

面向无人机中继通信平台的混合网络编码算法

丛嘉艺, 李彬, 郭宪振, 张若南
(西北工业大学电子信息学院, 710072, 西安)

摘要: 针对现有远距离中继通信系统吞吐率较低的问题,提出了一种面向无人机移动中继平台的混合网络编码算法。该算法综合考虑网络编码策略和空地信道状态,根据用户实时信噪比选择编码方式。根据循环往复式的无人机飞行轨迹和视距信道(LoS)条件,得出远距离用户与无人机中继平台间的信噪比和误码率;引入用户信噪比约束和无人机位置约束,根据无人机与用户间的信噪比和误码率求解出最优通信方式转换时刻;无人机中继平台在转换时刻前后分别采用三时隙网络编码方式和两时隙直传方式进行数据包的接收和发送,从而有效提高中继通信系统整体吞吐率。实验结果表明:当用户间距离为1 600 m、无人机飞行半径为600 m、飞行速度为10 m/s时,混合网络编码算法与传统三时隙移动中继通信算法相比可提升28.42%的系统总吞吐率,并降低17.8%的吞吐率平均变化率,体现出较高的通信效率和系统稳定性,具有良好的应用前景。

关键词: 无人机;中继通信;网络编码;信噪比约束

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202204019 **文章编号:** 0253-987X(2022)04-0176-09



OSID 码

A Hybrid Network Coding Algorithm for Unmanned Aerial Vehicle Relay Communication Platform

CONG Jiayi, LI Bin, GUO Xianzhen, ZHANG Ruonan

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A hybrid network coding algorithm for the Unmanned Aerial Vehicle (UAV) mobile relay platform is proposed to solve the low throughput of existing remote relay communication systems. The algorithm considers the network coding strategy and the state of the air-ground channel and selects the coding mode according to the real-time signal-to-noise ratio (SNR) of the users. Firstly, the SNR and bit error rate (BER) between remote users and UAV relay platform is obtained according to the cyclic reciprocating UAV flight trajectory and line-of-sight channel conditions. Then, the users SNR constraint and UAV position constraint are introduced to solve the optimal communication mode conversion time according to the SNR and BER between UAV and the users. Finally, the UAV relay platform adopts three timeslot network coding modes and two timeslot direct transmission modes to receive and send data packets before and after the switching time to effectively improve the overall throughput rate of the relay communication system. Experimental results show that when the distance between users is 1 600 m, the flight radius of UAV is 600 m and the flight speed of UAV is 10 m/s, the hybrid network coding algorithm improves the total throughput rate of the system by 28.42% and reduces the

收稿日期: 2021-07-22。 作者简介: 丛嘉艺(1998—),男,硕士生;李彬(通信作者),男,副教授,硕士生导师; 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2020YFB1807004;2020YFB1807003)。

网络出版时间: 2021-11-24

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20211123.2057.002.html>

throughput change rate by 17.8%, compared with the traditional three-slot mobile relay communication algorithm. These results reflect that the proposed algorithm has the higher communication efficiency and system stability and it has good application prospect.

Keywords: unmanned aerial vehicle; relay communication; network coding; signal-to-noise ratio constraint

随着无人机(UAV)技术的发展,成本降低和结构小型化,无人机在民用和商业领域出现了许多新应用,例如气象监测、林木监测、交通控制、货物运输、紧急搜救、通信中继等^[1]。无人机通信平台作为可移动的空中通信基站受到了广泛关注^[2]。与地面无线通信基站相比,无人机无线通信基站具有可优化的飞行轨迹、为地面用户提供视距信道(LoS)连接、灵活部署等优点^[1-3]。无人机通信平台已成为空-天-地-海一体化通信的重要组成部分^[4]。

近年来,国内外专家学者针对无人机通信技术问题进行了诸多研究。例如无人机被用来对物联网设备(IoT)进行信息收集和发布^[5-8]或作为空中无线中继节点^[9-14]为用户提供无线通信支持。可以在复杂地形条件下有效地提高远距离系统吞吐率,扩大通信范围的无人机中继通信技术受到了广泛的关注。

按照信息流的流向分类,无人机中继技术可以分为单向中继^[8]和双向中继^[10]两类。在单向中继网络中,信息流从源站到目的站是单向的,中继节点只需要将从源站接收到的信息转发到目的站即可^[11]。在双向中继系统中,无人机中继节点用于辅助两个不能直接通信的用户进行信息交换,无人机接收并转发来自两个用户的信息^[12]。无人机中继通信技术虽然已得到广泛的研究,但是仍存在一些有待讨论的问题。首先,现有的研究主要集中在单向中继系统上^[15-16],而对无人机双向中继系统还缺乏相应的研究。其次,虽然在传统固定位置的地面中继系统中,编码方案的性能得到了充分的分析与研究^[17-18],但是在无人机支持的移动双向中继网络中,其性能还未得到分析与优化。无人机位置随时间改变,无人机中继节点与用户间通信方式也应随之变化。此外,单纯的数据中继已不能满足用户信息保密的需求,需要引入可以提高用户安全性的编码策略。

提高系统保密性的一个有效方式是采用网络编码策略^[19]。传统的地面中继方案已经证明了其可以充分利用时隙资源,提高系统吞吐率,并通过编码方式提升通信安全性^[20-21]。目前已有许多学者将无人机平台与网络编码相结合以提升无人机通信系统

