基于匹配博弈的空天地一体化网络服务功能链部署

Yilu Cao[†]、Ziye Jia[†*]、Chao Dong[†]、Yanting Wang[‡]、Jiahao You[†]和Qihui Wu[†]
[†]电磁频谱空间动态认知系统重点实验室，工业和信息化部，南京航空航天大学，南京，江苏，210016，中国

[‡]西北工业大学软件学院，西安，陕西，710129，中国
[*]电子邮箱：jiaziye@nuaa.edu.cn

arXiv:2303.01020v1 [cs.NI] 2 Mar 2023

摘要—空天地一体化网络（SAGIN）具有动态性和灵活性，能够支持在缺乏地面通信设施的环境中传输数据。然而，SAGIN的节点具有异构性，难以共享资源以提供多种服务。因此，本文考虑采用网络功能虚拟化技术来解决灵活资源分配问题。具体而言，构建服务功能链（SFC），以部署面向不同任务的多种虚拟网络功能。为描述SAGIN的动态模型，我们提出了可重构时间扩展图。随后，构建一个优化问题，以最大化已完成任务的数量，即成功部署的服务功能链数量。该问题属于混合整数线性规划问题，难以在有限的时间复杂度内求解。因此，我们将其转化为多对一双边匹配博弈问题，并设计了一种基于盖尔-沙普利算法的算法。最后，通过大量仿真验证了所设计的算法能够以较高的资源利用率有效部署服务功能链。

索引词——空天地一体化网络、服务功能链、资源分配、匹配博弈。

I. 引言

作为[S]第六代（6G）通信系统中的一项前景广阔的技术，空天地一体化网络（SAGIN）具有多层、高度异构的特点[1]。SAGIN可应用于多种场景下的任务，例如缺乏可用地面通信设施的自然灾害场景。然而，SAGIN中的资源具有异构性，无法由不同任务直接共享，因此资源利用率低下。因此，需要提升SAGIN的灵活性和可重构性，以改善其性能。

网络功能虚拟化（NFV）是近年来提出的一项技术[2]。传统网络功能以专用硬件设备的形式部署，而网络功能虚拟化（NFV）则可将其转化为运行在通用设备上的虚拟网络功能（VNFs）。因此，我们考虑将网络功能虚拟化（NFV）引入空天地一体化网络（SAGIN），以高效利用不同节点的各类资源和能力。网络功能虚拟化（NFV）允许虚拟网络功能（VNFs）从一个节点动态迁移到另一个节点，从而提高网络功能针对不同任务的部署灵活性。一个任务可能包含多个虚拟网络功能（VNFs），它们按顺序构成一条服务功能链（SFC）。每条服务功能链（SFC）都可以看作由一个或多个虚拟网络功能（VNF）连接而成的虚拟路径实例，并按照特定顺序排列。服务功能链（SFC）的部署为管理空天地一体化网络（SAGIN）资源提供了一种新方法。

服务功能链在地面网络中的部署已得到广泛研究。然而，关于在SAGIN系统中使用服务功能链的研究仍处于起步阶段。例如，在 [3], 中，作者提出了面向SAGIN系统的服务功能链部署模型。随后，他们以高空平台为例，采用启发式贪心算法实现服务功能链的部署。Zhou 等人 [4] 研究了SAGIN中用于敏捷任务卸载的服务功能链。在 [5], 中，SAGIN的异构资源编排被建模为一个多域虚拟网络嵌入问题，并通过深度强化学习方法求解。Jia 等人 [6] 研究了低地球轨道（LEO）卫星网络中的虚拟网络功能编排问题。随后，他们提出了一种分支定价算法来解决该优化问题。在 [7], 中，作者提出了一种基于软件定义网络和网络功能虚拟化（NFV）的车联网SAGIN架构。然而，据作者所知，关于SAGIN中服务功能链部署的研究尚未得到充分关注。此外，对资源时变特性的研究也不够充分。

因此，我们构建了空天地一体化网络的系统模型，并采用可重构时间扩展图（RTEG），该图能够表示不同节点的状态以及节点之间的连接。不同时间隙中的同一节点可视为不同的节点。基于 RTEG，我们建立了一个优化问题，旨在满足部署约束、资源约束和流约束的同时，最大化服务功能链部署的任务需求数量。该问题属于混合整数线性规划（MILP）问题，难以在有限的时间复杂度内求解。因此，我们提出了一种多时隙匹配博弈算法，并结合迪杰斯特拉算法求取最短路径。最后，仿真结果表明，与对比方法相比，所提算法能够有效获得更好的结果。

本文其余部分安排如下：第二节介绍系统模型。第三节对完成服务功能链部署的任务最大化问题进行建模。第四节提出一种有效的匹配算法来解决该问题。第五节给出仿真结果，第六节总结全文。

