

无人机部署位置和信道分配联合优化方法

解其乐, 赵文栋, 俞星月, 刘存涛

(陆军工程大学 通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要:无人机在执行周期性数据采集任务时,由于任务执行时间有限、无线传感器的部署位置和功能不同,会存在无法采集全部数据、所采集数据具有不同应用价值等问题。基于此,提出了一种综合考虑采集公平性和重要度的数据采集评价方法。以采集周期内无人机采集数据的加权数据量最大化为优化目标,对无人机的悬停位置和信道分配进行联合优化。将该联合优化问题建模为一个非线性混合整数规划问题,并提出一种鲸鱼优化资源分配算法(whale optimized resource allocation algorithm, WORAA)对问题进行求解。仿真结果表明,相较于传统方法,在重要度影响不大的条件下,采集数据公平性有比较明显的提升,在满足公平性要求的基础上,加权数据量更大。

关键词:无人机; 数据采集; 公平性; 无线传感器

中图分类号: TP212.9; TN929.5 **DOI:** 10.12018/j.issn.2097-0730.20230214001

Joint Optimization of UAV Deployment Position and Channel Allocation

XIE Qile, ZHAO Wendong, YU Xingyue, LIU Cuntao

(College of Communications Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract: Due to the limited execution time, different mounted positions and functions of wireless sensors, the UAV may not be able to collect all the data, and the collected data may have different application values when the UAV is used to carry out the task of periodic data collection. Therefore, a data collection evaluation method is proposed to comprehensively consider the fairness and importance of acquisition. Based on the optimization objective of maximizing the weighted data volume of the UAV collected within the acquisition period, the hovering position and channel allocation of the UAV are jointly optimized. The joint optimization problem is modeled as a nonlinear mixed integer programming problem, and a whale optimization resource allocation algorithm (WORAA) is proposed to solve the problem. The simulation results show that compared with the traditional methods, this method significantly improves the fairness of data collection under the condition that the importance degree has little influence; on the basis of meeting the fairness requirement of the collected data, the weighted data volume is higher.

Key words: UAV; data collection; fairness; wireless sensor

物联网时代,无人机和无线传感器是当前重要的研究热点^[1-2]。无人机广泛应用于无线传感器的数据采集,包括环境监测、现场搜索、无人区勘探等^[3-4]。相较于固定基站和传感器之间多跳的通信

传输方案,采用无人机采集数据的方案具有成本低、机动性强、操作灵活、隐蔽性高、部署简单的优势^[5-6]。此外,在空旷环境下无人机与传感器建立由视距链路(line-of-sight, LOS)为主导的通信链路,提

收稿日期:2023-02-14

基金项目:国家自然科学基金(61671471)。

第一作者:解其乐,硕士研究生,主要研究无人机无线通信网络。

通信作者:赵文栋,教授,主要研究计算机网络、信息系统、无线自组织网络和嵌入式系统。

高了采集数据的速率^[7]。但无人机采集数据方案的性能会受到无人机位置部署、信道分配、通信范围和采集时间等多种因素的影响,如何利用无人机在有限时间内最大化数据采集量是一个值得研究的问题。

在考虑无人机位置部署方面,文献[8]通过覆盖概率描述无人机的覆盖问题,用粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)优化无人机的三维位置,从而优化无人机的覆盖概率。文献[9]研究了无人机网络中实时部署无人机作为飞行基站以优化移动用户吞吐量问题,提出了一种基于角色-批评者的深度强化学习方法,找到接近最优的无人机位置。在无人机能源和资源管理上,文献[10]提出了一种基于无人机布局、频谱分配和功率控制的联合优化方法,实现通信速率最大化。在无人机和传感器睡眠-唤醒机制优化上,文献[11]通过优化无人机的轨迹、无线传感器的唤醒机制以及传感器与无人机之间的匹配,最小化任务完成时间。

鉴于传感器数据具有不同应用价值的情况,文献[12]考虑了不同的服务质量要求和传感器的业务重要性,提出了无人机部署和信道分配的联合优化问题,但通信过程中无法保证每个传感器都能分配到信道资源。文献[13]研究了数据采集公平性对无人机任务决策的影响,在无人机定期收集数据的场景下提出速度控制的公平数据采集方案,该方法在无人机飞行时间相同的情况下提高了数据采集的公平性。文献[14]通过无人机收集照片数据,既考虑了无人机有限的能量容量,还考虑了照片数据的冗余性,在满足无人机能量容量的约束下,使在路线上拍摄的照片中包含的非冗余数据量最大化。

但以上研究均没有综合考虑传感器的不同重要度和数据采集公平性对无人机采集方案的影响。而不考虑数据采集公平性则会导致无人机集中于采集重要度高的传感器数据,而部分重要度不高的传感器数据会被忽视,从而影响决策的全面性;若不考虑传感器数据的重要度,只考虑数据采集公平性,则在有限时间内采集到的重要数据将会减少,从而影响决策的重要性。鉴于此,本文研究了安装多个定向天线的单架无人机对多个传感器进行数据采集的场景,其中多个传感器由于功能和部署位置不同,产生的数据具有不同的重要度。首先提出了一种综合考虑采集公平性和重要度的数据采集评价方法,通过联合优化无人机的采集位置和信道分配,实现无人机在一次数据采集周期内,传感器加权数据量及传感器数据公平性最大化,并将该联合优化问题建模为一个非线性混合整数规划问题。为解决该问题,

