

非线性 EH 模型下基于 NOMA 的 WP-MEC 卸载优化

段云阁¹ 富爽^{1*}

DUAN Yunge FU Shuang

摘要

在大规模数据采集和实时处理需求日益增长的背景下, 将移动边缘计算 (mobile edge computing, MEC) 与无线供电技术 (wireless power transfer, WPT) 相结合的研究正逐步成为物联网 (internet of things, IoT) 领域的热点方向。因此, 文章在更贴近实际应用场景的非线性能量收集 (energy harvesting, EH) 模型下, 研究了基于非正交多址技术 (non-orthogonal multiple access, NOMA) 的无线供电移动边缘计算 (wireless powered mobile edge computing, WP-MEC) 网络, 以应对物联网系统在计算能力和能源供应方面的双重挑战。通过联合优化物联网设备 (wireless devices, WDs) 的卸载时间、卸载功率以及能量发射端的功率分配, 最大化系统的总计算位数。针对所提非凸优化问题, 研究设计了一种基于逐次凸逼近 (successive convex approximation, SCA) 的迭代优化算法。仿真实验结果表明, 所提出的方案能够显著提升系统的计算效率, 为物联网系统的性能优化提供了新的思路。

关键词

移动边缘计算; 无线能量传输; 非正交多址接入; 非线性能量收集

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.10.021

0 引言

随着人工智能物联网 (artificial intelligence & internet of things, AIoT) 与移动边缘计算 (mobile edge computing, MEC) 的深度融合, 下一代智能物联网基础设施正在逐步构建。MEC 不仅提升了系统响应速度和数据安全性, 还为全场景智能化转型提供了技术支撑。未来, MEC 将进一步赋能产业升级, 推动物联网技术在更多领域的广泛应用。与此同时, 物联网设备的电池容量仍然受限于能量密度和充电速度等技术瓶颈, 难以无限扩展。为解决这一问题, 研究者提出了无线能量传输 (wireless power transfer, WPT) 技术, WPT 可以为物联网设备 (wireless devices, WDs) 提供持续的能量供应, 减少了设备对电池的依赖, 从而延长了设备的使用寿命^[1]。基于此, 无线供电移动边缘计算 (wireless powered mobile edge computing, WP-MEC) 作为一种新兴的网络范式被提出, WP-MEC 不仅能够提升计算能力, 还能缓解移动设备的能量短缺问题^[2]。

目前, 对于 WPT 和 MEC 技术的联合应用已有大量研究。文献 [3] 通过将 MEC 网络和无线电力传输这两种技术进行整合, 有效地降低了任务执行过程中的固有能量消耗。文

献 [4] 考虑了多智能可穿戴设备 (SWD) 和单智能移动设备 (SMD) 的 WP-MEC 系统, 其中计算密集型任务可卸载到 SMD 和 MEC 服务器, 以提高资源利用率。非正交多址技术 (non-orthogonal multiple access, NOMA) 可以同时调度多个终端, 并在时间、空间和频谱上共享无线电资源, 显著提高频谱效率和用户接入量。因此, NOMA 也被引入 WP-MEC 系统, 文献 [5] 研究了 WP-MEC 系统采用 NOMA 技术, 使多个移动设备可以利用相同的系统子载波进行任务卸载, 从而提高系统性能。文献 [6] 中利用移动设备之间的通信来协助 WP-MEC 网络中的协作卸载, 设备到设备 (D2D) 通信辅助卸载的方式方便且节能, 可以方便相邻设备之间的中继和执行计算任务。

研究表明, 在部分卸载和二进制卸载模式下, NOMA 的计算效率优于传统的正交频分多址 (orthogonal frequency division multiple access, OFDMA) 技术^[7]。然而, 现有研究多基于线性能量收集 (energy harvesting, EH), 而实际 EH 电路受非线性元器件影响, 输入输出关系呈现非线性特性^[8]。文献 [9] 提出了一种基于非线性能量收集的无线供电通信网络 (wireless powered communication network, WPCN), 通过多天线混合接入点向低功耗设备传输无线能量并接收传感数据, 解决了认知无线供电通信网络中的用户不公平问题。但这些研究未考虑计算卸载, 难以直接应用于 WP-MEC 系统。

