

# 海上边缘计算云边智能协同服务建模

乐光学<sup>1</sup>, 戴亚盛<sup>1</sup>, 杨晓慧<sup>1</sup>, 杨忠明<sup>1</sup>, 马柏林<sup>1</sup>, 刘建华<sup>2</sup>

(1. 嘉兴学院数理与信息工程学院, 浙江嘉兴 314001; 2. 绍兴文理学院计算机科学与工程系, 浙江绍兴 312000)

**摘要:** 由于受环境、资源、能耗、异构等因素制约,海上无线技术发展明显滞后于陆地。以低开销、自适应和自主融合为约束,提出一种海上边缘计算云边智能协同服务策略模型(Model of Cloud-Edge Cooperative Service Scheme for Maritime Edge Computing, MCECS-MEC)。基于边缘计算构建海上云边智能协同服务网络框架,抽象海上边缘计算节点行为特征,建立具有抑制联合作弊的节点信任和推荐量化综合评价模型,根据其综合属性评价将准盟员节点融合聚类到不同的协同服务池,实现分级就近服务;基于协同服务请求的优先级和负载均衡理论,设计协同服务池组建规则和段页式自适应轻量级、自适应过热规避盟员发现算法,以状态机方式描述和分析 MCECS-MEC 协同服务状态演化。基于 Router View 公开数据集对 MCECS-MEC 模型性能进行仿真分析,仿真实验表明, MCECS-MEC 相比于 AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing)、SR (Stochastic Routing) 算法,减少了 57.7% 和 55.04% 的冗余传输流量,链路重寻率小于 3%,负载率稳定于 65%。MCECS-MEC 模型能有效降低过载、热区、空洞效应等对网络性能的影响,提高海上边缘计算云边智能协同服务效率和质量。

**关键词:** 海上边缘计算; 云边智能协同; 信任与推荐; 自适应过热规避; 协同状态演化

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2021)12-2407-12

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20200565

## Model of Cloud-Edge Cooperative Service for Maritime Edge Computing

YUE Guang-xue<sup>1</sup>, DAI Ya-sheng<sup>1</sup>, YANG Xiao-hui<sup>1</sup>, YANG Zhong-min<sup>1</sup>, MA Bo-lin<sup>1</sup>, LIU Jian-hua<sup>2</sup>

(1. School of Mathematics and Information Engineering, Jiaxing University, Jiaxing, Zhejiang 314001, China;

2. Department of Computer Science and Engineering, Shaoxing University, Shaoxing, Zhejiang 312000, China)

**Abstract:** Limited by environment, resources, energy consumption, heterogeneity, etc., the development of maritime wireless data network technology is backward. A model of cloud-edge cooperative service scheme for maritime edge computing (MCECS-MEC) is proposed. Based on edge computing, it constructs an intelligent cloud-edge cooperative service network framework in maritime edge computing. The abstracted behavior characteristics of nodes in maritime edge computing are clustered into different cooperative service pools by restraining the joint cheating trust evaluation and recommendation quantitative comprehensive evaluation models. Based on the priority evaluation and the theory of load balancing of cooperative service, the rules of building cooperative service pool and the algorithm of segment page adaptive lightweight and heavy load avoidance are designed to discovery cooperative node. The state evolution of MCECS-MEC cooperative service is described and analyzed by state machine. Based on router view open data set, simulation results show that our algorithm reduces 57.7% and 55.04% redundant transmission traffic compared with ad hoc on-demand distance vector routing (AODV) and stochastic routing (SR). The link retransmission rate is less than 3%, and the load rate is stable at 65%. It can effectively alleviate node overload and hot region, and improve the efficiency and quality of service of cooperative service of maritime edge computing.

**Key words:** maritime edge computing; intelligent cloud-edge cooperation; trusted recommendation; adaptive over hot avoidance; the state evolution of cooperation

### 1 引言

由于海洋气候环境复杂多变,无人岛礁分布不均,资源、能源、气象环境等限制基站建设,其通信网络的发展明显滞后于陆地网络<sup>[1]</sup>. 网络拓扑动态、服务节点的资源有限、链路时变、带宽和容量限制等导致海上通信网络效率和服务质量不高,成为制约海洋开发与探索向纵深发展的瓶颈,构建可靠、高效、大容量、高宽带、低延迟和无盲区的自主融合海上通信高速数据业务网络面临的巨大挑战.

文献[1]针对我国南海的地理特点,提出了一个新型的天地海一体化海洋通信网络架构. 文献[2]通过计算迁移方式在靠近数据源侧协同执行任务处理,将计算结果上传至云计算中心,或将云计算中心的任务下发给边缘端节点执行,以降低网络延迟、数据交互开销,提高任务计算效率、网络容量和带宽,保障数据安全和隐私. 研究分析发现将边缘计算协同服务思想应用至海上无线数据通信网络,是提高海上无线网络的QoS、网络容量和效率的有效机制之一.

文献[3]将计算迁移和资源分配联合优化问题转化为执行成本最小问题求解. 文献[4]以任务驱动方式,盟主节点通过信任评价策略实施资源融合与协同计算迁移. 文献[5]提出了一种服务精度最大化的AI增强卸载框架. 文献[6]基于进化模糊博弈的相邻节点实时协同决策数据分发策略,实施数据缓存与分发. 文献[7]将计算密集型任务迁移到边缘执行,实现轻量快速决策和负载均衡. 文献[8]基于时延和能耗联合优化方法,提出了一种两阶段联合优化卸载算法. 文献[9]提出了一种海上移动协同边缘通信模型.

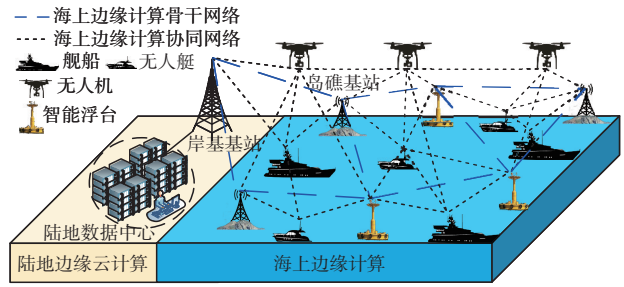
海上边缘计算研究还处于起步阶段,构建高效可信的海上智能边缘计算协同服务机制已成为业界亟待解决的关键问题. 以陆地数据中心为云计算中心,岸基基站、岛礁基站、智能中继浮台为骨干路由网络;船载智能设备、无人艇、无人机等智能设备作为业务处理和计算执行节点,构建海上智能边缘计算;提出一种海上边缘计算云边智能协同服务策略模型(MCECS-MEC),实现资源快速融合映射. 基于可信协同推荐机制构建节点特征信息库和协同服务节点集;根据节点性能建立A、B、C、D协同集,以低开开销和均匀开销为约束设计搜索算法,发现可信协同盟员,实现可信可靠、服务均衡、快速高效的海上边缘计算的云边智能协同服务.

### 2 MCECS-MEC 智能协同服务建模

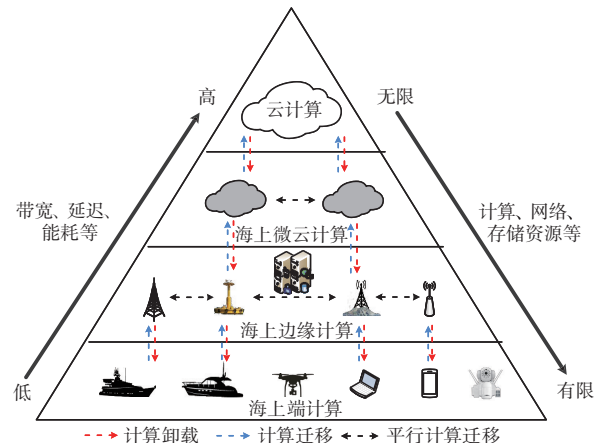
#### 2.1 MCECS-MEC 网络架构建模

由于海上智能设备会产生大量的计算任务和源数

据,若完全上传至岸基数据中心处理,将大量消耗网络资源、能量、带宽等,造成网络抖动、过载、热区等,引起的空洞雪崩效应导致网络性能和容量急剧下降,甚至出现网络崩溃. 将海上智能设备赋予计算处理使命,在靠近数据源侧进行数据分析计算,以减轻数据上传开销和计算效率,提高其响应速度和性能,是实现海洋高速、大容量流式数据服务和无盲区覆盖,为用户提供具有鲁棒性的QoS网络服务的有效解决方法. 如图1所示.