将其分解为无人机信道资源分配问题和无人机最佳悬停采集位置选择问题。针对第一个子问题,将无人机悬停位置固定,对无人机信道资源分配进行优化,并将该子问题建模为一个整数规划问题,提出了一种信道分配算法。针对第二个子问题,利用鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, WOA)在一定范围内选择无人机部署的最佳位置。

1 问题模型

1.1 场景描述

如图1所示,在一个无固定基础设施的偏远空旷的环境下,派出一架多旋翼多定向天线的无人机采集传感器数据,其中椭圆形区域表示待采集区域,区域内随机分布 N 个地面传感器。无人机出发前已知静态传感器的位置信息,在悬停位置可以覆盖全部传感器。传感器先接受无人机定向天线发射的激活信号,再通过全向天线向无人机发送存储在传感器的数据。无人机通过定向天线接收传感器数据,在理想状态下忽略定向天线之间的干扰。

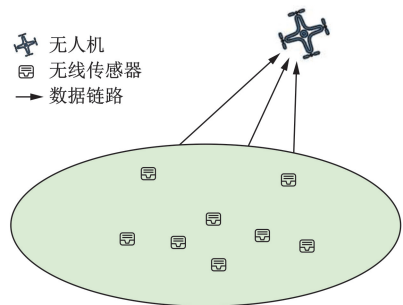


图1 无人机采集数据场景

由于传感器的数据量、采集时间、功能和部署位置均不同,导致产生的数据具有不同的重要度,因此在采集过程中应尽可能采集更重要的传感器数据。不考虑无人机从数据中心出发到悬停位置的时间,数据采集周期是指无人机到悬停位置后,对所有传感器从开始采集数据到结束采集数据的时间段。

1.2 系统模型

用 $\mathcal{N}=\{1,2,\dots,N\}$ 表示传感器的序号集合,用 $S=\{s_n, n \in \mathcal{N}\}$ 表示传感器,传感器的坐标为 $s_n=(x_n, y_n, 0)$,传感器存储的数据量集合为 $L=\{L_n, n \in \mathcal{N}\}$ 。无人机飞行高度固定为 H ,为了便于描述,将无人机的位置坐标表示为 $l(x_u, y_u, H)$ 。假设无人机上安装 K 根定向天线,每根天线在任一时刻仅能对准一个传感器,因此无人机最多同时采集

K 个传感器数据,建模为无人机分配 K 个信道,每个信道在任一时刻最多分给一个传感器。用集合 $\mathcal{K} = \{1, 2, \dots, K\}$ 表示无人机的每个信道,无人机可通过调整方向与所有传感器建立信道连接,通信过程中采用时分多址(time division multiple access, TDMA)技术,忽略天线与传感器调整对准方向的耗时。此外,每个传感器最多可占用一个信道,不能同时通过多个天线上传数据。

无人机与传感器通信采用视距模型,为了便于计算,将无人机在水平面的投影坐标表示为 $l_u(x_u, y_u)$, 假设时隙 τ 为一个单位时隙。在时隙 τ 内,无人机不调整天线方向,也不调整传感器连接链路。无人机共消耗 T 个连续的时隙 τ 来收集传感器的数据,令 $\mathcal{T} = \{1, 2, \dots, T\}$ 表示 T 个连续时隙的集合, $t \in \mathcal{T}$ 表示无人机工作的第 t 个时隙。在该模型中传感器 n 与无人机的距离为

$$d_{n,u} = \sqrt{H^2 + \|l_u - s_n\|_2^2} \quad (1)$$

无人机与第 n 个传感器在第 t 个时隙的信道衰落系数为

$$\beta_n = \rho_0 (d_{n,u})^{-2} = \frac{\rho_0}{H^2 + \|l_u - s_n\|_2^2} \quad (2)$$

式中: $\rho_0 = [(4\pi f_c)/c]^2$ 为单位距离的信道增益。第 t 个时隙,第 n 个传感器的数据传输速率为

$$R_n(t) = B \log_2 \left(1 + \frac{P_D \beta_n(t)}{\sigma^2} \right) \quad \forall t \in \mathcal{T}, \forall n \in \mathcal{N} \quad (3)$$

