



## 新型电力通信网广覆盖架构及虚拟网络映射优化方法

徐丽红<sup>1</sup>, 陈端云<sup>2</sup>, 庄书达<sup>1</sup>

(1. 国网福建省电力有限公司莆田供电公司, 福建 莆田 351199;

2. 国网福建省电力有限公司, 福建 福州 350003)

**摘要:** 为满足新型电力系统中业务通信的广覆盖、低时延以及高效资源利用的需求, 提出了新型电力通信网广覆盖架构以及在该架构下的虚拟网络映射优化方法。首先, 将卫星互联网技术融入电力通信网架构中, 形成新型的电力通信网架构, 拓展了电力通信网络的覆盖范围, 实现极端气候、自然灾害频发或偏远地区的稳定通信。其次, 基于此新型架构提出一种面向电力业务的虚拟网络映射模型。在该模型下, 将通信网络的资源利用率和时延参数作为核心优化指标, 通过对传统模拟退火算法进行改进, 实现虚拟网络映射时的低时延与高资源利用率的双重优化。最后, 仿真验证表明, 所提方法在保障广覆盖通信网络保持低时延的同时, 可以实现资源利用率的最大化, 进而提升了电力通信系统的运行效率和稳定性。

**关键词:** 卫星互联网; 广覆盖; 虚拟网络映射; 电力通信网; 低时延; 高资源利用率; 改进模拟退火算法

**中图分类号:** TM73

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2025177

## Wide coverage architecture for new power communication network and virtual network mapping optimization method

XU Lihong<sup>1</sup>, CHEN Duanyun<sup>2</sup>, ZHUANG Shuda<sup>1</sup>

1. Putian Power Supply Company, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Putian 351199, China

2. State Grid Fujian Power Co., Ltd., Fuzhou 350003, China

**Abstract:** In order to meet the needs of wide coverage, low delay and efficient resource utilization of service communication in new power system, a new power communication network with wide coverage architecture and a virtual network mapping optimization method based on this architecture were proposed. Firstly, the satellite Internet technology was integrated into electric power communication network architecture to form a new electric power communication network architecture, the coverage of the electric power communication network was expanded, and stable communication was achieved in extreme climates, natural disasters or remote areas. Secondly, based on this new architecture, a virtual network mapping model for power business was proposed. In this model, the resource utilization and de-

收稿日期: 2025-03-14; 修回日期: 2025-04-23

通信作者: 庄书达, zhuangsd1996@163.com

基金项目: 国家电网有限公司科技项目 (No.SGFJPT00XTJS2400526); 国家自然科学基金资助项目 (No.61971190)

**Foundation Items:** The Science and Technology Project Fund of State Grid Corporation of China (No.SGFJPT00XTJS2400526), The National Natural Science Foundation of China (No.6197119)

lay parameters of the communication network were taken as the core optimization indexes. By improving the traditional simulated annealing algorithm, the dual optimization of low delay and high resource utilization in virtual network mapping was realized. Finally, the simulation results show that the proposed method can maximize the resource utilization while ensuring the low delay of the wide coverage communication network, thus improving the operating efficiency and stability of the power communication system.

**Key words:** satellite Internet, wide coverage, virtual network mapping, electric power communication network, low delay, high resource utilization rate, improved simulated annealing algorithm

## 0 引言

电网规模的不断扩大、新电力系统的快速发展以及电力业务种类的日益繁多和复杂化,对电力通信系统的广覆盖需求提出了更为迫切和全面的要求。具体而言,新型电力系统不仅要求电力通信系统全面覆盖输电、变电、配电及用电<sup>[1-2]</sup>等关键环节,实现信息的实时准确传输,而且要求通信链路在极端气候、自然灾害频发或偏远无基站地区保持稳定<sup>[3-5]</sup>。为满足这一需求,亟须提出一种新型的电力通信网架构,以有效应对新型电力系统对通信网络的多元化挑战。

当前,针对电力通信网架构方面的研究已取得一定进展。新型电力系统构建了涵盖新能源发电、智能电网及源网荷储互动的通信网架构,这种架构强调安全分区以保障核心网络安全,同时实现泛在接入以支撑分布式能源的大规模接入<sup>[6]</sup>。针对电力物联网新业务提出新增互联网大区,与生产控制大区和管理信息大区形成公专一体化架构,以满足物联网业务的大带宽、低时延、高可靠性等需求<sup>[7]</sup>。这些研究均体现了电力通信网架构向更加灵活、安全、高效方向发展的趋势。

与此同时,卫星互联网技术的融入,为构建广覆盖、高可靠的电力通信系统提供了新的思路。卫星互联网可以通过规模化组网,为电力系统提供全域覆盖、低时延、高带宽的通信、导航、遥感服务,这些服务在电力规划等领域有着广泛应用,能够有效解决偏远地区通信覆盖不足等问题<sup>[3,8-10]</sup>。

此外,基于新型通信网络架构,适用于广覆盖电力业务的虚拟网络映射优化算法可以进一步提升电力通信系统的性能。文献[11]提出了一种基于节点排序的动态虚拟网络映射(time delay-virtual network mapping, TD-VNE)算法,该算法综合考虑网络拓扑重要性和资源参数,有效优化了映射结果的时延性能。为了确保电力业务的时延和可靠性需求,文献[12]提出了在虚拟网络映射时,在节点映射阶段考虑拓扑属性和相邻节点重要性,实现负载均衡;在链路映射阶段,提出基于遗传算法的链路映射算法(genetic-algorithm based mapping algorithm, GLMA),优化链路时延和负载比方差。上述方法均未全面兼顾电力通信系统中的广覆盖性、低时延性以及高效资源利用的综合性需求。