容量和安全性^[21-23],但是对于无人机移动平台,在双向中继模式下,其与两个用户间距离的变化会显著影响与用户的通信速率^[24-25]。对于无人机移动中继平台,在设计中继通信算法时不仅要考虑网络编码方式,还需要考虑无人机飞行方式导致的吞吐率的变化。除此之外,无人机飞行速度会导致通信周期的改变,如果要在工程应用中应用,算法需要具有较强稳定性。

综合考虑上述的无人机中继节点所存在的问题,本文提出一种面向无人机平台的混合网络编码双向中继调度算法,通过判决无人机与用户间信噪比来进行中继方式转换,并选择最优用户进行中继通信。实验结果表明,相较于固定位置中继算法,网络编码可以有效提升无人机中继系统吞吐率,其中混合中继编码相比固定时隙编码中继策略提升效果更好,且具有更高的稳定性。

1 无人机中继平台通信模型

1.1 无人机飞行模型

无人机中继通信平台工作模型如图 1 所示。无人机在固定飞行高度 H 的条件下在用户 1 和用户 2 之间进行循环往复飞行,为 2 个用户提供中继通信服务。

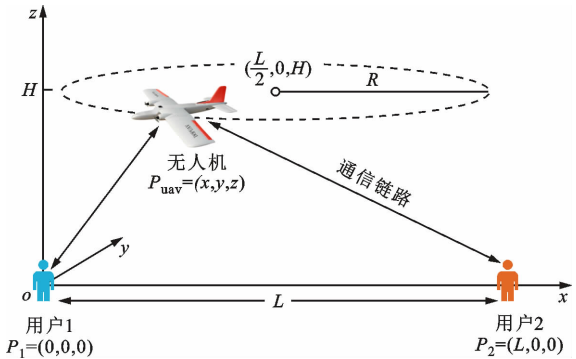


图 1 无人机中继通信平台工作模型
Fig. 1 Work model of UAV relay communication platform

为确定无人机和地面用户的三维位置,以用户 1 为坐标原点建立笛卡尔坐标系。相距 L 的 2 个用户的位置坐标可以表示为 $P_1 = (0,0,0)$ 和 $P_2 = (L,0,0)$,无人机中继节点的位置坐标可以表示为

$P_{\text{uav}} = (x, y, z)$ 。不失一般性,为保证无人机中继通信平台在 1 个周期内可以为 2 个用户提供性能一致的通信服务,无人机的飞行轨迹被设定为 1 个以 $(L/2, 0, H)$ 为几何中心的循环往复飞行模式。无人机循环往复飞行模式的转向位移远小于巡航位移,因此转向时间可以被忽略。

设无人机飞行半径为 R ,无人机的初始位置为 $(L/2 + R, 0, H)$,以速度 v 在用户 2 和用户 1 之间进行循环往复飞行,则无人机在 1 个飞行周期内实时位置的 x 轴坐标可表示为

$$\begin{cases} x = \frac{L}{2} + R - vt, & 0 < t \leq \frac{2R}{v} \\ x = \frac{L}{2} - R + v\left(t - \frac{2R}{v}\right), & \frac{2R}{v} < t \leq \frac{4R}{v} \end{cases} \quad (1)$$

无人机位置在 $yo z$ 平面上的投影可表示为

$$\begin{cases} y = 0 \\ z = H \end{cases} \quad (2)$$

1.2 无人机通信模型

由于无人机工作在较高的飞行高度,其与地面用户之间的信道链路可以近似为视距信道。无人机中继平台与 2 个用户之间的信道增益 $h_{u,1}$ 和 $h_{u,2}$ 可以表示为

$$h_{u,1} = \beta_0 (\|P_{\text{uav}} - P_1\|)^{-2} \quad (3)$$

$$h_{u,2} = \beta_0 (\|P_{\text{uav}} - P_2\|)^{-2} \quad (4)$$

式中: β_0 是参考距离为 1 m 处的信号接收功率,其大小由天线增益和载波频率决定。

在视距信道条件下,无人机与用户 1 之间的信噪比 $E_{\text{SNR},1}$,无人机与用户 1、用户 2 之间的瞬时数据传输速率 $C_{u,1}$ 、 $C_{u,2}$ 可以表示为

$$E_{\text{SNR},1} = \frac{P_t h_{u,1}}{\sigma^2} \quad (5)$$

$$C_{u,1} = B \log\left(1 + \frac{P_t h_{u,1}}{\sigma^2}\right) \quad (6)$$

$$C_{u,2} = B \log\left(1 + \frac{P_t h_{u,2}}{\sigma^2}\right) \quad (7)$$

式中: P_t 为无人机中继平台通信发射端功率; B 为带宽,不失一般性,本文认为无人机与用户 1、用户 2 之间的通信带宽均为 B ; σ^2 为噪声功率密度。显然, $C_{u,1}$ 、 $C_{u,2}$ 是随无人机实时位置变化而变化的函数,因此合理地设置无人机飞行轨迹可以有效地优化无人机平台对地面用户的数据传输速率。

由于无人机往复飞行的飞行轨迹为对称轨迹,1 个飞行周期内用户 1 和用户 2 的吞吐率相等,因此在进行吞吐率分析时只需分析用户 1 的数据吞吐率即可。用户 1 的误码率 $R_{u,1}$ 经过高斯误差函数运

算,可以表示为

$$R_{u,1} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{P_t h_{u,1}}{\sigma^2}}\right) \quad (8)$$