式中: P_D 表示传感器的发射功率,假设每个传感器有相同的传输功率 P_D ; σ^2 表示无人机接收天线处的噪声功率。

用 $\mathbf{M}_S = \{\mathbf{M}_{S_1}, \dots, \mathbf{M}_{S_T}\}$ 表示信道分配方案,对于 $t \in \mathcal{T}$, 用一个 N 维向量 \mathbf{M}_{S_t} 表示第 t 个时隙的分配策略。 $\mathbf{M}_{S_t} = [a_1(t), a_2(t), \dots, a_N(t)]$, 用 $a_n(t) = 1$ 表示传感器 s_n 在 t 时隙与无人机建立信道连接; $a_n(t) = 0$ 表示传感器 s_n 在该时隙未与无人机建立信道连接,无人机从各传感器收集的数据量为 L_m , 可得

$$L_m = \sum_{t=1}^T \tau a_n(t) R_n(t) \quad \forall n \in \mathcal{N} \quad (4)$$

$$\sum_{n=1}^N a_n(t) \leq K \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (5)$$

$$a_n(t) \in \{0, 1\} \quad (6)$$

其中:式(5)表示无人机在每个时隙采集的传感器不超过 K ; 式(6)表示每个传感器在一个时隙内最多接入一个信道。

无人机在 T 个时隙内采集的数据总量为

$$C_{\text{sum}} = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \tau a_n(t) R_n(t) \quad \forall n \in \mathcal{N} \quad (7)$$

1.3 问题建模

令集合 $G = \{G_n, n \in \mathcal{N}\}$ 表示每个传感器的数据重要程度, G_n 越大传感器的等级越高、数据越重要。假设传感器存储的数据中,必须上传至无人机的数据占比服从正态分布,每个传感器产生的数据总量用概率密度面积 $I(0, \sigma_n^2)$ 表示。其中,传感器重要度 G_n 与正态分布参数 σ_n 的关系如式(8)所示,同等重要度的传感器对应的参数 σ_n 相同,通过式(9)描述不同重要度的传感器最小上传数据量。

$$\sigma_n = \frac{1}{G_n} \quad (8)$$

$$L_n^{\min} = L_n \int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_n^2}} dx \quad (9)$$

式中: $\int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_n^2}} dx$ 为必须上传的数据占比,

如图2所示。图中有两个 σ_n 值不同的正态分布概率密度曲线,曲线在虚线内的积分值表示传感器重要数据的占比。

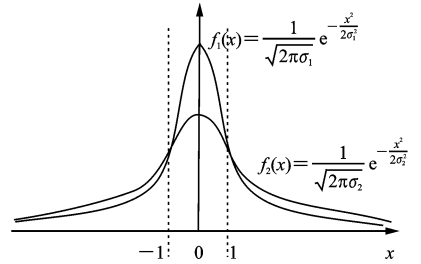


图2 重要数据占比示意

为了保证无人机采集传感器数据的公平性,要求无人机保证从每个传感器中采集到最少的数据量为

$$L_m \geq L_n^{\min} \quad \forall n \in \mathcal{N} \quad (10)$$

对此,用式(11)来表示无人机采集数据任务的价值量。

$$C_{\text{sum}}^l = \sum_{n=1}^N G_n * \sum_{t=1}^T \tau a_n(t) R_n(t) \quad \forall n \in \mathcal{N} \quad (11)$$

为了评估无人机采集数据的质量,设置两个评价指标如下。

(1) 公平性评价指标。无人机采集传感器的重要数据时,若满足 $L_m \geq L_n^{\min}$, 则 $x_n = 1$, 否则 $x_n = 0$ 。

$$\eta_{\text{comp}} = \frac{\sum_{n=1}^N x_n}{N} \times 100\% \quad (12)$$

式(12)表示采集重要数据的公平性,当无人机完成所有传感器的重要数据采集,即 $\eta_{\text{comp}} = 1$ 时,此次任务收集数据才判定为公平。

(2) 数据重要度评价指标。用来表示无人机采集数据中来自重要传感器的数据占比,用 κ_{impo} 表示为

$$\kappa_{\text{impo}} = \frac{\sum_{n=1}^N L_{r_n} (\forall G_n \geq a)}{\sum_{n=1}^N L_{r_n}} \times 100\% \quad (13)$$

式中: a 为一个常数,当传感器重要度大于 a 时,该传感器重要度较高。基于此,在规定的无人机采集时间 $T \cdot \tau$ 内,通过优化无人机的信道分配方案 M_S 和无人机的采集位置 l , 提高采集数据的公平性和重要度,最大化无人机采集数据的加权数据量,问题构建如下

$$P: \max_{M_S, l} C_{\text{sum}}^l \quad (14)$$

$$\text{s. t. } \sum_{n=1}^N a_n(t) \leq K \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (14a)$$

$$a_n(t) \in \{0, 1\} \quad (14b)$$

$$L_{r_n} \geq L_n^{\min} \quad \forall n \in \mathcal{N} \quad (14c)$$

$$L_{r_n} \leq L_n \quad \forall n \in \mathcal{N} \quad (14d)$$

其中:式(14a)表示无人机每个时隙的信道数不超过 K ; 式(14b)表示每个传感器在一个时隙内最多接入一个信道;式(14c)等价于 $\eta_{\text{comp}} = 1$, 收集数据达到公平性的要求;式(14d)表示无人机从 s_n 采集数据量不能超过 L_n 。

