

5G-卫星集成网络中控制器与网关可靠部署策略

陈金涛, 梁俊, 刘波, 谢宝华

(空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077)

摘要 基于SDN架构的5G-卫星集成网络将是提供全球覆盖和宽带通信最有潜力的方案之一。在该集成网络中,控制器和网关的有效部署是提高网络可靠性、降低时延的关键。虽然控制器和网关部署可以独立求解,但控制器与网关部署的紧耦合特性使得联合部署更有现实意义。分析并建模了5G-卫星集成网络中SDN控制器与卫星网关联合部署的问题,提出了一种基于最大化网络可靠性的控制器与网关联合部署策略,设计了基于模拟退火与粒子群的混合算法。仿真结果表明:与枚举算法、双重模拟退火算法(SASA)等现有算法相比,文中提出的算法具有更低的时间复杂性,并将进一步降低了平均控制时延,提高了网络健壮性。

关键词 软件定义网络(SDN);集成网络;5G;控制器部署;网关部署

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2021.03.011

中图分类号 TP393 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2021)03-0068-06

A Reliable Deployment Strategy of Controllers and Gateways in 5G-Satellite Integrated Network

CHEN Jintao, LIANG Jun, LIU Bo, XIE Baohua

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract The 5G-satellite integrated network based on the SDN architecture will be one of the most promising solutions of global coverage and broadband communications. In this integrated network, the key of effective deployment of controllers and gateways lies in improving network reliability and reducing time delay. Although the deployment of the controller and the gateway can be solved independently, the tightly coupled nature of the deployment of the controller and the gateway makes the joint deployment more realistic. This paper analyzes and models the joint deployment of SDN controllers and satellite gateways in 5G-satellite integrated networks, proposes a joint deployment strategy of controllers and gateways based on maximizing network reliability, and designs a mixed algorithm based on simulated annealing and particle swarm Hybrid. The simulation results show that compared with the existing algorithms such as enumeration algorithm and dual simulated annealing algorithm (SASA), the algorithm proposed in this paper has lower time complexity, and further reduces the average control delay and improves the robustness of the network.

Key words software-defined network (SDN); integrated network; 5G; controller deployment; gateway deployment

收稿日期: 2021-01-21

作者简介: 陈金涛(1997—),男,江苏盐城人,硕士生,研究方向:空天信息网络。E-mail:751163179@qq.com

引用格式: 陈金涛, 梁俊, 刘波, 等. 5G-卫星集成网络中控制器与网关可靠部署策略[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2021, 22(3): 68-73. CHEN Jintao, LIANG Jun, LIU Bo, et al. A Reliable Deployment Strategy of Controllers and Gateways in 5G-Satellite Integrated Network[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(3): 68-73.

卫星通信^[1]是实现真正全球化通信的关键支撑,是未来通信网络体系架构中必不可少的互连部分。包括 Sat5G、ITU、3GPP 等标准化组织已经考虑将卫星通信融合在 5G 环境中^[2]。从而可以有效解决农村和偏远地区的网络接入、地面基础设施损毁下网络的临时搭建^[3]。融合卫星的 5G 网络将意味着更高的网络可用性和可靠性,特别是,具有高吞吐量的卫星链路可有效地卸载地面流量,以减轻网络中的拥塞同时提高地面网络的伸缩性和安全性^[4]。

总之,卫星与地面 5G 网络的融合将充分发挥各自优势,并提供一种新的网络架构以满足未来无线网络中的各种应用。但是,由于集成网络固有的异构性,因此要管理具有大量物理设备的网络同时实现网络性能最佳是目前面临的重大挑战。正如软件定义网络 SDN^[5]所带来的优势,SDN 可以通过解耦控制平面和数据平面,利用全局视角调配网络资源、制定有效的资源分配策略^[6],从而高效地管理整个集成网络。此外,应用 SDN 可以简化硬件操作,同时可以大大提高架构的灵活性,系统升级成本也将降低。

