



基于流量工程的 LEO 巨型星座主动容错方法

王少清¹, 孙富春¹, 赵有健^{1,2*}

1. 清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084

2. 鹏城实验室, 深圳 518000

* 通信作者. E-mail: zhaoyoujian@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2020-10-16; 修回日期: 2020-12-26; 接受日期: 2021-03-03; 网络出版日期: 2021-11-15

摘要 LEO 巨型星座因其广覆盖、高通量及低延时的通信潜力而受到越来越多的关注. 然而由于所处空间环境复杂及自身特点等原因, LEO 巨型星座容错问题亟待研究. 为此, 本文关注如下问题: 如何保证卫星失效后, 网络流量依然无拥塞正常转发? 本文提出了基于流量工程的主动容错方法 SN-FFC, 主要思想是通过合理的链路冗余, 使得对于至多 k (k 为可调参数) 个卫星失效, 网络流量依然能无拥塞正常转发. SN-FFC 首先设计基于流量工程的容错建模方法, 随后针对模型计算复杂度高的问题, 提出基于对偶理论的算法, 使得复杂度从 $O(C_n^k)$ 降低到 $O(n)$. 基于 Starlink 第一阶段星座模型的仿真实验表明 SN-FFC 相较现有方案, 能实现故障下的无拥塞转发, 并且计算时间和吞吐量开销较低.

关键词 LEO 巨型星座, 容错, 流量工程, 对偶理论, 线性规划

1 引言

LEO 巨型星座卫星网络 (LEO mega-constellation satellite network, 以下简称 LEO 巨型星座) 是指由部署在低轨道 (low Earth orbit, LEO) 上的卫星组成的网络系统, 特点是卫星数量多 (成百上千, 甚至上万), 一般具有星间链路 (inter satellite link, ISL), 及一般具有星载处理能力 (即具备路由功能) 等^[1]. 近年来, LEO 巨型星座受到了来自工业界、学术界和政府机构的越来越多的关注, 原因在于其能提供广覆盖、高通量及低延时的通信能力^[2~4]. 目前规划在建的 LEO 巨型星座有数十个, 典型的有国外 SpaceX 旗下的 Starlink¹⁾²⁾, OneWeb³⁾ 及 Kuiper⁴⁾, 国内的中国航天科技集团有限公司的鸿雁、中国航天科工集团有限公司的虹云等.

1) SpaceX FCC filing. SpaceX V-band non-geostationary orbit satellite system, 2017.

2) SpaceX FCC filing update. SpaceX non-geostationary orbit satellite system, 2018.

3) OneWeb. How OneWeb is changing global communications, 2018.

4) FCC Authorizes Kuiper Satellite Constellation. <https://www.fcc.gov/document/fcc-authorizes-kuiper-satellite-constellation>. 2020.

引用格式: 王少清, 孙富春, 赵有健, 等. 基于流量工程的 LEO 巨型星座主动容错方法. 中国科学: 信息科学, 2021, 51: 1840–1852, doi: 10.1360/SSI-2020-0328

Wang S Q, Sun F C, Zhao Y J, et al. A proactive failure tolerance method for LEO mega-constellation based on traffic engineering (in Chinese). Sci Sin Inform, 2021, 51: 1840–1852, doi: 10.1360/SSI-2020-0328

尽管前景看好,处于外太空的LEO巨型星座面临的生存环境其实是复杂严峻的.主要有两方面的影响因素:一是自然环境,如太阳活动、宇宙射线及空间碎片等;二是人为因素,如设计、操作失误及空间战争等.生存环境的不确定性导致卫星失效难以预测,修复则更加困难.与此同时,LEO巨型星座卫星数量多带来的系统失效概率增大及路由计算复杂等挑战,也进一步加剧了卫星失效的后果.不同于地面网络,卫星失效对网络的影响更加深远,如由于检测和修复困难,失效卫星的故障状态可能持续较长的时间等.因此,研究LEO巨型星座的容错方法,具有重要意义.

现有针对卫星网络的容错研究,归纳起来有4个角度.(1)路由角度,例如Lu等^[5]改进了传统静态2维mesh网络容错路由策略,应用于LEO卫星网络,提出了自适应容错路由算法和路由扩散方法,分别解决了故障块外部和内部的路由问题.(2)可生存性分析角度,例如Nie等^[6]基于排队论生灭模型研究了资源约束下低轨卫星网络的通信性能,并构造网络效用函数用于评估4种不同攻击情况(自然失效、随机攻击、故意攻击和饱和攻击模式)下低轨卫星网络的生存性.(3)星载设备角度,Jung等^[7]提出了仅利用系统配置资源信息预测星载处理器(on-board processor, OBP)系统故障率的数学模型,分析了OBP可靠性与单一事件及OBP屏蔽厚度(shield thickness)的关系.(4)应用角度,Fan等^[8]基于北斗系统,分析了4种故障模式:与卫星服役期有关的长期故障,与卫星操纵有关的维修故障,与可修复的随机异常有关的短期故障以及对应于以上3种故障的等效故障组合,并根据故障分类以及2015~2016年的精确星历表和广播星历表,检测获得每种故障类型的平均故障间隔时间(mean time between failure, MTBF)和平均维修时间(mean time to repair, MTTR).现有的4个角度的容错研究存在的问题是没有具体考虑遇到故障时,网络承载流量的变化情况.不同于现有容错研究,本文从流量工程(traffic engineering, TE)的角度出发,针对LEO巨型星座提出主动容错方法.具体而言,本文致力于解决这样的问题:如何保证卫星失效后,网络流量依然无拥塞正常转发.

本文基本假设. 本文研究假设LEO巨型星座存在星间链路,卫星节点具备路由能力.研究基于网络视角看待卫星失效,即卫星失效存在两种可能:(1)整星节点失效,对应交换机故障;(2)卫星转发器失效,对应链路故障.此外,由于重点关注的是容错问题,本文假设LEO巨型星座的动态拓扑控制及快速切换问题均可利用现有的虚拟拓扑策略等^[9~11]事先解决.