2 问题求解

问题 P 需要优化无人机的悬停位置和信道分配来最大化无人机采集数据的加权容量,是一个混合整数非线性规划问题。针对此问题提出一个资源分配算法和鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, WOA)结合的鲸鱼优化资源分配算法(whale optimized resource allocation algorithm, WORAA), 实现无人机资源分配和部署问题的快速求解。首先,选择无人机的初始悬停位置,用资源分配算法获得固定位置无人机资源分配方案。该算法可以通过对无人机采集传感器重要程度来迅速接近资源分配问题的最优解。然后,在无人机的搜索范围内,采用 WOA 找到无人机的部署位置。

2.1 资源分配算法

提出考虑数据公平性的信道分配算法,如算法 1 所示。算法 1 用来实现无人机在给定部署位置的信道分配,同时提出不考虑公平性的信道分配算法,如算法 2 所示,作为对比算法来验证所提信道分配算法的有效性。无人机位置固定后可将问题 P 转化为问题 P1。

$$P1: \arg\max_{M_S} C_{\text{sum}}^l \quad (15)$$

$$\text{s. t. } \sum_{n=1}^N a_n(t) \leq K \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (15a)$$

$$a_n(t) \in \{0, 1\} \quad (15b)$$

$$\sum_{t=1}^T \tau a_n(t) R_n(t) \geq L_n^{\min} \quad \forall n \in \mathcal{N} \quad (15c)$$

$$\sum_{t=1}^T \tau a_n(t) R_n(t) \leq L_n \quad \forall n \in \mathcal{N} \quad (15d)$$

算法 1 考虑公平性的信道分配算法

输入:任务时间 T ;传感器位置 S ;传感器数 N ;传感器数据量 L ;传感器重要程度 G ;信道数 K ;无人机固定位置 l_u

输出:无人机资源分配策略 M_S ;无人机数据加权数据量

C_{sum}^l

1. 无人机的总资源空间为 $T \cdot K$;
2. 计算各传感器单位时间加权数据量 $G_n R_n \tau$, 按 $G_n R_n \tau$ 由大到小顺序对传感器进行排序;
3. 计算无人机完成各传感器重要数据 L_n^{\min} 的采集时隙 L_n^{\min}/R_n , 按由大到小的顺序对传感器进行排序;
4. 无人机按步骤 3 的顺序与传感器建立连接,连接时长为步骤 3 的计算结果,将传感器占用的时隙空间依次放入无人机的总资源空间内;
5. 计算无人机采集每个传感器剩余数据的时隙 $(L_n - L_n^{\min})/R_n$;
6. 根据步骤 2 的顺序,将采集传感器剩余数据的时隙依次放入无人机剩余的资源空间内,截取任务时间 T 的部分为无人机资源分配策略 M_S ;
7. 计算分配策略 M_S 下的数据加权数据量。

当不考虑数据公平性时,由式(11)可知 C_{sum}^l 与 $R_n(t), G_n, a_n(t)$ 为线性函数关系, M_S 为在规定时隙 T 内,各传感器占用信道的时隙。此时可将问题 P1 转化为求解整数线性规划问题 P2。

$$P2: \max_{M_S} C_{\text{sum}}^l \quad (16)$$

$$\text{s. t. } \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \tau a_n(t) \leq T \cdot K \quad (16a)$$

$$a_n(t) \in \{0, 1\} \quad (16b)$$

$$\sum_{t=1}^T \tau a_n(t) R_n(t) \geq L_n^{\min} \quad \forall n \in \mathcal{N} \quad (16c)$$

$$\sum_{t=1}^T \tau a_n(t) R_n(t) \leq L_n \quad \forall n \in \mathcal{N} \quad (16d)$$

式(16a)由式(14a)得出,表示无人机分配给传感器的总时隙资源不超过 $T \cdot K$, 对于问题 P2, 可用 MATLAB 整数规划的工具, 求解出 $\sum_{t=1}^T \tau a_n(t)$ 的值。受式(16b)的约束, 每个传感器在一个时隙内只能占用一个信道的资源, 在信道分配过程中需使传感器尽可能只占用一个信道的资源, 提出不考虑数据公平性的算法 2 解决问题 P2。

算法 2 不考虑公平性的信道分配方案

输入: 任务时间 T ; 传感器位置 S ; 传感器数 N ; 传感器数据量 L ; 传感器重要程度 G ; 信道数 K ; 无人机固定位置 l_u
输出: 无人机资源分配策略 M_S ; 无人机数据加权数据量 C_{sum}^l

1. 利用整数线性规划的方法求出 $\sum_{t=1}^T \tau a_n(t)$ 的值, 为各传感器占用的资源空间;
2. 计算各传感器单位时间加权数据量 $G_n R_n \tau$, 按 $G_n R_n \tau$ 由大到小顺序对传感器进行排序;
3. 按步骤 2 的顺序给传感器分配步骤 1 的时隙, 直到任务时间 T 结束为止, 可得无人机资源分配策略 M_S ;
4. 计算分配策略 M_S 下的数据加权数据量。

