

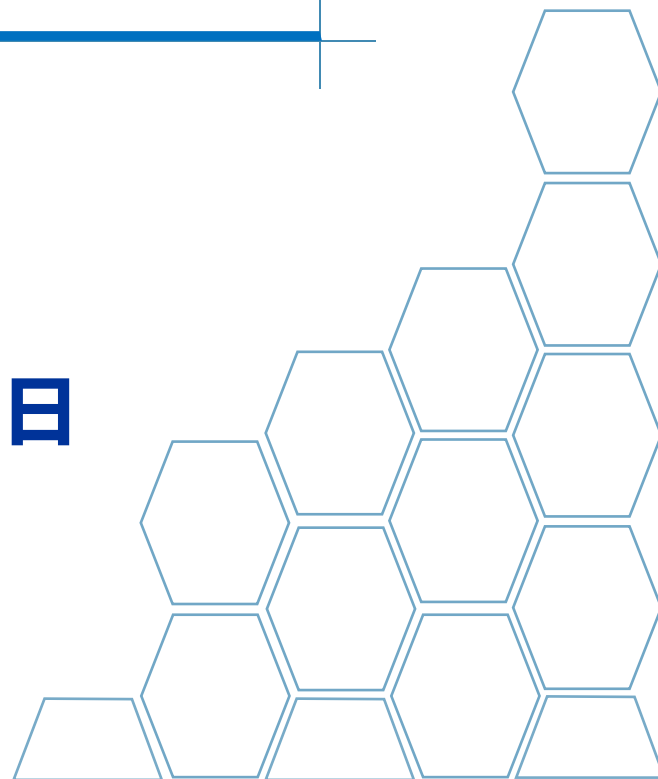


南京邮电大学  
Nanjing University of Posts and Telecommunications

# 组会汇报

汇报人：  
日期：

王金义  
2024年5月11日





南京邮电大学  
Nanjing University of Posts and Telecommunications

# Energy Efficient Transmission Strategy for Mobile Edge Computing Network in UAV-Based Patrol Inspection System

## 无人机巡检系统中移动边缘计算网络的节能传输 策略

---



研究背景



系统建模



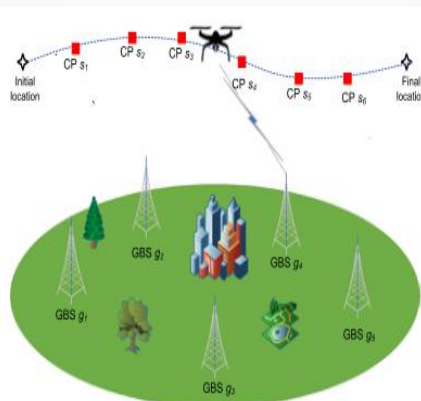
问题描述



解决方法

## 研究背景一

- 无人驾驶飞行器 (UAV) 由于其机动性、灵活性。配备通信设备的无人机可用于侦察和跟踪等各种紧急任务。
- 无人机巡逻检查任务具有较多的计算需求，但无人机的机载能量有限，因此面临着计算密集型或延迟敏感型任务时存在很大的挑战。



场景示意图

## 研究背景二

- 为了缓解无人机能量有限和计算需求之间的矛盾，引入了移动边缘计算 (MEC) 技术，通过将任务卸载到相邻的资源丰富的服务器，提高了任务执行效率。
- 在现实场景中，无人机可能会在多个基站的覆盖区域内飞行。相关研究关注于优化无人机与多个基站之间的联系，以及路径规划优化，以减少能量消耗和任务完成时间。

无人机辅助物联网的相关应用，解决无人机的飞行轨迹设计及优化问题。现在无人机轨迹设计及优化的研究方向可以大致分为两类：一类是用机器学习方法解决无人机的飞行轨迹设计及优化。另一类则是将无人机轨迹问题设计成一个优化问题，通过离散化或者非凸化来解决。