具体方法. 本文提出了基于TE的LEO巨型星座主动容错方法SN-FFC. SN-FFC的主要思想是通过合理的链路冗余,使得对于至多 k (k 为可调参数)个卫星失效,网络流量依然能无拥塞正常转发.之所以说SN-FFC是一种主动容错方法,是因为相对于被动容错方法(指检测到卫星失效后,再通过重路由计算、更新转发规则等一系列动作来应对故障,如文献[5]),SN-FFC无须经历耗时耗资源的重路由计算(这点对于LEO巨型星座至关重要),而只需调整链路权重(往往较快).因此,SN-FFC反应速度快,受故障影响时间短.

具体而言,SN-FFC首先针对LEO巨型星座网络,利用线性规划,设计基于TE的容错建模方法.该模型以最小化最大链路利用率为目标,将保证至多 k 个故障组合下无拥塞转发加入约束条件中.然而,该初始模型会因LEO巨型星座卫星数量多导致计算复杂度爆炸,针对该挑战,SN-FFC随后基于有界 M 和^[12]及对偶理论^[13],提出了降低计算复杂度的方法,使得约束条件数从 $O(C_n^k)$ 降低到 $O(n)$.为了评估SN-FFC的有效性,基于Starlink第一阶段星座模型进行仿真实验.实验评估TE计算时间、吞吐量开销及拥塞和预期链路使用率分布等3个指标,结果表明,与现有方案对比,SN-FFC(1)能在故障后实现流量无拥塞转发(与此同时,现有方案约有16%的链路超出自身容量);(2)相较于LEO巨型星座几十分钟的可用窗口,TE计算时间低;(3)在两倍流量需求场景下,吞吐量开销在20%以下.

本文贡献. 总结而言,本文有如下几方面的贡献.

- 提出LEO巨型星座网络故障(节点和链路失效)容错模型.

表 1 Starlink, OneWeb 及 Kuiper 的轨道参数
Table 1 Orbital parameters for Starlink, OneWeb, and Kuiper

System	Altitude (km)	Inclination	#plane	#sat per plane
Starlink	550	53°	24	66
	1110	53.8°	32	50
	1130	74°	8	50
	1275	81°	5	75
	1325	70°	6	75
OneWeb	1200	87.9°	18	40
Kuiper	630	51.9°	34	34
	610	42°	36	36
	590	33°	28	28

- 提出解决因 LEO 巨型星座特点导致的模型计算复杂度高的方法, 使得复杂度从 $O(C_n^k)$ 降低到 $O(n)$.
- 使得网络能容错至多 k 个并行故障, 保障故障期间流量无拥塞转发.

2 背景介绍

本节首先简要介绍 LEO 巨型星座的基本概念, 随后简要讨论卫星通信, 以表明 LEO 巨型星座的应用前景, 最后介绍一些现有的卫星网络拓扑控制策略.

2.1 LEO 巨型星座

星座设计是卫星组网的关键部分, 其中最重要的是轨道设计. 描述轨道需要许多参数, 包括高度、倾角、轨道面数、每轨道面卫星数等.

高度 (altitude). 卫星的高度在轨道设计中起着重要的作用, 它决定着卫星的轨道速度和轨道周期. 本文以飞行高度在 2000 公里以下、轨道周期小于 2 小时的 LEO 卫星为研究对象.

倾角 (inclination). 倾角用卫星向北运行时轨道与赤道之间的夹角表示, 例如极地轨道的倾角是 90° . 卫星运行的倾角越低, 在低纬度地区飞行的时间就越长.

轨道面数 (number of orbital planes) 和每轨道面卫星数 (number of satellites per plane). 轨道面数和每轨道面卫星数共同构成星座的大小.

近年来提出了许多新的 LEO 巨型星座. 现在简要介绍其中 3 个系统的轨道参数, 如表 1⁵⁾所示.

2.2 卫星通信

卫星通信市场经历了近 40 年的发展^[14,15]. 目前提出的 LEO 巨型星座的目标是将覆盖范围扩大到偏远地区, 同时提供比地面网络更低的延迟和更高的容量. 根据最近的研究^[2,4], 人口密集的大城市之间的通信, LEO 巨型星座中的链路时延相比地面网络具有竞争优势. 更具体地说, 文献 [2] 得出的

5) 根据文献 [2], SpaceX 向联邦通信委员会 (federal communications commission, FCC) 提出了修改 Starlink 星座结构的请求, 即修改后的第一阶段将包括 72 个轨道平面, 每个平面载有 22 颗卫星, 其他轨道参数保持不变. 2019 年 12 月 19 日, 该申请被批准.

结论是,在距离超过 3000 公里的情况下,以特定方式构建的 LEO 巨型星座可以提供比任何可能的地面光纤网络更低的通信延迟。

与光纤网络相比,LEO 巨型星座潜在的低延迟长途连接主要来自两个方面:第一,LEO 巨型星座能够构建近乎直线最短路径的地面光纤线路;第二,它可以以光在真空中的速度传播,即 $c = 300000$ 公里/秒,而光纤传播速度为 $\frac{2}{3}c$ 。

2.3 卫星网络拓扑控制

卫星网络的一个问题是,一方面由于节点的高速移动性,其网络拓扑是动态的,另一方面卫星是在特定的轨道上运行的,因此卫星网络的动态拓扑又具有可预测性。基于这一特点,卫星网络路由算法一般采用拓扑控制策略来屏蔽拓扑的动态,然后基于静态拓扑序列计算路由。

目前卫星网络拓扑控制主要有 3 种策略,即虚拟拓扑策略^[9~11]、虚拟节点策略^[16]和覆盖区域划分^[17]。本文采用虚拟拓扑策略来屏蔽网络的动态性。虚拟拓扑策略离散化卫星网络的动态拓扑,即将系统周期 T 划分为若干个时隙,即 $[t_0, t_1], [t_1, t_2], \dots, [t_{n-1}, t_n]$ 。注意,链路连接状态只在时刻 t_1, t_2, \dots, t_n 改变,即卫星网络在每个时隙 $[t_{i-1}, t_i]$ 内拓扑保持不变。更重要的是,这种策略更适合 SN-FFC 的 TE 容错模型,因为 TE 计算是间隔固定时间的。

