

无人机级联中继广播通信系统航迹优化方法

李冬霞, 宋思雨, 刘海涛

(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: 无人机航迹优化是提高无人机中继通信系统性能的重要方式之一。针对无人机级联中继广播通信系统, 研究其在译码转发协议下的航迹优化方法。分析给出了无人机和用户的信噪比表达式, 在此基础上提出了基于最大用户中断概率最小化准则的级联无人机航迹联合优化方法和分步优化方法, 研究了 2 种航迹优化方法下系统链路的传输性能, 给出了系统遍历容量和单个用户中断概率的数学表达式。通过计算机仿真分析验证了系统特征参数对级联中继无人机最优航迹和系统性能的影响。仿真结果表明: 所提 2 种航迹优化方法性能基本一致, 验证了航迹优化准则的有效性。

关 键 词: 无人机级联; 航迹优化; 中断概率; 广播通信

中图分类号: TN92; V279

文献标志码: A

文章编号: 1000-2758(2023)03-0579-08

无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)中继通信可以有效扩大通信覆盖范围, 克服信道衰落和路径损耗, 保证通信的可靠性^[1]; 且 UAV 具有组网灵活、部署快速、运行成本低等优点, 已成为无线中继通信的重要方式^[2]。由多 UAV 组成的机群协作部署和传输, 能够克服单 UAV 在载荷能力、续航时间、功率等方面的制约, 更好保证信息传输的可靠性、高效性和稳定性。多无人机协作传输的无线中继通信系统将会成为未来无线通信的一个重要组成部分。

近年来, 围绕 UAV 动态中继之间的协作问题, 已开展航迹优化^[3-9]、资源分配^[10]和网络优化^[11]等多方面的研究。本文将围绕无人机航迹优化方法进行相关研究。针对点对点 UAV 级联中继通信系统航迹优化问题, 文献[3]基于端到端信噪比最大化准则, 比较了译码转发(decode-and-forward, DF)和放大转发(amplify-and-forward, AF)2 种转发协议下系统的中断概率和误码率。文献[4]对于有缓存和无缓存的多跳中继网络, 给出了在传输功率较大区域内的渐近中断概率和误码率, 并验证了缓存的使用可以为 UAV 系统提供可靠和低延迟的通信。文献[5]基于通信链路遍历容量最大化准则提出 UAV 航迹优化方法。文献[6]提出一种利用人工势场法

以系统容量最大化为优化准则的 UAV 航迹优化方法, 但没有研究信道衰落对系统性能的影响。文献[3-6]在系统建模中只考虑了单个用户, 没有考虑多 UAV 在多用户情况下的航迹优化问题。然而, 对于 UAV 中继通信系统的研究, 多用户场景的广播通信比单用户场景更具有现实意义。

针对 UAV 中继广播通信系统航迹优化的研究, 目前主要面向单 UAV 中继广播通信系统。如文献[7]基于公平吞吐量最大化准则, 提出了旋翼 UAV 航迹优化方法, 但该系统只分析了 UAV 和用户之间的链路, 没有研究基站到 UAV 之间的链路对系统的影响。文献[8]基于各链路加权和遍历容量最大化准则提出了 UAV 航迹优化方法。文献[9]以平均中断概率最小化为准则对 UAV 进行航迹优化, 并定量分析了无人机的系统性能。当前对于多 UAV 协作传输的广播通信系统的航迹优化方法及其对系统整体性能的研究很少见诸于公开文献资料。

本文研究了 UAV 级联中继在静态用户广播通信系统中的航迹优化问题, 在 DF 协议下基于最大用户中断概率最小化准则给出了联合优化和分步优化 2 种 UAV 航迹优化方法, 推导出用户链路中断概率和系统容量表达式, 最后通过计算机仿真验证了

所提航迹优化方法的正确性。

1 UAV 级联中继广播通信系统

1.1 系统模型

图1为无人机级联中继广播通信系统示意图。系统由固定地面基站(base station, BS)、2架固定翼无人机(分别记为 UAV1 和 UAV2)及 N 个用户 U_i ($i=1, \dots, N$) 节点等四部分组成, 其中 N 个用户节点分布在地面圆形服务区内。假设 BS 与用户 U_i 节点之间有较远的通信距离, 无法进行直接通信, 需要借助 2 架中继 UAV 级联实现 BS 到用户节点的通信。此外, 所有通信节点均为单天线, 且 2 架 UAV 均采用 DF 协议进行中继通信。

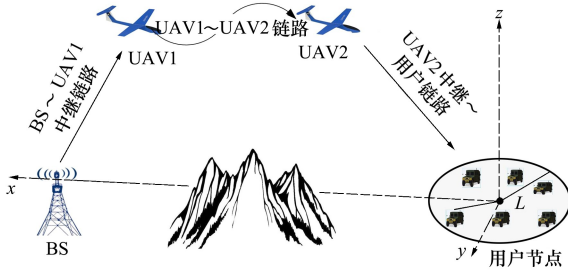


图1 无人机级联中继广播通信系统示意图

1.2 信号模型

BS 节点发送的信号通过 3 个时隙传输到用户节点。在第一个时隙, BS 节点发送信号至 UAV1, 则 UAV1 接收信号为

$$y_{R1} = \sqrt{P_B} h_{BR1} s_B + n_{BR1} \quad (1)$$

式中: P_B 为 BS 的发射功率; h_{BR1} 为 BS 与 UAV1 之间的信道衰落系数; s_B 为 BS 的发射信号, 其满足 $E\{|s_B|^2\} = 1$; n_{BR1} 为 UAV1 在第 1 个时隙接收到的复高斯白噪声, 其服从均值为零, 方差为 σ_B^2 的复高斯分布。