在这种基于 SDN 的集成网络中,控制平面起着承上启下的核心作用,控制器位置的部署将影响集成网络对网络事件的响应^[7],不同于传统地面网络,从地面节点到卫星的大多数数据流量都必须通过卫星网关,因此,本文所提的 5G-卫星集成网络体系架构中的主要挑战之一是卫星网关和控制器的联合部署问题,这是一个多目标放置问题(multi-target deployment),显著区别于单一控制器或网关部署问题。文献[8]首次证明了该问题是一个 NP-hard 新问题,并提出了一种基于模拟退火和聚类的混合算法,并与枚举算法相比,该算法能够以较短的运行时间获得较优的解决方案。文献[9]则提出了双重模拟退火算法(SASA)和基于遗传算法(GAJ)的 2 种联合部署方法,其中 SASA 在运行时间上折中考虑,GAJ 在运行时间和解的质量上均有提高。本文提出了一种基于模拟退火与粒子群的混合算法(SA-PSO),以进一步降低算法复杂度同时实现更高的可靠性。

1 控制器与网关联合部署问题建模

1.1 模型建立

在本文中,考虑如图 1 所示的 5G-卫星集成网络体系结构。该体系结构由两部分组成,即卫星网络和地面网络。卫星网络主要由实现全球无缝覆盖

的对地静止轨道(GEO)卫星和地面卫星网关组成,卫星间通过星间链路相互通信。地面网络主要由地面 5G 通信系统组成,包括 gNB(gNodeB, 5G NodeB)、5G 核心网络、SDN 交换机组成。用户终端设备产生的流量可以通过 gNB(即 gNodeB, 5G NodeB)和 RN 连接到 5G 网络。交换机和卫星网关之间主要通过光纤建立连接,地面网络主要通过卫星网关与卫星进行通信,SDN 控制器部署在地面网络的物理节点上,为集成网络提供集中控制和管理功能,为了简化分析,在该网络模型中,不考虑卫星网络中卫星间链路(ISL)的动态性。

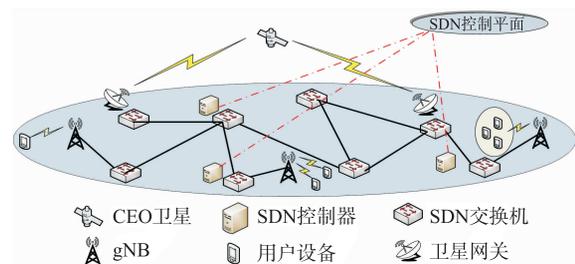


图 1 基于 SDN 的 5G-卫星集成网络架构示意图

1.2 问题描述

基于 SDN 的 5G-卫星集成网络可以用无向图 $G=(V,E)$ 表示,其中, $V=V_g \cup V_s$, V_g 是地面交换机、卫星网关等物理节点集, V_s 是集成网络中卫星节点的集合, E 是各类节点之间的物理链路集合,其链路的权重表示传播延迟。

在基于 SDN 的 5G-卫星集成网络架构中,卫星链路可有效地卸载地面流量^[10],因此,首先应考虑的是地面交换机与卫星的流量传输过程。在该过程中地面交换机与卫星之间的时延是影响集成网络性能的关键因素。因此,每个地面交换机都应在最短的时间内与卫星通信。而时延主要以传播时延为主,传播延迟取决于交换机和卫星之间的距离,由于对地静止轨道(GEO)卫星到地面的距离是固定的(35 786 km),因此交换机与卫星网关之间的延时特别重要。

将地面交换机 u 经卫星网关 w 到卫星 s 的传播时延定义为 L_{us}^w ,则集成网络中所有的地面交换机 u 到卫星 s 的平均时延 L_{ave} 为:

$$L_{ave} = \frac{1}{n} \sum_{u \in V_g} L_{us}^w = \frac{1}{n} \sum_{u \in V_g} (L_{uw} + L_{ws}) \quad (1)$$

式中: L_{ws} 为网关与卫星通信传播时延,为固定值。此外,通信的可靠性是集成网络性能的必要保证,集成网络中路径类型主要包括地面通信和星地通信。在这里,令 $P_u, P_e, P_{e_{sw}}$ 分别表示地面交换机节点 u , 地面链路 e 和卫星链路 e_{sw} 的故障概率。因此从交换机 u 到控制器节点 c 的路径的可靠性计算