1

提出了一个巡逻检查场景中的无人机-MEC框架

2

提出了旅行商问题 (TSP) 准则和节能旅行商问题准则的组合方案。

3

提出一个联合优化无人机轨迹、任务完成时间、通信调度和计算资源分配的数学模型。然后通过分解、离散化求取问题的解。

## 系统建模

### 系统模型

系统由一架配备了MEC服务器和激光雷达或高清摄像头等强大数据采集设备的旋翼式无人机和多个配备了高性能MEC服务器的地面基站（GBS）组成。无人机需要在一次飞行任务中穿越一系列预先定义的巡航点。任务从给定的起点开始，依次经过巡航点执行数据采集和处理任务，最后到达终点。整个操作在规定的时间内完成。

### 能量模型

无人机巡逻检测系统的能量消耗模型，主要分为三个类别：无人机计算能量消耗、数据传输能量消耗和无人机飞行能量消耗。

## 问题描述

在巡检场景中，无人机应该遍历所有的巡航点以获取数据，并通过消耗最少得能量在合理的时间内完成既定任务。所以本文中的一个目标就是联合优化遍历顺序，通信调度，任务完成时间。

$$(P0) : \min_{\{\eta(k)\}, \{\mathbf{q}(t)\}, \{\theta_{gm}(t)\}, t_{s_{\eta(k)}}, T, \{\xi_{gm}(t)\}, \{f_U(t), f_{gm}(t)\}} E_{Total}$$

$$\text{s.t. } \xi_{gm}(t) \in \{0, 1\}, \sum_{m=1}^M \xi_{gm}(t) \leq 1, \forall m, t \in [0, T], \quad (15a)$$

$$\sum_{m=1}^M \int_{t_{s_{\eta(k)}}}^{t_{s_{\eta(k+1)}}} \frac{f_{gm}(t)}{C_U} dt + \int_{t_{s_{\eta(k)}}}^{t_{s_{\eta(k+1)}}} \frac{f_U(t)}{C_U} dt \geq Q_{s_{\eta(k)}},$$

$$\forall t \in [t_{s_{\eta(k)}}, t_{s_{\eta(k+1)}}], k = 1, \dots, K, \quad (15b)$$

$$\int_0^{T_G} \xi_{gm}(t) \tilde{R}_{gm}(t) dt \geq \int_0^{T_G} \frac{f_{gm}(t)}{C_U} dt, \forall m, \quad (15c)$$

$$\theta_{gm}(t) = \frac{180}{\pi} \arctan \left( \frac{H_U - H_G}{\|\mathbf{q}(t) - \mathbf{w}_{gm}\|} \right), \forall m, \quad (15d)$$

$$0 \leq f_U(t) \leq f_U^{\max}, \forall t \in [0, T], \quad (15e)$$

$$0 \leq f_{gm}(t) \leq f_{gm}^{\max}, \forall m, t \in [0, T], \quad (15f)$$

$$\|\dot{\mathbf{q}}(t)\| \leq V_{\max}, \forall t \in [0, T], \quad (15g)$$

$$\mathbf{q}(t_{s_{\eta(k)}}) = \mathbf{w}_{s_{\eta(k)}}, k = 0, \dots, K+1, \quad (15h)$$

$$\mathbf{w}_{s_{\eta(0)}} = \mathbf{q}_I, \quad \mathbf{w}_{s_{\eta(K+1)}} = \mathbf{q}_F, \quad (15i)$$

$$t_{s_{\eta(0)}} = 0, \quad t_{s_{\eta(K+1)}} = T, \quad (15j)$$

### 第一步

巡航点的遍历顺序。本文提出了一种使用加权因子来设计访问巡航点的遍历顺序。

### 第二步

然后，利用所获得的遍历顺序，可以优化传输调度和轨迹设计。通过以上两个步骤，可以以迭代的方式解决原始问题。



将无人机轨迹问题建模为TSP问题，通过求解TSP问题的相关方法来解决无人机估计规划问题。



$$W(s_i, s_j) = Q_{s_i} * \frac{E_{s_i, s_j}}{\cap}, \quad \forall i, j \in \mathcal{K}, i \neq j,$$