3 研究动机

基于 TE 的方法本质上是对网络进行流量规划。本节通过一个简单的例子,展现容错建模 SN-FFC TE 方法与通常的 TE 方法的区别,以此来指导 SN-FFC 的具体设计。

3.1 通常的 TE (无容错)

根据 TE 网络中普遍采用的方式,本文假设网络流量采用基于隧道 (tunnels) 的转发,即网络流 (flow) 由每个入口-出口交换节点 (卫星) 对之间的流量组成,并且由一个或多个隧道负责传输,每个隧道的具体传输量是由各隧道权重决定的。例如,如图 1 所示,源节点 (卫星) S 通过 3 条隧道 (t_1, t_2, t_3) 连接到目的节点 d 。每个隧道的容量为 3 Gbps。假设准入的流为 9 Gbps,隧道权重 $(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})$,即每个隧道分别传输 3 Gbps。此时,网络并不会产生拥塞。

然而,当某一隧道的链路或交换节点 (卫星) 失效时,该隧道将不可用,产生故障。当这种故障发生时,入口交换机节点 (卫星) 首先检测到隧道故障,之后根据相应的分配权重,重新规划流量到剩余的可用隧道。仍以前述例子为例,如图 2 所示,假设 t_2 失败,那么将使用一个新的隧道权重 $(\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2})$,也就是说,存活下来的两条隧道 (t_1 和 t_3) 现在每条都携带 4.5 Gbps。注意 t_1 和 t_3 的容量分别为 3 Gbps。因此,虽然重新调整后可以继续传输流量,但网络可能会因超出隧道自身容量而产生拥塞。更糟糕的是,这种拥塞将持续下去,直到计算出新的 TE 解决方案并重新配置网络,这可能需要较长时间。

3.2 SN-FFC TE

不同于上述通常的 TE 方法,本文提出的 SN-FFC TE 容错建模方法,对至多 k 个 (k 为可调参数) 并发故障具有鲁棒性。SN-FFC 关键思想是通过合理的链路冗余,控制准入的网络流量及其传输。虽然存在网络吞吐量开销,但 SN-FFC 可以快速应对故障,并且保证故障期间网络流量无拥塞转发。

图 3 给出了 SN-FFC 下的解决方案。现在准入流量 ($s \rightarrow d$) 不再是 9 Gbps,而是 6 Gbps。隧道权重 $(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})$ 保持不变,即每个隧道承载 2 Gbps (不超过其容量)。注意,此时网络对于任何单一故障都

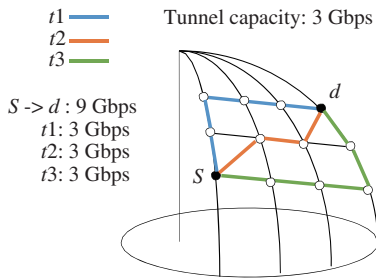


图 1 (网络版彩图) 通常 TE 下的初始流量分布
 Figure 1 (Color online) Initial traffic distribution under ordinary TE

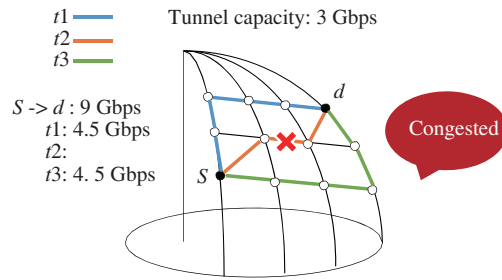


图 2 (网络版彩图) 通常 TE 下, $t2$ 故障后重新调整的流量分布
 Figure 2 (Color online) Rescaled traffic distribution when tunnel $t2$ fails under ordinary TE. At this time, congestion occurs

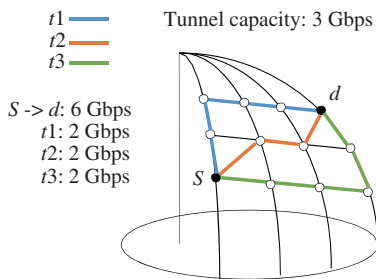


图 3 (网络版彩图) SN-FFC TE 下的初始流量分布
 Figure 3 (Color online) Initial traffic distribution under SN-FFC TE

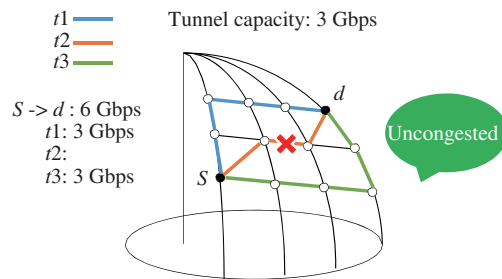


图 4 (网络版彩图) SN-FFC TE 下, $t2$ 故障后重新调整的流量分布
 Figure 4 (Color online) Rescaled traffic distribution when tunnel $t2$ fails under SN-FFC TE. At this time, no congestion occurs

是鲁棒的. 例如, 如图 4 所示, 依旧假设 $t2$ 失效, 使用相同的隧道权重 ($\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}$), 即存活的两条隧道 ($t1$ 和 $t3$) 分别传输 3 Gbps. 不难发现, 此时网络不会产生拥塞. 当 $t1$ 或 $t3$ 失效时, 也可得到类似结果. 简而言之, 此时 SN-FFC 可以主动容错任何单一故障, 即 $k = 1$.

3.3 指导 SN-FFC 设计

总结而言, 针对具体的星座, SN-FFC 就是要计算出如图 3 的流量规划. 本质上, SN-FFC 的鲁棒性源于网络中预留的隧道容量. 网络发生故障后, 这些预留容量可用于吸纳失效隧道上的流量. 为了容错, 有必要权衡故障造成的拥塞风险和网络吞吐量开销. 我们认为这种权衡对于对拥塞敏感的应用程序是值得的, 比如金融业, 特别是如果卫星星座运营商明确地设计为低延迟和避免拥塞.

