无人机辅助毫米波车联网的中继选择与传输调度联合优化

Jing Li、Yong Niu，*IEEE*会员，Hao Wu，*IEEE*会员，Bo Ai，*IEEE*会士，Ruisi He，*IEEE*高级会员，Ning Wang，*IEEE*会员，Sheng Chen，*IEEE*会士

arXiv:2303.02940v1 [cs.IT] 6 Mar 2023

摘要——**为应对移动通信流量的爆炸式增长，凭借丰富带宽资源的毫米波通信已应用于车联网。由于毫米波信号易受阻塞影响，我们引入无人机辅助双向中继系统，以增强车联网连接并扩展覆盖范围。在这种动态场景下，如何提高传输效率并降低时延是一项颇具挑战的问题。本文针对中继选择与传输调度构建联合优化问题，旨在满足吞吐量要求的同时缩短传输时间。为解决这一问题，本文提出了两种方案。第一种是随机中继选择与并发调度（RCS），这是一种分两步实现的低复杂度算法。第二种是结合动态调度的联合中继选择（JRDS），该方案可完全避免中继竞争，并充分利用潜在的并发能力，从而在RCS基础上进一步提升性能。通过在不同环境下，针对不同流数量和车辆速度进行大量仿真，我们证明RCS和JRDS方案在传输时间和网络吞吐量方面均显著优于现有方案。我们还分析了阈值选择对可实现性能的影响。**

索引词—**毫米波、车联网、中继选择、并发调度、动态调度、联合优化。**

I. 引言

不断增长的吞吐量需求促使运营商在车联网中利用毫米波（mmWave）频段，以提高交通效率并支持数据密集型服务 [1]。毫米波频谱的应用被视为下一代通信系统的基石。然而，由于路径损耗（PL）高且经常受到阻塞，毫米波车车通信的链路质量会下降，并发生传输中断 [2], [3]。改善覆盖、吞吐量和链路可靠性的有效方法是采用中继辅助传输，由飞行无人机（UAV）和地面车辆担任中继节点 [4]。具体而言，多架无人机通过空对地（A2G）通信辅助地面车联网，相较于地面车辆中继，这种方式有以下三项优势。（i）灵活部署：根据业务需求，可将无人机部署在拥挤路口和事故现场等特定路段，从而缓解地面通信拥塞；（ii）高效传输：凭借可控移动性和较高的飞行高度，无人机很有可能与地面车辆建立视距（LoS）通信链路[5]；（iii）连接增强：由于地面传播环境复杂，地面中继车联网链路可能失效，而无人机能够提供辅助无线连接 [6]。

尽管无人机通信的集成带来了诸多益处，但要提升空地毫米波移动网络的性能，仍面临以下挑战。首先，由于无人机受功率限制且处理能力有限，因此必须有效利用空中资源，以最大限度地提高通信成功率、提升吞吐量并实现无缝无线覆盖。此外，任务密集区域可能出现严重的中继竞争，导致请求车辆等待时间增加，不利于自动驾驶、计算卸载、高清电视（HDTV）等时延敏感型服务。除此之外，网络中的交通状态和传输环境都在动态变化，因此有效的传输方案对于应对时变通信网络尤为重要。因此，如何基于时变网络状态合理进行空中中继选择并高效调度，以转发服务请求，值得深入研究 [7]。

A. 相关工作

作为提升系统性能的一种有前景的方法，中继辅助毫米波通信受到了广泛关注。例如，Wu 等 [8] 利用两跳设备到设备（D2D）中继来同时提升毫米波蜂窝网络的覆盖和频谱效率。基于对阻塞效应的分析，Ruiz 等 [9] 在第五代移动通信框架下提出了一种用于增强覆盖的最优中继定位方法。此外，Eltayeb [10]创新性地引入了一种中继辅助方案，以纠正由非理想天线阵列引起的信道估计误差。近年来，中继在复杂毫米波车联网中的应用优势已得到验证 [11], ，为毫米波中继移动网络的构建与标准化铺平了道路。在应用方面，Xiao 等 [12] 为多源多中继协作通信设计了中继选择和功率分配策略，实现了显著的节能效果。受无人机辅助潜在益处的启发，一些研究部署了灵活的无人机中继，用于探测道路状况、提供应急通信，并加强车辆之间的通信链路[5], [13]。具体而言，该工作 [5] 推导了一种协作空—

地交互网络框架，并采用多跳传输。Khabbaz等 [13] 提出了一种无人机移动性模型，并据此开展了整体性能评估，阐明了将无人机用作车联网中外部中继的可行性。然而，高度动态的车载环境仍然给无人机辅助系统的性能优化带来了诸多技术挑战，仍有必要开展进一步研究。

毫米波频段的另一个主要研究重点是高效传输的调度方案。Hadded 等人 [14]指出，由于时分多址技术能够实现无冲突且高可靠性的传输，因此适用于车载应用。基于此，他们进一步对适用于集中式、分布式和基于簇的网络拓扑的时分多址介质访问控制（MAC）协议进行了分类。在 [15], 中，研究者提出了采用定向天线进行并发传输，以实现空间复用；该方案在毫米波网络中的性能优于时分多址。Qiao 等人 [16] 提出了多跳并发传输（MHCT）方案，以利用毫米波中继系统的空间容量，获得了优于单跳方案的性能。此外，大量研究 [17]–[19]实现了毫米波无线个域网（WPAN）和无线回传网络中的链路调度，然而这些研究受到静态条件的限制。

B. 研究动机与贡献

现有研究在一定程度上提升了网络性能，但尚未充分解决毫米波车载通信的可靠性问题，具体而言：

- 依赖地面中继时，远程收发器之间的车车通信链路可能会失效。但对于无人机中继系统而言，由于电池寿命有限，在高业务负载下很难保证令人满意的网络性能。迄今为止，针对车联网中无人机集成双向中继机制的研究仍然很少。
- 车辆之间的相对位置和遮挡情况会动态变化，因此在构建候选中继集和确定中继节点时需要进行移动性预测。

- 目前，很少有研究将中继选择与并发传输相结合，以减少无人机辅助车联网中的时间消耗，从而显著提高传输效率。

为弥补这一空白，我们采用一种新的候选中继集构建方法，随后求解无人机辅助毫米波车联网中的中继选择与传输调度联合优化问题。启用全双工（FD）方案，以进一步提高传输效率。我们的主要贡献总结如下。

- 我们将无人机辅助毫米波车联网中的中继选择与传输调度联合优化问题建模为混合整数非线性规划（MINLP）问题，旨在满足所有流的业务需求，同时最大限度地减少时间消耗。在所建模的问题中，我们充分利用了全双工机制和并发传输。
- 为解决这一问题，我们设计了两种启发式方案：随机中继选择与并发调度（RCS）以及联合中继选择与动态调度（JRDS）。前者的算法设计复杂度较低，后者则能显著提升吞吐量。这两种方案都能有效减少中继选择中的冲突，并充分利用并发传输。

- 大量仿真表明，JRDS 在网络吞吐量方面实现了近乎最优的性能，并且在传输时间和网络吞吐量两方面均优于其他方案，同时 RCS 的计算复杂度极低。我们还分析了阈值选择对可实现性能的影响。

本文其余部分安排如下：第二节介绍系统模型和假设。第三节对中继选择与并发传输的最优联合调度问题进行建模，随后在第四节详细介绍候选中继集的构建，以及所提出的方案（RCS 和 JRDS）。第五节从时间消耗和网络吞吐量两方面展示可实现性能的仿真结果。最后，第六节总结本文并探讨未来的研究方向。

II. 系统概述

我们考虑图 1 所示的无人机辅助毫米波车联网，其中，路侧单元（RSU）与其通信范围内的车辆和无人机保持无线连接，并实施集中式控制。在移动过程中，车辆之间存在 N 个数据流的传输需求，但由于阻塞，其中一些数据流无法通过直接车车通信链路传输。对于受阻流，可以由另一辆车或无人机进行转发

最多一次，即仅利用两跳中继路径。因此，网络中共存三种传输路径，即直连链路、车辆中继链路和无人机中继链路。

为提升系统容量，地面设备配备多天线并以全双工（FD）模式运行，这使其能够在同一频段同时收发，但无法同时充当多个流的发送端或接收端 [20], [21]。但是

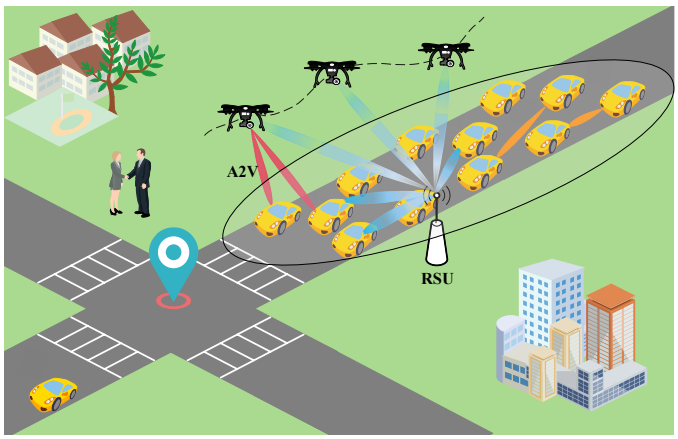


图 1. 无人机辅助毫米波车联网。

无人机只能以半双工（HD）模式运行。在传输过程中，我们将时间资源划分为 M 个等长时隙，每个时隙的持续时间为 T，其中可以在不同的时隙中启用并发调度，以节省时间。下面介绍移动性模型、天线方向图、通信模型和动态调度方案。