在第二个时隙, UAV1 将接收到的信号解码处理, 重新编码后发送给 UAV2, 则 UAV2 接收信号为

$$y_{R2} = \sqrt{P_{R1}} h_{R1R2} s_{R1} + n_{R1R2} \quad (2)$$

式中: P_{R1} 为 UAV1 的发射功率; h_{R1R2} 为 UAV1 与 UAV2 之间的信道衰落系数; s_{R1} 为 UAV1 的发射信号, 其满足 $E\{|s_{R1}|^2\} = 1$; n_{R1R2} 为 UAV2 接收到的复高斯白噪声, 服从均值为零, 方差为 σ_{R1}^2 的复高斯分布。

在第 3 个时隙, UAV2 将接收到的信号通过解码、编码, 广播发送至用户节点 U_i ($i=1, \dots, N$), 则用户 U_i 节点接收信号为

$$y_i = \sqrt{P_{R2}} h_{R2i} s_{R2} + n_{R2i} \quad (3)$$

式中: P_{R2} 为 UAV2 的发射功率; h_{R2i} 为 UAV2 与用户 U_i 之间的信道衰落系数; s_{R2} 为 UAV2 的发射信号, 满足 $E\{|s_{R2}|^2\} = 1$; n_{R2i} 为用户节点 U_i 接收到的复高斯白噪声, 其均值为零, 方差为 σ_{R2}^2 。

1.3 UAV1、UAV2 与用户节点的输入瞬时信噪比

BS~UAV1、UAV1~UAV2、UAV2~用户 U_i 节点链路之间为瑞利衰落信道, 建模为

$$h_\beta = \frac{g_\beta}{d_\beta^\alpha} \quad (\beta \in \{BR1, R1R2, R2i\}) \quad (4)$$

式中: d_β 为各节点之间的距离; α 为信道的损耗因子; $g_\beta \sim CN(0, 1)$ 为信道小尺度衰落系数。

根据(1)~(4)式, 可以得到 UAV1、UAV2 和用户 U_i 节点的瞬时信噪比分别为

$$\gamma_{R1} = \frac{\bar{r}_B |g_{BR1}|^2}{d_{BR1}^{2\alpha}} \quad (5)$$

$$\gamma_{R2} = \frac{\bar{r}_{R1} |g_{R1R2}|^2}{d_{R1R2}^{2\alpha}} \quad (6)$$

$$\gamma_i = \frac{\bar{r}_{R2} |g_{R2i}|^2}{d_{R2i}^{2\alpha}} \quad (7)$$

式中, $\bar{r}_x = \frac{P_x}{\sigma_x^2}$, $x = B, R1, R2$ 。

(5)~(7)式表明: γ_{R1} 通过距离 d_{BR1} 和信道的小尺度衰落系数 g_{BR1} 联合确定; γ_{R2} 通过距离 d_{R1R2} 和信道的小尺度衰落系数 g_{R1R2} 联合确定; γ_i 通过距离 d_{R2i} 和信道的小尺度衰落系数 g_{R2i} 联合确定。

2 中继 UAV 级联航迹优化方法

在 UAV 级联中继广播通信系统中, 实时优化 UAV1 和 UAV2 的航迹, 以获取最佳的通信性能。本文基于最大用户中断概率最小化准则给出 UAV 级联中继的联合优化方法和分步优化方法的航迹优化方法。联合优化方法是同时优化 UAV1 和 UAV2 的航向角, 分步优化方法是先优化 UAV1 的航向角, 然后再优化 UAV2 的航向角。

2.1 用户中断概率

图1所示级联 UAV 系统中用户 U_i 节点的中断

概率为

$$P_{U_i} = 1 - (1 - P_{BR1})(1 - P_{R1R2})(1 - P_{R2i}) = P_{BR1} + P_{R1R2} + P_{R2i} - P_{BR1}P_{R1R2} - P_{BR1}P_{R2i} - P_{R1R2}P_{R2i} + P_{BR1}P_{R1R2}P_{R2i} \quad (8)$$

式中: P_{BR1} , P_{R1R2} 与 P_{R2i} 分别为 BS ~ UAV1、UAV1 ~ UAV2 和 UAV2 ~ 用户 U_i 节点链路的中断概率。

由于 P_{BR1} , P_{R1R2} 和 P_{R2i} 取值较低, (8) 式近似为^[9]

$$P_{U_i} \approx P_{BR1} + P_{R1R2} + P_{R2i} \quad (9)$$

利用(5)~(7)式,可计算得到用户 U_i 节点的近似中断概率为

$$P_{U_i} \approx 3 - \exp\left(-\frac{d_{BR1}^{2\alpha} \gamma_{th}}{\bar{r}_B}\right) - \exp\left(-\frac{d_{R1R2}^{2\alpha} \gamma_{th}}{\bar{r}_{R1}}\right) - \exp\left(-\frac{d_{R2i}^{2\alpha} \gamma_{th}}{\bar{r}_{R2}}\right) \quad (10)$$

