

近极轨微纳卫星星座高速数传模型路由算法*

史毅龙^{1,2}, 姜秀杰¹, 熊蔚明¹, 薛长斌¹

(1. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100190)

摘要:基于近极轨微纳卫星星座在高速数据传输模型下的网络特点,给出近极轨微纳卫星星座的高速数据传输的模型,分析适用于该模型的路由算法,推导该路由算法开销的计算方式,说明了算法在高速数传模型下的不足;给出算法的改进策略;利用 NS3 网络仿真平台建立微纳卫星星座高速数传网络场景,仿真了该场景下采用改进路由算法前后的关键性能指标。研究表明:在近极轨微纳卫星星座构建的高速数据传输网络中,改进算法在使得吞吐率和分组到达率有所提升的同时,显著降低了网络系统路由开销,微纳卫星高速数据传输网络的性能得到优化。

关键词:微纳卫星;近极轨星座;高速数传;路由开销

中图分类号:TN919.5 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2019)01-169-07

Routing algorithm for high-speed data transmission of nearly polar micro-satellite constellation

SHI Yilong^{1,2}, JIANG Xiujie¹, XIONG Weiming¹, XUE Changbin¹

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: According to the operational characteristics of the high-speed network model of nearly polar constellation of micro-satellite, the definition of the high-speed network of constellation was given. The routing protocol adapted to the transmission model was analyzed, its deficiency under the model was illustrated and the calculation method of protocol overhead was deduced. Then the optimized protocol was provided. The high-speed network model of micro-satellite constellation was established by using the NS3 network simulation platform, and the key performance indexes of the routing protocol were simulated before and after adopting the optimization strategy. The results show that the optimized routing algorithm reduces the overhead significantly, meanwhile it improves the throughput and packet arrival rate in the high-speed network. The performance of the high-speed network of nano-satellite constellation is optimized.

Keywords: nano-satellite; nearly polar constellation; high-speed data transmission; routing overhead

近年来,星座网络因其具有全球无缝覆盖、接入简单、可扩展性强等优势,成为地面网络的重要补充和延伸。而微纳卫星也以其成本低、体积小、功耗低、质量轻、标准化等优势获得了广泛关注,研究应用日益增多^[1-2]。国内外已开展了多项空间演示试验与应用研究,如:对地观测 Flock-1 卫星星座^[3]、Space Technology 5 星座计划^[4]等。对于包含大量微纳卫星的近极轨星座,由于星上资源受限,微纳卫星不可能实现大卫星对地面站那样的高速数据传输^[5-6]。为解决大量星上探测数据及时传输的问题,一种有效方案是在极地区域建立高速星间链路,构造高速数传网络,将数据传输给即将过境的卫星,再通过高速的星地链路

下传到地面。

目前针对微纳卫星星座网络路由方案的研究成果尚少,现有卫星网络路由算法主要针对大卫星网络。文献[7]为智能化整个卫星网络的网络流量,提出了一种基于负载均衡的低地球轨道(Low Earth Orbit, LEO)卫星网络的分布式路由方案。文献[8-9]为解决整个卫星网络负载不均衡而导致的链路拥塞的问题设计路由协议。以上算法多从整个星座网络的拓扑变化、负载均衡的角度考虑路由算法的设计,而近极轨微纳卫星星座的路由研究主要聚集于星座在极地形成的局部高速网络。该网络因其低传输延时的要求以及拓扑规律变化的特点,适合采用 ad-hoc 网络中的

* 收稿日期:2017-12-02

基金项目:中国科学院空间科学战略性科技先导专项基金资助项目(XDA04060300)

作者简介:史毅龙(1988—),男,湖南邵阳人,博士研究生,E-mail:shiyilong277@sina.com;

薛长斌(通信作者),男,研究员,博士,博士生导师,E-mail:xuechangbin@nssc.ac.cn

优化链路状态路由 (Optimized Link State Routing, OLSR) 协议,但现有的 OLSR 协议大多针对无线网状网络^[10] (Wireless Mesh Networks, WMN),没有利用星座网络拓扑变化的特点,且 OLSR 协议的消息泛洪开销对于微纳卫星来说过大。

本文针对该不足,结合高速数传网络拓扑变化的特点做出改进,得到一套微纳卫星高速数传优化链路状态路由 (Micro-nano satellite High-speed transmission Optimized Link State Routing, MH-OLSR) 协议,该协议优化了网络性能,降低了网络开销。