在上述研究的基础上,本文提出将卫星互联网技术融入新型电力通信网架构中,更好地满足电力通信系统对于广覆盖的需求。卫星互联网的加入会存在通信时延的增加和资源浪费等问题,因此,在满足广覆盖的需求下,选择具有更低时延及更高资源利用效率的通信链路进行映射,需要提出适用于该广覆盖架构下的虚拟网络映射算法。本文所提出的虚拟网络映射算法能够实时且动态地将资源分配给各个虚拟网络,同时有效最大化通信网络的资源利用率并降低时延。

## 1 新型电力系统的通信网架构

将卫星互联网技术融入电力通信网架构中,创新性地融合了卫星通信、移动通信及电力专用



通信技术，融入卫星互联网的广覆盖新型电力通信网如图1所示。此架构可在极端气候、自然灾害、偏远无基站以及信号弱覆盖区域，利用卫星互联网的广泛覆盖性，维持关键通信链路不间断，拓展了电力通信的广覆盖与灵活接入的能力，确保电力数据的实时精准传输与调控。

图1所展示的新型电力通信网架构由业务层、接入层、骨干层和平台层构成，各层级间相互协作，业务层的需求驱动接入层数据上传，数据经由骨干层高效传输至平台层进行综合处理与分析。

(1) 终端层。其核心主要由新型电力系统调度对象组成，这些实体覆盖了源网荷储的各个环节，囊括了数量庞大且地理分布极为广泛的分布式可再生能源发电单元，这些单元作为新型电力体系的重要组成部分，对于实现灵活高效的电力调度、优化资源配置及促进能源绿色低碳转型具有至关重要的意义。

(2) 接入层。电力通信网中的接入层主要确保终端用户设备可以无缝连接到网络，并为电力通信网中的各项业务提供必要的接入途径。

(3) 骨干层。电力通信网的骨干层主要负责汇聚、转发来自接入层的信息，并进行区域调度。它采用如光纤通信、电力线载波通信等多种先进的通信技术手段，确保电力数据的实时传输和精确调控，为电力系统的安全、可靠运行提供有力保障。

(4) 尽管卫星互联网的融入显著提升了电力通信网络的广覆盖能力，但其固有的传输时延使其难以满足部分对实时性要求高的电力业务需求。因此，在新型电力系统中，需根据业务特性进行差异化设计：对时延敏感的实时控制类业务（如继电保护、快速频率调节）需优先采用地面低时延通信技术，而卫星通信可作为广域监测、偏远地区数据采集等非实时或容时业务的备份或补充。新型电力系统中不同业务的分类及补偿策

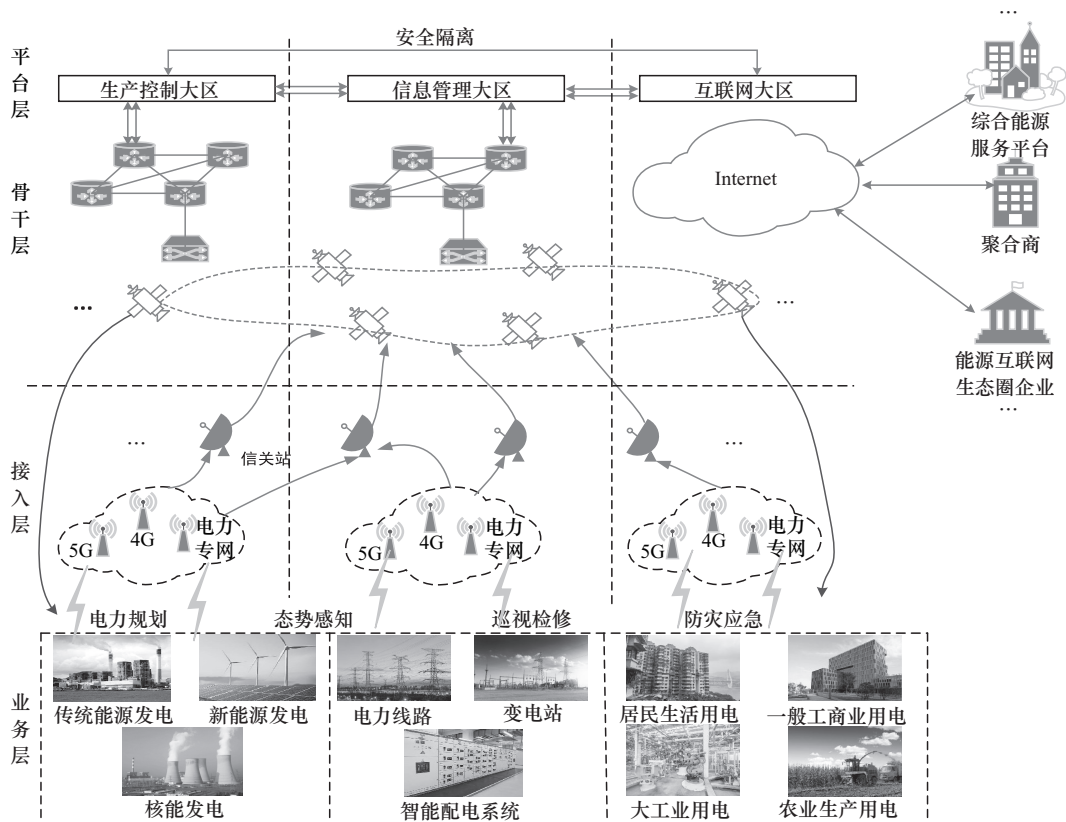


图1 融入卫星互联网的广覆盖新型电力通信网

略见表1, 针对新型电力系统中的不同类型业务补充了备选增强策略。

## 2 面向电力业务的低时延、高资源利用率的虚拟网络优化映射策略

基于融入卫星互联网的新型电力通信网架构, 虽然增强了该架构的广覆盖能力, 但同时会存在通信时延增加和资源浪费等问题。因此, 为了实现广泛覆盖并优化时延与资源利用率, 本节提出了一种适用于该架构的虚拟网络映射算法。