2 网络编码

2.1 无人机网络编码

在无人机无线中继系统中引入网络编码概念,旨在减少通信时隙、提高通信系统吞吐率、增强中继系统信息保密性。

无人机单向中继方式如图 2(a)所示,无人机平台在第 1 时隙接收来自用户 2 的数据 m_2 ,在第 2 时隙飞行至用户 1 附近后卸载数据。第 3、第 4 时隙的数据上传与卸载方式与第 1、第 2 时隙相同但是接收与发送目标用户相反。无人机双向中继方式如图 2(b)所示,无人机在第 1、第 2 时隙分别接收来自 2 个用户的数据,并在第 3、第 4 时隙将数据分别下发给对应的接收用户。无人机网络编码中继通信方式如图 2(c)所示,无人机中继平台在第 1、第 2 时隙分别接收来自用户 1 和用户 2 的数据,并对数据进行编码(例如 $m_1 \oplus m_2$),将 2 组数据合并为 1 组数据,并在第 3 时隙将数据在通信空间内进行广播。2 个用户接收数据并进行解码,从而获取所需数据。使用网络编码可以有效地减少完成 1 次通信所需要的时隙数,从而提高系统吞吐率。

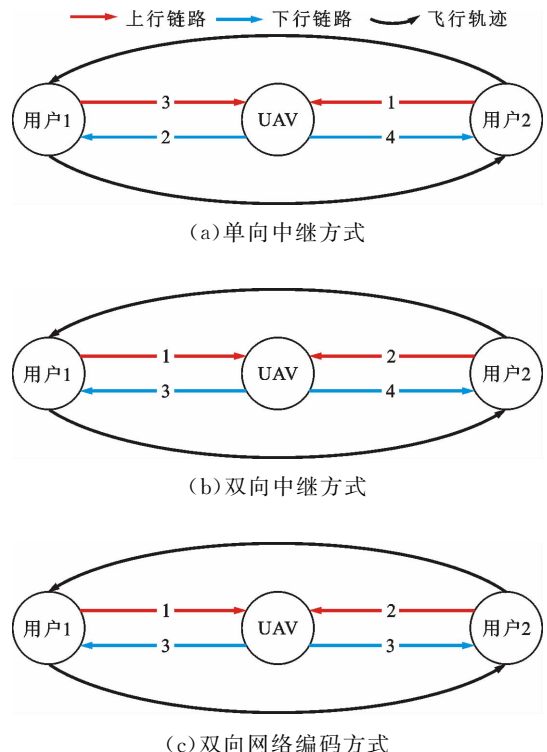


图 2 无人机网络编码方式

Fig. 2 Network coding modes of UAV

为简化叙述,本文采用异或网络编码。由于传输速率不一致,各时隙转发或接收的数据包数不相同,本文采用文献[14]提出的滑动窗口编码机制来减少无人机中继平台内存压力。无人机在飞行过程中,由于无人机与用户 1 和用户 2 之间距离不相等,接收到的数据包数也不相同,因此无人机中继平台缓存的来自 2 个用户的数据包长度也不相同。如果无人机与某一用户进行双时隙通信,则滑动窗口将始终保持可以发送的最大数据包数以提升系统吞吐量;如果无人机与 2 个用户进行三时隙移动编码通信,由于无人机与 2 个用户信道容量的差异,在无人机接收数据包时隙缓存的用户数据包数通常不相等。此时在第 3 时隙广播过程中,无人机选择两种数据包的最小值,并以该数据包大小作为移动窗口大小在广播时隙中进行滑动选取应发送的数据包,再经编码后进行数据广播。由于飞行轨迹的对称性,用户 1 与用户 2 的数据包大小关系周期性变化,因此这种滑动编码方式可以在 1 个飞行周期内完成全部数据包的下发,完成中继通信任务。

这种采用网络编码的中继无人机通信平台可以将飞行周期 T 划分为 n 个时隙 τ , 即 $n = T/\tau$, 则各时隙所对应的信道容量可以表示为

$$C_1 = \int_{3\tau}^{(3+1)\tau} B \log \left(1 + \frac{P_1 h_{u,1}}{\sigma^2} \right) dt \quad (9)$$

$$C_2 = \int_{(3+1)\tau}^{(3+2)\tau} B \log \left(1 + \frac{P_2 h_{u,2}}{\sigma^2} \right) dt \quad (10)$$

$$C_3 = \int_{(3+2)\tau}^{(3+3)\tau} B \log \left(1 + \frac{P_1 h_{u,1}}{\sigma^2} \right) dt \quad (11)$$

式中: P_1 、 P_2 分别表示用户 1 和用户 2 的通信输出功率; C_1 、 C_2 和 C_3 为 3 个时隙对应信道的信道容量。

为在广播时隙实现系统吞吐率的最大化,混合中继编码算法需要综合考虑无人机已缓存的数据包情况和无人机中继平台所允许发送的数据包大小。不妨假设第 3 时隙无人机中继平台进行网络编码后的数据包大小为 K_u 。第 3 时隙的数据包大小并不固定,其大小取决于无人机中继平台缓存的来自用户 1 和用户 2 的数据包 S_1 、 S_2 。对于无人机中继通信平台,显然 S_1 、 S_2 不会大于无人机允许的最大发送数据包 $K_{u,\max}$, 否则无人机在前 2 个时隙无法完整接收 2 个用户的数据。在本文提出的混合中继策略中,存在无人机与某一个用户的单向通信过程。由于在前两时隙通信中无人机接收的来自单一用户的数据包不相等, S_1 、 S_2 的大小周期性变化,从而导

