

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0351

禁飞区约束的 CSTBC 无人机中继通信系统航迹优化

刘海涛*, 刘晓畅, 黄金凤, 李冬霞

(中国民航大学 天津市智能信号与图像处理重点实验室, 天津 300300)

摘要: 中继无人机的飞行路径对无人机中继通信系统的链路传输可靠性具有重要影响。为提高无人机中继通信系统链路传输的可靠性, 提出协作空时分组编码 (CSTBC) 无人机中继通信方案, 并以链路中断概率最小化准则为基础, 提出中继无人机的航迹优化方法; 理论分析给出系统遍历容量和分集增益; 为保障中继无人机飞行安全, 并获取信道的分集增益, 提出无人机禁飞区规避方法。结果表明: 协作空时分组编码无人机中继通信系统可充分获取信道的分集增益, 改善无人机中继通信系统链路传输的可靠性。

关键词: 协作通信; 无人机中继通信; 空时分组编码; 禁飞区规避; 航迹优化

中图分类号: TN925

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2024)03-0729-10

无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV) 中继通信系统是以无人机为中继节点的远距离无线通信系统^[1]。与固定无线中继通信系统相比, 无人机中继通信系统具有通信距离远、部署灵活、中继位置可控、构建迅捷、维护成本低廉等优势^[1-2]。因此, 无人机中继通信系统在军用与民用通信领域获得了广泛应用。由于中继节点部署在高速飞行的无人机中, 无人机中继通信也存在一系列特殊问题^[2], 中继无人机的航迹优化问题就是其中一个重要问题。中继无人机的航迹优化问题可表述为: 在中继无人机飞行过程中, 寻找一条最优的飞行路径, 以保障无人机中继通信链路传输的可靠性。由于中继无人机的飞行路径对无人机中继通信系统链路传输可靠性有决定性影响, 开展无人机中继通信航迹优化的研究具有重要意义。近年来, 围绕着无人机中继通信航迹优化问题, 以通信性能改善^[3-13]、保密性能改善^[14-18]、能量效率提升^[19-21]等为目的, 国内外开展了大量研究。

文献 [5] 研究了系统功率受限情况下无人机最

小信息速率最大化问题, 以及给定信息速率下总功耗最小化问题, 利用逐次凸优化方法优化无人机航迹。文献 [8] 以接收机解调器输出信噪比最大化准则为基础, 提出了中继无人机的航迹优化方法。与文献 [8] 研究问题相同, 文献 [9] 提出基于空时分组编码的无人机中继传输方案, 并以双跳链路遍历容量最大化准则为基础, 提出中继无人机的航迹优化方法。文献 [11] 研究了频率选择性衰落信道下基于直序列码分多址的无人机中继通信系统的航迹优化问题, 并基于链路中断概率最小化准则提出了中继无人机的航迹规划方法。文献 [18] 研究了无人机中继系统的保密能源效率最大化问题, 基于交替优化方法, 联合优化通信调度、功率分配和无人机航迹。文献 [19] 为延长无人机中继通信的持续时间, 提出启发式无人机协作替代方案与频谱高效无人机替代方案, 基于端到端吞吐量最大化准则优化无人机航迹与功率分配, 并利用块坐标上升与逐次凸逼近方法求解优化问题。文献 [21] 以源节点至目的节点链路中断概率最小化准则为基础, 通过

收稿日期: 2022-05-12; 录用日期: 2022-08-15; 网络出版时间: 2022-08-30 10:18

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20220829.1842.006

基金项目: 国家自然科学基金 (62172418)

*通信作者. E-mail: htliucau@qq.com

引用格式: 刘海涛, 刘晓畅, 黄金凤, 等. 禁飞区约束的 CSTBC 无人机中继通信系统航迹优化 [J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50 (3): 729-738. LIU H T, LIU X C, HUANG J F, et al. Trajectory optimization of CSTBC UAV relay communication systems with no-fly zone constraints [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50 (3): 729-738 (in Chinese).

梯度下降方法与极值原理给出了中继无人机的航迹优化方法。

在无人机中继通信航迹优化方面,尽管国内外开展了大量研究,然而相关研究^[8-9]中同一节点上的天线距离较近,导致航空信道之间具有强相关性,因此,难以有效获得信道分集增益;此外,考虑到中继无人机体积、功率受限,更适合安装单天线。基于上述原因,为提高无人机中继通信系统链路传输的可靠性,本文提出了双无人机协作空时分组编码(cooperative space-time block coding, CSTBC)中继传输方案,并提出了中继无人机的航迹优化方法。为确保航空信道相互独立,本文通过设置禁飞区实现无人机之间的距离约束,并给出了中继无人机的禁飞区规避方法。本文创新点如下:①提出了CSTBC无人机中继通信传输方案;②提出了中继无人机的航迹优化方法;③提出了中继无人机禁飞区规避方法。

1 CSTBC 无人机中继通信系统模型

1.1 系统模型

图1为CSTBC无人机中继通信系统示意图。系统由移动用户(mobile user, MU)、2架固定翼无人机(UAV1、UAV2)及固定地面基站(base station, BS)4个节点组成。假设MU与BS节点之间距离遥远,2个节点无法直接建立通信链路,可通过无人机搭载中继载荷,实现MU与BS节点间的双向通信。为提高无人机中继通信系统链路传输的可靠性,采用2架无人机协作空时编码的中继传输方案,无人机节点采用译码转发(decode and forward, DF)方式,BS节点采用相关合并接收,以提高中继链路的传输可靠性。为方便叙述,本文仅考虑MU节点至BS节点的单向链路。

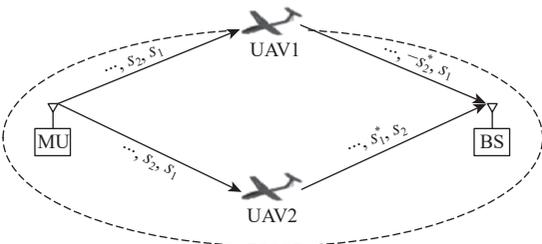


图1 协作空时分组编码无人机中继通信系统模型

Fig. 1 CSTBC UAV relay communication system model

1.2 信号模型

无人机中继通信需要4个时隙,在 T_1 与 T_2 时隙, MU节点发送复符号 s_1 与 s_2 ,且满足 $E(|s_i|^2) = 1$, $i = 1, 2$ 。 T_1 与 T_2 时隙 UAV1 和 UAV2 接收信号表示为

$$\begin{cases} r_1^{(1)} = \sqrt{P_M} h_{M,1} s_1 + n_1^{(1)} \\ r_2^{(1)} = \sqrt{P_M} h_{M,2} s_1 + n_2^{(1)} \\ r_1^{(2)} = \sqrt{P_M} h_{M,1} s_2 + n_1^{(2)} \\ r_2^{(2)} = \sqrt{P_M} h_{M,2} s_2 + n_2^{(2)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $r_j^{(i)}$ ($i = 1, 2, j = 1, 2$)为 T_i 时隙第 j 个无人机接收的信号; P_M 为MU节点发射功率; $h_{M,j}$ ($j = 1, 2$)为MU节点发射天线到第 j 个无人机接收天线的信道衰落系数; $n_j^{(i)}$ ($i = 1, 2, j = 1, 2$)为 T_i 时隙第 j 个无人机接收天线输入的均值为0、方差为 σ_j^2 的复高斯白噪声。