1. 黑龙江八一农垦大学信息与电气工程学院

黑龙江大庆 163000

[基金项目] 大庆市指导性科技计划项目 (ZD2024-34); 黑龙江省自然科学基金联合引导项目 (LH2023F042)

因此, 针对上述技术问题, 本文进一步研究了非线性 EH 模型下的 WP-MEC 网络系统, 优化多天线能量发射器 (energy transmitter, ET) 的波束间功率分配及系统性能, 并将 NOMA 技术引入系统模型中。充分利用能量和计算资源, 最大化系统加权和计算率总计算位数。仿真结果表明, 该算法在不同场景下均能显著提升系统性能。

1 系统模型

如图 1 所示, 考虑一个非线性 EH 模型下, 基于 NOMA 的多设备 WP-MEC 网络。该网络由单个集成了 MEC 服务器的基站和 M 个单天线的物联网设备组成, $M = \{1, 2, \dots, M\}$ 。其中每个设备都配备了可充电电池和能量收集电路, AP 通过射频信号对 WDs 进行充电, WDs 利用收集到的能量进行计算卸载, 并将剩余的能量储存在电池中。

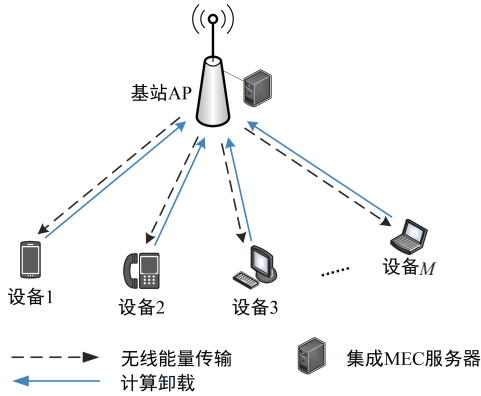


图 1 多设备 WP-MEC 系统模型图

系统的时间分配结构如图 2 所示, 假设持续时间为 T s, 且经历独立且同分布的瑞利衰落。采用部分卸载的方式, 一部分在本地进行计算, 另一部分通过上行 NOMA 的方式卸载到 MEC 服务器上执行。其中, t_0 阶段的下行 WPT 和本地计算可以同时进行, t_1 阶段的下行 WPT 和上行计算卸载遵循先收后发 (harvest-the-offload, HTT) 协议^[10]。由于 AP 的计算能力强大, 计算结果量很小, 一般忽略结果计算及返回时间 $t_2 \approx 0$ 。

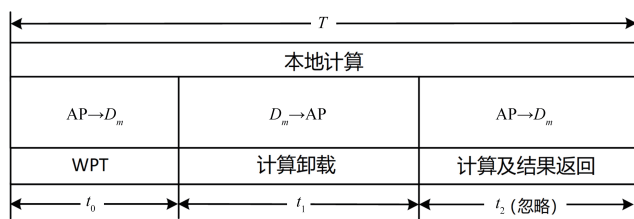


图 2 WP-MEC 系统的时分结构图

1.1 能量收集模型

在 t_0 时隙, 拥有 N 个天线的 AP 可以同时为 M 个单天线设备提供稳定的无线能量传输, 设 $p_{a,m}, \forall m \in \{1, 2, \dots, M\}$ 为对

应波束的发射功率。AP 发射功率受到固定值 $P_a^{\max}$ 表示基站的最大发射功率, 因此, 总的发射功率应符合能量约束:

$$\sum_{m=1}^M p_{a,m} \leq P_a^{\max} \quad (1)$$

本文采用了更符合实际电路的非线性 EH 模型, 对第 m 个设备的输入输出功率进行拟合。则每个 WDs 收集到的无线能量可以定义为:

$$\begin{aligned} \psi(p_{a,m}) &= \frac{\frac{O}{1 + \exp(-a(|h_m|^2 p_{a,m} - b))} - \frac{O}{1 + \exp(ab)}}{1 - \frac{1}{1 + \exp(ab)}} \\ &= \left(\frac{O}{1 + \exp(-a(|h_m|^2 p_{a,m} - b))} - X \right) / Y \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $|h_m|^2$ 为 AP 到第 m 个设备的信道功率增益; O 表示当 EH 电路饱和时, 在接收器处收获的最大能量; a 和 b 由电阻、电容和电路灵敏度决定, 与 EH 电路的规格有关; X 和 Y 表示两个参数, $X = O/(1 + \exp(ab)), Y = 1 - 1/(1 + \exp(ab))$ 。