将(10)式进行泰勒展开,取第一项代入(10)式,则用户节点的中断概率化简为

$$P_{U_i} \approx \left(\frac{d_{BR1}^{2\alpha}}{\bar{r}_B} + \frac{d_{R1R2}^{2\alpha}}{\bar{r}_{R1}} + \frac{d_{R2i}^{2\alpha}}{\bar{r}_{R2}}\right) \gamma_{th} \quad (11)$$

(11)式表明:影响用户 U_i 节点中断概率的主要因素为各节点之间的距离(d_{BR1} , d_{R1R2} , d_{R2i})。

2.2 联合优化方法

为了定量分析,建立三维直角坐标系如图1所示,计算各节点之间距离,假设 t 时刻 BS、UAV 和用户 U_i 节点的坐标矢量分别为 $\mathbf{b} = [x_b, y_b, 0]^T$, $\mathbf{r}_{Rm,t} = [x_{Rm,t}, x_{Rm,t}, h_{Rm,t}]^T$ ($m=1,2$) 和 $\mathbf{u}_i = [x_i, y_i, 0]^T$ 。假设 UAV 中继在 $t - \Delta\tau$ 时刻的位置坐标为 $\mathbf{r}_{Rm,t-\Delta\tau} = [x_{Rm,t-\Delta\tau}, x_{Rm,t-\Delta\tau}, h_{Rm,t-\Delta\tau}]^T$ ($m=1,2$), 根据固定翼 UAV 的运动模型,其在 t 时刻的坐标可表示为^[12]

$$\begin{cases} x_{Rm,t} = x_{Rm,t-\Delta\tau} + v_{Rm} \Delta\tau \cos(\delta_{Rm,t}) \\ y_{Rm,t} = y_{Rm,t-\Delta\tau} + v_{Rm} \Delta\tau \sin(\delta_{Rm,t}) \end{cases} \quad (12)$$

式中, v_{Rm} 为 UAV 的飞行速度; $\Delta\tau$ 为中继位置更新的时间间隔; $\delta_{Rm,t}$ 为 t 时刻中继 UAV 的航向角,且 $|\delta_{Rm,t} - \delta_{Rm,t-\Delta\tau}| \leq \delta_{\max}$, $\delta_{\max}$ 表示最大转弯角,这里假设 UAV1 和 UAV2 的最大转弯角相同。结合(12)式, d_{BR1} , d_{R1R2} 与 d_{R2i} 可以分别表示为

$$d_{BR1,t} = \sqrt{(x_{R1,t} - x_b)^2 + (y_{R1,t} - y_b)^2 + h_{R1,t}^2} \quad (13)$$

$$d_{R1R2,t} = \sqrt{(x_{R2,t} - x_{R1,t})^2 + (y_{R2,t} - y_{R1,t})^2 + (h_{R2,t} - h_{R1,t})^2} \quad (14)$$

$$d_{R2i,t} = \sqrt{(x_{R2,t} - x_i)^2 + (y_{R2,t} - y_i)^2 + h_{R2,t}^2} \quad (15)$$

(12)~(15)式表明: t 时刻用户 U_i 节点的中断概率只取决于 UAV 的航向角 $\delta_{Rm,t}$ 。

为了使 t 时刻级联 UAV 中继广播通信系统性能最优,基于最大用户中断概率最小化准则优化 UAV 的航向角^[13],则上述优化问题表示为

$$\begin{aligned} \min_{\delta_{R1,t}, \delta_{R2,t}} \max \{P_{U_i}\} \\ \text{s.t.} \quad |\delta_{Rm,t} - \delta_{Rm,t-\Delta\tau}| \leq \delta_{\max} \end{aligned} \quad (16)$$

(16)式中的优化问题可以进一步表示为^[14]

$$\begin{aligned} \min_{\delta_{R1,t}, \delta_{R2,t}} \frac{1}{p} \ln \left(\sum_{i=1}^N \exp \left(p \left(\frac{d_{BR1,t}^{2\alpha}}{\bar{r}_B} + \frac{d_{R1R2,t}^{2\alpha}}{\bar{r}_{R1}} + \frac{d_{R2i,t}^{2\alpha}}{\bar{r}_{R2}} \right) \gamma_{th} \right) \right) \\ \text{s.t.} \quad |\delta_{Rm,t} - \delta_{Rm,t-\Delta\tau}| \leq \delta_{\max} \end{aligned} \quad (17)$$

其中 p 大于零, (17) 式中的优化问题是含有约束条件的二维非线性优化问题,该问题可以通过二维搜索算法在 $[\delta_{Rm,t-\Delta\tau} - \delta_{\max}, \delta_{Rm,t} \leq \delta_{Rm,t-\Delta\tau} + \delta_{\max}]$ 内找到最佳航向角。

2.3 分步优化方法

2.3.1 UAV1 航迹优化问题

在无人机级联中继广播通信系统中,在单个位置更新间隔内,无人机的空间位置改变量较小,因此在优化 UAV1 的航向角时,可近似认为 UAV2 空间位置没有产生变化,此时仅需要对 BS ~ UAV1 ~ UAV2 链路来优化 UAV1 的航向角 $\delta_{R1,t}$;再以优化得到的 $\delta_{R1,t}$ 为基础,针对 BS ~ UAV1 ~ UAV2 ~ 用户节点 U_i 链路来优化 UAV2 的航向角 $\delta_{R2,t}$ 。