A. 移动性模型

毫米波车联网中的移动性建模在性能评估和高效调度方案设计中发挥着至关重要的作用。因此，我们首先介绍车辆和无人机的移动性模型。

1）车辆移动性模型：假设车辆到达服从泊松过程。为避免冲突，我们将前车与后车之间的安全距离设为 max{2m d_n}，其中 d_n 服从参数为 $v \cdot 2$s 的指数分布，v为所有车辆的平均速度 [m/s] [22]。 – –

2）无人机移动性模型：假设无人机的覆盖半径为 500 m，且多架无人机悬停在道路上方，为不同区域提供服务。每架无人机以恒定速度 V_u 沿圆形轨迹移动，高度固定为 h_u，并在一个完整周期 [23]后返回初始位置。由于无人机的电池容量和处理能力有限， [24], [25],因此施加以下约束

$$P_u(t) \leq \widetilde{P_u}, \quad \forall u, t, \tag{1}$$

$$\frac{1}{M}\sum_{t=1}^{M} P_u(t) \leq \overline{P_u}, \quad \forall u, \tag{2}$$

其中，$P_u(t)$表示无人机 u 在$\widetilde{\ }$时隙 t的发射功率，而 P_u 和 P_u 分别表示无人$\overline{机}$ u的峰值功率和平均功率。

B. 天线方向图

采用波束成形的定向传输不仅可以补偿毫米波信号的传播损耗，还为车对车场景中的高速率通信提供了可能。因此，我们在所有收发器上都采用定向天线，以实现尖锐的波束成形。

无人机和车辆均配备多根天线。每辆车辆（工作于全双工模式）都支持在每个时隙同时发送和接收消息，而每架无人机（工作于半双工模式）在一个时隙内只能发送或接收消息。为说明每条链路的天线增益，我们给出了车对车通信的干扰模型，其中 s_i 和 r_i 分别是流 i的源节点和目的节点， r_j 表示流 j的目的节点。具体而言，在期望链路（s_i， r_i）传输期间，天线可通过调整方向获得最大波束成形增益 G_0 。与此同时， r_j 受到链路（s_i， r_i）的干扰。将偏离期望方向的角度表示为$\theta_{r_j;\ s_i,\ r_i}$， r_j在方向 $\theta_{r_j;\ s_i,\ r_i}$ 上的天线增益可表示为 [26]

$$G_{r_j;s_i,r_i} = G_0 - \min\left\{\left(\frac{\theta_{r_j;s_i,r_i}}{\theta_{3\text{dB}}}\right)^2, 26\right\} \text{ [dBi]}, \tag{3}$$

其中 $\theta_{3\text{dB}}$ 为半功率波束宽度。该干扰模型也适用于无人机到车辆（U2V）链路。

C. 信道模型

本小节考虑用于车车通信和 U2V 通信的不同信道模型。

1) 车车通信链路：由于 Nakagami-m 衰落信道广泛应用于车载通信和短距离通信，因此本文将其用于车车通信链路 [27], [28]。因此，信道包络 A 的概率密度函数（概率密度函数）服从 Nakagami-m分布，表示为

$$f_A(a; m, \varepsilon) = \frac{\varepsilon^{-m} e^{m-1}}{\Gamma(m)} \exp\left(-\frac{a}{\varepsilon}\right), m > 0, \varepsilon > 0, \tag{4}$$

其中， $\Gamma(m)$表示伽马函数，形状参数为 m， ε 为控制离散程度的尺度参数。因此，信道功率增益 G 服从参数为 m的伽马分布，其概率密度函数表示为 [29], [30]

$$f_G(g; m) = \frac{\left(\frac{1}{m}\right)^{-m} g^{m-1} e^{-mg}}{\Gamma(m)}, g > 0, m > 0. \tag{5}$$

对于直达链路（s_i， r_i），根据毫米波信号的视距路径损耗模型 [31], ， r_i 处的接收信号功率为

$$P_r(s_i, r_i) = k_v P_t G_0 g(s_i, r_i) d_{s_i,r_i}^{-\alpha_v}, \tag{6}$$

其中，$k_v = \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^{\alpha_v}$， λ为波长， α_v为路径损耗指数。在式（6）中， $\overline{P_t}$、 G_0、 g（s_i， r_i）和$d_{s_i,\ r_i}$ 分别表示发射功率、最大天线增益、服从伽马分布（5）的信道功率增益，以及 s_i 与 r_i之间的距离。

由于采用并发传输来提升网络性能，车辆 r_i 从（s_j， r_j）接收到的互干扰（MUI）为

$$P_r(s_j, r_i) = k_v P_t G_{r_i;s_j,r_j} g(s_j, r_i) d_{s_j,r_i}^{-\alpha_v}, \tag{7}$$

其中，$G_{r_i;\ s_j,\ r_j}$ 表示车辆 r_i 从链路（s_j， r_j）接收的天线增益，而 g（s_j， r_i）表示链路（s_j， r_i）的信道功率增益，该增益服从伽马分布（5）。

此外，由于采用全双工模式，当同一信道用于接收和发送时，车辆发射的信号会在该车辆处对接收信号产生自干扰（SI）信号分量。经过自干扰抑制后，残余自干扰（RSI）可按 βP_t计算。其中， P_t表示车辆的发射功率，β 表示自干扰抵消等级；对于不同的自干扰算法 [32]，其数值介于 -70 至 -110 dB 之间。由于多用户干扰和自干扰都会影响r_i处的信干噪比（SINR），因此有

$$\text{SINR}_{s_i,r_i} = \frac{P_r(s_i, r_i)}{N_0 W + \sum\limits_{j \in \{1,\cdots,N\}\setminus\{i\}} \left(a_i^j P_r(s_j, r_i) + b_i^j \beta P_t\right)}, \tag{8}$$

其中， N_0 是噪声功率谱密度， W是信道带宽，而 a_i^j 和 b_i^j 是二元变量，分别表示流 i 是否受到来自流的多用户干扰和

自干扰。在式（8）中，$\sum_{j\in\{1,\cdots,N\}\setminus\{i\}} a_i^j P_r(s_j,r_i)$和$\sum_{j\in\{1,\cdots,N\}\setminus\{i\}} b_i^j \beta P_t$分别表示车辆 r_i接收到的总多用户干扰和自干扰。随后，链路（s_i, r_i）的可达数据速率可由香农容量 [33]估算

$$R_{s_i,r_i} = \eta W \log\left(1+\mathrm{SINR}_{s_i,r_i}\right), \tag{9}$$

其中，$\eta\in(0,\ 1]$是收发器设计的效率。

2) 无人机到车辆链路：当无人机被部署在高度为 h_u 处，用于转发受阻的地面流时，无人机与车辆之间很可能建立视距链路 [34]。在这种情况下，假设无人机到车辆链路经历大尺度路径损耗衰落和小尺度莱斯衰落，以表征视距（LoS）和非视距（NLOS）分量。因此，无人机u 到车辆 r_k 的下行链路信干噪比（记为式（10）中的链路 k ）可表示为

$$\mathrm{SINR}_{u,r_k} = \frac{k_u P_u G_0 d_{u,r_k}^{-\alpha_u}\Omega_{u,r_k}}{N_0 W + \sum_{w\in\{1,\cdots,N\}\setminus\{k\}} \left(a_k^w P_r(s_w,r_k) + b_k^w \beta P_t\right)}, \tag{10}$$

其中，$k_u = \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^{\alpha_u}$ 的链路路径损耗指数为 α_u，P_u 表示无人机 u的发射功率，且$d_{u,\ r_k} = \sqrt{(x_{r_k}-x_u)^2+(y_{r_k}-y_u)^2+h_u^2}$是 u与 r_k之间的距离，其中（x_{r_k}，y_{r_k}，0）和（x_u，y_u，h_u）分别是 r_k 和 u的三维坐标。$\Omega_{u,\ r_k}$ 描述小尺度功率衰落，其服从非中心 χ^2 分布，概率密度函数（pdf）由 [35] 给出

$$\begin{aligned} f_{\Omega_{u,r_k}}(\omega) = &\frac{(\mathcal{K}+1)e^{-\mathcal{K}}}{\overline{\Omega}_{u,r_k}} \exp\left(\frac{-(\mathcal{K}+1)\omega}{\overline{\Omega}_{u,r_k}}\right) \\ &\times I_0\left(2\sqrt{\frac{\mathcal{K}(\mathcal{K}+1)\omega}{\overline{\Omega}_{u,r_k}}}\right),\ \omega\geq 0, \end{aligned} \tag{11}$$

