

基于智能反射面的无人机工作模式调整研究

石雁航,孙颖,陈思光
(南京邮电大学 物联网学院,江苏 南京 210003)

摘要:由于复杂的通信环境,空地网络的视线传输可能会受阻,严重影响通信质量。可重构智能反射面是通过可重构无源单元改善无线环境的一种有前途的解决方案。基于此,研究了一种新的智能反射面辅助空地通信场景,通过优化智能反射面相移以及联合优化系统吞吐量和无人机能耗,提出基于智能反射面辅助的无人机工作模式自适应算法。首先,考虑了基于无人机-智能反射面信道以及智能反射面-地面节点的信道模型,并对静态模式以及巡航模式下无人机工作周期等参数进行设计;然后,通过优化智能反射面相移最大化系统吞吐量,然而由于最大化吞吐量以及最小化能耗的目标是相悖的,基于此规划了无人机经济效率最大化问题;最后,通过最大化经济效率,达到对无人机工作模式进行自适应性调整的目的。与传统方法相比,该算法在经济效率方面可以获得较大的性能提升。

关键词:无人机;智能反射面;经济效率;工作模式调整;无线传感器网络

中图分类号:TP393

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2023)06-0101-08

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2023.06.016

UAV-assisted Communication Working Mode Adjustment Based on Intelligent Reflective Surface

SHI Yan-hang, SUN Ying, CHEN Si-guang

(School of Internet of Things, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Due to the complex communication environment, the line-of-sight transmission of the air-ground networks may be obstructed, which seriously affects the communication quality. Reconfigurable intelligent reflective surface (IRS) is a promising solution to improve the wireless environment through reconfigurable passive units. Based on this, a new IRS-assisted air-ground communication scenario is studied, and an IRS-assisted unmanned aerial vehicle (UAV) working mode adjustment algorithm is proposed. The channel models based on UAV-IRS channel and IRS-ground node are first considered, and parameters such as UAV operating period in static mode and cruise mode are designed. Then, the system throughput is maximized by optimizing the IRS phase shift. However, since the objectives of maximizing throughput as well as minimizing energy consumption are contradictory, based on this, an UAV economic efficiency maximization problem is formulated. Finally, by maximizing economic efficiency, the self-adapting adjustment purpose of UAV working mode is achieved. The proposed algorithm can obtain higher performance improvement in terms of economic efficiency compared to the conventional methods.

Key words: unmanned aerial vehicle; intelligent reflective surface; economic efficiency; working mode adjustment; wireless sensor networks

0 引言

无人机的发展推动了无人机在军事、民用和商业领域的大量应用^[1],包括空中监察、货物运输、搜索和救援等。此外,与地面基础设施相比,无人机通常在高空飞行,这使得无人机和地面设备之间的传输链路以视线链路为主^[2]。无人机作为中继部署有助于在严重

衰落信道中进行地面通信,用以提高信道传输性能^[3]。无线传感器网络已广泛应用于许多领域,从现代农业到森林火灾探测,从人体结构监测到家庭自动化系统^[4]。为了延长无线传感器网络寿命,引入无人机作为中继进行辅助通信。可以将无人机辅助无线传感器网络通信看作一种特殊的基于移动的无线传感器网

收稿日期:2022-08-22

修回日期:2022-12-22

基金项目:国家自然科学基金(61971235);中国博士后科学基金(面上)(2018M630590);江苏省博士后科研资助计划(2021K501C);江苏省“333高层次人才培养工程”(XX);南京邮电大学“1311”人才计划(XX);江苏省研究生科研创新计划(KYCX21_0803)

作者简介:石雁航(1998-),男,硕士研究生,研究方向为通信网络与物联网;通讯作者:陈思光(1984-),男,博士,教授,研究方向为边缘智能与智慧物联网。

络,无人机的灵活性可以为无线传感器网络提供更有效和更广泛的覆盖。然而,无人机辅助无线传感器网络通信面临许多挑战,例如:复杂且不可控的无线环境,尤其是拥挤区域,建筑物、树木和人体等常见物体的存在使得视线链路更加容易被阻塞^[5]。另外,无人机的机动性引起的非平稳信道的空间和时间变化,会导致无人机系统出现严重的非平稳性。

为了应对上述挑战,一些研究提出了智能反射面辅助空地通信系统^[6-7],智能反射面能够绕过障碍物并增强无人机系统中的通信,即智能反射面辅助无人机通信。现如今,智能反射面被认为是未来实现节能、经济传输的一项有前途的技术^[8]。智能反射面是由大量规则排列的无源反射元件和智能控制器组成的人造可重构表面。智能反射面通过改变入射电信号在其反射元件上的振幅或相移,能够以期望的方式实现高精度的无线电波操纵,从而通过控制无线环境来达到信号增强、干扰抑制和传输安全的目的。由于智能反射面采用无源阵列结构,所以智能反射面辅助的无线信道能够以低功耗和硬件成本获得大型天线阵列的优势。此外,与传统中继相比,智能反射面反射的无线电信号以固有的全双工传输方式不存在自干扰和噪声^[9]。

