

IRS 辅助无人机轨迹优化在 WSN 中节能数据采集^{*}

吴广通 张爽 田文 刘光杰 戴跃伟

(南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044)

摘要: 在无线传感器网络(WSN)中,为了提高传感器节点(SNs)的能量效率,延长 WSN 的使用寿命,通常采用 UAV 作为数据采集器。然而,由于传统的 UAV 飞行轨迹设定存在能耗高的特点,此外,部分节点在地理特征存在通信信道较差的问题。针对以上问题,提出了一种基于 IRS 辅助 UAV 轨迹优化的 WSN 节能数据采集方法,该方法利用 IRS 通过反射传感器所发的信号增强 UAV 采集数据的能力,通过优化 UAV 轨迹提高 WSN 节点的能量效率。具体来说,首先构建 IRS 辅助 UAV 空地信道模型,然后构建面向 UAV 飞行轨迹和唤醒机制约束的 WSN 能耗目标函数,通过块坐标下降技术,将目标函数转化为对 UAV 的飞行轨迹和 SNs 的唤醒调度策略的优化问题。通过仿真,与 3 种典型无人机轨迹优化方法相比,该方案产生的能量消耗分别降低了 91.0%、61.5% 和 41.6%,证明了该方法明显提高了 WSN 能量效率。

关键词: 智能反射面;无人机轨迹优化;无线传感器网络;节能数据采集;混合信道模型

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1020

IRS assisted UAV trajectory optimization for energy saving data acquisition in WSN

Wu Guangtong Zhang Shuang Tian Wen Liu Guangjie Dai Yuewei

(College of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In wireless sensor network (WSN), in order to improve the energy efficiency of sensor nodes (SNs) and extend the service life of WSN, UAV is usually used. UAV as a data collector. However, due to the characteristics of high energy consumption in traditional UAV flight trajectory setting, in addition, some nodes have poor communication channels in geographical characteristics. To solve the above problems, a WSN energy-saving data acquisition method based on IRS assisted UAV trajectory optimization is proposed. The method uses IRS to enhance the UAV's data acquisition capability through the signal sent by the reflection sensor. The energy efficiency of WSN nodes is improved by optimizing UAV trajectory. Specifically, the IRS-assisted UAV air-ground channel model is first constructed, and then the WSN energy consumption objective function is constructed for UAV flight trajectory and wake-up mechanism constraints. By using block coordinate descent technology, the objective function is transformed into an optimization problem for UAV flight trajectory and SNs wake-up scheduling strategy. Through simulation, compared with the three typical UAV trajectory optimization methods, the energy consumption generated by this scheme is reduced by 91.0%, 61.5% and 41.6%, respectively, which proves that the WSN energy efficiency is significantly improved by this method.

Keywords: intelligent reflecting surface; UAV trajectory optimization; wireless sensor network; energy saving data collection; mixed channel model.

0 引言

随着科技的飞速发展,无线传感器网络(wireless

sensor network, WSN)在现实生活中应用越来越广泛,成为现代信息技术和智能系统的重要组成部分。无线传感器网络是由多个传感器节点(sensor nodes, SNs)组成^[1],这些传感器节点都采用的储备电池进行能源供电,无需有线电

收稿日期:2024-12-24

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(62401269, U2436601, 62072250)、江苏省科技计划专项资金(基础研究计划自然科学基金)项目(BK20230415)、江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究面上项目(23KJB120007)资助

源连接,部署更加灵活,安装成本更低。然而,这种无线连接将会导致传感器节点的能量有限,并且能源一旦耗尽就很难再充电,使得 WSN 的使用寿命受到限制,因此,如何高效节能的进行数据传输对于延长 WSN 的使用寿命有着重要影响。无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)作为主要唤醒设备和数据采集器在 WSN 具有广泛的发展前景^[2-3],由于其高机动性和灵活性^[4-5],扩大了数据采集的覆盖范围,使得其能够高效的从 SNs 处收集数据,减少对 SNs 的能量消耗。然而,传统的 WSN 中部分节点由于地理地形特点,使得通信信道极易被树木或高层建筑遮挡,提升了 UAV 数据采集的难度。

智能反射面(intelligent reflecting surface, IRS)是解决该问题的一个很有前途的解决方案,因为它能够重构无线传播环境^[6]。IRS 由大量反射元件组成,无需任何射频链即可被动反射入射信号以增强所需信号或抑制干扰^[7]。IRS 可以通过反射来增强发射信号,它不仅可以减少建筑物的遮挡影响,而且也提高信息的覆盖范围,由于 IRS 可以通过反射来增强信号为 SNs 提供更多的通信机会,为无人机的轨迹优化提供了更大的自由度,这也是降低 SNs 能耗的潜在途径。为了尽可能降低 SNs 的能量消耗,在 UAV 作为数据采集器的 WSN 中,对 SNs 应用一种唤醒机制来减少网络能耗的技术^[8]。在这种机制下,SNs 一直是休眠状态,只有当 UAV 靠近某个 SN 或者 IRS 时,使得相应的 SN 开始工作进行数据传输,此时其他的 SN 处于休眠状态。这种方法是通过两个方面来减少 SNs 的能量损耗的,一方面“唤醒”是能够有效的控制 SNs 的工作时间,避免了 SNs 在非工作时间的能量浪费。另一方面“靠近”是通过缩短 UAV 到 SNs 的通信距离,减少信道损耗,间接减少了 SNs 发射的能量损耗。通过应用这个唤醒机制,使得在 WSN 中达到了节省 SNs 能量损耗的效果,提高了 WSN 中的能量利用效率,在一定的程度上延长了 WSN 的使用寿命。

目前部分工作研究了无人机如何通过轨迹优化高效节能的对无线传感器网络进行数据收集。文献[9]设计了一个封闭的 3D 无人机轨迹,以实现无人机辅助 WSN 的高效数据收集。文献[10]提出通过给 UAV 安装旋转天线形成扇形覆盖区,并限定每个扇形内的节点数进而避免了信号碰撞,达到降低数据传输能耗的效果。文献[11]将多无人机在同频段下为多个传感器节点传输能量并收集传感数据。文献[12]提出一种将无人机与无线传感器网络结合解决环境恶劣的特殊监测区域数据采集问题。近年来,将 IRS 集成到现有的无人机网络中,进一步释放空地网络的潜力,已成为研究的热点^[13],考虑将 IRS 安装在无人机上^[14-15],以实现来自天空的智能反射,这种设计受无人机的高机动性的影响,IRS 的位置可以相应改变,进而提高数据传输效率和抗干扰能力^[16-18]。