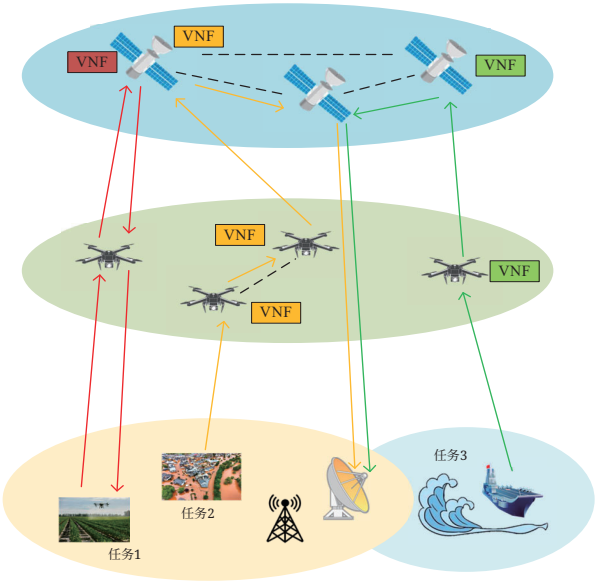


图1. 空天地一体化网络中服务功能链部署的场景。

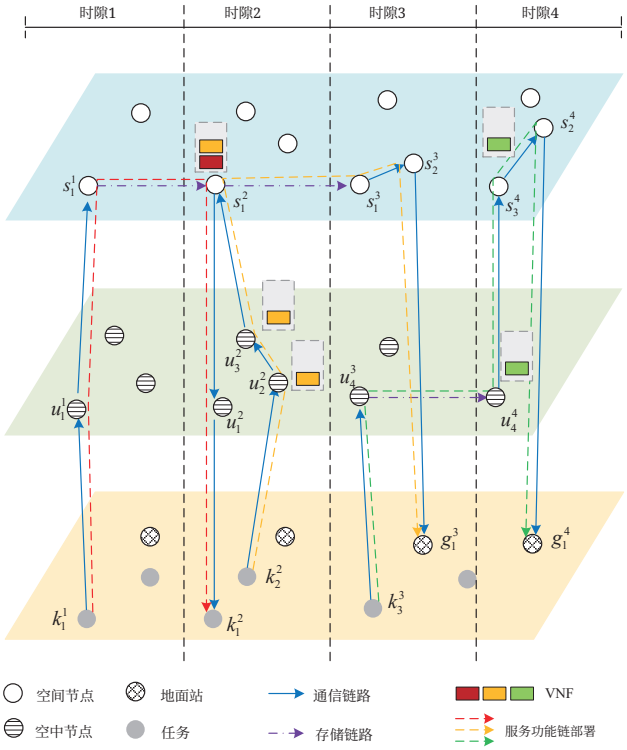


图 2. 基于 RTEG 的空天地一体化网络服务功能链部署场景。

II. 系统模型

A. 网络模型

如图1所示，空天地一体化网络场景由地面用户、空中的无人飞行器（无人机）以及太空中的低地球轨道卫星组成。地面设施包括数据中心、基站、卫星接收机等。用户包括陆地上的移动设施、海洋中的船舶等。低地球轨道卫星通过无线链路互连，能够提供大范围覆盖。无人机彼此互连，并可通过无线链路连接至地面基站。任务来自地面或海洋，随后由基站、卫星站、无人机和低地球轨道卫星提供服务。根据需求，每个任务对应的服务功能链由虚拟网络功能编排。图1展示了三种不同类型任务的服务功能链编排与组成，以及相应的资源提供方。然而，如何描述空天地一体化网络中的动态资源和多种任务，仍然是棘手的问题。

B. RTEG模型

在空天地一体化网络中，低地球轨道卫星高速周期性移动，无人机灵活运动，而地面任务则低速移动。任务类型多样，网络具有跨域性和高度动态性。地面到无人机（G2U）、无人机到无人机（U2U）、无人机到卫星（U2S）、卫星间（S2S）以及卫星到地面（S2G）的通信链路随时间变化。要在如此复杂的跨域网络中高效部署服务功能链，需要有效地表征资源。因此，我们提出 RTEG 来表示空天地一体化网络中的多层动态资源，如图 2 所示。

具体而言，RTEG 表示为 $\mathcal{G} = (\mathcal{N}, \mathcal{L})$，其中包含节点 $\mathcal{N} = \mathcal{N}_g \cup \mathcal{N}_s \cup \mathcal{N}_u$ 和链路 $\mathcal{L} = \mathcal{L}_{gu} \cup \mathcal{L}_{uu} \cup \mathcal{L}_{us} \cup \mathcal{L}_{ss} \cup \mathcal{L}_{sg} \cup \mathcal{L}_t$，分别表示地面到无人机、无人机到无人机、无人机到卫星、卫星间和卫星到地面。 $\mathcal{L}_t = \{(n^\tau, n^{\tau+1}) | n^\tau \in \mathcal{N}_u \cup \mathcal{N}_s, 1 \le \tau \le T\}$表示同一节点 n 从时隙 τ到相邻时隙 τ+1的存储链路。我们考虑一个时间范围 $\mathcal{T}$，其长度大于低地球轨道卫星的周期。 $\mathcal{T}$被划分为 T 个时隙，每个时隙的长度为 t， $\tau \in T$。由于时隙 τ很短，我们认为同一时隙内两个节点之间的连接保持不变，且网络拓扑为准静态。 $\mathcal{N}$表示所有类型的节点， $n^\tau \in \mathcal{N}$。 $\mathcal{L}$描述所有类型的链路， $(n^\tau, m^{\tau'}) \in \mathcal{L}$。