如下^[8]:

$$R_{uc} = \prod_{e \in E_{u \rightarrow c}} (1 - P_e) \prod_{v \in V_{u \rightarrow c}} (1 - P_v) \quad (2)$$

式中: $V_{u \rightarrow c}$ 表示地面通信中从交换机 u 到控制器 c 的完整路径上除该交换机节点的其他节点集合; $E_{u \rightarrow c}$ 表示地面通信中从交换机 u 到控制器 c 的完整路径上的链路集合。同理,则从卫星节点 s 经过卫星网关 w 到控制器 c 的路径可靠性计算如下:

$$R_{sc}^w = (1 - P_{e_{sw}}) \prod_{e \in E_{s \rightarrow c}} (1 - P_e) \prod_{v \in V_{s \rightarrow c}} (1 - P_v) \quad (3)$$

式中: $V_{s \rightarrow c}$ 表示卫星节点 s 通过卫星网关 w 到达控制器 c 的完整链路上除卫星节点外的其他节点集合; $E_{s \rightarrow c}$ 表示卫星节点 s 通过卫星网关 w 到达控制器 c 的完整链路上的链路集合。因此基于SDN的5G-卫星集成网络的平均可靠性可定义为:

$$\max \frac{1}{n+k} \left(\sum_{u \in V_g} R_{uc} + \sum_w R_{sc}^w \right) \quad (4)$$

1.3 控制器与网关节联合部署问题

根据以上分析,集成网络中控制器与网关节联合部署问题可以定义如下:给定集成网络中需部署的地面交换机节点 V_g ,对地静止轨道(GEO)卫星节点 V_s , k 个卫星网关以及 m 个控制器,目的是确定最佳控制器位置 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\} \subseteq V_g$ 与最佳卫星网关位置 $W = \{g_1, g_2, \dots, g_k\} \subseteq V_g$ 在满足时延约束限制下,最大化基于SDN的5G-卫星集成网络中的平均可靠性,即:

$$\max \frac{1}{n+k} \left(\sum_{u \in V_g} R_{uc} + \sum_w R_{sc}^w \right) \quad (5)$$

$$\text{s. t.} \quad \frac{1}{n} \sum_{u \in V_g} L_{ug} \leq L_{\max} \quad (6)$$

式中: $c \in C, w \in W, n$ 和 k 分别表示 V_g 中的节点和 W 中的卫星网关数; L_{\max} 是最大等待时间约束,即地面网络中可以接受的最大平均等待时间。

2 最大化可靠性部署算法

2.1 基于枚举算法的最大化可靠性部署方法

为实现5G-卫星集成网络中控制器和卫星网关节联合部署问题,最直接的方法就是枚举出所有部署的可能性,计算其目标函数的值,并从中选出满足时延约束且具有最大可靠性的放置方案。该方案简单直接,但求解速度极慢^[11],因此,在大规模网络中枚举算法(optimal enumeration algorithm, OEA)并不适用甚至无法求解。

2.2 基于模拟退火和粒子群的混合算法(SABPSO)

粒子群优化算法^[12]是一种全局优化的智能算

法,其寻优是依靠粒子间的协作和共享,并记录自身找到的最佳历史位置以及种群所找到的最佳历史位置,在优化过程中目的性较强,粒子群算法收敛速度快,且易与其他优化算法相结合,克服易陷入局部最优的缺点。所以本文选用粒子群算法结合模拟退火算法对卫星网关与控制器组合优化问题进行求解。