从以上的研究方向和内容可以发现 UAV 与 IRS 的结

合具有极大的潜力,然而,目前尚未有研究探讨在 WSN 中应用 IRS 辅助无人机进行轨迹优化,以实现节能数据采集。众所周知,延长 UAV 辅助的 WSN 的寿命需考虑两个关键性内容。一方面是 SNs 的能量有限,应该合理地设计 SNs 的调度策略,来尽量减少 SNs 对电池的使用时间;另一方面就是优化 SNs 调度策略的同时也要考虑 UAV 轨迹的设计^[19]。本文在 IRS 辅助下通过以最小化所有传感器节点的最大能量消耗为目标函数,优化 UAV 的飞行轨迹和 SNs 的唤醒策略调度。然而,通过计算发现要求解的目标函数为复杂的非凸问题,该问题难以找到最优解。为了能够解出最优解,本文应用了块坐标下降技术^[20],把复杂非凸优化问题转化为两个简单的非凸优化问题,即 UAV 轨迹优化问题和 SN 调度优化问题,又通过引入松弛变量和应用一阶泰勒展开的方法,把非凸优化问题转化凸优化问题,通过凸优化工具进行求解得出最优解,并对实验数据进行分析与对比,本文采用了控制变量法,分别改变了 IRS 的高度、位置、数量以及 UAV 的飞行高度等参数。通过观察这些参数变化对 WSN 能耗的影响,实验结果表明,本文所提出的方案有显著的节能效果。

1 系统模型和问题阐述

1.1 系统模型

本文采用的系统模型如图 1 所示,其中包括 1 个 IRS, 1 个 UAV 和 K 个 SNs,通过在 IRS 的辅助下,实现无人机在无线传感器网络中高效的数据采集,地面上有 K 个 SNs 组成的无线传感器网络,由于存在建筑、植被等造成多径效果,会减弱部分信号的强度,影响信息的传输,所以引入 IRS,使 SNs 发送的信息可以通过 IRS 的反射到 UAV 上,从而提高 SNs 的能量效率。

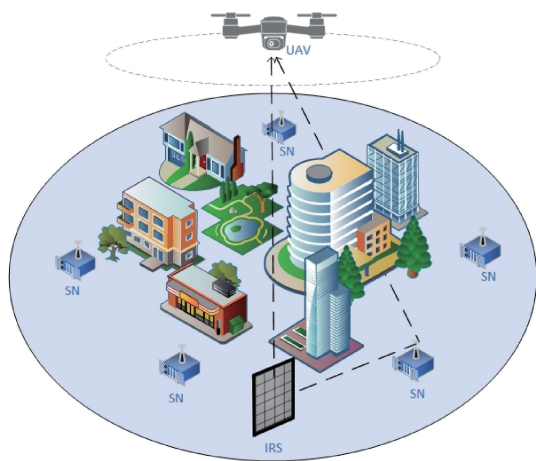


图 1 IRS 辅助无人机在无线传感器网络系统模型

Fig. 1 System model of IRS-assisted UAV in wireless sensor network

假设 K 个 SNs 用 $\{u_k, 1 \leq k \leq K\}$ 来表示, UAV 的飞行高度是固定为 H_U , 水平坐标是不断变化的, 其飞行时间是 T , 最大速度用 $V_{\max}$ 表示, 并设起点和终点位置分别用

q_0 和 q_F 表示,对于每个 SN 要求传输固定比特数据 S_k ,此时,UAV 要在 T 秒的时间内对 SNs 所发的数据进行收集。将 UAV 的飞行时间 T 均分为等长的 M 个时隙,每个时隙用 $m = \{1, 2, \dots, M\}$ 表示,其长度是 $\delta_t = \frac{T}{M}$,为了使 UAV 在相邻时隙的位置不改变,所以要将每个时隙的长度 δ_t 足够小。以地面建立水平坐标系,UAV 在水平坐标系上的飞行轨迹投影为 $q(t) \in R^{2 \times 1}, 0 \leq t \leq T$ 可以通过 $\{q[m], 1 \leq m \leq M\}$ 来表示,其中 UAV 的轨迹用 $Q = \{q[m], \forall m\}$ 来表示。IRS 由 N 个反射单元,其相位调节矩阵用 ϕ 表示,它是一个 $N \times N$ 的对角矩阵,即 $\phi[n] = \text{diag}(e^{j\theta_1[n]}, e^{j\theta_2[n]}, \dots, e^{j\theta_N[n]})$,其中, $\theta_i \in [0, 2\pi)$ 表示第 i 个反射单元的相位调整。

假设 SN-UAV 和 IRS-UAV 的信道为准静态块衰落信道, SN-IRS 的信道为准静态衰落信道,其中信道中的每个衰落块内保持不变。从系统模型图中可以看出存在 3 个信道链路,分别是直接链路 SN-UAV,间接链路 SN-IRS 和 IRS-UAV。

对于 SN-UAV 链路,UAV 到地面 SNs 的距离可以表示为:

$$d_{SU}[m] = \sqrt{(H_U - H_S)^2 + \|q[m] - u_k\|^2} \quad (1)$$

信道增益可以表示为:

$$h_{SU}[m] = \sqrt{\rho d_{SU}^{-\alpha}[m]} \left(\sqrt{\frac{\beta}{\beta+1}} h_{SU}^{LOS} + \sqrt{\frac{1}{\beta+1}} h_{SU}^{NLOS} \right) \quad (2)$$

其中, ρ 是参考距离 $d_0 = 1$ m 处的路径损耗, α 表示的为路径损耗指数, β 是 Rician 系数, h_{SU}^{LOS} 表示 LOS 分量, h_{SU}^{NLOS} 表示 NLOS 分量。