(a) 特定海域海事监控通信网络



(b) 业务数据流迁移图

图1 海上智能边缘计算网络

#### 2.2 MCECS-MEC 节点行为特征建模

根据图1海上边缘计算服务框架,将海上边缘计算设备抽象为节点,进行节点行为建模. 假设其规模为 $n, i < n, j < n$ ,边缘节点连接矩阵为 $N$ ,其元素为 $a_{ij}$ ,如果节点 $j$ 与节点 $i$ 相连,则 $a_{ij}=1$ ,否则 $a_{ij}=0$ ;边缘计算服务关系矩阵为 $B$ ,其元素为 $b_{ij}$ ,如果节点 $i$ 可向节点 $j$ 请求边缘计算服务,则 $b_{ij}=1$ ,否则 $b_{ij}=0$ ;节点信任关系矩阵为 $T_{ij}$ ,其元素为 $t_{ij}^{(s)}, t_{ij}^{(s)} \in (0, 1), s$ 为当前观察周期数;边缘计算服务节点服务能力评价矩阵为 $G_{ij}$ ,其元素为 $g_{ij}, g_{ij} \in (0, 1)$ .

假设观察周期时长为 $T$ ,节点 $i$ 在第 $s$ 观察周期对节点 $j$ 的信任度评价 $t_{ij}^{(s)}$ 满足式(1):

$$\begin{cases}
 t_{ij}^{(s)} = t_{ij}^{(s-1)} \frac{f_{ij,succ}^{(s)}}{f_{ij,succ}^{(s)} + \varepsilon^{(s-1)} f_{ij,fail}^{(s)}} \\
 \quad + (1 - t_{ij}^{(s-1)}) \left( \frac{f_{ij,succ}^{(s)}}{f_{ij,succ}^{(s)} + \varepsilon^{(s-1)} f_{ij,fail}^{(s)}} \right)^{\alpha} \left( \frac{\tau_j}{T} \right)^{L_j} \\
 t_{ij}^{(0)} = a_{ij} J(i,j) \frac{1}{\sqrt{V(i,j)}} \\
 \varepsilon^{(s)} = \varepsilon^{(s-1)} u^{-\frac{1}{\sqrt{T}}} + \frac{f_{ij,fail}^{(s)}}{f_{ij,succ}^{(s)} + \varepsilon^{(s-1)} f_{ij,fail}^{(s)}}, \\
 J(i,j) = \frac{\sum_{k=1}^n b_{ik} b_{jk}}{\sum_{k=1}^n b_{ik} + \sum_{k=1}^n b_{jk} - \sum_{k=1}^n b_{ik} b_{jk}}
 \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $f_{ij,succ}^{(s)}$  与  $f_{ij,fail}^{(s)}$  分别表示第  $s$  观察周期节点  $i$  与节点  $j$  的成功和失败交互次数;  $\varepsilon^{(s)}$  为第  $s$  观察周期的不诚信行为惩罚因子;  $f_{j,succ}^{(s)}$  与  $f_{j,fail}^{(s)}$  分别表示第  $s$  观察周期节点  $j$  在局域网内的成功和失败交互次数;  $\alpha$  表示网络节点在观察周期时间内的基准有效交互次数;  $f_j$  为节点  $j$  在周期时间内的平均交互次数;  $\tau_j$  和  $L_j$  分别表示节点  $j$  在观察周期时间内的平均在线时间时长和离线次数;  $J(i,j)$  是节点  $i$  与节点  $j$  的 jaccard 系数, 表征两个节点的协同服务节点集的重合度, 重合度越高则其推荐更具意义;  $V(i,j)$  表示节点  $i$  与节点  $j$  网络延迟;  $u^{-1/\sqrt{T}}$  表示周期衰减常数因子,  $u \in (0, 1)$ ;

由式(1)分析可知, 构建的信任度计算函数  $t_{ij}^{(s)}$  由节点直接交互信任和局部网络节点的推荐信誉度表征, 实现节点快速融入协同服务簇, 缓解新节点加入网络特性信息有限等造成数据稀疏导致难以融合的问题. 构建节点  $i$  对节点  $j$  服务能力评价  $g_{ij}$  如式(2):

$$\begin{cases}
 g_{ij} = e^{-1 + \frac{b_j h_j' w_j' m_j'}{\sqrt{V(i,j)}} t_{ij}^{(s)} \left( \frac{\tau_j}{T} \right)^{L_j}} \\
 h_j' = \frac{h_j}{h_{\max}} \\
 w_j' = \frac{\log_2(w_j)}{\log_2(w_{\max})} \\
 m_j' = \frac{\log_2(m_j)}{\log_2(m_{\max})}
 \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $h_j, w_j, m_j$  分别表示边缘计算协同服务节点  $j$  可共享的计算能力、带宽和内存大小;  $h_j', w_j', m_j'$  分别为  $h_j, w_j, m_j$  归一化处理后的值;  $h_{\max}, w_{\max}, m_{\max}$  分别为协同服务集中节点计算能力、带宽和内存大小的最大值.

### 2.3 MCECS-MEC 协同盟员推荐策略

根据自主融合和就近服务原则, 构建节点特征信息库, 以推荐信任度均方差过滤信任评价结果, 融合直接信任度评价与推荐信任评价构建协同节点综合信任评价; 基于布隆过滤快速索引调度可信服务节点, 构建可信协同服务盟员集, 如图2所示,  $\odot$  为调度机制执行器.

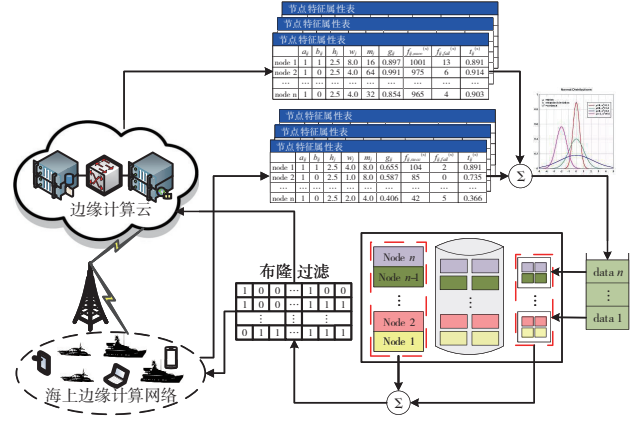


图2 MCECS-MEC 协同盟员推荐模型

假设第  $s$  观察周期获取服务节点  $k$  的评价  $r_{ik} = \{r_{1k}, r_{2k}, \dots, r_{nk}\}$ , 采用信任机制获取协同节点推荐信息, 节点  $j$  向节点  $i$  推荐协同节点  $k$  的服务评价  $r_{ik}$  如式(3):

$$r_{ik} = t_{ij} t_{jk} \quad (3)$$

根据均方差过滤推荐节点评分得推荐信任度  $R_{ik}$  如式(4):

$$\begin{cases}
 R_{ik} = \frac{1}{l} \sum_i^l r_{ik} (1 - \sigma_{ik}), \sigma_{ik} > \delta \\
 R_{ik} = 0.5, \sigma_{ik} \leq \delta \\
 \text{s.t. } \sigma_{ik} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (r_{ik} - \bar{r}_{ik})^2}
 \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $\delta$  为推荐异常阈值,  $\bar{r}_{ik}$  为节点  $i$  对协同服务节点  $k$  的平均信任度. 在观察期内, 若  $i, k$  节点执行协同操作, 且节点  $i$  对协同服务节点  $k$  已进行评价, 则节点  $i$  对协同服务节点  $k$  的信任综合评价式(5):

$$u_{ik} = \beta^m R_{ik} + (1 - \beta^m) t_{ik} \quad (5)$$

其中,  $\beta$  为评价稀疏性系数,  $\beta \in (0, 1)$ ,  $m$  为节点  $i$  对协同服务节点  $k$  的评价次数.