假设 T_1 与 T_2 时隙无人机正确接收, UAV1与UAV2协作采用空时分组编码转发 T_1 与 T_2 时隙接收的复符号。在 T_3 与 T_4 时隙, UAV1向BS节点传输复符号 s_1 与 $-s_2^*$, UAV2向BS节点传输复符号 s_2 与 s_1^* ,则BS节点接收信号表示为

$$\begin{cases} y_B^{(3)} = \sqrt{P_U} h_{1,B} s_1 + \sqrt{P_U} h_{2,B} s_2 + n_B^{(3)} \\ y_B^{(4)} = -\sqrt{P_U} h_{1,B} s_2^* + \sqrt{P_U} h_{2,B} s_1^* + n_B^{(4)} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $y_B^{(i)}$ ($i = 3, 4$)为BS节点 T_i 时隙接收的信号; P_U 为无人机节点发射的功率(假设UAV1与UAV2发射功率相同); $h_{j,B}$ ($j = 1, 2$)为第 j 个无人机发射天线到BS节点接收天线的信道衰落系数; $n_B^{(i)}$ ($i = 3, 4$)为 T_i 时隙BS节点接收天线输入的均值为0、方差为 σ_B^2 的复高斯白噪声。

假设通过信道估计,BS节点可精确知晓信道的衰落系数,则BS节点对 T_3 与 T_4 时隙接收信号进行相关合并处理^[22]得到

$$\begin{cases} \tilde{s}_1 = h_{1,B}^* y_B^{(3)} + h_{2,B} y_B^{(4)*} = \sqrt{P_U} (|h_{1,B}|^2 + |h_{2,B}|^2) s_1 + N_0 \\ \tilde{s}_2 = h_{2,B}^* y_B^{(3)} - h_{1,B} y_B^{(4)*} = \sqrt{P_U} (|h_{1,B}|^2 + |h_{2,B}|^2) s_2 + N_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中:上标“*”表示共轭运算; \tilde{s}_1 和 \tilde{s}_2 为相关合并处理后的信号; N_0 和 N_1 为噪声分量,表示为

$$\begin{cases} N_0 = h_{1,B}^* n_B^{(3)} + h_{2,B} n_B^{(4)*} \\ N_1 = h_{2,B}^* n_B^{(3)} - h_{1,B} n_B^{(4)*} \end{cases} \quad (4)$$

1.3 信道模型

在研究无人机中继通信航迹优化问题时,需要综合考虑信道小尺度衰落和大尺度衰落的影响。将MU节点至无人机、无人机至BS节点的信道建模为含路径损耗的瑞利衰落信道^[9],表示为

$$h_{M,j} = \frac{g_{M,j}}{d_{M,j}^\alpha} \quad j = 1, 2 \quad (5)$$

式中: $g_{M,j} \sim \text{CN}(0, 1)$ 为MU节点至第 j 个无人机接收天线间信道的小尺度衰落系数, $\text{CN}(0, 1)$ 表示均值为0、方差为1的复高斯分布; $d_{M,j}$ 为MU节点至

第 j 个无人机的距离; α 为路径损耗因子。

$$h_{jB} = \frac{g_{jB}}{d_{jB}^\alpha} \quad j=1,2 \quad (6)$$

式中: $g_{jB} \sim \text{CN}(0,1)$ 为第 j 个无人机至BS节点接收天线间信道的小尺度衰落系数; d_{jB} 为第 j 个无人机至BS节点的距离。

假设BS节点的坐标为 $(x_B, y_B, 0)$, t 时刻MU节点的坐标为 $(x_M(t), y_M(t), 0)$, t 时刻第 j 个无人机坐标为 $(x_j(t), y_j(t), h_j(t))$, 则 t 时刻MU节点至无人机及无人机至BS节点的距离为

$$\begin{cases} d_{M,j}(t) = \sqrt{(x_j(t) - x_M(t))^2 + (y_j(t) - y_M(t))^2 + h_j^2(t)} \\ d_{jB}(t) = \sqrt{(x_j(t) - x_B)^2 + (y_j(t) - y_B)^2 + h_j^2(t)} \\ j = 1, 2 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $h_j(t)$ 为 t 时刻第 j 个无人机的高度。

假设无人机飞行高度恒定为 h , 速度恒为 v , 则 t 时刻无人机的位置坐标可根据其 $t - \Delta t$ 时刻坐标, 并利用式(8)得到^[23]:

$$\begin{cases} x_j(t) = x_j(t - \Delta t) + v\Delta t \cos \delta_j(t) \\ y_j(t) = y_j(t - \Delta t) + v\Delta t \sin \delta_j(t) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\delta_j(t)$ 为 t 时刻第 j 个无人机的航向角, 满足 $\delta_j(t - \Delta t) - \delta_{\max} \leq \delta_j(t) \leq \delta_j(t - \Delta t) + \delta_{\max}$, δ_{\max} 为无人机的最大转弯角; Δt 为无人机位置更新的时间间隔。

将式(8)代入式(7)得

$$\begin{cases} d_{M,j}^2(t) = (x_j(t - \Delta t) + v\Delta t \cos \delta_j(t) - x_M(t))^2 + \\ (y_j(t - \Delta t) + v\Delta t \sin \delta_j(t) - y_M(t))^2 + h^2 \\ d_{jB}^2(t) = (x_j(t - \Delta t) + v\Delta t \cos \delta_j(t) - x_B)^2 + \\ (y_j(t - \Delta t) + v\Delta t \sin \delta_j(t) - y_B)^2 + h^2 \end{cases} \quad (9)$$

1.4 无人机与基站接收机解调器输入瞬时信噪比

根据式(1)和式(5), 可得到 t 时刻第 j 个无人机接收机解调器输入瞬时信噪比为

$$\gamma_{M,j} = \frac{P_M |h_{M,j}|^2}{\sigma_j^2} = \bar{r}_M |g_{M,j}|^2 d_{M,j}^{-2\alpha} \quad j=1,2 \quad (10)$$

式中: $\bar{r}_M = P_M / \sigma_j^2$ 。

根据式(3)和式(6), 可得到 t 时刻BS节点接收机解调器输入瞬时信噪比为

$$\gamma_B = \frac{P_U}{\sigma_B^2} (|h_{1,B}|^2 + |h_{2,B}|^2) = \bar{r}_U |g_{1,B}|^2 d_{1,B}^{-2\alpha} + \bar{r}_U |g_{2,B}|^2 d_{2,B}^{-2\alpha} = \gamma_{1,B} + \gamma_{2,B} \quad (11)$$

式中: $\bar{r}_U = P_U / \sigma_B^2$; $\gamma_{jB} = \bar{r}_U |g_{jB}|^2 d_{jB}^{-2\alpha}$ 。

式(10)和式(11)表明, 无人机与BS节点接收机解调器输入瞬时信噪比由MU-UAV链路及UAV-BS链路的大尺度损耗($d_{M,j}, d_{jB}$)和小尺度衰落($g_{M,j}, g_{jB}$)共同确定。

2 中继无人机的航迹优化方法

2.1 链路中断概率

中断概率是衡量无线通信系统链路传输可靠性的重要技术指标, 其定义为接收机解调器输入信噪比低于门限 γ_T 的概率。 t 时刻系统中中断概率 p_{out} 表示为

$$p_{out} = 1 - (1 - p_{M,1}) (1 - p_{M,2}) (1 - p_B) - (1 - p_{M,1}) p_{M,2} (1 - p_{1,B}) - p_{M,1} (1 - p_{M,2}) (1 - p_{2,B}) \quad (12)$$

