

## 基于通感融合的无人机预编码及飞行轨迹设计

柴蓉<sup>\*①</sup> 崔相霖<sup>①</sup> 孙瑞锦<sup>②</sup> 陈前斌<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

<sup>②</sup>(综合业务网理论及关键技术国家重点实验室西安电子科技大学 西安 710126)

**摘要:** 无人机(UAVs)具有机动性强,低成本及易部署等特性,通过搭载通信及感知设备,支持通信与感知技术的高效资源共享,无人机可作为融合通信与传感技术的高性能空中平台。该文针对多输入多输出(MIMO)无人机使能的联合通信、感知场景,综合考虑无人机飞行能量、多天线传输及用户业务需求等限制条件,建模无人机通信、感知预编码及飞行轨迹联合优化问题为多目标优化问题,以实现通信用户最低速率最大化及目标最小发现概率最大化。由于通信用户最低速率最大化问题为非凸优化问题,难以直接求解,将原优化问题分解为通信预编码设计子问题及无人机轨迹设计子问题,并采用交替迭代法依次求解两个子问题直至算法收敛,其中,对于通信预编码设计子问题,提出一种基于迫零(ZF)算法的求解策略;对于无人机轨迹设计子问题,提出一种基于连续凸逼近(SCA)算法的求解策略。基于所得到的无人机最优轨迹,将无人机感知位置选择问题建模为加权距离和最小化问题,进而应用泛搜索算法优化确定目标感知位置,并设计基于ZF算法的通信感知预编码联合优化策略,以实现通信感知性能的联合优化。最后通过仿真验证了该文所提算法的有效性。

**关键词:** 无人机; 通感联合; 轨迹优化; 预编码设计

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2024)04-1266-10

DOI: [10.11999/JEIT230515](https://doi.org/10.11999/JEIT230515)

## Precoding and Trajectory Design of Unmanned Aerial Vehicle Based on Joint Communication and Sensing

CHAI Rong<sup>①</sup> CUI Xianglin<sup>①</sup> SUN Ruijin<sup>②</sup> CHEN Qianbin<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(School of Communications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

<sup>②</sup>(State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710126, China)

**Abstract:** Benefited from the characteristics of high mobility, low cost and convenient deployment, by deploying communication and sensing equipment and supporting efficient resource sharing of communication and sensing technologies, Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are expected to act as high-performance aerial platforms which integrate communication and sensing technologies. In this paper, Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO) UAV-enabled joint communication and sensing scenario is examined, the constraints of the flight energy of the UAV, multi-antenna transmission and user service requirement are jointly considered, the problem of UAV communication, sensing precoding and flight trajectory is formulated as a multi-objective optimization problem which jointly maximizes the minimum data rate of communication users and the minimum discovery probability of targets. Since the minimum rate maximization problem of communication users is a non-convex optimization problem, which is difficult to solve directly, the original optimization problem is decomposed into communication precoding design subproblem and UAV trajectory design subproblem. The two subproblems are solved successively by applying alternate iteration method until the algorithm reaches convergence. Specifically, a Zero-Forcing (ZF) algorithm is put forward for solving the communication precoding design subproblem. A Successive Convex Approximation (SCA) algorithm is applied to determine the optimal trajectory of the UAV. Based on the optimal trajectory of UAV, the sensing location selection problem is modeled as a weighted

收稿日期: 2023-05-30; 改回日期: 2023-12-01; 网络出版: 2023-12-06

\*通信作者: 柴蓉 [chairong@cqupt.edu.cn](mailto:chairong@cqupt.edu.cn)

基金项目: 国家自然科学基金(62271097)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (62271097)

distance minimization problem, and then the extensive search algorithm is applied to obtain the optimal locations. Finally, a ZF algorithm-based joint communication and sensing precoding is presented. The effectiveness of the proposed algorithm is verified by simulations.

**Key words:** Unmanned Aerial Vehicle (UAV); Joint communication and sensing; Trajectory optimization; Precoder design

## 1 引言

随着无线通信及目标感知应用的普及, 有限的频谱资源与日益增长的通信、感知频谱需求之间的矛盾逐渐凸显<sup>[1]</sup>。采用联合通信与感知技术, 支持通信、感知应用的频谱共享, 已成为提高频谱利用率, 提升通信、感知性能的关键技术<sup>[2,3]</sup>。然而, 在联合通信、感知应用中, 如何合理调度多维通信、感知资源, 满足用户通信、感知需求, 并实现两者之间的性能折中已成为极具挑战性的问题。另一方面, 多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)系统通过在收发端配置多根天线, 采用波束成形与预编码技术, 可提供丰富的空间自由度, 显著提升用户通信性能<sup>[4]</sup>。近年已有相关研究针对通信及感知联合性能优化问题, 设计基于MIMO的资源调度策略, 如文献<sup>[5]</sup>针对采用MIMO雷达及多用户MIMO通信发射机的联合通信、感知系统, 设计基于损失函数最小化的发射波束成型矩阵及基于迫零(Zero-Forcing, ZF)算法的低复杂度干扰消除设计方案。文献<sup>[6]</sup>提出了一种基于无线能量传输的通信感知联合系统, 将优化问题建模为雷达性能和通信性能约束的能量最小化问题, 进而采用半定松弛法和辅助变量法优化确定。

文献<sup>[7-10]</sup>研究无人机的部署及轨迹优化问题。文献<sup>[7]</sup>提出基于用户与无人机之间平均距离优化的无人机部署策略; 文献<sup>[8]</sup>提出基于用户覆盖概率最大化的无人机部署算法; 文献<sup>[9]</sup>以系统中断概率优化为目标设计无人机部署策略。文献<sup>[10]</sup>以用户间的公平性能为优化目标, 提出了多无人机调度及轨迹优化策略。通过在无人机上搭载感知设备, 并优化设计无人机的飞行轨迹及目标感知参量, 可实现对目标的灵活高效感知。文献<sup>[11]</sup>提出了一种基于认知无线电技术的认知无人机网络框架, 并提出帧内协同频谱感知方案以提升频谱感知性能及系统吞吐量。文献<sup>[12]</sup>针对延迟受限的多任务无人机传感场景, 提出了一种基于轨迹搜索的空间剪枝算法以降低传统算法的复杂度, 进而确定无人机与基站的相关策略。

文献<sup>[13,14]</sup>针对无人机联合通信、感知技术开展研究。文献<sup>[13]</sup>提出了一种周期感知及通信融合机制, 通过联合优化无人机轨迹、用户关联、目标

感测选择和发射波束实现系统可达速率优化。文献<sup>[14]</sup>将无人机通信感知系统中无人机轨迹优化及资源分配问题建模为感知频率和波束增益约束的用户通信速率最大化问题, 通过求解优化问题确定无人机飞行轨迹及频率分配策略。

尽管已有研究考虑无人机联合通信、感知系统的资源调度及无人机轨迹设计问题, 但较少文章针对多用户MIMO场景的联合通信、感知问题开展研究。MIMO技术通过部署多根天线获得更高的分集增益和复用增益, 进一步提升了通信感知联合性能。此外, 针对多用户无人机通信资源调度问题, 现有研究多考虑通信系统综合性能优化, 较少考虑用户间公平性, 可能导致部分用户通信性能严重恶化。本文针对无人机通信感知场景的联合资源分配及无人机轨迹优化问题开展研究, 综合考虑无人机可用能量、多天线传输特性及无人机最大飞行速率等限制条件及多用户通信、多点感知性能公平性, 建模通信感知预编码及无人机飞行轨迹优化问题为多目标优化问题, 旨在实现最小用户速率最大化及最小目标发现概率最大化, 并提出了求解算法。最后通过Matlab仿真验证了本文所提算法的有效性, 与所给出的参考文献相比, 本文所提算法能够达到更佳的通信性能, 并且具有更快的收敛速度。