1 微纳卫星高速数传网络模型

1.1 微纳卫星星座高速数传场景概述

星座高速数传网络用以解决大量微纳卫星探测数据无法及时传输的问题,由于微纳卫星的星上资源严重受限,微纳星每次过站下传数据量较小、码速率较低,如果采用传统的“一星一传”方式完成大量微纳卫星数据传输的任务,需要大量地面站支撑。全球布站方式实际上不可取。微纳卫星高速数传网络通过中继传输方式实现。每个轨道面以 1 到 3 颗星为一组,利用低速 L 波段星间链路将每组的数据收集到一颗中间星上,再通过该中间星在两极附近构建高速网络。在该网络中,使用高速的 X 波段星间链路将各轨道面的中间星数据路由到即将入境的某一轨道面的星上,然后当该星入境时,数据通过星地高速链路下传到地面,这样一个轨道面只需要中间星具备 X 波段数据传输能力即可。以每组均有 3 颗星为例,过程如图 1 所示。

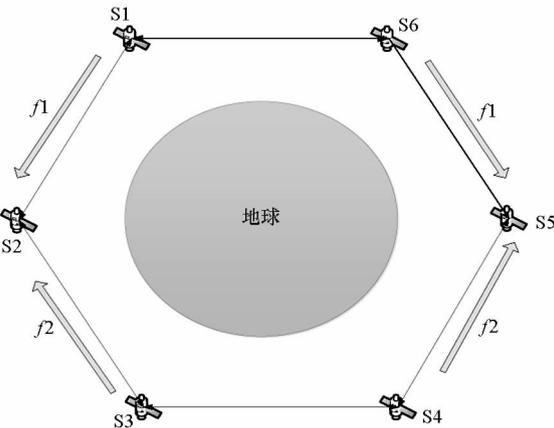


图 1 高速数传网络结构图

Fig. 1 Structure of efficient data transmission network

图 1 中 S1、S2、S3 为一组, S4、S5、S6 为另外一组。以其中一组说明: S2 作为中间星, 与邻近

的两颗星 S1、S3 分别采用两个频率 f_1 、 f_2 进行通信, 将 S1 与 S3 星的数据集中到 S2 中, 再由 S2 在两极附近将数据传输到即将入境的卫星, 由该星入境时将数据下传到地面。

1.2 微纳卫星高速数传网络分析

在近极轨星座组网中, 太阳同步轨道 (Sun-Synchronous Orbit, SSO) 星座对低、中、高纬度区域覆盖较为均衡, 本文以 600 km 高度、 12×12 的经典同构 SSO 星座为例来说明微纳卫星高速数传网络的构建。星座的极区俯视图如图 2 所示。

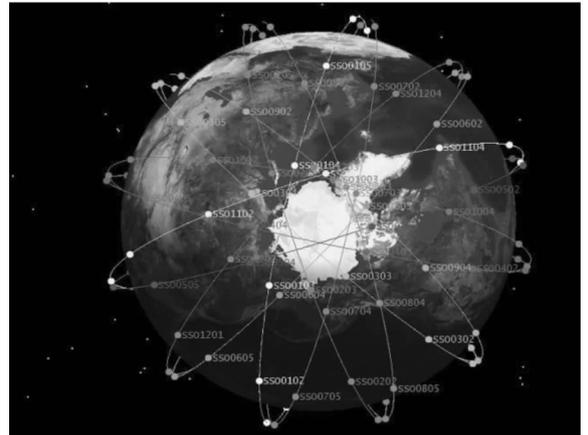


图 2 星座的极区俯视图

Fig. 2 Graph of a polar view of the constellation

星座在非极区域利用 L 波段建立距离数千千米的同轨道面星间链路、在极地及过境区域利用 X 波段建立星间和星地链路, 实现整个大规模星座的互联互通。由于大规模星座卫星数量众多, 从成本角度出发, 仪器的小型化和低功耗应为其首要考虑因素。在卫星可控波束天线获得高增益、高传输速率的同时, 数传信号的发射功率以及卫星功耗也会随之激增, 成本也相应地会上升。因此, 综合考虑, 本文中星上可控波束天线定向增益设定为 25 dBi, 定向天线的接收 G/T 为 1 dB/K, 发射机馈线损耗设为 1.5 dB, 大气损耗、天线指向损耗、极化损耗均设为 0.5 dB, X 波段载波频率为 8.2 GHz, 调制解调损耗设为 2 dB, 编码方式采用 RS(255, 223) + CV(7, 1/2) 级联编码, E_b/N_0 为 2.5 dB, 此时, 发射功率为 1 W。依据无线电空间传输损耗衰减计算方法以及信噪比、载噪比之间的关系可以得到星间距离与传输速率之间的关系。星间距离在 7200 km 上数据传输速率为 500 kbit/s; 5000 km 上数据传输速率为 1 Mbit/s; 500 km 上数据传输速率为 100 Mbit/s。因此在极地形成的高速数传网络中, 可以近似地认为在星间距离小于 500 km 时, 高速链路形成, 大于