由(5)~(6)式可以得到 t 时刻 BS ~ UAV1 ~ UAV2 链路的中断概率为

$$P_t = \left(\frac{d_{BR1,t}^{2\alpha}}{\bar{r}_B} + \frac{d_{R1R2,t}^{2\alpha}}{\bar{r}_{R1}} - \frac{d_{BR1,t}^{2\alpha}}{\bar{r}_B} \frac{d_{R1R2,t}^{2\alpha}}{\bar{r}_{R1}} \gamma_{th} \right) \gamma_{th} \quad (18)$$

考虑到在位置更新的时间间隔内, UAV2 的移动距离相对较小,因此, d_{R1R2} 由 t 时刻 UAV1 的位置坐标 $r_{R1,t}$ 和 $t - \Delta\tau$ 时刻 UAV2 的位置坐标 $r_{R2,t-\Delta\tau}$ 确定,即 d_{R1R2} 可以表示为

$$d_{R1R2,t} = \sqrt{\phi_t + \zeta_t + \psi_t} \quad (19)$$

式中

$$\begin{cases} \phi_t = (x_{R1,t-\Delta\tau} + v_{R1} \Delta\tau \cos(\delta_{R1,t}) - x_{R2,t-\Delta\tau})^2 \\ \zeta_t = (y_{R1,t-\Delta\tau} + v_{R1} \Delta\tau \sin(\delta_{R1,t}) - y_{R2,t-\Delta\tau})^2 \\ \psi_t = (h_{R1,t-\Delta\tau} - h_{R2,t-\Delta\tau})^2 \end{cases}$$

(13)~(14)和(19)式表明:在 $t - \Delta\tau$ 时刻 UAV1 的位置 $r_{R1,t-\Delta\tau}$ 给定后, t 时刻的 $d_{BR1,t}$ 和 $d_{R1R2,t}$ 仅由 UAV1 的航向角 $\delta_{R1,t}$ 决定,则 t 时刻 BS ~ UAV1 ~ UAV2 链路的中断概率 P_t 仅取决 $\delta_{R1,t}$ 。因此,为使 t 时刻该链路的中断概率最小,基于 BS ~ UAV1 ~

UAV2 链路中断概率最小化准则优化 UAV1 的航向角,该优化问题表示为

$$\min_{\delta_{R1}} P_t \quad \text{s.t.} \quad |\delta_{R1,t} - \delta_{R1,t-\Delta\tau}| \leq \delta_{\max} \quad (20)$$

(20)式描述的优化问题是含约束条件的一维非线性优化问题,该问题可以通过一维搜索算法在 $[\delta_{R1,t-\Delta\tau} - \delta_{\max} \leq \delta_{R1,t} \leq \delta_{R1,t-\Delta\tau} + \delta_{\max}]$ 内找到最佳航向角。

2.3.2 UAV2 航迹优化问题

当 UAV1 在 t 时刻的最佳航向角被确定后,级联 UAV 系统的中断概率仅由 UAV2 的航向角决定。为使系统中断概率最低,针对 BS~UAV1~UAV2~用户 U_i 节点链路,以用户最大中断概率最小化为准则优化 UAV2 的航向角。因此,(17)式的优化问题可以等效为

$$\min_{\delta_{R2,t}} \frac{1}{p} \ln \left(\sum_{i=1}^N \exp \left(p \left(\frac{d_{BR1,t}^{2\alpha}}{\bar{r}_B} + \frac{d_{R1R2,t}^{2\alpha}}{\bar{r}_{R1}} + \frac{d_{R2i,t}^{2\alpha}}{\bar{r}_{R2}} \right) \gamma_{th} \right) \right) \quad \text{s.t.} \quad |\delta_{R2,t} - \delta_{R2,t-\Delta\tau}| \leq \delta_{\max} \quad (21)$$

根据(20)式可得到 UAV1 的最佳航向角,将其代入(12)式,得到 UAV1 的位置坐标,然后求得 t 时刻 BS~UAV1 的距离 $d_{BR1,t}$,则 $d_{R1R2,t}$ 和 $d_{R2i,t}$ 为(21)式优化问题的主要影响因素。假设 UAV2 节点在 $t - \Delta\tau$ 时刻可通过卡尔曼滤波确定 UAV1 在 t 时刻的坐标 $\hat{r}_{R1,t}$,则 $d_{R1R2,t}$ 可以表示为

$$d_{R1R2,t} = \sqrt{\phi'_t + \zeta'_t + \psi'_t} \quad (22)$$

式中

$$\begin{cases} \phi'_t = (x_{R2,t-\Delta\tau} + v_{R2}\Delta\tau \cos(\delta_{R2,t}) - x_{R1,t})^2 \\ \zeta'_t = (y_{R2,t-\Delta\tau} + v_{R2}\Delta\tau \sin(\delta_{R2,t}) - y_{R1,t})^2 \\ \psi'_t = (h_{R2,t-\Delta\tau} - h_{R1,t})^2 \end{cases}$$

(22)式表明:在 $t - \Delta\tau$ 时刻 UAV2 的位置 $r_{R2,t-\Delta\tau}$ 给定后, $d_{R1R2,t}$ 和 $d_{R2i,t}$ 仅由 t 时刻 UAV2 航向角 $\delta_{R2,t}$ 决定,因此,(21)式的优化问题进一步等效为

$$\min_{\delta_{R2,t}} \frac{1}{p} \ln \left(\sum_{i=1}^N \exp \left(p \left(\frac{d_{R1R2,t}^{2\alpha}}{\bar{r}_{R1}} + \frac{d_{R2i,t}^{2\alpha}}{\bar{r}_{R2}} \right) \gamma_{th} \right) \right) \quad \text{s.t.} \quad |\delta_{R2,t} - \delta_{R2,t-\Delta\tau}| \leq \delta_{\max} \quad (23)$$