### 2.1 系统模型

本节所提出的虚拟网络映射模型由虚拟电网层和底层物理网络层组成, 虚拟网络映射模型如图2所示, 来自用户的不同业务请求通过电网虚拟化平台, 创建出由运行不同电网业务的虚拟网络所构成的虚拟网络层, 并为这些虚拟网络分配

资源切片; 电网虚拟化平台将来自电网中物联网设备的物理资源整合到一起并进行统一的管理和分配, 形成底层物理网络层。

#### 2.1.1 约束条件

##### (1) 节点约束

在电力系统的实际场景中, 各种特定的电网硬件设备被配置于不同的物理网络节点位置。因此, 在进行电力通信网络的虚拟化映射过程中, 不仅要关注节点的计算能力的限制, 还必须充分考虑到节点上安装的多种电力设备的特定约束条件。

##### ① 节点资源约束

$$cpu(n^v) \leq cpu(n^s) \quad (1)$$

其中,  $cpu(n^v)$ 与 $cpu(n^s)$ 分别代表虚拟节点 $n^v$ 的计算资源需求量及其所映射的物理节点 $n^s$ 当前剩余的可用计算资源量。该映射的约束条件在于, 虚拟节点的资源需求不能超过物理节点的可用资源。

表1 新型电力系统中不同业务的分类及补偿策略

业务大类	业务子类	典型场景	时延要求	卫星适用性	补偿/增强技术	备选地面通信
实时控制类	继电保护	变电站故障隔离	<15 ms	不适用	5G URLLC 切片网络	光纤+5G 冗余链路
	快速频率调节	新能源场站调频控制	<50 ms	有限适用	星载边缘计算时延预测补偿算法	电力专网 PLC+微波
广域监测类	PMU 动态监测	跨区域电网动态稳定监测	100~200 ms	适用	星间激光链路多普勒频移补偿	4G/5G 公网聚合传输
	SCADA 数据采集	偏远地区配电终端监测	200~500 ms	适用	缓存队列优化非对称传输协议	LoRaWAN+光纤中继
应急通信类	灾备指挥通信	台风/地震灾害现场指挥	500 ms~2 s	适用	多星链路快速切换自适应编码调制	系留无人机基站
	移动巡检通信	输电线路无人机巡检	1~5 s	适用	视频流智能压缩断点续传机制	5G 车载移动基站
信息管理类	电力市场交易	跨省绿电交易数据同步	<1 s	有条件适用	区块链存证加速数据分级传输策略	政务专网+量子通信
	设备状态评估	主变振动声纹分析	分钟级	适用	星上 AI 预处理批量数据分片传输	光纤+Wi-Fi6 复合传输

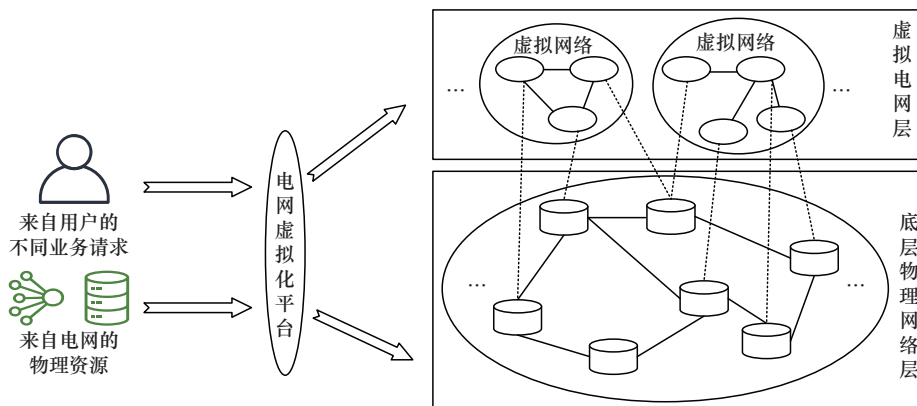


图2 虚拟网络映射模型



## ② 电力设备约束

电力通信网应用中, 电网节点功能及部署设备类型数量各异, 所部署电力设备类型与数量亦不相同<sup>[13]</sup>。需要确保虚拟节点请求的设备类型在物理节点已部署类型范围内, 且虚拟网络映射算法应依据物理节点硬件及空间限制, 合理分配设备数量, 以预防过载、避免资源浪费, 实现电网资源高效利用。

$$EDN_i \geq 1 \quad (2)$$

其中,  $EDN_i$ 代表第*i*个物理节点上的电力设备数量, 为满足电力设备约束条件,  $EDN_i$ 需要大于或等于1。

## ③ 节点处理时间约束

$$D^{nv} \geq D^{ns} \quad (3)$$

其中,  $D^{nv}$ 为虚拟节点 $n^v$ 的数据处理时延,  $D^{ns}$ 为其映射的物理节点 $n^s$ 所能提供的最大处理时延。该映射关系成立的前提是虚拟节点的处理时延不能超过其映射到的物理节点所能提供的处理时延能力。