针对无人机辅助通信系统的研究,无人机轨迹优化对最大化系统吞吐量至关重要。在文献[3]提出一种移动无人机中继系统,并通过联合优化功率分配和无人机轨迹来最大化系统吞吐量。随着智能反射面的提出,智能反射面辅助无人机通信已成为一个有前途的研究课题。文献[10-12]提出了无人机辅助地面通信系统,通过联合优化无人机轨迹和智能反射面被动波束形成,使得系统吞吐量最大化。少数文献对安装在无人机上以降低无人机功耗的智能反射面进行研究。文献[13]使用智能反射面-无人机实现了更宽视角的信号反射,文献[14]采用智能反射面与无人机来减轻干扰攻击并增强了合法传输。但是文献[13-14]仅研究了假设智能反射面以及无人机处于固定位置,然后通过部署优化智能反射面以及无人机以找到最佳位置。文献[15]提出了一种智能反射面与无人机的中继模型,用来提高协作通信性能。然而,文献[15]中智能反射面以及无人机的水平位置是固定的。考虑到无人机的机动性,文献[11]研究了由移动无人机和地面用户组成的下行链路通信系统,通过联合设计无人机轨迹以及智能反射面相位,获得最大平均速率。

基于以上研究,可以发现基于智能反射面辅助的无人机通信研究大多固定在智能反射面以及无人机单一工作模式方面。基于智能反射面辅助的无人机作为空中基站向地面提供覆盖的部署分为两类:基于智能

反射面的静态无人机通信以及基于智能反射面的巡航无人机通信。静态无人机由于距离地面传感器节点较远,吞吐量性能会受到一定的限制,但是静态无人机被固定在某一点悬停不需要额外的机械飞行,所以与无人机巡航工作模式相比能量消耗较低。由于无人机车载能量有限,因此如何衡量无人机系统吞吐量性能与能量消耗是无人机通信研究中的关键挑战。

通过以上分析,为了改善无人机辅助通信无线信道环境,突破传感器能量限制对无线传感器网络性能限制的瓶颈以及进一步提升无人机系统经济效率,实现基于智能反射面的无人机工作模式自适应调整。该文研究智能反射辅助的空地通信系统,综合考虑无人机系统吞吐量以及能量消耗,提出一种自适应的无人机工作模式调整方案。主要贡献总结如下:

- 从改善无线信道质量方面,引入智能反射面辅助无人机以及无线传感器网络通信。推导了无人机处于静态以及巡航工作模式下智能反射面的相位偏移闭式解,实现了不同传输路径接收信号的相位对准,进一步提升无人机系统吞吐量以及经济效率。

- 基于上述问题,提出一种基于智能反射面辅助的无人机工作模式调整算法。该算法综合考虑无人机吞吐量以及能量消耗,对智能反射面反射元件相位偏移进行优化以提升吞吐量性能,并对无人机工作周期以及飞行进行设计以降低无人机能量消耗。

- 与随机相位以及不采用智能反射面方案相比,所提方案在提升吞吐量以及经济效率方面具有较大的性能优势。同时,通过最大化无人机经济效率从而实现无人机工作模式自适应调整的目的。

1 系统模型

本节研究基于智能反射面的无人机辅助无线传感器网络通信系统,该系统由源传感器节点、目标传感器节点、智能反射面以及无人机组成。

1.1 智能反射面-无人机空中部署

在笛卡尔坐标系下以传感器节点1为原点,传感器节点1与传感器节点2连线为 x 轴,无线传感器网络所在平面为 xoy 平面,垂直于 xoy 平面的方向为 z 轴建立坐标系,传感器节点坐标为 (x_i, y_i, z_i) , $i \in \{1, 2, 3\}$ 。设定无人机坐标为 (x_u, y_u, z_u) ,那么无人机在 xoy 平面的投影坐标为 $(x_u, y_u, 0)$ 。将智能反射面第一个元素作为参考点,那么智能反射面的坐标为 (x_k, y_k, z_k) 。

与无人机静态模式相比,巡航模式下无人机的机动性有助于实现更好的空对地信道,从而可以进一步提高系统吞吐量,提升网络通信质量。类似的,巡航模式下智能反射面辅助无人机与传感器节点通信如图2

所示,其中智能反射面安装在无人机上,并且可以依靠无人机的机动性高速移动。

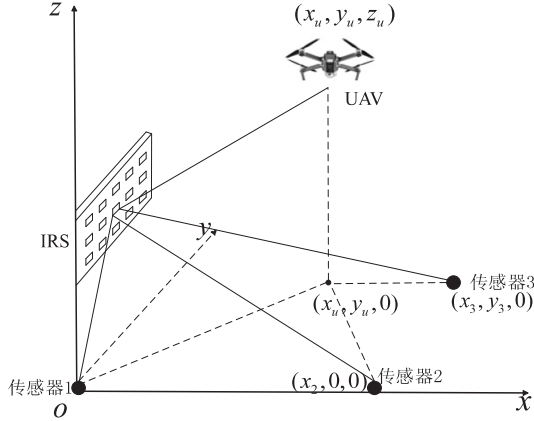


图1 静态模式下智能反射面辅助通信

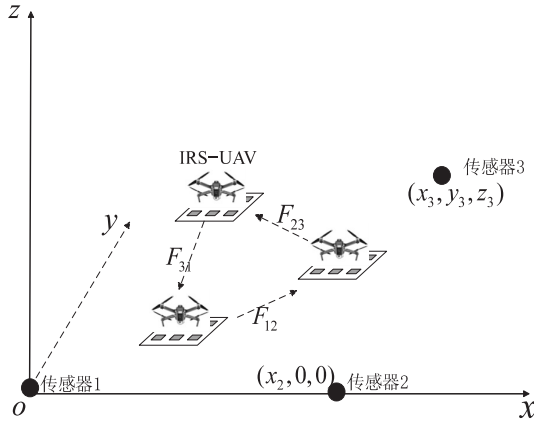


图2 巡航模式下智能反射面辅助通信

巡航模式下无人机在工作周期 T 内以特定高度 H 在地面传感器网络上空飞行以辅助无线传感器网络通信。智能反射面与无人机初始位置位于传感器1与传感器2节点中点上空,当源传感器与目标传感器需要传输数据时,智能反射面与无人机飞至源传感器与目标传感器中点上空 H 处,源传感器节点信号通过智能反射面反射给目标传感器节点。那么巡航模式下智能反射面与无人机坐标为 (x_u, y_u, H) , 传感器节点1、传感器节点2以及传感器节点3坐标与静态模式下相同。