### 2.4 MCECS-MEC 协同服务池构建策略

不同类型海上边缘计算节点的网络、计算、存储服务资源具有差异, 执行协同服务时将表现出不同的特征. 为充分发挥海上边缘节点独立、灵活、移动的服务特征, 根据节点的负载评价、服务能力评价、信任综合评价等特征构建综合性能评价模型, 设节点  $i$  对节点  $j$  的综合性能评价为  $\eta_j$  如式(6).

$$\begin{cases}
 \eta_j = u_{ij} g_{ij} Q_j \\
 Q_j = (1 - \frac{p_j}{h})(1 - \frac{q_j}{w})(1 - \frac{d_j}{m}) \\
 \text{s.t. if } Q_j \leq 0 \text{ then } Q_j = 0, \\
 0 \leq \eta_j \leq 1
 \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $u_{ij}$  为节点  $i$  对协同服务节点  $j$  的信任综合评价,  $Q_j$  为边缘计算服务节点  $j$  的负载评价函数,  $p_j$  为内存占用率,  $q_j$  为计算能力,  $d_j$  为带宽占用率,  $h, w, m$  分别为计算负载阈

值、带宽负载阈值、内存负载阈值;根据节点综合性能评价将海上边缘计算节点的性能分为优、良、中和一般四类,构建A、B、C、D协同集,按规则式(7)进行划分:

$$D = \begin{cases} \eta_j \geq 0.85, & \text{节点}j\text{进入}A\text{协同集} \\ 0.75 \leq \eta_j < 0.85, & \text{节点}j\text{进入}B\text{协同集} \\ 0.5 \leq \eta_j < 0.75, & \text{节点}j\text{进入}C\text{协同集} \\ 0 \leq \eta_j < 0.5, & \text{节点}j\text{进入}D\text{协同集} \end{cases} \quad (7)$$

对新进入节点,取中性值 $\eta_j=0.5$ ,随节点 $j$ 协同服务质量评价周期更新 $\eta_j$ ,按规则式(7)重新进入协同集.

### 2.4.1 段页式自适应协同盟员发现算法

由于网络节点趋优特性普遍存在,盟主选择A协同集盟员执行计算任务时,容易导致任务聚集,形成热区;选择D协同集盟员执行计算任务时,其服务能力弱,无法长期稳定执行计算任务.

根据段页式访问原理,按先进先出原则,设计段页式自适应协同盟员发现算法扫描A、D协同集.在协同集中创建双向哈希链式队列,选取协同服务盟员时,按2的指数次幂分段,随机选择并捎带其前驱和后继节点,若均被占用,则重新选择.选取协同服务盟员队列

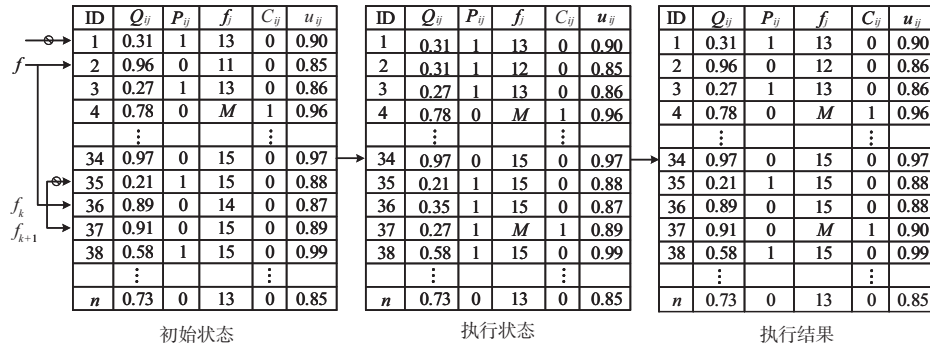


图3 段页式自适应协同盟员发现算法

### 2.4.2 自适应过热规避协同盟员发现算法

传统顺序访问总是从队头节点开始搜索,容易使队列靠前的盟员被过度消耗资源,导致其失效,引起网络拓扑改变等.针对该问题,在B、C协同集中创建双向哈希环队列,采用顺序搜索选取盟员. B协同集队列选取完成时,队头指针平移至当前搜索盟员的后继节点;C协同集队列按综合性能顺序进行排序,每当有比队头盟员综合性能更优的盟员协同完成进入空闲状态时,将队头指针指向该盟员;自适应过热规避协同盟员发现算法,选取协同服务盟员队列指针函数 $D$ 如式(10).

$$D = \begin{cases} f_k = *H, \\ f_{k+1} = f_k + 1, & f_k \text{映射节点不符协同要求} \\ *H = f_k + 1, & f_k \text{映射节点符合协同要求} \\ \text{s.t. } f_k \notin \{f_1, f_2, \dots, f_{k-1}\}, \end{cases} \quad (10)$$

指针函数 $D$ 如式(8).

$$D = \begin{cases} f = H(\lfloor nW(x) \rfloor) \bmod l, \\ f_k = (f \pm 2^{\lfloor \log_2(l)W(x) \rfloor}) \bmod l, \\ f_{k+1} = f_k \pm \lfloor nW(x) \rfloor, \\ \text{s.t. } f_k \notin \{f_1, f_2, \dots, f_{k-1}\}, \end{cases} \quad (8)$$

其中, $n$ 为放大因子, $H$ 为队列哈希映射函数, $W$ 为随机数生成函数, $x$ 为时间种子, $l$ 为队列长度. MCECS-MEC自适应协同盟员发现适配模型:

$$\begin{cases} P_{ij} + C_{ij} > 0, & \text{放弃} \\ P_{ij} + C_{ij} = 0, & \text{适配成功} \\ C_{ij} = \begin{cases} 0, & f_j < M \\ 1, & f_j \geq M \end{cases} \\ P_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{节点空闲} \\ 1, & \text{节点正在服务} \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

其中, $P_{ij}$ ,  $C_{ij}$ ,  $f_j$ 分别表示协同服务的占用状态、可用状态、观察周期协同次数, $M$ 为协同服务上限,段页式自适应协同盟员发现算法如图3所示.

其中,\* $H$ 为队列头指针. 自适应过热规避协同盟员发现算法适配模型:

$$\begin{cases} P_{ij} + C_{ij} > 0, & \text{放弃} \\ P_{ij} + C_{ij} = 0, & \text{适配成功} \\ C_{ij} = \begin{cases} 0, & f_j < M \\ 1, & f_j \geq M \end{cases} \\ P_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{节点空闲} \\ 1, & \text{节点正在服务} \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

基于优先级自适应过热规避协同盟员发现算法,如图4所示.

## 3 MCECS-MEC 系统构建规则

### 3.1 MCECS-MEC 协同服务建模

以协同盟员资源特征、能源等综合性能和属性相

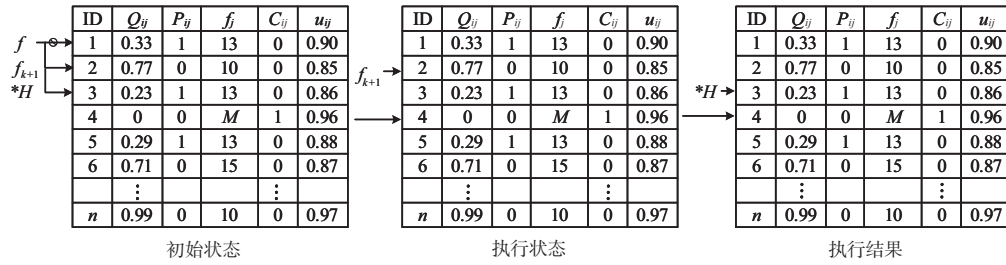


图4 自适应过热规避协同盟员发现算法

似度为约束条件,根据相应策略盟主对协同服务进行任务划分、调度、资源配置,定义其协同服务协议、约束条件和融合规则,对协同盟员服务质量进行动态监控和评价.协同服务任务完成后,盟主对该盟员的协同服务质量和信任度做出公正的评价并向其所在协同服务集节点公布.海上边缘计算云边智能协同服务策略模型其事件流计算模型和状态转移分别如图5所示.