其中，$\mathcal{K}$ 为莱斯因子，$\Omega_{u,\ r_k} \equiv 1$ 定义为两个分量的总功率，$I_0(\cdot)$表示第一类零阶修正贝塞尔函数。此外，与式（8）类似，$a_k^w P_r(s_w,\ r_k)$和$\sum_{w\in\{1,\cdots,N\}\setminus\{k\}} b_k^w \beta P_t$分别表示链路 $(u,\ r_k)$ 接收到的多用户干扰和自干扰。

对于上行链路，由于无人机的飞行高度为 h_u，可以忽略来自地面链路的干扰，车辆 s_k 到无人机 u的链路的信干噪比为

$$\mathrm{SINR}_{s_k,u} = \frac{k_v P_t G_0 d_{s_k,u}^{-\alpha_v}\Omega_{s_k,u}}{N_0 W}. \tag{12}$$

类似地，U2V下行链路和上行链路的可达数据速率可分别根据式（9）中的香农容量，利用信干噪比$_{u,\ r_k}$ 和信干噪比$_{s_k,\ u}$进行估算。

D. 动态调度

动态调度（DS）的基本思想如图2所示。总时间消耗由调度阶段和传输阶段组成，而调度时间可在传输阶段的多次调度操作中分摊 [36], [37]。传输时间

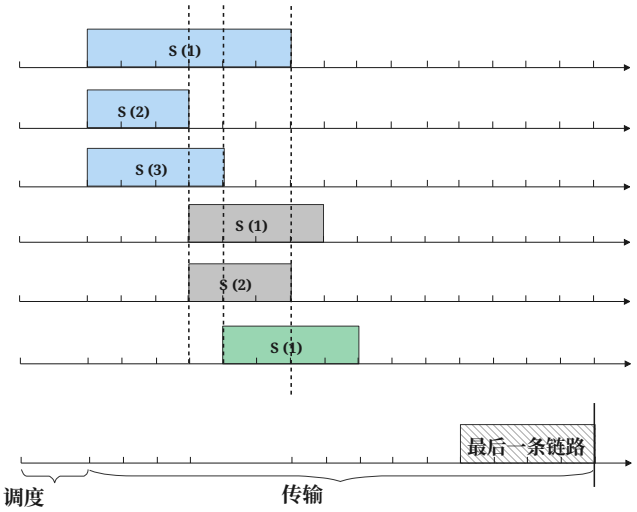


图2. 动态调度时间线示意图。

由多个时隙组成，多个互不冲突的链路可以在同一时间间隔内并发传输。

传输期间，首先安排非相邻直接链路同时传输。随后，一旦其中任意一条链路完成，就执行动态调度。具体而言，该操作会更新每条流的候选中继集，重新生成竞争图，并重新分配可与当前正在传输的链路并发传输的链路。请注意，每当有链路完成时，该操作都会重复执行，直至安排最后一条链路。如图2所示，S_1、S_2、S_3 代表动态调度的三个步骤。第一步中，安排 S_1(1)、S_1(2)、S_1(3)同时传输。当 S_1(2)完成时，第二步启动 S_2(1)和 S_2(2)的并发传输，它们与正在传输的S_1(1)和 S_1(3)不存在冲突。随后，当 S_1(3)完成时，执行相同操作，并启动 S_3(1)。

III. 问题表述

为了通过最优中继选择和利用并发传输来提高传输效率，即以最少的时间间隔满足各流的业务需求，我们针对无人机辅助车联网中的中继选择与并发传输建立了一个联合优化问题。

将候选中继集表示为 $\mathbf{C}$，将调度表示为 $\mathbb{S}$。我们首先总结中继选择和传输调度子问题中的约束。

子问题*1*：当流 i 受阻时，可由另一辆车或无人机转发。因此，如何选择其中继路径是一个关键问题。令 N_i 和 N_i' 分别为二进制变量，表示流 i 是否通过直连链路和中继链路成功传输。具体而言，仅当直接流满足服务质量（QoS）时，$N_i=1$；对于受阻流，仅当满足两跳的QoS 时，$N_i'=1$。由于一个流可以通过直接路径或中继路径成功传输，因此有

$$N_i + N_i' \leq 1, \quad \forall i. \tag{13}$$

下面给出中继选择的约束条件。

首先，由于每个受阻流最多只能被中继一次，因此流 i 在传输路径中的最大跳数满足 $H_{\max,\ i} \leq 2$。

其次，流 i的候选中继集，记为$\mathbf{C}(i)$，可能随时间变化，因为其受到并发链路中继选择的影响。在这种情况下，为流 i选择最优中继，定义竞争函数最小度，以寻找与正在进行的链路竞争最小的中继路径。随后，流 i 的最优中继可表示为

$$\mathcal{R}(i) = \text{MinDegree}(\mathbf{C}(i)), \text{if } N_i' = 1, \forall i. \tag{14}$$

请注意，在流 i的传输期间，其他阻塞流无法使用 $\mathcal{R}(i)$。

子问题 *2*：调度中允许非邻接链路之间进行并发传输。这些链路保持活跃，直至其业务需求完成。定义二进制变量 $F(s_i^t,\ r_i^t;\ s_j^t,\ r_j^t)$，以指示两个链路在时间段 t是否邻接。若是，则 $F(s_i^t,\ r_i^t;\ s_j^t,\ r_j^t) = 1$；否则，$F(s_i^t,\ r_i^t;\ s_j^t,\ r_j^t) = 0$。一旦某条并发链路完成，我们将更新每个流的 $\mathbf{C}(i)$，重新生成竞争图，并尽可能继续调度剩余链路。现对调度约束进行分析。

首先，两个相邻流不能在同一时间段内传输，即，

$$c_i^t + c_j^t \leq 1, \text{ if } F(s_i^t, r_i^t; s_j^t, r_j^t) = 1, \forall i, j, t, \tag{15}$$

$$e_{ih}^t + e_{jl}^t \leq 1, \text{ if } F(s_{ih}^t, r_{ih}^t; s_{jl}^t, r_{jl}^t) = 1, \forall i, h, j, l, t, \tag{16}$$

$$c_i^t + e_{jl}^t \leq 1, \text{ if } F\left(s_i^t, r_i^t; s_{jl}^t, r_{jl}^t\right) = 1, \ \forall i, j, l, t. \tag{17}$$

这里，c_i^t 是一个二进制变量，用于表示流 i 是否在时间段 t 内传输（若是，则 $c_i^t = 1$；否则，$c_i^t = 0$）；而 s_i^t和 r_i^t 分别表示时间段 t内流 i的直接路径的源节点和目的节点。类似地，二进制变量 e_{ih}^t 表示流 i 的第 h跳是否在时间段 t 内传输（若是，则 $e_{ih}^t = 1$；否则，$e_{ih}^t = 0$）；而 s_{ih}^t 和 r_{ih}^t 分别表示时间段 t内流 i的第 h跳路径的源节点和目的节点。

其次，对于受阻流，其中继路径上的传输存在固有顺序，因此同一路径上的不同跳不能同时调度，即，

$$\sum_{h=1}^{H_{\max,i}} e_{ih}^t \leq 1, \quad \forall i, h, t. \tag{18}$$

第三，对于通过中继路径传输的流 i，其第 h 跳应先于第（$h+1$）跳进行调度，可表示为

$$\sum_{t=1}^{T^\star} e_{ih}^t \geq \sum_{t=1}^{T^\star} e_{i(h+1)}^t, \text{ if } H_{\max,i} > 1, \quad \forall h = 1 \sim (H_{\max,i} - 1),\ T^\star = 1 \sim M. \tag{19}$$

此条件表示一系列约束，其中 h 从 1 变化到 $H_{\max,\ i} - 1$ 而 $T^\star$从 1 变化到 M。

第四，流 i 既可以通过直达链路传输，也可以通过中继路径传输，即，

$$c_i^t + e_{ih}^t \leq 1, \quad \forall h = 1 \sim H_{max,i}, t. \tag{20}$$

因此，针对中继选择和并发传输的联合优化问题P1可表述为

$$\text{P1} \begin{cases} \min\limits_{\mathbf{C},\mathbb{S}} & \delta(\mathbf{C}, \mathbb{S}), \\ \text{s.t.} & \text{Constraints } (13) - (20) \text{ are met.} \end{cases} \tag{21}$$

这里，目标函数 δ 是中继集 $\mathbf{C}$ 和调度方案 $\mathbb{S}$的总时间消耗。由于流调度具有离散特性且受 QoS 约束限制，这是一个混合整数非线性规划（MINLP）问题。一般而言，这类问题是 NP 困难的 [37]。鉴于直接求解该问题的难度，我们提出两种启发式算法，作为解决这一 NP 困难问题的实用方案。