## 2 系统模型

### 2.1 系统场景

本文所考虑场景包含1架多天线无人机、 $K$ 个单天线用户和1个感知目标。系统模型见图1。假设无人机从起点出发, 在系统时间 $T$ 内沿一定轨迹在区域上空飞行, 在飞行过程中与用户通信并进行目标感知, 完成通信感知任务后返回起点。假设无人机内置通信感知模块, 并配备了数量为 $M$ 的线性天线阵列, 用于为 $K$ 个单天线用户提供通信服务, 同时目标进行感知。系统中 $K$ 个用户与感知目标均位于地面区域内, 第 $k$ 个用户的位置可表示为:  $\omega_k = [x_k, y_k]^T$ ,  $1 \leq k \leq K$ , 感知目标的位置为:  $\omega_s = [x_s, y_s]^T$ 。假设感知目标随机出现且目标出现的位置确定, 无人机机载雷达对感知目标发射波束, 并基于所接收的回波确定目标是否出现, 并利用反射波束来获取感知目标的信息。

方便起见, 将系统时间 $T$ 划分为 $N$ 个等长时

隙, 即  $T = N\tau$ , 其中,  $\tau$  为每个时隙的长度。不失一般性, 假设每个时隙内无人机的位置不变, 且无人机在固定高度飞行, 令  $L$  表示为无人机的飞行高度,  $V_{\max}$  为最大飞行速度。令无人机在时隙  $n$  的平面位置坐标为  $\mathbf{q}(n) = [x_u(n), y_u(n)]^T$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ 。令  $\mathbf{q}(0)$  表示无人机起始位置,  $\mathbf{q}(N)$  表示无人机终点位置, 则有:  $\mathbf{q}(0) = \mathbf{q}(N)$ 。

无人机在飞行过程中持续对用户执行数据传输, 仅在距离感知目标较近的区域执行感知任务, 在进行感知的同时进行通信。相应地, 无人机在各时隙的状态可分为仅进行通信的通信状态和同时进行通信和感知的通信感知状态。令处于通信状态的时隙数为  $n_c$ , 通信状态时隙集合为  $N_c$ , 通信感知状态时隙数为  $n_s$ , 通信感知状态时隙集合为  $N_s$ , 即  $N = n_c + n_s$ 。

在通信状态下, 无人机通过  $M$  根发送天线向多个用户发送数据; 在通信感知状态下, 无人机在与用户进行通信的同时利用机载雷达设备通过  $M$  根发送天线向被探测目标发射波束, 并利用接收天线接收雷达反射信号获取被探测目标的信息。假设雷达收发天线不共用且雷达接收天线数目为1。

## 2.2 通信信道建模

令  $h_{k,m}^c(n)$  表示  $n$  时隙无人机第  $m$  根天线与第  $k$  个用户之间的通信信道增益。综合考虑信道传输损耗及随机衰落, 建模  $h_{k,m}^c(n)$  为

$$h_{k,m}^c(n) = \frac{\rho_0}{\sqrt{L^2 + \|\mathbf{q}(n) - \boldsymbol{\omega}_k\|^2}} \psi_{k,m} \quad (1)$$

其中,  $\rho_0$  表示单位距离下的信道损耗系数,  $\psi_{k,m}$  代表小尺度MIMO天线性能增益, 建模为均值为0, 方差为1的复高斯分布随机变量。

## 2.3 感知信道建模

假设无人机到地面目标的感知链路以视距 (Light-of-Sight, LoS) 链路为主。令  $h_m^s(n)$  表示  $n$  时隙无人机第  $m$  根天线与感知目标之间的感知信道增益, 可建模为

$$h_m^s(n) = \frac{\rho_0}{\sqrt{2(L^2 + \|\mathbf{q}(n) - \boldsymbol{\omega}_s\|^2)}} \Psi_m^s(n) \quad (2)$$

其中,  $\Psi_m^s(n) = \beta \psi_m^s(n)$  代表小尺度感知性能增益,  $\beta$  为振幅系数, 是与非起伏目标的横截面积有关的参数,  $\psi_m^s(n)$  为MIMO天线感知性能增益, 建模为均值为0, 方差为1的复高斯分布随机变量。

## 3 问题建模

本节对无人机通信感知联合信号进行数学建模, 并将通信时隙内通信预编码及轨迹优化问题建模为最小用户平均速率最大化问题; 将通信感知时隙内无人机位置及通信感知预编码优化问题建模为满足通信用户信噪比约束的最小发现概率最大化问题。

### 3.1 联合发送信号建模

本文假设无人机搭载的雷达系统与通信系统共享MIMO天线阵列, 感知与通信两种功能通过联合波束成型同时工作, 即无人机的天线阵列同时发射用于通信与感知的联合波束。令  $\mathbf{s} = [s_1, \dots, s_m, \dots, s_M]^T$  表示雷达发送波形矢量,  $s_m$  为第  $m$  根天线发送的雷达波形,  $\mathbf{c} = [c_1, c_2, \dots, c_K]^T$  表示通信信号矢量,  $c_k$  为第  $k$  个用户的通信信号。简单起见, 对通信信号  $\mathbf{c}$  与感知信号  $\mathbf{s}$  进行归一化处理, 即  $\mathbb{E}[\mathbf{c}^2] = \mathbb{E}[\mathbf{s}^2] = 1$ 。

针对通信及雷达信号分别设计预编码矢量, 令  $\mathbf{W}_s(n) \in \mathbb{C}^{M \times M}$  为  $n$  时隙雷达预编码矩阵,  $\mathbf{W}_c(n) \in$

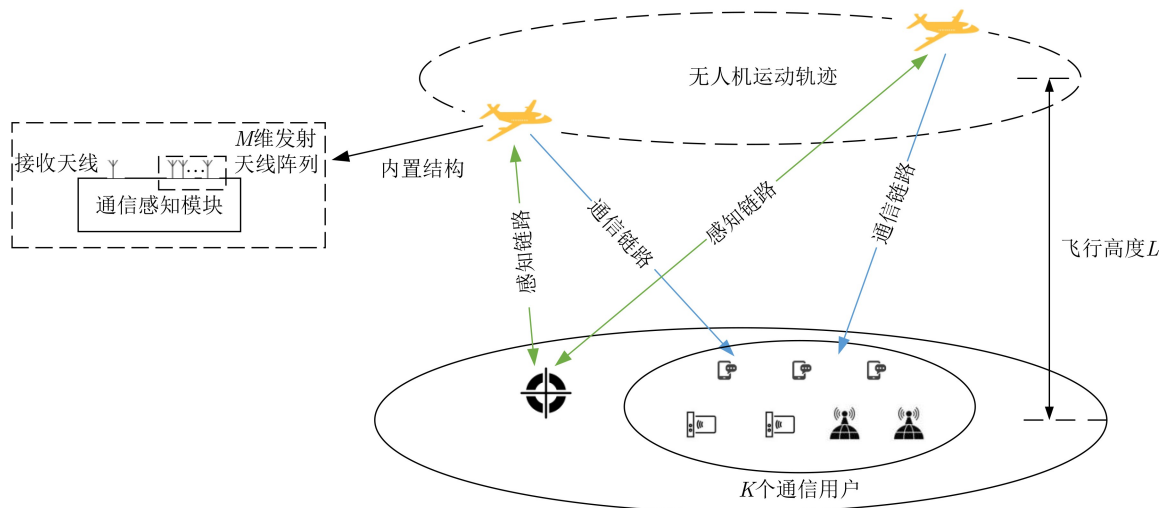


图1 系统模型图

$\mathbf{C}^{M \times K}$  为  $n$  时隙通信预编码矩阵。令  $\mathbf{x}(n)$  表示  $n$  时隙无人机联合发送信号, 可建模为

$$\mathbf{x}(n) = \mathbf{W}_s(n)\mathbf{s} + \mathbf{W}_c(n)\mathbf{c}, n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3)$$