定义有效的粒子编码形式是SABPSO混合算法应用的关键步骤。每一个粒子都应对应一种卫星网关和控制器部署的解决方案。因此种群中粒子的长度为 $k+m$ 。其中 k 表示卫星网关部署位置向量长度,即 $W = \{g_1, g_2, \dots, g_k\} \subseteq V_g$, m 表示控制器部署位置向量长度,即 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\} \subseteq V_g$ 。粒子的每一维值都在 $[1, n]$ 的范围内,则每个粒子可以表示 $U = [W, C]$ 。以 $n=12, k=2, m=3$ 为例,即集成网络中共有12个可部署网络设备的节点,目标是在12个节点的任何位置部署2个卫星网关和3个控制器均实现在延时约束下的可靠性最大化。粒子编码映射如图2所示。每个粒子中的数代表卫星网关和控制器的位置编号。例如, P_1 表示卫星网关位于位置1和3,控制器位于3、6和9。总之,每个粒子均由 $2+3=5$ 个整数编码,在初始化过程中,随机生成一组粒子,每个粒子由 $k+m$ 个整数组成。

	g_1	g_2	c_1	c_2	c_3	Fitness
P_1	1	3	3	6	9	$F(1)$
P_2	4	11	2	8	12	$F(2)$
P_3	5	6	1	7	9	$F(3)$

图2 粒子编码映射

每一个粒子都是 $k+m$ 维的,设当前粒子的位置为 $U_{ij} = [g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{ik}, c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{im}]$,其中 $i \in 1, 2, \dots, N$ 。当前速度为 $v_{ij} = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{ik}, v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{im}]$ 。 $pbest_{ij}$ 记录局部最优粒子。 $gbest_{ij}$ 记录全局最优粒子。每次迭代,粒子按式(7)~(8)更新速度 v_{ij} 和位置 U_{ij} 。

$$v_{ij}^{t+1} = \gamma v_{ij}^t + l_1 r_1 (pbest_{ij} - U_{ij}^t) + l_2 r_2 (gbest_{ij} - U_{ij}^t) \quad (7)$$

$$U_{ij}^{t+1} = U_{ij}^t + v_{ij}^{t+1} \quad (8)$$

$$\gamma = \gamma_{\max} - (\gamma_{\max} - \gamma_{\min}) (t/t_{\max}) \quad (9)$$

式中: γ 为惯性因子(初始权重),本文采用惯性因子随迭代次数递减的粒子群算法以提升算法性能^[13]; l_1 和 l_2 是加速系数, r_1 和 r_2 是 $[0, 1]$ 之间的随机数。

模拟退火算法^[14]是一种基于概率选择的优化求解算法, Metropolis准则是该算法的核心,模拟退火算法具有结构简单、限制条件少、使用灵活等优

点。基于概率选择,模拟退火算法在求解过程中对于较差的值也会根据温度以一定的概率接受,这是算法在寻优过程中跳出局部最优解关键。首先,选择一个随机解并计算其适应度函数值 $F(i)$,在迭代过程中,以一定的规则生成该解的邻域解并计算其适应度函数值 $F'(i)$,然后根据 Metropolis 准则进一步判断是否接受扰动所产生的新解代替全局最优解, Metropolis 准则表达式如下:

$$P = \begin{cases} 1, & F'(i) \geq F(i) \\ \exp\{-\Delta/T\}, & F'(i) < F(i) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\Delta = F'(i) - F(i)$ 。由于接受概率是随温度的下降而降低的,因此,选择起止温度时不能过高或过低,在本文中我们设置初始温度 T_0 为 1 000,终止温度 T_{final} 为 1。

尽管粒子群算法具有收敛速度快等许多优点,但有时会陷入局部最优。为避免陷入局部最优,在本文中,引入了 SA 算法。SA 算法具有较强的局部搜索能力, PSO 算法具有较强的全局搜索能力。通过两者的结合,充分利用了 2 种算法优势,提高了搜索效率,解决单个算法在优化求解中存在的问题。此外,为减少因每次迭代使用 SA 算法所带来的计算复杂性,本文设置当全局最优解在 t 代中不发生变化的情况下才使用 SA 算法,这一定程度上简化了所设计算法的复杂性。所提算法如表 1 和表 2 所示。

表 1 模拟退火与粒子群的混合算法(SABPSO)

