他各节点进行数据转发。仿真开始后节点随机失效,失效节点个数分别为 10,20,30,40,仿真时长为 5 h。将地面站收到的包个数占网络中包个数的比率作为衡量网络通信能力的指

标。每组实验运行 5 次,取算术平均值。

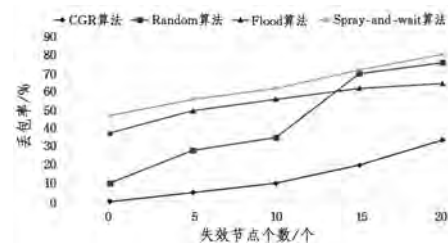


图 6 多种路由方法的网络收包率对比图

从图 6 可以看出,在规模为 55 个卫星的网络中,基于连通图路由的网络在失效节点不超过 15 个时能够保证网络的通信能力在 80% 以上,相对于其他 3 种路由算法,CGR 路由算法具有明显的优势。

图 7 和图 8 是各路由方法在无节点失效、10 个节点失效、20 个节点失效的情况下 CGR 算法、Flood 算法、Random

算法和 Spray-and-wait 算法的网络性能对比。每组实验运行 5 次,取算术平均值。从图 7 的仿真结果可以看出,CGR 路由算法在无节点失效、10 个节点失效、20 个节点

失效的情况下时,平均时延分别为 15.75 s,16.00 s,16.48 s,显然远远低于其他 3 种算法。从图 8 中可以看到,CGR 算法相对于其他 3 种算法获得了更高的吞吐量。

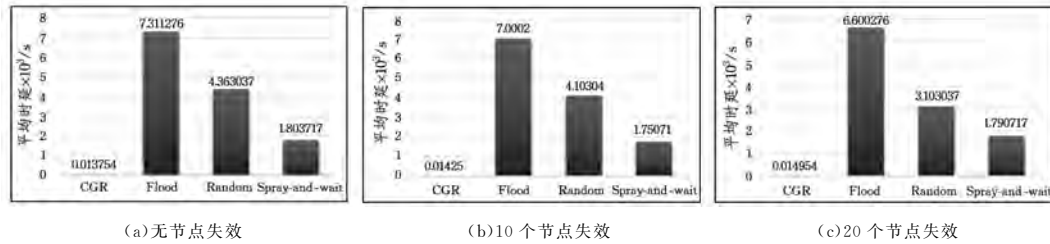


图 7 多种路由方法的网络平均时延对比图

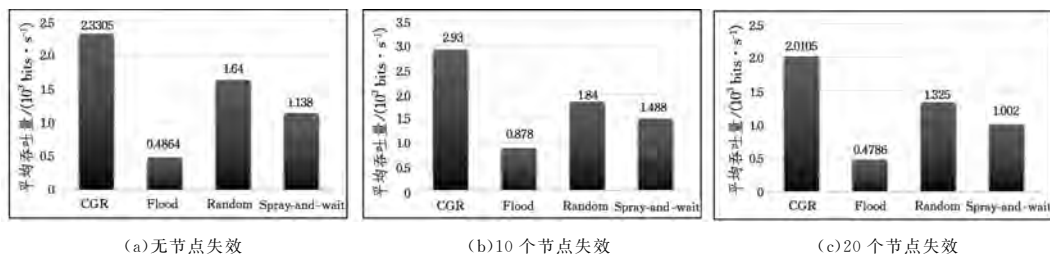


图 8 多种路由方法的网络平均吞吐量对比图

结束语 本文设计的自组织卫星网络参考了 DTN 协议体系对受限网络的支持,利用地球轨道卫星周期性运动的特点,提出了基于连通图的路由方法。仿真过程中,通过在 OPNET Modeler 中实现连通图路由及其他 3 种基于 DTN 的路由算法,比较了多种算法的收包率、数据时延、网络平均吞吐量等性能。仿真结果表明,CGR 路由算法在测控通信网络中某一个或若干节点失效的情况下具有较低的时延和较高的吞吐量,尤其具有较好的抗毁性能,采用该路由算法的网络具有更好的自愈和抗毁能力。

参考文献

- [1] CHEN C, EKICI E. A routing protocol for hierarchical LEO/MEO satellite IP networks[J]. ACM/Kluwer Wireless Networks Journal, 2005, 11(4): 507-521.
- [2] LONG F, XIONG N X, VASILAKOS A V, et al. A sustainable heuristic QoS routing algorithm for pervasive multi-layered satellite wireless networks[J]. Wireless Networks, 2010, 16(6): 1657-1673.
- [3] KAWAMOTO Y, NISHIYAMA H, KATO N, et al. A delay-based traffic distribution technique for multi-layered satellite networks[C]//Proc. of the Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC). Piscataway: IEEE, 2012: 2401-2405.
- [4] NISHIYAMA H, TADA Y, KATO N, et al. Toward optimized traffic distribution for efficient network capacity utilization in two-layered satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(3): 1303-1313.
- [5] AKYILDIZ I F, EKICI E, BENDER M D. MLRS: a novel routing algorithm for multilayered satellite IP networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 10(3): 411-424.
- [6] 李连强, 游寒旭, 朱杰, 等. 一种新型多层卫星星座组网设计[J]. 上海师范大学学报, 2016, 45(2): 248-252.
- [7] 常青, 李显旭, 何善宝. 我国空间信息网发展探讨[J]. 遥测遥控, 2015, 36(1): 1-10.
- [8] 陈宇, 孟新, 张磊. 空间信息网络协议体系分析[J]. 计算机技术与发展, 2012, 22(6): 1-5.
- [9] 申景诗, 李伟明, 张素娟. DTN 协议在空间信息网络中的应用研究[J]. 航天器工程, 2015, 24(6): 34-40.
- [10] BURLEIGH S. Contact Graph Routing[EB/OL]. <http://tools.ietf.org/html/draft-burleigh-dtnrg-cgr-ol>.
- [11] 唐坚刚, 潘锐. Flooding 算法改进及其应用[J]. 软件导刊, 2016, 15(8): 6-9.
- [12] VAHDAT D, BECKER Epidemic Routing for Partially-Connected Ad Hoc Networks: CS-2000-06[R]. Duke Tech Report, Durham, NC, 2000.
- [13] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 153-180.
- [14] 邵梅. DTN 中基于传递效用的路由协议和缓存管理研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2016.
- [15] BUIXUAN B, FERREIRA A, JARRY A. Evolving graphs and least cost journeys in dynamic networks[C]//Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt'03). 2003.
- [16] 王彦, 刘波, 虞万荣, 等. 基于演化图的导航星座星间路由算法[J]. 中国空间科学技术, 2012(5): 76-83.
- [17] BURLEIGH S. Contact Graph Routing[OL]. [2014-5-17]. <http://tools.ietf.org/html/draft-burleigh-cgr-01>.
- [18] 方维维, 姚雪宁, 王文瑞, 等. 分布式星群网络中基于联系图的路由技术研究[J]. 北京交通大学学报, 2017, 41(5): 17-23.