则 WDs 在时隙 t_0 内的收获能量为:

$$E_m^h = t_0 \psi(p_{a,m}) \quad (3)$$

1.2 部分计算卸载模型

1.2.1 本地计算

每个 WD 都可以在整个时间块中进行计算, 且不被任何信息或能量传输中断, 则第 m 个设备的本地计算速率为:

$$Q_{m,l} \leq \frac{f_m}{C_m} \quad (4)$$

式中: $Q_{m,l}$ 为 WDs 在本地计算的任务量; C_m 为 WDs 计算 1 bit 数据量所需的 CPU 周期数; f_m 为 CPU 主频, 表示 WDs 的计算能力。相应的计算能耗可以定义为:

$$E_m^{\text{loc}} = \xi f_m^3 T \quad (5)$$

式中: ξ 是有效电容系数, 取决于设备的硬件。

1.2.2 卸载计算

基于上行 NOMA 的原理, MEC 服务器使用连续干扰消除 (successive interference cancellation, SIC) 技术, 先对信道条件最佳的设备信息进行解码, 将其从接收到的复合信号中减去, 再对信道条件次佳的设备信息进行解码^[11]。因此, 本文假设 $\{|h_m|\}, \forall m \in \{1, 2, \dots, M\}$ 按降序排列, 即 $|h_1| \geq |h_2| \geq \dots \geq |h_M|$ 。为了降低系统复杂性, 本文重点研究两个物联网设备的上行 NOMA 卸载, 即设备 D_1 和 D_2 。其中 D_1 被视为 NOMA 强用户, D_2 被视为 NOMA 弱用户, 则 D_1 和 D_2 到 AP 的可达速率为:

$$R_1 = B \log_2 \left(1 + \frac{p_1 |h_1|^2}{p_2 |h_2|^2 + \sigma_a^2} \right) \quad (6)$$

$$R_2 = B \log_2 \left(1 + \frac{p_2 |h_2|^2}{\sigma_a^2} \right) \quad (7)$$

式中: B 表示卸载带宽; P_1 和 P_2 表示 D_1 和 D_2 到 AP 的发射功率; σ_a^2 表示 AP 处的加性高斯白噪声 (additive white gaussian noise, AWGN)。

因此, 可以将 D_1 和 D_2 到 AP 的计算量记为 Q_1 和 Q_2 , 卸载的任务数据量受到以下约束:

$$Q_1 \leq t_1 R_1, \quad Q_2 \leq t_1 R_2 \quad (8)$$

则 D_1 和 D_2 在 t_1 阶段通过 NOMA 卸载的能耗为:

$$E_1^{\text{off}} = t_1 p_1, \quad E_2^{\text{off}} = t_1 p_2 \quad (9)$$

1.3 问题规划

在非线性 EH 模型的背景下, 利用系统有限的能量和计算资源, 最大限度地提高系统的计算率, 用数学形式表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{P1}: \max_{p_m, p_a, Q_1, Q_2} & \lambda_1(Q_{1,l} + Q_{1,o}) + \lambda_2(Q_{2,l} + Q_{2,o}) \\ \text{s.t.} \quad \text{C1:} & 0 \leq p_{a,1} + p_{a,2} \leq P_a^{\max} \\ \text{C2:} & t_0 + t_1 \leq T, \quad 0 \leq t_0, t_1 \leq T \\ \text{C3:} & Q_{1,o} \leq t_1 B \log_2(1 + \frac{p_1 |h_1|^2}{p_2 |h_2|^2 + \sigma_a^2}) \\ \text{C4:} & Q_{2,o} \leq t_1 B \log_2(1 + \frac{p_2 |h_2|^2}{\sigma_a^2}) \\ \text{C5:} & \frac{Q_{m,l} C_m}{f_m} \leq T, \quad m = \{1, 2\} \\ \text{C6:} & E_m^{\text{loc}} + E_m^{\text{off}} \leq E_m^h, \quad m = \{1, 2\} \\ \text{C7:} & P_m \geq 0, \quad Q_{m,l}, Q_{m,o} \geq 0, \quad m = \{1, 2\} \end{aligned} \quad (10)$$