此外, SN-FFC 应该尽可能少地占用备用容量, 允许接入更多的流量, 换言之, 对于给定的健壮性水平 (k), TE 的优化目标是保证无拥塞转发的同时最小化最大链路利用率. 第 4 节将展示基于线性规划的 SN-FFC 的详细设计.

表 2 用于 SN-FFC TE 建模时的符号
Table 2 Notations used in modeling SN-FFC TE

	Symbol	Description
	G	Network graph with switches V and links E
	c_e	The capacity of link e
TE input	d_i	The bandwidth demand of flow i
	T_i	The set of tunnels of flow i
	$L[t, e]$	1 if tunnel t uses link e and 0 otherwise
TE output	b_i	Bandwidth admitted to flow i
	$a_{i,t}$	Bandwidth allocated for flow i on tunnel t
TE additional	$\omega_{i,t}$	The traffic splitting weight of flow i on tunnel t

4 SN-FFC 的设计

4.1 SN-FFC TE 容错建模

在介绍 SN-FFC TE 容错建模之前, 首先描述通常 TE (无容错) 的建模过程, 由 TE 输入、TE 输出和优化目标 3 部分组成. 然后通过通常在通常 TE (无容错) 设置上添加故障约束建立 SN-FFC TE 容错模型.

4.1.1 通常 TE 的建模 (无容错)

输入. 如同大多数 TE 研究一样, 本文将 LEO 巨型星座网络建模为一个有向图 $G = (V, E)$, 其中 V 表示交换节点 (卫星), E 表示交换节点之间的链路 (星间链路). 每条链路的容量已知, 例如, 以 bps 为单位, 用 c_e 表示, 并且每条链路上的总流量不应该超过它的容量. TE 解决方案每隔固定时间计算一次, 基于此时间间隔估计用户流量需求. 此后在每个时间片内, 实际流量需求由一组流 F 组成, 其中每条流 i ($i \in F$ 中) 是从一个入口到一个出口交换机的流量, 由 d_i 和一个预先计算的隧道集 T_i 表示.

输出. 输出包括两部分: (1) 分配给流 i 的带宽, 记为 b_i ; (2) 每条隧道所承载的流量 t ($t \in T_i$), 记为 $a_{i,t}$.

优化目标. 一般来说 TE 优化目标有网络总流量最大化、最大最小公平性及并发流量最大化等. 然而对于 LEO 巨型星座 (存在卫星数量多、间歇性连接的挑战), 一个适当的选择是最小化最大链路利用率 (maximum link utilization, MLU). MLU 能够提高链路利用率, 同时避免链路过度利用.

至此, 利用表 2 中的关键符号, 通常 TE (无容错) 线性规划 (linear programming, LP) 建模如下:

$$\min \quad \Theta(u) \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \frac{\sum_{i,t} a_{i,t} L[t, e]}{c_e} \leq u, \quad \forall e, \quad (2)$$

$$\sum_t a_{i,t} = b_i, \quad \forall i, \quad (3)$$

$$0 \leq b_i \leq d_i, \quad \forall i, t, \quad (4)$$

$$a_{i,t} \geq 0, \quad \forall i, t, \quad (5)$$

其中, 二值变量 $L[t, e]$ 表示隧道 t 是否经过链路 e . 在式 (1) 中, $\Theta(u)$ 是需要最小化的 u 的函数, u 代表 MLU. 式 (2) 用于计算链路利用率, 即所有链路利用率总和不超过 MLU. 式 (3) 代表流 i 的所有隧道流量之和应等于其准入流量. 式 (4) 表示分配给流 i 的带宽不应超过其需求. 最后, 所有的变量都是非负的. 注意, 这是一个多商品流量变化的问题, 可以用 LP 来解决.

因此, 一旦计算出 TE 解, 则可以导出隧道权重, 即 $\omega_{i,t} = \frac{a_{i,t}}{\sum_t a_{i,t}}$. 然后, TE 控制器可根据权重将流的速率限制器更新为 b_i .

4.1.2 容错建模

上述模型没有考虑网络故障, 即不提供主动的故障容错. SN-FFC 在此基础上增加了对故障的容错建模. 具体来说, 引入了两个指示符 $\lambda_e = 1$ 和 $\varphi_s = 1$, 分别表示链路 e 和交换机 s 失效. (λ, φ) 表示一组故障情况, 其中 $\lambda = [\lambda_e | e \in E]$ 和 $\varphi = [\varphi_s | s \in V]$. 考虑对 k_e 链路故障和 k_s 交换机故障鲁棒的 SN-FFC TE, 相应的故障情况如下:

$$Z_{k_e, k_s} = \left\{ (\lambda, \varphi) \mid \sum_e \lambda_e \leq k_e, \sum_s \varphi_s \leq k_s \right\}.$$

在图 2 中, 故障可能会导致拥塞, 因为当入口交换机重新调节流量时, 它们会将流量从受影响的隧道转移到存活隧道. 令 $T_i^{\lambda, \varphi}$ 表示流的存活隧道. 主动保护意味着流 i 的幸存隧道能够承载受影响的流量, 即

$$\sum_{t \in T_i^{\lambda, \varphi}} a_{i,t} \geq b_i, \quad \forall i \in F, (\lambda, \varphi) \in Z_{k_e, k_s}. \quad (6)$$

注意, 当流 i 的所有隧道均失效时, b_i 应被固定为 0. 接下来证明在这样的 TE 模型下不会超载任何链路, 即能实现无拥塞转发.

注释 1 在故障场景 (λ, φ) 下, 一个满足约束 (2)~(6) 的 SN-FFC TE 解决方案 $(\{a_{i,t}\}, \{b_i\})$ 可保证网络流量在重新调整权重后无拥塞转发.