500 km时高速链路断开。

为分析所构建的SSO高速数传场景下的网络性能和网路开销,给出一些网络规则约束:①微纳卫星高速数传网络中的路由方式为动态路由;②节点与节点进行数传时,节点间距离小于500 km,视作高速链路连通,而大于500 km,视作星间高速链路断开;③在星座模型中,同轨道面星间距离固定为3600 km,异轨面星间距离小于700 km时视作进入极区,即只有在极区内的异轨面星才能形成高速星间链路;④卫星一轨时间约为1.5 h,极区高速数传链路连通的持续时间可达200 s以上;⑤星间长距离下的传播延迟忽略不计。

当采用在地面进行静态路由计算再将路由上注星上的方法时,若中间节点突发问题,故障无法及时检测。极地的高速数传网络近似于ad-hoc网络,且具有拓扑变化规律、时延及开销受限的特点,因此,ad-hoc网络中的OLSR协议较适合该网络场景^[11-13]。

2 改进 OLSR 路由算法

2.1 OLSR 路由协议分析

OLSR 协议是一种标准化的表驱动式路由协议,是为了适应无线自组网的需求,由经典链路状态算法进行优化而形成的^[14]。协议通过多点中继(MultiPoint Relay, MPR)机制以及链路信息压缩的方式来减少分组消息的开销。路由协议的流程如图3所示。

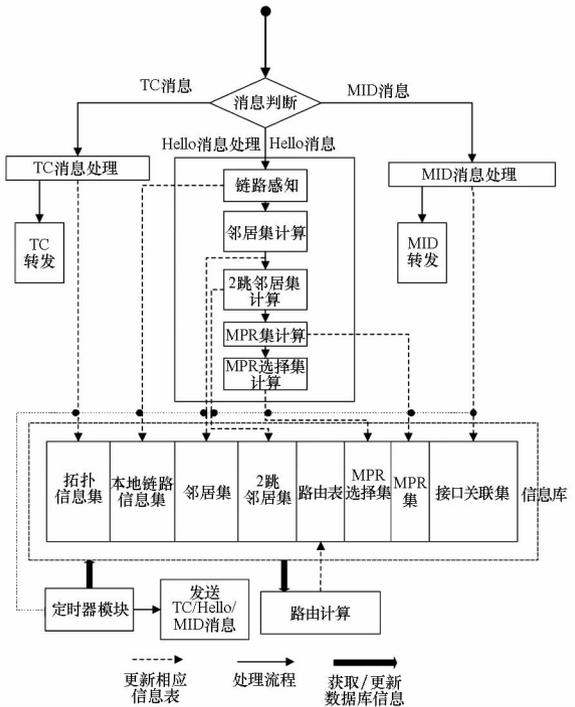


图3 OLSR 协议流程图

Fig.3 Flow chart of OLSR routing protocol

OLSR 协议需要周期性发送 Hello 消息以及 TC 消息,前者用来获取一跳及两跳邻居节点信息,后者用来维护全网的路由信息。而当有数据消息发送时,因为已经有了相应的路由信息,不会增加额外的路由开销。

OLSR 协议在忽略帧碰撞和各种退避的情况下,路由开销只和网络的拓扑结构、Hello 分组发送间隔 H_{int} 、TC 分组发送间隔 T_{int} 、网络的节点数 N_{total} 有关^[15-16]。为方便分析和运算,列出部分参数并加以说明,如表1所示。

表 1 参数表

Tab.1 Parameter list

| 参数 | 定义 |
|------------------|------------------------------|
| H_{int} | Hello 分组发送间隔 |
| T_{int} | TC 分组发送间隔 |
| T_{sim} | 整个仿真的时长 |
| N_{mpr} | TC 分组通过 MPR 平均转发数 |
| N_{Hello} | T_{sim} 内,单节点产生的 Hello 分组数 |
| N_{TC} | T_{sim} 内,单节点产生的 TC 分组数 |
| N_{total} | 整个网络中的节点总数 |
| O_{olsr_d} | OLSR 协议开销的下界 |
| O_{olsr_u} | OLSR 协议开销的上界 |
| SL | 链路稳定性计分,度量节点链路稳定性 |
| SM | MPR 选择集稳定性计分,用于 T_{int} 配置 |
| H_{min} | H_{int} 浮动范围下界值 |
| H_{max} | H_{int} 浮动范围上界值 |
| T_{min} | T_{int} 浮动范围下界值 |
| T_{max} | T_{int} 浮动范围上界值 |
| H_{int_last} | 上一个发送的 Hello 消息的 H_{int} |
| H_{int_last2} | 上上一个发送的 Hello 消息的 H_{int} |
| T_{int_last} | 上一个发送的 TC 消息的 T_{int} |
| T_{int_last2} | 上上一个发送的 TC 消息的 T_{int} |
| N_L | 网络中 $SL > 0$ 的节点的个数 |
| N_M | 网络中 $SM > 0$ 的节点的个数 |