对于 SN-IRS 链路,SNs 到 IRS 的距离可以表示为:

$$d_{SI} = \sqrt{(H_I - H_S)^2 + \|w_i - u_k\|^2} \quad (3)$$

信道增益可以表示为:

$$h_{SI} = \sqrt{\rho d_{SI}^{-\alpha}} \left(\sqrt{\frac{\beta}{\beta+1}} h_{SI}^{LOS} + \sqrt{\frac{1}{\beta+1}} h_{SI}^{NLOS} \right) \quad (4)$$

其中, h_{SI}^{LOS} 表示 LOS 分量, h_{SI}^{NLOS} 表示 NLOS 分量。

对于 IRS-UAV 链路,IRS 到 UAV 的距离可以表示为:

$$d_{IU}[m] = \sqrt{(H_U - H_I)^2 + \|q[m] - w_i\|^2} \quad (5)$$

信道增益可以表示为:

$$h_{IU}[m] = \sqrt{\rho d_{IU}^{-\alpha}[m]} \left(\sqrt{\frac{\beta}{\beta+1}} h_{IU}^{LOS} + \sqrt{\frac{1}{\beta+1}} h_{IU}^{NLOS} \right) \quad (6)$$

其中, h_{IU}^{LOS} 表示 LOS 分量, h_{IU}^{NLOS} 表示 NLOS 分量。

因此,地面 SNs 到 UAV 之间的传输速率为:

$$R_{SU}[m] = \log_2 \left(1 + \frac{P_S |h_{SU}[m] + h_{SI}\phi[n]h_{IU}[m]|^2}{\delta^2} \right) \quad (7)$$

其中, P_S 是表示 SNs 恒定传输速率, δ^2 表示噪声功率, $\phi[n]$ 表示 IRS 在第 n 个时隙的相移矩阵。

1.2 无线传感器网络中最小化能耗问题

本文主要研究的是如何使传感器以最小的能耗在无线传感器网络中进行数据传输。为了更好的节省 SNs 的能量,本文对 SNs 应用了一种唤醒机制,即在一个时隙中只能唤醒一个 SN 向 UAV 进行数据传输,SN 的唤醒调度为 $Y = \{y_k[m], \forall k, m\}$,当 $y_k[m] = 1$ 时表示第 k 个 SN 在第 m 时隙唤醒,即对应的 SN 正在向 UAV 以恒定的传输功率 P_S 进行数据传输,相反的,当 $y_k[m] = 0$ 时表示该传感器节点处于休眠状态。所以,可以得到约束:

$$\sum_{k=1}^K y_k[m] \leq 1, \forall m \quad (8)$$

为了减少所有 SNs 的能量消耗,本文将以最小化所有 SNs 的最大能量消耗为目标,结合优化 UAV 的轨迹 Q 和 SNs 的唤醒调度策略 Y 。定义 SNs 在时隙中所消耗的能量用 $E_k \triangleq P_u \delta_t$ (单位为 J) 表示,SNs 发送数据量 S_k 平均传输速率用 $r_k = \frac{S_k}{B\delta_t}$ (单位为 bps/Hz) 表示,UAV 每个时隙内的最大飞行距离用 $D_{\max} = V_{\max} \delta_t$ (单位为 m) 表示。最终的目标函数为最小化所有 SNs 的最大能量消耗,即让

$\sum_{m=1}^M x_k[m] E_k$ 最小即可。所以,在 IRS 辅助下,UAV 对无线传感网络数据采集的问题可以表示为:

$$(P1) \min_{Q, Y} \sum_{m=1}^M y_k[m] E_k \quad (9)$$

$$s. t. \sum_{k=1}^K y_k[m] \leq 1, \forall m$$

$$y_k[m] \in \{0, 1\}, \forall k, m \quad (10)$$

$$\|q[m] - q[m-1]\| \leq D_{\max}, \forall m \geq 2 \quad (11)$$

$$q[1] = q_0, q[M] = q_F \quad (12)$$

$$\sum_{m=1}^M y_k[m] R_k[m] \geq r_k, \forall k \quad (13)$$

其中,式(11)和式(12)对应的是 UAV 的轨迹约束,式(13)确保从每个 SN 可靠地收集目标数据量,即只有当 SNs 的传输速率大于等于其平均发射速率时,才能满足需要的数据量要求。

为了更好的解决问题,将式(10)中的二进制约束放宽为 $0 \leq y_k[m] \leq 1$,本文引入松弛变量 ξ ,通过约束 $\sum_{m=1}^M y_k[m] E_k \leq \xi, \forall k$ 来确保 SNs 的能量消耗不超过 ξ ,所以,目标问题就转化为求出最小值的 ξ 就是最小化 SNs 的最大能量消耗,可以得到问题 (P2):

$$(P2) \min_{Q, Y, \xi} \xi \quad (14)$$

$$s. t. \sum_{m=1}^M y_k[m] E_k \leq \xi, \forall k$$

$$\sum_{k=1}^K y_k[m] \leq 1, \forall m,$$

$$\begin{aligned}
0 &\leq y_k[m] \leq 1, \forall k, m \\
\|q[m] - q[m-1]\| &\leq D_{\max}, \forall m \geq 2, \\
q[1] &= q_0, q[M] = q_F \\
\sum_{m=1}^M y_k[m] R_k[m] &\geq r_k, \forall k
\end{aligned} \quad (15)$$

问题 (P2) 是一个混合非凸问题, 该问题难以求出最优解。所以, 本文将提出一种算法来求解问题 (P2)。

2 无线传感器网络能耗问题算法分析

为了解出问题 (P2) 的最优解, 本文采用了一种基于块坐标下降技术的迭代优化算法。该方法是将上述复杂混合非凸优化问题转化为两个简单的凸优化问题, 即 SNs 的唤醒调度策略和 UAV 的飞行轨迹优化。

2.1 SNs 唤醒调度策略

首先假设 UAV 的任意飞行 Q , 紧接着对 SNs 的唤醒调度策略 Y 优化, 问题就转化成 (P3):

$$\begin{cases}
(P3) \min_{Y, \xi} \\
s. t., \sum_{m=1}^M y_k[m] E_k \leq \xi, \forall k \\
\sum_{k=1}^K y_k[m] \leq 1, \forall m, \\
0 \leq y_k[m] \leq 1, \forall k, m \\
\sum_{m=1}^M y_k[m] R_k[m] \geq r_k, \forall k
\end{cases} \quad (16)$$