证明 在故障场景 (λ, φ) 下, 流 i 的存活隧道所承载的流量 $b_{i,t}^{\lambda, \varphi}$ ($t \in T_i^{\lambda, \varphi}$) 为

$$b_{i,t}^{\lambda, \varphi} = b_i \times \frac{a_{i,t}}{\sum_t a_{i,t}} \leq b_i \times \frac{a_{i,t}}{b_i} = a_{i,t}.$$

因此链路 e 上总流量为

$$\sum_{i,t \in T_i^{\lambda, \varphi}} b_{i,t}^{\lambda, \varphi} L[t, e] \leq \sum_{i,t \in T_i} a_{i,t} L[t, e] \leq c_e.$$

至此, SN-FFC 通过在通常 TE (无容错) 中添加容错约束 (6), 使得在 Z_{k_e, k_s} 的故障情况下, 即 k_e 并发链路故障和 k_s 交换机故障的任意组合下, 依然可保证网络流量无拥塞转发.

然而, 对于 LEO 巨型星座, Z_{k_e, k_s} 意味着故障的可能组合非常之大 ($O(C_n^k)$ 个约束条件 ($k = k_e + k_s$)), 直接求解 SN-FFC TE 线性规划变得几乎不可能. 需要设计算法来高效解决上述容错模型.

4.2 高效解决 SN-FFC 容错模型

本小节首先简要描述如何将约束转换为一个“有界 M 和”问题. 在此基础上, 提出了一种新的方法, 可以将原来的 $O(C_n^k)$ 约束压缩为 $O(n)$ 约束.

4.2.1 转换为有界 M 和问题

有界 M 和问题定义如下.

定义1 给定包含 N 个变量的组合, 要求其中任意 M 个变量的总和应大于某一值 B . 令 n^j 是 n 中第 j 小的变量, 那么只要下面约束成立, 就能满足要求:

$$\sum_{j=1}^M n^j \geq B.$$

因此, 如果可以为 N 中最小的 M 个变量找到有效的 (线性) 表达式, 那么所有原始的 $O(C_N^M)$ 约束都可以被一个约束替换. 沿此思路, 可以将 SN-FFC TE 约束转化为有界 M 和问题, 接下来展示这种变换.

转换. 假设流 i 使用 (ρ_i, σ_i) 链路 - 交换机不相交 (link-switch disjoint) 的隧道, 即对于流 i , 最多 ρ_i 隧道利用了同一条链路, 最多 σ_i 隧道利用同一个交换机. 那么对于任何失效情况 $(\lambda, \varphi) \in Z_{k_e, k_s}$, 存活隧道数量应该不小于 $\tau_i = |T_i| - k_e \rho_i - k_s \sigma_i$. 假设 $a_{i,t}^j$ 表示 $\{a_{i,t} | t \in T_i\}$ 中的第 j 小的元素, 则有

$$\sum_{j=1}^{\tau_i} a_{i,t}^j \geq b_i, \quad \forall i. \quad (7)$$

重要的是, 满足式 (7) 即满足式 (6), 因为 $\sum_{j=1}^{\tau_i} a_{i,t}^j$ 是流 i 在任意 Z_{k_e, k_s} 失效场景下的最坏情况.

至此, 通过式 (7), 我们成功地将 SN-FFC TE 约束转化为“有界 M 和”问题. 因此, 下一个问题是如何为最小的 M 个变量找到有效的 (线性) 表达式.

文献 [12] 利用冒泡排序网络将最小的 $|\tau_i|$ 个变量表示为线性约束, 最终得到 $O(kn)$ 个约束. 然而, SN-FFC 设计了最小 $|\tau_i|$ 个变量的更有效的线性表达式, 以进一步减少约束条件数量 (这是必要且有意义的, 特别是考虑到 LEO 巨型星座有限的计算资源).

4.2.2 从 $O(kn)$ 到 $O(n)$

现在展示如何将约束减少到 $O(n)$.

假设集合 $S = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ 包含 N 个变量. 令函数 $f(S)$

$$f(S) = f(s_1, s_2, \dots, s_n) = \sum_{i=1}^M s^i$$

表示 S 中最小 M 个元素的和, 其中 s^i 表示 S 中第 i 小的变量. 给定一组固定的 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, $f(S)$ 为以下 LP 的最优解:

$$\min \sum_{j=1}^n s_j \times t_j \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^n t_j = M, \quad (9)$$

$$t_j \in [0, 1], \quad \forall j, \quad (10)$$

其中 $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 是变量, M 是给定的参数. 例如, $S = \{1, 2, 3, 4\}$ 和 $M = 2$, 则有 $f(S) = 1 + 2 = 3$, LP 的最优解为 3, 其中 $T = \{1, 1, 0, 0\}$.

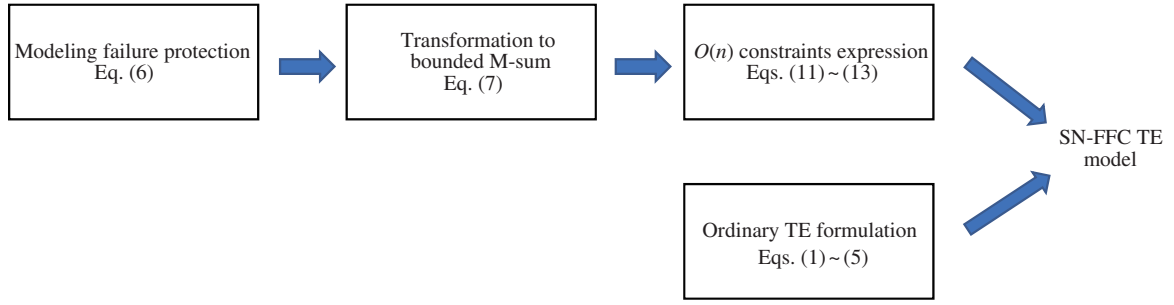


图 5 (网络版彩图) SN-FFC TE 的建模过程

Figure 5 (Color online) Overall process of the SN-FFC TE modeling

上述 LP 的对偶式为

$$\begin{aligned} \max \quad & Mp + \sum_{j=1}^n q_j \\ \text{s.t.} \quad & p + q_j \geq s_j, \quad \forall j, \\ & q_j \geq 0, \quad \forall j. \end{aligned}$$