$$W(s_0, s_{K+1}) = +\infty, \quad (19)$$

$$W(s_{K+1}, s_k) = +\infty, \quad (20)$$

$$W(s_{K+1}, s_0) = 0. \quad (21)$$

$$(P1): \quad \min \sum_{i \in \mathcal{K}} \sum_{j \in \mathcal{K}, i \neq j} \tau_{i,j} W(s_i, s_j)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in \mathcal{K}, i \neq j} \tau_{i,j} = 1, \quad \forall j \in \mathcal{K}, \quad (22a)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{K}, j \neq i} \tau_{i,j} = 1, \quad \forall i \in \mathcal{K}, \quad (22b)$$

$$\tau_{i,j} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \in \mathcal{K}, i \neq j, \quad (22c)$$

$$\tau_{i,j} + \tau_{j,i} \leq 1, \quad \forall i, j \in \mathcal{K}, i \neq j, \quad (22d)$$

$$u_i - u_j + (K+2)\tau_{i,j} \leq K+1, \\ i, j \in \{1, \dots, K+1\}, i \neq j, \quad (22e)$$

$$u_0 = 1, \quad (22f)$$

$$2 \leq u_i \leq K+2 \quad i \in \mathcal{K}, i \geq 1, \quad (22g)$$

## 解决方法——最优传输策略设计

02

在确定最优遍历顺序的情况下，最优的子问题可以分解成 $k+1$ 个独立的子问题，即两个连续航点之间的最优传输策略。

$$(P2) : \min_{\{\mathbf{q}(t)\}, \{\xi_{g_m}(t)\}, T_{s_{\eta(k)}}^{s_{\eta(k+1)}}, \{\theta_{g_m}(t)\}, \{f_U(t), f_{g_m}(t)\}} E_{Total}[t_{s_{\eta(k)}}, t_{s_{\eta(k+1)}}]$$

$$\text{s.t. } \xi_{g_m}(t) \in \{0, 1\}, \sum_{m=1}^M \xi_{g_m}(t) \leq 1, \\ \forall m, t \in [0, T_{s_{\eta(k)}}^{s_{\eta(k+1)}}], \quad (23a)$$

$$\sum_{m=1}^M \int_0^{T_{s_{\eta(k)}}^{s_{\eta(k+1)}}} \frac{f_{g_m}(t)}{C_U} dt + \int_0^{T_{s_{\eta(k)}}^{s_{\eta(k+1)}}} \frac{f_U(t)}{C_U} dt \\ \geq Q_{s_{\eta(k)}}, \forall t \in [0, T_{s_{\eta(k)}}^{s_{\eta(k+1)}}], \quad (23b)$$

$$\int_0^{T_G} \xi_{g_m}(t) \tilde{R}_{g_m}(t) dt \geq \int_0^{T_G} \frac{f_{g_m}(t)}{C_U} dt, \\ \forall m, T_G \in [0, T_{s_{\eta(k)}}^{s_{\eta(k+1)}}], \quad (23c)$$

$$\theta_{g_m}(t) = \frac{180}{\pi} \arctan \left( \frac{H_U - H_G}{\|\mathbf{q}(t) - \mathbf{w}_{g_m}\|} \right), \\ \forall m, t \in [0, T_{s_{\eta(k)}}^{s_{\eta(k+1)}}], \quad (23d)$$

$$0 \leq f_U(t) \leq f_U^{\max}, \forall t \in [0, T_{s_{\eta(k)}}^{s_{\eta(k+1)}}], \quad (23e)$$

$$0 \leq f_{g_m}(t) \leq f_{g_m}^{\max}, \quad \forall m, t \in [0, T_{s_{\eta(k)}}^{s_{\eta(k+1)}}], \quad (23f)$$

$$\|\dot{\mathbf{q}}(t)\| \leq V_{\max}, \forall t \in [0, T_{s_{\eta(k)}}^{s_{\eta(k+1)}}], \quad (23g)$$

$$\mathbf{q}(0) = \mathbf{w}_{s_{\eta(k)}}, \quad \mathbf{q}(T_{s_{\eta(k)}}^{s_{\eta(k+1)}}) = \mathbf{w}_{s_{\eta(k+1)}}, \quad (23h)$$