设仿真时间长度为 T_{sim} ,则每个节点产生的 Hello 分组数为

$$N_{Hello} = \frac{T_{sim}}{H_{int}} \quad (1)$$

网络中 MPR 转发 TC 分组的平均次数设为 N_{mpr} ,由于每个 TC 分组需要 N_{mpr} 次转发,因此单节点转发的 TC 分组数为

$$N_{TC} = \frac{T_{sim}}{T_{int}} \times N_{mpr} \quad (2)$$

当节点数为 N_{total} 时,OLSR 协议的路由开销 O_{olsr} 为

$$O_{olsr} = (N_{Hello} + N_{TC}) \times N_{total} = \left(\frac{T_{sim}}{H_{int}} + \frac{T_{sim}}{T_{int}} \times N_{mpr} \right) \times N_{total} \quad (3)$$

路由开销的下界出现在所有节点彼此均在一跳范围内时,该场景下只需要能达到 1 跳邻居节点的 Hello 消息就能获取整个网络的拓扑信息。此时 OLSR 协议的开销仅与 Hello 分组的时间间隔和仿真时长有关,利用式(1)可以得到 OLSR 协议开销的下界为

$$O_{olsr_d} = \frac{T_{sim}}{H_{int}} \times N_{total} \quad (4)$$

路由开销的上界出现在单一节点的所有相邻节点均被选为 MPR 的环形网络场景中,此时 $N_{mpr} = N_{total}$,即任何节点产生的 TC 分组均被网络中的每个节点转发一次,因此路由协议开销达到上界。利用式(3)可以得到 OLSR 协议开销的上界为

$$O_{olsr_u} = \left(\frac{T_{sim}}{H_{int}} + \frac{T_{sim}}{T_{int}} \times N_{total} \right) \times N_{total} \quad (5)$$

由此可知当网络中的节点数固定时,网络的开销主要由 H_{int} 以及 T_{int} 来决定。传统的 OLSR 协议维护路由信息的方式是周期性地洪泛 Hello 和 TC 消息,在微纳卫星高速数传场景中,当节点需要快速建立路由进行高速数传时,固定的发送间隔使得节点感知延迟,同时微纳卫星轨道规律性变化的特性没有得到有效利用。在网络结构缓慢变化的情况下,大量重复而冗余的 Hello 和 TC 消息充斥着整个网络,泛洪对于资源受限的微纳卫星来说又开销过大。

2.2 OLSR 路由协议的改进方法

MH-OLSR 协议中 Hello 以及 TC 发送间隔的处理方式如图 4 所示。

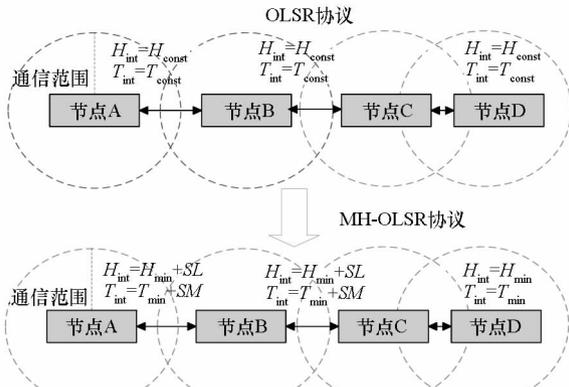


图 4 改进协议 Hello 及 TC 消息处理示意图

Fig. 4 Process of Hello & TC message of modified routing

改进协议添加了链路稳定性计分 SL 以及

MPR 稳定性计分 SM ,以此来度量节点当前拓扑的稳定性,根据节点内链路集以及 MPR 集的变化情况计分,分别计算 SL 以及 SM 值,通过它们来确定下一个 Hello 消息以及 TC 消息的发送时间。

OLSR 协议规定的 H_{int} 为一个恒定值,设为 H_{const} ,MH-OLSR 协议就以 H_{const} 为参考进行改进,当高速数传网络建立时,为使节点快速获得路由,令 $H_{int} = H_{min}$,其中 $H_{min} \leq H_{const}$, H_{min} 过小时,虽然性能得到较大的提升,但是网络资源消耗过大,因此 H_{min} 最好不要小于 H_{const} 的一半。MH-OLSR 路由协议令 $H_{min} = \frac{H_{const}}{2}$,当高速数传网络断开,网络进入拓扑结构相对稳定阶段时,为减少不必要的网络洪泛,令 $H_{int} = H_{min} + SL$ 。此时 $H_{const} \leq H_{int}$,当 H_{int} 过大时,节点感知延迟太大,网络性能严重下降,为使各节点下一周期进入高速数传网络时不损失太多的网络性能,令 $H_{int} \leq H_{max}$,其中 $H_{max} = H_{const} \times 10$ 。