IV. 所提方法

由于问题 P1 中有两个需要优化的关键部分，即中继选择和并发传输，我们首先为阻塞流构建候选中继集，然后设计两种用于中继选择与传输调度的算法，分别称为 RCS 和 JRDS。这两种算法会对直连链路、车辆中继链路和无人机中继链路进行调度，并传输阻塞流。

A. 候选中继集的构建

如图 3 所示，我们以一条三车道的直线高速公路为例。当某条流受阻时，需要选择合适的中继来转发其数据。需要注意的是，在相邻车道上行驶的车辆之间的通信不会受阻，因此我们针对以下三种情况进行中继选择。

1）对于受阻流 a，由于其发送端 s_a 和接收端r_a 在非相邻车道上向前行驶，我们从中间车道选择候选车辆中继，这些中继更有可能使流成功完成传输。2）对于发送端和接收端在同一车道上向前行驶的受阻流，例如流 b，我们从其相邻车道选择候选车辆中继。3）对于受阻流 c，由于其发送端和接收端在同一车道上向前行驶，且两者之间只有一个阻挡车辆，因此将该阻挡车辆用作车辆中继。

经过此步骤得到的车辆中继集记为 $\mathbf{V}'(i_{\text{flow}})$，其中 i_{flow} 表示所关注的流。为保证中继转发 [38],过程中的传输质量，我们定义参数 ϵ，以便从 $\mathbf{V}'(\bullet)$ 中得到候选地面中继集 $\mathbf{V}(\bullet)$。

具体而言，对于情况 1），

$$\epsilon(a_i) = \frac{P(a_i) \cap P(D1, D2)}{P(a_i)}, \tag{22}$$

$$\mathbf{V}(\bullet) = \mathbf{V}(\bullet) \cup \{a_i\}, \text{if } \epsilon(a_i) \geq 0.5, \tag{23}$$

其中，$P(a_i)$ 表示每个中继 $a_i \in \mathbf{V}'(a)$ 的预测运动路径，该路径可由路侧单元获取；$P(D1, D2)$ 表示理想中继的预测运动路径，其长度可计算为

$$L(P(D1, D2)) = \frac{1}{2}\left(v'(s_a) \cdot (\xi_a T) + v'(r_a) \cdot (\xi_a T)\right). \tag{24}$$

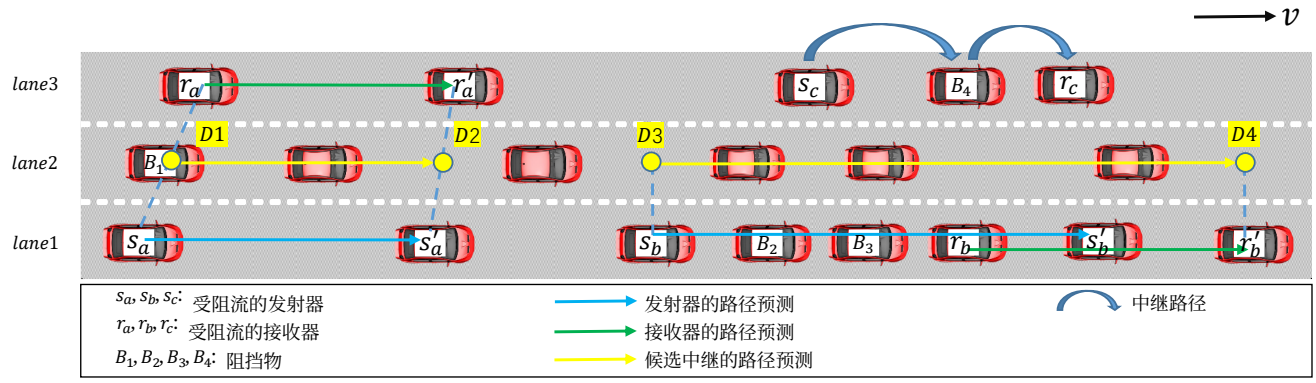


图 3. 中继选择原理。

这里， $v'(s_a)$ 和 $v'(r_a)$ 分别表示流 a 开始传输时车辆 s_a 和 r_a的速度， ξ_a 是估计 a 所需占用的时隙数，即

$$\xi_a = \frac{Q_a \cdot M \cdot T}{R_a \cdot T}, \tag{25}$$

其中， Q_a 是 a的吞吐量， R_a 是流a不受其他链路干扰时的速率。

对于空中无人机，在 ξ_a期间，如果 $P(D_1, D_2)$位于某架无人机的覆盖范围内，该无人机便可充当i_{flow}的中继，据此构建候选空中中继集$\mathbf{U}(\bullet)$。因此，我们得到 i_{flow}的候选中继集，其中$\mathbf{C}(\bullet) = \mathbf{V}(\bullet) \cup \mathbf{U}(\bullet)$。

同理，对于情况 2，

$$\epsilon(b_i) = \frac{P(b_i) \cap P(D3, D4)}{P(b_i)}, \tag{26}$$

$$\mathbf{V}(\bullet) = \mathbf{V}(\bullet) \cup \{b_i\}, \text{if } \epsilon(b_i) \geq 0.5, \tag{27}$$

$$L(P(D3, D4)) = L(s_b, r_b) + v'(r_b) \cdot (\xi_b T), \tag{28}$$

其中， $L(s_b, r_b)$表示 s_b 与 r_b之间的距离。此外，通过判断 $P(D_3, D_4)$位于哪架无人机的覆盖范围内，即可确定$\mathbf{U}(\bullet)$。

对于情况 3， $\mathbf{V}(c) = \{B_4\}$ 且 $\epsilon(c)$为常数，因此可以构建 $\mathbf{U}(\bullet)$、$\mathbf{C}(\bullet)$。

B. RCS方案

基于候选中继集，RCS为优化问题P1提供了一种两步求解方案。首先，对于每个受阻流，通过从其$\mathbf{C}(\bullet)$中随机选择一个元素来确定其中继。在调度阶段，为避免因第一跳完成时第二跳未能及时调度而导致流失败，调度时将一个流的两跳视为一个整体，且第一跳完成后可立即发送第二跳。

接下来，根据图论将流划分为若干组，其中存在竞争关系的流不能被调度到同一组中。为了构建竞争图 $Graph$（V， E），将每个流表示为一个顶点；当两个顶点之间存在严重干扰时，即相对干扰（RI）超过定义的阈值 σ，或两个流因全双工模式而发生冲突时 [20]，就在这两个顶点之间连一条边。请注意，只有当某个流的两跳都没有与其他流相连的边时，它们之间才不存在边。一个顶点的边数定义为其度。

上述流分组策略的伪代码见算法1。首先，输入 $Group$（V， E）个流，并初始化分组结果集合 $\mathbb{G} \leftarrow \emptyset$。当 $V \neq \emptyset$时，调用函数生成组，从 V 中的流里找出彼此不存在竞争关系的流，并将其组成一个新组$G \rightarrow \mathbb{G}$。接下来，从 V中移除这些流，并从 E中移除与这些流相关的边。该过程重复进行，直到没有剩余流。算法1的计算复杂度为 N^2量级，记作 $\mathcal{O}$（N^2）。

算法1： 流分组算法

输入： $Graph$（V， E）；
输出： 流分组结果 $\mathbb{G}$；
初始化： $\mathbb{G} \leftarrow \emptyset$；
1 **当** $V \neq \emptyset$ **时**
2 **函数** generateGroup(V， E)**:**
3 $G \leftarrow \emptyset$;
4 **当** $V \neq \emptyset$ **时**
5 获取具有最小度的 $v \in V$；
6 $G = G \cup \{v\}$;
7 获取具有与 v 相连的边的流 $v' \in V$；
8 $V = V - v - v'$;
9 $E = E - E(v) - E(v')$;
10 **返回** G;
11 $V = V - G$;
12 $E = E - E(G)$;
13 $\mathbb{G} = \mathbb{G} \cup \{G\}$;

根据中继选择和流分组结果，我们提出的并发调度方案如算法2所示，其中同一组中的流并发传输，而不同组则按顺序调度。该方案的时隙消耗和系统吞吐量也一并给出。H_g 在开始时设为1，以确保每条流的第一跳先于第二跳传输。在第4至8行中，每当一跳传输完成，就会重新计算组 G中剩余流的数据速率$R'_{g,\ H_g}(n)$，因为传输完成后干扰会降低。具体而言，剩余V2V链路的$R'_{g,\ H_g}(n)$根据式(9)计算，而剩余车对基础设施下行链路和上行链路的相应数值，则分别根据式(10)和式(11)给出的信干噪比进行估算。此外，每条流所达到的比特数