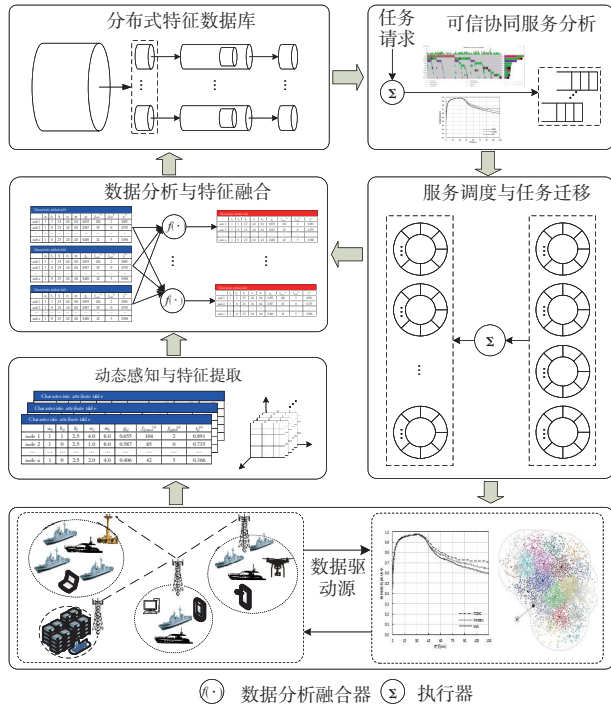


图5 MCECS-MEC 系统模型

### 3.2 MCECS-MEC 状态演化建模

#### 3.2.1 MCECS-MEC 系统状态演化描述

$$MCECS-MEC = \{Q, \Gamma, \delta, q_{start}, q_{accept}\} \quad (12)$$

其中:

(1) $Q$ 是有穷状态集, $Q = \{加入状态, 协同候选状态, 在线状态, 下线状态\}$ .其中,协同候选状态 $\in \{按策略划分到相应的协同候选服务集\}$ ;在线状态 $\in \{一般性服务, 协同服务\}$ ;一般性服务 $\in \{搜索, 浏览, 消息发布, 内容转发等\}$ .

(2) $\Gamma$ 是状态转移条件产生式.

(3) $\delta$ 是转移函数, $\delta = (Q \times \Gamma) \rightarrow f$ .

(4) $q_{start}$ 是起始状态, $q_{start} = \{加入状态\}, q_{start} \in Q$ .

(5) $q_{accept}$ 是接受状态, $q_{accept} \subseteq Q$ .

由式(12)结合图8分析可知,节点进入MCECS-MEC系统的状态描述如下:

Step 1:节点加入MCECS-MEC系统,发布节点特征信息.

Step 2:根据节点的特征信息,依据策略将节点融合到相应的协同服务候选集中.

Step 3:为节点提供服务、发布信息、任务迁移等.

①节点获得全部所需资源、服务后,以概率 $P$ 选择离开,进入离线状态;以 $1-P$ 的概率选择留在MCECS-MEC,进入协同候选状态.

②异常宕机,节点在给定的时间 $\tau$ 内恢复,则为正常在线继续相应操作;否则节点直接进入离线状态,协同服务迁移操作.

③当服务请求端因异常或中断服务请求时,MCECS-MEC系统服务提供端撤销提供的服务队列,更新协同盟员集.

Step 4:服务质量评价:

①接收节点对协同服务质量的正常评价;

②在时间窗 $\tau$ 内,同一节点对同一服务质量评价次数大于给定阈值,拒绝,标记该评价节点;

③以 $1-e^{-g(i)}$ 的概率接受几点 $i$ 对协同盟员服务质量的负面评价.

④以 $g(i)$ 的概率接收节点 $i$ 对同一协同服务节点本次评价远大于或远小于最近一次的服务质量评价,并标记该用户.

Step 5:协同服务集更新:

①节点的综合性能评价大于等于设定的阈值 $\zeta$ ,由当前盟员集升级进入综合性能更高一级的协同盟员集,否则,进行降级操作;

②节点的综合性能值小于等于设定的阈值 $\xi$ ,该节点退出协同服务系统;

③协同服务盟员规模大于等于其规模上限0.85时,选取一个新的盟主,按综合新能评价价值实施分裂操作,划分进入相应协同服务集;当协同服务盟员规模小于等于其规模上限的0.25时,按综合新能评价价值实施

合并操作,并入相应协同服务集;

### 3.2.2 MCECS-MEC 系统中节点协同服务状态演化描述

$$N_{i,service} = \{Q, \Gamma, \delta, q_{start}, q_{accept}\} \quad (13)$$

其中:

(1)  $Q$  是有穷状态集,  $Q = \{\text{协同服务请求, 任务划分, 有效性检测, 资源融合与映射, 调度与执行, 服务质量评价等}\}$ .

(2)  $\Gamma$  是状态转移条件产生式.

(3)  $\delta$  是转移函数,  $\delta = (Q \times \Gamma) \rightarrow f$ .

(4)  $q_{start}$  是起始状态,  $q_{start} = \{\text{协同服务请求}\}$ ,  $q_{start} \in Q$ .

(5)  $q_{accept}$  是接受状态,  $q_{accept} = \{\text{协同服务质量评价}\}$ ,  $q_{accept} \subseteq Q$ .

其算法描述如下:

Step1: 段页式自适应、自适应过热规避轻量级搜索算法扫描协同服务盟员集, 选取协同服务节点.

Step2: 服务协商、定义逻辑关系、约束和融合等, 实现资源映射和融合, 构建协同服务联盟.

Step3: 根据策略规则实施任务迁移和资源调度, 执行协同服务操作.

Step4: 协同服务质量评价, 更新并发布.

Step5: 释放资源, 解散.

## 4 MCECS-MEC 性能仿真与分析

### 4.1 仿真实验环境设置

基于 Router View 公开数据集随机选择 1758 个节点, 构建海上边缘计算仿真实验环境, Router View 公开数据集节点数 6474, 连接边数 13895, 平均度为 4.2926,

基尼系数 0.608, 相对边缘分布熵 0.854, 聚类系数 0.959%. 设 1 个岸基基站为根节点, 1 个陆地数据中心为边缘云计算中心, 4 个岛礁基站和 3 个智能中继浮台基站构建骨干网络, 以基站构建 7 协同服务簇, 基站协同服务簇规模上限为 250. 基于 Router View 公开数据集随机选择 1758 个节点, 构建海上边缘计算网络;

基站节点连接度上限为 256, 基站协同服务簇 A、B、C、D 协同集规模上限为 128; 盟主节点连接度上限为 128, 盟主协同服务簇 A、B、C、D 协同集规模上限为 64.

节点通信制式符合 IEEE 802.11 协议标准.

### 4.2 MCECS-MEC 系统仿真验证

#### 4.2.1 MCECS-MEC 系统初始状态环境仿真

初始采用洪泛路由机制获取协同服务节点特征信息, 初始拓扑结构如图 6 所示, 特征参数如表 1 所示, 表中前 4 项为设定值, 其余项为仿真值.

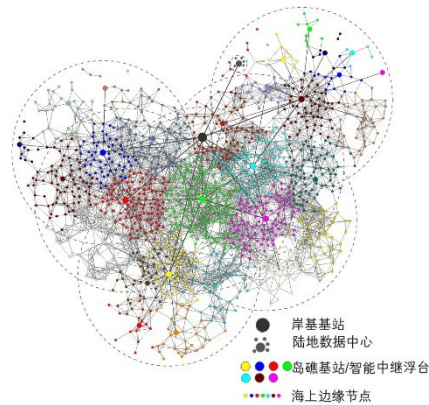


图6 MCECS-MEC 初始拓扑结构图

表1 MCECS-MEC 初始生成特征参数

岸基基站	岛礁基站	智能中继浮台	网络直径	稳定时间 (min)	基站簇个数	基站簇规模	盟主协同服务簇个数	盟主协同服务簇平均规模	盟主协同服务簇覆盖率	平均推荐节点数	推荐节点数均方差	游离节点数	云端平均访问延迟 (ms)	云端计算服务响应延迟 (ms)
1	4	3	6	15	7	250	24	70.5	56.40%	223	37.29	9	23.21	45.61

由表2分析可知, 仿真实验海上边缘计算初始状态环境具有如下特征:

(1) 15min 网络达到稳定状态, 岸基基站、岛礁基站、智能中继浮台基站形成 7 个基站协同服务簇, 基站簇规模为 250, 24 个盟主协同服务簇, 盟主协同服务簇平均规模为 70.5;

(2) 盟主协同服务簇覆盖率达到 56.40%, 节点推荐平均数达到 223, 基站簇协同服务节点平均搜索率达到 89.2%;

(3) 云-端平均访问延迟为 23.21ms, 云-端协同服务响应延迟为 45.61ms;

#### 4.2.2 MCECS-MEC 协同盟员推荐服务性能仿真分析

设陆地数据中心服务器集群存在 150 个待迁移移

算任务, 每个迁移计算任务量  $250 \leq M \leq 1024$ , 用户请求频率  $f \leq 4$  次/s, 每次请求 5 个连续的计算任务, 实验测试时间 4h, 采样周期为 5s, 稳定拓扑结构如图 7 所示, 参与率、符合度和信任度如图 8~10 所示, 推荐服务特征参数如表 2 所示.