基于 RTEG，可以部署来自地面或海洋、具有不同需求的服务功能链。与图 1 中空天地一体化网络的服务功能链部署场景相对应，图 2 描述了来自三个不同任务的三条服务功能链的部署情况。具体而言，任务 k_1^1 被传输至 u_1^1，并经由s_1^1、 s_1^2 和 u_1^2到达 k_1^2。虚拟网络功能部署在 k_1^2上。任务 k_2^2 在 u_2^2部署第一个虚拟网络功能，在 u_3^2部署第二个虚拟网络功能，并在s_1^2部署第三个虚拟网络功能。随后， k_2^2 经由 s_1^3 和s_2^3中继后，被传输至地面 g_1^3。任务 k_3^3 被传输至 u_4^3。它在 u_4^4部署第一个虚拟网络功能，并在 s_3^4部署第二个虚拟网络功能。随后，它经过 s_2^4被传输至 g_1^4。需要注意的是，两个不同的虚拟网络功能部署在 s_1^2，并共享节点资源。因此，我们需要优化服务功能链的部署，以避免资源利用率低下，并获得最优部署方案。

C. 信道模型

图 1 中存在五种类型的信道，包括地面到无人机、无人机到无人机、无人机到卫星、卫星间和卫星到地面。由于无人机到无人机、无人机到卫星和卫星间信道均与视距通信有关，因此将它们统一归为无人机到无人机（空对空）信道。因此，这些信道采用三种不同的模型进行表征。

1) 地面到无人机信道模型：根据 [8], ，由于无人机的天线高度远高于地面，地面到无人机的信噪比（SNR）可表示为

$$SNR_{gu} = \frac{P_{gu}}{N_0}(\frac{\eta_L - \eta_{NL}}{1+\alpha\exp\{-\beta(\sigma_{nm}^{\tau}-\alpha)\}} + \mathcal{A}_{nm}^{\tau}), \quad (1)$$

其中

$$\mathcal{A}_{nm}^{\tau} = 20\log_{20}(\frac{4\pi d_{nm}^{\tau} f_c}{300}) + \eta_{NL}, \quad (2)$$

and

$$\sigma_{nm}^{\tau} = \frac{180}{\pi}\arcsin(\frac{h_{m^{\tau}}}{d_{nm}^{\tau}}), \quad (3)$$

P_{gu} 表示从地面站到无人机的发射功率。 N_0 为加性高斯白噪声的功率。 η_L， η_{NL}， α，以及 β 是与环境相关的常数参数。 d_{nm}^{τ} 表示时隙τ内地面站发射端 n 与无人机接收端 m 之间的距离。 $h_{m^{\tau}}$表示无人机 m^{τ}的高度。 f_c 表示载波频率（单位：MHz）。

2) 空对空信道模型：由于无人机与卫星之间为视距连接，空对空信道近似为理想模型，且与两个节点[9]之间的距离有关。空对空的信噪比为

$$SNR_{aa} = \frac{P_{aa}G_{aa}^{tr}G_{aa}^{re}c}{4\pi f d_{aa}^{\tau} k_B T_s B_{aa}}, \quad (4)$$

其中 P_{aa} 表示发射功率。 G_{aa}^{tr} 和 G_{aa}^{re} 分别表示发射天线增益和接收天线增益。c 为光速。 f 表示载波频率，d_{aa}^{τ} 表示时隙 τ内发送端与接收端之间的距离。 k_B 为玻尔兹曼常数（单位：J/K）， T_s表示整个系统的噪声温度（单位：K）。 B_{aa}为带宽。

3）卫星到地面信道模型：卫星到地面信道受大气降水影响，其信道状态可由气象卫星 [10] 预测。具体而言，卫星到地面的信噪比表示为:

$$SNR_{sg} = \frac{P_{sg}G_{sg}^{tr}G_{sg}^{re}L_s L_r}{N_0 B_{sg}}, \quad (5)$$

其中， P_{sg} 是卫星到地面链路的发射功率。 G_{sg}^{tr} 表示低地球轨道卫星的发射天线增益。 G_{sg}^{re} 表示地面站的接收天线增益。 L_s 是自由空间损耗。由于低地球轨道卫星与地面站之间的距离较远，且可认为在一个时隙内保持不变，因此 L_s 是一个固定值。 L_r 表示雨衰。B_{sg} 是卫星到地面链路的带宽。

根据香农公式，地面到无人机、空对空和卫星到无人机链路的最大数据速率可合并为

$$r_{(n^{\tau},m^{\tau})} = B\log_2(1+SNR), \forall(n^{\tau},m^{\tau}) \in \mathcal{L}_{gu} \cup \mathcal{L}_{aa} \cup \mathcal{L}_{sg}, \quad (6)$$