假设 $f(S)$ 是原 LP 问题的最优解, 根据强对偶理论, 它也是对偶问题的最优解. 因此, 约束 $f(S) \geq B$ (有界 M 和问题) 等价于以下线性约束集:

$$Mp + \sum_{j=1}^n q_j \geq B \quad (11)$$

$$\text{s.t.} \quad p + q_j \geq s_j, \forall j, \quad (12)$$

$$q_j \geq 0, \quad \forall j. \quad (13)$$

这是因为 $Mp + \sum_{j=1}^n q_j \geq B$ 足以保证 $\max\{Mp + \sum_{j=1}^n q_j | \forall p, q_j\} \geq B$. 更重要的是, 此时只有 $2n$ 个约束, 而不是使用排序网络的 $O(Mn)$. 至此, 我们将约束减少到 $O(n)$.

说明. 从大 O 记法角度看, $O(kn)$ 与 $O(n)$ 事实上是等价的. 但需要说明的是, 对于 LEO 卫星网络, 卫星数量多, 故障发生概率增大, 且星上计算资源有限, 从 $O(kn)$ 进一步压缩到 $O(n)$, 本质上是性能提高 k 倍. 后续仿真实验将进一步展示定量分析结果.

图 5 展示了 SN-FFC TE 建模的整个过程.

5 实验评估

5.1 实验配置

LEO 巨型星座. 本文使用 STK 仿真 Starlink (见表 1) 的第一阶段部署, 即在 24 条轨道上运行 1584 颗卫星 ($53^\circ, 550 \text{ km}$), 每条轨道有卫星 66 颗. 与文献 [2] 一样, 本文合理地假设每颗卫星有 5 条星间链路, 即 p 轨道上的卫星 n 将连接: (1) p 轨道上的卫星 $n-1$; (2) p 轨道上的卫星 $n+1$; (3) $p+1$ 轨道上的卫星 n ; (4) $p-1$ 轨道上的卫星 n ; (5) 最后一条激光链路用于网间连接 (inter-mesh).

此外假设在全球有 4 个地面站用于收发流量, 分别位于北京 (40°N, 116°E)、旧金山 (37°N, 122°W)、伦敦 (51°N, 0°) 和新加坡 (1°N, 103°E).

流量与故障. 鉴于目前尚未有真正投入使用的 LEO 巨型星座, 真实的用户流量无法获取. 本文采用与文献 [1] 一样的方法, 利用上述地面站的真实人口密度来估计流量情况. 具体而言, 本文基于 Gridded Population of the World v4 数据集⁶⁾, 以当地 5% 的互联网流量为该星座承载量. 地面站进一步生成流量需求 (聚合为入口 - 出口流), 故障以随机概率注入网络 (为了模拟卫星网络故障的随机性). 流的隧道是预先计算好的. TE 控制器位于北京, TE 间隔 5 min.

TE 方法. 本文将 SN-FFC 与 PTCE^[18] 进行比较. PTCE 方法以卫星网络中的正常流量为优化对象, 为不可预测的流量峰值增加一个开销闭包. 这样既可以在卫星网络流量正常时达到接近最优化的流量规划方案, 又能在不可预测的流量峰值到达时不至于使网络性能降低过快. 然而 PTCE 并未考虑故障应对, 也即其不提供任何的主动保护. 当发生故障时, 只能等下一次 TE 计算调整, 期间网络性能将受损. 换言之, PTCE 可视为与 SN-FFC 对应的通常 TE 方法 (无容错). 本文使用 Solver Foundation with CPLEX 插件作为 LP 求解器.

指标. 本文定义了 3 个指标来评估 SN-FFC 的性能.

- 拥塞及预期链路使用率分布. 在给定的保护级别下 SN-FFC 和 PTCE 的拥塞分布和预期的链路利用率, 即如果数据包没有由于容量限制而丢失, 每条幸存链路将承载多少流量.

- TE 计算时间. 给出了不同保护等级的 SN-FFC TE.

- 吞吐量开销. 将 SN-FFC 的网络吞吐量除以连续 TE 内的网络吞吐量, 得到一个比值, 1 减去该比值即为 SN-FFC 的开销.

5.2 实验结果

本文首先利用拥塞分布及预期链路使用率这一指标来评估 SN-FFC 是否相较于现有方案, 能实现在故障情况下网络流量的无拥塞转发.

拥塞及预期链路使用率分布. SN-FFC 的优化目标是最小化 MLU 和避免故障下的拥塞. 仿真实验评估了 SN-FFC 和 PTCE 的拥塞和预期链路利用率的分布, 即, 如果数据包没有由于容量限制而丢失, 每个幸存链路将承载多少流量. 实验使用 (3, 1) (表示网络对至多 3 个链路故障和 1 个交换机 (卫星) 故障的任意组合具有鲁棒性) 作为保护级别. 图 6(a) 和 (b) 给出了对应的互补累积分布函数 (complementary cumulative distribution function, CCDF). 可以观察到, PTCE 有 16% 的存活链路承载的流量超过了自身容量 (图 6(a) 中的实心小圆圈), 然而与此同时, SN-FFC 在故障情况下是无拥塞的. 图 6(b) 进一步展示了细节, 例如, PTCE 的某些链路甚至超载超过 7 倍. 因此可得出结论, SN-FFC 确实是一种主动容错且无拥塞 (最多 k 并发故障) 的方法.

在证明了 SN-FFC 确实能主动容错后, 本文利用 TE 计算时间和吞吐量开销两个指标, 针对 SN-FFC 的性能进行实验评估.