致 K_u 的变化。 K_u 可以表示为 $K_u = \min\{S_1, S_2\}$ 。这种无人机网络编码中继方式(UNCWR),将作为混合网络编码调度算法中的三时隙通信策略进行使用。

2.2 混合编码调度算法

无人机作为移动的中继节点,其与地面用户间的通信速率会随无人机位置变化而发生改变。式(5)表明当距离某个用户较远时,接收信息的用户可能由于信噪比太低而无法正常接收和解调数据。这种情况会导致系统总吞吐率的下降,浪费通信时隙。为解决这一问题,本文提出了一种单向中继方式和网络编码混合中继调度算法。这两种中继方式工作流程如图 2(a)、2(c)所示。混合编码调度算法采用信噪比作为中继转换方式的判别条件。

由于无人机飞行轨迹的对称性,两用户中继通信系统存在 4 个转换时刻。为分析转换时刻的合理性,循环往复飞行轨迹被等分为 4 个阶段。因此无人机总飞行轨迹被分为 8 个飞行阶段,无人机混合编码模式转换如图 3 所示。在这种对称的飞行轨迹下,对用户 1 进行分析时,吞吐率可以简化为阶段 2、阶段 3 和阶段 4 的分析。

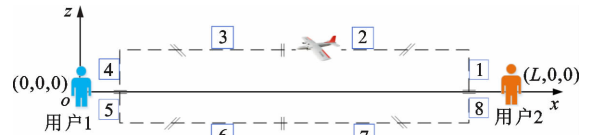


图 3 无人机混合编码模式转换示意图

Fig. 3 A conversion diagram of HUNCWR mode

在图 3 所示的无人机飞行轨迹中,阶段 1 无人机中继平台更接近用户 2,因此与用户 2 之间进行两时隙直传,即对用户 2 卸载来自用户 1 的无编码数据,并接收来自用户 2 上传的数据。阶段 2 无人机距离用户 1 和用户 2 信噪比相差不大,此时无人机将采用网络编码的方式减少通信时隙,提升吞吐率。其他飞行阶段的分析与阶段 1 和阶段 2 分析类似,不再赘述。这种混合中继方式的问题的关键在于确定其中继转换点的时刻和位置。同样地,在混合中继编码调度策略下,用户 1 能进行有效数据传输的阶段为阶段 2 至阶段 7。考虑飞行轨迹的对称性,用户 1 在 1 个飞行周期内的平均吞吐率为

$$\bar{K} = \frac{K_{\text{total}}}{T} = \frac{2(P_{a2} + P_{a3} + P_{a4})}{4R/v} \quad (12)$$

式中: P_{a2} 、 P_{a3} 、 P_{a4} 分别表示用户 1 在阶段 2、阶段 3 和阶段 4 接收到的数据包数; K_{total} 为一周期总接收

包数。

信噪比的门限 E_{th} 是影响无人机中继平台的工作模式阶段划分的主要因素。当某一个用户与无人机之间的信噪比大于 E_{th} 时,无人机将与信道条件较好的用户进行两时隙直传,在其他情况下进行网络编码中继通信。由式(5)可知,无人机与用户1的信噪比随无人机与用户1之间的距离的增加而减小。无人机循环往复的飞行模式使得 $E_{SNR,1}(t) = E_{th}$ 的时刻必定成对出现,且两时刻无人机位置相对于用户1、用户2的连线对称。根据式(5)和信噪比的门限 E_{th} ,可以计算得到针对用户1的通信方式切换时间 t_0 和 t_0^* 。因为 t_0 和 t_0^* 为两个等价可行解,不妨设 $t_0 < t_0^*$, t_0 和 t_0^* 的表达式为

$$t_0 = \left(\frac{L}{2} + R - \sqrt{\frac{\beta_0 P_t}{\sigma^2 E_{th}} - H^2} \right) / v \quad (13)$$

$$t_0^* = \left(\frac{L}{2} + R + \sqrt{\frac{\beta_0 P_t}{\sigma^2 E_{th}} - H^2} \right) / v \quad (14)$$

无人机的轨迹划分包括飞行时刻和转换时刻,对于这两类时刻的大小关系需要进行讨论以确保转换时刻的合理性。整个无人机飞行周期总飞行时长为 $4R/v$; t_0 和 t_0^* 的大小关系为 $t_0 < t_0^*$; 对于 t_0 与 R/v 的大小关系,若设定的无人机混合编码策略能够实现,用户1与用户2的通信方式切换点不应重叠,即 $R/v < t_0$ 。由无人机飞行轨迹的对称性可得,在阶段2,即距离另一用户更近且采用三时隙网络编码通信策略阶段的起始时间为 $2R/v - t_0$, 停止时间为 R/v , 即 $1/4$ 无人机飞行周期; 同样地,由对称关系可知阶段3的起始时间为 R/v , 停止时间为 t_0 , 为距离本用户更近且采用三时隙网络编码通信策略阶段; 阶段4为与用户1进行双时隙通信阶段,起始时间为 t_0 , 停止时间为 $2R/v$ 。在此条件下,用户1在不同飞行阶段的接收数据包数为