算法2： 并发传输

输入： 流分组结果 $\mathbb{G}$；每条流的吞吐量 Q_g；时隙数量 M；最大每条流的跳数 $H_{\max,\ g}$；

输出： 调度后所需的总时隙数 n；调度后的系统吞吐量 U；

初始化： $U=0, H_g=1$;

1 **遍历**时隙 $n\ (1 \le n \le M)$ **执行**
2 **对** $G\ in\ \mathbb{G}$ **中的每一项执行**
3 **当** $G \neq \emptyset$ **时执行**
4 **若** G 中某个流的一跳刚刚完成 **则**
5 **对于每个**流 g 在 G**中执行**
6 重新计算每条链路的数据速率 $R'_{g,\ H_g}(n)$;
7 已计算出的比特数由每个流 $u_{g,\ H_g}(n)$;
8 转到第 13 行;
9 **else**
10 **对每个**流 g 在 G**执行**
11 计算已达到的比特数由每个流 $u_{g,\ H_g}(n)$;
12 转到第 13 行;
13 **如果**任何 $u_{g,\ H_g}(n) \ge Q_g \cdot M$ **则**
14 **如果** $H_{\max,\ g}=2$ 且 $H_g=1$ **则**
15 $H_g = H_g + 1$;
16 跳出;
17 $U = Q_g \cdot N/(n \cdot 0.1)$;
18 **返回** n ，U

流$u_{g,\ H_g}(n)$的比特数通过计算得出。如果没有任何一跳完成传输（如第9至12行所示），则每条流的数据速率保持不变，但$u_{g,\ H_g}(n)$会增加。之后，如第13至15行所示，我们检查是否有某些跳已达到其数据需求。如果中继流的第一跳已满足数据需求，则将跳数 H_g 加1并重复迭代。如第16行所示，当所有流均满足传输需求时，外层循环终止，n 为消耗的总时隙数。此外，我们在第17行计算系统吞吐量。

*C. JRDS*方案

前文提出的RCS方案中，有两个可能影响其性能的问题需要进一步考虑。首先，随机中继选择可能导致流之间发生冲突，从而影响并发调度。其次，正在传输的流会占用一些中继节点，这些节点无法同时被视为阻塞流的候选中继。因此，为了提高系统效率，我们设计了一种联合方案来解决优化问题P1，该方案会动态地为每个阻塞流选择最优中继，并实时调度各流。我们提出的JRDS方案总结于算法3中。

算法3： JRDS

输入： 直接流集合 V_d；与以下对象相关的边集 E_d V_d；中继流集合 V_r；候选中继集到每个流 R_g；

输出： 调度结果 $\mathbb{G}$；总时隙消耗 m；之后的系统吞吐量调度 U；

初始化: $\mathbb{G} \leftarrow \emptyset$; $G \leftarrow \emptyset$;

1 **函数** DGroup $(V_d,\ E_d,\ G)$ **:**
2 获取 V_d 与现有中继流之间的边组 G, E_{dr};
3 $E = E_d + E_{dr}$;
4 $DG = generateGroup(V_d, E)$;
5 **返回** DG;
6 $G = DG$;
7 **函数** RGroup $(V_r,\ R_g,\ G)$ **:**
8 $RG \leftarrow \emptyset$;
9 **对** $v \in V_r$ **执行**
10 **对于** r 在流 v 的可选中继集中**执行**
11 **如果** $v(r)$未与以下流发生冲突 $(G + RG)$ **然后**
12 $RG = RG + v(r)$;
13 跳出;
14 **返回** RG;
15 $G = DG + RG$;
16 **对**时隙 $m\ (1 \le m \le M)$ **执行**
17 更新车辆和无人机的坐标;
18 获取每个流的可选中继集，R_g;
19 **如果** G中的某个流刚刚完成**则**
20 获取 G'中的完成的流;
21 $G = G - G'$;
22 $V_d = V_d - G'_d$;
23 $V_r = V_r - G'_r$;
24 $G = G + DGroup(V_d,\ E_d,\ G)$;
25 $G = G + RGroup(V_r,\ R_g,\ G)$;
26 $\mathbb{G} = \mathbb{G} \cup G$;
27 **如果**流 $(V_d + V_r)$ 已完成，**则**
28 中断;
29 $U = Q_g \cdot N/(m \cdot 0.1)$;
30 **返回** $\mathbb{G}$、m、U;

该算法首先依次调用函数 $DGroup$ 和$RGroup$。$DGroup$ 获取未调度直连流 E_d 的边，并获取 V_d 与组 G 中现有中继流之间的边，记为 E_{dr}。E_d 和E_{dr} 存储在 E 中。随后，函数 $generateGroup$ 找出彼此不存在竞争关系的直连流。函数 $RGroup$ 迭代地为 V_r中的每个受阻流分配合适的中继（车辆或无人机），并构建 RG，其中包含与（G+RG）中的现有流不发生冲突的流。至此，算法找出了能够并发传输的直连流和中继流。随后进入循环，首先更新车辆和无人机的位置，

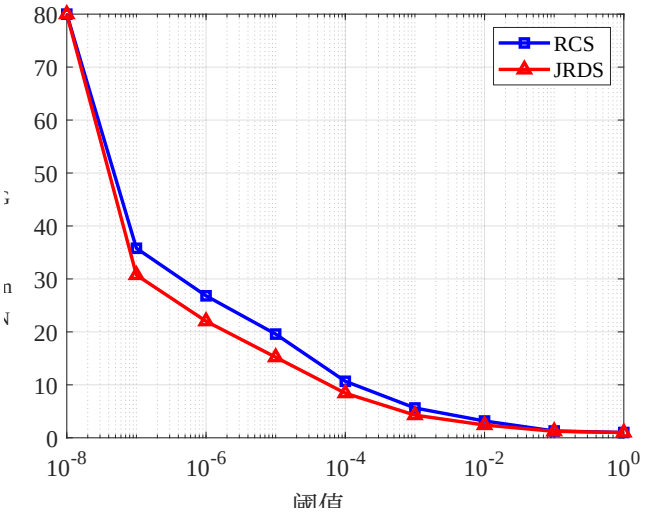


图 4. 默认系统设置下，RCS 和 JRDS 的组数随阈值 σ 的变化情况（参见 V-A 小节）。

这会影响候选中继集的构建。接着，算法检测该时隙中每个流的可选中继集：一旦某个流完成传输，一些节点（车辆和无人机）便会被释放，从而成为其他流的可选中继。接下来，算法检查是否存在已完成的流。如果存在，则将这些流保存到 G' 中，并从当前组 G中移除。同样，在第22至23行，分别从未调度集 V_d 和 V_r中移除已完成的直连流和中继流。然后，算法调用函数 $DGroup$ 和 $RGroup$，找出在 G 中与正在传输的流不相邻的流，并将其加入新组 G，该组中的流可以并发传输。我们将该组保存到 $\mathbb{G}$中。每个时隙结束时，如第27行所示，我们检查所有流是否都已完成。若已完成，则跳出迭代，m 即为实际时隙消耗量；否则，循环继续。流传输完成后，我们在第29行计算系统吞吐量。算法3的计算复杂度为 $\mathcal{O}(N^2)$量级。

图 4 对比了默认系统设置下 RCS 和 JRDS 得到的组数（参见 V-A 小节）。从图 4 可以看出，JRDS 得到的组数少于 RCS，尤其是在 σ 的范围为 10^{-7} 至 10^{-4} 时。这是因为联合方案能够有效避免冲突，因此可以将更多流划分到同一组中。

V. 性能评估

A. 仿真系统设置

考虑一个长度为 6 km 的笔直三车道高速公路场景，由一个路侧单元和 5 架无人机提供服务，如图 1 所示。每条车道上的车辆数量设为 60 辆，平均速度为 100 k m/h。需要注意的是，相邻车辆之间满足安全距离要求。我们假设每条流的收发器均为随机选择，且每条流的吞吐量要求范围为 $[0.1,\ 1]$Gbps。在仿真中，车辆和无人机的位置按时隙更新，并执行动态调度算法。除非另有说明，均采用表 I 中列出的默认仿真参数，另请参见 [26], [28], [40]。

表 I 默认系统参数

参数	符号	数值
载波频率	f	30 GHz
流数量	N	80
时隙数量	M	2000
时隙时长	T	0.1 s
衰落深度	m	2
背景噪声	N_0	-134 dBm/MHz
系统带宽	W	2000 MHz
发射功率	P_t	40 dBm
无人机平均功率	$\overline{P_u}$	30 dBm
无人机峰值功率	$\widehat{P_u}$	$2\overline{P_u}$
收发器效率	η	0.8
无人机高度	h_u	100 m
无人机移动速度	V_u	20 m/s
车车通信路径损耗因子	α_v	2.5
U2V路径损耗因子	α_u	2
莱斯K因子	$\mathcal{K}$	9 dB
干扰阈值	σ	10^{-3}
自干扰抵消等级	β	10^{-9}
最大天线增益	G_0	20 dBi
半功率波束宽度	$\theta_{3\text{dB}}$	30°