由图 7~10 及表 2, 实验结果表明:

(1) 盟主节点通过自主资源聚合, 构建边缘计算协同节点协同服务簇.

(2) 盟主对协同服务簇实施管理, 负责对协同任务的分析和调度, 防止冗余请求涌入基站造成过载, 保证了网络稳定性.

(3) 协同盟员推荐服务能够快速、可靠地发现可协

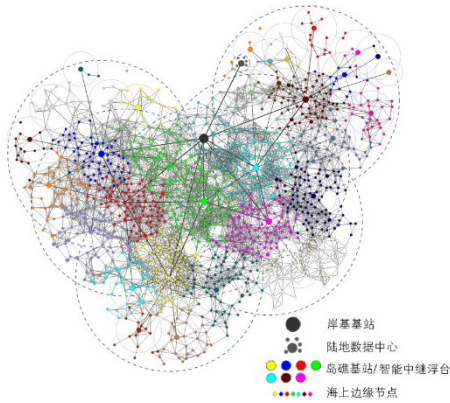


图7 MCECS-MEC 稳定拓扑结构

同的节点,缓解了冷启动的问题;

(4)推荐符合度是根据节点执行协同服务时的服

务质量与任务需求的符合程度,45min时推荐符合度达到99%以上;随着协同任务量增大,部分协同服务节点的服务能力不足,导致其服务质量下降,100min时推荐符合度稳定于95%;

(5)协同盟员推荐节点与自身的网络特征和协同服务集越相似,其推荐效用越好,信任度越高。

#### 4.2.3 MCECS-MEC 智能协同服务算法性能仿真分析

从服务能力、服务均衡型、服务质量三个角度分析浪涌访问下海上边缘计算智能协同服务盟员发现算法性能。

##### 4.2.3.1 服务能力分析

MCECS-MEC 智能协同服务算法特征参数如表3所示,协同集合平均长度、访问量、任务接受率、交付成功率如图11~14所示。

表2 MCECS-MEC 云边协同盟员推荐服务特征参数表

	平均推荐节点个数	盟员推荐服务参与率	推荐盟员平均规模	推荐盟员平均服务覆盖率	推荐信任度均方差	推荐服务节点符合度	协同服务节点服务周期占比	推荐服务响应延迟(ms)	游离节点数
近邻推荐服务	221.66	99.40%	376.51	21.53%	3.66	95.11%	98.65%	19.21	9

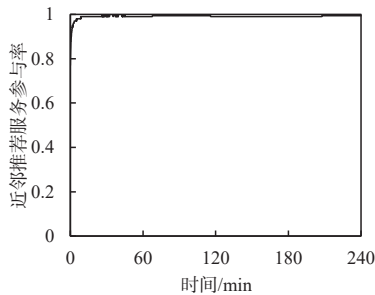


图8 协同盟员推荐服务参与率

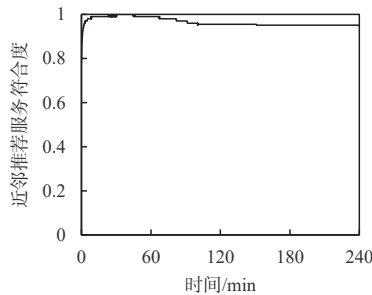


图9 推荐的协同盟员符合度

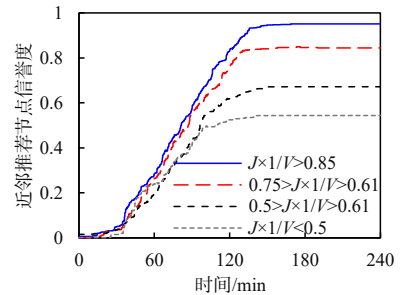


图10 MCECS-MEC 协同盟员推荐节点信任度

表3 MCECS-MEC 智能协同服务算法特征参数表

协同集合	稳定时间(min)	队列平均长度	队列长度占比	队列长度均方差	峰值服务流量(MB/min)	峰值服务流量占比	平均服务流量(MB/min)	平均服务流量占比	峰值任务并发数	平均任务并发数	服务响应延迟(ms)	服务时长周期占比
A	120	52.33	14.66%	15.96	31498.67	72.12%	16459.66	68.59%	262.48	137.16	23.41	99%
B	120	158.67	44.45%	55.55	6990.71	16.01%	4618.42	19.25%	58.25	38.49	45.23	93%
C	120	136.89	38.34%	68.36	4875.72	11.16%	2871.28	11.97%	40.63	23.93	63.47	71%
D	120	9.11	2.55%	8.38	309.33	0.71%	46.29	0.19%	2.58	0.39	137.78	21%

图11~14及表3,实验结果表明:

(1)A协同集长度占比为14.66%,承担了78.19%的访问请求,服务了68.59%的流量,完成了68.59%的计算任务;B、C和D协同集,长度占比分别为44.45%,38.34%,2.55%,分别承担了11.74%,9.56%,0.50%的访问请求,分别服务了19.25%,11.97%,0.19%的流量,分别完成了19.25%,11.97%,0.19%的计算任务;这是搭便车和自私理性节点行为核心特征,符合二八定律。

(2)A协同集盟员竭尽全力执行协同服务,任务接

收率和成功率平稳;而B、C和D协同集盟员,由于其服务能力有限,则按策略执行服务。

##### 4.2.3.2 服务均衡性分析

MCECS-MEC 协同服务节点平均负载、流量如图15~16所示。实验结果表明:

(1)节点的自私理性、搭便车行为直接导致了网络服务抖动,这种抖动将会在上级节点中不断放大,具有马太效应。

(2)MCECS-MEC 智能协同服务算法稀疏化了A协

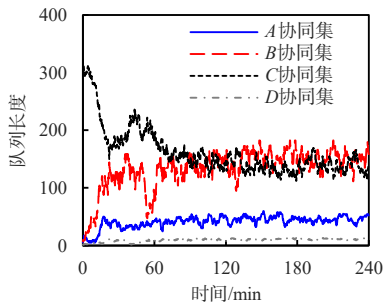


图 11 MCECS-MEC 队列平均长度

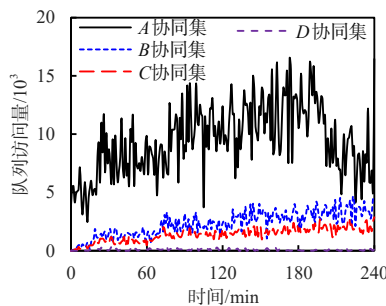


图 12 MCECS-MEC 访问量

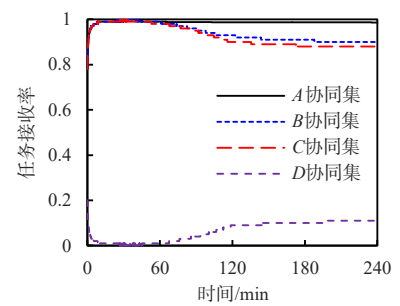


图 13 MCECS-MEC 任务接收率

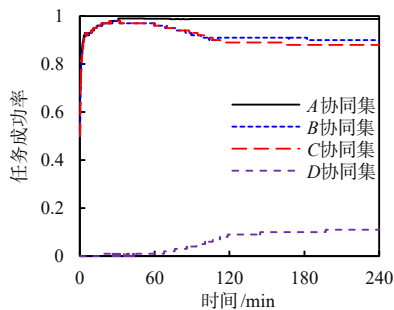


图 14 MCECS-MEC 任务交付成功率

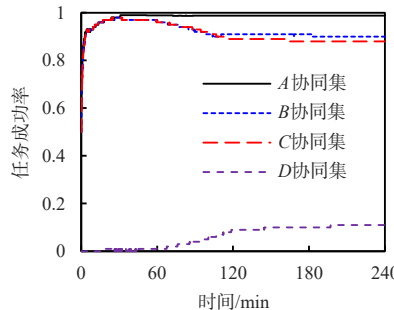


图 15 MCECS-MEC 协同服务节点负载

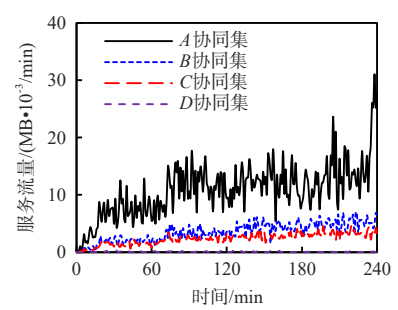


图 16 MCECS-MEC 协同服务节点流量

同集盟员选择,使得其计算负载波动较为稳定,并基于负载阈值触发,将超出A协同集服务能力的计算任务迁移至B、C和D协同集盟员中执行,防止了A协同集盟员的任务过载,减少了网络热区的产生.