$$P_{a2} = C_0 \sum_{i=0}^{(\frac{R}{v}-t_0)/3\tau} \int_{(3i+\frac{t_0}{\tau})\tau}^{(3i+1+\frac{t_0}{\tau})\tau} \ln \left\{ 1 + P_0 / \left[\left(\frac{L}{2} + R - vt \right)^2 + H^2 \right] \right\} dt \quad (15)$$

$$P_{a3} = C_0 \sum_{i=0}^{(\frac{R}{v}-t_0)/3\tau} \int_{(3i+\frac{R}{v\tau})\tau}^{(3i+1+\frac{R}{v\tau})\tau} \ln \left\{ 1 + P_0 / \left[\left(\frac{L}{2} - R + vt \right)^2 + H^2 \right] \right\} dt \quad (16)$$

$$P_{a4} = C_0 \sum_{i=0}^{t_0/2\tau} \int_{(2i+\frac{R}{v\tau})\tau}^{(2i+1+\frac{R}{v\tau})\tau} \ln \left\{ 1 + P_0 / \left[\left(\frac{L}{2} - R + vt \right)^2 + H^2 \right] \right\} dt \quad (17)$$

式中: $P_0 = \frac{P_t \beta_0}{\sigma^2}$; $C_0 = \frac{B}{\ln 2}$ 。将式(15)中的积分项进行近似处理,可得下式

$$\int_{(3i+\frac{t_0}{\tau})\tau}^{(3i+1+\frac{t_0}{\tau})\tau} \ln \left\{ 1 + P_0 / \left[\left(\frac{L}{2} + R - vt \right)^2 + H^2 \right] \right\} dt \approx \left[\ln(1+K)t - 2\sqrt{P_0} \arctan \left(\frac{-2vt + L + 2R}{2\sqrt{R}} \right) / v - \frac{L + 2R}{2v} \ln(1+K) \right] \Big|_{t=3i\tau+t_0}^{t=3i\tau+t_0+\tau} \quad (18)$$

式中: $K = 4P_0 / [(2vt - L - 2R)^2 + H^2]$ 。由于在数量级比较上 P_0 远大于 L, H, v , 上式的后两项均可以近似为0, 积分项可以进一步近似为

$$\int_{(3i+\frac{t_0}{\tau})\tau}^{(3i+1+\frac{t_0}{\tau})\tau} \ln \left\{ 1 + P_0 / \left[\left(\frac{L}{2} + R - vt \right)^2 + H^2 \right] \right\} dt \approx \ln \{ 1 + 4P_0 / \{ [2v(3i\tau + t_0) - L - 2R]^2 + H^2 \} \} \quad (19)$$

其他两项同理类推,式(15)~(17)可以化简为

$$P_{a2} = C_0 \sum_{i=0}^{(\frac{R}{v}-t_0)/3} \ln \left[1 + \frac{4P_0}{(L + 2R - 2v(3i + t_0))^2} \right] \quad (20)$$

$$P_{a3} = C_0 \sum_{i=0}^{(\frac{R}{v}-t_0)/3} \ln \left\{ 1 + 4P_0 / \left[L - 2R + 2v \left(3i + \frac{R}{v} \right) \right]^2 \right\} \quad (21)$$

$$P_{a4} = C_0 \sum_{i=0}^{t_0/2} \ln \left\{ 1 + 4P_0 / \left[L + 2R - 2v \left(2i + \frac{2R}{v} - t_0 \right) \right]^2 \right\} \quad (22)$$

通过分析和简化,本文给出了无人机混合网络编码调度算法(HUNCWR)系统吞吐率计算方式。这种计算方式与网络编码方法一致,便于仿真实验结果的分析。无人机混合中继编码系统算法描述如下。

算法1 无人机混合中继编码算法

输入 节点距离 L 、无人机轨迹半径 R 、飞行速度 v 、时隙间隔 τ 、信噪比门限 E_{th}

输出 接收包数 K_{total} 、平均吞吐率 $\bar{K}$

1. 计算无人机飞行周期 $T = 2\pi R/v$, 中继方式转换时间 t_0, t_0^* , 时隙数 $n = \lfloor T/\tau \rfloor$
2. for $i = 1$ to n
3. if $n\tau < 2R/v - t_0$ or $n\tau > 2R/v + t_0$
4. 计算 $K_{2,u}$, 发送并被无人机存储, 无人机向用户2发送 $K_{u,2}$ 。无人机与用户2双时隙中继

```
5. else if  $t_0 < n\tau < t_0^*$ 
6.   计算  $K_{1,u}$ , 发送并被无人机存储, 无人机向用户
   1 发送  $K_{u,1}$ 。无人机与用户 1 双时隙中继
7. else
8.   for  $i = 1$  to  $n$ 
9.     if  $\text{rem}(i, 3) = 1$ 
10.      计算  $K_{1,u}$ , 发送并被无人机存储
11.    else if  $\text{rem}(i, 3) = 2$ 
12.      计算  $K_{2,u}$ , 发送并被无人机存储
13.    else
14.      计算  $K_{u,1} = \min\{K_{u,\max}, S_1, S_2\}$  并在网络编
      码完成后进行数据广播。
15.    end if
16.  end for
17. end if
18. end for
```