式中: λ_1 和 λ_2 表示设备 D_1 和 D_2 的权重。C1 表示 AP 处的 WPT 能量约束; C2 表示整个系统的总延迟限制; C3 和 C4 表示 WDs 卸载的计算数据量不超过其可以卸载的最大值; C5 表示 WDs 需要在最大容差延迟内执行其本地计算; C6 表示设备的总能耗约束, 即每个设备的能耗不超过其 WPT 阶段所收获的能量。

2 问题求解

在本节中, 首先将问题 **P1** 约束中的非凸表达式用变量替换法重新表述, 再用逐次凸逼近 (successive convex approximation, SCA) 将其转化为凸函数形式, 通过一种迭代优化算法来求解重新表述的目标问题。

对于约束 C5 的非凸性, 通过引入新的替换变量 β_m 进行重新表述, 其中 $\beta_m = \exp(-a(|h_m|^2 p_{a,m} - b))$, $m = \{1, 2\}$ 可以得到:

$$p_{a,m} = \frac{b}{|h_m|^2} - \frac{1}{a|h_m|^2} \ln \beta_m \quad (11)$$

则 **P1** 中的约束 C1 和 C5 可以分别重写为:

$$\sum_{m=1,2} (\frac{b}{|h_m|^2} - \frac{1}{a|h_m|^2} \ln \beta_m) \leq P_a^{\max}, \quad m = \{1, 2\} \quad (12)$$

$$e^{(-a(|h_m|^2 p_{a,m}^{\max} - b))} \leq \beta_m \leq e^{ab}, \quad m = \{1, 2\} \quad (13)$$

$$Y(E_m^{\text{loc}} + E_m^{\text{off}}) \leq t_0 \frac{O}{1 + \beta_m} - X t_0, \quad m = \{1, 2\} \quad (14)$$

对于式 (14) 中变量 β_m 和 t_0 在 $t_0 O / (1 + \beta_m)$ 上的耦合关系, 采用 SCA 进行一阶泰勒展开:

$$\frac{t_0}{1 + \beta_m} \geq \frac{t_0^n}{1 + \beta_m^n} + (t_0 - t_0^n) \frac{1}{1 + \beta_m^n} - (\beta_m - \beta_m^n) \frac{t_0^n}{(1 + \beta_m^n)^2} \quad (15)$$

式中: t_0^n 和 β_m^n 为问题在第 n 次迭代时获取最优值的可行点, 则式 (14) 中的约束变换为:

$$Y(E_m^{\text{loc}} + E_m^{\text{off}}) \leq O(\frac{t_0}{1 + \beta_m^n} - (\beta_m - \beta_m^n) \frac{t_0^n}{(1 + \beta_m^n)^2}) - X t_0, \quad m = \{1, 2\} \quad (16)$$

设备的传输功率 P_m 和持续时间 t_1 在约束 C3 和 C4 中的耦合也导致了问题 **P1** 的非凸性。因此, 通过引入变量 $S_1 = p_1 t_1$ 、 $S_2 = p_2 t_1$ 来重新表述非凸表达式。根据透视函数 $tG(x/t) = t \log_2(1 + x/t)$ 在 $t > 0$ 时是凹的, 可以判断问题 **P1** 中约束 C4 的表达式也是凹函数。然而, 约束 C3 的表达式仍是非凸函数, 故问题 **P1** 仍然非凸。

为解决以上问题, 先将约束 C3 非凸的表达式改写为关于 S 和 t_1 的凸差分 (DC) 形式。随后采用 SCA 方法将其转化为一个凸表达式, 则函数的凸差形式表示为:

$$t_1 B \log_2(1 + \frac{S_1 |h_1|^2}{S_2 |h_2|^2 + \sigma_a^2 t_1}) = u(S, t_1) - v(S_2, t_1) \quad (17)$$