链路稳定性计分的计分方式如下:当链路集新增一个元素,修改一个元素从其他状态恢复为 SYM_LINK 或 LOST_LINK 状态,以及从 SYM_LINK 恢复为 ASYM_LINK 状态,将 SL 置 0。节点每发送一次 Hello 消息, SL 累加 1。

当新增节点或是链路集发生变化时,意味着节点间的距离由远及近,需要快速建立路由,高速数传网络稳定性减弱,此时将 SL 置 0。当星间距离由近及远,链路集变化逐渐减少,网络拓扑结构趋于稳定,此时对 SL 进行累加。

同理,OLSR 规定 T_{int} 恒定为 T_{const} 。MH-OLSR 协议令 T_{int} 在 $[T_{min}, T_{max}]$ 之间浮动,其中 $T_{min} = \frac{T_{const}}{2}$ 。由于是通过 MPR 集的节点转发到整个网络,所以与 Hello 消息不同,TC 消息通过 SM 计分来判断网络拓扑稳定性, SM 计分方式与 SL 类似:当节点的 MPR 选择集新增元素时或者删除元素时 SM 置 0。节点每发送一次 TC 消息, SM 加 1。考虑微纳卫星在某一 H_{int} 或者 T_{int} 消息间隔内可能出现通信故障从而导致消息间隔大于实际期望值,因此 MH-OLSR 协议在 H_{int} 以及 T_{int} 的计算中加入缓冲机制。具体方法是在计算消息间隔时,将当前消息与之前两个发送间隔内的消息进行综合考虑,用其加权和作为 MH-OLSR 中 H_{int} 及 T_{int} 的设定依据。 H_{int} 的计算公式如式(6)所示。

$$H_{int} = \begin{cases} (H_{min} + SL) \times 0.5 + H_{int_last} \times 0.3 + H_{int_last2} \times 0.2, & H_{max} - H_{min} > SL > 0 \\ H_{max}, & SL \geq H_{max} - H_{min} \\ H_{min}, & SL = 0 \end{cases} \quad (6)$$

因为 T_{int} 的周期较长且在全网洪泛,一个快速发送的 TC 已经能够准确表示节点的拓扑状况。为了使 T_{int} 尽早恢复为 T_{max} , TC 发送间隔 T_{int} 的计算方式不同于 H_{int} , 如式(7)所示。

$$T_{int} = \begin{cases} (T_{min} + SM) \times 0.7 + 0.2 \times T_{int_last} + 0.1 \times T_{int_last2}, & T_{max} - T_{min} > SM > 0 \\ T_{max}, & SM \geq T_{max} - T_{min} \\ T_{min}, & SM = 0 \end{cases} \quad (7)$$

联立式(3)、式(6)、式(7),对路由开销进行进一步分析计算。当各节点均满足 $SL > 0$ 且 $SM > 0$ 时,节点路由的开销为

$$O_{olsr} = \frac{T_{sim}}{(H_{min} + SL) \times 0.5 + H_{int_last} \times 0.3 + H_{int_last2} \times 0.2} \times N_{total} + \frac{T_{sim}}{(T_{min} + SL) \times 0.7 + T_{int_last} \times 0.2 + T_{int_last2} \times 0.1} \times N_{total} \quad (8)$$

当各节点均满足 $SL = 0$ 且 $SM = 0$ 时,节点路由协议的开销为

$$O_{olsr} = \frac{T_{sim}}{H_{min}} \times N_{total} + \frac{T_{sim}}{T_{min}} \times N_{mpr} \times N_{total} \quad (9)$$

当只有部分节点满足 $SL > 0$ 以及 $SM > 0$ 时,路由的开销为

$$O_{olsr} = \frac{T_{sim}}{(H_{min} + SL) \times 0.5 + H_{int_last} \times 0.3 + H_{int_last2} \times 0.2} \times N_L + \frac{T_{sim}}{H_{min}} \times (N_{total} - N_L) + \frac{T_{sim}}{T_{min}} \times N_{mpr} \times (N_{total} - N_M) + \frac{T_{sim}}{(T_{min} + SM) \times 0.7 + T_{int_last} \times 0.2 + T_{int_last2} \times 0.1} \times N_M \quad (10)$$

由 2.1 节可知,当 T_{sim} 及网络节点数固定时,整个网络的路由开销主要由 Hello 以及 TC 消息发送间隔确定,即可以通过固定时间内发送 Hello 以及 TC 消息泛洪量来衡量网络的开销。MH-OLSR 协议就是通过式(6)、式(7)使得消息泛洪数量降低来对网络进行优化的。