2.2 基准搜索算法

使用穷举搜索的算法来寻找无人机的部署位置, 将该算法作为 WOA 的对比算法。其核心思想是在一定范围内穷尽搜索部署区域内的最优位置, 从而得到悬停位置的次优解。基准算法的主要步骤如算法 3 所示。

算法 3 穷举搜索最优部署位置

输入: 任务时间 T ; 传感器位置 S ; 传感器数 N ; 传感器数据量 L ; 传感器重要程度 G ; 信道数 K ; 无人机的搜索直径 D_{max}
输出: 无人机资源分配策略 M_S ; 无人机数据加权数据量 C_{sum}^l ; 无人机的部署位置 l_{uopt}

1. 搜索步长 $s = 1 \text{ m}$, $M_S = \emptyset$, $C_{\text{sum}}^l = 0$, $l_{\text{uopt}} = [200, 200]$
2. for each $x_u \in [-D_{\text{max}}/2, D_{\text{max}}/2]$ do
3. for each $y_u \in [-\sqrt{D_{\text{max}}^2/4 - x_u^2}, \sqrt{D_{\text{max}}^2/4 - x_u^2}]$ do
4. 把 (x_u, y_u) 作为算法 1 的输入计算无人机的信道分配策略 M_S 和无人机采集数据的数据量 C_{sum}^l
5. if $(C_{\text{sum}}^l > C_{\text{sum}}^l)$ then
6. Let $l_{\text{uopt}} \leftarrow (x_u, y_u)$, $C_{\text{sum}}^l \leftarrow C_{\text{sum}}^l$
7. end
8. let $y_u = y_u + s$
9. end
10. let $x_u = x_u + s$
11. end

2.3 WOA

无人机的优化部署难以求得精确的解, 本文采用 WOA 迭代搜索次优的部署位置。WOA 是 2016 年由澳大利亚格里菲斯大学的 Mirjalili 等通过模仿

自然界中鲸鱼捕食行为提出的一种新的群体智能优化算法。鲸鱼的捕食行为主要分为 3 类: (1) 包围捕食; (2) 气泡网攻击; (3) 搜索猎物。根据文献 [15] 对 WOA 算法的描述, 可将 3 类捕食行为表示如下。

2.3.1 包围捕食

在 d 维空间中, 当前最佳鲸鱼个体 X^* 的位置为 $(X_1^*, X_2^*, \dots, X_{\text{dim}}^*)$, dim 表示鲸鱼个体的维度, 鲸鱼个体 X^j 的位置为 $(X_1^j, X_2^j, \dots, X_{\text{dim}}^j)$ 。则鲸鱼个体 X^j 在最佳鲸鱼个体影响下的下一个移动位置 $X^{j+1}(X_1^{j+1}, X_2^{j+1}, \dots, X_{\text{dim}}^{j+1})$ 的计算公式为

$$X_i^{j+1} = X_i^* - A \cdot D_i \quad (17)$$

$$D_i = |C \cdot X_i^* - X_i^j| \quad (18)$$

$$C = 2r_2 \quad (19)$$

$$A = 2a \cdot r_1 - a \quad (20)$$

式中: X_i^{j+1} 表示 X^{j+1} 的第 i 个分量; r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数; a 在迭代过程中从 2 到 0 线性递减。

2.3.2 气泡网攻击

共设计了两种方法来对鲸鱼的气泡网行为进行建模: (1) 收缩包围, 通过降低式(19)中 a 的值来实现, 将 A 中的取值范围设置为 $[-1, 1]$, 其他公式与包围捕食相同; (2) 螺旋位置更新, 鲸鱼个体以式(20)方式向当前最佳鲸鱼个体螺旋式移动。

$$X_i^{j+1} = X_i^* + D_i \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) \quad (21)$$

式中: $D_i = |X_i^* - X_i^j|$ 表示第 i 头鲸鱼与最佳位置之间的距离; b 为常数, 定义了对数螺线的形状; l 为 $[-1, 1]$ 之间的随机数。鲸鱼在围捕猎物时, 在一个不断缩小的圆圈内绕着猎物游动, 同时通过螺旋形路径向猎物靠近。可建模为各以 50% 的概率选择收缩包围, 或者选择螺旋位置更新。

$$X_i^{j+1} = \begin{cases} X_i^* - AD_i & p < 0.5 \\ X_i^* + D_i e^{bl} \cos(2\pi l) & p \geq 0.5 \end{cases} \quad (22)$$