1.2 信道模型

(1) 静态模式。

静态模式场景下,配有 M 个反射单元组成的均匀线性阵列和一个能够调节每个单元相移的智能控制器的智能反射面部署在一定高度,智能反射面中的每个单元均可以调节相移反射接收到的信号。首先对智能反射面对角相位矩阵建模,即:

$$\Theta = \text{diag}\{e^{j\theta_1}, e^{j\theta_2}, \dots, e^{j\theta_M}\} \quad (1)$$

假设相位偏移 $\{\theta_i\}$ 可以被连续控制,其中 $\theta_i \in [0, 2\pi)$, $i \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。无人机静态模式场景下智能反射面被部署在高层建筑物表面,无人机在高空悬

停,因此无人机与智能反射面间的链路可以被假定为视距信道。由于智能反射面采用均匀线性阵列,那么后续信道建模采用乘性信道模型^[16],无人机与智能反射面之间的信道增益 h_{UR} 表示如下:

$$h_{UR} = \sqrt{\rho d_{UR}^{-\alpha}} [1, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d_{UR}}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} (M-1) d_{UR}}]^T \quad (2)$$

其中, d_{UR} 表示无人机与智能反射面之间的距离, α 表示对应于无人机与智能反射面链路的相关路径损耗指数, ρ 表示单位距离 $D_0 = 1$ 下的路径损耗。上述公式左边项代表路径损耗,右边项表示 M 个元素的均匀线性阵列响应, $\varphi_{UR} = \frac{x_k - x_u}{d_{UR}}$ 代表从无人机到智能反射面的信号到达角的余弦, d 表示天线间距, λ 表示载波波长。

类似的,智能反射面与地面传感器节点之间的链路采用莱斯衰落建模,那么智能反射面与地面传感器节点之间的信道增益表示为:

$$h_{RG} = \sqrt{\rho d_{RG}^{-\alpha}} (\sqrt{\frac{\beta}{1+\beta}} h_{RG}^{\text{LOS}} + \sqrt{\frac{1}{1+\beta}} h_{RG}^{\text{NLOS}}) \quad (3)$$

其中, $d_{RG} = \sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2 + (z_k - z_i)^2}$, $i \in \{1, 2, 3\}$, 表示智能反射面与地面传感器节点之间的距离, h_{RG}^{LOS} 表示确定性视距分量,即

$$h_{RG}^{\text{LOS}} = [1, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d_{RG}}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} (M-1) d_{RG}}]^T \quad (4)$$

h_{RG}^{NLOS} 表示非确定性视距分量,智能发射面的每个元素均相互独立且服从均值为0、方差为1的圆对称复高斯分布,其中 $\varphi_{RG} = \frac{x_k - x_i}{d_{RG}}$ 表示智能反射面到地面传感器节点的信号偏离角的余弦, β 表示莱斯因子, $\theta_{RG} = \sin^{-1} \frac{z_k}{d_{RG}}$ 表示智能反射面相对于地面传感器节点的仰角, α 表示智能反射面与地面传感器节点之间通信链路相关路径损耗指数。

虽然源传感器与目标传感器节点之间的链路可能被阻塞,但是仍然存在散射信号,因此将该信道建模为瑞利衰落,其信道增益表示为:

$$h_{SD} = \sqrt{\rho d_{SD}^{-2}} \tilde{h} \quad (5)$$

其中, d_{SD} 表示源传感器节点到目标传感器节点的距离, \tilde{h} 表示由零均值和单位方差的循环对称复高斯 (Circularly Symmetric Complex Gaussian, CSCG) 随机变量建模的随机散射分量。

根据公式(1)~(5),无人机接收信噪比表示为:

$$\gamma_{SD}^s = \frac{p_u \|h_{SD} + h_{RG}^H \Theta h_{UR}\|^2}{\sigma^2} \quad (6)$$

式中, $(\cdot)^H$ 表示该矩阵或向量的厄米特矩阵, p_u 为无人机发射功率, σ^2 表示加性高斯白噪声,则静态模式下无人机系统吞吐量表示为:

$$R_s = \sum_{i=1}^3 \log_2(1 + \gamma_{SD}^i) \quad (7)$$

(2) 巡航模式。

巡航模式场景下,由于无人机飞行高度足够高,因此将源传感器节点和智能反射面以及智能反射面与目标传感器节点之间的链路均视为视距链路。因此,源传感器节点与智能反射面之间的信道增益为:

$$h_{SR} = \sqrt{\rho d_{SR}^{-\alpha}} [1, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d_{SR}}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} (M-1) d_{SR}}]^T \quad (8)$$

式中, d_{SR} 表示源传感器节点与智能反射面之间的距离, α 为源传感器节点与智能反射面之间的路径损耗指数, $\varphi_{SR} = \frac{x_k - x_i}{d_{SR}}$ 表示源传感器节点到智能反射面的信号到达角的余弦。