### (2) 链路约束

#### ① 链路资源约束

$$b(l^v) \geq b(l^s) \quad (4)$$

其中,  $b(l^v)$ 与 $b(l^s)$ 分别为虚拟链路 $l^v$ 的带宽资源需求量与其所映射的底层物理链路 $l^s$ 当前剩余的可用带宽资源量。该约束保证了物理链路的可用带宽资源不低于其承载的虚拟链路所需的带宽。

#### ② 总时延约束

底层物理路径从源节点到目的节点之间的总时延, 将其与虚拟网络的时延要求进行比较, 如果总时延小于或等于虚拟网络的时延要求, 则认为满足时延约束条件。

$$D^{ls} \leq D^{lv} \quad (5)$$

其中,  $D^{ls}$ 为映射后物理路径的总体时延,  $D^{lv}$ 为虚拟网络的时延要求。

#### ③ 卫星天线约束

在卫星互联网通信层的虚拟网络映射模型中, 卫星之间的通信链路建立是一个复杂且关键的过程。在此过程中, 必须充分考虑卫星节点间

是否存在可用的天线资源, 以及当前卫星剩余的可用于与其他卫星建立通信链路的的天线数量是否满足最低要求<sup>[14]</sup>。若某卫星剩余的天线数量不足, 则无法与其他卫星建立有效的通信链路, 这将影响卫星互联网通信层的整体性能和稳定性。

### 2.1.2 目标函数

#### (1) 整体资源利用率

整体资源利用率能够反映出网络系统的资源分配是否合理、是否存在资源浪费等问题, 从而为网络优化和资源管理提供重要依据。本文中的资源利用率计算式如下所示:

$$\text{Overall}(U) = \frac{U(n^s) + U(l^s)}{2} \quad (6)$$

$$U(n^s) = \frac{\text{CPU}_{\text{all}}(n^s) - \text{remain}(n^s)}{\text{CPU}_{\text{all}}(n^s)} \quad (7)$$

$$U(l^s) = \frac{\text{BW}_{\text{all}}(l^s) - \text{remain}(l^s)}{\text{BW}_{\text{all}}(l^s)} \quad (8)$$

其中,  $U(n^s)$ 表示映射后底层物理网络的节点资源利用率,  $U(l^s)$ 表示映射后底层物理网络的链路资源利用率,  $\text{CPU}_{\text{all}}(n^s)$ 表示底层物理网络节点计算资源的总和,  $\text{remain}(n^s)$ 表示剩余的底层物理网络节点计算资源,  $\text{BW}_{\text{all}}(l^s)$ 表示底层物理网络链路带宽资源的总和,  $\text{remain}(l^s)$ 表示剩余的底层物理网络链路带宽资源。

#### (2) 时延参数

当一条星间链路要承担空间任务时, 会引发建立链路的过程, 而天线的偏转、对齐等都需要在链路建立过程中进行, 所以链路的建立需要一定的时间。因此, 卫星通信网络通信时的时延考虑星间链路建立所需的时间和星间链路在通信时的时延2个部分, 用 $De_1$ 表示它们的总和, 计算式如下:

$$De_1(l^s) = \sum_{l^s \in L^s} D_{\text{establish}}(l^s) + D_{\text{process}}(l^s) \quad (9)$$

其中,  $D_{\text{establish}}(l^s)$ 表示星间链路建立所需的时间,

$D_{\text{process}}(l^s)$ 表示星间链路通信时的时延。如果虚拟节点映射在已建立物理链路的物理节点间, 则  $D_{\text{establish}}=0$ 。

其次, 对于地面网络而言, 完成一次虚拟映射的网络总体传播时延, 包括网络总体的节点时延和链路时延, 式(10)中用  $\text{De}_2$ 表示总体传播时延, 并且用计算式可以表示为:

$$\text{De}_2(l^s) = \sum_{n^v \in N^v} \sum_{n^s \in R(n^v)} D(n^s) + \sum_{l^v \in L^v} \sum_{l^s \in R(l^v)} D(l^s) \quad (10)$$

其中,  $R(n^v)$ 表示映射该虚拟节点的物理节点;  $R(l^v)$ 表示映射该虚拟链路的物理路径。

综上, 将两部分时延进行合并, 得到该通信网络的总体时延参数计算式:

$$\text{Delay} = \text{De}_1(l^s) + \text{De}_2(l^s) \quad (11)$$

为了实现最低时延, 需要找到可使时延参数  $\text{Delay}$  最小化的映射解。同理, 为了实现最高资源利用率, 定义  $1-\text{Overall}(U)=\text{Rs}$ , 需要找到可使资源利用率参数  $\text{Rs}$  最小化的映射解。

### (3) 恶化解接受概率

恶化解接受概率是指在模拟退火算法迭代过程中, 以一定的概率接受那些使目标函数值劣化的解<sup>[15]</sup>。本文提出了在模拟退火算法中恶化解接受概率的通用表达式, 以综合考虑整体资源利用率和时延参数这2个目标, 计算式如下:

$$P = a \cdot e^{-\frac{\text{Delay}}{\text{Delay}_{\text{max}} \times T}} + b \cdot e^{-\frac{\text{Rs}}{\text{Rs}_{\text{max}} \times T}} \quad (12)$$