其中 $r_{(n^{\tau},m^{\tau}}$ $r_{n^{\tau}\,m^{\tau}}^{gu}$ $r_{(n^{\tau},m^{\tau}}^{aa}$， $r_{n^{\tau}\,m^{\tau}}^{sg}$ $B_{gu} \cup B_{aa} \cup B_{sg}$ $B =)$ 2 2 表示(,))和(,)。分别表示 G U、A A 和卫星到地面的带宽。 SNR 表示 SNR_{gu}、 SNR_{aa}和SNR_{sg}。 $\mathcal{L}_{aa} = \mathcal{L}_{uu} \cup \mathcal{L}_{us} \cup \mathcal{L}_{ss}$。

D. 能耗模型

1）无人机能耗：无人机的能量消耗主要包括悬停、移动和通信 [11]。移动功率为

$$P_{n^{\tau}}^{\mathrm{MOV}} = \frac{v_{n^{\tau}}}{v_{n^{\tau}}^{\max}}(P_{n^{\tau}}^{\mathrm{MAX}} - P_{n^{\tau}}^{\mathrm{HOV}}), \quad (7)$$

$\forall n^{\tau} \in \mathcal{N}_u$， $\tau \in T$，其中 $v_{n^{\tau}}$ 和 $v_{n^{\tau}}^{\max}$ 分别表示无人机 n^{τ} 的移动速度和最大速度。$P_{n^{\tau}}^{\mathrm{MAX}}$ 和 $P_{n^{\tau}}^{\mathrm{HOV}}$ 分别表示无人机达到最大速度时的功率和悬停功率。悬停功率可表示为

$$P_{n^{\tau}}^{\mathrm{HOV}} = \Delta\sqrt{\frac{(M_{n^{\tau}})^3}{\mu_{n^{\tau}}^2 \nu_{n^{\tau}}}}, \forall n^{\tau} \in \mathcal{N}_u, \tau \in T, \quad (8)$$

其中， $\Delta = \sqrt{g^3/(2\pi\vartheta)}$表示环境参数。$g$ 为地球的重力加速度。 ϑ 表示空气密度。$M_{n^{\tau}}$ 表示质量。 $\mu_{n^{\tau}}$ 和 $\nu_{n^{\tau}}$ 分别表示无人机 n^{τ}的半径和螺旋桨数量。因此，路径能耗为

$$E_{n^{\tau},u}^{\mathrm{PATH}} = P_{n^{\tau}}^{\mathrm{MOV}}\frac{\|\gamma_{n^{\tau}} - \gamma_{n^{\tau+1}}\|_2}{v_{n^{\tau}}} + P_{n^{\tau}}^{\mathrm{HOV}}t, \quad (9)$$

$\forall n^{\tau} \in \mathcal{N}_u$， $\tau \in T$，其中 $\gamma_{n^{\tau}}$表示时隙 τ中无人机 n 的位置。此外，通信能耗可表示为

$$E_{n^{\tau},u}^{\mathrm{COM}} = \sum_{k\in\mathcal{K}}\sum_{m^{\tau}\in\mathcal{N}}\frac{P_{n^{\tau}}^{tr} z_{(n^{\tau},m^{\tau})}^{k}\varphi_k}{r_{(n^{\tau},m^{\tau})}}, \quad (10)$$

$\forall n^{\tau} \in \mathcal{N}_u$， $\tau \in T$，其中 $P_{n^{\tau}}^{tr}$为无人机 n^{τ}的发射功率。 $z_{(n^{\tau},m^{\tau})}^{s} \in \{0,1\}$ 表示任务s的服务功能链是否部署在链路(n^{τ}， m^{τ})上。 φ_s表示任务 s 在每个服务功能链中所需的通信资源量。因此，总能耗为

$$E_{n^{\tau},u}^{total} = E_{n^{\tau},u}^{\mathrm{PATH}} + E_{n^{\tau},u}^{\mathrm{COM}}, \forall n^{\tau} \in \mathcal{N}_u, \tau \in T, \quad (11)$$

2）低地球轨道卫星的能耗：低地球轨道卫星的能耗主要与数据的传输和接收有关。当卫星作为接收端（无人机到卫星、卫星间）时，能耗表示为$E_{n^{\tau},s}^{re}$ ；当卫星作为发送端（卫星间、卫星到地面）时，能耗表示为$E_{n^{\tau},s}^{tr}$。我们有

$$E_{n^{\tau},s}^{re} = \sum_{k\in\mathcal{K}}\left(\sum_{m^{\tau}\in\mathcal{N}_u}\frac{P_{us}^{re} z_{(m^{\tau},n^{\tau})}^{k}\varphi_k}{r_{(m^{\tau},n^{\tau})}^{aa}} + \sum_{m^{\tau}\in\mathcal{N}_s}\frac{P_{ss}^{re} z_{(m^{\tau},n^{\tau})}^{k}\varphi_k}{r_{(m^{\tau},n^{\tau})}^{aa}}\right), \quad (12)$$

and

$$E_{n^\tau,s}^{tr}=\sum_{k\in\mathcal{K}}\left(\sum_{m^\tau\in\mathcal{N}_s}\frac{P_{ss}^{tr}z_{(n^\tau,m^\tau)}^{k}\varphi_k}{r_{(n^\tau,m^\tau)}^{aa}}+\sum_{m^\tau\in\mathcal{N}_g}\frac{P_{sg}^{tr}z_{(n^\tau,m^\tau)}^{k}\varphi_k}{r_{(n^\tau,m^\tau)}^{sg}}\right), \tag{13}$$