式中: $p_{M,1}$ 和 $p_{M,2}$ 分别为MU-UAV1和MU-UAV2链路的中断概率; p_B 为UAV1-BS与UAV2-BS链路相关合并的中断概率; $p_{1,B}$ 和 $p_{2,B}$ 分别为UAV1-BS与UAV2-BS链路的中断概率。

MU节点至第 j 个无人机链路的中断概率 $p_{M,j}$ 可表示为

$$p_{M,j} = \Pr \{ \gamma_{M,j} < \gamma_T \} = \int_0^{\gamma_T} f_{M,j}(x) dx \quad (13)$$

式中: $f_{M,j}(x)$ 为第 j 个无人机接收机解调器输入瞬时信噪比 $\gamma_{M,j}$ 的概率密度函数。

由式(10)可知, $g_{M,j}$ 服从均值为0、方差为1的复高斯分布, 因此, $|g_{M,j}|^2$ 服从参数为1的指数分布, $\gamma_{M,j}$ 服从参数为 $\bar{r}_M^{-1} d_{M,j}^{-2\alpha}$ 的指数分布, $f_{M,j}(x)$ 表示为

$$f_{M,j}(x) = \begin{cases} \frac{1}{\bar{r}_M d_{M,j}^{-2\alpha}} \exp\left(-\frac{x}{\bar{r}_M d_{M,j}^{-2\alpha}}\right) & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (14)$$

将式(14)代入式(13), $p_{M,j}$ 表示为

$$p_{M,j} = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma_T}{\bar{r}_M d_{M,j}^{-2\alpha}}\right) \quad (15)$$

2个无人机至BS节点的链路中断概率 p_B 表示为

$$p_B = \Pr \{ \gamma_B < \gamma_T \} = \int_0^{\gamma_T} f_B(x) dx \quad (16)$$

式中: $f_B(x)$ 为BS节点接收机解调器输入瞬时信噪比 γ_B 的概率密度函数。

由式(11)可知, g_{jB} 服从均值为0、方差为1的复高斯分布, 因此, $|g_{jB}|^2$ 服从参数为1的指数分布, γ_{jB} 服从参数为 $\bar{r}_U^{-1} d_{jB}^{-2\alpha}$ 的指数分布, γ_B 为 $\gamma_{1,B}$ 与 $\gamma_{2,B}$ 两指数分布的和。

当 $d_{1,B} \neq d_{2,B}$ 时, γ_B 可表示为不同参数的指数分布之和, 根据附录A的推导, γ_B 的概率密度函数表示为

$$f_B(x) = \begin{cases} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} [\exp(-\lambda_2 x) - \exp(-\lambda_1 x)] & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\lambda_1 = \bar{r}_U^{-1} d_{1,B}^{2\alpha}$; $\lambda_2 = \bar{r}_U^{-1} d_{2,B}^{2\alpha}$ 。

将式(17)代入式(16), p_B 表示为

$$p_B = 1 + \frac{d_{2,B}^{2\alpha}}{d_{1,B}^{2\alpha} - d_{2,B}^{2\alpha}} \exp\left(-\frac{d_{1,B}^{2\alpha} \gamma_T}{\bar{r}_U}\right) - \frac{d_{1,B}^{2\alpha}}{d_{1,B}^{2\alpha} - d_{2,B}^{2\alpha}} \exp\left(-\frac{d_{2,B}^{2\alpha} \gamma_T}{\bar{r}_U}\right) \quad (18)$$

当 $d_{1,B} = d_{2,B} = d_B$ 时, γ_B 可表示成参数为 $\lambda = \bar{r}_U^{-1} d_B^{2\alpha}$ 的两指数分布之和, 即参数为 2 的伽马分布, 此时 γ_B 的概率密度函数为

$$f_B(x) = \lambda^2 x \exp(-\lambda x) \quad (19)$$

将式(19)代入式(18), p_B 表示为

$$p_B = 1 - \left(\frac{d_B^{2\alpha} \gamma_T}{\bar{r}_U} + 1\right) \exp\left(-\frac{d_B^{2\alpha} \gamma_T}{\bar{r}_U}\right) \quad (20)$$

第 j 个无人机至 BS 节点的链路中断概率 $p_{j,B}$ 可表示为

$$p_{j,B} = \Pr\{\gamma_{j,B} < \gamma_T\} = \int_0^{\gamma_T} f_{j,B}(x) dx \quad (21)$$

式中: $f_{j,B}(x)$ 为第 j 个无人机至 BS 节点链路接收机解调器输入瞬时信噪比 $\gamma_{j,B}$ 的概率密度函数。

考虑到 $\gamma_{j,B}$ 服从参数为 $\bar{r}_U^{-1} d_{j,B}^{2\alpha}$ 的指数分布, $f_{j,B}(x)$ 表示为

$$f_{j,B}(x) = \begin{cases} \frac{1}{\bar{r}_U d_{j,B}^{2\alpha}} \exp\left(-\frac{x}{\bar{r}_U d_{j,B}^{2\alpha}}\right) & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (22)$$

将式(22)代入式(21), $p_{j,B}$ 可表示为

$$p_{j,B} = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma_T}{\bar{r}_U d_{j,B}^{2\alpha}}\right) \quad (23)$$

将式(15)、式(18)、式(20)与式(23)代入式(12), p_{out} 可表示为

$$P_{out} = 1 - p_1 - p_2 - p_3 \quad (24)$$

式中:

$$\begin{cases} p_1 = \exp\left(-\frac{d_{M,1}^{2\alpha} + d_{M,2}^{2\alpha}}{\bar{r}_M} \gamma_T\right) (1 - p_B) \\ p_2 = \exp\left(-\frac{d_{M,1}^{2\alpha}}{\bar{r}_M} \gamma_T - \frac{d_{1,B}^{2\alpha}}{\bar{r}_U} \gamma_T\right) - \exp\left(-\frac{d_{M,1}^{2\alpha} + d_{M,2}^{2\alpha}}{\bar{r}_M} \gamma_T - \frac{d_{1,B}^{2\alpha}}{\bar{r}_U} \gamma_T\right) \\ p_3 = \exp\left(-\frac{d_{M,2}^{2\alpha}}{\bar{r}_M} \gamma_T - \frac{d_{2,B}^{2\alpha}}{\bar{r}_U} \gamma_T\right) - \exp\left(-\frac{d_{M,1}^{2\alpha} + d_{M,2}^{2\alpha}}{\bar{r}_M} \gamma_T - \frac{d_{2,B}^{2\alpha}}{\bar{r}_U} \gamma_T\right) \end{cases} \quad (25)$$

式(24)表明, 中断门限 γ_T 给定情况下, 影响链路中断概率的主要因素是信道大尺度衰落和解调器输入的平均信噪比。

2.2 基于中断概率最小化准则的航迹优化方法

由式(24)可知, 在中断门限 γ_T 给定情况下, 系统中断概率主要由信道大尺度衰落决定。假设在 $t - \Delta t$ 时刻无人机位置给定情况下, 由式(9)可知,

t 时刻信道大尺度衰落由 UAV1 和 UAV2 的航向角 $\delta_1(t)$ 与 $\delta_2(t)$ 决定。因此, 可通过优化 t 时刻 UAV1 和 UAV2 的航向角, 使得系统链路中断概率最小化:

$$\begin{cases} \{\delta_1^{\text{opt}}(t), \delta_2^{\text{opt}}(t)\} = \arg \min_{\delta_1(t), \delta_2(t)} p_{out} \\ \text{s.t.} \quad \begin{cases} |\delta_1(t) - \delta_1(t - \Delta t)| \leq \delta_{\max} \\ |\delta_2(t) - \delta_2(t - \Delta t)| \leq \delta_{\max} \end{cases} \end{cases} \quad (26)$$