### 3.2 通信系统性能分析

令  $\mathbf{y}_c(n) \in \mathbf{C}^{K \times 1}$  表示通信用户的接收信号矢量, 则有

$$\mathbf{y}_c(n) = \mathbf{H}_c(n)\mathbf{W}_s(n)\mathbf{s} + \mathbf{H}_c(n)\mathbf{W}_c(n)\mathbf{c} + \mathbf{v}(n) \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{H}_c(n)$  为  $n$  时隙通信信道增益矩阵, 且  $[\mathbf{H}_c(n)]_{k,m} = h_{k,m}^c(n)$ 。

则第  $k$  个通信用户在  $n$  时隙的信干噪比(Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio, SINR)可以表示为

$$\gamma_k^c(n) = \frac{|[\mathbf{H}_c(n)\mathbf{W}_c(n)]_{k,k}|^2}{\sum_{i \neq k} |[\mathbf{H}_c(n)\mathbf{W}_c(n)]_{k,i}|^2 + \sum_{i=1}^M |[\mathbf{H}_c(n)\mathbf{W}_s(n)]_{k,i}|^2 + \sigma^2} \quad (5)$$

用户通信速率是用来衡量系统通信性能的重要指标之一, 本文以通信时隙内用户通信速率为衡量通信性能的指标, 令  $R_{c,k}$  为通信时隙内用户  $k$  的通信速率, 可建模为

$$R_{c,k} = \frac{1}{n_c} \sum_{n \in N_c} \log_2(1 + \gamma_k^c(n)) \quad (6)$$

### 3.3 感知系统性能分析

为提高无人机的目标感知性能, 假设无人机可在飞行过程中的某一位置悬停多个时隙, 并在悬停的各时隙对目标特性进行感知。令  $P_d(n)$  表示时隙  $n$  目标发现概率。  $P_d(n)$  可建模为<sup>[15]</sup>

$$P_d(n) = \int_{V_T} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{(\mathbf{H}_s(n)(\mathbf{W}_s(n)\mathbf{W}_s^H(n))\mathbf{H}_s^H(n))_{m,m} + x^2}{2\sigma^2}} \cdot I_0\left(\frac{x + \sqrt{(\mathbf{H}_s(n)(\mathbf{W}_s(n)\mathbf{W}_s^H(n))\mathbf{H}_s^H(n))_{m,m}}}{\sigma^2}\right) dx, n \in N_s \quad (7)$$

其中,  $I_0(\cdot)$  代表第1类0阶贝塞尔函数,  $V_T$  为雷达接收机判决门限。本文假定目标检测虚警概率  $P_{fa}$  为给定常数, 判决门限  $V_T$  与虚警概率  $P_{fa}$  之间满足  $e^{-\frac{V_T^2}{2\sigma^2}} = P_{fa}$ 。

### 3.4 无人机能量建模

无人机的飞行及执行通信、感知任务均需消耗一定能量。令  $E_f$  表示无人机飞行能量, 则:  $E_f =$

$\sum_{n=1}^N P^f(n)$ 。其中,  $P^f(n)$  表示无人机时隙  $n$  飞行所需推进功率<sup>[16]</sup>, 可建模为

$$P^f(n) = k_1 v^3(n) + k_2 \frac{1}{v(n)} \quad (8)$$

其中,  $v(n)$  为无人机在时隙  $n$  的飞行速度。由于  $v(n) = \|\mathbf{q}(n+1) - \mathbf{q}(n)\|/\tau$ , 则  $n$  时隙的推进功率可表示为

$$P^f(n) = \frac{k_1}{\tau^3} \|\mathbf{q}(n+1) - \mathbf{q}(n)\|^3 + \tau k_2 \frac{1}{\|\mathbf{q}(n+1) - \mathbf{q}(n)\|} \quad (9)$$

令无人机通信感知的总能量为  $E_t$ , 可得  $E_t = E_c + E_s = \tau \sum_{n=1}^N \text{Tr}(\mathbf{W}_c(n)\mathbf{W}_c^H(n) + \mathbf{W}_s(n)\mathbf{W}_s^H(n))$ , 其中,  $E_c$  为通信时隙无人机所消耗的能量, 可建模为  $E_c = \tau \sum_{n \in N_f} \text{Tr}(\mathbf{W}_c(n)\mathbf{W}_c^H(n))$ ;  $E_s$  为通信感知时隙无人机消耗的能量, 可得  $E_s = \tau \sum_{n \in N_s} \text{Tr}(\mathbf{W}_c(n)\mathbf{W}_c^H(n) + \mathbf{W}_s(n)\mathbf{W}_s^H(n))$ 。

### 3.5 优化问题建模

本文联合优化无人机通信、感知预编码及飞行轨迹, 考虑到通信与感知任务的不同性能需求, 分别针对无人机通信时隙及通信感知时隙建模优化问题。将无人机在通信时隙的通信预编码及轨迹优化问题建模为最小用户速率最大化问题

$$\left. \begin{aligned} & \max_{\mathbf{W}_c, \mathbf{q}} \min_k \{R_{c,k}\} \\ & \text{s.t. C1: } E_c \leq E_{cm} \\ & \quad \text{C2: } \mathbf{q}(0) = \mathbf{q}(N) \\ & \quad \text{C3: } \|\dot{\mathbf{q}}(n)\| \leq V_{max} \\ & \quad \text{C4: } E_f \leq E_{fm} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中, C1为无人机在通信时隙内的通信能量约束, 其中  $E_{cm}$  为通信能量上限; C2为无人机轨迹约束; C3为无人机的飞行速率约束, 可等价表示为  $\|\mathbf{q}(n+1) - \mathbf{q}(n)\| \leq S_{max}^2$ ; C4为无人机飞行能量约束, 其中  $E_{fm}$  为无人机飞行能量上限。

将无人机在通信感知时隙内无人机位置及通信感知预编码联合优化问题建模为目标最小发现概率最大化问题

$$\left. \begin{aligned} & \max_{\mathbf{W}_c, \mathbf{W}_s} \min_n \{P_d(n)\} \\ & \text{s.t. C1: } E_s \leq E_{sm} \\ & \quad \text{C2: } \min_k \frac{1}{n_s} \sum_{n \in N_s} \gamma_k^c(n) \geq \gamma_{th} \\ & \quad \text{C3: } \mathbf{H}_s(n)(\mathbf{W}_s(n)\mathbf{W}_s^H(n))\mathbf{H}_s^H(n) \geq S_{i,min}, n \in N_s \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

其中, C1为无人机在通信感知时隙内的发送能量约束, 其中  $E_{sm}$  为通信感知能量上限; C2为通信性

能约束,即在通信感知时间内,用户通信性能需优于某一性能阈值,  $\gamma_{th}$ 表示通信性能阈值; C3为目标检测虚警概率约束; C4为雷达接收机灵敏度约束,  $S_{i\min}$ 表示雷达接收机最小灵敏度。