其中, 参数  $a$  与  $b$  的赋值依据算法运行过程中不同的跳出局部最优解的策略而定, 有关这些参数设置的详细阐释, 参阅本文第2.2.2节。

## 2.2 适用虚拟网络映射的改进型模拟退火算法

由于电网中部署了不同类型和数量的电力设备, 这些设备对虚拟网络映射构成了多元约束, 使得映射过程变得复杂。因此, 算法在迭代过程中需要能够不断地启发式搜索满足所有约束条件

的映射解。为了实现这一目标, 需要对传统的模拟退火算法进行改进, 例如, 改进初始解的寻找方法、动态调整邻解的搜索范围等, 以提高算法的收敛性能和全局搜索能力。

### 2.2.1 算法改进

#### (1) 改进算法的初始解

根据各类电力业务在通信时段内各节点上电力设备所需的带宽量、计算资源以及时延情况的不同, 运用一个预设的节点排序公式, 对所有节点进行排序。

节点排序计算式为:

$$\text{NS} = \frac{R}{\mu_0 D} \quad (13)$$

其中,  $\text{NS}$ 代表节点的排序分数, 该分数主要由节点资源需求量  $R$  和节点处理时延  $D$  构成。  $\mu_0$  为权重因子, 用以控制时延  $D$  和节点资源  $R$  之间的比重。节点资源  $R$  越大, 节点处理时延  $D$  越短, 其优先级越高。该计算式对虚拟节点和物理节点排序时都通用。

式(14)为资源需求量  $R$  的计算式, 表示节点的计算资源及其周围的可用链路可提供的带宽资源量的总和。

$$R = \mu_1 \text{cpu}(n) + \sum_{l \in C} \mu_2 \text{bw}(l) \quad (14)$$

其中,  $C$  为节点  $n$  周围的可用链路集合,  $\mu_1$  与  $\mu_2$  为权重因子, 用以控制节点 CPU 资源和节点相邻链路带宽资源在节点资源度中所占的比重, 在本文中均取1。

模拟退火算法寻找初始解流程如图3所示。

最后, 在节点映射完成后进行链路映射, 链路映射阶段采用 D 最短路径优化算法, 在多个可能的路径中选择最优的路径进行映射。

#### (2) 改进的邻解搜索范围

在算法迭代初期,  $\text{Rs}$  和  $\text{Delay}$  还比较大, 虚拟网络映射到物理网络的映射解  $\text{Rs}$  和  $\text{Delay}$  的下



降空间比较大, 要找到更好的映射解不需要太大的邻解搜索范围。迭代末期, 映射解的Rs和Delay已经相对较小, 此时虚拟网络映射到物理网络映射解的Rs和Delay下降空间很小, 要找到更好的映射解, 需要更大的邻解搜索范围。

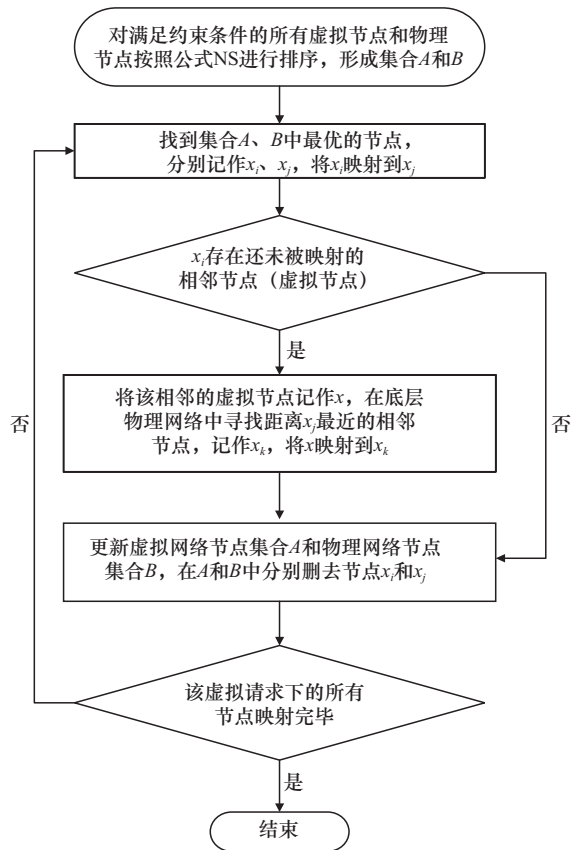


图3 模拟退火算法寻找初始解流程

因此, 为了解决算法迭代过程中邻解搜索范围需求不断变化的问题, 需要采用动态的邻解搜索范围策略。将邻解搜索范围定义为每轮迭代中重新映射的虚拟节点的数量, 动态的邻解搜索范围计算式为:

$$S = \left[ \alpha \cdot \left( e^{-\frac{T}{T_{ini}} + \beta} \right) \right] \quad (15)$$

其中,  $S$ 表示每轮迭代中重映射的虚拟节点的数量,  $T$ 表示当前温度,  $T_{ini}$ 表示初始温度, 邻解搜索范围 $S$ 随着迭代温度 $T$ 的降低而逐渐扩大。

## 2.2.2 算法流程

在模拟退火过程中, 初始温度应足够高, 使得在算法初期能够接受大多数的状态转移, 增加搜索到全局最优解的概率, 因此, 初始温度 $T_{ini}$ 设置为100 000; 温度每次降低10%, 在每个温度下, 算法会继续进行循环迭代, 循环次数越多, 算法越能够充分探索解空间并找到该温度下的最优解或近似最优解, 同时考虑到算法的效率, 循环次数设置为200次; 当温度降低到终止温度 $T_{end}=4 \times 10^{-5}$ 以下时, 算法将停止迭代并输出搜索过程当中的最优解或近似最优解。