上述问题是一个凸优化问题, 可以通过使用 MATLAB 中的 CVX 进行求解。

2.2 UAV 飞行轨迹优化

通过问题 (P3) 后, 可以得到 SNs 的唤醒调度策略 Y , 然后, 对 UAV 的飞行轨迹 Q 进行优化, 得到问题 (P4):

$$\begin{cases}
(P4) \max_{Q, \tau} \\
s. t., \frac{1}{r_k} \sum_{m=1}^M y_k[m] R_k[m] \geq \tau, \forall k, \\
q[1] = q_0, q[M] = q_F \\
\|q[m] - q[m-1]\| \leq D_{\max}, \forall m \geq 2,
\end{cases} \quad (17)$$

即使 SNs 的唤醒调度策略 Y , 但在问题 (P4) 中的 $R_k[m]$ 仍然为非凸难以处理, 难以得到最优解。因此, 下面将致力于解决这个问题, 将用一个多项式来近似 $R_k[m]$, 这个多项式是 $R_k[m]$ 的下界, 并且为凸函数的。定义 $Q^l = \{q^l[m], \forall m\}$ 为第 l 次迭代时 UAV 的飞行轨迹。首先对 $R_k[m]$ 进行转换得:

$$R_k[m] = \log_2 \left(1 + \frac{A_1[m]}{d_{SU}^\alpha[m]} + \frac{A_2[m]}{d_{SU}^{\frac{\alpha}{2}}[m] d_{IU}[m]} + \frac{A_3[m]}{d_{IU}^2[m]} \right) \quad (18)$$

其中,

$$\begin{cases}
A_1[m] = \frac{\rho P_s |h_{SU}^H[m]|^2}{\delta^2} \\
A_2[m] = \frac{2\rho^{1.5} P_s |h_{SU}^H[m]| |h_{IU}^H[m] \phi[n] h_{SI}[m]|}{\delta^2} \\
A_3[m] = \frac{\rho^2 P_s |h_{IU}^H[m] \phi[n] h_{SI}[m]|^2}{\delta^2}
\end{cases} \quad (19) \quad (20) \quad (21)$$

由于式 (18) 仍然是一个非凸, 为了更好的处理非凸性, 引入松弛变量 $\theta[m]$ 和 $\epsilon[m]$, 将式 (18) 转化为约束:

$$R_k[m] = \log_2 \left(1 + \frac{A_1[m]}{\theta^\alpha[m]} + \frac{A_2[m]}{\theta^{\frac{\alpha}{2}}[m] \epsilon[m]} + \frac{A_3[m]}{\epsilon^2[m]} \right) \quad (22)$$

$$\theta[m] \geq d_{SU}[m] = \sqrt{(H_U - H_S)^2 + \|q[m] - u_k\|^2} \quad (23)$$

$$\epsilon[m] \geq d_{IU}[m] = \sqrt{(H_U - H_I)^2 + \|q[m] - w_i\|^2} \quad (24)$$

通过应用一阶泰勒展开方法, $\theta^l[m]$ 和 $\epsilon^l[m]$ 为可行点, 可以得出 $R_k[m]$ 的下界为:

$$R_k[m] \geq R_k^l[m] = \log_2 F[m] + \frac{G[m]}{F[m]} (\theta[m] - \theta^l[m]) + \frac{E[m]}{F[m]} (\epsilon[m] - \epsilon^l[m]) \quad (25)$$

$$\theta^l[m] = \sqrt{(H_U - H_S)^2 + \|q^l[m] - u_k\|^2} \quad (26)$$

$$\epsilon^l[m] = \sqrt{(H_U - H_I)^2 + \|q^l[m] - w_i\|^2} \quad (27)$$

其中,

$$F[m] = 1 + \frac{A_1[m]}{(\theta^l[m])^2} + \frac{A_2[m]}{(\theta^l[m])^{\frac{\alpha}{2}} \epsilon^l[m]} + \frac{A_3[m]}{(\epsilon^l[m])^2} \quad (28)$$

$$G[m] = -\log_2(e) \left(\frac{\alpha A_1[m]}{(\theta^l[m])^{(\alpha+1)}} + \frac{A_2[m]}{(\theta^l[m])^{(\frac{\alpha}{2}+1)} \epsilon^l[m]} \right) \quad (29)$$

$$E[m] = -\log_2(e) \left(\frac{2A_3[m]}{(\epsilon^l[m])^3} + \frac{A_2[m]}{(\theta^l[m])^{\frac{\alpha}{2}} (\epsilon^l[m])^2} \right) \quad (30)$$

将得到的 $R_k[m]$ 的下界 $R_k^l[m]$ 代入 (P4) 中, 得到 (P5):

$$\begin{cases}
(P5) \max_{Q, \tau^l} \\
s. t., \frac{1}{r_k} \sum_{m=1}^M y_k[m] R_k^l[m] \geq \tau^l, \forall k \\
q[1] = q_0, q[M] = q_F \\
\|q[m] - q[m-1]\| \leq D_{\max}, \forall m \geq 2
\end{cases} \quad (31)$$

其中, τ^l 是一个待最大化的松弛变量, 上述问题满足凸优化的条件, 通过应用 CVX 工具求最优解。

2.3 块坐标下降技术

通过对上面问题的分析和转化, 本文采用逐次凸优化

技术,即通过分别交替优化求解问题 (P3) 和 (P5) 的唤醒调度策略 Y 和飞行轨迹 Q ,最终达到问题 (P2) 的一个最优解,也就达到最小化所有 SNs 的能量消耗的目的。算法流程如下:

算法 1:求解 (P2) 的算法
1)初始化,对 UAV 的飞行初始值为 Q^0 ,算法精度为 ϵ 。
2)设置迭代次数 $r = 0$ 。
3)开始循环。
4)求解问题 (P3),输入 Q^r ,求得唤醒调度策略 Y^{r+1} 。
5) 求解问题 (P5),输入的 $\{Q^r, Y^{r+1}\}$,求得 UAV 的飞行轨迹 Q^{r+1} 。
6)令 $r = r + 1$ 。
7)直到满足条件 $ \xi^{r+1} - \xi^r < \epsilon$,停止循环。
8)得到最优解 Q, Y 。