2.2.3 搜索捕猎

在收缩包围的捕猎行为中 A 范围限制为 $[-1, 1]$, 但当 A 的取值不在 $[-1, 1]$ 时, 此时当前鲸鱼个体可能不会向当前最佳鲸鱼个体靠近, 而是从当前鲸鱼群体中随机选择一条鲸鱼个体靠近, 这就是搜索捕猎。根据随机选择而不是最优选择更新位置, 虽然可能会使当前鲸鱼群体偏离目标, 但是会增强鲸鱼群体跳出局部搜索的能力。鲸鱼群体中随机一个鲸鱼 X^{rand} 的位置为 $(X_1^{\text{rand}}, X_2^{\text{rand}}, \dots, X_d^{\text{rand}})$, 鲸鱼个体 X^j 的位置为 $(X_1^j, X_2^j, \dots, X_d^j)$, 则搜索捕猎的表达式为

$$X_i^{j+1} = X_i^{\text{rand}} - AD_i \quad (23)$$

$$D_i = |CX_i^{\text{rand}} - X_i^{j+1}| \quad (24)$$

WOA 求解无人机最优部署位置的主要步骤如算法 4 所示。

算法 4 WOA 解决最优部署位置问题

输入:任务时间 T ;传感器位置 S ;传感器数 N ;传感器数据量 L ;传感器重要程度 G ;信道数 K

输出:无人机最佳部署位置 PO ;无人机数据加权数据量 C_{sum}^t

1. 初始化算法参数:鲸鱼规模 N_{agent} , 迭代次数 t_{max} , 问题维数 dim
2. 设置鲸鱼捕猎的限定范围为 $X_i^* \in [0, 400]$, $i = 1, 2$, 随机产生初始鲸鱼的位置, X^* 表示最佳位置
3. while ($t < t_{\text{max}}$) do
4. 先对鲸鱼位置进行限定, 然后根据算法 1 计算当前鲸鱼群的适应度值, 找出当前最优位置
5. for $i = 1$ to N_{agent} do
6. 更新 a, A, C, l, p
7. for $i = 1$ to dim do
8. if ($p < 0.5$) do
9. if ($|A| \geq 1$) do
10. 使用式(23)更新鲸鱼位置
11. else if ($|A| < 1$) do
12. 使用式(17)的收缩包围更新鲸鱼的位置
13. end if
14. else if ($p \geq 0.5$) do
15. 使用式(21)进行变螺旋更新鲸鱼位置
16. end if
17. end for
18. end for
19. $t = t + 1$;
20. end while
21. 输出最优解和最优适应值

3 仿真实验及分析

对所提方案的有效性,在 CPU 主频为 2.2 GHz, 内存为 16 GB 的平台上使用 MATLAB2021 进行评估。在模拟过程中,40 个传感器随机分布在 $0.4 \text{ km} \times 0.4 \text{ km}$ 的区域内,每个传感器存储的数据量 $L = \{L_n, n \in \mathcal{N}\}$ 服从均值为 6 000 bit 的泊松分布,传感器的重要度 $G = \{G_n, n \in \mathcal{N}\}$ 在集合 $\{0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3\}$ 中随机取值,当传感器重要度 $G_n \geq 2$ 时,表示传感器 s_n 为重要传感器。主要参数如表 1 所示^[16]。

表 1 仿真参数设置

符号	表示含义	值
H	无人机的高度	50 m
K	信道数	7
σ^2	高斯白噪声功率	-50 dB
ρ_0	$d = 1 \text{ m}$ 处的参考数据功率增益	-30 dB
τ	最小时隙	1 s
P_D	传感器的传输功率	5 W
D_{max}	搜索范围	200 m
B	无人机的带宽	1 MHz
l_u	无人机固定位置	(200, 200, 50)

本文比较了算法 1 与算法 2 在无人机不同的采

集时间下采集传感器数据的公平性、重要度和加权数据量。

在不同的采集时间内分别用算法 1 和算法 2 进行无人机数据采集公平性的评估,如图 3 所示。由图 3 可以看出,算法 1 能在 210 s 后达到公平性要求,而算法 2 在 230 s 仍未达到公平性要求。上述比较中,算法 1 首先保证在最短时间内采全传感器的最小数据量,再采集剩余数据,而算法 2 仅考虑无人机采集的加权数据量。因此,在采集数据时,算法 1 较算法 2 在达到公平性的要求用的时间周期更短。

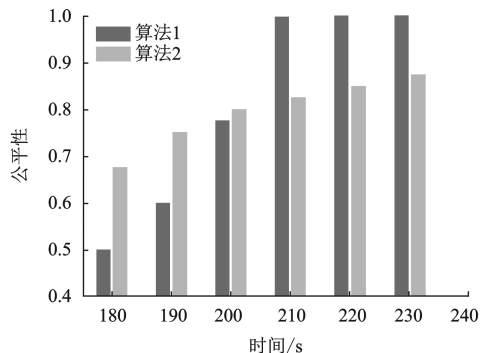


图 3 不同周期采集数据的公平性

无人机用算法 1 和算法 2 进行任务采集时,重要传感器数据占总采集数据的比值如图 4 所示。在相同任务时间内,算法 1 与算法 2 重要度接近,算法 1 为了达到公平性的要求采集了重要度不高的数据,因此重要度略低于算法 2。