# 解决方法——最优传输策略设计

将无人机的轨迹离散为N个线段，无人机的位置由N+1个航路点表示，轨迹可以离散为 $\mathbf{q}[N]$ ， $\delta[n]$ 表示无人机沿第n个线段花费的时间，在第n个线段上，无人机个GBS之间的通信速率表示如下：

$$\tilde{R}_{g_m}[n] = \left( C_3 + \frac{C_4}{1 + e^{-(C_1 + C_2 \theta_{g_m}[n])}} \right) \times B \log_2 \left( 1 + \frac{P[n] \hat{\gamma}}{\left( (H_U - H_G)^2 + \|\mathbf{q}[n] - \mathbf{w}_{g_m}\|^2 \right)^{\alpha/2}} \right)$$

通过上述改写，将问题P2离散化为问题P3

$$(P3) : \min_{\{\mathbf{q}[n]\}, \{\theta_{g_m}[n]\}, \{\phi_{g_m}[n], \delta[n]\}, \{I[n], O_{g_m}[n]\}} E_{cop} + E_{tra} + E_f$$

$$\text{s.t.} \sum_{m=1}^M \phi_{g_m}[n] \leq \delta[n], \phi_{g_m}[n] \geq 0, \quad \forall m, n, \quad (31a)$$

$$\phi_{g_m}[N] = 0, O_{g_m}[1] = 0, \quad \forall m, \quad (31b)$$

$$\sum_{n=1}^N I[n] + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N O_{g_m}[n] \geq Q_{s_{\eta(k)}}, \quad (31c)$$

$$\sum_{l=1}^{n-1} \phi_{g_m}[l] \tilde{R}_{g_m}[l] \geq \sum_{l=2}^n O_{g_m}[l], \quad \forall m, \forall n = 2, \dots, N, \quad (31d)$$

$$\theta_{g_m}[n] = \frac{180}{\pi} \arctan \left( \frac{H_U - H_G}{\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{w}_{g_m}\|} \right), \quad \forall m, n, \quad (31e)$$

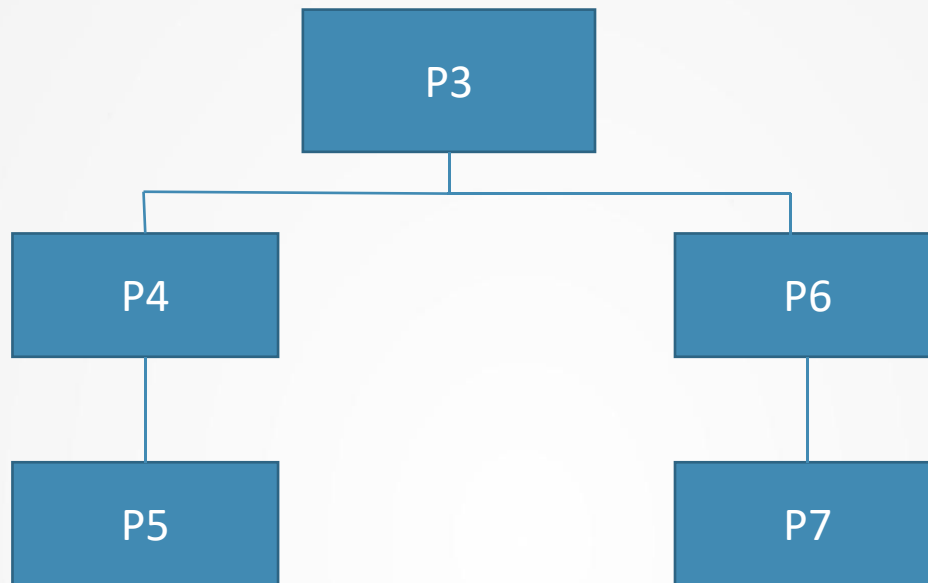
$$0 \leq \frac{C_U I[n]}{\delta[n]} \leq f_U^{\max}, \quad \forall n, \quad (31f)$$