2.4 收敛性分析

算法 1 中是以迭代的方法分别求解 (P3)和 (P5),由于 (P5)是凸性的,通过使用 CVX 工具求解 (P5)的结果 τ^l 在迭代过程中不减小。此外,在算法 1 的步骤 4 中,(P3)是一个标准的线性规划问题,因此 (P3)的最优解满足约束 (13)的等式。又因为 P5 为 QCQP 问题,约束 (13)被松弛为约束 (31),又由于 τ^l 在迭代过程不减小,为 (P3)的目标结果 ξ 的减小留下了更大的优化空间。另外, τ^l 是问题 (P4)的目标结果的下界,因此 ξ 也是一个有限值的下界。综上,目标结果 ξ 减小且有下界,所以肯定能找到 ξ 最小值。因此,算法 1 是收敛的。

2.5 复杂度分析

在算法中主要复杂度是求解问题 (P3) 和 (P5),即 UAV 的飞行轨迹优化以及 SNs 的唤醒调度策略优化,也就是算法 1 的步骤 4)和 5)。在算法 1 中存在迭代循环,设迭代次数为 I ,此外,在问题 (P5)中存在内层循环,关键步骤是通过 CVX 工具求解 QCQP 问题,此过程涉及矩阵操作,复杂度为 $O(N(2))$ 。所以,本文中所提出算法复杂为 $O(IN(2))$,其中 I 表示算法中的循环次数, N 表示问题规模。

3 数据结果和分析

通过上面的算法进行仿真验证,本文考虑系统有 $K = 5$ 个 SNs,这些传感器随机分别在一个大小为 $1\ 600\text{ m} \times 1\ 600\text{ m}$ 的二维坐标内且位置已知。已知 IRS 的位置是固定的,本文选取 IRS 的位置为 $[0, -600]^T$,UAV 的初始位置为 $q_0 = [-800, 0]^T$,终点位置为 $q_F = [800, 0]^T$ 。SNs 坐标分别为: $[-600, 100]^T, [-400, -500]^T, [0, 500]^T, [400, -500]^T, [600, 100]^T$,仿真数据表如表 1 所示。

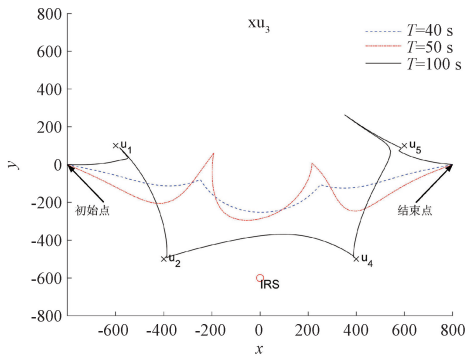
表 1 仿真数据
Table 1 Simulation data

参数	数值
UAV 飞行高度 H_U/m	100
UAV 最大飞行速度 $V_{\max}/\text{ms}^{-1}$	50
SNs 高度 H_S/m	3
SNs 功率 P_S/W	0.1
SNs 数据大小 S_K/Mibits	10
IRS 的高度 H_I/m	10
IRS 的元素个数 N	150
噪声功率 δ^2/dBm	-110
距离 1m 处的路径损耗 ρ/dB	-20
带宽 B/MHz	1
路径损耗指数 α	2
信道增益 β_0/dB	-60
时隙长度 δ_t/s	1
算法收敛精度 ϵ	0.01

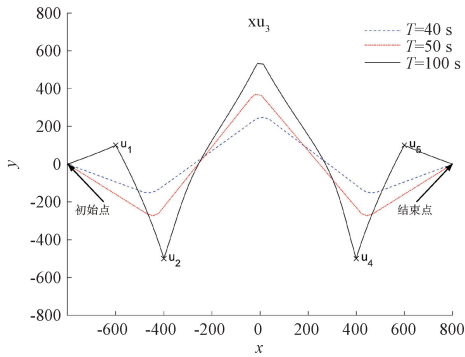
不同飞行时间 T 下在有无 IRS 部署策略下的 UAV 的飞行轨迹如图 2 所示,其中,红色圆圈图标表示 IRS 所在的位置,为了更好的对比出 IRS 的作用效果,本文将对没有部署 IRS,不同位置部署 IRS 以及部署不同数量 IRS 的情况比较 UAV 的飞行轨迹图,从图 2 中可以看出,IRS 可以改变 UAV 的飞行轨迹,可以看出在没有部署 IRS 时,UAV 需要尽可能的靠近传感器节点来实现数据传输。如图 2 (a)和(c)所示,IRS 的位置改变也会影响 UAV 的飞行轨迹的变化,这是因为部署 IRS 后,UAV 接受的信息可以通过传感器直接发射的,也可以是通过 IRS 反射的,由于接受到的信息来源发生改变,导致飞行轨迹也会发生变化,UAV 的飞行轨迹将会偏向于 IRS,也可以看出通过引入 IRS,可以缩短了 UAV 的飞行距离。图 2(d)中在每个 SN 附近部署了 IRS,增加 IRS 部署的个数,可以观察到 UAV 飞行轨迹发生改变,UAV 将会更加靠近 SN 和 IRS,以获取更好的通信信道进行数据传输。

图 3 是 $T = 50\text{ s}$ 时 SNs 的唤醒时间表。从图 3 中可以看出,SNs 一直是休眠状态,只有当 UAV 接近 SN 或 IRS 时,某个 SN 被唤醒并向 UAV 进行数据传输。通过对比可以看出加入 IRS 后,改变了 SN 的唤醒时间,并且唤醒的持续时间减少了,这是由于 IRS 可以通过反射 SN 的信号来减少了信道的损耗,提高了传输速率,使得传输时间缩短。