(23)式的优化问题是一维约束的非线性优化问题,该问题通过一维搜索算法在 $[\delta_{R2,t-\Delta\tau} - \delta_{\max} \leq \delta_{R2,t} \leq \delta_{R2,t-\Delta\tau} + \delta_{\max}]$ 内找到最佳航向角。

2.4 算法复杂度分析

算法1 联合优化算法

1. 输入: $\mathbf{b}, \mathbf{r}_{Rm,t} (m = 1, 2), T = 200 \text{ s}$ 、用户数 N 等所需参数,初始化 BS、UAV1、UAV2 的位置。
2. while $t < T$ do
3. for $i = 1, 2, \dots, N$ do
4. 计算 $d_{BR1,t}, d_{R1R2,t}, d_{R2i,t}$,代入(11)式计算中断概率
5. end for
6. 确定 UAV1 航向角取值范围的长度 L_{δ_1}
7. 确定 UAV2 航向角取值范围的长度 L_{δ_2}
8. for $k = 1: L_{\delta_1}$ do
9. for $s = 1: L_{\delta_2}$ do
10. 用(13)~(15)式表示 $d_{BR1,t}, d_{R1R2,t}, d_{R2i,t}$,求解(17)式
11. end for
12. end for
13. 由最大最小优化准则求出 UAV1 的最优航向角 δ_{R1}^{opt} , UAV2 的最优航向角 δ_{R2}^{opt}
14. 根据无人机运动方程实时优化无人机航迹
15. end while
16. 输出:全局极值

联合优化方法运算复杂度主要由两部分决定:

- ① 计算用户 U_i 节点的中断概率 P_{U_i} ;
- ② 以最大-最小准则得到的优化表达式求解。根据公式(11)和(17)表示形式可知,两部分运算复杂度分别为 $O(N)$ 和 $O(L_{\delta_1} L_{\delta_2} N)$ 。因此在每次迭代运算中,联合优化方法的运算复杂度为 $O(L_{\delta_1} L_{\delta_2} N + N)$ 。在算法实现中,由于 $L_{\delta_1} = L_{\delta_2} > N$,故联合优化方法的运算复杂度为 $O(L_{\delta_1}^2 N)$ 。同理,可得到分步优化方法的运算复杂度为 $O(L_{\delta_1} N)$ 。因此,分步优化方法的复杂度比联合优化方法的复杂度低。

2.5 系统遍历容量

根据(5)式,可得到 BS~UAV1 中继节点链路的瞬时容量为

$$C_{R1} = \frac{1}{3} \log_2(1 + \gamma_{R1}) \quad (24)$$

根据(6)式,可得到 UAV1~UAV2 中继节点链路的瞬时容量为

$$C_{R2} = \frac{1}{3} \log_2(1 + \gamma_{R2}) \quad (25)$$

根据(7)式,可得到 UAV2~用户 U_i 节点链路的瞬时容量为

$$C_{U_i} = \frac{1}{3} \log_2(1 + \gamma_i) \quad (26)$$

由(24)~(26)式可以得到,UAV 级联中继广播通信系统第 i 条链路的各态历经性容量可以表示为

$$C_i = E_{g_{BR1}, g_{R1R2}, g_{R1i}}(\min(C_{R1}, C_{R2}, C_{U_i})) \quad (27)$$

式中, $E[\cdot]$ 代表均值, C_{R1} , C_{R2} 和 C_{U_i} 分别是关于 g_{BR1} , g_{R1R2} 和 g_{R2i} 的独立分布函数。(27) 式可以进一步表示为

$$C_i = \min(E_{g_{BR1}}(C_{R1}), E_{g_{R1R2}}(C_{R2}), E_{g_{R1i}}(C_{U_i})) \quad (28)$$

将(5)~(7)式代入(28)式,得到:

$$C_i = \frac{1}{3} \min(E_{g_{BR1}}(1 + \bar{r}_B |g_{BR1}|^2 d_{BR1}^{-2\alpha}), E_{g_{R1R2}}(1 + \bar{r}_{R1} |g_{R1R2}|^2 d_{R1R2}^{-2\alpha}), E_{g_{R1i}}(1 + \bar{r}_{R2} |g_{R2i}|^2 d_{R2i}^{-2\alpha})) \quad (29)$$

由于 $E[\log_2(1 + X)] = \int_0^\infty \log_2(1 + x) f_X(x) dx$, 可以得到

$$C_i = \frac{1}{3 \ln 2} \min \left(-\exp\left(\frac{d_{BR1}^{2\alpha}}{\bar{r}_B}\right) E_1\left(-\frac{d_{BR1}^{2\alpha}}{\bar{r}_B}\right), -\exp\left(\frac{d_{R1R2}^{2\alpha}}{\bar{r}_{R1}}\right) E_1\left(-\frac{d_{R1R2}^{2\alpha}}{\bar{r}_{R1}}\right), -\exp\left(\frac{d_{R2i}^{2\alpha}}{\bar{r}_{R2}}\right) E_1\left(-\frac{d_{R2i}^{2\alpha}}{\bar{r}_{R2}}\right) \right) \quad (30)$$