#### 4.2.3.3 服务质量分析

MCECS-MEC 协同服务访问延迟、丢包率、消耗带宽、请求响应率如图 17~图 20 所示.

由图 17~20 实验结果表明:

(1)A协同集服务质量可靠、高效且平稳.

(2)A协同集盟员与B、C和D协同集盟员构建协同服务池后,A、B、C和D协同集盟员的服务带宽得到了更高效的利用,每个服务请求节点获得的服务带宽不断增长.

(3)MCECS-MEC 系统执行任务调度时,将部分不紧要、不重要的任务迁移至D协同集盟员执行,使其积累协同服务的经验,激励其参与协同服务的热情.

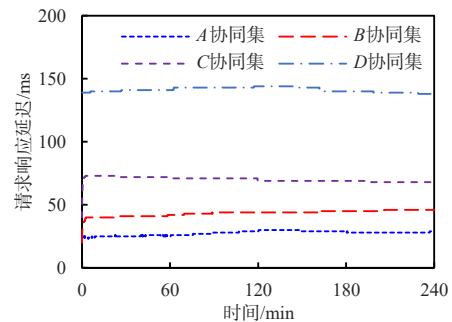


图 17 MCECS-MEC 访问延迟

#### 4.3 MCECS-MEC 系统性能对比分析

以流量、负载、信誉度、任务接收率、协同成功率、吞吐率、负载均衡等为评价指标,将 MCECS-MEC 与随机游牧 SR、按需路由 AODV、基于近邻协同过滤推荐 LCR-SR、LCR-AODV 进行对比分析. 设数据源服务器

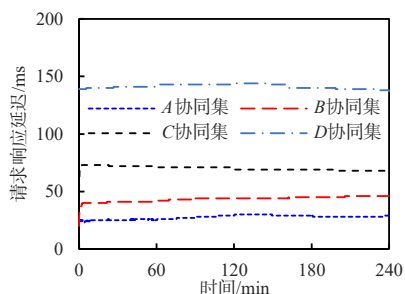


图 18 MCECS-MEC 丢包率

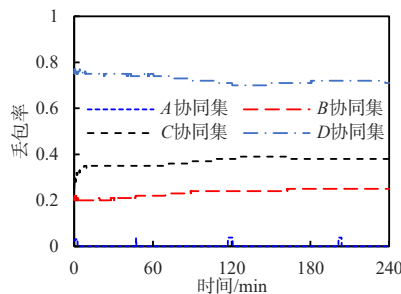


图 19 MCECS-MEC 协同服务消耗带宽

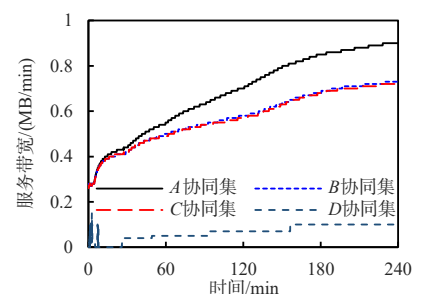


图 20 MCECS-MEC 请求响应延迟

存在 100 个待迁移计算任务,每个迁移计算任务量  $500\text{MB} \leq M \leq 1024\text{MB}$ ,对目标计算任务所在数据源服务器进行浪涌式服务请求测试.

### 4.3.1 系统性能对比分析

由图 21~图 23 和表 4,实验结果表明:

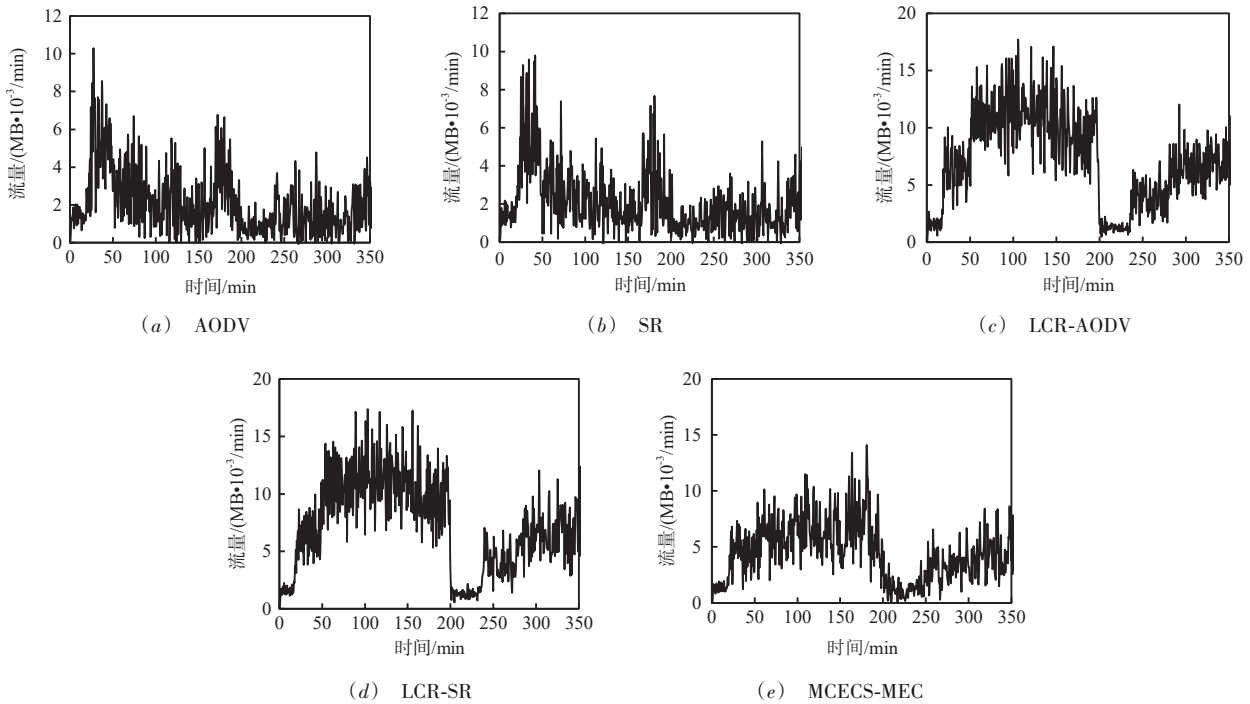


图 21 MCECS-MEC 与经典服务模型平均流量对比

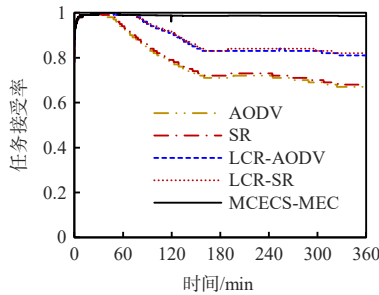


图 22 MCECS-MEC 与经典服务模型智能协同任务接收率

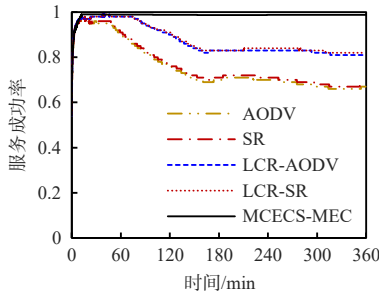


图 23 MCECS-MEC 与经典服务模型智能协同服务成功率

(1)第一阶段浪涌冲击时,LCR-AODV,LCR-SR相比于 AODV,SR,平均流量减少了 30.43%和 19.62%;MCECS-

MEC 相比于 LCR-AODV,LCR-SR 算法,平均流量减少了 20.57%和 25.95%;MCECS-MEC 调度算法相比于 AODV,SR,系统总体减少了 44.74%和 40.48%的冗余流量.