TE 计算时间. 本文在 Intel Core i5-4300U 2.5 GHz CPU (2 核) 和 8 GB RAM 的普通 PC 上对计算时间进行基准测试. 除了不同的保护级别外, 同时也展示了使用 3 种不同方法得到的计算时间, 即直接计算、基于冒泡排序网络^[12] 及基于对偶理论. 表 3 列出了结果. (k_e, k_s) 表示不同的保护级别, ∞ 表示即使在 12 小时后也没有计算结果输出.

结果表明, 用原始约束公式 (6) 直接计算 SN-FFC TE 是不现实的. 这就证实了压缩约束的必要性. 在任何保护水平下, 基于对偶理论提出的方法比其他两种方法所需的计算时间更少. 这是因为该

6) Gridded population of the world (gpw), v4. <https://sedac.ciesin.columbia.edu/data/collection/gpw-v4>.

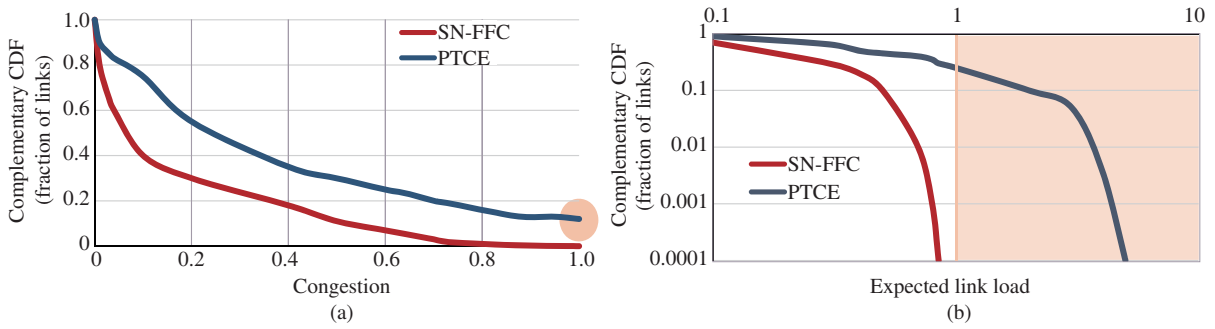


图 6 (网络版彩图) 拥塞及预期链路使用率分布图. (a) 链路拥塞 CCDF, $P(X \geq x) = y$; (b) 预期链路利用率 CCDF

Figure 6 (Color online) Distribution of congestion and expected link utilizations. (a) CCDF of link congestions, $P(X \geq x) = y$; (b) CCDF of expected link loads

表 3 不同防护等级和不同计算方法下的 SN-FFC TE 的计算时间 (s)

Table 3 TE computation time for SN-FFC TE with different protection levels and methods

	(2, 0)	(3, 0)	(2, 1)	(3, 1)
Directly computing SN-FFC TE	∞	∞	∞	∞
Based on bubble sorting network	1.3	4.9	10.9	15.2
Based on duality theory	0.2	1.1	2.4	3.1

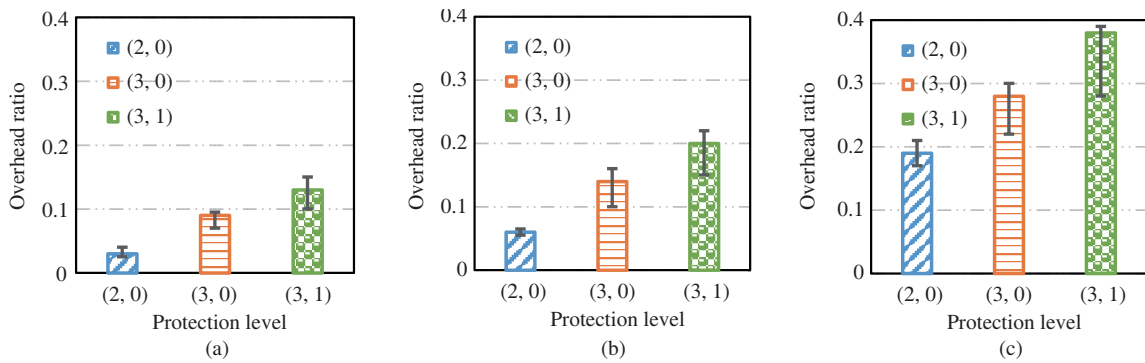


图 7 (网络版彩图) 不同流量需求及不同保护级别下的 SN-FFC 吞吐量开销情况. (a) 正常流量需求; (b) 2 倍流量需求; (c) 3 倍流量需求

Figure 7 (Color online) The overhead of SN-FFC with different protection levels under different traffic demands. (a) Normal traffic demand; (b) $2\times$ traffic demand; (c) $3\times$ traffic demand

方法在求解 LP 时需要较少的约束. 另外保护级别越高, 计算时间就越长. 然而, 即使是在高保护级别, 例如 (3, 1), 更新巨型星座也只需要几秒钟. 这相较于几十分钟的接触窗口是可接受的. 此外虽然可能会发生故障, 但卫星系统一般采用高可靠的软硬件设计, 故障率相对较低. 因此本文建议在 LEO 巨型星座中使用 $(k_e, k_s) = (3, 1)$ 的保护级别.

吞吐量开销. 由于 SN-FFC 以控制进入网络的流量为代价提供容错保护, 因此存在性能开销. 图 7 显示了不同流量需求及不同保护级别下的结果, 开销 = $1 - \text{SN-FFC 的吞吐量} / \text{PTCE 的吞吐量}$, 条形图代表第 90 百分位值, 误差线代表第 50 和第 99 百分位值. 当业务量正常时, 如图 7(a) 所示, SN-FFC

的开销较小, 即在所有保护级别的 90 百分位, 开销小于 13%. 另一方面, 从图 7(a)~(c) 可以看出, 开销通常随着流量规模的增加而增加. 图 7(b) 和 (c) 可视为 LEO 巨型星座的压力测试. 可以看到, 即使流量是原始设置的 2 倍, 图 7(b) 中展示的吞吐量开销也不超过 20%. 简而言之, 可以用不同的保护级别来平衡开销, 即 SN-FFC 为网络管理员提供了控制选项.