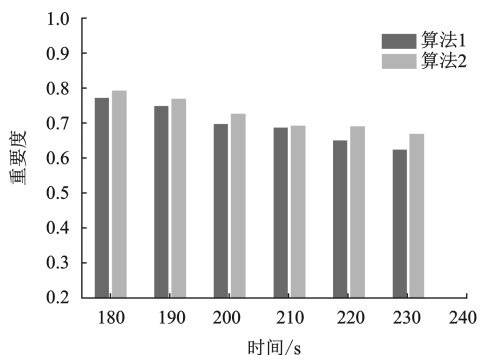


图 4 不同周期采集数据的重要度

无人机用算法 1 和算法 2 在不同时间内完成采集任务时,无人机采集数据的加权数据量如图 5 所示。由图可知,在达到公平性要求后,算法 1 与算法 2 的加权数据量接近。对比算法 2,算法 1 可以更快地达到数据采集的公平性,在达到公平性的要求下不降低采集数据的重要度和采集数据的加权数据量。

接下来,对算法 3 和算法 4 的应用效果进行对比。由图 6(a)可知,无人机使用算法 4 在相同时间

下采集的加权数据量与使用算法3几乎相同,算法3的加权数据量略高于算法4,平均差值不超过0.4%。由图6(b)可知,算法3的运算时间约为350s,而算法4的运算时间约为2s,相较于无人机的采集时间,虽然算法3可以达到更高的采集数据量,但计算效率太低,不符合实际应用,使用算法4可以更快地找到较优的部署位置。

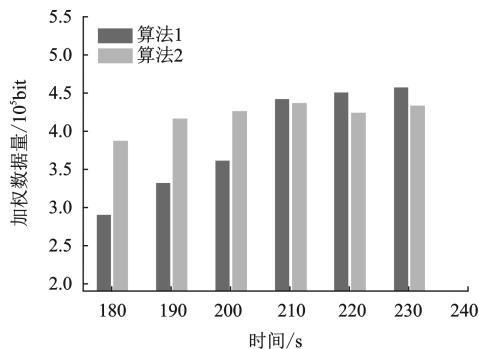
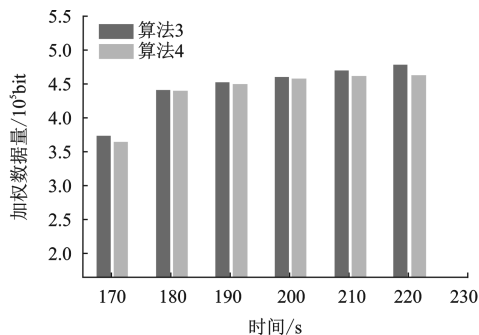
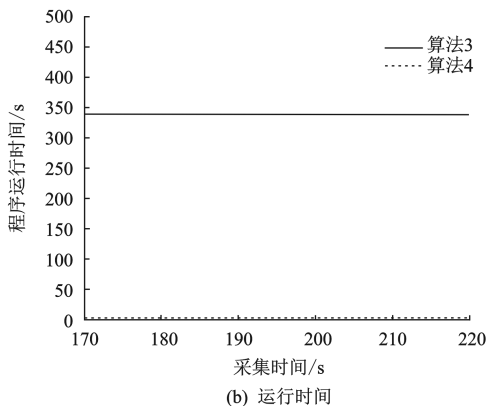


图5 不同周期采集数据的加权数据量



(a) 加权数据量



(b) 运行时间

图6 不同周期采集数据的加权数据量和程序运行时间

然后,使用WORAA方案与文献[12]提出的信道分配及位置优化方案(以下称方案b)进行性能对比,在不同的采集周期内,比较两种方案中无人机采集数据的公平性、重要度和加权数据量。

使用方案b与WORAA方案分别在20~240s完成采集数据的公平性和重要度评估,如图7所示。

可以看出,在采集公平性方面,WORAA方案可以在180s达到公平性要求,而方案b无法达到公平性要求,180s时公平性为40%,240s时公平性为60%。在采集重要度方面,WORAA方案优先采集了重要度高的传感器数据,重要度高的数据达到要求后,再采集重要度不高的传感器数据。因此,在60s后采集数据的重要度逐渐降低,180s时重要度为70%,240s时重要度为60%。方案b无人机采集数据的重要度保持在80%~90%。对比方案b,WORAA方案在采集时隙到180s时,重要度虽下降约10%,但公平性提高约60%;采集时隙到240s时,重要度下降约20%,公平性提高约40%,依然可以满足公平性的要求。在设计时WORAA方案综合考虑了采集数据公平性和传感器重要度的影响,而方案b倾向于采集重要传感器的数据,忽略了重要度不高的传感器数据。由此可见,WORAA方案在满足采集传感器数据的公平性方面有更好的效果,可以在重要度影响不大的条件下,明显提升采集公平性,采集的数据公平性达到100%更能反映采集区域信息的全局特征。