输入: $G=(V,E), L_{\text{max}}, k$ (卫星网关数量), m (控制器数量)
输出: R_{max} (最大可靠性), $W(k)$ 个网关最佳位置), $C(m)$ 个控制器最佳位置)
1:初始化参数
2: $pbest \leftarrow 0, gbest \leftarrow 0$
3:for $i=1:N$ do
4:随机生成粒子位置 U_{ij}
5: $v \leftarrow 0$,通过式(5)计算适应度值
6:if $F(i) > pbest$ do
7: $pbest \leftarrow F(i)$
8: $pb \leftarrow p //$ 记录局部最优解及粒子
9:end if
10:end for
11: $gbest \leftarrow pbest$
12: $gbest_{\text{history}} \leftarrow gbest$
13: $gb \leftarrow pb \setminus \setminus$ 记录全局最优解及粒子
14:While $t < t_{\text{max}}$ do
15:for each particle do
16:计算网络平均延时 L_{ave}
17:if $L_{\text{ave}} \leq L_{\text{max}}$ do
18:根据式(5)计算适应度

19:根据式(7)~(8)更新速度和位置
20:更新局部最优解
21:更新全局最优解
22:else if
23: $R_{\text{max}} \leftarrow 0$
24:else if
25:end for
26:if $gbest < gbest_{\text{history}}$ do
27: $gbest_{\text{history}} \leftarrow gbest$
28: $b \leftarrow 0$
29:else
30: $b \leftarrow b + 1$
31:end if
32: if $b = t$ do
33: $b \leftarrow 0$
34: $gbest, gb = SA(gb)$
35:end if
36:end while
37:return $gbest, gb$

表 2 SA 算法

输入: $T_0, T_{\text{final}}, t_{\text{max}}, \alpha, gb$
输出: R_{max} (最大可靠性), U_{ij} (粒子位置)
1:初始化参数
2:While $T \geq T_{\text{final}}$ do
3:生成一组新的粒子位置 U'_{ij}
4:计算适应度值
5: $\Delta = F'(i) - F(i)$
6:if $P \geq r$ or $\Delta \leq 0$ do
7:更新的全局最优解
8:end if
9: $T = T\alpha$
10:end while

经过多次实验,关于 SABPSO 算法的初始参数设置见表 3 所示。

表 3 算法参数设置

参数	说明	参数值
l_1	加速系数	2
l_2	加速系数	2
γ_{max}	惯性因子最大值	1.2
γ_{min}	惯性因子最小值	0.6
N	粒子种群大小	50
t_{max}	最大迭代次数	100
t	重复次数	15
T_0	初始温度	1 000
T_{final}	终止温度	1
α	降温系数	0.9

为了评估本文提出的卫星网关和控制器联合部署算法,采用 Topology Zoo^[15]上的现实网络拓扑进

行实验仿真,表4给出了详细的拓扑以及各类故障概率设置。本文仿真程序均在 MATLAB(R2018a)上编译运行。另外,本文将枚举算法、SASA 算法、随机算法作为对比算法,其中随机算法选取随机部署 1 000 次后的最佳部署方案。

表4 拓扑与故障概率设置

拓扑	节点	链路	P_u	P_e	$P_{e_{sw}}$
Chinanet	38	62	[0,0.04]	[0,0.02]	[0,0.03]
OS3E	34	42	[0,0.05]	[0,0.03]	[0,0.04]
Agis	25	30	[0,0.06]	[0,0.04]	[0,0.05]

首先,我们将通过 SABPSO、OEA、SASA、随机放置等不同算法研究联合部署问题,并利用 Agis 拓扑针对网络可靠性,运行时间进行仿真比较。

图3~4显示了在卫星网关 $k=3$ 、最大时延 10 ms 约束下,不同算法在相同网络拓扑和故障概率设置见表4,网络的平均可靠性和运行时间随 SDN 控制器数量 m 变化的比较。