式中: $\delta_1^{\text{opt}}(t)$ 和 $\delta_2^{\text{opt}}(t)$ 分别为 t 时刻 UAV1 和 UAV2 的最佳航向角。

式(26)描述的问题是含有边界约束的二维非线性最优化问题。由式(24)可知, p_{out} 是关于 $d_{M,1}$ 、 $d_{M,2}$ 、 $d_{1,B}$ 、 $d_{2,B}$ 的四元函数, 其中, $d_{M,1}$ 与 $d_{1,B}$ 为 $\delta_1(t)$ 的函数, $d_{M,2}$ 与 $d_{2,B}$ 为 $\delta_2(t)$ 的函数, 且 $\delta_1(t)$ 与 $\delta_2(t)$ 相互独立。因此, 以上问题可转换为 2 个含有边界约束的一维非线性最优化问题:

$$\begin{cases} \delta_1^{\text{opt}}(t) = \arg \min_{\delta_1(t)} p_{out} \\ \text{s.t.} \quad |\delta_1(t) - \delta_1(t - \Delta t)| \leq \delta_{\max} \\ \delta_2^{\text{opt}}(t) = \arg \min_{\delta_2(t)} p_{out} \\ \text{s.t.} \quad |\delta_2(t) - \delta_2(t - \Delta t)| \leq \delta_{\max} \end{cases} \quad (27)$$

针对以上问题, 可使用线性搜索法解决, 即首先优化 $\delta_1(t)$, 其次优化 $\delta_2(t)$, 该方法称为分步优化法。

3 无人机中继通信性能

3.1 遍历容量

遍历容量是衡量无线通信系统的一个重要技术指标, 下面分析给出 CSTBC 无人机中继通信系统的遍历容量。首先, 计算单跳链路的瞬时信息速率, MU-UAV 链路的瞬时信息速率^[24]为

$$\begin{aligned} R_M &= \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_{M,1}) + \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_{M,2}) = \\ &= \frac{1}{2} \log_2(1 + \bar{r}_M |g_{M,1}|^2 d_{M,1}^{-2\alpha}) + \\ &= \frac{1}{2} \log_2(1 + \bar{r}_M |g_{M,2}|^2 d_{M,2}^{-2\alpha}) \end{aligned} \quad (28)$$

UAV-BS 链路的瞬时信息速率为

$$\begin{aligned} R_B &= \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_B) = \\ &= \frac{1}{2} \log_2(1 + \bar{r}_U |g_{1,B}|^2 d_{1,B}^{-2\alpha} + \bar{r}_U |g_{2,B}|^2 d_{2,B}^{-2\alpha}) \end{aligned} \quad (29)$$

对于译码转发通信系统, 系统遍历容量取决于两跳链路中遍历容量较小的一跳^[24]。

$$C = \min(E_{g_{M,1}, g_{M,2}}(R_M), E_{g_{1,B}, g_{2,B}}(R_B)) \quad (30)$$

根据附录 B 推导, 系统的遍历容量最终表示为

$$\begin{cases} C = \begin{cases} \frac{1}{2\ln 2} \min(C_1, C_2) & d_{1,B} \neq d_{2,B} \\ \frac{1}{2\ln 2} \min(C_1, C_3) & d_{1,B} = d_{2,B} = d_B \end{cases} \\ C_1 = -\exp\left(\frac{d_{M,1}^{2\alpha}}{\bar{r}_M}\right) E_1\left(-\frac{d_{M,1}^{2\alpha}}{\bar{r}_M}\right) - \\ \exp\left(\frac{d_{M,2}^{2\alpha}}{\bar{r}_M}\right) E_1\left(-\frac{d_{M,2}^{2\alpha}}{\bar{r}_M}\right) \\ C_2 = \frac{\bar{r}_U}{d_{1,B}^{2\alpha} - d_{2,B}^{2\alpha}} \left[\frac{d_{2,B}^{2\alpha}}{\bar{r}_U} E_1\left(-\frac{d_{1,B}^{2\alpha}}{\bar{r}_U}\right) \exp\left(\frac{d_{1,B}^{2\alpha}}{\bar{r}_U}\right) - \right. \\ \left. \frac{d_{1,B}^{2\alpha}}{\bar{r}_U} E_1\left(-\frac{d_{2,B}^{2\alpha}}{\bar{r}_U}\right) \exp\left(\frac{d_{2,B}^{2\alpha}}{\bar{r}_U}\right) \right] \\ C_3 = \left(\frac{d_B^{2\alpha}}{\bar{r}_U} - 1\right) E_1\left(-\frac{d_B^{2\alpha}}{\bar{r}_U}\right) \exp\left(\frac{d_B^{2\alpha}}{\bar{r}_U}\right) + 1 \end{cases} \quad (31)$$

式 (31) 表明, 系统遍历容量决定于信道大尺度衰落和解调器输入平均信噪比。

3.2 分集增益

本节分析 CSTBC 无人机中继通信系统的分集增益性能, 并与单无人机中继通信系统的分集增益性能进行比较。为方便分析, 假设 MU 节点与无人机距离及无人机与 BS 节点距离均为 d , 且接收机解调器输入平均信噪比充分大, 此时, 式 (24) 给出的中断概率 p_{out} 化简为

$$\begin{aligned} p_{out} &\approx \frac{d_B^{4\alpha}}{\bar{r}_U} \gamma_T^2 + \frac{d_{M,2}^{2\alpha} d_B^{2\alpha}}{\bar{r}_U \bar{r}_M} \gamma_T^2 + \frac{d_{M,1}^{2\alpha} d_B^{2\alpha}}{\bar{r}_U \bar{r}_M} \gamma_T^2 = \\ &\frac{d^{4\alpha}}{\bar{r}_U^2} \gamma_T^2 + \frac{d^{4\alpha}}{\bar{r}_U \bar{r}_M} \gamma_T^2 + \frac{d^{4\alpha}}{\bar{r}_U \bar{r}_M} \gamma_T^2 \end{aligned} \quad (32)$$

由于 $\bar{r}_M = 2\bar{r}_U$, 式 (32) 最终可表示为

$$p_{out} = \frac{d^{4\alpha}}{\bar{r}_U^2} \gamma_T^2 + \frac{d^{4\alpha}}{2\bar{r}_U^2} \gamma_T^2 + \frac{d^{4\alpha}}{2\bar{r}_U^2} \gamma_T^2 = k_1 \bar{r}_U^{-2} \quad (33)$$

式中: $k_1 = 2d^{4\alpha} \gamma_T^2$ 。

式 (33) 表明, CSTBC 无人机中继通信系统可获得二重分集增益。

单无人机中继通信系统链路的中断概率为

$$p_{out_SISO} = 1 - (1 - P_{MU})(1 - P_{UB}) \quad (34)$$

式中: p_{MU} 为 MU-UAV 链路的中断概率; p_{UB} 为 UAV-BS 链路的中断概率。

利用相同的假设, p_{out_SISO} 可化简为

$$\begin{aligned} p_{out_SISO} &= 1 - \exp\left(-\frac{d_{MU}^{2\alpha}}{2\bar{r}_U} \gamma_T\right) \exp\left(-\frac{d_{UB}^{2\alpha}}{2\bar{r}_U} \gamma_T\right) \approx \\ &\frac{d_{MU}^{2\alpha}}{2\bar{r}_U} \gamma_T + \frac{d_{UB}^{2\alpha}}{2\bar{r}_U} \gamma_T = k_2 \bar{r}_U^{-1} \end{aligned} \quad (35)$$