#### 4 优化问题求解

本节对所建模优化问题进行求解,分别提出基于交替迭代算法的无人机通信预编码及轨迹设计策略及基于通信轨迹选定目标感知点的算法。

##### 4.1 基于交替迭代算法的无人机通信预编码与飞行轨迹设计策略

式(10)中所建模的无人机通信预编码及轨迹设计问题为复杂非凸优化问题,难以直接进行求解。本节将该问题拆分为通信预编码设计子问题及无人机轨迹优化子问题,并采用交替迭代算法依次对子问题进行求解,直至算法收敛。

###### 4.1.1 通信预编码设计子问题建模及求解

通过对通信时隙内的无人机发射天线预编码进行设计,可以实现通信用户间和通信感知信号间的干扰消除,同时可以针对不同时隙的信道特性实现最佳发射功率分配,从而得到更好的通信性能。若无人机位于通信时隙,其仅执行通信任务而不进行雷达探测,故在此阶段不对雷达分配功率。因此,用户SINR可重新表示为

$$\gamma_k^c(n) = \frac{|[\mathbf{H}_c(n)\mathbf{W}_c(n)]_{k,k}|^2}{\sum_{i \neq k} |[\mathbf{H}_c(n)\mathbf{W}_c(n)]_{k,i}|^2 + \sigma^2} \quad (12)$$

通信时隙内用户通信平均速率 $R_{c,k}$ 可重新表示为

$$R_{c,k} = \frac{1}{n_c} \cdot \sum_{n \in N_c} \log_2 \left( 1 + \frac{|[\mathbf{H}_c(n)\mathbf{W}_c(n)]_{k,k}|^2}{\sum_{i \neq k} |[\mathbf{H}_c(n)\mathbf{W}_c(n)]_{k,i}|^2 + \sigma^2} \right) \quad (13)$$

为实现用户通信速率最大化,应尽可能降低或消除用户间干扰,本文通过设计通信预编码消除用户间干扰,即使 $\sum_{i \neq k} |[\mathbf{H}_c(n)\mathbf{W}_c(n)]_{k,i}|^2 = 0$ ,也即 $\mathbf{H}_c(n)\mathbf{W}_c(n)$ 为对角矩阵,可得

$$\mathbf{H}_c(n)\mathbf{W}_c(n) = \text{diag}(\sqrt{p_1(n)}, \sqrt{p_2(n)}, \dots, \sqrt{p_K(n)}) \quad (14)$$

其中,  $p_k(n) = |[\mathbf{H}_c(n)\mathbf{W}_c(n)]_{k,k}|^2$ 为用户 $k$ 在时隙 $n$ 的接收信号功率。以下引入定理对式(14)进行等价转换。

**定理** 给定半正定协方差矩阵 $\mathbf{R}$ 和满秩矩阵

$\mathbf{F}$ ,则存在矩阵 $\mathbf{W}$ 满足: $\mathbf{R} = \mathbf{W}\mathbf{W}^H$ ,  $\mathbf{H}\mathbf{W} = \mathbf{F}$ ,当且仅当: $\mathbf{H}\mathbf{R}\mathbf{H}^H = \mathbf{F}\mathbf{F}^H$ 。

令 $\mathbf{F} = \text{diag}(p_1(n), p_2(n), \dots, p_K(n))$ ,则 $\mathbf{H}_c(n)\mathbf{W}_c(n)\mathbf{W}_c^H(n)\mathbf{H}_c^H(n) = \text{diag}(p_1(n), p_2(n), \dots, p_K(n))$ ,其中 $\mathbf{R}(n) = \mathbf{W}_c(n)\mathbf{W}_c^H(n)$ 。根据上述分析,在给定无人机轨迹 $\mathbf{q}$ 的情况下,通信预编码设计子问题可以建模为

$$\left. \begin{aligned} & \max_{\mathbf{R}, p} \min_k \left\{ \frac{1}{n_c} \sum_{n \in N_c} \log_2 \left( 1 + \frac{p_k(n)}{\sigma^2} \right) \right\} \\ & \text{s.t. C1: } \mathbf{R}(n) \succeq 0, n \in N_c \\ & \quad \text{C21: } p(n) \succeq 0, n \in N_c \\ & \quad \text{C31: } \mathbf{H}_c(n)\mathbf{R}(n)\mathbf{H}_c^H(n) \\ & \quad \quad = \text{diag}(p_1(n), p_2(n), \dots, p_K(n)) \\ & \quad \text{C41: } \sum_{n \in N_c} \text{Tr}(\mathbf{R}(n)) \leq \frac{E_c}{\tau} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

针对约束条件C4,引入变量 $\mathbf{E}(n)$ 表示时隙 $n$ 无人机的最大通信能量,优化问题式(15)可重写为如式(16)的半正定规划(Semi-Definite Program, SDP)问题

$$\left. \begin{aligned} & \max_{\mathbf{R}, p, \mathbf{E}, \xi} \{ \xi \} \\ & \text{s.t. 式(15)的C1} \sim \text{C3} \\ & \quad \text{C4: } \frac{1}{n_c} \sum_{n \in N_c} \log_2 \left( 1 + \frac{p_k(n)}{\sigma^2} \right) \geq \xi, \\ & \quad \quad k = 1, 2, \dots, K \\ & \quad \text{C5: } \mathbf{E}(n) \leq p_{\max}^c, n \in N_c \\ & \quad \text{C6: } \tau \text{Tr}[\mathbf{R}(n)] \leq \mathbf{E}(n), n \in N_c \\ & \quad \text{C7: } \sum_{n \in N_c} \mathbf{E}(n) \leq \mathbf{E}_c \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

可以证明上述优化问题为凸优化问题,可通过优化工具包,如Matlab凸优化工具包(Matlab software for disciplined Convex programming, CVX)进行求解。

###### 4.1.2 无人机飞行轨迹子问题建模及求解

对通信时隙内的无人机飞行轨迹进行设计,旨在利用无人机有限的飞行能量对多用户进行通信服务,从而得到更好的通信性能。给定通信预编码 $\mathbf{W}_c(n)$ 的前提下,用户 $k$ 处于时隙 $n$ 的SINR可建模为

$$\begin{aligned} \gamma_k^c(n) &= \frac{\left| \sum_{i=1}^M h_{k,i}^c(n) w_{i,k}(n) \right|^2}{\sigma^2} \\ &= \frac{\left| \sum_{i=1}^M \rho_{k,i} w_{i,k}(n) \right|^2}{\sigma^2 (L^2 + \|\mathbf{q}(n) - \boldsymbol{\omega}_k\|^2)}, n \in N_c \end{aligned} \quad (17)$$

其中,  $w_{i,j}(n)$ 为 $n$ 时隙 $\mathbf{W}_c$ 的第 $i$ 行第 $j$ 列元素。令  $\lambda_{k,n} = \frac{1}{\sigma^2} \left| \sum_{i=1}^M \rho_{k,i} w_{i,k}(n) \right|^2$ , 无人机轨迹优化子问题可以建模为