$\forall n^\tau\in\mathcal{N}_s,\tau\in T$，其中 P_{us}^{re}和 P_{ss}^{re}分别为无人机到卫星和卫星间的接收功率。 P_{ss}^{tr} 和 P_{sg}^{tr} 分别为卫星间和卫星到地面的发射功率。总能耗可表示为

$$E_{n^\tau,s}^{total}=E_{n^\tau,s}^{re}+E_{n^\tau,s}^{tr}+E_{n^\tau,s}^{o},\forall n^\tau\in\mathcal{N}_s,\tau\in T, \tag{14}$$

其中 $E_{n^\tau,s}^{o}$ 表示一般运行能耗。

III. 问题构建

本节将构建优化问题，其中包括三类约束。

A. 约束

1) 部署约束：任务 k的每个虚拟网络功能 $f_r\in\mathcal{F}_k$ 只能部署在一个节点上，即

$$\sum_{n^\tau}x_{n^\tau}^{k,f_r}=1,\forall k,f_r, \tag{15}$$

其中 $x^{k}{}_{,n^\tau}{}^{f_r}\in\{0,1\}$ 表示任务 k 的虚拟网络功能 f_r 是否在时隙 τ部署到节点 n^τ 。此外，只有当任务 k 的服务功能链经过节点 n^τ 时，虚拟网络功能 f_r 才能部署到该节点，即

$$x_{n^\tau}^{k,f_r}\le y_{n^\tau}^{k},\forall k,f_r,n^\tau, \tag{16}$$

其中， $y_{n^\tau}^{k}\in\{0,1\}$ 表示任务 k 的服务功能链是否经过 RTEG 中的节点 n^τ。

每个任务的服务功能链都是单向的。当服务功能链经过节点 n_i^τ时，可以将其部署在该节点与周围节点相连的链路上，其中也包括相邻时隙之间该节点自身的连接。因此，该约束可表示为

$$\sum_{(n^\tau,m^\tau)}z_{(n^\tau,m^\tau)}^{k}+z_{(n^\tau,n^{\tau+1})}^{k}\le y_{n^\tau}^{k},\forall k,n^\tau,m^\tau, \tag{17}$$

2）资源约束：在 RTEG 中，节点的存储资源可以转换为相邻时隙之间该节点的链路资源。节点 G_{n^τ}（$n^\tau\in\mathcal{N}$）的存储资源容量有限，可用 RTEG 中该节点跨时隙的链路容量来表征。因此，节点 n^τ 上的总存储资源不得超过G_{n^τ}，即

$$\sum_{k\in\mathcal{K}}z_{(n^\tau,n^{\tau+1})}^{k}\delta_{n^\tau}^{k}\le G_{n^\tau},\forall(n^\tau,n^{\tau+1}),\tau\in T, \tag{18}$$

其中， $\delta_{n^\tau}^{k}$ 表示任务 k 在节点 n^τ上所需的存储资源量。

由于每架无人机和低地球轨道卫星的计算资源容量有限，服务功能链部署所消耗的总计算资源不能超过节点上的 $C_{n^\tau}^{u}$（$n^\tau\in\mathcal{N}_u$）和 $C_{n^\tau}^{s}$（$n^\tau\in\mathcal{N}_s$），即，

$$\sum_{k\in\mathcal{K}}\sum_{f\in\mathcal{F}_r}x_{n^\tau}^{k,f_r}\sigma_k^{f_r}\le C_{n^\tau},\forall n^\tau\in\mathcal{N}_u\cup\mathcal{N}_s,\tau\in T, \tag{19}$$

其中， $\sigma_s^{f_r}$表示任务 k的虚拟网络功能 f_r 所需的计算资源量。 C_{n^τ} 表示 $C_{n^\tau}^{u}$（$n^\tau\in\mathcal{N}_u$）和$C_{n^\tau}^{s}$（$n^\tau\in\mathcal{N}_s$）。此外，计算资源消耗$E_{n^\tau}^{C}$ 可表示为

$$E_{n^\tau,u}^{C}=\sum_{k\in\mathcal{K}}\sum_{f\in\mathcal{F}_k}x_{n^\tau}^{k,f_r}\sigma_k^{f_r}e^{c},\forall n^\tau\in\mathcal{N}_u\cup\mathcal{N}_s,\tau\in T, \tag{20}$$

