

V2I通信中基于STAR-RIS辅助RSMA的HARQ性能分析

季霏霏

兰州理工大学理学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2025年4月29日; 录用日期: 2025年5月23日; 发布日期: 2025年5月30日

摘要

为解决车辆与基站之间通信链路受阻和通信可靠性问题, 本文研究同时传输和反射可重构智能表面(Simultaneous Transmitting and Reflecting Reconfigurable Intelligent Surfaces, STAR-RIS)辅助的车辆通信, 考虑速率分割多址接入(Rate-Splitting Multiple Access, RSMA), 并结合混合自动重传(Hybrid Automatic Repeat reQuest, HARQ)技术, 分析系统性能。通过信道近似分布推导HARQ传输协议下车辆用户的中断概率, 根据中断概率表达式进一步分析吞吐量和能量效率, 推导出吞吐量和能量效率的闭式表达式。最后, 借助MATLAB平台进行数值模拟, 验证了理论分析的正确性。结果表明, 通过对不同STAR-RIS元件个数、基站发射功率和HARQ最大重传次数下的系统性能, 发现采用HARQ的系统性能优于不采用HARQ的系统, 且分配更多功率的车辆用户性能更优。

关键词

STAR-RIS, 速率分割多址接入, 混合自动重传, 车辆与基站通信

Analysis of HARQ Performance Based on STAR-RIS Assisted RSMA in V2I Communication

Feifei Ji

School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu

Received: Apr. 29th, 2025; accepted: May 23rd, 2025; published: May 30th, 2025

Abstract

To solve the problems of communication link obstruction and communication reliability between

文章引用: 季霏霏. V2I通信中基于STAR-RIS辅助RSMA的HARQ性能分析[J]. 应用数学进展, 2025, 14(5): 625-636.
DOI: 10.12677/aam.2025.145288

vehicles and base stations, this paper studies vehicle communication assisted by Simultaneous Transmitting and Reflecting Reconfigurable Intelligent Surfaces (STAR-RIS), considers Rate Splitting Multiple Access (RSMA) and combines Hybrid Automatic Repeat reQuest (HARQ) technology to analyze system performance. The outage probability of vehicle users under the HARQ transmission protocol is deduced from channel approximation distribution, throughput and energy efficiency are further analyzed based on the outage probability expression, and closed-form expressions for throughput and energy efficiency are derived. Finally, numerical simulations are conducted using the MATLAB platform to verify the correctness of the theoretical analysis. The results show that by comparing the system performance under different numbers of STAR-RIS elements, base station transmission power, and maximum HARQ retransmission times, it is found that the system performance using HARQ is better than that without HARQ, and the performance of vehicle users who allocate more power is better.

Keywords

STAR-RIS, Rate Splitting Multiple Access (RSMA), Hybrid Automatic Repeat reQuest (HARQ), Vehicle-to-Base Station Communication

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来，车联网(Vehicle-to-Everything, V2X)技术作为智能交通系统(Intelligent Transportation Systems, ITS)的核心组成部分，通过实现车辆与车辆(Vehicle to Vehicle, V2V)、车辆与基础设施(Vehicle to Infrastructure, V2I)、车辆与行人(Vehicle to Pedestrian, V2P)的高效信息交互，提升了道路安全、交通效率和用户体验[1] [2]。然而，随着自动驾驶和高密度车辆网络的快速发展，传统V2X通信面临严峻挑战：复杂城市环境中的信号遮挡、动态拓扑变化导致的多普勒频移，以及频谱资源受限等问题，严重制约了通信可靠性的进一步提升。

可重构智能表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)技术通过动态调控电磁波传播环境，为无线通信提供了新的突破路径[3] [4]。然而，传统RIS只支持反射，发射机和接收机需在同一侧，限制了RIS在各种无线通信应用中的灵活性和实际部署。为了克服这一限制，刘元玮教授及其团队提出了同时传输和反射RIS(Simultaneous Transmitting and Reflecting RIS, STAR-RIS)[5]。STAR-RIS可以在一侧反射入射信号，同时在另一侧传输入射信号，其中传输信号和反射信号可以通过传输系数和反射系数进行调整，并独立优化其相位与幅度，从而实现对车辆通信环境的360°智能重构。在车辆通信中应用STAR-RIS，包括在车辆或道路(侧)基础设施上，提供了增强V2X通信、提高数据传输速率和提高通信可靠性的潜力[6]。