(2)第二阶段浪涌冲击时,LCR-AODV,LCR-SR 相比于 AODV,SR,平均流量减少了 37.18%和 29.11%;MCECS-MEC 相比于 LCR-AODV,LCR-SR 算法,平均流量减少了 20.57%和 25.94%;MCECS-MEC 调度算法相比于 AODV,SR,系统总体减少了 50.10%和 47.50%的冗余流量.

(3)LCR-AODV,LCR-SR 相比于 AODV,SR,最大任务并发数提高 15.07%和 16.33%,平均吞吐量提高 21.30%和 23.66%;MCECS-MEC 算法相比于 LCR-AODV,LCR-SR,最大任务并发数提高 16.11%和 16.98%,平均吞吐量提高 25.79%和 23.86%;MCECS-MEC 算法相比于 AODV,SR,最大任务并发数分别提高 33.61%和 36.08%,平均吞吐量分别提高 52.58%和 53.17%.

(4)MCECS-MEC 调度算法实现了高效、稀疏化的协同节点特征提取和任务分配,防止了优队列节点的任务过载,减少了网络热区的产生,实现了相对稳定的计算任务迁移.

(5)LCR-AODV,LCR-SR 相比于 AODV,SR,任务接收率和成功率提高 20.6%;MCECS-MEC 算法相比于 LCR-AODV,LCR-SR,任务接收率和成功率提高

表4 MCECS-MEC任务智能协同服务算法特征参数表

浪涌访问阶段	浪涌冲击	评价指标	AODV	SR	LCR-AODV	LCR-SR	MCECS-MEC
第1阶段	第1次浪涌冲击	峰值流量(MB/min)	10299.35	9789.11	10036.96	8444.16	7031.33
		平均流量(MB/min)	9299.35	8633.23	6469.65	6939.65	5138.88
	第2次浪涌冲击	峰值流量(MB/min)	5149.67	4894.55	15055.44	12666.24	10546
		平均流量(MB/min)	4328.54	3774.51	9704.475	10409.48	7708.32
	第3次浪涌冲击	峰值流量(MB/min)	2574.84	2447.28	17068.95	17737.83	15820.49
		平均流量(MB/min)	1674.83	1857.27	14556.71	15614.21	11562.48
	第4次浪涌冲击	峰值流量(MB/min)	1287.41	1223.63	5603.42	6606.74	17391.35
		平均流量(MB/min)	975.16	923.77	1835.07	3421.32	14043.72
第2阶段	第1次浪涌冲击	峰值流量(MB/min)	6777.67	7188.13	5018.48	4222.08	3515.67
		平均流量(MB/min)	5149.68	4894.56	3234.83	3469.83	2569.44
	第2次浪涌冲击	峰值流量(MB/min)	4573.83	3747.27	6022.17	5066.53	4218.8
		平均流量(MB/min)	1554.50	1365.26	3881.79	4163.18	3083.33
	第3次浪涌冲击	峰值流量(MB/min)	2587.43	3423.78	13922.18	12366.32	5062.56
		平均流量(MB/min)	1287.41	1261.63	7781.33	5063.23	3699.99
	第4次浪涌冲击	峰值流量(MB/min)	843.71	812.33	5822.31	4866.5	6075.07
		平均流量(MB/min)	583.67	623.82	3681.16	3922.79	4439.99
		平均任务接收率(%)	68.2	68	82	82.1	98.6
		平均任务成功率(%)	68.2	67	82	82.1	98.7

20.7%;MCECS-MEC算法相比于AODV,SR,系统总体服务效率提高45.6%。

4.3.2 服务均衡性对比分析

由图24、图25,实验结果表明:MCECS-MEC调度算

法能够有效解决边缘计算中存在高拥塞、单点失效、低数据分发效率问题,提高服务质量,实现负载均衡,为大规模可信边缘计算服务提供保障。

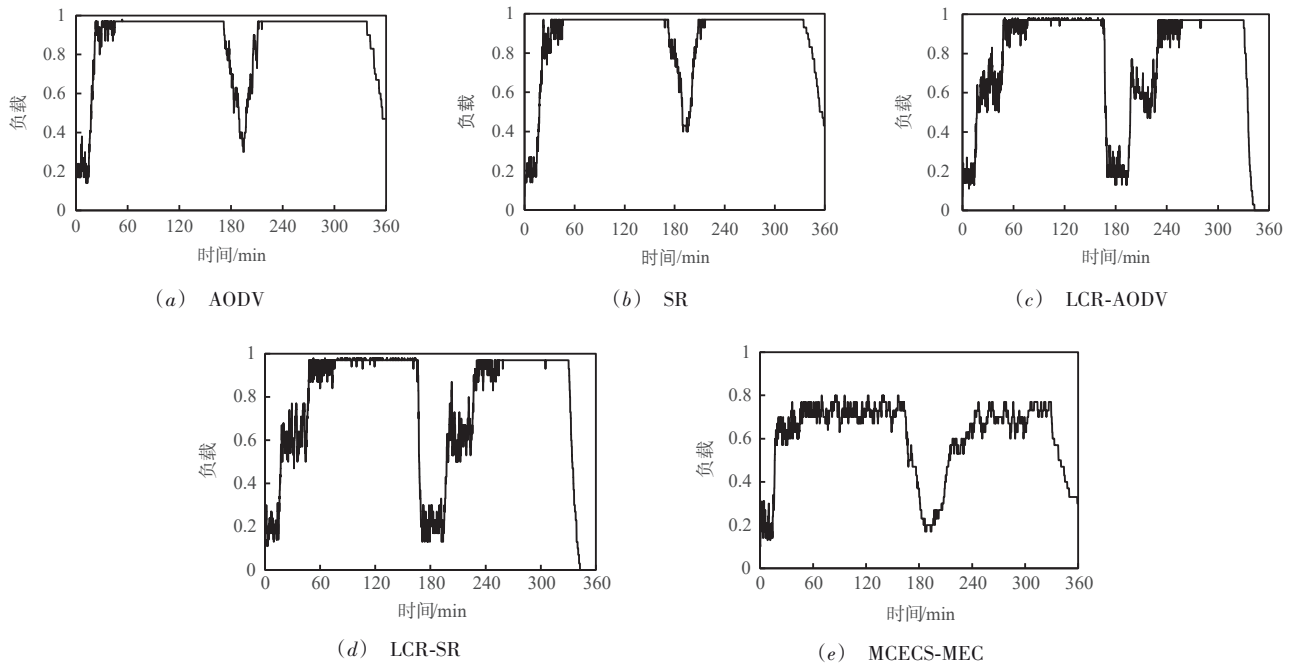


图24 MCECS-MEC与经典服务模型智能协同服务池平均负载对比

4.3.3 服务质量及开销分析

由图26~28,实验结果表明:

(1)MCECS-MEC算法相比于LCR-AODV,LCR-SR访问延迟降低了46.23%,43.22%,任务执行延迟降低

了 43.89%, 40.88%.

(2) LCR-AODV, LCR-SR 链路相比于 AODV, SR 算法带宽利用率提升 58.33%, 56.82%; MCECS-MEC 算法

相比于 LCR-AODV, LCR-SR 算法链路带宽利用率提升 85.00%, 84.21%; MCECS-MEC 算法相比于 AODV, SR 算法, 系统带宽利用率提升 93.47%.