其中， $E_{n^\tau}^{C}$ 包括$E_{n^\tau,\ u}^{C}$ 和$E_{n^\tau,\ s}^{C}$。 e^c 由 e_u^c 和e_s^c组成，分别表示无人机和低地球轨道卫星上单位计算资源的能耗。节点的能量消耗包括计算资源消耗$E_{n^\tau}^{C}$ 和传输资源消耗 $E_{n^\tau}^{total}$。总能量消耗不能超过节点的总能量E^{MAX}，即:

$$E_{n^\tau}^{C}+E_{n^\tau}^{total}\le E_{n^\tau}^{MAX},\forall n^\tau\in\mathcal{N}_u\cup\mathcal{N}_s,\tau\in T, \tag{21}$$

如上所述，不同信道具有不同的通信能力。在一个时隙内，链路（n^τ、 m^τ）上所有任务的数据量不能超过其信道容量，即:

$$\sum_{k\in\mathcal{K}}z_{(n^\tau,m^\tau)}^{k}\varphi_k\le r_{(n^\tau,m^\tau)}t,\forall(n^\tau,m^\tau)\in\mathcal{L},\tau\in T. \tag{22}$$

3）流约束：存在一些应满足的流守恒约束，即:

$$\sum_{(o^\tau,\ m^\tau)}z_{(o^\tau,m^\tau)}^{k}=1,\forall k,\tau, \tag{23}$$

$$\sum_{(n^\tau,d^\tau)}z_{(n^\tau,d^\tau)}^{k}=1,\forall k,\tau, \tag{24}$$

$$\sum_{(n^\tau,m^\tau)}z_{(n^\tau,m^\tau)}^{k}+\sum_{(m^{\tau-1},m^\tau)}z_{(m^{\tau-1},m^\tau)}^{k}=\sum_{(m^\tau,n^\tau)}z_{(m^\tau,n^\tau)}^{k}+\sum_{(m^\tau,n^{\tau+1})}z_{(m^\tau,n^{\tau+1})}^{k},\forall k,\tau\neq 1 or T,m^\tau, \tag{25}$$

其中， o^τ 表示源节点， d^τ 表示目的节点。$z_{(m^{\tau-1},m^\tau)}^{k}=0$若 $\tau=1$，且$z_{(m^\tau,n^{\tau+1})}^{k}=0$若$\tau=T$。

B. 优化目标

目标问题是最大化完成服务功能链部署的任务数量，记为 $\mathbf{Q}$，即，

$$\mathscr{P}0:\ \max_{\boldsymbol{X},\boldsymbol{Y},\boldsymbol{Z}}\ \mathbf{Q} \tag{26}$$

$$\text{s.t.}\quad (15)-(25), \tag{27}$$

其中 $\boldsymbol{X}=\{x_{n^\tau}^{k,f_r},\forall n^\tau\in\mathcal{N},\tau\in T\}$, $\boldsymbol{Y}=\{y_{n^\tau}^{k},\forall n^\tau\in\mathcal{N},\ \tau\in T\}$和 $\boldsymbol{Z}=\{z_{(n^\tau,m^\tau)}^{k}\forall(n^\tau,\ m^\tau)\in\mathcal{L},\ \tau\in T\}$。注意， $\mathscr{P}0$是一个混合整数线性规划问题，在有限时间复杂度内难以求解。因此，我们使用匹配博弈来处理该问题。

算法1MG-RTEG。

输入： 所有任务 $k \in \mathcal{K}$ 及服务功能链集合、所有节点 $n \in \mathcal{N}$，任务 d_k的数据大小。

输出： 完成服务功能链部署的任务数量。

1：使用迪杰斯特拉算法获取任务从起点到目的地的最短路径。
2：将最短路径上的节点放入任务的偏好列表 L_k 依次。
3：根据 d_k，按降序排列在 n 到达的任务排列。
4：依次将任务放入节点的偏好列表 L_n 中。
5：**针对**每个时隙 τ **执行**
6: **对于**，存在 k 未传输，**执行**
7: **如果** d_k 足够小，可以完全由无人机**则**
8: **对于** $n^\tau \in L_k$，**执行**
9: 将 $k \in L_n$ 的虚拟网络功能分配给 n^τ，直至无法继续部署虚拟网络功能。
10: 拒绝所有满足 $k \succ_n k'$ 的 k'。
11: 从 L_k 中移除 n^τ。
12: **结束循环**
13: **如果** k 未能在 τ 中部署任何虚拟网络功能**则**
14: 找到距离起点最近的 $n_0 \in L_k$。
15: 将 k 存储到 $n_0^{\tau+1}$ 处的下一个时隙。
16: **结束 if**
17: **如果** k 到达距离目的地最近的节点且虚拟网络功能尚未全部部署**则**
18: 查找部署虚拟网络功能的最后一个节点 $n_1 \in L_k$ 虚拟网络功能。
19: 将 k 存储到 $n_1^{\tau+1}$的下一个时隙。
20: **结束条件判断**
21: **else**
22: k 通过距离起点最近的无人机向卫星传输数据，并在卫星上部署虚拟网络功能。
23: **结束条件判断**
24: **结束循环**
25: **结束循环**

IV. 算法设计

我们通过算法1处理这个混合整数线性规划问题，该算法称为匹配博弈-RTEG（MG-RTEG）。该问题表示为一个多对一双边匹配博弈问题[12]–[14]。它可以通过盖尔-沙普利（GS）算法求解，该算法也称为延迟接受算法。GS算法在匹配提议方方面具有优势，因此我们将任务设为匹配提议方，将无人机和卫星节点设为匹配接收方。