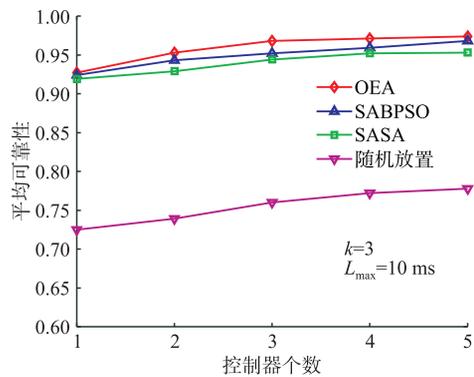


图3 Agis 网络中不同算法下网络平均可靠性比较

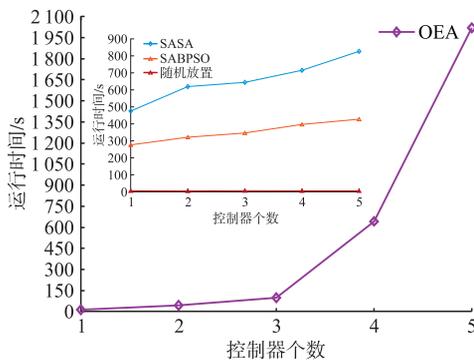


图4 Agis 网络中不同算法下运行时间比较

由图3可知,增加部署控制器可以直接提高集成网络的平均可靠性,原因在于合理部署更多控制器可以极大改善网络连接关系,使得交换机与控制器的跳数减少甚至为零。此外,由图4可见,随着控制器数量的增加,枚举算法的运行时间变得极长,因此不适合解决大规模网络中的部署,而其他算法则可以在较短时间内实现较优部署。从图中可看出,本文的算法较文献[9]中的 SASA 算法更接近

最优解,且运行时间大大降低,更易于实现(运行时间减少 48%)。

此外,为了更好地证明本文所提算法的优越性,本文在表4所列的不同拓扑和故障概率下进行实验,得到了在不同网络拓扑,各算法所求网络平均可靠性的比较结果,见图5。

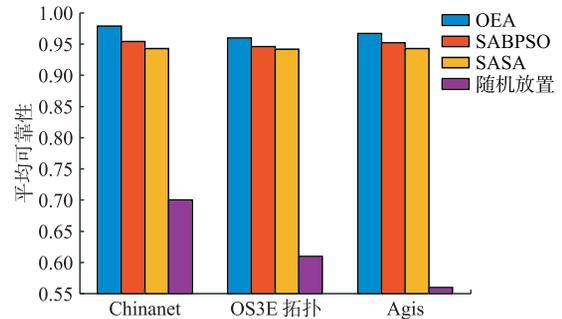


图5 不同网络拓扑下网络平均可靠性比较

由图可知,在表4所列3种不同拓扑中,随机放置算法性能最差,而本文算法的平均可靠性更接近网络的最佳性能,较其他算法更有优势。

4 结语

本文针对基于 SDN 的 5G-卫星集成网络中控制器和卫星网关联合部署问题,提出了 SABPSO 算法,以实现在延迟约束条件下最大化集成网络的可靠性,文中在3种不同拓扑和故障概率设置下进行试验,实验结果表明,与枚举算法、SASA 算法、随机放置算法相比,本文所提算法在运行时间与性能上较其他算法更有优势。

参考文献

- [1] 易克初,李怡,孙晨华,等. 卫星通信的近期发展与前景展望[J]. 通信学报, 2015, 36(6):157-172.
- [2] 汪春霆,翟立君,卢宁宁,等. 卫星通信与 5G 融合关键技术与应用[J]. 国际太空, 2018(6):11-16.
- [3] XIAO Y, ZHANG T, LIU L. Addressing Subnet Division Based on Geographical Information for Satellite-ground Integrated Network[J]. IEEE Access, 2018, 6:75824-75833.
- [4] 唐琴琴,谢人超,刘旭,等. 融合 MEC 的星地协同网络:架构,关键技术与挑战[J]. 通信学报, 2020, 41(4):162-181.
- [5] KREUTZ D, RAMOS F M V, VERISSIMO P E, et al. Software-Defined Networking: a Comprehensive Survey[J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 103(1):14-76.
- [6] KIM H, FEAMSTER N. Improving Network Management with Software Defined Networking[J]. Communications Magazine IEEE, 2013, 51(2):114-119.