此外，仿真中考虑了两种移动性模型：泊松过程（PP）和中断泊松过程（IPP）。PP 模型已在第二节中介绍。对于 IPP，连续两辆车之间的到达间距服从均值为 $E(d_n) = {}^{p}_{v_1 \cdot 2\,[s]} + {}^{(1-p)}_{v_2 \cdot 2\,[s]}$ [41]的二阶超指数分布。除非另有说明，采用的移动性模型为 PP。

为展示所提出的 RCS 和 JRDS 算法在提升性能方面的优势，我们将其与另外三种方案进行比较，即通过穷举法获得最优解的方案、随机选择中继的随机中继并发传输（RR）方案 [38],以及串行时分多址方案。考虑的两项性能指标如下：

1)传输时间：完成流传输所消耗的时隙总数。2) **网络吞吐量**：网络中已完成流的吞吐量 [Gbps]。

B. 与最优解的比较

图5比较了在不同流数量下，我们的 RCS 和 JRDS 与基准方案 TDMA 和 RR 的性能，并将其与优化问题P1的最优解进行了对比。由于求得最优解极其耗时，仿真仅针对最多 100 条流进行。可以看出，JRDS 的性能接近最优，优于 RCS、RR 和 TDMA 方案。从传输时间来看，如图5(a)所示，在不同流数量下，最优解与我们的 JRDS 方案之间的差距始终可以忽略不计。从图5(b)可以看出，最优解与我们的 JRDS 在网络吞吐量方面的差距较小，并且随着

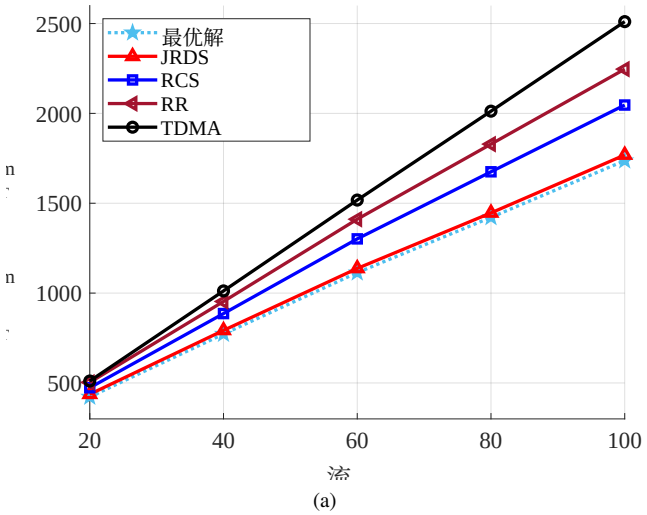


图5. 最优解与四种方案的性能比较：(a)传输时间，(b)网络吞吐量。

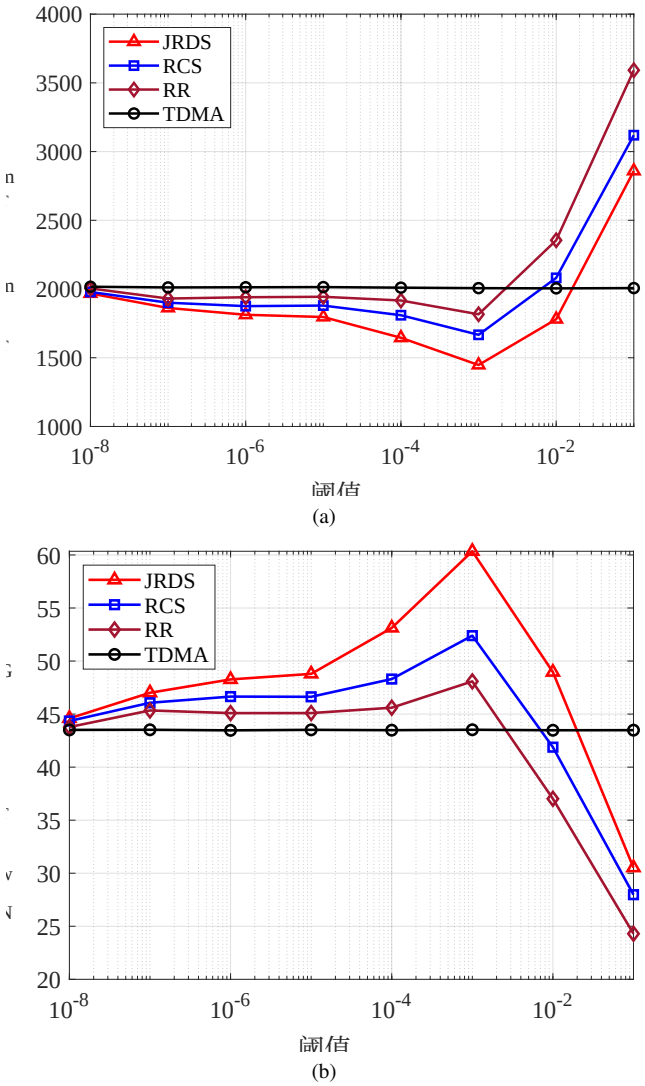


图6. 阈值 σ 对四种方案可实现性能的影响：(a)传输时间，(b)网络吞吐量。

流数量的增加而减小。当 $N=100$ 时，差距仅约为 2.4%。由于 JRDS 的性能非常接近最优解，因此在后续仿真中，只需将 JRDS 与 RCS 及其他现有方案进行比较即可。

C. 干扰阈值的选择

图 6 研究了干扰阈值 σ 对四种方案可实现性能的影响。显然，σ 的选择不会影响 TDMA 的性能，因为它采用串行传输，不存在流竞争。但对于 RR、RCS 和 JRDS，当 σ 从 10^{-8} 变为 10^{-3} 时，可实现性能逐步提升。这是因为提高阈值能让更多流并发传输，从而缩短传输时间并提升整体吞吐量。在 $\sigma=10^{-3}$ 处达到最佳性能后，继续增大 σ 会导致性能下降。这是因为阈值过大时，并发流之间会产生严重干扰，导致每条流的数据速率低于串行 TDMA 方案下的速率。因此，除非另有说明，我们在评估中固定 $\sigma=10^{-3}$。

从图 6 的结果中还可以看出，与 RR 相比，我们提出的两种方案消耗的传输时间更少，同时实现了更高的吞吐量，这得益于所提出的中继选择方案。该方案：1）选择更有可能实现视距传输的中继，从而有助于减少时间消耗；2）避免不同的受阻流选择同一个中继，因此有利于利用并发传输来提升性能。此外，由于采用了动态调度，JRDS 的性能显著优于 RCS。

D. 不同流数量下的性能

在图 7 中，我们绘制了这四种方案在不同流数量下的网络吞吐量。可以看到，TDMA 的曲线保持平坦。这是因为 TDMA 采用串行传输，已完成比特数或流数量与传输时间成正比。因此，其吞吐量不受 N 影响。相比之下，随着 N 增大，RR、RCS 和 JRDS 的网络吞吐量也先随之增加，直到分别在 RR 的 $N=150$ 、RCS 的 $N=300$ 和 JRDS 的 $N=400$ 处达到饱和值。显然，并发传输使 RR、RCS