2.3 改进 OLSR 路由算法描述

通过上节中描述的方法,改进算法首先判断网络拓扑变化的状态,并以其作为依据,重新计算 H_{int} 以及 T_{int} ,最后采用新的 H_{int} 以及 T_{int} 对路由进行优化。具体算法描述见图 5。

步骤 1: 初始阶段以 H_{const} 以及 T_{const} 配置 Hello 以及 TC 发送间隔,并进行链路感知构建每个路由节点的链路集、邻居集、MPR 及其选择集。

步骤 2: 根据链路集的变化情况对网络拓扑状态进行分析,通过 SL 结合缓冲机制计算出每个路由节点的 H_{int} 。

步骤 3: 根据 MPR 选择集的变化情况对网络

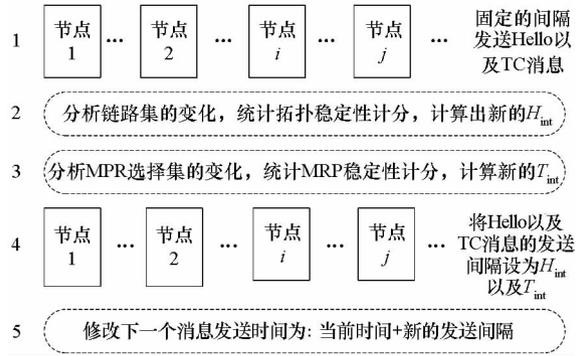


图 5 改进算法描述示意图

Fig. 5 Graph of modified algorithm

拓扑状态进行分析,通过 SM 计分计算出每个路由节点的 T_{int} 。

步骤 4: 根据修改后的 H_{int} 以及 T_{int} 记录下一个 Hello 消息以及下一个 TC 消息的预发时间,即当前时间 + H_{int} 以及当前时间 + T_{int} 。

步骤 5: 修改下一个 Hello 消息预发时间为当前时间 + H_{int} , TC 同理,配置完成返回步骤 2。

3 仿真结果与分析

3.1 仿真平台的搭建

由于 NS3 平台没有卫星轨道模型的仿真模块,无法直接构建微纳卫星星座高速数传网络进行仿真。由 1.2 节可知 12×12 经典同构 SSO 星座高速数传模型的结构,因此在 NS3 平台环境下自行搭建网络模型环境,网络模型见图 6。在 NS3 中,采用 WayPointModel 模拟微纳卫星运动轨迹,PropagationLossModel 模拟节点间通信传输范围,最后近似模拟出近极轨微纳卫星星座数传的网络模型。

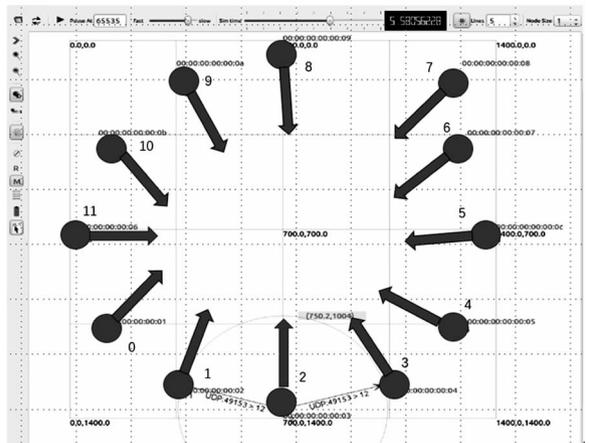


图 6 微纳卫星星座高速数传仿真场景示意图

Fig. 6 Graph of simulation scene of high-speed transfer

如图 6 所示,在搭建好的仿真环境下,标号

0~11为近极轨微纳卫星高速数传网络中各轨的节点,相关仿真条件如下:

1)依据 1.2 节中对于高速数传链路的描述,通过 PropagationLossModel 设置各节点高速数传范围为 500 km,高速数传传输速率为 100 Mbit/s。在节点间数传速率为 100 Mbit/s 的仿真条件下,为了使数据包总量不超出 NS3 trace 模块中 pcap 文件的数据流记录上限,数据包大小设为 1 Mbit。

2)设置节点 11 为即将入境的目的节点,节点 0~10 依次设为源节点。

3)将各节点配置为动态路由方式,并设置 12 个节点数据的路由方式为 MH-OLSR。

4)仿真时长设为 300 s,采用 WayPointModel 来近似模拟轨道模型,节点采用 1.2 节描述的 SSO 轨道星历文件中的轨道坐标,仿真 0 时刻对应星历文件中异轨道面节点距离为 [650 km, 750 km] 的随机时刻。