3 实验仿真与分析

本实验是在 Matlab2020a 环境架构下进行的, 无人机三时隙网络编码算法和无人机混合编码调度算法仿真参数见表 1。

表 1 HUNCWR 算法场景参数设置

Table 1 Parameter setting of HUNCWR Scenario

参数	数值	参数	数值
H/m	100	$\sigma^2/(\text{dB} \cdot \text{Hz}^{-1})$	-170
β_0/dB	-40	P_t/W	0.5
B/MHz	20	l	1 024
τ/s	0.5	$K_{u,\max}$	10

本节对比分析了两种无人机中继通信算法与传统的固定位置四时隙中继、固定位置网络编码中继的性能。对于两种固定位置的中继方法, 无人机中继节点始终位于 $(L/2, 0, H)$ 处。由于两个用户的位置和无人机轨迹具有中心对称性, 因此任意一个用户的吞吐率均可代表系统吞吐率。本文在仿真实验中选取用户 1 进行分析。

在飞行半径 $R=600\text{ m}$ 、飞行速度 $v=10\text{ m/s}$ 的条件下, 4 种中继方式下用户 1 吞吐率随用户间距离的变化如图 4 所示。混合中继网络编码算法可在 2 个用户间进行数据包的搬移, 并根据信道信噪比的大小差异进行通信方式的选择, 从而在用户间距离 L 较大时有效增加用户吞吐率。在用户间距离 L 较小时, 无人机与两个用户间信噪比均高于设定的信噪比门限 E_{th} , 在各位置均进行三时隙通信, 而混

合中继策略需要进行移动飞行, 浪费部分有效通信时间, 此时固定位置通信效果好于本文提出的混合中继方式。此外, 混合网络编码中继调度算法下的吞吐率随用户间距离变化最为缓慢, 证明本算法具有更强的稳定性。

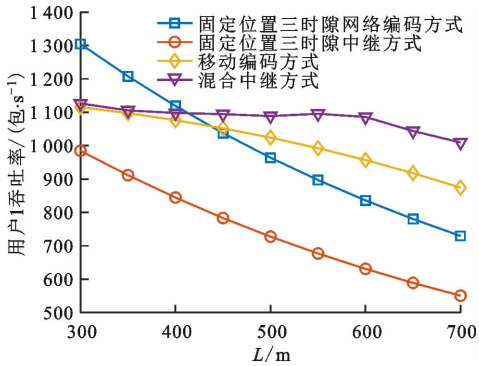


图 4 不同中继方式下用户吞吐率随用户间距离变化
Fig. 4 Relationships between user throughput and L under different relay modes

图 5 为用户 1 吞吐率随无人机飞行半径的变化。固定位置中继通信方式不存在飞行轨迹, 无人机飞行半径 R 对固定位置中继通信方式无影响。当飞行半径较小时, 飞行轨迹与固定位置通信基本相同, 吞吐率接近; 随着半径增加至最佳半径, 本文提出的混合中继算法相较于三时隙固定位置中继通信可以提升吞吐率 52.7%。相较于固定位置的网络编码算法的用户吞吐率, 三时隙移动网络编码算法只能提升 28.42%。当 R 进一步增加至超过用户间距离 L 后, 无人机移动中继系统吞吐率会随之下降。混合中继编码所引入的两时隙直传阶段可以有效地减少由于飞行半径增大导致的吞吐率下降。

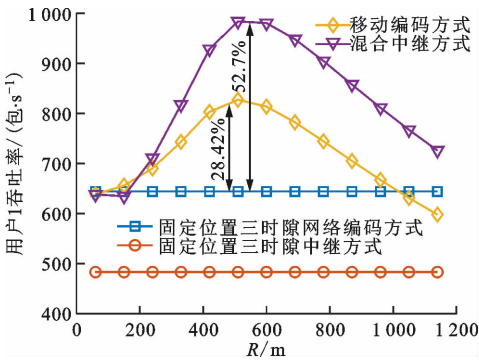


图 5 不同中继方式下用户吞吐率随飞行半径的变化
Fig. 5 Relationships between user throughput and R under different relay modes

图 6 给出了移动网络编码算法与混合中继编码算法的吞吐率随飞行半径和用户间距离的变化。在

传统移动中继通信方式中,各时隙选择的通信用户是固定的,使得通信系统在部分时隙选择信道条件较差的用户,降低整个周期内的吞吐率。在相同飞行半径和用户距离下,混合中继方式的吞吐率均高于网络编码方式,在用户间距离 L 为 700 m 时,混合中继编码算法可以提升吞吐率 18.34%;在用户间距离 L 为 900 m 时,混合中继编码算法可以提升吞吐率 23.92%。

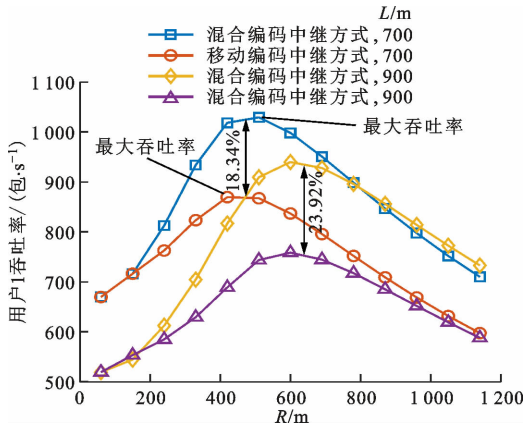


图 6 吞吐率随飞行半径和用户间距离变化的对比
Fig. 6 A comparison of throughputs with different R and L