式中: $k_2 = d^{2\alpha} \gamma_T$; d_{MU} 为 MU 节点与 UAV 之间的距离; d_{UB} 为 UAV 与 BS 节点之间的距离。

式 (35) 表明, 单无人机中继通信系统可获得一重分集增益。式 (33) 和式 (35) 比较表明, CSTBC 无人机中继通信系统可充分获取信道的分集增益, 链路性能显著优于单无人机中继通信系统。

4 禁飞区规避方法

4.1 禁飞区模型

为保障 2 架协作中继无人机的飞行安全, 同时获得系统的分集增益性能, 设置如图 2 所示的禁飞区。图中: MU 与 BS 节点连线方向为 x 轴, 垂直方向为 y 轴, 禁飞区在地面投影为矩形区域 $[-\infty < x < +\infty, y_1 < y < y_u]$; 为避免无人机进入禁飞区, 在禁飞区外侧设置规避区, 规避区在地面投影为: $[-\infty < x < +\infty, y_1 - r < y < y_1] \cup [-\infty < x < +\infty, y_u < y < y_u + r]$, 其中, r 为无人机最小盘旋半径 (见图 3)。

图 3 为无人机盘旋飞行航迹。 $t - \Delta t$ 时刻, 无人机位于 a 点, 经过 Δt 时刻的飞行, 运动至 b 点, 由图 3 观察到, 无人机盘旋的航迹可近似视为一个圆。假设无人机飞行速度为 v , 最大转弯角为 δ_{max} , 则在 Δt 时间内, 无人机飞行距离 $ab = v\Delta t$ 可视为圆的弦, 其对应的圆心角为最大转弯角 δ_{max} 。根据弦与圆心角的几何关系可知, 无人机的最小盘旋半径为

$$r = \frac{v\Delta t}{2\sin(\delta_{max}/2)} \quad (36)$$

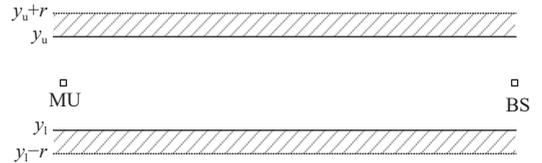


图 2 禁飞区模型
Fig. 2 No-fly zone model

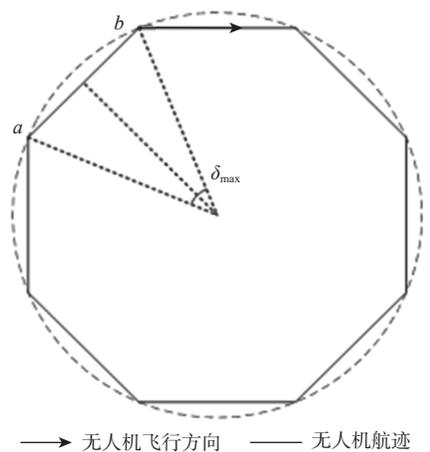


图 3 无人机盘旋飞行航迹与最小盘旋半径

Fig. 3 UAV hovering trajectory and minimum hovering radius

4.2 禁飞区规避方法步骤

图 4 为无人机规避禁飞区的示意图。图中: A 点、 C 点位于禁飞区边界, B 点、 D 点位于规避区边界。UAV1 由上方向 A 点飞行 (飞行方向垂直于 x 轴), 当 UAV1 飞行至 B 点时, UAV1 暂停航迹优

化并进行规避飞行,以最大转弯角向任意一侧转弯飞行,直至 UAV1 离开规避区; UAV2 由下方向 C 点飞行,当 UAV2 飞行至 D 点时, UAV2 暂停航迹优化并进行规避飞行,以最大转弯角向飞行方向与 x 轴夹角呈锐角一侧转弯,直至 UAV2 离开规避区;当无人机离开规避区后,恢复航迹优化。在无人机规避禁飞区时,可能出现如图 5 所示的蛇形飞行航迹。

图 5 为特殊情况下无人机规避禁飞区所形成的蛇形航迹。无人机由下方向 A 点飞行,飞行至 B 点时,暂停航迹优化,并进行规避飞行,飞行至 C 点(规避区边界外),恢复航迹优化,按照航迹优化方法的引导,飞行至 D 点,再次暂停航迹优化,并进行禁飞区规避飞行,最终形成如图 5 所示的蛇形航迹。

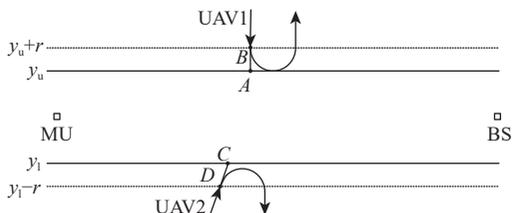


图 4 无人机规避禁飞区的示意图

Fig. 4 Diagram of UAV avoiding no-fly zone

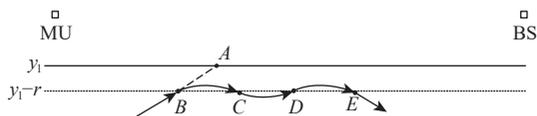


图 5 无人机规避禁飞区形成的蛇形航迹

Fig. 5 A snake-like track formed by UAV avoiding no-fly zone

以上情况将导致无人机偏离最优中继位置,不利于链路可靠性的提高,原因是无人机恢复航迹优化的时机不恰当。为克服该问题,规定无人机恢复航迹优化的前提条件为:①无人机离开规避区;②无人机飞行方向垂直于规避区的 x 轴。

综上所述,禁飞区规避方法步骤如下:

步骤 1 检查无人机是否进入规避区,如果进入规避区,则执行步骤 2; 否则执行步骤 1。

步骤 2 暂停航迹优化,以最大转弯角向无人机飞行方向与水平方向夹角呈锐角一侧转弯(若夹角为直角可向任意一侧转弯),并记录转弯方向,执行步骤 3。

步骤 3 检测无人机航向是否可转弯至 90° (无人机位于禁飞区上侧)或 -90° (无人机位于禁飞区下侧),若是则执行步骤 5, 否则执行步骤 4。

步骤 4 向步骤 2 中记录的转弯方向以最大转弯角转弯,执行步骤 3。

步骤 5 将无人机航向转弯至 90° 或 -90° ,执行

步骤 6。

步骤 6 开始航迹优化,执行步骤 1。

5 数值仿真

5.1 仿真参数

为验证本文方案的正确性,基于 MATLAB 构建 CSTBC 无人机中继通信仿真系统。仿真系统由 MU、UAV1、UAV2、BS 等 4 个节点组成,表 1 给出了仿真系统的主要技术参数。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameter setting

参数	数值
MU节点的初始位置坐标/m	(500,2 500,0)
UAV1节点的初始位置坐标/m	(1 000,4 000,350)
UAV2节点的初始位置坐标/m	(1 000,1 000,350)
BS节点的初始位置坐标/m	(4 500,2 500,0)
MU节点的移动速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	10
无人机的飞行速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	30
禁飞区范围(y 轴)/m	2 000~3 000
仿真时间/s	300
位置更新时间间隔 Δt /s	1
路径损耗因子 α	2.0
MU节点发射功率/dB	150
无人机转发功率/dB	147
中断门限/dB	5