对该高速数传场景中各节点的轨道模型、数据包大小、传输速率的配置进行仿真。场景仿真次数为 1000 次,得出不同初始场景下,各源节点平均的吞吐率、分组投递率、整个网络 Hello 以及 TC 消息总量,并用 gnuplot 对数据加以分析。

3.2 MH-OLSR 算法优化后的分析

采用 2.3 节的算法思想,依据拓扑状况对全网节点的消息泛洪进行优化:①增加网络活跃阶段节点消息泛洪的频率,当有拓扑变化时使用最短间隔泛洪消息;②降低网络非活跃阶段节点消息泛洪的频率,当拓扑稳定时,增加最短间隔泛洪消息;③改变完成后,进行仿真分析;④记录 11 个源节点采用改进协议与原协议在吞吐率、分组投递率、全网消息泛洪数量几个方面的对比情况。

图 7 是采用改进算法前后,不同节点作为源节点时吞吐率的对比图。当节点 4 作为源节点时,原协议的吞吐率为 30.235 Mbit/s,采用 MH-OLSR 协议的吞吐率提升到了 39.703 Mbit/s,此

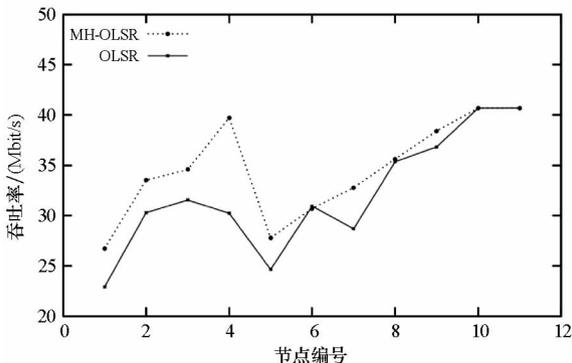


图 7 算法改进对吞吐率的影响

Fig. 7 Effect on throughput of algorithm modified

时改进协议对吞吐率提升最大,约达到了 31.3%。当节点 11 作为源节点时,原协议的吞吐率为 40.686 Mbit/s,采用 MH-OLSR 协议的吞吐率为 40.690 Mbit/s,吞吐率提升最小。仿真结果表明当节点采用 MH-OLSR 协议时,整个网络的平均吞吐率得到了提升。

图 8 是采用改进算法前后,不同节点作为源节点时全网分组到达率的对比。由图分析可以发现,采用 MH-OLSR 算法优化后,各节点的分组到达率比原来提升了 0~7%,也就是说,通过算法优化后,整个网络的平均分组投递率得到了提升。

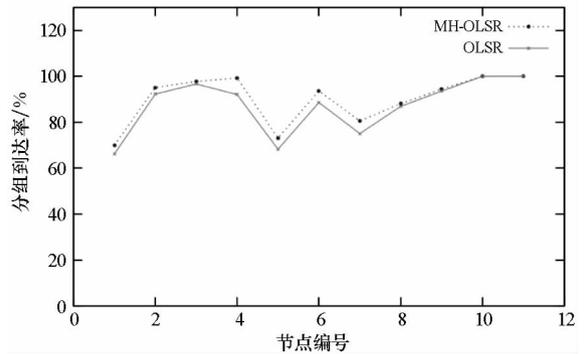


图 8 算法改进对分组投递率的影响

Fig. 8 Effect on packet delivery of algorithm modified

采用改进算法前后的消息泛洪量的变化见图 9。在图 9 中,采用 MH-OLSR 协议的网络在 50~130 s 的仿真时段,拓扑结构处于快速变化阶段,Hello 以及 TC 消息发送数量由 61 迅速增加至 684,在仿真时刻为 140 s 时,最接近原协议消息的泛洪数量。而在拓扑趋于稳定阶段,消息增长曲线趋于平缓。在仿真结束时刻,采用 MH-OLSR 协议优化的网络将消息泛洪数量由原来的 1830 下降到了 756,整体降低了 58.7%,下降幅度明显。