图 7 为在飞行半径 $R=300$ m、用户间距离 $L=800$ m 的条件下,不同飞行速度下吞吐率随飞行半径的变化。更大的飞行速度使得飞行周期 T 变短,可用时隙 n 减少,导致 1 个飞行周期内系统吞吐率下降。混合中继编码算法在每一时隙均进行信道条件判定,而非固定时隙用户方式,环境适应性更强,因此在相同的速度变化条件下,平均吞吐率下降更小。对于无人机中继混合编码方式,其吞吐率受飞行速度 v 的影响在 1 个周期内平均变化率为 0.65%,显著低于移动网络编码模式的变化率 3.65%。表明混合中继编码方式比移动网络编码调度算法稳定性更强。

E_{th} 的大小直接影响着网络编码方式飞行距离在一个飞行周期总距离的占比。 E_{th} 对混合编码调度算法和用户吞吐率的影响如图 8 所示。如图 8(a)所示,网络编码模式的占比随 E_{th} 增加而增加,这与式(13)(14)的表述一致。在图 8(b)中, E_{th} 较小使得 $R/v > t_0$,即不存在三时隙网络编码阶段,此时系统吞吐率较低。随着 E_{th} 的增加,引入更多的三时隙网络编码方式可以有效地通过切换通信方式增大用户吞吐率。当 E_{th} 进一步增加时,通信系统中三时隙编码增加,浪费与用户间距离较近位置处的两时隙通信机会,导致系统吞吐率的下降。

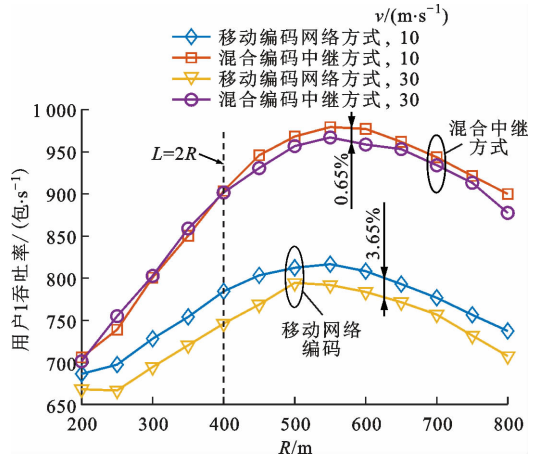
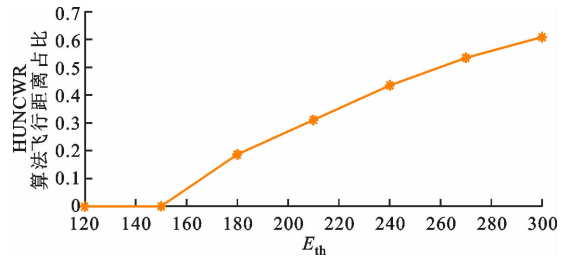
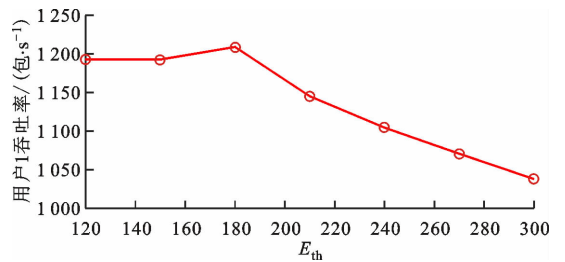


图 7 不同飞行速度下吞吐率随飞行半径的变化
Fig. 7 A comparison of throughputs with R at different v



(a) HUNCWR 算法的飞行距离占比随 E_{th} 的变化



(b) 用户吞吐率随 E_{th} 的变化

图 8 E_{th} 对 HUNCWR 算法的飞行距离占比和用户吞吐率的影响

Fig. 8 E_{th} 's influence on HUNCWR rate of flight distance and throughput

通过以上实验结果的对比分析,证明了混合网络编码策略在用户间距离较大与飞行半径较大的条件下,相较无人机固定位置中继通信模式和移动网络编码算法具有更好的稳定性,并可获得更大的用户吞吐率。