类似的,智能反射面到传感器节点的信道增益表示为:

$$h_{RD} = \sqrt{\rho d_{RD}^{-\alpha}} [1, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d_{RD}}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} (M-1) d_{RD}}]^T \quad (9)$$

其中, d_{RD} 表示智能反射面与目标传感器节点的距离, α 为源传感器节点与智能反射面之间的路径损耗指数, $\varphi_{RD} = \frac{x_i - x_k}{d_{RD}}$ 表示智能反射面到目标传感器节点的信号到达角余弦。

根据公式(8)和(9),巡航模式下智能反射面与无人机辅助通信信噪比可以表示为:

$$\gamma_{SD}^m = \frac{p_s |h_{SD} + h_{RD}^H \Theta h_{SR}|^2}{\sigma^2} \quad (10)$$

其中, p_s 表示源传感器节点功率。那么巡航模式下系统吞吐量表示为:

$$R_m = \sum_{i=1}^3 \log_2(1 + \gamma_{SD}^m) \quad (11)$$

1.3 经济效率

无人机辅助通信总能耗通常包含两部分:一部分是由辐射、信号处理等产生的能量消耗,另一部分是无人机为支持其机动性所需要的机械飞行能耗。根据 Zeng 等人^[17]提出的相关理论,无人机机械飞行相关功率消耗可建模为:

$$p(v_u) = p_0(1 + \frac{3v_u^2}{U_{tip}^2}) + \frac{p_i v_0}{v_u} + \frac{1}{2} d_0 \rho s A v_u^3 \quad (12)$$

其中, p_0 表示悬停状态下的叶片剖面功率, p_i 表示悬停状态下的感应功率, U_{tip} 表示叶片的叶尖速度, v_0 表示无人机向前飞行时的平均旋翼速度, d_0 和 s 分别表示无人机机身阻力比和转子坚固度, ρ 和 A 分别表示空气密度以及相关面积。

静态模式下对无人机工作周期 T 进行设计,其包括:收集智能反射面反射信号、转发数据以及传输数据采集指令。假设无人机收集智能反射面反射信号时间为 t_s , 转发数据时间为 t_f , 传输数据采集指令时间为

t_i 。由于无人机转发的数据是无人机在时间 t_s 内采集的数据,那么无人机转发数据的时间与采集数据的时间相等,即 $t_s = t_f$ 。静态模式下无人机保持悬停,其速度 $v_u = 0$,根据公式(12)获得静态模式下无人机推进功耗 $p_h = p_0 + p_i$ 。那么静态模式下无人机总能耗表示为:

$$E_s = P_c t_s + P_f t_f + P_i (T - 2t_s) + p_0 + p_i \quad (13)$$

其中, p_c 为无人机感知数据的功率, p_f 为无人机转发数据的功率, p_i 为无人机传输数据采集指令的功率。

巡航模式下由于无人机辅助无线通信系统使用智能反射面对信号进行反射,无人机并不需要对源信号进行处理以及传输,并且无人机机械飞行产生的能耗通常远高于通信能耗,那么巡航模式下无人机总能耗主要由机械飞行产生的能耗组成。假设无人机以速度 v_u 匀速飞行,单位时间内无人机机械飞行能耗为 E_{slf} 。对巡航模式下无人机工作周期进行设计,其中 t_1 为无人机经过 F_{12} 需要花费的时间, t_2 为无人机经过 F_{23} 需要的时间, t_3 为无人机经过 F_{31} 返回初始位置需要的时间。那么,巡航模式下无人机能量消耗表示为:

$$E_m = P(v_u) (\frac{F_{1,2}}{v_u} + \frac{F_{2,3}}{v_u} + \frac{F_{3,1}}{v_u}) \quad (14)$$

直观来讲,从吞吐量最大化角度来看,无人机应该在距离地面节点最近位置保持静止,以便保持最佳通信信道条件,然后飞向目标节点传送数据。然而,由于无人机自身能量有限,机械飞行产生的能耗对无人机辅助通信系统是一个挑战。因此,该文提出将无人机的经济效率作为衡量标准,衡量无人机系统吞吐量以及能量消耗。首先,根据文献[18]中经济效率相关定义,ECE 作为一个通用的度量,它考虑了成本和功耗,是一个衡量无人机吞吐量以及能耗的很好的性能指标,可以充分体现无人机吞吐量以及能耗的特点。

将 k_r 和 k_c 分别表示每比特的收入和每焦耳的能耗成本, R_{ref} 为相关数据速率, R 表示无人机系统吞吐量, E 表示无人机系统所消耗的能量,ECE 衡量系统的盈利能力,等于收入减去所提供服务的实际成本。那么 ECE 定义如下:

$$ECE = k_r R_{ref} \log_2(1 + \frac{w}{R_{ref}} R) - k_c E \quad (15)$$

2 基于智能反射面的无人机工作模式调整算法

一般来说,吞吐量以及能耗是衡量无人机通信质量的两大重要指标。静态模式下无人机由于距离地面传感器节点较远,因此对吞吐量性能会造成一定的影响。巡航模式下无人机通过机械飞行缩短了与地面传感器节点之间的距离,但是机械飞行带来了更多的能量消耗。该文的优化目标为通过设计最优的相位偏移

矩阵最大化无人机系统吞吐量以及设计无人机工作周期对无人机能耗进行优化,从而最大化无人机经济效率且无人机对工作模式进行自适应调整。

(1) 智能反射面相移优化。

根据以上优化问题,为了最大化智能反射面辅助空地无线通信系统吞吐量,设计最优的相位偏移矩阵 Φ 。为了便于后续讨论,将公式(3)的复向量 \mathbf{h}_{RG} 表示为:

$$\mathbf{h}_{\text{RG}} = [|\mathbf{h}_{\text{RG},1}| e^{jw_1}, |\mathbf{h}_{\text{RG},2}| e^{jw_2}, \dots, |\mathbf{h}_{\text{RG},M}| e^{jw_M}]^T \quad (16)$$