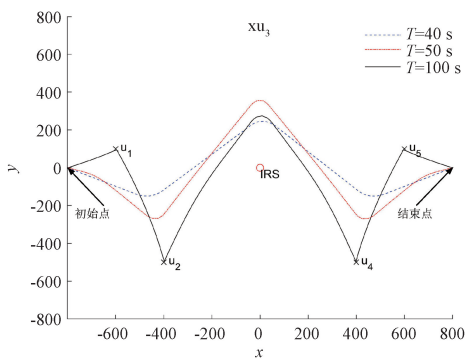
图 4 是 $T = 50\text{ s}$ 的情况下,在 SNs 传输不同大小的数据时,SNs 所需要消耗的最大的能量 ξ ,为了明显的看出本文所提方案的优越性,引入了 3 个对比对象:1)静态收集,2)直线飞行,3)无 IRS 部署时轨迹优化。其中,第 1 方案是将数据采集器放置在 SNs 的中心位置,第 2 方案直线飞行是从起始位置 q_0 直线飞到终止位置 q_F 。从图中可以看出,本文所提方案在节能效果有显著的优越性,随着 SNs



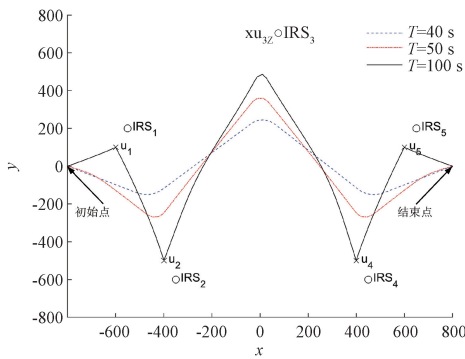
(a) 部署IRS(0,-600)
(a) Deploy IRS (0,-600)



(b) 无IRS
(b) Without IRS

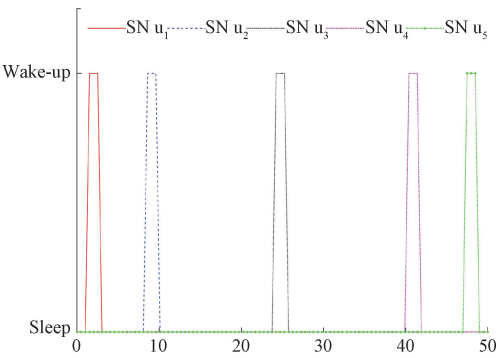


(c) 部署IRS(0,0)
(c) Deploy IRS (0,0)

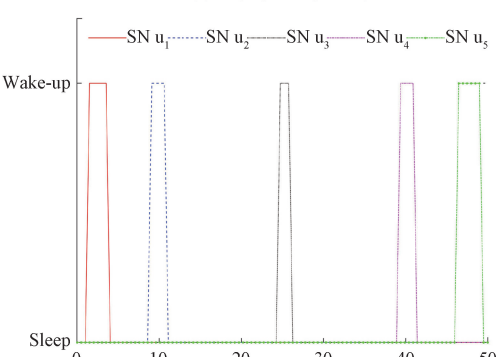


(d) 部署5个IRS
(d) Deploy 5 IRS

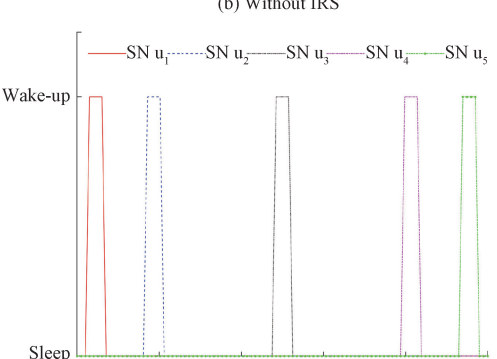
图 2 不同情况 UAV 随飞行时间变换下的飞行轨迹
Fig. 2 The flight trajectory of UAV changed with flight time in different cases



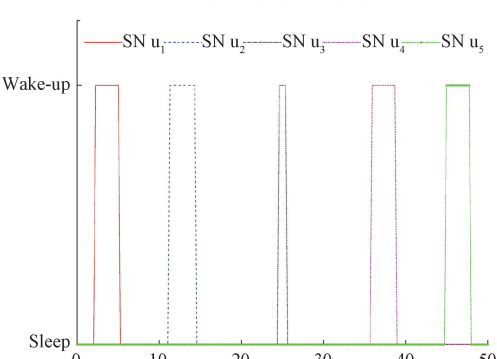
(a) 部署IRS(0,-600)
(a) Deploy IRS (0,-600)



(b) 无IRS
(b) Without IRS



(c) 部署IRS(0,0)
(c) Deploy IRS (0,0)



(d) 部署5个IRS
(d) Deploy 5 IRS

图 3 传感器的唤醒时间表
Fig. 3 Sensor wake-up schedule

传输数据大小 S_k 的增加, SNs 所需要消耗的能量 ξ 也在增加,但本文中采取加入 IRS 的方案是 SNs 最大能量消耗增加最缓慢的,经计算,本文方案与 3 个基准方案相比,产生的能量消耗分别降低了 91.0%、61.5% 和 41.6%。这是由于本文提出的方案可以通过更接近或者停留在 SNs/IRS 之上来获得更好的信道,所以 SNs 可以在更短的传输时间内以更高的传输数据速率进行可靠地传输,从而节省了能量消耗。此外,为了观察 IRS 的位置和数量的变化对系统能耗的影响,从图中可以看出 IRS 的位置变化对系统能耗没有影响,然而,IRS 数量的增加使得系统能耗略微增加,如图 3(d)所示多 IRS 下某些 SN 的唤醒时间比单 IRS 长,使得系统的能耗有所增加。