将初始解代入改进的模拟退火算法当中, 寻找在资源利用率和时延方面效果最好的解。改进的模拟退火算法流程如图4所示。

鉴于同时涉及了资源利用率和时延参数, 因此需要对这两者进行归一化处理以确保其可比性。

(1) 只有资源利用率结果恶化时,  $a$ 取1,  $b$ 取0, 接受概率为:

$$P_1 = e^{-\frac{\text{Delay}}{\text{Delay}_{\max} \times T}} \quad (16)$$

(2) 只有时延参数结果恶化时,  $a$ 取0,  $b$ 取1, 接受概率为:

$$P_2 = e^{-\frac{Rs}{Rs_{\max} \times T}} \quad (17)$$

(3) 资源利用率和时延参数都恶化时,  $a$ 和 $b$ 都取1/2, 接受概率为:

$$P_3 = \frac{1}{2} e^{-\frac{\text{Delay}}{\text{Delay}_{\max} \times T}} + \frac{1}{2} e^{-\frac{Rs}{Rs_{\max} \times T}} \quad (18)$$

$\text{Delay}_{\max}$ 表示在映射过程中最大的时延参数值,  $Rs_{\max}$ 表示在映射过程中最大的资源利用率值。

## 2.3 仿真与分析

### 2.3.1 仿真环境与参数设置

本文利用MATLAB软件对所提的改进模拟

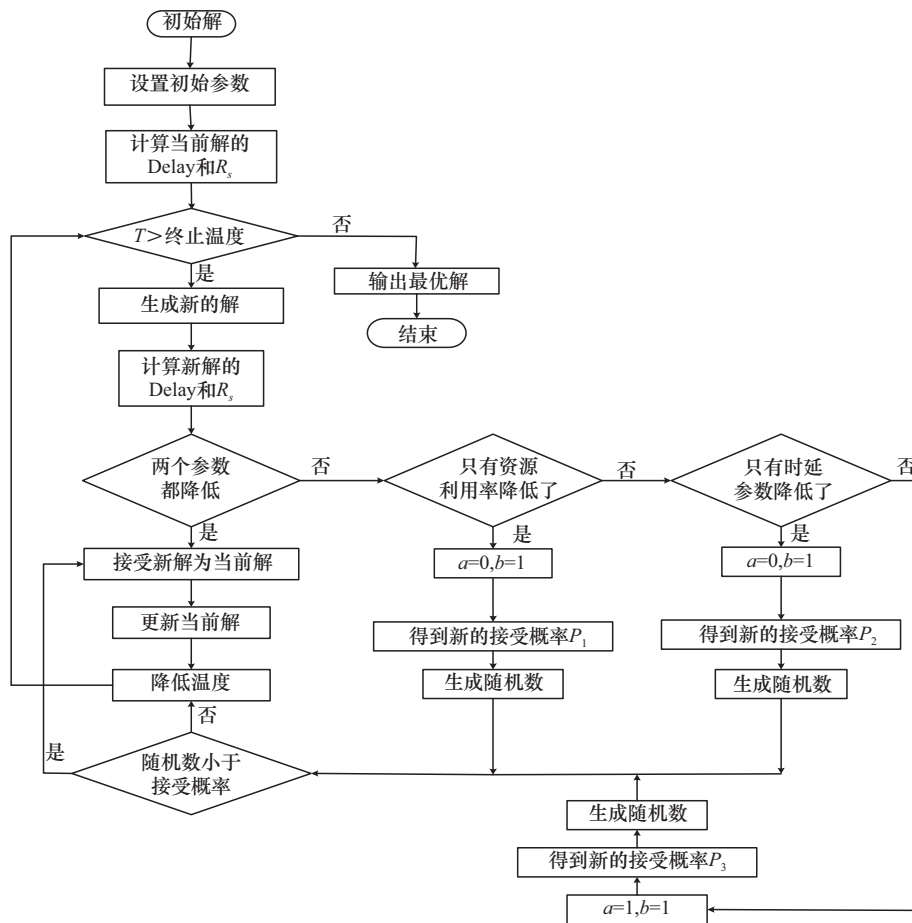


图4 改进的模拟退火算法流程

退火算法的虚拟网络映射方法 (improved simulated annealing algorithm, ISAA) 进行仿真, 并与 GLMA<sup>[11]</sup> 和传统模拟退火算法 (SA 算法) 在长期接受率、长期映射收益开销比、时延方面进行比较。其中, GLMA 通过优先级排序和遗传算法实现虚拟网络映射。物理网络仿真参数见表 2, 虚拟网络请求仿真参数见表 3, 总的运行时间为 15 000 个时间单位。

表2 物理网络仿真参数

网络属性	数值分布
底层物理网络节点数	200
底层物理网络链路数	1 000
节点 CPU 资源	[20,100] 均匀分布
链路带宽资源	[20,100] 均匀分布
物理链路时延	1 个时间单位
节点处理时延	1 个时间单位

表3 虚拟网络请求仿真参数

网络属性	数值分布
虚拟网络请求生存时间	500 个时间单位
虚拟网络到达率	服从 0.1 的泊松分布
虚拟网络节点数	[5,15], 均匀分布
节点 CPU 资源	[0,20], 均匀分布
链路带宽资源	[0,20], 均匀分布
虚拟链路时延	[1,5], 均匀分布
节点处理时延	1 个时间单位