其中, $|\mathbf{h}_{\text{RG},i}|$ 是 \mathbf{h}_{RG} 中第 i 个元素的模, $w_i \in [0, 2\pi)$ 是 \mathbf{h}_{RG} 中第 i 个元素的相位角。根据公式(16),静态模式下信噪比 $\mathbf{h}_{\text{RG}}^H \Theta \mathbf{h}_{\text{UR}}$ 可以重写为:

$$\mathbf{h}_{\text{RG}}^H \Theta \mathbf{h}_{\text{UR}} = \frac{\sqrt{\rho} \sum_{i=1}^M |\mathbf{h}_{\text{RG},i}| e^{j(\theta_i - w_i - \frac{2\pi}{\lambda}(i-1)\varphi_{\text{UR}})}}{d_{\text{UR}}} \quad (17)$$

假设在目标传感器节点处对来自不同路径的信号进行相干地组合,则相干构成的信号便可以最大化接收信号的速率,从而最大化系统吞吐量。因此,为了最大化信号可达率,接下来对同相信号进行叠加,即:

$$\theta_1 - w_1 = \theta_2 - w_2 - \frac{2\pi}{\lambda} d \varphi_{\text{UR}} = \dots = \theta_M - w_M - \frac{2\pi}{\lambda} d(M-1)\varphi_{\text{UR}} = \arg(h) \quad (18)$$

那么智能反射面每个元素在对信号进行反射时应该调整的相位表示为:

$$\theta_i = \arg(h) + w_i + \frac{2\pi}{\lambda} d(i-1)\varphi_{\text{UR}}, \forall i \in M \quad (19)$$

有了上述闭式解之后,那么静态模式下信噪比 $\mathbf{h}_{\text{RG}}^H \Theta \mathbf{h}_{\text{UR}}$ 可以被重写为:

$$\mathbf{h}_{\text{RG}}^H \Theta \mathbf{h}_{\text{UR}} = \frac{e^{j\arg(h)} \sqrt{\rho} \sum_{i=1}^M |\mathbf{h}_{\text{RG},i}|}{d_{\text{UR}}} \quad (20)$$

此时,静态模式下智能反射面辅助空地通信系统吞吐量可以获得最大值。

巡航模式下,为了获得智能反射面辅助空地通信系统最大系统吞吐量,通过巡航模式下系统吞吐量可以看出,信道增益 $\mathbf{h}_{\text{SD}} + \mathbf{h}_{\text{RD}}^H \Theta \mathbf{h}_{\text{SR}}$ 处于主导地位,当 \mathbf{h}_{SD} 与 $\mathbf{h}_{\text{RD}}^H \Theta \mathbf{h}_{\text{SR}}$ 拥有相同相位时,巡航模式下智能反射面辅助空地通信系统可以获得最大信道增益。那么,巡航模式下智能反射面辅助空地通信系统信噪比 $\mathbf{h}_{\text{SD}} + \mathbf{h}_{\text{RD}}^H \Theta \mathbf{h}_{\text{SR}}$ 可以重写为:

$$\mathbf{h}_{\text{SD}} + \mathbf{h}_{\text{RD}}^H \Theta \mathbf{h}_{\text{SR}} = \frac{\sqrt{\rho}}{d_{\text{SD}}} h + \frac{\rho \sum_{i=1}^M e^{j(\theta_i - \frac{2\pi}{\lambda} d(\varphi_{\text{SR}} - \varphi_{\text{RD}}))}}{d_{\text{SR}}^2 d_{\text{RD}}^2} \quad (21)$$

因此,智能反射面每个元素可以获得最佳反射相位。

$$\theta_i = \arg(h) + \frac{2\pi}{\lambda} d(\varphi_{\text{SR}} - \varphi_{\text{RD}}) \quad (22)$$

此时,巡航模式下智能反射面辅助空地通信系统吞吐量可以获得最大值。

(2) 工作模式切换。

由以上分析可以最大化无人机系统吞吐量,接下来对无人机工作模式切换进行分析,巡航模式下无人机通过飞行提升无人机系统吞吐量,但也消耗了更多的能量。综合考虑无人机工作模式及其能量是否充足,设状态空间为 $I \in \{S.L, M.S, M.L\}$, 其中“S.L”表示无人机能量不充足的静态工作模式,“M.S”代表无人机能量充足的静态工作模式,“M.L”代表无人机能量不充足的巡航工作模式。

设定无人机从静态模式到巡航模式下的转移概率为 $p_m = \lambda$, 那么巡航模式到静态模式转移下的概率 $p_s = 1 - \lambda$ 。当无人机能量低于预定义的阈值 ξ 时,无人机的工作模式将切换为低电量模式,将无人机电量由充足转为不充足的转移概率记为 p , 那么无人机能量由不充足转为充足的状态转移概率为 $1 - p$ 。 $\lambda(1 - p)$ 为无人机由能量不充足的静态工作模式转移到能量充足的巡航模式下的转移概率, $(1 - \lambda)p\{\varepsilon \leq \xi\}$ 为能量充足的巡航工作模式转移到能量不充足的静态工作模式的转移概率,由图3描述无人机工作模式状态转移。