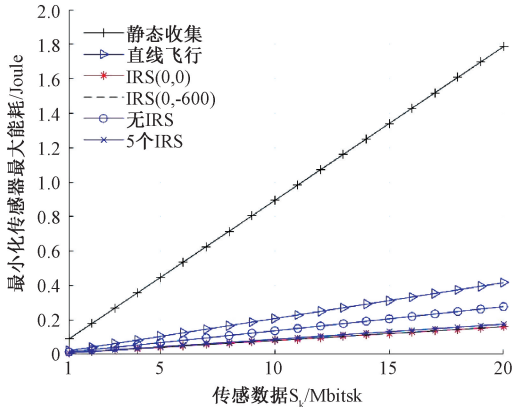


图4 最小化能量损耗随传输数据大小 S_k 的变化

Fig. 4 Minimize energy consumption as a function of data transmission size S_k

为了更好的观察 IRS 的参数变化对 SNs 的能量损耗的影响,本文将通过对 IRS 元素的个数 N 和高度 H_I 改变来观察对所提出方案的性能影响。图 5 是 $T=50$ s 情况下 IRS 元素个数 N 对 SNs 能量消耗的影响。如图 5 所示,由于直线飞行和无 IRS 的模型中是不存在 IRS 元件的,所以,IRS 元素数量 N 的变化不会影响到传感器最大能耗的变化。然而在有 IRS 的模型中,IRS 的元素起始个数 $N=30$,当 IRS 的元素个数 N 增加时,对 SNs 所需要消耗的能量是减小的。这是因为通过增加 IRS 的元素个数 N ,影响对 SNs 信息的反射能力,增强信道增益进而减小传感器的能量消耗。现实生活中也不能一直增加 IRS 元素个数 N ,需要结合成本和 IRS 的高度等因素。

图 6 是 $T=50$ s 情况下 IRS 的高度 H_I 对 SNs 能量消耗的影响,如图所示,由于直线飞行和无 IRS 的模型中是不存在 IRS 元件的,所以,IRS 的高度 H_I 的变化不会影响到 SNs 最大能耗的变化。但在有 IRS 的模型中,随着 IRS 的高度 H_I 的增加,SNs 所消耗的能量是缓慢的增加。由于 IRS 的高度 H_I 的增加,导致 SNs-IRS 的信道链路变化,即 SNs 到 IRS 的距离和路径损耗变大,使得 SNs 需要消耗更多的能量到 IRS 然后进行反射,因而 SNs 最大能耗是增加

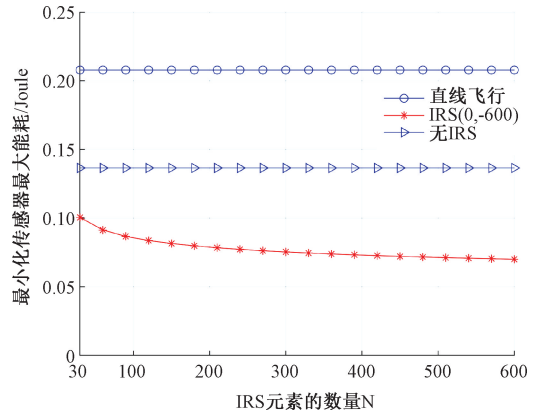


图5 最低能耗随 IRS 元素数量 N 的变化

Fig. 5 The minimum energy consumption varies with the number of IRS elements N

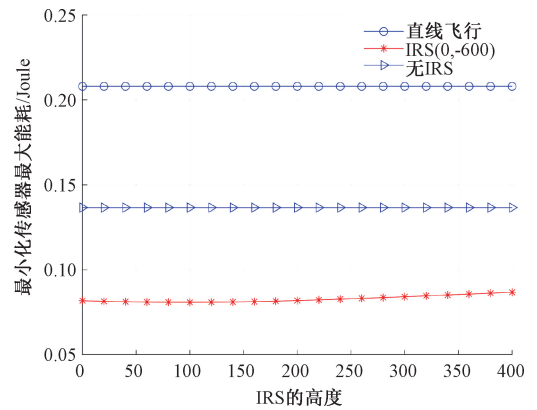


图6 最低能耗随 IRS 的高度 H_I 的变化

Fig. 6 The minimum energy consumption varies with the height H_I of the IRS

的。需要注意的,在现实中,IRS 都是安装在建筑物上,所以它的高度是有限的。

为了观察 UAV 在不同飞行高度情况下系统最低能量损耗变化,本文进行实验仿真,如图 7 所示,可以看出随着 UAV 的飞行高度不断增加,SNs 所消耗的能量也不断增加,这是因为 UAV 的飞行高度升高,通信链路 SN-UAV 和 IRS-UAV 的距离增加,使得 SNs 需要消耗更多的能量进行数据传输,导致 WSN 系统的能量损耗增加。需要注意的是,在现实中,由于高层建筑的存在,UAV 的飞行高度不能太低,所以本文选取 UAV 的飞行高度是 100 m。

4 结 论

本文研究了通过应用 IRS 辅助无人机轨迹优化在无线传感网络中节能数据采集,通过在系统模型中加入 IRS,降低了无人机空地模型中由于信道阻塞问题造成传感器的能量消耗,并通过应用块坐标下降技术的优化算法和一阶泰勒展开等方法,将复杂的混合整数的非凸优化问题转化为连续凸优化问题,通过联合优化 UAV 飞行轨迹和 SNs 的

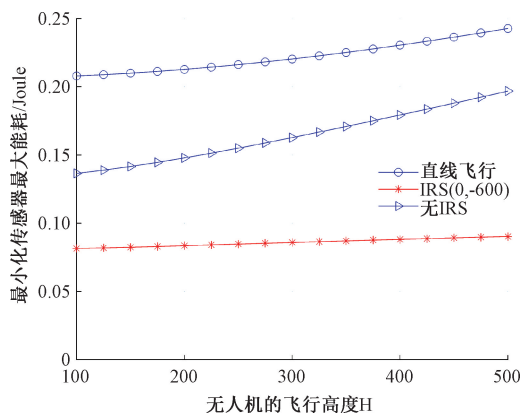


图 7 最低能耗随无人机的飞行高度的变化

Fig. 7 The minimum energy consumption varies with the height of the UAV

唤醒策略,最小化所有 SNs 的最大能量损耗,降低了无线传感网络中 SNs 能量有限的问题。仿真结果表明,与现有三种典型方法相比,在 IRS 的辅助下,SNs 的能量消耗随着 S_k 的增加增长的比较缓慢,使得无线传感器网络更加节能,延长了无线传感网络的使用寿命,使得本文方法在无线传感器网络进行数据采集更加节能。

下一步,将研究拓展到更复杂的实际环境中进行验证。具体而言,考虑不同的环境挑战,如动态变化的通信信道、复杂的多径传播效应、不同的地形和建筑物遮挡等,进行现场测试和实验,以验证仿真结果在实际应用中的一致性和可靠性。