### 2.3.2 仿真结果分析

#### (1) 长期接受率

长期接受率是指成功映射的虚拟网络请求数在运行时间  $T$  内到达的虚拟网络请求数中所占的比例。虚拟网络请求接受率仿真结果如图 5 所示, 展示了 15 000 个时间单位内不同算法的运





行状况, 观察到接受率随时间推移逐渐趋于稳定, 并持续保持不变。

$$\omega = \frac{\sum_{t=0}^{\infty} \text{VNR}_{\text{success}}^t}{\sum_{t=0}^{\infty} \text{VNR}_{\text{total}}^t} \quad (19)$$

其中,  $\text{VNR}_{\text{success}}^t$  表示当前  $t$  时刻成功接受的 VNR 数量,  $\text{VNR}_{\text{total}}^t$  表示当前  $t$  时刻的 VNR 总数量。

ISAA 基于优先级的排序与映射策略, 从而提高虚拟网络请求的接受率。由图 5 可知, ISAA 的接受率比 SA、GLMA 的接受率分别大致提高了 20%、44%。

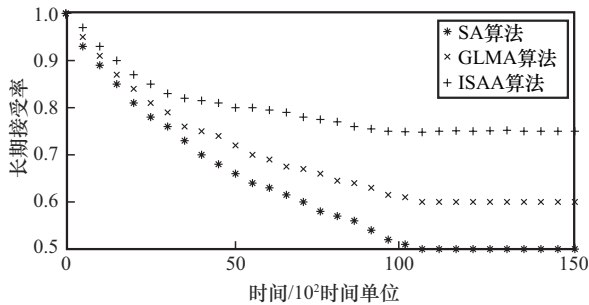


图5 虚拟网络请求接受率仿真结果

## (2) 长期映射收益开销比

长期映射收益开销比是评估虚拟网络映射效果的关键指标, 它体现了在特定时间段内, 虚拟网络所获得的收益与其投入成本之间的比率, 用以衡量虚拟网络映射过程中网络资源的整体利用效率。虚拟网络映射资源需求 Revenue 和资源消耗成本 Cost 计算式如下:

$$\text{Revenue} = \sum_{n^v \in N^v} \text{cpu}(n^v) + \sum_{l^v \in L^v} b(l^v) \quad (20)$$

$$\text{Cost} = \sum_{n^v \in N^v} \text{cpu}(n^v) + \sum_{l^v \in L^v} |\text{path}(l^v)| b(l^v) \quad (21)$$

其中,  $|\text{path}(l^v)|$  表示虚拟链路  $l^v$  在物理网络中所映射的物理路径的长度。

综上, 长期映射收益开销比的计算式如下:

$$\psi = \frac{\text{Revenue}}{\text{Cost}} \quad (22)$$

ISAA 将资源利用率设为优化目标, 通过模拟物理退火过程, 有效探索资源分配的全局最优配置, 而 GLMA 和 SA 中未考虑资源利用因素, 因此 ISAA 在长期映射收益开销比方面优于其他 2 种算法。映射长期运行后所获得的收益和成本如图 6 所示。

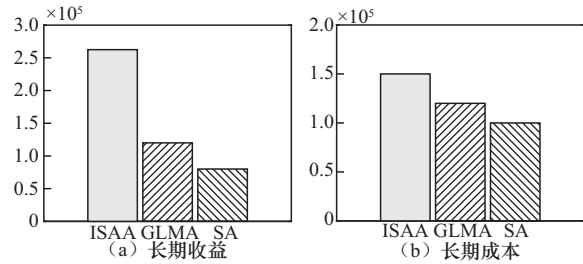


图6 映射长期运行后所获得的收益和消耗成本

长期映射收益开销比如图 7 所示, ISAA 相对比于 GLMA 和 SA 算法具有更好的收益以及长期映射收益开销比。

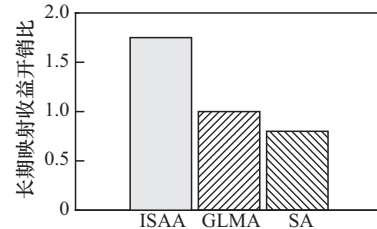


图7 长期映射收益开销比

## (3) 平均网络时延

平均网络时延是指在运行时间  $T$  的条件下, 网络总体时延和网络节点和链路数总和的比值。

$$\text{AveDelay} = \frac{\text{Delay}}{\text{NUM}(N^v) + \text{NUM}(E^v)} \quad (23)$$

其中, Delay 为映射时的处理时延、 $\text{NUM}(N^v)$  和  $\text{NUM}(E^v)$  分别为虚拟网络请求中虚拟节点和虚拟链路的数量。

平均网络传播时延的仿真结果如图 8 所示。ISAA 通过全局搜索寻找平均时延最低的最优路径, 为构建低时延的虚拟网络环境提供支持。SA 由于缺乏基于优先级的排序与映射策略, 以及使