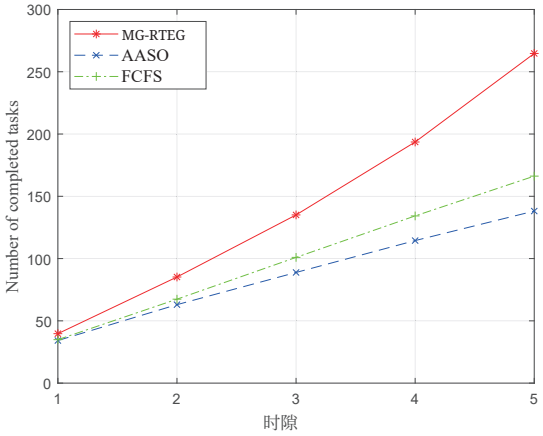
首先，我们构建偏好列表，用于表示任务更倾向于选择的节点，以及节点更偏好的任务。任务的偏好列表通过迪杰斯特拉算法构建，用于生成任务从起点到目的地的最短路径。将所得路径中的节点按照从靠近起点的无人机节点开始的顺序依次加入偏好列表（第 1–2 行）。节点的偏好列表则根据任务的数据量按降序构建（第 3–4 行）。随后，我们通过 GS算法获得服务功能链的部署方案。在为任务传输选择节点时，我们优先考虑靠近任务起点且灵活性较高的无人机节点。如果任务的数据量过大，无法完全由无人机传输，或者无人机节点的计算资源耗尽，则考虑将服务功能链部署到卫星上进行传输（第 22 行）。

在一个时隙内，任务根据偏好列表选择第一个节点并部署虚拟网络功能。节点则根据偏好列表选择相应的任务，并拒绝偏好列表中排在其后的其他任务。根据GS算法的延迟接受机制，节点可以拒绝当前任务 s'，转而接受在该节点偏好列表中排名更高的任务 k，表示为 $k \succ_n k'$。具体而言，$k \succ_n k'$ 表示节点 n 更偏好任务k 而非任务 k'。此外，一旦某个任务被拒绝，排名在其后的任务也会被拒绝（第5–12行）。如果某个任务在一个时隙内未能部署任何虚拟网络功能，则将该任务存放在距离起点最近的无人机节点上，并在该节点等待，直到下一个时隙与其他任务完成匹配（第13–16行）。如果某个任务仅部署了部分虚拟网络功能，则将该任务存放在最后部署虚拟网络功能的节点上，等待至下一个时隙部署剩余的虚拟网络功能（第17–20行）。迭代持续进行，直至双边匹配达到稳定性。随后，服务功能链部署完成。

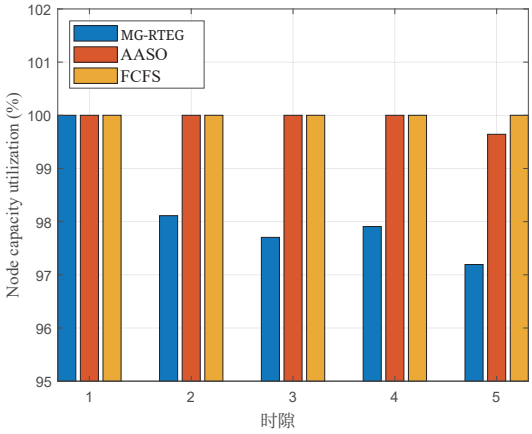
V. 仿真结果

我们使用 MATLAB 进行仿真设计，并将数据设置为六架无人机和一颗卫星。我们假设这些无人机始终可以与最近的低地球轨道卫星通信，不考虑切换问题。无人机和卫星在每个时隙都会动态变化。每架无人机和每颗卫星的计算资源分别设置为 8 个单位和 50 个单位。我们考虑任务的一种虚拟网络功能类型，$|\mathcal{F}_s| = 1.\sigma_s^{f_k} = 1$unit/10 Mbit。任务随机分布在无人机覆盖范围内的地面上。每个任务的数据大小在 10Mbit 到 50Mbit 之间随机生成。

为了评估所提出的匹配算法的优势，我们考虑了300个随机任务，并将所提出的算法与另外两种算法进行比较。一种是按升序选择节点接受的任务（AASO），另一种是先到先服务（FCFS）。从图3a可以看出，随着时隙的增加，完成服务功能链部署的任务数量逐渐增加。就已完成的任务数量而言，在每个时隙中，所提出的算法始终优于另外两种算法。此外，如图3b所示，由于任务数量庞大，节点的计算资源几乎耗尽；而采用所提出的算法时，在后续时隙中节点资源并未得到充分利用。因此，与另外两种算法相比，MG-RTEG能够成功完成更多任务并部署更多服务功能链