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{q}, \eta} \{ \eta \}, \\ \text{s.t. C1: } & \frac{1}{n_c} \sum_{n \in N_c} \log_2 \left( 1 + \frac{\lambda_{k,n}}{L^2 + \|\mathbf{q}(n) - \boldsymbol{\omega}_k\|^2} \right) \geq \eta, \\ & \forall k \in 1, 2, \dots, K, \\ \text{C2: } & \mathbf{q}(0) = \mathbf{q}(N), \\ \text{C3: } & \|\mathbf{q}(n+1) - \mathbf{q}(n)\|^2 \leq S_{\max}^2, \\ \text{C4: } & \sum_{n \in N_c} \frac{k_1}{\tau^3} \|\mathbf{q}(n+1) - \mathbf{q}(n)\|^3 \\ & + \tau k_2 \frac{1}{\|\mathbf{q}(n+1) - \mathbf{q}(n)\|} \leq E_f \end{aligned} \quad (18)$$

该问题中约束条件C1和C4为非凸约束, 故该问题为非凸优化问题, 难以采用凸优化工具直接求解, 本节采用连续凸逼近对C1和C4进行近似处理。

可以证明,  $\log_2 \left( 1 + \frac{\lambda_{k,n}}{L^2 + \|\mathbf{q}(n) - \boldsymbol{\omega}_k\|^2} \right)$ 为  $\|\mathbf{q}(n) - \boldsymbol{\omega}_k\|^2$ 的凸函数。应用凸函数在任意点处的1阶泰勒展开式为原函数的全局下界估计的特性, 可得

$$\begin{aligned} \log_2 \left( 1 + \frac{\lambda_{k,n}}{L^2 + \|\mathbf{q}(n) - \boldsymbol{\omega}_k\|^2} \right) & \geq -A^r(n) \\ & \cdot (\|\mathbf{q}(n) - \boldsymbol{\omega}_k\|^2 - \|\mathbf{q}^r(n) - \boldsymbol{\omega}_k\|^2) + B^r(n) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\text{其中, } A^r(n) = \frac{\lambda_{k,n} \log_2 e}{L^2 + \|\mathbf{q}^r(n) - \boldsymbol{\omega}_k\|^2}, \quad B^r(n) = \frac{\lambda_{k,n}}{1 + \frac{\lambda_{k,n}}{L^2 + \|\mathbf{q}^r(n) - \boldsymbol{\omega}_k\|^2}}$$

$\log_2 \left( 1 + \frac{\lambda_{k,n}}{L^2 + \|\mathbf{q}^r(n) - \boldsymbol{\omega}_k\|^2} \right)$ , 均为常数,  $r$ 为迭代次数。

根据连续凸逼近(Successive Convex Approximation, SCA), 采用式(19)中的下界函数逼近原函数, 可重写约束条件C1为

$$\begin{aligned} & \sum_{n \in N_c} -A^r(n) (\|\mathbf{q}(n) - \boldsymbol{\omega}_k\|^2 - \|\mathbf{q}^r(n) - \boldsymbol{\omega}_k\|^2) \\ & + B^r(n) \geq n_c \eta, \quad \forall k \in 1, 2, \dots, K \end{aligned} \quad (20)$$

由于  $\|\mathbf{q}(n) - \boldsymbol{\omega}_k\|^2$ 为关于 $\mathbf{q}$ 的凸函数, 上述约束条件为凸约束。优化问题式(18)的约束C4中,  $\frac{1}{\|\mathbf{q}(n+1) - \mathbf{q}(n)\|}$ 为 $\mathbf{q}$ 的非凸非凹函数, 故该约束为非凸约束。引入松弛变量 $v(n)$ , 满足  $\|\mathbf{q}(n+1) - \mathbf{q}(n)\| \geq \sqrt{v(n)}$ , 则约束C4可转换为

$$\sum_{n \in N_c} \left( \frac{k_1}{\tau^3} \|\mathbf{q}(n+1) - \mathbf{q}(n)\|^3 + \tau k_2 \frac{1}{\sqrt{v(n)}} \right) \quad (21)$$

$$\|\mathbf{q}(n+1) - \mathbf{q}(n)\| \geq \sqrt{v(n)} \quad (22)$$

上述约束条件中  $\|\mathbf{q}(n+1) - \mathbf{q}(n)\| \geq \sqrt{v(n)}$ 可等价于  $\|\mathbf{q}(n+1) - \mathbf{q}(n)\|^2 \geq v(n)$ 。显然, 该约束仍为非凸约束。由于  $\|\mathbf{q}(n+1) - \mathbf{q}(n)\|^2$ 为 $\mathbf{q}$ 的凸函数, 利用SCA对  $\|\mathbf{q}(n+1) - \mathbf{q}(n)\|^2$ 进行1阶泰勒展开, 可得到

$$\begin{aligned} \|\mathbf{q}(n+1) - \mathbf{q}(n)\|^2 & \geq -\|\mathbf{q}^r(n+1) - \mathbf{q}^r(n)\|^2 \\ & + 2(\mathbf{q}^r(n+1) - \mathbf{q}^r(n))^T (\mathbf{q}(n+1) - \mathbf{q}(n)) \end{aligned} \quad (23)$$

综上所述, 优化问题式(20)可转换为

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{q}, \eta, v(n)} \{ \eta \}, \\ \text{s.t. C1: } & \sum_{n \in N_c} -A^r(n) (\|\mathbf{q}(n) - \boldsymbol{\omega}_k\|^2 - \|\mathbf{q}^r(n) - \boldsymbol{\omega}_k\|^2) \\ & + B^r(n) \geq n_c \eta, \quad \forall k \in 1, 2, \dots, K, \\ \text{C2: } & \mathbf{q}(0) = \mathbf{q}(N), \\ \text{C3: } & \|\mathbf{q}(n+1) - \mathbf{q}(n)\|^2 \leq S_{\max}^2, \\ \text{C4: } & \sum_{n \in N_c} \frac{k_1}{\tau^3} \|\mathbf{q}(n+1) - \mathbf{q}(n)\|^3 \\ & + \tau k_2 \frac{1}{\|\mathbf{q}(n+1) - \mathbf{q}(n)\|} \leq E_f, \\ \text{C5: } & v(n) \leq -\|\mathbf{q}^r(n+1) - \mathbf{q}^r(n)\|^2 \\ & + 2(\mathbf{q}^r(n+1) - \mathbf{q}^r(n))^T (\mathbf{q}(n+1) - \mathbf{q}(n)) \end{aligned} \quad (24)$$

上述问题的目标函数与约束条件均为标准凸形式, 可利用CVX进行求解。

#### 4.1.3 基于交替迭代法的通信预编码及无人机轨迹问题求解

本文采用交替迭代法对通信预编码优化子问题式(16)和轨迹通信优化子问题式(24)进行迭代求解, 直至算法收敛, 可得到预编码与轨迹联合策略。

交替迭代法的具体步骤如下:

(1) 初始化: 无人机初始轨迹 $\mathbf{q}^0$ , 令迭代次数  $r = 0$ ;

(2) 给定无人机轨迹 $\mathbf{q}^{(r)}$ , 求解通信预编码子问题式(16), 得到 $\mathbf{W}_c^{(r)}$ ;

(3) 给定通信预编码 $\mathbf{W}_c^{(r)}$ , 求解轨迹子问题式(24), 得到 $\mathbf{q}^{(r+1)}$ ;

(4) 重复步骤(2)和步骤(3), 直至算法收敛, 得到次优预编码解 $\mathbf{W}_c^*$ 和次优轨迹解 $\mathbf{q}^*$ 。

#### 4.2 无人机通信感知问题建模及求解

本节主要对通信感知时隙内的无人机感知位置优化及通信感知预编码设计问题进行建模及求解。首先将无人机感知位置优化问题建模为加权距离最小化问题, 通过求解优化问题确定无人机最优感知位置, 进而建模无人机通信感知预编码问题。