5.2 仿真结果

图 6 为分步优化法与穷举搜索法下中继无人机的飞行航迹。航迹比较表明,分步优化法与穷举搜索法得到的无人机飞行航迹完全一致,验证了本文航迹优化方法的正确性。

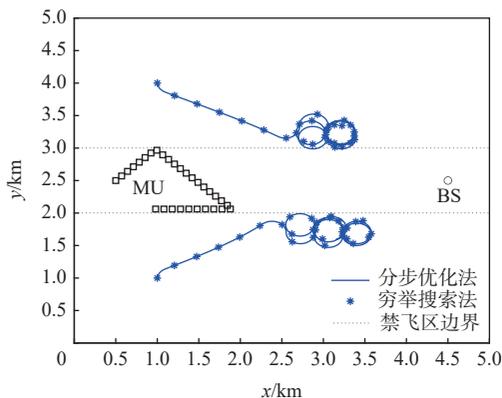


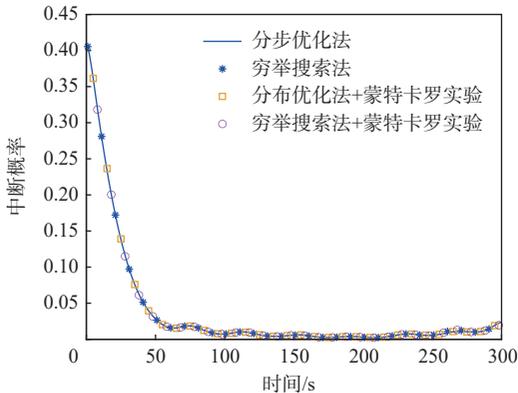
图 6 不同方法下中继无人机的飞行航迹

Fig. 6 Flight track of relay UAV under different methods

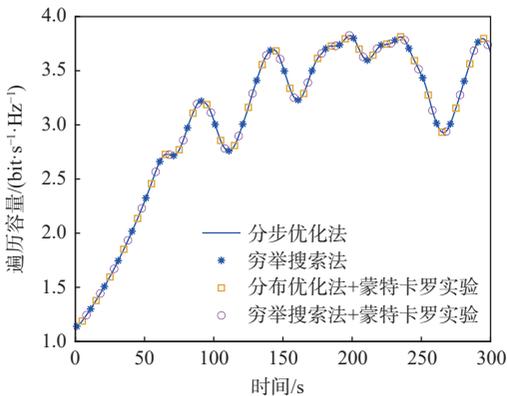
图 7 为分步优化法与穷举搜索法下系统中断概率和遍历容量。比较表明,分步优化法获得的中断概率与遍历容量与穷举搜索法完全一致,且理论

公式与蒙特卡罗方法获得的性能完全一致。

图 8 为 CSTBC 无人机中继通信系统与单无人机中继通信系统(SISO)的飞行航迹。为公平比较 2 种方案的性能, CSTBC 方案中, 无人机发射功率是 SISO 方案的一半, 且 SISO 方案中无人机不存在禁飞区约束; 此外, 为便于观察, 将 MU 节点固定设置。仿真结果表明, CSTBC 方案中, 无人机航迹始终位于禁飞区以外, SISO 方案中, 无人机飞行航迹则位于禁飞区内。



(a) 中断概率



(b) 遍历容量

图 7 不同方法下中断概率与遍历容量

Fig. 7 Interruption probability and ergodic capacity under different methods

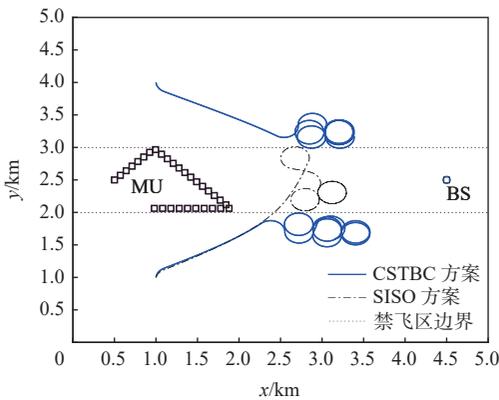


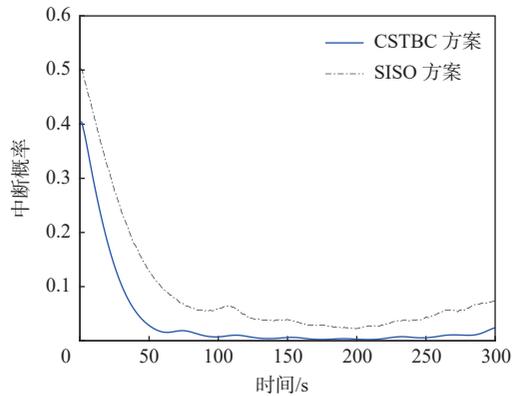
图 8 不同方案下中继无人机的飞行航迹

Fig. 8 Flight track of relay UAV under different plans

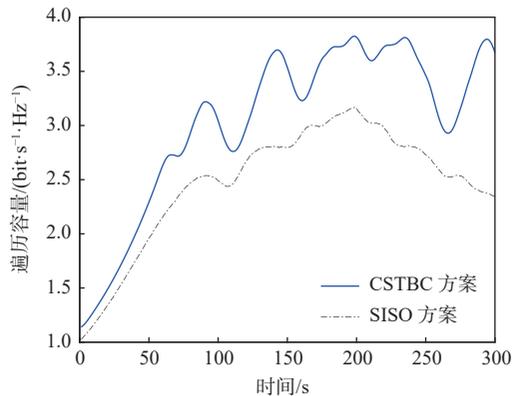
图 9 为 CSTBC 方案与 SISO 方案下系统中断概率与遍历容量。比较表明, 与 SISO 方案相比, CSTBC 方案具有更低链路中断概率和更高遍历容量。

图 10 为路径损耗因子 α 为 2 和 2.2 时对无人机航迹的影响。比较表明: ①不同路径损耗因子情况下, 本文方法均可获得稳定飞行航迹; ②路径损耗因子增大, 无人机航迹没有明显变化。