4 结 论

本文提出了一种面向无人机中继通信平台的混合网络编码调度算法以提高中继系统吞吐率,并进行仿真实验测试。主要创新点包括无人机网络编码

算法、混合网络编码切换方式、与无人机双向中继系统吞吐率计算方式。首先对无人机中继平台的工作方式进行了分析,给出了无人机平台基本飞行模型。在此基础上介绍了中继通信的几种常见方式并进行了定性分析,给出了一种面向无人机中继通信平台的网络编码方式。通过对这种网络编码方式和无人机的工作特点的综合考虑,最终提出了一种无人机混合编码中继通信调度算法。仿真实验结果表明:相较于固定位置的网络编码算法,本文提出的混合网络编码调度算法可以提升系统吞吐率 52.7%;在不同的飞行速度下,移动网络编码算法用户吞吐率平均变化率为 3.65%,混合网络编码调度算法吞吐率平均变化率为 0.65%,证明了混合中继编码算法可以显著地提高通信系统指标,增大用户吞吐率,增强系统的稳定性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] ZENG Yong, ZHANG Rui, LIM T J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(5): 36-42.
- [3] WU Qingqing, ZENG Yong, ZHANG Rui. Joint trajectory and communication design for multi-UAV enabled wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(3): 2109-2121.
- [4] 贺子健, 艾元, 闫实, 等. 无人机通信网络的容量与覆盖性能 [J]. *电信科学*, 2017, 33(10): 65-70.
HE Zijian, AI Yuan, YAN Shi, et al. Performance evaluation of capacity and coverage in UAV communication networks [J]. *Telecommunications Science*, 2017, 33(10): 65-70.
- [5] ALZENAD M, EL KEYI A, LAGUM F, et al. 3-D placement of an unmanned aerial vehicle base station (UAV-BS) for energy-efficient maximal coverage [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2017, 6(4): 434-437.
- [6] LYU Jiangbin, ZENG Yong, ZHANG Rui, et al. Placement optimization of UAV-mounted mobile base stations [J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(3): 604-607.
- [7] LU Jiaxun, WAN Shuo, CHEN Xuhong, et al. Energy-efficient 3D UAV-BS placement versus mobile users' density and circuit power [C]//*Proceedings of the 2017 IEEE Globecom Workshops*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 1-6.
- [8] LI Jiaxun, ZHAO Haitao, WANG Haijun, et al. Joint optimization on trajectory, altitude, velocity, and link scheduling for minimum mission time in UAV-aided data collection [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(2): 1464-1475.
- [9] 吴启晖, 吴伟. 无人机辅助边缘计算的能效最大化算法设计 [J]. *通信学报*, 2020, 41(10): 15-24.
WU Qihui, WU Wei. Algorithm design on energy efficiency maximization for UAV-assisted edge computing [J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(10): 15-24.
- [10] SAMIR M, SHARAFEDDINE S, ASSI C M, et al. UAV trajectory planning for data collection from time-constrained IoT devices [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(1): 34-46.
- [11] 陈璞, 严飞, 刘钊, 等. 通信约束下异构多无人机任务分配方法 [J]. *航空学报*, 2021, 42(8): 306-319.
CHEN Pu, YAN Fei, LIU Zhao, et al. Communication-constrained task allocation of heterogeneous UAVs [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(8): 306-319.
- [12] EOM S, LEE H, PARK J, et al. UAV-aided two-way mobile relaying systems [J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(2): 438-442.
- [13] ZENG Yong, ZHANG Rui, LIM T J. Throughput maximization for UAV-enabled mobile relaying systems [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(12): 4983-4996.
- [14] YANG Juan, SHI Zhiping, WANG Chenxi, et al. Design of optimized sliding-window BATS codes [J]. *IEEE Communications Letters*, 2019, 23(3): 410-413.
- [15] 李彬, 李泉, 张若南, 等. 无线组播网络中应用网络编码的动态组合重传算法 [J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(12): 38-44.
LI Bin, LI Quan, ZHANG Ruonan, et al. A retransmission algorithm with dynamic linear combination based on network coding in wireless multicast networks [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(12): 38-44.
- [16] BAEK H, LIM J. Design of future UAV-relay tactical data link for reliable UAV control and situational awareness [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(10): 144-150.
- [17] LIU C H, XUE F. Network coding for two-way relaying: rate region, sum rate and opportunistic scheduling

- ling [C]//Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Communications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 1044-1049.
- [18] 周清峰, 丁志中, 开彩红. 面向传感器网络的双向中继协议 [J]. 通信学报, 2014, 35(3): 30-37.
ZHOU Qingfeng, DING Zhizhong, KAI Caihong. Two-way relaying protocol tailored for sensor network [J]. Journal on Communications, 2014, 35(3): 30-37.
- [19] 冀保峰, 宋康, 王毅, 等. 联合网络编码和中继选择的协作传输方案及其性能分析 [J]. 通信学报, 2015, 36(3): 41-51.
JI Baofeng, SONG Kang, WANG Yi, et al. Cooperative transmission scheme of relay selection combined with network coding and its performance analysis [J]. Journal on Communications, 2015, 36(3): 41-51.
- [20] PAN Cunhua, REN Hong, DENG Yansha, et al. Joint blocklength and location optimization for URLLC-enabled UAV relay systems [J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(3): 498-501.
- [21] BLÁZQUEZ-GARCÍA R, SUN Xiaoliang, BURGOS-GARCIA M, et al. Smart relay architecture for over-the-horizon high quality communications with unmanned aerial vehicles [J]. IEEE Access, 2019, 7: 76317-76327.
- [22] LARSEN E, LANDMARK L, KURE Ø. Optimal UAV relay positions in multi-rate networks [C]//Proceedings of the 9th 2017 IFIP Conference on Wireless Days. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 8-14.
- [23] DE FREITAS E P, HEIMFARTH T, NETTO I F, et al. UAV relay network to support WSN connectivity [C]//Proceedings of the International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 309-314.
- [24] 张尚伟, 刘家佳, 许铁鑫. 无人机辅助的蜂窝数据流量卸载及保密传输方案 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(2): 121-128.
ZHANG Shangwei, LIU Jiajia, XU Tiexin. An unmanned aerial vehicle-assisted cellular data traffic offloading and secure transmission scheme [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(2): 121-128.
- [25] 崔高峰, 徐媛媛, 张尚宏, 等. 基于最小能耗的多无人机无线网络数据安全数据卸载策略 [J]. 通信学报, 2021, 42(5): 51-62.
CUI Gaofeng, XU Yuanyuan, ZHANG Shanghong, et al. Secure data offloading strategy for multi-UAV wireless networks based on minimum energy consumption [J]. Journal on Communications, 2021, 42(5): 51-62.

(编辑 武红江 刘杨)