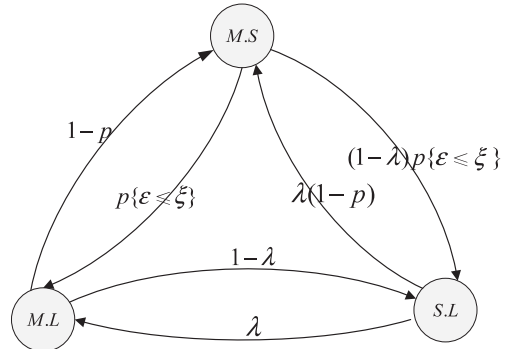


图3 无人机工作模式切换状态转移图

控制上述系统的归一化方程由下式给出:

$$\begin{cases} \pi_1 = \lambda \pi_2 + \lambda(1-p)\pi_3 \\ \pi_2 = (1-\lambda)\pi_1 + (1-p)\pi_3 \\ \pi_3 = (1-\lambda)p\pi_3 + p\pi_2 \\ \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 = 1 \end{cases} \quad (23)$$

其中, π_i 表示处于状态 i 的平稳概率, $i \in \{S.L, M.S, M.L\}$ 。对上述方程组求解,即:

$$(\pi_1, \pi_2, \pi_3) = \{C_1 a, C_1, C_1 b\} \quad (24)$$

公式(24)中无人机处于能量不充足的静态工作模式状态下 $a = \frac{\lambda - \lambda^2 + 1}{2\lambda}$, 无人机处于能量不充足的巡

航工作模式状态下 $b = \frac{p - p^2 + 1}{2p}$, 无人机处于不同工作模式下的状态概率可表示为 $C_1 = (\frac{1}{a} + 1 + \frac{1}{b})^{-1}$,

$$p = \frac{\frac{3\lambda^2 - 3\lambda - 1}{\lambda - \lambda^2 + 1} + \sqrt{\left(\frac{3\lambda^2 - 3\lambda - 1}{\lambda - \lambda^2 + 1}\right)^2 + 4\left(\frac{3\lambda^2 - 3\lambda - 1}{\lambda - \lambda^2 + 1}\right)\left(\frac{\lambda^2 - \lambda - 1}{\lambda - \lambda^2 + 1}\right)}}{2\left(\frac{3\lambda^2 - 3\lambda - 1}{\lambda - \lambda^2 + 1}\right)}$$

因此,智能反射面辅助空地通信系统吞吐量表示为:

$$R(\lambda) = R_s P_{s,l} + R_m P_{m,l} + R_m P_{m,s} = R_s \pi_1 + R_m \pi_2 + R_m \pi_3 \quad (25)$$

系统总能耗表示为:

$$E(\lambda) = E_s P_{s,l} + E_m P_{m,l} + E_m P_{m,s} = E_s \pi_1 + E_m \pi_2 + E_m \pi_3 \quad (26)$$

系统经济效率表示为:

$$ECE(\lambda) = k_r R_{\text{ref}} \log_2 \left(1 + \frac{w}{R_{\text{ref}}} R(\lambda)\right) - k_c E(\lambda) \quad (27)$$

为了更好地理解所提求解方法的思想与内涵,算法1将上述求解过程高度总结凝练如下:

算法1:基于智能反射面的无人机辅助通信工作模式调整算法

1. 输入: (x_i, y_i, z_i) , j , M , ρ , α , λ , d , β , p_u , σ^2 , p_t , p_c , p_f , T , k_r , k_u
2. 输出: $R(\lambda)$, $E(\lambda)$, $ECE(\lambda)$, λ_{opt}
3. 开始
4. 初始化地面传感器节点坐标;
5. 根据公式(12)–(14),确定无人机两种工作模式下的能量消耗;
6. 根据公式(16)–(20),确定无人机静态模式下 IRS 各个元素的最佳相移;
7. 通过 IRS 最佳相移获得静态模式下系统最大吞吐量;
8. 利用公式(21)–(22),获得无人机巡航模式下 IRS 各个元素的最佳相移;
9. 通过无人机巡航模式下 IRS 各个元素的最佳相移,获得巡航模式下系统最大吞吐量;
10. 利用基于智能反射面的无人机工作模式调整算法获得无人机每种工作模式的平稳概率;
11. 根据公式(23)和(26)获得无人机最优系统总吞吐量 $R(\lambda)^*$ 以及总能耗 $E(\lambda)^*$;
12. 将上述结果代入公式(5)–(27)计算经济效率;
13. 通过最大化无人机经济效率获得 λ_{opt} ;
14. 当 $\lambda \leq \lambda_{\text{opt}}$ 时,无人机选择静态模式下工作,否则选择巡航模式下工作;
15. 结束

3 仿真与性能描述

本节通过仿真实验来评估所提算法的有效性,并将所提出的方案与其他经典基准方案进行对比,以验证该方案的性能优势。

3.1 仿真参数设置

根据文献[18–19]相关参数设置,在本仿真环境中,设定无人机发射功率 $p_u = 10$ dBm,无人机飞行速度 $v_u = 30$ km/h,传感器节点发射功率 $p_s = 1$ W,通信带宽 $B = 1$ MHz,地面传感器节点噪声功率谱密度 $N_0 = -110$ dBm/Hz,那么相应的噪声功率 $\sigma^2 = -110$ dBm;给出传感器节点2坐标(300,0,0),传感器节点3坐标(200,150,0),静态模式下无人机悬停坐标为(191.64,81.52,100);无人机感知数据的功率为 $p_c = 4$ W,转发数据的功率为 $p_f = 4$ W,传输数据采集指令的功率为 $p_t = 5$ W;无人机工作周期 $T = 200$ s;天线间距 $d = \lambda/2$,相关路径损耗指数 $\alpha = 2.8$,莱斯因子 $\beta = 3$ dB,路径损耗系数 $\rho = -20$ dB,智能反射面反射元素数量 $M = 80$;与无人机系统经济效率相关的每比特的收入设置为 $k_r^0 = 1.55 \times 10^{-2}$ pence/bit,每焦耳的能量消耗成本设置为 $k_c^0 = 4.22 \times 10^{-5}$ pence/J。