图 11 为路径损耗因子为 2 与 2.2 时对中断概



(a) 中断概率



(b) 遍历容量

图 9 不同方案下中断概率与遍历容量

Fig. 9 Interruption probability and ergodic capacity under different plans

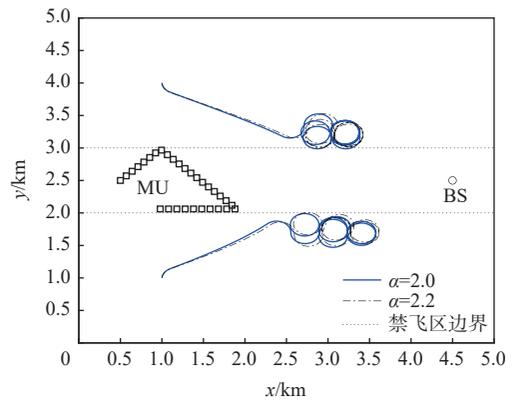
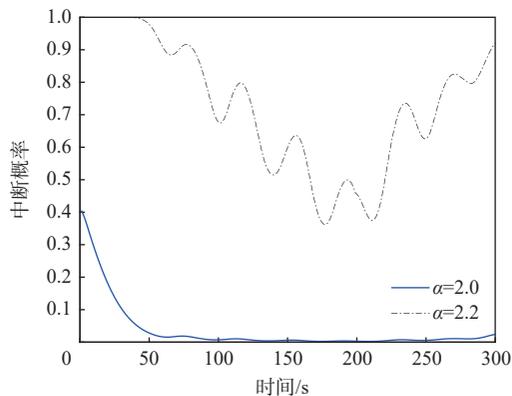
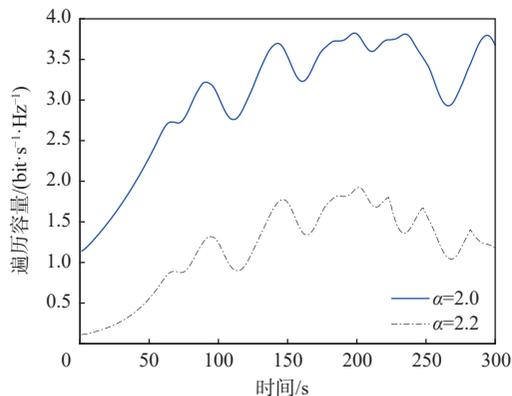


图 10 不同路径损耗因子对无人机航迹的影响

Fig. 10 Influence of path loss factor on UAV track



(a) 中断概率



(b) 遍历容量

图 11 不同路径损耗因子时的中断概率与遍历容量

Fig. 11 Interruption probability and ergodic capacity under different path loss factors

率与遍历容量的影响。比较表明,随着路径损耗因子的增加,链路中断概率增加,遍历容量降低。

6 结论

1) 针对无人机中继通信系统信道相关性强、难以获取分集增益的问题,为提高无人机中继通信系统链路传输的可靠性,本文提出了协作空时分组编码无人机中继通信方案。

2) 本文基于链路中断概率最小化准则提出中继无人机的航迹优化方法,并定量分析了系统遍历容量和分集增益性能;设置禁飞区以确保无人机之间的距离约束,并给出禁飞区规避方法;通过仿真验证了本文方法的正确性和有效性。

3) 协作空时分组编码无人机中继通信系统可有效获得信道分集增益,显著提高链路传输的可靠性,为其他无人机协作通信研究提供参考,为后续进一步完善无人机协作通信方案与航迹优化方法、优化距离约束方法奠定基础。

参考文献 (References)

[1] SAAD W, BENNIS M, MOZAFFARI M, et al. Wireless commu-

nications and networking for unmanned aerial vehicles [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2020.

[2] MOZAFFARI M, SAAD W, BENNIS M, et al. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(3): 2334-2360.

[3] SONG Q, ZHENG F C, ZENG Y, et al. Joint beamforming and power allocation for UAV-enabled full-duplex relay[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(2): 1657-1671.

[4] LI B, ZHANG R, YANG L. Joint user scheduling and UAV trajectory optimization for full-duplex UAV relaying[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2021: 21175405.

[5] JIANG X, WU Z, YIN Z, et al. Joint power and trajectory design for UAV-relayed wireless systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(3): 697-700.

[6] MA D, FENG Z, QIN Y. Optimization of throughput maximization of UAV as mobile relay communication system[C]//Proceedings of the International Conference on Virtual Reality and Intelligent Systems. Piscataway: IEEE Press, 2020: 21231307.

[7] ZHOU L, ZHAO X, GUAN X, et al. Robust trajectory planning for UAV communication systems in the presence of jammers[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(10): 265-274.

[8] JIAN O, YI Z, MIN L, et al. Optimization of beamforming and path planning for UAV-assisted wireless relay networks[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014, 27(2): 313-320.

[9] 刘海涛, 赵文强, 李春鸣, 等. 空时分组编码的无人机中继通信航迹规划方法[J]. 航空学报, 2017, 38(9): 279-288.

LIU H T, ZHAO W Q, LI C M, et al. Path planning method for UAV relay communication system with space-time block coding[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(9): 279-288(in Chinese).

[10] CHEN Q. Joint trajectory and resource optimization for UAV-enabled relaying systems[J]. IEEE Access, 2020, 8: 24108-24119.

[11] 刘海涛, 顾新宇, 方晓钰, 等. 频率选择性衰落信道 DS-CDMA 无人机中继通信系统航迹规划[J]. 航空学报, 2019, 40(7): 149-158.

LIU H T, GU X Y, FANG X Y, et al. Path planning for UAV relay communication systems with DS-CDMA over frequency selective fading channel[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(7): 149-158(in Chinese).

[12] CHEN Y, ZHAO N, DING Z, et al. Multiple UAVs as relays: Multi-hop single link versus multiple dual-hop links[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(9): 6348-6359.

[13] 李冬霞, 李春鸣, 赵文强, 等. 无人机中继广播通信系统航迹优化方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2018, 45(3): 160-166.

LI D X, LI C M, ZHAO W Q, et al. Trajectory optimization method for UAV relaying broadcast communication system[J]. Journal of Xidian University, 2018, 45(3): 160-166(in Chinese).

[14] ZHANG G C, WU Q Q, CUI M, et al. Securing UAV communications via trajectory optimization[C]//Proceedings of the IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.

[15] SUN X F, SHEN C, CHANG T H, et al. Joint resource allocation and trajectory design for UAV-aided wireless physical layer security

[C]/Proceedings of the IEEE Globecom Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.

- [16] WANG Q, CHEN Z, LI H, et al. Joint power and trajectory design for physical-layer secrecy in the UAV-aided mobile relaying system[J]. IEEE Access, 2018, 6: 62849-62855.
- [17] DONG R, WANG B, CAO K. Security enhancement of UAV swarm enabled relaying systems with joint beamforming and resource allocation[J]. China Communications, 2021, 18(9): 71-87.
- [18] XIAO L, XU Y, YANG D, et al. Secrecy energy efficiency maximization for UAV-enabled mobile relaying[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2020, 4(1): 180-193.
- [19] ZHANG G, OU X, CUI M, et al. Cooperative UAV enabled relaying systems: Joint trajectory and transmit power optimization[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2022, 6(1): 543-557.
- [20] LI Z. Trajectory optimization for UAV-enabled amplify-and-forward relaying system based on communication performance[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications. Piscataway: IEEE Press, 2020: 19913516.
- [21] ZHANG G, YAN H, ZENG Y, et al. Trajectory optimization and power allocation for multi-hop UAV relaying communications[J]. IEEE Access, 2018, 6: 48566-48576.
- [22] ALAMOUTI S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, 16(8): 1451-1458.
- [23] DUBINS L E. On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents[J]. American Journal of Mathematics, 1957, 79(3): 497-516.
- [24] RUI X. Capacity analysis of decode-and-forward protocol with partial relay selection[C]//Proceedings of the International Conference on Wireless Communications & Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2010: 11652227.