$$0 \leq \frac{C_U O_{g_m}[n]}{\delta[n]} \leq f_{g_m}^{\max}, \quad \forall m, \forall n, \quad (31g)$$

$$\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{q}[n-1]\| \leq \min\{V_{\max} \delta[n], \Delta_{\max}\}, \quad \forall n, \quad (31h)$$

$$\mathbf{q}[0] = \mathbf{w}_{s_{\eta(k)}}, \mathbf{q}[N] = \mathbf{w}_{s_{\eta(k+1)}}. \quad (31i)$$

# 解决方法



$$\begin{aligned}
 \text{(P4): } & \min_{\{\phi_{gm}[n]\}, \{\delta[n]\}, \{I[n], O_{gm}[n]\}} E_{cop} + E_{tra} + E_f \\
 & \text{s.t. (31a)–(31d), (31f)–(31h).} \quad (32)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{(P5): } & \min_{\{\phi_{gm}[n]\}, \{\delta[n]\}, \{I[n], O_{gm}[n]\}, \{\zeta[n]\}} E_{cop} + E_{tra} \\
 & + \left( P_0 \sum_{n=1}^N \left( \delta[n] + \frac{3(\varpi[n])^2}{\delta[n] U_{tip}^2} \right) + P_i \sum_{n=1}^N \zeta[n] \right. \\
 & \left. + \frac{1}{2} d_0 \rho s A \sum_{n=1}^N \frac{(\varpi[n])^3}{(\delta[n])^2} \right) \\
 & \text{s.t. (31a)–(31d), (31f)–(31h),} \quad (36a)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{(\delta[n])^4}{(\zeta[n])^2} \leq (\zeta^r[n])^2 + 2 \zeta^r[n] (\zeta[n] - \zeta^r[n]) \\
 & c + \frac{(\varpi[n])^2}{v_0^2}, \quad (36b)
 \end{aligned}$$

$$\zeta[n] \geq 0. \quad (36c)$$

# 解决方法

$$(P4) : \min_{\{\phi_{gm}[n]\}, \{\delta[n]\}, \{I[n], O_{gm}[n]\}} E_{cop} + E_{tra} + E_f$$

$$\text{s.t. (31a)–(31d), (31f)–(31h).} \quad (32)$$

$$(P5) : \min_{\{\phi_{gm}[n]\}, \{\delta[n]\}, \{I[n], O_{gm}[n]\}, \{\zeta[n]\}} E_{cop} + E_{tra}$$

$$+ \left( P_0 \sum_{n=1}^N \left( \delta[n] + \frac{3(\varpi[n])^2}{\delta[n] U_{tip}^2} \right) + P_i \sum_{n=1}^N \zeta[n] \right)$$

$$+ \frac{1}{2} d_0 \rho s A \sum_{n=1}^N \frac{(\varpi[n])^3}{(\delta[n])^2}$$

$$\text{s.t. (31a)–(31d), (31f)–(31h),} \quad (36a)$$

$$\frac{(\delta[n])^4}{(\zeta[n])^2} \leq (\zeta^r[n])^2 + 2\zeta^r[n](\zeta[n] - \zeta^r[n])$$

$$c + \frac{(\varpi[n])^2}{v_0^2}, \quad (36b)$$

$$\zeta[n] \geq 0. \quad (36c)$$

$$(P6) : \min_{\{\mathbf{q}[n]\}, \{\theta_{gm}[n]\}} P_0 \sum_{n=1}^N \left( \delta[n] + \frac{3(\varpi[n])^2}{\delta[n] U_{tip}^2} \right)$$