3.2 结果分析

本节将从无人机系统吞吐量性能以及无人机经济效率等方面来验证所提算法的性能。由图4分析巡航模式下智能反射面反射元件数量从20增加到120时的智能反射面增益。

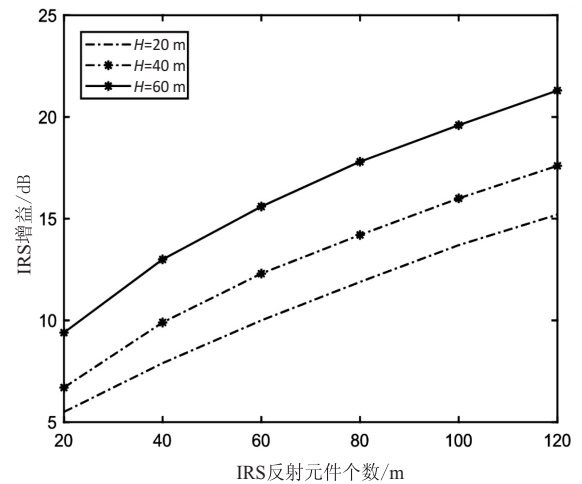


图4 智能反射面增益随着反射元件数量的变化情况

从图4可以发现,对于巡航模式下不同无人机高度,智能反射面增益随着智能反射面元件数量增加而增加。当携带智能反射面的无人机高度降低时,智能反射面增益随之降低。此外,还可以发现,当智能反射面元件数量翻倍时,智能反射面可以从源传感器节点收集更多能量,并将更多电磁波反射到目标传感器节

点,智能反射面增益与智能反射面反射元件数量成比例增加。

接下来在考虑智能反射面辅助信号传播的信道模型基础上,研究了智能反射面相关路径损耗指数变化时不同方案的无人机系统吞吐量性能,如图5所示。其中,“without IRS”表示不采用智能反射面进行辅助通信; $\theta_i = 0$;“随机相位”表示智能反射面中每个反射元件的相移是随机的。

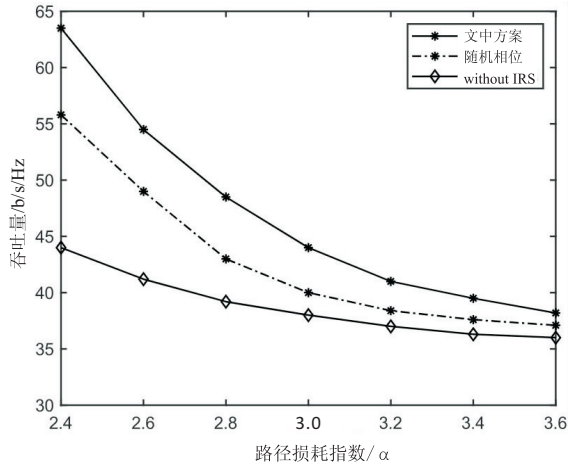


图5 吞吐量随着路径损耗指数的变化情况

从图5中可以看出,随着相关路径损耗指数的增加,所提方案以及采用随机相位方案的吞吐量随之下降。这是因为当智能反射面相关路径损耗指数变大时,智能反射面反射的信号功率随之变弱。此外,还可以看出,当智能反射面相关链路衰落非常严重时,例如 $\alpha = 4$ 时,所提方案与不采用智能反射面进行辅助通信相比性能提升差别不大。接下来的仿真实验设置相关路径损耗指数 $\alpha = 2.8$ 。

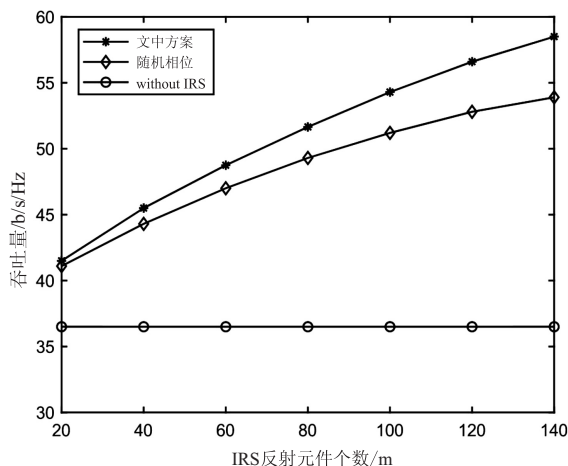


图6 吞吐量随着智能反射面元件个数的变化情况

图6展示了智能反射面辅助无人机系统吞吐量性能与智能反射面反射元件数量的关系。从图6可以发现,在没有部署智能反射面场景下,无人机系统吞吐量性能的变化可以忽略不计,而使用智能反射面辅助通信可以显著提高无人机系统吞吐量性能。此外,文中

方案与采用随机相位方案下的吞吐量性能随着智能反射面元素个数的增加而提升。与采用智能反射面随机相位进行辅助通信相比,通过优化智能反射面相移可以带来显著的性能增益。因此,可以发现使用智能反射面辅助无人机通信可以从改善信道环境方面从而提升通信质量。