与传统的多址接入方法相比，基于速率分裂(Rate-Splitting, RS)概念的速率分割多址接入(Rate-Splitting Multiple Access, RSMA)技术，因其强大而灵活的干扰管理能力越来越受到人们的关注[7] [8]。RSMA的主要思想是将用户消息分成公共部分和私有部分，一部分解码干扰，一部分将干扰作为噪声，这与空分多址接入(Space-Division Multiple Access, SDMA)和非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)中使用的极端干扰管理策略形成对比。RSMA的灵活性使它能够对所有级别的干扰有更好的处理，当干扰较弱或较强时，RSMA通过调整公共流和私有流的功率，自动降低为SDMA或NOMA[9]。

尽管引入 RSMA 具有一定的优势，但在快速变化的无线信道上建立可靠的通信链路仍然是一个待解决的问题。为此，研究人员对 STAR-RIS 辅助 RSMA 通信系统展开研究，以优化信号的传输和接收。文献[10]研究了 STAR-RIS 辅助 RSMA 的下行通信，分析了系统的性能，并推导出两种不同的 STAR-RIS 操作协议，即能量分割和模式切换下每个反射和传输的下行用户中断概率封闭表达式。文献[11]针对 STAR-RIS 辅助 RSMA 系统的物理层安全，研究了用户保密中断概率在高信噪比区域的渐近行为。进一步分析传输功率、目标保密率、功率分配参数以及反射和传输元素个数对系统保密性能的影响。文献[12]研究了不完美连续干扰消除下的 STAR-RIS 辅助双用户 RSMA 网络的有效容量，推导了双 RSMA 用户的有效容量解析表达式，结果表明随着信噪比的增长，两个用户的有效容量显著提高，并且 STAR-RSMA 网络在提高系统有效容量方面比 STAR-RIS 辅助的其他非正交多址网络更有优势。文献[13]针对 RSMA 辅助的 V2X 通信，提出了多层 RSMA 方案，研究了其在瑞利衰落信道上的性能，并分别推导了可实现总速率和中断概率的封闭表达式。结果表明，对于低信噪比场景，此系统比传统 NOMA 辅助的 V2X 系统实现了更高的可实现总速率，中断概率优于 NOMA 辅助的 V2X 系统和传统协作通信系统。

为了提高无线通信系统的频谱或能源效率，以满足不断增长的需求，混合自动重复请求(Hybrid Automatic Repeat reQuest, HARQ)作为一种很有前途的技术出现，它通过战略性地转发有限次数的信息，减少由于信道衰落造成的数据损失，提高数据传输的可靠性和效率[14][15]。文献[16]提出了一种针对 RSMA 网络的高效 HARQ 传输协议，分析了三种新引入的重传策略的有效性。文献[17]为了进一步提高无线通信系统的覆盖范围和鲁棒性，研究了一种主动 RIS 辅助的 RSMA 系统，分析了基于 HARQ 传输协议的中断概率。

此外，HARQ 在 STAR-RIS 辅助 RSMA 系统中的性能的具体影响和有效性尚未达成共识。在复杂和充满障碍的无线通信环境中，确保信号传输的可靠性，同时避免计算复杂度的显著增加，仍然是一个迫切需要解决的问题。为了有效地解决这一问题，本文分析 V2I 通信中 STAR-RIS 辅助 RSMA 网络的 HARQ 性能。本文的贡献如下：

- 1) 根据能量分裂协议，建立了基于 V2I 通信的 STAR-RIS 辅助 RSMA 模型，并给出 HARQ 下信号传输过程；
- 2) 根据 RSMA 原则，分析系统车辆用户解码公共信号和私有信号的信干噪比；
- 3) 通过信道近似分布，求解车辆用户在 HARQ 协议下的中断概率，推导出系统中断概率闭式表达式；
- 4) 在中断概率的基础上，进一步推导吞吐量和能量效率表达式；
- 5) 数值结果表明，同时考虑 HARQ 和 STAR-RIS 技术的 V2I 通信系统可以获得显著的性能增益，系统的中断性能和吞吐量性能得到了提升。此外，数值结果揭示了采用 HARQ 技术的系统性能优于无 HARQ 系统。