#### 4.2.1 感知位置选取

本节首先优化确定无人机目标感知位置, 由于无人机目标发现概率与链路传输特性密切相关, 在给定雷达发送功率的前提下, 最小化无人机与探测目标之间的距离可以实现发现概率优化; 此外, 无人机与用户之间的可靠通信也对通信链路提出要求, 而通信链路同样与用户距离相关。为兼顾无人机通信与感知性能, 本节将无人机感知位置优化问题建模为加权距离和最小化问题。令 $d(n)$ 为加权距离和, 则

$$d(n) = \alpha_1 \sum_{n \in N_s} d^s(n) + \alpha_2 \sum_{k=1}^K \sum_{n \in N_s} d_k^c(n) \quad (25)$$

其中,  $\alpha_1, \alpha_2$  代表权重;  $d_k^c(n) = \|\mathbf{q}^*(n) - \boldsymbol{\omega}_k\|^2$  表示第 $k$ 个用户到无人机的距离;  $d^s(n) = \|\mathbf{q}^*(n) - \boldsymbol{\omega}_s\|^2$  表示感知目标到无人机的距离。优化问题可建模为

$$\left. \begin{aligned} & \max_{\mathbf{W}_c, \mathbf{W}_s} \min_n \{P_d(n)\} \\ & \text{s.t. C1: } \tau \sum_{n \in N_s} \text{Tr}(\mathbf{W}_c(n)\mathbf{W}_c^H(n) + \mathbf{W}_s(n)\mathbf{W}_s^H(n)) \leq E_{\text{sm}} \\ & \text{C2: } \min_k \frac{1}{n_s} \sum_{n \in N_s} \frac{|[\mathbf{H}_c(n)\mathbf{W}_c(n)]_{k,k}|^2}{\sum_{j \neq k} |[\mathbf{H}_c(n)\mathbf{W}_c(n)]_{k,j}|^2 + \sum_{j=1}^M |[\mathbf{H}_c(n)\mathbf{W}_s(n)]_{k,j}|^2 + \sigma^2} \geq \gamma_{\text{th}} \\ & \text{C3: } \mathbf{H}_s(n)(\mathbf{W}_s(n)\mathbf{W}_s^H(n))\mathbf{H}_s^H(n) \geq S_{i \min}, n \in N_s \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

采用ZF算法消除通信用户间的干扰以及雷达信号对通信的干扰, 可得

$$\sum_{j \neq k} |[\mathbf{H}_c(n)\mathbf{W}_c(n)]_{k,j}|^2 = 0, n \in N_s \quad (28)$$

$$\sum_{j=1}^M |[\mathbf{H}_c(n)\mathbf{W}_s(n)]_{k,j}|^2 = 0, n \in N_s \quad (29)$$

与4.1类似, 基于ZF的干扰消除可等价为如式(30)和式(31)的约束条件

$$\begin{aligned} & \mathbf{H}_c(n)\mathbf{W}_c(n)\mathbf{W}_c^H(n)\mathbf{H}_c^H(n) \\ & = \text{diag}(p_1(n), p_2(n), \dots, p_K(n)) \end{aligned} \quad (30)$$

$$\mathbf{H}_c(n)\mathbf{W}_s(n)\mathbf{W}_s^H(n)\mathbf{H}_c^H(n) = \mathbf{0}_{K \times K} \quad (31)$$

由于目标发现概率与雷达接收功率成正相关关系, 故发现概率最大化可以等价为雷达接收功率最大化。根据雷达信号传输模型可知, 接收功率 $p_s(n) = \mathbf{H}_s(n)\mathbf{W}_s(n)\mathbf{W}_s^H(n)\mathbf{H}_s^H(n)$ , 令 $\mathbf{R}_s(n) = \mathbf{W}_s(n)\mathbf{W}_s^H(n)$ ,  $\mathbf{R}_c(n) = \mathbf{W}_c(n)\mathbf{W}_c^H(n)$ , 优化问题可以转换为SDP问题

$$\min_{N_s} \sum_{n \in N_s} d(n), \text{ s.t. } |N_s| = n_s \quad (26)$$

给定无人机飞行轨迹, 无人机感知位置优化问题等价于无人机感知时隙选择问题, 具体算法步骤如下:

(1) 计算无人机飞行轨迹中各位置到检测目标与用户的加权距离和 $d(n)$ ;

(2) 对加权距离和进行升序排序, 得到序列:  $d(n_1) \leq d(n_2) \leq \dots \leq d(n_N)$ ;

(3) 选定该序列的前 $n_s$ 个值 $d(n_1) \leq d(n_2) \leq \dots \leq d(n_N)$ , 找到对应的通信感知时隙 $n_i$ 作为感知时隙,  $i = 1, 2, \dots, n_s$ 。

#### 4.2.2 通信感知预编码联合优化问题求解

给定感知时隙, 将通信感知预编码联合优化建模为满足用户SINR及能量约束的最小发现概率最大化问题

$$\left. \begin{aligned} & \max_{\mathbf{W}_c, \mathbf{W}_s} \{\chi\}, \\ & \text{s.t. C1: } \mathbf{H}_s(n)\mathbf{R}_s(n)\mathbf{H}_s^H(n) \geq \chi, n \in N_s, \\ & \text{C2: } \mathbf{H}_s(n)\mathbf{R}_s(n)\mathbf{H}_s^H(n) \geq S_{i \min}, n \in N_s, \\ & \text{C3: } \tau \sum_{n \in N_s} \text{Tr}(\mathbf{R}_c(n) + \mathbf{R}_s(n)) \leq E_s, \\ & \text{C4: } \frac{1}{n_s} \sum_{n \in N_s} p_k(n) \geq \sigma^2 \gamma_{\text{th}}, k = 1, 2, \dots, K, \\ & \text{C5: } \mathbf{H}_c(n)\mathbf{R}_c(n)\mathbf{H}_c^H(n) \\ & \quad = \text{diag}(p_1(n), p_2(n), \dots, p_K(n)), n \in N_s, \\ & \text{C6: } \mathbf{H}_c(n)\mathbf{R}_s(n)\mathbf{H}_c^H(n) = \mathbf{0}_{K \times K}, n \in N_s, \\ & \text{C7: } \mathbf{R}_c(n) \succeq \mathbf{0}, n \in N_s, \\ & \text{C8: } \mathbf{R}_s(n) \succeq \mathbf{0}, n \in N_s, \\ & \text{C9: } \mathbf{p}(n) \succeq \mathbf{0}, n \in N_s \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

由于目标函数与各约束均为标准凸形式, 该问题为凸优化问题, 可利用CVX求解。

## 5 仿真结果分析

本文采用MATLAB仿真软件对所提算法的性能进行验证和评估, 并与相关文献所提算法进行比较。仿真场景由1个无人机、 $K$ 个通信用户及1个待探测目标组成, 其中, 仿真区域的大小为1 000 m ×

1 000 m，无人机飞行的起点与终点均位于原点(0,0)处，通信用户与待探测目标随机分布在仿真区域内，仿真使用的相关参数如表1所示。

图2给出了通信用户数为4时，无人机在整个飞行时间内的飞行轨迹。图2(a)及图2(b)中无人机的飞行能量分别为 $4 \times 10^4$  J和 $8 \times 10^4$  J。由图可以看到无人机从起始点出发，依次向4个用户的邻近区域飞行，完成通信任务后返回原位置。对比不同飞行能量对无人机轨迹的影响，可以发现相较于飞行能量不足的情况，若无人机飞行能量较为充足，无人机的飞行轨迹距离用户位置更接近，从而保障用户获得更优通信性能。