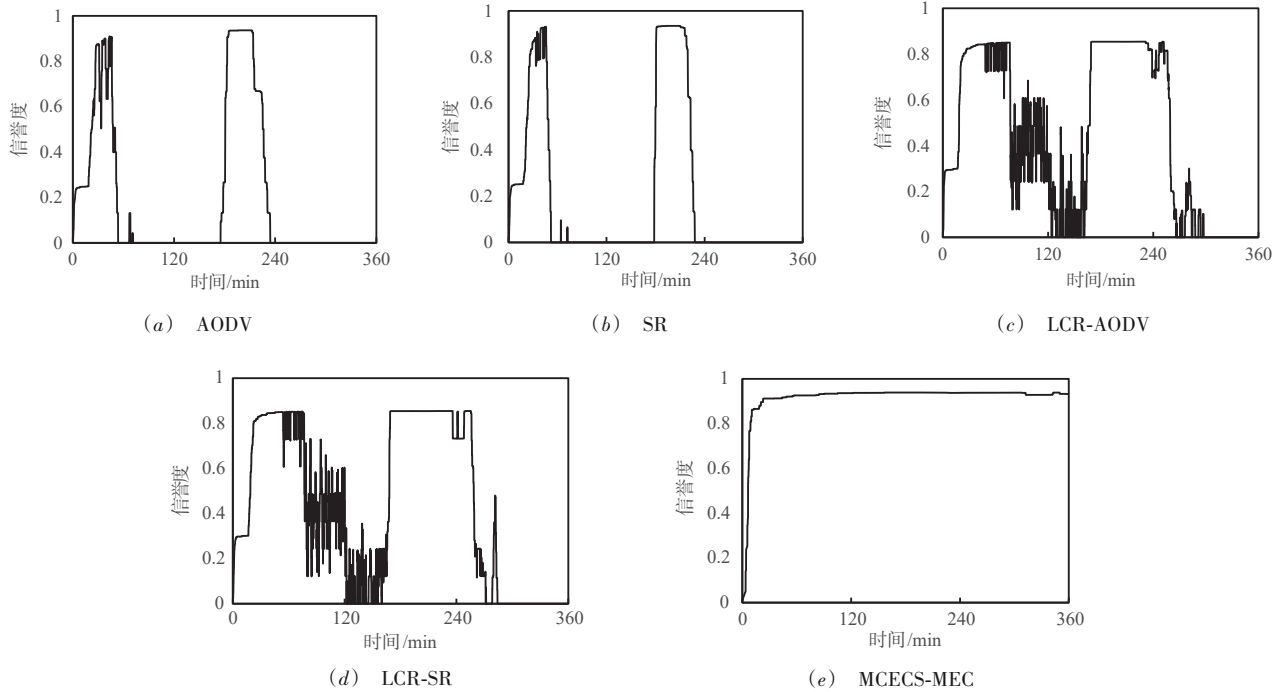


图 25 MCECS-MEC 与经典服务模型协同服务节点信誉度对比

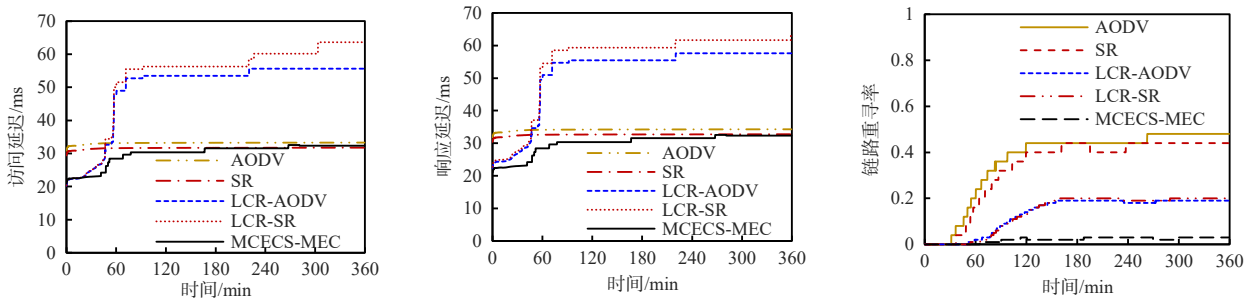


图 26 MCECS-MEC 与经典服务模型访问延迟

图 27 MCECS-MEC 与经典服务模型响应延迟

图 28 MCECS-MEC 与经典服务模型链路重寻率

### 5 总结

提出一种海上边缘计算云边智能协同服务策略模型. 利用信息捎带技术, 实现局部网络协同节点特征属性信息和推荐信息共享, 通过可信协同推荐机制构建协同服务盟员集; 融合节点综合信任度、负载评价、服务能力评价构建综合性能评价模型, 将海上边缘计算节点的性能分为优、良、中和一般 4 类, 根据规则进入相应协同集; 以低开销为约束设计稀疏、自适应、均衡、高效的搜索算法, 发现可信协同盟员, 实现可信可靠、服务均衡、快速高效的海上边缘计算的云边智能协同服务.

由于海上边缘计算服务应用具有多样、差异的需

求特征, 边缘计算设备的计算能力不一, 需将复杂的计算任务进行分割、单元化和压缩等预处理操作, 并根据其需求约束与智能设备的负载能力、资源、能耗等进行动态调度和计算迁移, 提高海上边缘计算协同服务 QoS. 在下一步工作中, 我们将针对海上边缘计算服务场景, 研究任务分割、计算智能迁移和协同等问题.

### 参考文献

[1] 夏明华, 朱又敏, 陈二虎, 等. 海洋通信的发展现状与时代挑战. 中国科学: 信息科学, 2017, 47(6): 677 - 695.

Xia M H, Zhu Y M, Chen E H, et al. The state of the art

- and challenges of marine communications[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2017, 47(6): 677 – 695. (in Chinese)
- [2] 施巍松, 张星洲, 王一帆, 等. 边缘计算: 现状与展望[J]. 计算机研究与发展, 2019, 56(1): 69 – 89.  
Shi W S, Zhang X Z, Wang Y F, et al. Edge computing: state-of-the-art and future directions[J]. Journal of Computer Research and Development, 2019, 56(1): 69 – 89. (in Chinese)
- [3] Chai R, Lin J L, Chen M L, et al. Task execution cost minimization-based joint computation offloading and resource allocation for cellular D2D MEC systems[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(4): 4110 – 4121.
- [4] 乐光学, 戴亚盛, 杨晓慧, 等. 边缘计算可信协同服务策略建模[J]. 计算机研究与发展, 2020, 57(5): 1080 – 1102.  
Yue G X, Dai Y S, Yang X H, et al. Model of trusted cooperative service for edge computing[J]. Journal of Computer Research and Development, 2020, 57(5): 1080 – 1102. (in Chinese)
- [5] Sun W, Liu J J, Yue Y L. AI-enhanced offloading in edge computing: When machine learning meets industrial IoT [J]. IEEE Network, 2019, 33(5): 68 – 74
- [6] Liu J H, Wang X, Yue G X, et al. Data sharing in VANETs based on evolutionary fuzzy game[J]. Future Generation Computer Systems, 2018, 81: 141 – 155.
- [7] Guo K, Yang M C, Zhang Y B, et al. Efficient resource assignment in mobile edge computing: A dynamic congestion-aware offloading approach[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2019, 134: 40 – 51
- [8] Yang T T, Feng H L, Gao S, et al. Two-stage offloading optimization for energy-latency tradeoff with mobile edge computing in maritime internet of things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(7): 5954 – 5963.
- [9] Yang T T, Zhang Y, Dong J. Collaborative optimization scheduling of maritime communication for mobile edge architecture[A]. 2018 IEEE International Conference on RFID Technology & Application (RFID-TA)[C]. Macau, China: IEEE, 2018. 1 – 5.

#### 作者简介



**乐光学** 男, 1963年11月出生, 博士, 嘉兴学院教授, 研究领域包括边缘计算、多云融合与协同服务、无线 Mesh 网络和移动云计算。  
E-mail: gxyue@zjxu.edu.cn



**杨忠明** 男, 1998年8月出生, 硕士研究生, 主要研究方向为边缘计算与协同服务。



**戴亚盛** 男, 1993年8月出生, 硕士, 主要研究方向为边缘计算多云融合与协同服务。  
E-mail: asdai0591@163.com



**马柏林** 男, 1961年3月出生, 博士, 嘉兴学院教授, 研究领域包括小波分析、调和分析、智能计算与数学建模。



**杨晓慧** 女, 1996年5月出生, 硕士研究生, CCF 会员, 主要研究方向为边缘计算与协同服务。



**刘建华** 男, 1978年出生, 博士, 副教授, IEEE 和 CCF 成员, 主要研究方向为分布式计算、无线通信、多媒体网络、无线传感器网络和机器学习。