式中: $u(S, t_1)$ 和 $v(S_2, t_1)$ 为凹函数, 表示为:

$$\begin{cases} u(S, t_1) = t_1 B \log_2(1 + \frac{S_1 |h_1|^2 + S_2 |h_2|^2}{\sigma_a^2 t_1}) \\ v(S_2, t_1) = t_1 B \log_2(1 + \frac{S_2 |h_2|^2}{\sigma_a^2 t_1}) \end{cases} \quad (18)$$

通过利用 SCA 方法, 将表达式 $v(S_2, t_1)$ 近似地替换为一阶泰勒展开, 即:

$$\begin{aligned} v(S_2, t_1) & \leq v(S_2, t_1, S_2^n, t_1^n) \triangleq t_1^n B \log_2(1 + \frac{S_2^n |h_2|^2}{\sigma_a^2 t_1^n}) \\ & + (S_2 - S_2^n) \frac{t_1^n B |h_2|^2}{(S_2^n |h_2|^2 + \sigma_a^2 t_1^n) \ln 2} + (t_1 - t_1^n) \\ & (B \log_2(1 + \frac{S_2^n |h_2|^2}{\sigma_a^2 t_1^n}) - \frac{B S_2^n |h_2|^2}{(S_2^n |h_2|^2 + \sigma_a^2 t_1^n) \ln 2}) \end{aligned} \quad (19)$$

经过近似代换后, 问题 **P1** 可以转化为:

$$\begin{aligned} \mathbf{P2}: \max_{p_m, S_m, Q_1, Q_2} & q \\ \text{s.t.} \quad \text{C1:} & (12), (13) \\ \text{C2:} & t_0 + t_1 \leq T, \quad 0 \leq t_0, t_1 \leq T \\ \text{C3:} & Q_{1,o} \leq u(S, t_1) - v(S_2, t_1, S_2^n, t_1^n) \\ \text{C4:} & Q_{2,o} \leq t_1 B \log_2(1 + \frac{S_2 |h_2|^2}{\sigma_a^2 t_1}) \\ \text{C5:} & \frac{Q_{m,l} C_m}{f_m} \leq T, \quad m = \{1, 2\} \\ \text{C6:} & (16) \\ \text{C7:} & S_m \geq 0, \quad Q_{m,l}, Q_{m,o} \geq 0, \quad m = \{1, 2\} \end{aligned} \quad (20)$$

式中: $q = \lambda_1(Q_{1,l} + Q_{1,o}) + \lambda_2(Q_{2,l} + Q_{2,o})$ 。

问题 **P2** 是一个凸问题, 可以用 CVX 工具箱进行求解。利用 SCA 技术, 通过迭代求解近似问题 **P2** 来求解问题 **P1**。具体流程如算法 1 所示。

算法 1: 基于 SCA 的迭代优化算法求解 P2

输入: 初始化 $\beta_1^0, \beta_2^0, S_2^0, t_1^0, t_2^0$, 设迭代次数 $n = 0$, 容忍度 $\varepsilon = 10^{-3}$

1. 当 $|q^{n+1} - q^n| \geq \varepsilon$ 时
2. 根据求解 P2 问题更新第 n 次迭代的解 $\{\beta_1^n, \beta_2^n, S_2^n, t_1^n, t_2^n\}$;
3. 更新 $q^n = q^{n+1}$;
4. 更新 $n = n+1$, 直到目标问题的值收敛

输出: 最优解 $\{\beta_1^*, \beta_2^*, S_2^*, t_1^*, t_2^*\}$

3 仿真结果

在本节中, 用仿真来验证所提出方案的收敛性并对其进行性能评估。 D_1 、 D_2 和 AP 之间的无线信道设置为一个复合信道 $f_m = (10)^{-(3/2)}(d_m)^{-(\delta/2)}g_m$, $m = \{1, 2\}$ 。其中, D_1 和 D_2 到 AP 的距离 $d_1 = 6$ m、 $d_2 = 7$ m; $\delta = 2.4$ 为路径损耗指数, g_m 表示均值为零、单位方差为零的瑞利衰落。主要仿真参数的详细信息如下: 通信带宽 $B = 1$ MHz, 处理 1 bit 消耗的时钟周期 $C_m = 100$, WDs 的计算能力 $f_m = 0.03$ GHz, 有效电容系数 $\zeta = 10^{-28}$, 干扰噪声功率 $\sigma_a^2 = 10^{-8}$ W 时间块长度 $T = 1$ s, AP 的最大发射功率 $P_a^{\max} = 3$ W, 目标问题中 D_1 和 D_2 的权重 $\lambda_1 = 0.7$ 、 $\lambda_2 = 0.3$, EH 电路饱和时, 收获的最大能量 $O = 0.02$ W, 相对于输入功率的非线性 EH 率 $a = 390$, EH 电路的最小导通电压 $b = 0.0024$ W。