图3针对2个用户，1个感知目标，无人机飞行能量为 $4 \times 10^4$  J的情况，给出了无人机的飞行轨迹及目标感知位置。由此可见，无人机的飞行轨迹距离通信用户较近，以实现用户通信性能更优。此外，无人机的目标感知位置距离感知目标较近，实现了感知与通信性能的折中。

图4(a)所示为不同通信用户数情况下，用户最低通信速率与无人机最大可分配通信功率之间关系图。由此可以看到随着通信功率的增加，用户最低

通信速率呈现上升趋势。比较不同通信用户数对应的通信速率可以看出，随着用户数的增多，用户最低通信性能相应降低，这是因为给定无人机发送功率，用户数的增加导致每个用户所分配的功率减少，对应较低通信速率。图4(b)所示为不同无人机天线数目情况下，用户最低通信速率与无人机最大可分配通信功率之间关系图。由图可以看到随着无人机天线数目的增加，用户最低通信性能相应提升，这是因为在多天线传输中，提升发射天线数目能够得到更高的通信速率以及频谱利用率。

图5(a)给出了采用本文及相关文献所提算法所得的用户平均通信速率与算法迭代次数关系图。与文献[10]所提出算法相比，本文所提算法具有更快的迭代速度及更优通信性能。图5(b)给出了用户最低通信速率与无人机最大飞行时间的关系图。从图中可以看到随着飞行时间的增加，用户的最低通信速率随之增加，也即通信性能有所提升。这是由于较长的飞行时间使无人机可以尽量靠近通信用户，从而增加用户的通信速率。对比起见，本文所提出的轨迹设计算法相较于文献[10]所提出的单无人机以及双无人机算法有着更好的通信性能。这是因为本文引入了无人机多天线传输，使得用户通信的性能有了显著提升。

图6(a)给出了目标发现概率与雷达接收功率的关系图。由图6可以看出，随着雷达接收功率的增加，目标发现概率呈现单调递增的变化趋势。对比不同虚警概率对应的发现概率性能，可以看出，较高的虚警概率对应着更高的目标发现概率，这表明获得更高的发现概率需要降低对虚警概率的要求。图6(b)给出了目标发现概率与感知信道振幅系数( $\beta$ )之间关系图。随着感知振幅系数的增加，通信感知时隙内最低发现概率显著增加，这是因为较大感知目标尺寸增加了目标感知概率。可以看出，被探测目标的尺寸较大影响了感知信道系数的大小，进而影响目标的发现概率，尺寸更大的目标对应更高的发现概率。

表1 仿真参数设置

仿真参数	数值
LOS特性系数( $\rho_0$ )	$10^{-2}$
飞行高度(L)	50 m
噪声标准差( $\sigma^2$ )	$10^{-10}$ W
无人机速度上限( $V_{max}$ )	30 m/s
无人机飞行能量系数( $k_1, k_2$ )	0.066 1, 15.97
飞行通信能量上限( $E_c$ )	100 J
无人机飞行能量上限	$4 \times 10^4$ J, $8 \times 10^4$ J
无人机通感联合能量上限( $E_s$ )	100 J
每时隙通信发射功率上限( $p_{max}^c$ )	1.5 W
每时隙感知发射功率上限( $p_{max}^s$ )	30 W
雷达最小接收灵敏度( $S_{i, min}$ )	-90 dBm

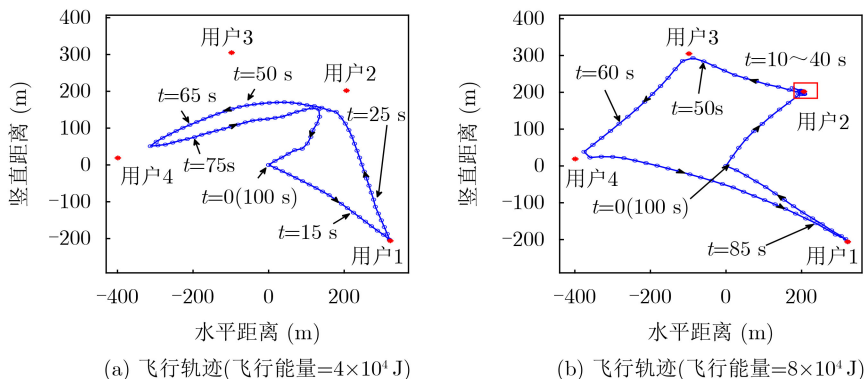


图2 无人机飞行轨迹



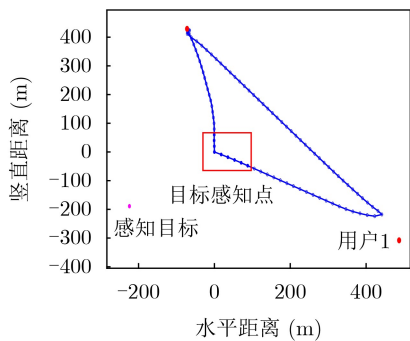


图3 无人机飞行轨迹及目标感知位置图

### 6 结论

针对多用户MIMO无人机使能的联合通信、感知场景, 本文提出基于通感联合的无人机预编码及飞行轨迹设计算法。综合考虑无人机飞行能量、多天线传输及用户业务需求等限制条件, 建模无人机通信、感知预编码及飞行轨迹联合优化问题为多目标优化问题, 以实现通信用户最低速率最大化及目标最小发现概率最大化。由于通信用户最低速率最大化问题为非凸优化问题, 难以直接求解, 将原优