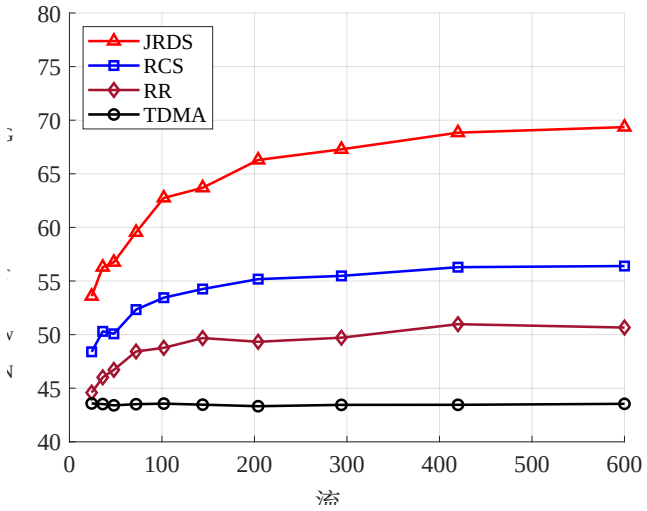


图 7. 不同流数量下四种方案的网络吞吐量对比。

和 JRDS 的网络吞吐量远高于 TDMA。正如预期，JRDS 的性能最佳，且显著优于排名第二的 RCS。

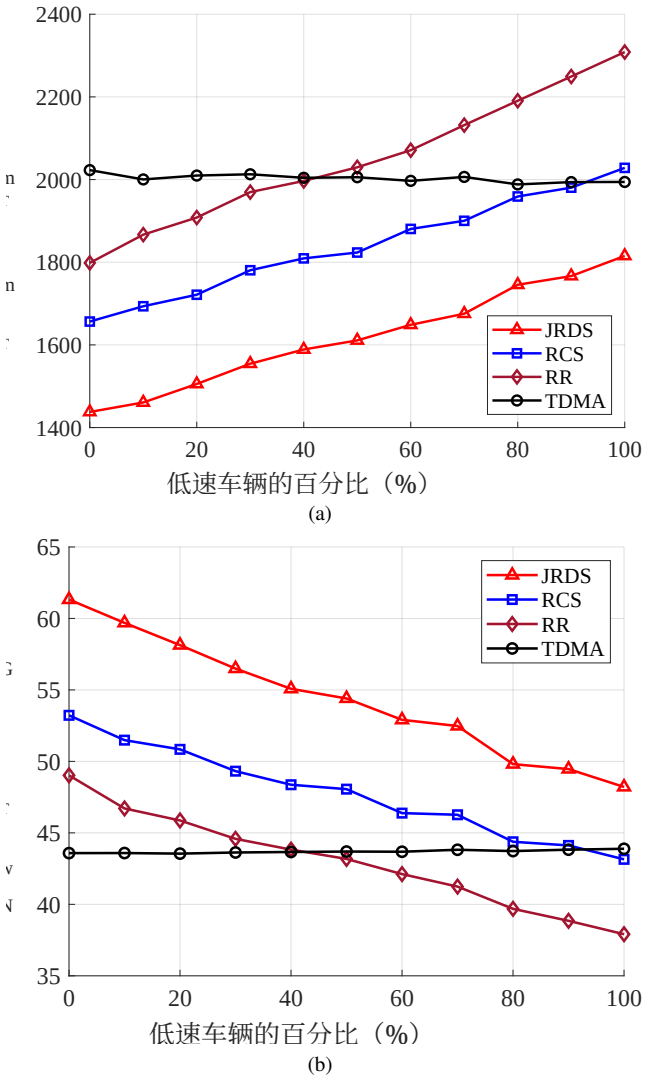


图 8. 移动性模型对四种方案可实现性能的影响：（a）传输时间；（b）网络吞吐量。

*E. IPP*流量模型下的性能

我们还研究了移动性模型对系统性能的影响。具体而言，在本实验中，我们采用了速度为 $v_1 = 60$ km/h 和 $v_2 = 100$km/h 的 IPP模型。图 8 比较了低速车辆比例不断增加时，四种方案在时隙消耗和网络吞吐量方面的表现。

从图 8 (a) 可以看出，JRDS 的传输时间消耗最低，这符合预期。随着低速车辆比例增加，各流的传输距离缩短，但它们之间的干扰增强。由于后者的负面影响超过了前者带来的益处，RR、RCS 和 JRDS 的时隙消耗随着低速车辆比例的增加而线性上升。相比之下，串行时分多址受干扰的影响较小。因此，当各流的传输距离缩短时，接收功率会增加，从而使其性能略有提升。同样，图 8(b) 证实 JRDS 获得了最高的网络吞吐量。此外，随着低速车辆比例增加，RR、RCS 和 JRDS 的网络吞吐量线性下降，而时分多址的网络吞吐量则略有提升。

图 8 还显示，当低速车辆的比例超过 40% 和 90% 时，时分多址分别优于 RR 和 RCS。在这种情况下，强制流分组增加了组内的传输干扰，降低了并发传输的性能。然而，即使低速车辆的比例达到 100%，我们的 JRDS 仍始终显著优于时分多址。

F. 不同速度下 *JRDS* 的性能

如前面的结果所示，JRDS 在动态场景中优于其他方案。这里我们重点考察不同速度下 JRDS 的性能。研究了 v、60 千米/小时、80 千米/小时和 100 千米/小时三种情况。

图 9(a) 绘制了在三种不同速度下，JRDS 的网络吞吐量随干扰阈值 σ 变化的曲线。可以注意到，JRDS 在速度较高时表现更佳。这是因为在较高速度下，干扰功率显著降低，抵消了传输距离增加导致的车车通信链路功率损失。还可以观察到，当 σ 从 10^{-8} 变化到 10^{-5} 时，不同速度下的吞吐量较为接近，因为并发传输尚未得到充分利用。最优阈值为 $\sigma = 10^{-3}$，这与图 6 中的结果一致。

在图 9(b) 中，我们绘制了 JRDS 在三种不同速度下随流数量变化的可达网络吞吐量 N。同样，我们观察到，JRDS 的动态调度在速度较高时性能更佳，这表明当用户分布密集时，车车通信链路会受到严重干扰。

VI. 结论

本文针对无人机辅助毫米波车联网，构建了中继选择与传输调度联合优化问题，以最小化传输时间

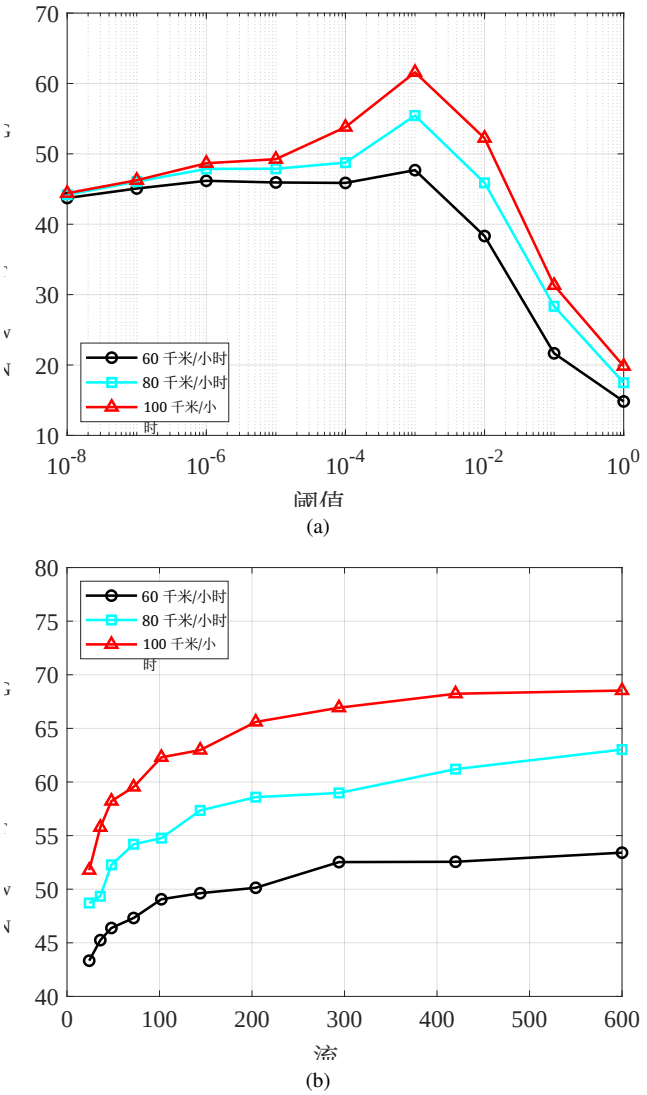


图 9. 移动速度 v 对 JRDS 网络吞吐量的影响：(a) 不同阈值下；(b) 不同流数量下。

同时满足吞吐量要求。由于该优化问题是 NP 困难，我们设计了两种启发式方案，分别称为 RCS 和 JRDS，以发挥并发传输的优势。RCS 为每个受阻流从候选中继集中随机选择中继，并支持并发传输。该方案复杂度较低，且性能优于现有的 RR 和时分多址方案。JRDS 将动态中继选择与传输调度相结合，从而显著减少并发传输中的中继冲突和干扰水平。仿真结果表明，JRDS 能够为中继选择与传输调度这一 NP 困难联合优化问题提供近似最优解。我们还进行了大量仿真，以研究各种系统参数的影响，包括干扰阈值的选择、到达速度和网络负载，从而为系统设计提供有用的指导。未来的工作将研究如何在维持 JRDS 减少传输时间和提升网络吞吐量优势的同时，最小化调度时延。