为了证明所提出的方案的有效性, 将所提方案的非线性 EH 模型下基于 NOMA 的 WP-MEC 部分卸载方案与 3 个基准方案进行比较。

- (1) 非线性 EH 下基于 NOMA 的完全卸载;
- (2) 线性 EH 下基于 NOMA 的部分卸载;
- (3) 线性 EH 下基于 NOMA 的完全卸载。

如图 3 所示, 更高的功率和更低的路径损耗指数能够提升系统的计算能力。通过所提算法在不同路径损失指数 δ 和 $P_a^{\max}$ 下的收敛性, 可以看出, 所提方案在大约 5 次迭代后基本达到收敛, 说明其收敛速度快且效率较高。

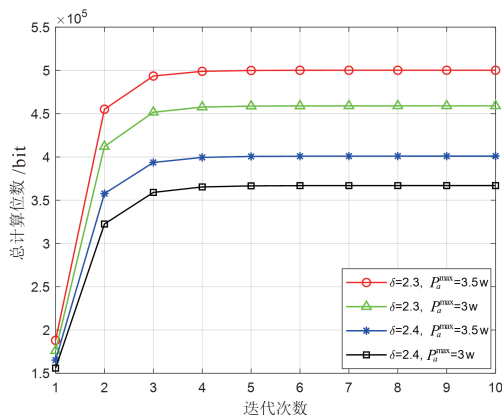


图 3 总计算位数随迭代次数的变化

如图 4 所示, 随着时间块长度 T 的增加, 所有方案的总计算位数都有所提升。这是因为随着 T 的增大, 上述方案可以实现更灵活的资源分配, 有助于提升系统的计算速率。从图中可以看出所提方案的性能最佳, 随着 T 的增加其计算量显著提升。非线性 EH 下的方案性能均优于线性 EH 模型下的方案, 部分卸载的性能优于完全卸载, 故本文所提方案可以有效提升系统的总计算位数。

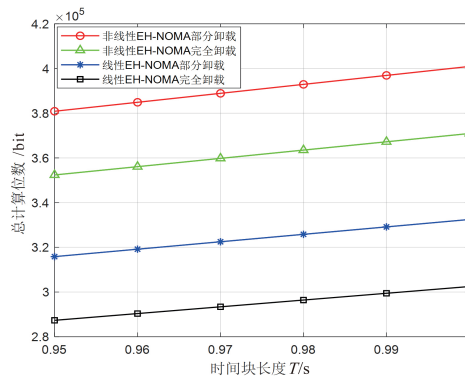


图 4 总计算位数随时间块长度的变化

4 结语

本文研究了一种基于非线性 EH 模式下的无线供电移动边缘计算优化算法, 结合 NOMA 技术, 旨在优化无线能量传输系统的性能。研究重点包括多天能量发射器在不同波束间的功率分配问题, 以及通过联合优化 AP 的发射功率、WDs 卸载时间和卸载功率, 来最大化系统总计算位数。为解决由 NOMA 卸载和非线性能量收集模型带来的非凸优化问题, 提出了一种基于逐次凸逼近 (SCA) 的迭代优化算法。仿真结果表明, 该方案在系统性能上优于现有方法。由于多设备之间很容易产生双重远近效应等干扰, 未来可以将目前的工作扩展到其他更具挑战性的场景中。

参考文献:

- [1] 王传启, 车国霖. 无线供电 MEC 中基于 S-PSO 的任务卸载策略研究 [J]. 电子技术应用, 2024, 50(8): 60-66.
- [2] 黄博闻, 陈晓龙, 方存亮, 等. 无线供能边缘计算时延优化卸载策略研究综述 [J]. 无线互联科技, 2024, 21(10): 1-9.
- [3] 薛明, 杨庆新, 章鹏程, 等. 无线电能传输技术应用研究现状与关键问题 [J]. 电工技术学报, 2021, 36(8): 1547-1568.
- [4] LI Y, XU G C, GE J Q, et al. Communication and computation cooperation in wireless network for mobile edge computing [J]. IEEE access, 2019, 7: 106260-106274.
- [5] SUN M Y, XU X D, HUANG Y Z, et al. Resource management for computation offloading in D2D-Aided wireless powered mobile-edge computing networks [J]. IEEE internet of things journal, 2021, 8(10): 8005-8020.