$$+ P_i \sum_{n=1}^N \left( \sqrt{(\delta[n])^4 + \frac{(\varpi[n])^4}{4v_0^4}} - \frac{(\varpi[n])^2}{2v_0^2} \right)^{1/2}$$

$$+ \frac{1}{2} d_0 \rho s A \sum_{n=1}^N \frac{(\varpi[n])^3}{(\delta[n])^2}$$

$$\text{s.t. (31d), (31e), (31h), (31i).} \quad (37)$$

$$(P7) : \min_{\{\mathbf{q}[n]\}, \{\theta_{gm}[n]\}, \{\varsigma[n]\}} P_0$$

$$\sum_{n=1}^N \left( \delta[n] + \frac{3\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{q}[n-1]\|^2}{\delta[n] U_{tip}^2} \right)$$

$$+ P_i \sum_{n=1}^N \varsigma[n] + \frac{1}{2} d_0 \rho s A \sum_{n=1}^N \frac{\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{q}[n-1]\|^3}{(\delta[n])^2}$$

$$\text{s.t. } \sum_{l=1}^{n-1} \phi_{gm}[l] \hat{R}_{gm}^L[l] \geq \sum_{l=2}^n O_{gm}[l], \forall m, n, \quad (49a)$$

$$\theta_{gm}[n] \leq \frac{180}{\pi} \psi_{gm}[n], \forall m, n, \quad (49b)$$

$$\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{q}[n-1]\| \leq \min\{V_{\max} \delta[n], \Delta_{\max}\}, \forall n, \quad (49c)$$

$$\mathbf{q}[0] = \mathbf{w}_{s_{\eta(k)}}, \quad \mathbf{q}[N] = \mathbf{w}_{s_{\eta(k+1)}}, \quad (49d)$$

$$\frac{(\delta[n])^4}{(\varsigma[n])^2} \leq (\varsigma^r[n])^2 + 2\varsigma^r[n](\varsigma[n] - \varsigma^r[n]) -$$

$$\frac{\|\mathbf{q}^r[n] - \mathbf{q}^r[n-1]\|^2}{v_0^2} +$$

$$\frac{2}{v_0^2} (\mathbf{q}^r[n] - \mathbf{q}^r[n-1])^T (\mathbf{q}[n] - \mathbf{q}[n-1]), \forall n, \quad (49e)$$