附录 A

设 $X \sim E(\lambda_1), Y \sim E(\lambda_2), Z = X + Y$, 其中, X 与 Y 相互独立, $\lambda_1 \neq \lambda_2, \lambda_1, \lambda_2 > 0$, 则 X 与 Y 的概率密度函数为

$$f_X(x) = \begin{cases} \lambda_1 e^{-\lambda_1 x} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (A1)$$

$$f_Y(y) = \begin{cases} \lambda_2 e^{-\lambda_2 y} & y > 0 \\ 0 & y \leq 0 \end{cases} \quad (A2)$$

由于 X 与 Y 统计独立, X 与 Y 的联合概率密度函数为

$$f(x, y) = f_X(x) f_Y(y) \quad (A3)$$

$Z = X + Y$ 的概率密度函数为

$$f_Z(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, z-x) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} f_X(x) f_Y(z-x) dx \quad (A4)$$

当 $z \leq 0$ 时, Z 的概率密度函数为

$$f_Z(z) = \int_{-\infty}^0 f_X(x) f_Y(z-x) dx + \int_0^{+\infty} f_X(x) f_Y(z-x) dx = 0 \quad (A5)$$

当 $z > 0$ 时, Z 的概率密度函数为

$$f_Z(z) = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} (e^{-\lambda_2 z} - e^{-\lambda_1 z}) \quad (A6)$$

附录 B

译码转发通信系统的遍历容量为

$$C = \min(E_{g_{M,1}, g_{M,2}}(R_M), E_{g_{1,B}, g_{2,B}}(R_B)) = \frac{1}{2} \min(E_{g_{M,1}}(\log_2(1 + \bar{r}_M |g_{M,1}|^2 d_{M,1}^{-2\alpha})) + E_{g_{M,2}}(\log_2(1 + \bar{r}_M |g_{M,2}|^2 d_{M,2}^{-2\alpha})), E_{g_{1,B}, g_{2,B}}(\log_2(1 + \bar{r}_U |g_{1,B}|^2 d_{1,B}^{-2\alpha} + \bar{r}_U |g_{2,B}|^2 d_{2,B}^{-2\alpha}))) \quad (B1)$$

由于 $\bar{r}_M |g_{M,j}|^2 d_{M,j}^{-2\alpha}$ ($j = 1, 2$) 服从参数为 $\bar{r}_M^{-1} d_{M,j}^{2\alpha}$ 的指数分布, $E_{g_{M,1}, g_{M,2}}(R_M)$ 可表示为

$$E_{g_{M,1}, g_{M,2}}(R_M) = \frac{1}{2} \int_0^{+\infty} \log_2(1+x) \frac{d_{M,1}^{2\alpha}}{\bar{r}_M} \exp\left(-\frac{d_{M,1}^{2\alpha}}{\bar{r}_M} x\right) dx + \frac{1}{2} \int_0^{+\infty} \log_2(1+y) \frac{d_{M,2}^{2\alpha}}{\bar{r}_M} \exp\left(-\frac{d_{M,2}^{2\alpha}}{\bar{r}_M} y\right) dy = -\frac{1}{2 \ln 2} \left[\exp\left(\frac{d_{M,1}^{2\alpha}}{\bar{r}_M}\right) \cdot E_1\left(-\frac{d_{M,1}^{2\alpha}}{\bar{r}_M}\right) + \exp\left(\frac{d_{M,2}^{2\alpha}}{\bar{r}_M}\right) \cdot E_1\left(-\frac{d_{M,2}^{2\alpha}}{\bar{r}_M}\right) \right] \quad (B2)$$

式中: $E_1(x) = \int_{-\infty}^x e^u / u du$ 为一元指数积分函数。

当 $d_{1,B} \neq d_{2,B}$ 时, 由式 (17), $E_{g_{1,B}, g_{2,B}}(R_B)$ 可表示为

$$E_{g_{1,B}, g_{2,B}}(R_B) = \frac{1}{2 \ln 2 (\lambda_1 - \lambda_2)} [\lambda_2 E_1(-\lambda_1) \exp(\lambda_1) - \lambda_1 E_1(-\lambda_2) \exp(\lambda_2)] \quad (B3)$$

式中: $\lambda_j = \bar{r}_U^{-1} d_{j,B}^{2\alpha}$ ($j = 1, 2$)。

将式 (B3)、式 (B2) 代入式 (B1), 可得 $d_{1,B} \neq d_{2,B}$ 时系统遍历容量为

$$C = \frac{1}{2 \ln 2} \min(C_1, C_2) \quad (B4)$$

$$\begin{cases} C_1 = -\exp\left(\frac{d_{M,1}^{2\alpha}}{\bar{r}_M}\right) E_1\left(-\frac{d_{M,1}^{2\alpha}}{\bar{r}_M}\right) - \exp\left(\frac{d_{M,2}^{2\alpha}}{\bar{r}_M}\right) E_1\left(-\frac{d_{M,2}^{2\alpha}}{\bar{r}_M}\right) \\ C_2 = \frac{\bar{r}_U}{d_{1,B}^{2\alpha} - d_{2,B}^{2\alpha}} \left[\frac{d_{2,B}^{2\alpha}}{\bar{r}_U} E_1\left(-\frac{d_{1,B}^{2\alpha}}{\bar{r}_U}\right) \exp\left(\frac{d_{1,B}^{2\alpha}}{\bar{r}_U}\right) - \frac{d_{1,B}^{2\alpha}}{\bar{r}_U} E_1\left(-\frac{d_{2,B}^{2\alpha}}{\bar{r}_U}\right) \exp\left(\frac{d_{2,B}^{2\alpha}}{\bar{r}_U}\right) \right] \end{cases}$$

当 $d_{1,B} = d_{2,B}$ 时,由式(20), $E_{g_{1,B},g_{2,B}}(R_B)$ 可表示为

$$E_{g_{1,B},g_{2,B}}(R_B) = \frac{1}{2\ln 2} [(\lambda - 1)E_1(-\lambda)\exp(\lambda) + 1] \quad (B5)$$

式中: $\lambda = \bar{r}_U^{-1} d_B^{2\alpha}$ 。

将式(B5)、式(B2)代入式(B1),可得到 $d_{1,B} =$

$d_{2,B} = d_B$ 时系统遍历容量为

$$\begin{cases} C = \frac{1}{2\ln 2} \min(C_1, C_3) \\ C_1 = -\exp\left(\frac{d_{M,1}^{2\alpha}}{\bar{r}_M}\right) E_1\left(-\frac{d_{M,1}^{2\alpha}}{\bar{r}_M}\right) - \exp\left(\frac{d_{M,2}^{2\alpha}}{\bar{r}_M}\right) E_1\left(-\frac{d_{M,2}^{2\alpha}}{\bar{r}_M}\right) \\ C_3 = \left(\frac{d_B^{2\alpha}}{\bar{r}_U} - 1\right) E_1\left(-\frac{d_B^{2\alpha}}{\bar{r}_U}\right) \exp\left(\frac{d_B^{2\alpha}}{\bar{r}_U}\right) + 1 \end{cases} \quad (B6)$$

式(B4)与式(B6)结合即式(30)。

Trajectory optimization of CSTBC UAV relay communication systems with no-fly zone constraints

LIU Haitao*, LIU Xiaochang, HUANG Jinfeng, LI Dongxia

(Tianjin Key Laboratory of Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The flight path of an UAV has a significant effect on the performance of a UAV relay communication system. To increase transmission reliability, a cooperative space-time block coding (CSTBC) UAV relay communication transmission technique with no-fly zone restrictions is suggested. The outage probability of the UAV relay communication system is theoretically derived, and the UAV flight path is optimized to minimize the system's outage probability. The UAV relay communication system's ergodic capacity is also presented. In addition, we established a no-fly zone and provided an evasive mechanism to ensure cooperative UAV flight safety while obtaining the channel's diversity gain. The simulation findings demonstrate that the cooperative space-time block coding-based UAV relay communication transmission method may get the channel's diversity gain and enhance the system's link transmission performance.

Keywords: cooperative communication; UAV relay communication; space-time block coding; no-fly zone avoidance; trajectory optimization