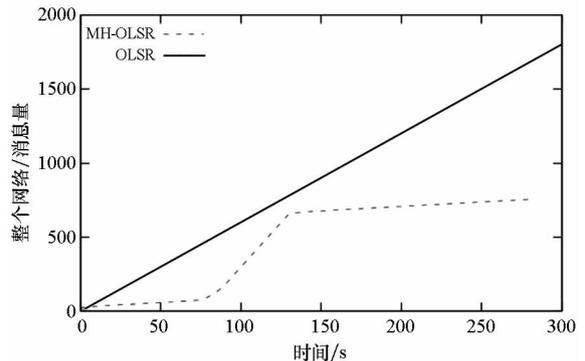


图 9 算法改进前后消息泛洪量随时间变化

Fig. 9 Message flooding of the two protocol over time

上述各仿真结果表明,通过算法优化后,整个网络在提升了平均吞吐率及分组投递率的情况

下,显著地降低了路由开销。

4 结论

根据 OLSR 路由协议的开销算法,推导一套改进协议 MH-OLSR,该协议依据网络拓扑变化的趋势来重新设计消息泛洪方式,使得节点能在近极轨星座高速数传网络场景下预测出当前高速数传网络中的拓扑变化趋势,并对网络中每个节点的消息泛洪间隔进行优化配置。最后,在 NS3 网络仿真平台近似地构建了 12 轨的 SSO 高速数传网络系统,对各轨节点作为源节点时的路由状态进行了仿真,在星间距离大于 500 km 则视链路为断开的测试环境下,分析了 MH-OLSR 协议优化的关键性能指标。结果表明:在吞吐率、分组投递率得到优化的情况下,MH-OLSR 大大降低了网络的开销,可以为今后微纳卫星星座高速数传网络的路由设计实现提供理论依据。

参考文献 (References)

- [1] Wang Z B, Wang Z Y, Gu X M, et al. Cross-layer design of LT codes and LDPC codes for satellite multimedia broadcast/multicast services[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(5): 1269 - 1275.
- [2] Tomioka Y, Yoshida K, Sakamoto Y, et al. Lessons learned on structural design of 50kg micro-satellites based on three real-life micro-satellite projects [C]//Proceedings of IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2012: 319 - 324.
- [3] Bandyopadhyay S, Subramanian G P, Foust R, et al. A review of impending small satellite formation flying missions [C]// Proceedings of the 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2015.
- [4] 康海龙. 分离载荷无线组网 MAC 协议关键技术研究[D]. 北京:中国科学院国家空间科学中心, 2016.
KANG Hailong. Research on the MAC protocol of wireless network for the fractionated payload [D]. Beijing: National Space Science Center, the Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [5] Lan S C, Chen Q, Zhang J X, et al. A taxonomy of energy efficiency strategies for cubesat cluster formation networks[C]// Proceeding of the 64th International Astronautical Congress, 2013: 11486 - 11493.
- [6] Yi X Q, Sun Z L, Yao F, et al. Satellite constellation of MEO and IGSO network routing with dynamic grouping[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2013, 31(6): 277 - 302.
- [7] Rao Y, Wang R C. Agent-based load balancing routing for LEO satellite networks [J]. Computer Networks, 2010, 54(17): 3187 - 3195.
- [8] Hu Q F, Yang D W, Wang Y T, et al. Accuracy and spatio-temporal variation of high resolution satellite rain-fall estimate over the Ganjiang River Basin [J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(4): 853 - 865.
- [9] Jiang W J, Zong P. Multi-class traffic QoS routing for LEO satellite networks [J]. Transaction of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 29(3): 254 - 262.
- [10] 王靖, 李芳芳, 于全. 基于链路状态感知的无线 Mesh 网优化路由协议[J]. 计算机科学, 2012, 39(11): 37 - 40.
WANG Jing, LI Fangfang, YU Quan. Link state reasoning based optimized routing protocol for wireless Mesh networks [J]. Computer Science, 2012, 39(11): 37 - 40. (in Chinese)
- [11] 马林华, 张嵩, 茹乐, 等. 航空高动态网络链路感知 OLSR 路由算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(7): 1326 - 1334.
MA Linhua, ZHANG Song, RU Le, et al. Link awareness-based OLSR routing algorithm for airborne highly dynamic networks [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(7): 1326 - 1334. (in Chinese)
- [12] Liu X Y, Ma J F, Hao X W. Self-adaption routing for two-layered satellite networks [J]. Computer Networks, 2010, 54(17): 3187 - 3195.
- [13] Matsuo K, Oda T, Barolli A, et al. A GA-based simulation system for WMNs; performance analysis for different WMN architectures considering transmission rate and OLSR protocol [C]// Proceedings of IEEE 19th International Conference on Network-Based Information Systems, 2016: 37 - 41.
- [14] 徐扬. Ad Hoc 网络性能分析及路由技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2014.
XU Yang. On performance analysis and routing technology for Ad Hoc networks [D]. Xi'an: Xidian University, 2014. (in Chinese)
- [15] Hu G W, Zhang C Q. MR-OLSR: a link state routing algorithm in multi-radio/multi-channel wireless mesh networks [C]// Proceedings of IEEE 18th Asia-Pacific Conference on Communications, 2012: 883 - 888.
- [16] Ikeda M, Honda T, Barolli L. Performance of optimized link state routing protocol for video streaming application in vehicular ad-hoc networks cloud computing [J]. Concurrency Computation: Practice and Experience, 2015, 27(8): 2054 - 2063.