通过上述分析,UAV 级联中继广播通信系统所有链路总的遍历容量(简称:系统遍历容量)为

$$C = \sum_{i=1}^N C_i \quad (31)$$

3 数值仿真

3.1 仿真参数

为了验证本文所提级联 UAV 中继广播通信航迹优化方法的有效性,构建级联 UAV 中继广播通信系统仿真平台,主要参数如下:BS 节点坐标为 $[4\ 500, 400, 0]$, UAV1 和 UAV2 的初始位置坐标分别为 $[3\ 500, -400, 300]$ 与 $[400, -500, 300]$;圆形服务区域半径设为 120 m,用户数为 240;UAV1 和 UAV2 的飞行速度设为 40 m/s,其最大转弯角为 10° ,位置更新周期为 1 s;中断概率门限设为 4.8 dB,BS、UAV1 和 UAV2 节点的发射功率与噪声功率的比值为 $\bar{r}_x = \frac{P_x}{\sigma_x^2} = 90$ dB ($x = B, R1, R2$);系统路径损耗因子设为 $1^{[12]}$;系统仿真时间为 200 s。

3.2 仿真结果

图2显示 UAV 采用联合优化方法和分步优化方法分别得到的 UAV 最优航迹、用户平均中断概率及系统遍历容量。仿真结果说明:采用联合优化方法与分步优化方法所得到的 UAV1 和 UAV2 的最优航迹、用户平均中断概率和系统遍历容量曲线几乎重合,表明了所提方法的正确性。2 种优化方法都是根据 UAV 运动模型将中断概率表示成含有航向角的表达式,利用最大用户中断概率最小化准则优化 2 架 UAV 的航向角,且仿真参数条件设置相同。所以联合优化与分步优化的性能几乎相同。