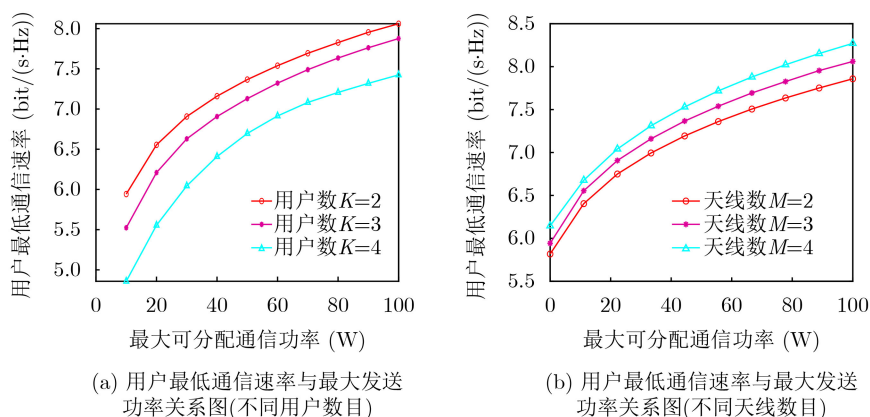


图4 用户最低通信速率对比

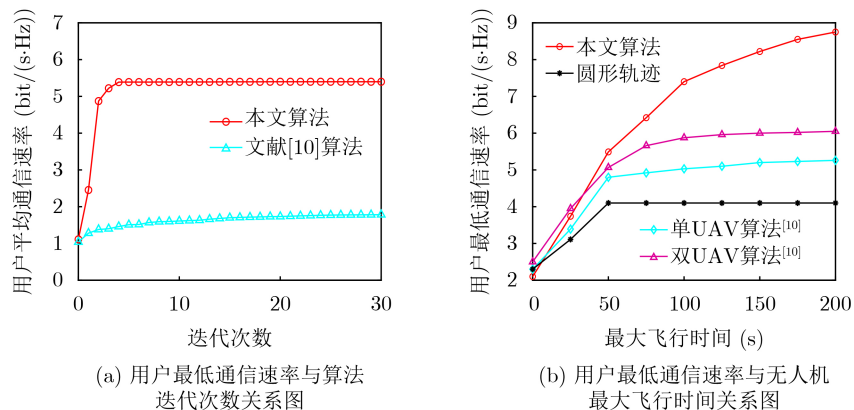


图5 算法对比

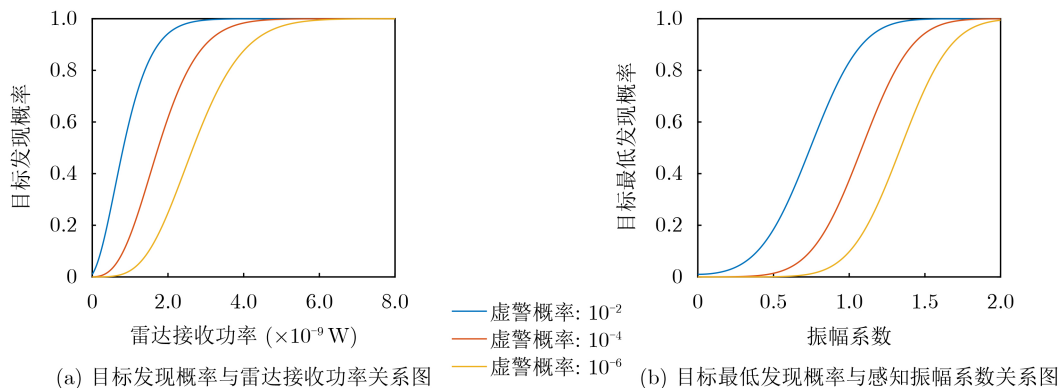


图6 感知性能对比

化问题分解为通信预编码设计子问题及无人机轨迹设计子问题, 并采用交替迭代法依次求解两个子问题。其中, 对于通信预编码设计子问题, 提出一种基于ZF算法的求解策略; 对于无人机轨迹设计子问题, 提出一种基于SCA算法的求解策略。基于所得到的无人机最优轨迹, 将无人机感知位置选择问题建模为加权距离和最小化问题, 进而应用泛搜索算法优化确定目标感知位置, 并设计基于ZF算法的通信感知预编码联合优化策略。最后通过仿真验证了本文所提算法的有效性。

### 参考文献

- [1] ZHENG Le, LOPS M, ELDAR Y C, *et al.* Radar and communication coexistence: An overview: A review of recent methods[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2019, 36(5): 85–99. doi: [10.1109/MSP.2019.2907329](https://doi.org/10.1109/MSP.2019.2907329).
- [2] ZHANG J A, HUANG Xiaojing, GUO Y J, *et al.* Multibeam for joint communication and radar sensing using steerable analog antenna arrays[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(1): 671–685. doi: [10.1109/TVT.2018.2883796](https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2883796).
- [3] YUAN Xin, FENG Zhiyong, ZHANG J A, *et al.* Spatio-temporal power optimization for MIMO joint communication and radio sensing systems with training overhead[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(1): 514–528. doi: [10.1109/TVT.2020.3046438](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3046438).
- [4] 江源. 面向MU-MIMO的符号级预编码和接收波束赋形[D]. [硕士学位论文], 南京邮电大学, 2022. doi: [10.27251/d.cnki.gnjdc.2022.001094](https://doi.org/10.27251/d.cnki.gnjdc.2022.001094).  
JIANG Yuan. Symbol level precoding and receive beamforming for MU-MIMO[D]. [Master dissertation], Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2022. doi: [10.27251/d.cnki.gnjdc.2022.001094](https://doi.org/10.27251/d.cnki.gnjdc.2022.001094).
- [5] LIU Xiang, HUANG Tianyao, SHLEZINGER N, *et al.* Joint transmit beamforming for multiuser MIMO communications and MIMO radar[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2020, 68: 3929–3944. doi: [10.1109/TSP.2020.3004739](https://doi.org/10.1109/TSP.2020.3004739).
- [6] ZHOU Yifan, ZHOU Huilin, ZHOU Fuhui, *et al.* Resource allocation for a wireless powered integrated radar and communication system[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 8(1): 253–256. doi: [10.1109/LWC.2018.2868819](https://doi.org/10.1109/LWC.2018.2868819).
- [7] SAVKIN A V and HUANG Hailong. Deployment of unmanned aerial vehicle base stations for optimal quality of coverage[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 8(1): 321–324. doi: [10.1109/LWC.2018.2872547](https://doi.org/10.1109/LWC.2018.2872547).
- [8] SUN Jingcong and MASOUIROS C. Deployment strategies of multiple aerial BSs for user coverage and power efficiency maximization[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(4): 2981–2994. doi: [10.1109/TCOMM.2018.2889460](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2018.2889460).
- [9] SHABANIGHAZIKELAYEH M and KOYUNCU E. Outage-optimized deployment of UAVs[C]. The 2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Istanbul, Turkey, 2019: 1–6. doi: [10.1109/PIMRC.2019.8904305](https://doi.org/10.1109/PIMRC.2019.8904305).
- [10] WU Qingqing, ZENG Yong, and ZHANG Rui. Joint trajectory and communication design for multi-UAV enabled wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(3): 2109–2121. doi: [10.1109/TWC.2017.2789293](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2789293).
- [11] WU Jun, LI Pei, BAO Jianrong, *et al.* Quick multiband spectrum sensing for delay-constraint cognitive UAV networks[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(19): 19088–19100. doi: [10.1109/JSEN.2022.3201006](https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3201006).
- [12] MENG Kaitao, LI Deshi, HE Xiaofan, *et al.* Space pruning based time minimization in delay constrained multi-task UAV-based sensing[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(3): 2836–2849. doi: [10.1109/TVT.2021.3061243](https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3061243).
- [13] MENG Kaitao, WU Qingqing, MA Shaodan, *et al.* Throughput maximization for UAV-enabled integrated periodic sensing and communication[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(1): 671–687. doi: [10.1109/TWC.2022.3197623](https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3197623).
- [14] MENG Kaitao, WU Qingqing, MA Shaodan, *et al.* UAV trajectory and beamforming optimization for integrated periodic sensing and communication[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2022, 11(6): 1211–1215. doi: [10.1109/LWC.2022.3161338](https://doi.org/10.1109/LWC.2022.3161338).
- [15] 丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理[M]. 3版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002: 130–138.  
DING Lufei and GENG Fulu. Principle of Radar[M]. 3rd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2002: 130–138.
- [16] JI Jiequ, ZHU Kun, YI Changyan, *et al.* Energy consumption minimization in UAV-assisted mobile-edge computing systems: Joint resource allocation and trajectory design[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(10): 8570–8584. doi: [10.1109/JIOT.2020.3046788](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3046788).

柴蓉: 女, 教授, 研究方向为通信网络架构及关键技术、无线资源管理及移动性管理技术等。

崔相霖: 男, 硕士生, 研究方向为无线通信、无线资源管理等。

孙瑞锦: 女, 普英副教授, 研究方向为知识驱动的资源调度。

陈前斌: 男, 教授, 研究方向为无线通信、通信网络理论、软件定义网络、多媒体技术等。

责任编辑: 余蓉