参考文献

- [1] 武娟,李洪兵,罗磊,等. WSN 中基于改进麻雀搜索算法的多目标覆盖优化[J]. 电子测量技术, 2022, 45(15): 48-56.
WU J, LI H B, LUO L, et al. Multi-objective coverage optimization of WSN based on improved sparrow search algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(15): 48-56.
- [2] 姚昌华,高泽邨,韩贵真,等. 基于数据辅助的无人机集群协同空域抗干扰[J]. 电子测量技术, 2022, 45(16): 164-170.
YAO CH H, GAO Z H, HAN G ZH, et al. Cooperative airspace anti-jamming of UAV cluster based on data assistance[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(16): 164-170.
- [3] YOU CH SH, ZHANG R. 3D trajectory optimization in Rician fading for UAV-enabled data harvesting[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(6): 3192-3207.
- [4] 韩东升,念欣然,李然. 无人机辅助无线通信位置和波束联合优化方法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(20): 88-97.

HAN D SH, NIAN X R, LI R. Joint optimization method of position and beam for UAV aided wireless communication[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(20): 88-97.

- [5] 郭斌,黄力宇,温鑫. 无人机辅助无线传感器网络的最优拓扑控制与数据采集[J]. 控制工程, 2023, 30(12): 2200-2216.
GUO B, HUANG L Y, WEN X. Optimal topology control and data collection of UAV enabled wireless sensor networks [J]. Control Engineering of China, 2023, 30(12): 2200-2216.
- [6] WU Q Q, ZHANG R. Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(1): 106-112.
- [7] WU Q Q, ZHANG SH W, ZHENG B X, et al. Intelligent reflecting surface aided wireless communications: A tutorial[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(5): 3313-3351.
- [8] 袁进,王海,秦蓁,等. 面向数据采集的多无人机协同节能部署方法[J]. 电讯技术, 2022, 62(10): 1419-1426.
YUAN J, WANG H, QIN ZH, et al. An energy-efficient UAV deployment method in multi-UAV data collection network [J]. Telecommunication Engineering, 2022, 62(10): 1419-1426.
- [9] LICEA D B, NURELLARI E, GHOGHO M. Energy-efficient 3D UAV trajectory design for data collection in wireless sensor networks [J]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2020, DOI: 10.1109/ICASSP40776.2020.9054054.
- [10] 冯梦清. WSNs 中基于无人机的数据收集算法[J]. 弹箭与制导学报, 2020, 40(6): 86-89.
FENG M Q. Unmanned aerial vehicle-based data collecting algorithm in wireless sensor networks[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2020, 40(6): 86-89.
- [11] 赵玉华,贾向东,胡海霞,等. 无人机辅助的无线传感网络 AoI 最小化研究[J]. 计算机工程与科学, 2022, 44(7): 1217-1221.
ZHAO Y H, JIA X D, HU H X, et al. An AoI minimization scheme of UAV-assisted wireless sensor networks[J]. Computer Engineering & Science, 2022, 44(7): 1217-1221.
- [12] 王鹏. 基于 UAV-WSN 的空中数据采集[J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(3): 157-159.
WANG P. UAV-WSN-based airborne data acquisition[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2022,

- 12(3):157-159.
- [13] ALFATTANI S. Aerial platforms with reconfigurable smart surfaces for 5G and beyond [J]. IEEE Communications Magazine, 2021,59(1): 96-102.
- [14] 许满青,张毅,徐川,等. IRS和UAV-IRS共同辅助中继网络公平下行通信方案[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版),2024,36(5): 924-934.
XU M Q, ZHANG Y, XU CH, et al. IRS and UAV-IRS co-assisted relay network fair downlink communication scheme [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2024,36(5):924-934.
- [15] PANG X W, SHENG M, ZHAO N, et al. When UAV meets IRS: Expanding air-ground networks via passive reflection[J]. IEEE Wireless Communications, 2021,28(5): 164-170.
- [16] LI S X, DUO B, YUAN X J, et al. Reconfigurable intelligent surface assisted UAV communication: Joint trajectory design and passive beamforming[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9 (5) 716-720.
- [17] FANG S S, CHEN G J, LI Y H. Joint optimization for secure intelligent reflecting surface assisted UAV networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021,10(2): 276-280.
- [18] 张倩倩,张强,栾亚婷,等. 基于IRS的无人机安全通信联合优化技术研究[J]. 现代电子技术, 2024,47(11): 27-30.
ZHANG Q Q, ZHANG Q, LUAN Y T, et al. Research on IRS? based joint optimization technology of UAV security communication [J]. Modern Electronics Technique, 2024,47(11): 27-30.
- [19] 徐莹莹,丁徐飞,田文,等. 无人机辅助无线传感网络的节能保密通信数据收集方法[J]. 无线电工程, 2024, 54(5): 1168-1174.
XU Y Y, DING X F, TIAN W, et al. Energy-efficient and secure communication data collection method for UAV enabled wireless sensor network [J]. Radio Engineering, 2024, 54(5): 1168-1174.
- [20] 刘超文,王丽平,党儒鸽,等. 多UAV辅助反向散射边缘计算网络能耗优化方案[J]. 西安邮电大学学报, 2024,29(1):20-31.
LIU CH W, WANG L P, DANG R G, et al. Power consumption optimization scheme for multi-UAV-assisted backscattering edge computing network [J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2024, 29(1):20-31.

作者简介

吴广通,硕士研究生,主要研究方向为UAV轨迹优化、隐蔽通信。

E-mail:202312490133@nuist.edu.cn

张爽,硕士研究生,主要研究方向为UAV轨迹优化、隐蔽通信。

E-mail:202412490683@nuist.edu.cn

田文(通信作者),博士,讲师,主要研究方向为无人机通信、隐蔽通信。

E-mail:wentian@nuist.edu.cn

刘光杰,博士,教授,主要研究方向为轨道交通信号处理。

E-mail:gjieliu@nuist.edu.cn

戴跃伟,博士,教授,主要研究方向为无人机通信、保密通信。

E-mail:dyw@nuist.edu.cn