用固定的邻解搜索范围,增加了平均网络时延。并且 ISAA 在平均网络传播时延方面相较于 GLMA,提升了20%左右。

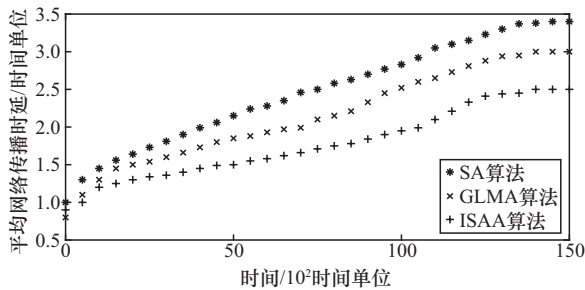


图8 平均网络传播时延的仿真结果

### 3 结束语

基于当下新型电力系统在通信时广泛覆盖、低时延和高效资源利用的需求,本文提出将卫星互联网技术融入电力通信网架构中以实现通信的广覆盖,同时提出一种面向电力业务的虚拟网络映射模型。在此基础上,本文采用改进的模拟退火算法,将资源利用率和时延参数作为核心优化指标,通过算法优化实现了在保障通信网络低时延的同时,资源利用率的最大化。考虑无线通信的不足,今后需要结合光纤通信等构建异构电力通信网络架构并对相关业务映射方法开展深入的研究。

### 参考文献:

[1] 黄杰,肖志清,毛冬.面向电力物联网的云边数据协同方法[J]. 电力信息与通信技术, 2022, 20(1): 35-42.  
HUANG J, XIAO Z Q, MAO D. Cloud-edge data collaboration method for power IoTs[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2022, 20(1): 35-42.

[2] 谢可,王剑锋,金尧,等.电力物联网关键技术研究综述[J]. 电力信息与通信技术, 2022, 20(1): 1-12.  
XIE K, WANG J F, JIN Y, et al. Review of key technologies for power Internet of things[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2022, 20(1): 1-12.

[3] 周全,周柯,金庆忍,等.卫星互联网赋能新型电力系统创新应用[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(6): 42-61.  
ZHOU Q, ZHOU K, JIN Q R, et al. Novel applications of satel-

lite Internet enabling new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(6): 42-61.

[4] 朱亮,戚少博,杨波,等.低轨宽带卫星互联网承载电网业务应用[J]. 天地一体化信息网络, 2023, 4(2): 103-113.  
ZHU L, QI S B, YANG B, et al. Application of the power grid business carrying on low earth orbit broadband satellite Internet[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2023, 4(2): 103-113.

[5] 别朝红,卞艺衡,张理寅,等.新型电力系统应对极端事件的风险防范与应急管理关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(18): 7049-7068.  
BIE Z H, BIAN Y H, ZHANG L Y, et al. Key technologies of risk prevention and emergency management against extreme events for new power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(18): 7049-7068.

[6] 欧清海,王盛鑫,余蕊,等.面向新型电力系统的电力通信网需求及应用场景探索[J]. 供用电, 2022, 39(2): 2-8, 21.  
OU Q H, WANG S X, SHE R, et al. Exploration of power communication network requirements and application scenarios for new power systems[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(2): 2-8, 21.

[7] 刘林,祁兵,李彬,等.面向电力物联网新业务的电力通信网需求及发展趋势[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 3114-3130.  
LIU L, QI B, LI B, et al. Requirements and developing trends of electric power communication network for new services in electric Internet of things[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 3114-3130.

[8] 赵亚飞,周家恩,王鑫洋,等.面向卫星通信的6G雾计算网络技术研究与展望[J]. 无线电通信技术, 2023, 49(5): 834-841.  
ZHAO Y F, ZHOU J E, WANG X Y, et al. Research and prospect of 6G fog computing network for satellite communication[J]. Radio Communications Technology, 2023, 49(5): 834-841.

[9] NGUYEN D C, DING M, PATHIRANA P N, et al. 6G Internet of things: a comprehensive survey[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(1): 359-383.

[10] 王鹏,祝思婷,李辰,等.卫星互联网标准化发展分析[J]. 无线电通信技术, 2023, 49(5): 803-808.  
WANG P, ZHU S T, LI C, et al. Analysis on development of satellite Internet standardization[J]. Radio Communications Technology, 2023, 49(5): 803-808.

[11] 杨超.基于时延优化的虚拟网络映射算法研究[D].南京:南京邮电大学, 2022.  
YANG C. Research on virtual network embedding algorithm based on delay optimization [D]. Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2022.



- [12] 郑伟军, 徐宏, 王征, 等. 基于电力业务时延敏感度和服务可靠性的虚拟网络映射方法[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2021, 41(6): 10-17.  
ZHENG W J, XU H, WANG Z, et al. Virtual network mapping method based on power service delay sensitivity and service reliability[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, 41(6): 10-17.
- [13] 方齐昱. 面向电力通信网的虚拟网络映射系统的设计与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.  
FANG Q Y. Design and implementation of virtual network mapping system for electric power communication network[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [14] 何晓春. 面向卫星网络能效优化的虚拟网络映射算法[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.  
HE X C. Virtual network embedding algorithm for satellite network energy efficiency optimization[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [15] 程海涛, 柯鹏. 能量收集技术驱动的移动边缘计算卸载策略[J]. 计算机应用与软件, 2024, 41(12): 77-85, 160.  
CHENG H T, KE P. Computation offloading strategy driven by energy harvesting technology in mobile edge computing[J]. Computer Applications and Software, 2024, 41(12): 77-85, 160.

[作者简介]



徐丽红 (1978-), 女, 国网福建省电力有限公司莆田供电公司高级工程师, 主要研究方向为电力系统光传输通信、无线通信。



陈端云 (1977-), 男, 国网福建省电力有限公司高级工程师, 主要研究方向为电力系统光传输通信、无线通信。



庄书达 (1996-), 男, 国网福建省电力有限公司莆田供电公司助理工程师, 主要研究方向为电力系统光传输通信、无线通信。