参考文献

[1] C.-H. Liu、K.-H. Ho 和 J.-Y. Wu，“具有多小区关联的毫米波无人机网络：性能极限与优化”，IEEE J. Sel. Areas Communi.，第 37 卷，第 12 期，第 2814–2831 页，2019 年 12 月。[2] S. Geng、J. Kivinen、X. Zhao 和 P. Vainikainen，“短距离无线通信的毫米波传播信道特性分析”，IEEE Trans. Vehicular Technology，第 58 卷，第 1 期，第 3–13 页，2009 年 1 月。[3] Z. Wei 等，“毫米波全双工中继系统的能效：挑战与解决方案”，IEEE Access，第 4 卷，第 4848–4860 页，2016 年 7 月。[4] M. Monemi 和 H. Tabassum，“有限块长区间内无人机辅助D2D网络的性能”，IEEE Trans. Communi.，第 68 卷，第 11 期，第 7270–7285 页，2020 年 11 月。[5] H. Wu 等，“ 空中辅助车联网中的最优无人机缓存与轨迹：一种基于学习的方法”，IEEE J. Sel. Areas Communi.，第 38 卷，第 12 期，第 2783–2797 页，2020 年 12 月。[6] Y. Zhou 、 N. Cheng 、 N. Lu 和 X. S. Shen，“多无人机辅助网络：空地协同车联网架构”，IEEE Vehicular Technology Mag.，第 10 卷，第 4 期，第 36–44 页，2015 年 12 月。[7] Y. Hui、Z. Su、T. H. Luan 和 C. Li，“预约服务：车联网边缘计算服务的可信中继选择”，IEEE J. Sel. Areas Communi.，第 38 卷，第 12 期，第 2734–2746 页，2020 年 12 月。[8] S. Wu、R. Atat、N. Mastronarde 和 L. Liu，“利用设备到设备中继提升毫米波蜂窝网络的覆盖范围和频谱效率”，IEEE Trans. Communi.，第 66 卷，第 5 期，第 2251–2265 页，2018 年 5 月。[9] C. G. Ruiz、A. Pascual-Iserte 和 O. Munoz，“毫米波蜂窝系统中的阻塞分析：中继定位的应用”，IEEE Trans. Communi.，第 69 卷，第 2 期，第 1329–1342 页，2021 年 2 月。[10] M. E. Eltayeb，“ 非理想天线阵列毫米波系统的中继辅助信道估计”，载于 ICC 2019 会议录（中国上海），2019 年 5 月 20 日至 24 日，第 1–5 页。[11] V. Petrov、D. Moltchanov、S. Andreev 和 R. W. Heath，“城市第五代移动通信+ 毫米波蜂窝部署中的智能车载中继分析”，载于 GLOBECOM 2019 会议录（美国夏威夷州威可洛亚），2019 年 12 月 9 日至 13 日，第 1–6 页。[12] H. Xiao、Y. Hu、K. Yan 和 S. Ouyang，“多源多中继协作车联网的功率分配与中继选择”，IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems，第 17 卷，第 11 期，第 3297–3305 页，2016 年 11 月。[13] M. Khabbaz、J. Antoun 和 C. Assi，“无人机辅助车联网的建模与性能分析”，IEEE Trans. Vehicular Technology，第 68 卷，第 9 期，第 8384–8396 页，2019 年 9 月。[14] M. Hadded 等，“车载自组织网络的基于时分多址的媒体访问控制协议：综述、定性分析与开放研究问题”，IEEE Communi. Surveys & Tutorials，第 17 卷，第 4 期，第 2461–2492 页，2015 年第四季度。[15] L. X. Cai、L. Cai、X. Shen 和 J. W. Mark，“Rex：一种用于定向天线毫米波无线个人局域网的随机独占区域调度方案”，IEEE Trans. Wireless Communi.，第 9 卷，第 1 期，第 113–121 页，2010 年 1 月。[16] J. Qiao、L. X. Cai 和 X. Shen，“定向天线毫米波无线个人局域网中的多跳并发传输”，载于 ICC 2010 会议录（南非开普敦），2010 年 5 月 23 日至 27 日，第 1–5 页。[17] Y. Niu 等，“利用多级码本的设备到设备通信赋能毫米波小基站组播调度”，IEEE Trans. Vehicular Technology，第 68 卷，第 3 期，第 2724–2738 页，2019 年 3 月。[18] F. G´omez-Cuba 和 M. Zorzi，“采用多用户多输入多输出无线电的毫米波多跳网络最优链路调度”，IEEE Trans. Wireless Communi.，第 19 卷，第 3 期，第 1839–1854 页，2020 年 3 月。[19] Y. Chen 等，“利用联盟形成博弈为异构蜂窝网络中的全双工接入和设备到设备链路进行子信道分配”，IEEE Trans. Vehicular Technology，第 69 卷，第 9 期，第 9736–9749 页，2020 年 9 月。[20] J. Li 等，“基于竞争图的毫米波回传网络节能全双工并发调度”，IEEE Access，第 7 卷，第 178007–178019 页，2019 年 12 月。[21] K. Eshteiwi、G. Kaddoum、B. Selim 和 F. Gagnon，“同频干扰和车辆作为障碍物对全双工车对车协作无线网络的影响”，IEEE Trans. Vehicular Technology，第 69 卷，第 7 期，第 7503–7517 页，2020 年 7 月。[22] 3 GPP 37.885，第三代合作伙伴计划；无线接入网技术规范组；车联网新用例评估方法研究

LTE 和新空口，技术报告，V15.3.0，2019 年 6 月。[23] J. Lyu、Y. Zeng 和 R. Zhang，“蜂窝热点的无人机辅助卸载”，IEEE Trans. Wireless Communi.，第 17 卷，第 6 期，第 3988–4001 页，2018 年 6 月。[24] M. Hua、等，“无人机辅助无线传感器网络中的节能通信”，IEEE Communi. Letters，第 22 卷，第 6 期，第 1264–1267 页，2018 年 6 月。[25] H. Lee、S. Eom、J. Park 和 I. Lee，“采用协作干扰的无人机辅助安全通信”，IEEE Trans. Vehicular Technology，第 67 卷，第 10 期，第 9385–9392 页，2018 年 10 月。[26] R. Amorim 等，“航空飞行器在LTE蜂窝网络中造成的实测上行链路干扰”，IEEE Wireless Communi. Letters，第 7 卷，第 6 期，第 958–961 页，2018 年 12 月。[27] K. Eshteiwi 等，“密集多车道公路中基于全双工车辆中继选择的性能分析”，IEEE Access，第 7 卷，第 61581–61595 页，2019 年。[28] Y. Wang 等，“毫米波车联网中基于联盟博弈的全双工热门内容分发”，IEEE Trans. Vehicular Technology，第 69 卷，第 11 期，第 13836–13848 页，2020 年 11 月。[29] O. E. Ochia 和 A. O. Fapojuwo，“设备到设备赋能的毫米波OFDMA蜂窝网络能效与频谱效率分析”，IEEE Trans. Communi.，第 67 卷，第 11 期，第 8097–8111 页，2019 年 11 月。[30] M. D. Yacoub、J. E. V. Bautista 和 L. Guerra de Rezende Guedes，“Nakagami-m分布的高阶统计量”，IEEE Trans. Vehicular Technology，第 48 卷，第 3 期，第 790–794 页，1999 年 5 月。[31] 3GPP TR 38.901，5G；0.5 至 100 GHz 频段的信道模型研究（第 14 版），技术报告，V14.0.0，2017 年 5 月。[32] G. Yang 和 M. Xiao，“毫米波中继性能分析：波束宽度和自干扰的影响”，IEEE Trans. Communi.，第 66 卷，第 2 期，第 589–600 页，2018 年 2 月。[33] C. E. Shannon，“通信的数学理论”，The Bell System Technical J.，第 27 卷，第 3 期，第 379–423 页，1948 年 7 月。[34] Y. Liu、K. Xiong、Y. Lu、Q. Ni、P. Fan 和 K. B. Letaief，“莱斯衰落下的无人机辅助无线能量传输与数据采集”，IEEE J. Sel. Areas Communi.，第 39 卷，第 10 期，第 3097–3113 页，2021 年 10 月。[35] M. K. Simon 和 M.-S. Alouini，《衰落信道中的数字通信》，第 95 卷。美国新泽西州霍博肯：威利，2005 年。[36] I. K. Son、S. Mao、M. X. Gong 和 Y. Li，“定向毫米波无线个人局域网的基于帧的调度”，载于 INFOCOM 2012 会议录（美国佛罗里达州奥兰多），2012 年 3 月 25 日至 30 日，第 2149–2157 页。[37] Y. Niu 等，“在毫米波小基站接入与回传联合调度中利用设备到设备通信”，IEEE J. Sel. Areas Communi.，第 33 卷，第 10 期，第 2052–2069 页，2015 年 10 月。[38] Y. Niu 等，“采用中继辅助且具备QoS感知的调度克服毫米波回传网络中的阻塞”，IEEE Trans. Vehicular Technology，第 68 卷，第 2 期，第 1733–1744 页，2019 年 2 月。[39] T. D. Hoang、L. B. Le 和 T. Le-Ngoc，“利用基于图的方法为底层蜂窝网络中的D2D通信分配资源”，IEEE Trans. Wireless Communi.，第 15 卷，第 10 期，第 7099–7113 页，2016 年 10 月。[40] “3GPP TR 38.901 V16.1.0——0 至 138 901、5 100 2020. 至 GHz 频段信道模型研究”，ETSI，法国索菲亚安提波利斯，ETSI TR Dec. . [41] B. Chandrasekaran，“网络流量模型综述”，圣路易斯华盛顿大学 CSE，2009 年。 [在线]。网址：https://www.cse.wustl.edu/jain/cse567-06/traffic models3.htm

–