(a) 完成服务功能链部署的任务数量。



(b) 节点的计算资源利用率。

图3. 一个时隙内不同算法的比较。

同时消耗更少的节点计算资源。根据图4中所有任务的VNF部署所需资源量，MG-RTEG的部署完成率要高得多。总之，所提出算法的性能优于另外两种算法。

VI. 结论

本文利用 RTEG 描述空天地一体化网络中不同资源的情况，并将资源管理建模为服务功能链部署优化问题。随后，我们提出一种基于匹配博弈的算法，以解决所构建的最大化已完成任务数量的优化问题。仿真结果表明，MG-RTEG 能够更有效、稳定地分配资源，并部署更多服务功能链。同时，MG-RTEG 能够实现较高的资源利用率。这表明，所提出的算法优于其他对比算法。

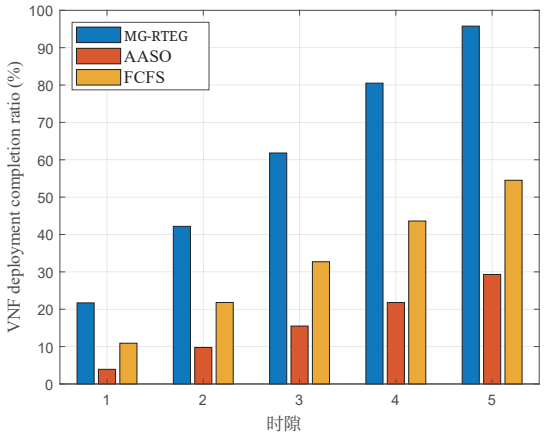


图4. 各时隙任务所需的虚拟网络功能计算资源使用情况对比。

参考文献

[1] J. Liu、Y. Shi、Z. M. Fadlullah 和 N. Kato，“空天地一体化网络：综述”，*IEEE Commun. Surv. Tutor.*，第20卷第4期，第2714–2741页，2018年。

[2] J. Gil Herrera 和 J. F. Botero，“网络功能虚拟化中的资源分配：全面综述”，*IEEE Trans. Netw. Service Manag*，第13卷第3期，第518–532页，2016年。[3] G. Wang、S. Zhou、S. Zhang、Z. Niu 和 X. Shen，“面向可重构空天地一体化网络的基于SFC的服务提供”，*IEEE J. Sel. Areas Commun.*，第38卷第7期，第1478–1489页，2020年。[4] S. Zhou、G. Wang、S. Zhang、Z. Niu 和 X. S. Shen，“面向敏捷空天地一体化网络的双向任务卸载”，*IEEE Wirel Commun*，第26卷第2期，第38–45页，2019年。[5] P. Zhang、C. Wang、N. Kumar 和 L. Liu，“基于虚拟网络架构的空天地一体化多域网络资源编排：一种深度强化学习方法”，*IEEE trans Intell Transp Syst*，第23卷第3期，第2798–2808页，2022年。[6] Z. Jia、M. Sheng、J. Li、D. Zhou 和 Z. Han，“软件定义低地球轨道卫星网络中的基于VNF的服务提供”，*IEEE Trans. Wirel. Commun.*，第20卷第9期，第6139–6153页，2021年。[7] B. Cao、J. Zhang、X. Liu、Z. Sun、W. Cao、R. M. Nowak 和 Z. Lv，“面向车联网的空天地一体化网络中的边缘云资源调度”，*IEEE Internet Things J.*，第9卷第8期，第5765–5772页，2022年。[8] Y. Wang、W. Feng、J. Wang 和 T. Q. S. Quek，“面向6G泛在覆盖的混合卫星-无人机-地面网络：海上通信视角”，*IEEE J. Sel. Areas Commun.*，第39卷第11期，第3475–3490页，2021年。[9] Z. Jia、M. Sheng、J. Li、D. Niyato 和 Z. Han，“低地球轨道卫星辅助无人机：面向6G空中接入网络中远程物联网的联合轨迹规划与数据收集”，*IEEE Internet Things J.*，第8卷第12期，第9814–9826页，2021年。[10] Z. Jia、M. Sheng、J. Li 和 Z. Han，“面向6G空天地一体化网络的数据收集与传输：HAP与低地球轨道卫星协作方案”，*IEEE Internet Things J.*，第9卷第13期，第10 516–10 528页，2022年。[11] A. A. Al-Habob、O. A. Dobre、S. Muhaidat 和 H. V. Poor，“使用无人机实现节能的信息放置与传送”，*IEEE Internet Things J.*，第10卷第1期，第357–366页，2023年。[12] D. Gale 和 L. S. Shapley，“大学招生与婚姻稳定性”，*Am Math Mon*，第69卷第1期，第9–15页，1962年。[13] Z. Jia、M. Sheng、J. Li、D. Zhou 和 Z. Han，“6G中的联合HAP接入与低地球轨道卫星回传：基于匹配博弈的方法”，*IEEE J. Sel. Areas Commun.*，第39卷第4期，第1147–1159页，2021年。[14] Z. Jia、Q. Wu、C. Dong、C. Yuen 和 Z. Han，“通过HAP与无人机协作实现面向物联网的分层空中计算”，*IEEE Internet Things J.*，第1–1页，2022年。