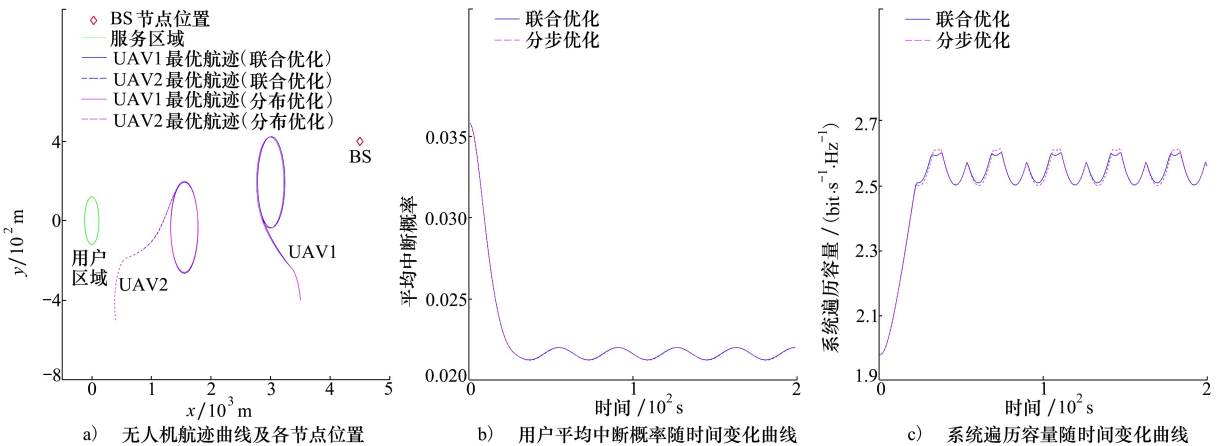


图2 联合优化与分步优化对比

图3显示联合优化方法下最大转弯角对 UAV 最优航迹和系统性能的影响。仿真结果说明:①随

着最大转弯角增大,UAV 圆形飞行轨迹的半径减小,约为蓝色圆形轨迹半径的 1/2;②随最大转弯角

的增大,用户平均中断概率减小,系统遍历容量增大,级联 UAV 系统性能提高,但无明显差别。

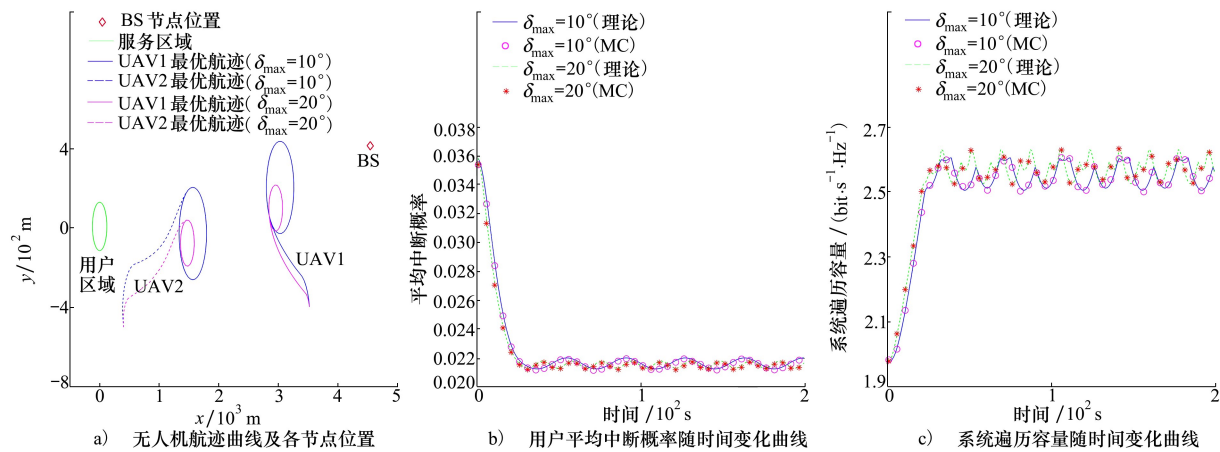


图 3 最大转弯角对无人机最优航迹及系统性能的影响

图 4 显示联合优化方法下路径损耗因子对 UAV 最优航迹、用户平均中断概率和系统遍历容量的影响。仿真结果说明:①随着路径损耗因子增大, UAV 飞行轨迹发生变化,但圆形飞行轨迹的半径保

持不变;②路径损耗因子从 1 增大到 1.1,用户平均中断概率提高约 4.3 倍,系统遍历容量减少约为 27%,级联 UAV 系统的性能明显下降。

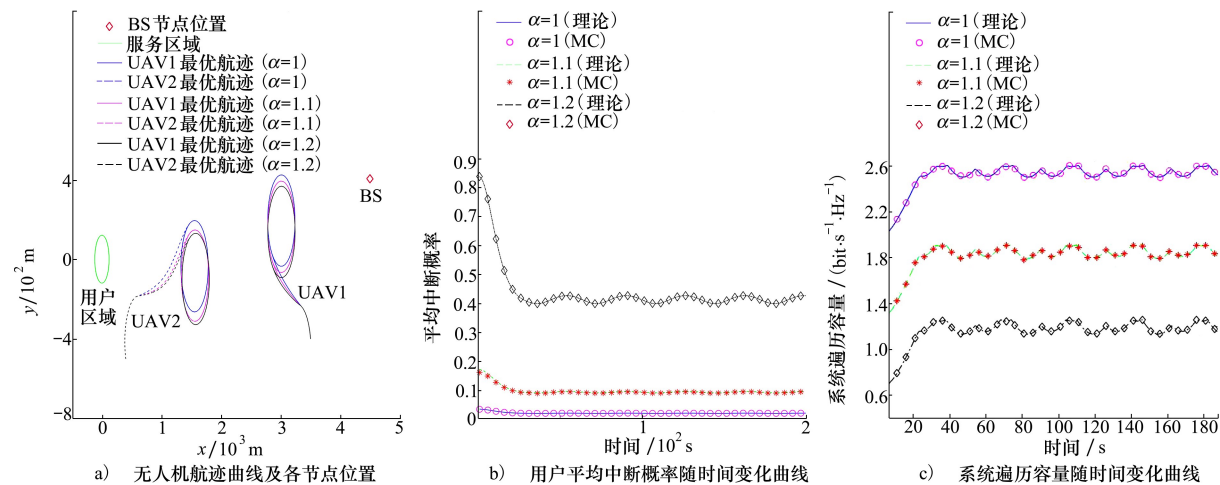


图 4 路径损耗因子对无人机最优航迹及系统性能的影响

图 5 显示出了各节点发射功率与噪声功率的比值对 UAV 最优航迹、用户平均中断概率和系统遍历容量的影响。仿真结果表明:①随着发射功率与噪声功率比值的增大,UAV1 飞行轨迹不变,UAV2 飞行轨迹发生小的变化;②发射功率与噪声功率的比值对中继通信系统性能影响较大,该值从 90 dB 增加到 95 dB 时,用户平均中断概率减小约为 68%,系