面向物联网多设备通信的边缘计算网络安全监测管理系统研究

武少鹏¹

WU Shaopeng

摘要

随着第五代移动通信技术(5G)的快速落地,为物联网及工业互联网场景下的大规模设备接入、云数据通信传输创造条件。但与此同时,移动边缘计算(mobile edge computing, MEC)网络的上下行链路数据传输,却频繁面临分布式拒绝服务(distributed denial of service, DDoS)、远程非授权访问(remote-to-login, R2L)、用户提权(user to root, U2R)、探测(Probe)等越权攻击威胁。为此,基于(client-server, C/S)网络架构、SDN(software defined network)控制器、网络路由、核心交换机、SQL Server 数据库、边缘云服务器等软硬件技术,构建起内生边缘计算网络安全管理系统,利用IDS(intrusion detection system)入侵探测器组件监测多网络节点的入侵数据流量,使用LSTM(long short-term memory)网络算法作出入侵访问数据流量的时序提取及分类,采用区块链DID(decentralized identifier)认证机制验证接入用户身份,最大程度保障网络入侵数据监测、系统防护管理的安全性。

关键词

物联网;多设备通信;边缘计算;网络安全管理系统

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.10.022

0 引言

传统基于复合型防火墙、静态/动态路由协议的网络安全访问验证管理模式,通常难以抵御入侵主机伪造IP地址、伪造ARP/Hello请求报文等越权访问攻击。且随着5G移动通信网络中海量化的设备联网、数据流量接入传输,传统依

托网络防火墙、代理网关的入侵访问检测过滤模式,面临着任务处理的拥塞或溢出问题。在这一背景下,引入融合SDN软件定义网络、NFV(network functions virtualization)功能虚拟化模型等组件的边缘计算技术,在云服务器内设置虚拟化网络的分布式边缘网元节点,启用区块链DID认证机制,为跨域入侵用户访问、设备终端数据通信提供分布式身份认证、安全运维管理服务,解决物联网安全监测控制执行效率

1. 武警内蒙古总队乌兰察布支队 内蒙古乌兰察布 012000

- [6] SHI J, ZHOU Y F, LI Z, et al. Delay minimization for NOMA-mmW scheme-based MEC offloading[J]. IEEE internet of things journal, 2022, 10(3): 2285-2296.
- [7] SHI L Q, CHU X L, SUN H J, et al. Wireless-powered OFDMA-MEC networks with hybrid active-passive communications[J]. IEEE internet of things journal, 2023, 10(12): 10484-10496.
- [8] HU Y L, YUAN X P, YANG T Y, et al. On the convex properties of wireless power transfer with nonlinear energy harvesting[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2020, 69(5): 5672-5676.
- [9] HUA M, WU Q Q. Throughput maximization for IRS-aided MIMO FD-WPCN with non-linear EH model[J]. IEEE journal of selected topics in signal processing, 2022, 16(5): 918-932.

- [10] MUSTAFA E, SHUJA J, ZAMAN S-K U, et al. Joint wireless power transfer and task offloading in mobile edge computing: a survey[J]. Cluster computing, 2022, 25: 2429-2448.
- [11] DING Z G, XU D F, SCHÖBER R, et al. Hybrid NOMA offloading in multi-user MEC networks[J]. IEEE transactions on wireless communications, 2022, 21(7): 5377-5391.

【作者简介】

段云阁(1998—),女,陕西渭南人,硕士研究生,研究方向:无线供电与移动边缘计算方向。

富爽(1982—),女,黑龙江大庆人,博士,副院长、教授,研究方向:认知无线电、信号传输与处理、无线携能传输和移动边缘计算。

(收稿日期:2025-03-07 修回日期:2025-10-16)