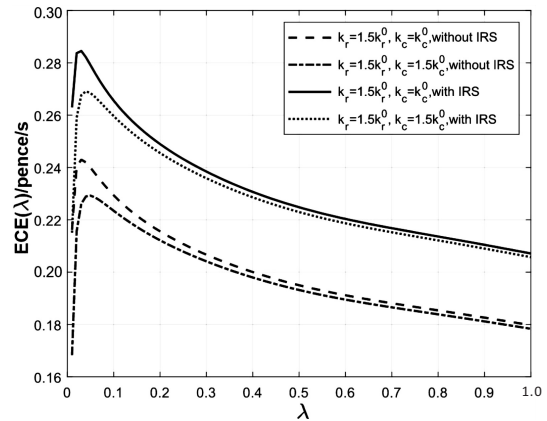


图7 无人机系统经济效率随着 λ 的变化情况

下面的仿真实验将每比特的能源成本设置为 $k_r = 1.5k_r^0$, $k_c = k_c^0$ 以及 $k_r = 1.5k_r^0$, $k_c = 1.5k_c^0$ 。由图7描述经济效率中每比特的收入 k_r 和每焦耳的能耗成本 k_c 对无人机系统性能的影响。从图中可以看出,基于智能反射面辅助的无人机系统经济效率随着 λ 增大先增大然后减小,中间存在最佳 λ_{opt} 使得无人机经济效率取得最大值。即当 $\lambda \geq \lambda_{opt}$ 时,无人机选择基于智能反射辅助的静态模式进行工作;当 $\lambda < \lambda_{opt}$ 时,无人机选择基于智能反射面的巡航模式下进行工作。当 $\lambda = 0$ 时,无人机处于静态模式下工作; $\lambda = 1$ 时,无人机处于巡航模式下工作。并且与其他方案结果相比,所提方案可以进一步提升无人机系统经济效率。

4 结束语

引入智能反射面辅助无人机与无线传感器网络通信,通过综合考虑无人机系统吞吐量以及能耗,构建了一个最大化无人机系统经济效率的问题。基于上述问题,首先,推导了无人机处于两种工作模式下智能反射面的相位偏移闭式解,实现了不同传输路径接收信号的相位对准。随后,通过综合考虑无人机能量,对无人机工作模式进行划分,然后通过基于智能反射面的无人机工作模式调整算法,获得最优经济效率,从而达到无人机工作模式自适应调整的目的。最后,经过仿真与分析,所提算法可以进一步提升无人机系统经济效率并对无人机工作模式进行调整。

参考文献:

- [1] ZENG Y, ZHANG R, LIM T J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges [J].

- IEEE Communications Magazine, 2016, 54(5):36–42.
- [2] XU D, SUN Y, NG D W K, et al. Multiuser MISO UAV communications in uncertain environments with no-fly zones: robust trajectory and resource allocation design[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(5):3153–3172.
- [3] ZENG Y, ZHANG R, LIM T J. Throughput maximization for UAV-enabled mobile relaying systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(12):4983–4996.
- [4] NEOL A B, ABDALOU A, ELFOULY T, et al. Structural health monitoring using wireless sensor networks: a comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(3):1403–1423.
- [5] KHUWAJA A, CHEN Y, ZHAO N, et al. A survey of channel modeling for UAV communications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(4):2804–2821.
- [6] 卢为党, 曹明锋, 高原, 等. 基于智能反射面辅助的无人机中继系统安全通信方法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(7):2273–2280.
- [7] 李思贤. 基于智能反射面的无人机通信研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [8] WU Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(11):5394–5409.
- [9] WU Q, ZHANG R. Towards smart and reconfigurable environment: intelligent reflecting surface aided wireless network[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(1):106–112.
- [10] ZUO J, LIU Y, QIN Z, et al. Resource allocation in intelligent reflecting surface assisted NOMA systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(11):7170–7183.
- [11] LI S, DUO B, YUAN X, et al. Reconfigurable intelligent surface assisted UAV communication: joint trajectory design and passive beamforming[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(5):716–720.
- [12] MEI H, YANG K, SHEN J, et al. Joint trajectory-task-cache optimization with phase-shift design of RIS-assisted UAV for MEC[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(7):1586–1590.
- [13] LU H, ZENG Y, JIN S, et al. Aerial intelligent reflecting surface: joint placement and passive beamforming design with 3D beam flattening[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(7):4128–4143.
- [14] TANG X, WANG D, ZHANG R, et al. Jamming mitigation via aerial reconfigurable intelligent surface: passive beamforming and deployment optimization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(6):6232–6237.
- [15] SHAFIQUE T, TABASSUM H, HOSSAIN E. Optimization of wireless relaying with flexible UAV-borne reflecting surfaces[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(1):309–325.
- [16] BASAR E, DI RENZO M, DE ROSNY J, et al. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces[J]. IEEE Access, 2019, 7:116753–116773.
- [17] ZENG Y, XU J, ZHANG R. Energy minimization for wireless communication with rotary-wing UAV[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(4):2329–2345.
- [18] PATCHARAMANEPAKORN P, WU S, WANG C X, et al. Spectral, energy, and economic efficiency of 5G multicell massive MIMO systems with generalized spatial modulation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(12):9715–9731.
- [19] LI S, DUO B, RENZO M D, et al. Robust secure UAV communications with the aid of reconfigurable intelligent surfaces[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(10):6402–6417.