6 总结

本文研究 LEO 巨型星座的容错问题, 即如何保证卫星失效后, 网络流量依然能无拥塞转发. 对此, 本文提出了一种基于流量工程的主动容错方法 SN-FFC. SN-FFC 首先建立了 LEO 巨型星座的容错模型, 随后基于对偶理论解决了因 LEO 巨型星座自身特点导致的模型计算复杂度高的问题. SN-FFC 可保证至多 k 个并行故障的组合下, 网络流量依然正常转发. 在最新的巨型星座 (Starlink 第一阶段) 上的仿真结果表明, SN-FFC 具有可接受的计算时间和吞吐量开销. 本文研究将有助于未来 LEO 巨型星座的网络管理.

参考文献

- 1 Portillo I D, Cameron B G, Crawley E F. A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband. *Acta Astronaut*, 2019, 159: 123–135
- 2 Handley M. Delay is not an option: low latency routing in space. In: *Proceedings of the 17th ACM Workshop on Hot Topics in Networks*, 2018. 85–91
- 3 Handley M. Using ground relays for low-latency wide-area routing in megaconstellations. In: *Proceedings of the 18th ACM Workshop on Hot Topics in Networks*, 2019. 125–132
- 4 Bhattacharjee D, Singla A. Network topology design at 27000 km/hour. In: *Proceedings of the 15th International Conference on Emerging Networking Experiments And Technologies*, 2019. 341–354
- 5 Lu Y, Zhao Y, Sun F, et al. Dynamic fault-tolerant routing based on FSA for LEO satellite networks. *IEEE Trans Comput*, 2013, 62: 1945–1958
- 6 Nie Y, Fang Z, Gao S. Survivability analysis of LEO satellite networks based on network utility. *IEEE Access*, 2019, 7: 123182–123194
- 7 Jung S, Choi J P. Predicting system failure rates of SRAM-based FPGA on-board processors in space radiation environments. *Reliability Eng Syst Saf*, 2019, 183: 374–386
- 8 Fan L H, Tu R, Zheng Z J, et al. Evaluation of signal-in-space continuity and availability for BeiDou satellite considering failures. *J Navigation*, 2020, 73: 312–323
- 9 Chang H S, Kim B W, Lee C G, et al. FSA-based link assignment and routing in low-earth orbit satellite networks. *IEEE Trans Veh Technol*, 1998, 47: 1037–1048
- 10 Gounder V V, Prakash R, Abu-Amara H. Routing in LEO-based satellite networks. In: *Proceedings of IEEE Emerging Technologies Symposium on Wireless Communications and Systems*, 1999. 1–6
- 11 Werner M, Delucchi C, Vogel H J, et al. ATM-based routing in LEO/MEO satellite networks with intersatellite links. *IEEE J Sel Areas Commun*, 1997, 15: 69–82
- 12 Liu H H, Kandula S, Mahajan R, et al. Traffic engineering with forward fault correction. In: *Proceedings of the ACM Special Interest Group on Data Communication*, 2014. 527–538
- 13 Altman A, Kleiman S. *Introduction to Grothendieck Duality Theory*. Berlin: Springer, 1970
- 14 Liu H Y, Sun F C, Wang S Q. Virtual strategy QoS routing in satellite networks. *Sci China Inf Sci*, 2016, 59: 092201
- 15 Li D R, Shen X, Chen N C, et al. Space-based information service in Internet Plus Era. *Sci China Inf Sci*, 2017, 60: 102308
- 16 Ekici E, Akyildiz I F, Bender M D. A distributed routing algorithm for datagram traffic in LEO satellite networks. *IEEE/ACM Trans Networking*, 2001, 9: 137–147

- 17 Hashimoto Y, Sarikaya B. Design of IP-based routing in a LEO satellite network. In: Proceedings of the 3rd International Workshop on Satellite-Based Information Services, 1998. 81–88
- 18 Long F. Satellite Network Robust QoS-aware Routing. Berlin: Springer, 2014

A proactive failure tolerance method for LEO mega-constellation based on traffic engineering

Shaoqing WANG¹, Fuchun SUN¹ & Youjian ZHAO^{1,2*}

1. Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518000, China

* Corresponding author. E-mail: zhaoyoujian@tsinghua.edu.cn

Abstract The LEO mega-constellation has attracted increasing attention due to its potential for wide coverage, high throughput and low latency communication. However, given the complex space environment and its own characteristics, LEO mega-constellation needs to study the fault tolerance problem. Therefore, this paper focuses on how to ensure that the network traffic is still forwarding without congestion after the failure of satellites. Specifically, a proactive fault-tolerant method called SN-FFC based on traffic engineering is proposed. The main idea is to make the network uncongested if the concurrent failures is up to k (k is a parameter) through reasonable link redundancy. SN-FFC first designs a fault-tolerant model based on traffic engineering, then proposes an algorithm based on dual theory to solve the high computational complexity problem of the model, which reduces the complexity from $O(C_n^k)$ to $O(n)$. The simulation experiments based on the Starlink constellation model (first stage) show that SN-FFC can realize uncongested forwarding under failures compared with the existing method, and can achieve low computing time and throughput cost.

Keywords LEO mega-constellation, fault tolerance, traffic engineering, duality theory, linear programming



Shaoqing WANG received his B.S. degree from the Department of Computer Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, in 2013. He is currently pursuing his Ph.D. degree in computer science with Tsinghua University, Beijing, China. His current research interests include computer networks.



Fuchun SUN received his Ph.D. degree in computer science from Tsinghua University in 1997. He is a full professor with the Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, China. His current research interest includes robotic perception and cognition.



Youjian ZHAO received his B.S. degree from Tsinghua University in 1991, M.S. degree from Shenyang Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, in 1995, and Ph.D. degree in computer science from Northeastern University, China, in 1999. He is currently a professor with the Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University.

His research mainly focuses on high-speed Internet architecture, switching and routing, and high-speed network equipments.