$$\varsigma[n] \geq 0, \forall n. \quad (49f)$$

# 解决方法——实验结果

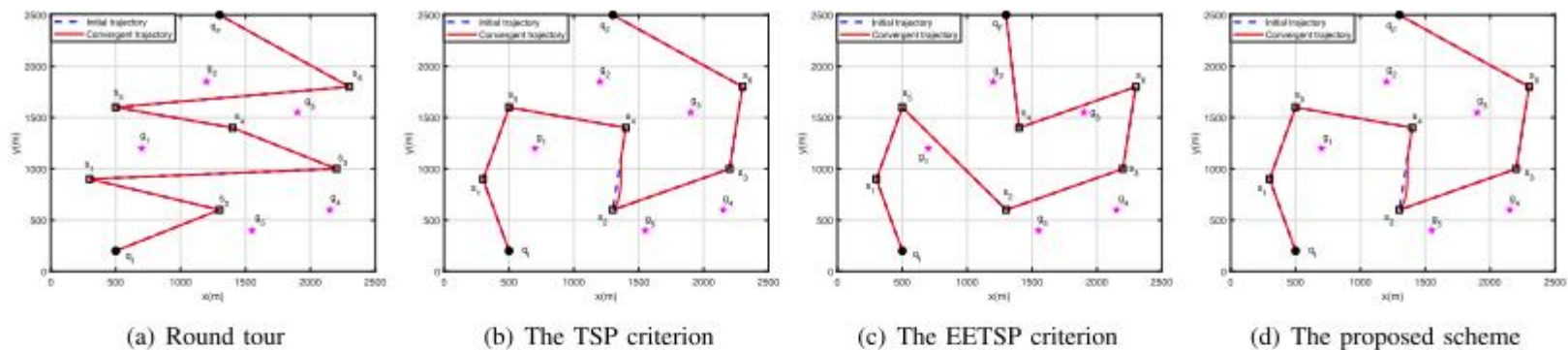


Fig. 2. Optimized UAV trajectories with  $Q_{sk} = 200$  Mbits.

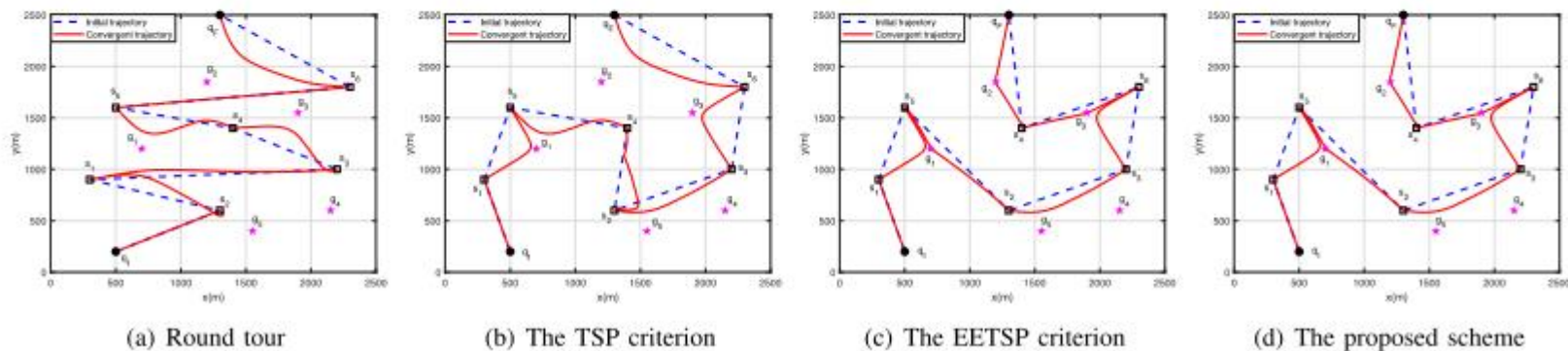
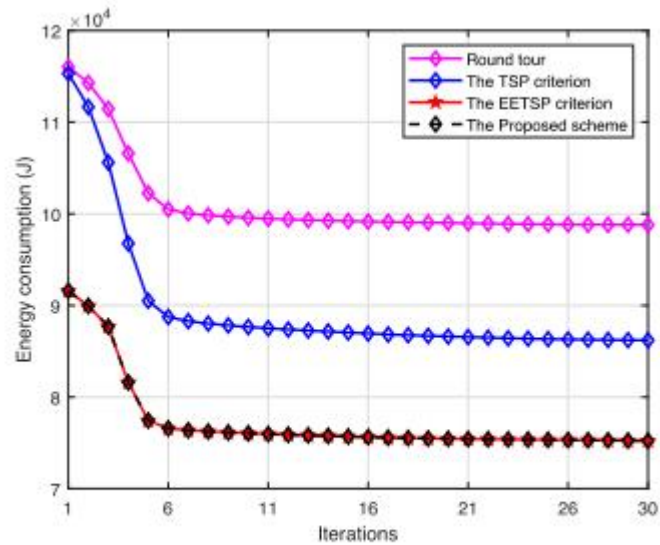


Fig. 3. Optimized UAV trajectories with  $Q_{sk} = 550$  Mbits.

# 解决方法——实验结果



7. Convergence of different schemes with  $Q_{s_k} = 550$  Mbits.