统遍历容量提高约为 1.2 倍,级联 UAV 系统的性能明显提高。

图 3~5 所示的 Monte-Carlo (MC) 仿真曲线与理论仿真曲线变化规律基本一致,验证了本文推导的系统遍历容量和单个用户中断概率数学表达式的正确性。

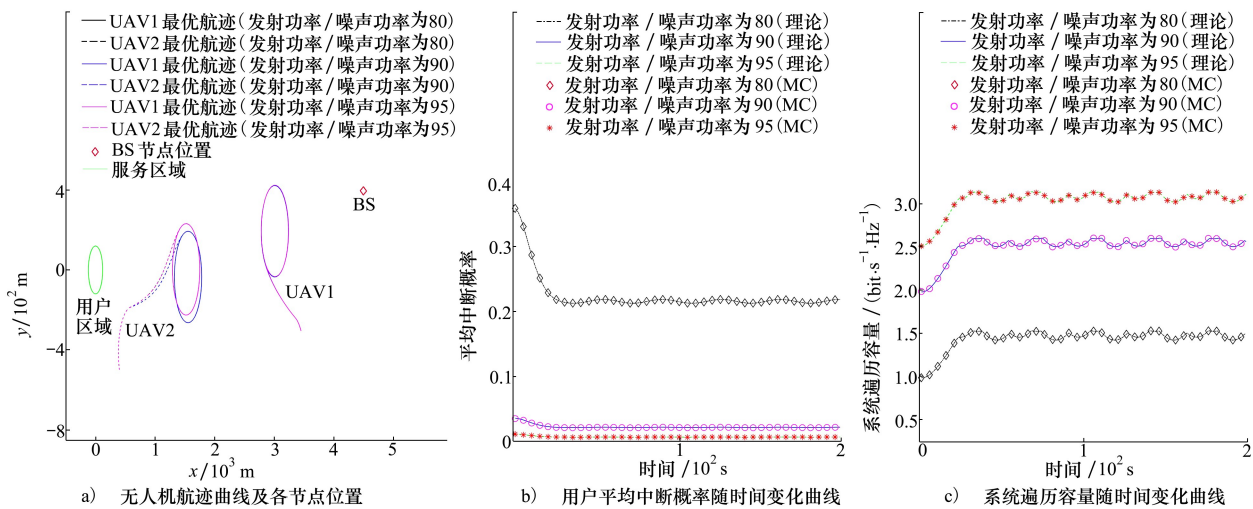


图 5 发射功率与噪声功率的比值对无人机最优航迹及系统性能的影响

4 结 论

针对 UAV 级联中继广播通信系统航迹优化问题,给出了联合优化方法和分步优化方法,并通过计

算机仿真验证了所提方法的有效性。主要研究结论如下:①联合优化方法和分步优化方法得到的中断和容量性能无明显差别;②路径损耗因子和各节点发射功率与噪声功率的比值对系统的中断概率和遍历容量影响较大。

参考文献:

[1] LIU T, CUI M, ZHANG G, et al. 3D trajectory and transmit power optimization for UAV-enabled multi-link relaying systems [J]. IEEE Trans on Green Communications and Networking, 2020, 5(1): 392-405

[2] MIAO W, LUO C, MIN G, et al. Lightweight 3-D beamforming design in 5G UAV broadcasting communications[J]. IEEE Trans on Broadcasting, 2020, 66(2): 515-524

[3] CHEN Y, LIU X, ZHAO N, et al. Using multiple UAVs as relays for reliable communications[C] //2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference, 2018; 1-5

[4] LI X, CHEN K, HOU H, et al. Cache-aided multi-hop UAV-relaying networks[J]. Physical Communication, 2019, 33: 165-171

[5] 刘海涛, 方晓钰, 顾新宇, 等. 无人机级联中继通信航迹规划方法[J]. 中国民航大学学报, 2020, 38(2): 1

LIU Haitao, FANG Xiaoyu, GU Xinyu, et al. Path planning method for UAV cascaded relay communication[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2020, 38(2): 1 (in Chinese)

[6] ZHU Ming, CHEN Yueyue, CAI Zhiping, et al. Using unmanned aerial vehicle chain to improve link capacity of two mobile nodes [C] //2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Piscataway, New Jersey, 2015: 494-499

[7] DING R, GAO F, SHEN X S. Deep reinforcement learning based 3D UAV trajectory design and frequency band allocation[C] //2020 IEEE Global Communications Conference, 2020; 1-6

[8] LI D, LI C, LIU H. Path-optimization method for UAV-aided relay broadcast communication system[J]. Physical Communication, 2018, 31: 40-48

[9] 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): 143-148

LI Dongxia, LI Chunming, ZHAO Wenqiang, et al. Trajectory optimization method for the UAV relaying broadcast communication system[J]. Journal of Xidian University, 2018, 45(3): 143-148 (in Chinese)

- [10] LIU X, DU W. Energy-efficiency-based power allocation scheme in multi-user single-DF-relay cognitive networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2020, 114(3): 1927-1941
- [11] LEI M, ZHANG X, YU B, et al. Throughput maximization for UAV-assisted wireless powered D2D communication networks with a hybrid time division Duplex/frequency division duplex scheme[J]. *Wireless Networks*, 2021, 27(3): 2147-2157
- [12] OUYANG J, ZHUANG Y, LIN M, et al. Optimization of beamforming and path planning for UAV-assisted wireless relay networks[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2014, 27(2): 313-320
- [13] 李春鸣. 无人机中继广播通信系统性能优化方法研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2018
LI Chunming. Performance optimization methods for UAV-aided relay broadcast communication system[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2018 (in Chinese)
- [14] XIAO Y, YU B. A truncated aggregate smoothing Newton method for minimax problems[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2010, 216(6): 1868-1879

A trajectory optimization method for UAV cascade relay broadcast communication system

LI Dongxia, SONG Siyu, LIU Haitao

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

Abstract: An unmanned aerial vehicle's(UAV) trajectory optimization is an important way to improve the performance of its relay communication system. The trajectory optimization method for the UAV cascade relay broadcast communication system that uses the decoding and forwarding protocols is studied. Firstly, the expressions of the signal-to-noise ratio of the UAV and the user are given. Then, a joint trajectory optimization method and a distributed trajectory optimization method for cascaded UAVs based on the minimized maximum user interruption probability are proposed. The transmission performance of the system link that uses the two trajectory optimization methods is studied; the mathematical expressions of the relay communication system's traverse capacity and the outage probability of a single user are given. Finally, the influence of the relay communication system's characteristic parameters on the optimal trajectory of the cascade relay UAV and its performance are verified with computer simulations. The simulation results show that the performance of the two trajectory optimization methods is basically the same, thus verifying the effectiveness of the trajectory optimization criterion.

Keywords: UAV cascade; trajectory optimization; interruption probability; broadcast communication

引用格式: 李冬霞, 宋思雨, 刘海涛. 无人机级联中继广播通信系统航迹优化方法[J]. 西北工业大学学报, 2023, 41(3): 579-586

LI Dongxia, SONG Siyu, LIU Haitao. A trajectory optimization method for UAV cascade relay broadcast communication system[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2023, 41(3): 579-586 (in Chinese)