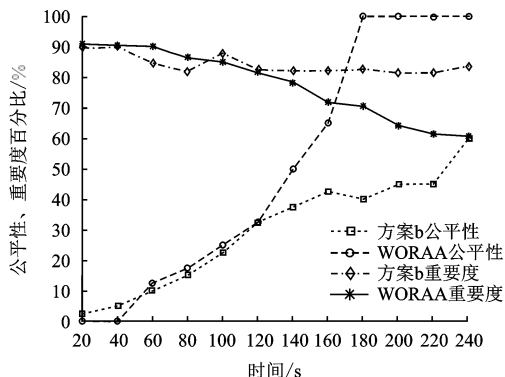


图7 WORAA方案与方案b的公平性和重要度对比

使用方案b与WORAA方案分别在20~240s完成采集数据的加权数据量变化,如图8所示。

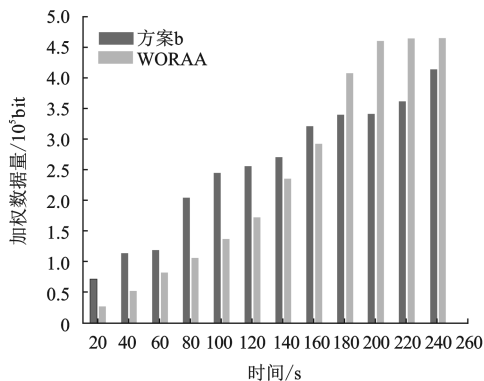


图8 WORAA方案与方案b的加权数据量对比

在 180 s 前, WORAA 方案为尽快达到公平性要求, 采集了部分重要度不高的传感器数据, 因此加权数据量低于方案 b; 在 180 s 后, WORAA 方案达到了公平性要求, 达到公平性要求后 WORAA 方案优先采集重要传感器数据, 因此无人机收集的加权数据量比方案 b 高, 平均加权数据量提高了约 10%。

4 结论

研究了单架无人机配备多根定向天线的资源分配和部署位置优化问题, 在现有的无人机通信模型上, 提出了考虑公平性和重要度的评价指标, 利用 WORAA 方法, 达到了无人机采集数据满足公平性要求的基础上, 最大化加权数据量的目标。仿真结果表明, 该方法可用更短的时间达到公平性要求, 在重要度影响不大的条件下, 采集数据公平性有比较明显的提升, 在满足公平性要求的基础上, 加权数据量更高。

参考文献:

- [1] 常宇飞, 李重阳, 张爱军, 等. 差分进化花朵授粉算法的 WSN 节点部署策略[J]. 陆军工程大学学报, 2023, 2(1): 86-92.
CHANG Yufei, LI Chongyang, ZHANG Aijun, et al. Strategy of WSN node deployment based on differential-evolution flower-pollination algorithm[J]. Journal of Army Engineering University of PLA, 2023, 2(1): 86-92.
- [2] 王海, 秦蓁, 熊飞, 等. 全分布式软件定义网络架构在无人集群系统中的应用[J]. 陆军工程大学学报, 2022, 1(1): 16-21.
WANG Hai, QIN Zhen, XIONG Fei, et al. Application of fully distributed software defined network architecture to unmanned swarm system[J]. Journal of Army Engineering University of PLA, 2022, 1(1): 16-21.
- [3] HAYAT S, YANMAZ E, MUZAFFAR R. Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(4): 2624-2661.
- [4] ALZHRANI B, OUBBATI O S, BARNAWI A, et al. UAV assistance paradigm: State-of-the-art in applications and challenges[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2020, 166: 102706.
- [5] KURUNATHAN H, HUANG H L, LI K, et al. Machine learning-aided operations and communications of unmanned aerial vehicles: A contemporary survey[J/OL]. 2022. <https://arXiv.org/abs/2211.04324>.
- [6] ZENG Y, WU Q Q, ZHANG R. Accessing from the sky: A tutorial on UAV communications for 5G and beyond[J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(12): 2327-2375.
- [7] AL-HOURANI A, KANDEEPAN S, JAMALIPOUR A. Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments [C]//2014 IEEE Global Communications Conference. Austin: IEEE, 2015: 2898-2904.
- [8] ZHANG Y H, ZHANG L Y, LIU C P. 3-D deployment optimization of UAVs based on particle swarm algorithm[C]//2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT). Xi'an: IEEE, 2020: 954-957.
- [9] CHEN Z W, ZHONG Y, GE X H, et al. An actor-critic-based UAV-BSs deployment method for dynamic environments[C]//ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC). Dublin: IEEE, 2020: 1-6.
- [10] PHAM Q V, IRADUKUNDA N, TRAN N H, et al. Joint placement, power control, and spectrum allocation for UAV wireless backhaul networks[J]. IEEE Networking Letters, 2021, 3(2): 56-60.
- [11] ZHAN C, ZENG Y. Completion time minimization for multi-UAV-enabled data collection[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(10): 4859-4872.
- [12] LIU C T, ZHAO W D. UAV deployment and channel allocation considering diverse QoS constraints and service importance[J]. International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing, 2021, 37(3): 151-164.
- [13] LI X, TAN J W, LIU A F, et al. A novel UAV-enabled data collection scheme for intelligent transportation system through UAV speed control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(4): 2100-2110.
- [14] LIANG Y, XU W Z, LIANG W F, et al. Nonredundant information collection in rescue applications via an energy-constrained UAV[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2): 2945-2958.
- [15] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95: 51-67.
- [16] YANG D C, WU Q Q, ZENG Y, et al. Energy tradeoff in ground-to-UAV communication via trajectory design[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(7): 6721-6726.