本文的其余部分组织如下。第 2 节介绍了基于 V2I 通信的 STAR-RIS 辅助 RSMA 模型。在第 3 节中，分析了 RSMA 方案下车辆用户解码公共信号和私有信号的信干噪比，推导了 HARQ 协议下的中断概率、吞吐量和能效表达式。第 4 节给出了数值模拟结果。第 5 节是结论。

2. 系统模型

本文主要研究 V2I 通信中 STAR-RIS 辅助 RSMA 模型，具体场景如图 1 所示。

在此模型中，包含两个接收车辆 P 和 Q、一个基站 S 和由 N 个元素组成的 STAR-RIS 板。车辆在行驶过程中，由于建筑物等障碍，导致基站与车辆之间直接通信链路受阻，车辆需借助 STAR-RIS 辅助通信，将信号通过反射和折射传输给目标车辆，所有车辆及基站都配备单天线。基站、车辆 Q 位于同一侧，

用于接收反射信号，而车辆 P 位于 STAR-RIS 板的另一侧，接收来自基站折射的信号，本章采用能量分裂协议[18]。为了提高系统内信息传输的可靠性，采用 HARQ 协议，将未成功解码的数据包进行重传，对所需信号的最大重传限制为 L 。

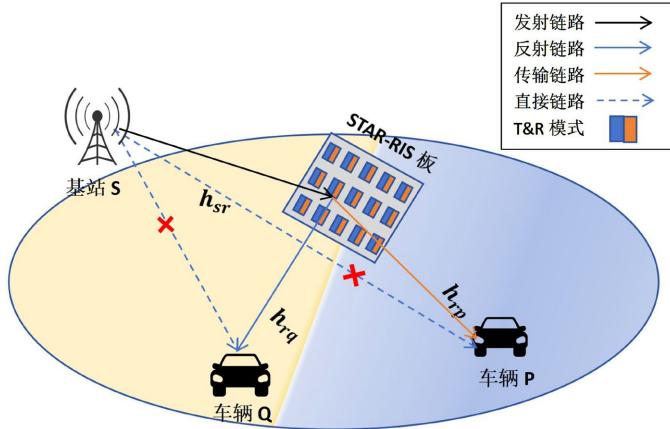


Figure 1. System model diagram of STAR-RIS assisted RSMA in V2I communication
图 1. V2I 通信中 STAR-RIS 辅助 RSMA 的系统模型图

首先，STAR-RIS 有 N 个元素， $T_n = \sqrt{\beta_n^T} e^{j\Theta_n^T}$ 、 $R_n = \sqrt{\beta_n^R} e^{j\Theta_n^R}$ 分别表示第 n ($n=1, 2, \dots, N$) 个元素的折射系数和反射系数。由 STAR-RIS 的能量分裂协议可知，所有 STAR-RIS 元素同时在折射模式和反射模式下工作，则有 $|T_n|^2 + |R_n|^2 \leq 1$ ，也可以写作 $\beta_n^T + \beta_n^R \leq 1$ ， $\beta_n^T, \beta_n^R \in [0, 1]$ 、 β_n^T, β_n^R 分别表示第 n 个元素的发射和反射信号的振幅系数， $\theta_n^T, \theta_n^R \in [0, 2\pi]$ 分别为第 n 个元素的发射和反射信号的相移，相移是可以被独立调节的。

$\mathbf{h}_{sr,l} = [h_{s1,l}, h_{s2,l}, \dots, h_{sN,l}]$, $\mathbf{h}_{rw,l} = [h_{1w,l}, h_{2w,l}, \dots, h_{Nw,l}]$ 分别表示基站 S 到 STAR-RIS 以及 STAR-RIS 到节点 $w \in \{p, q\}$ 的信道系数，其中 $\mathbf{h}_{sr,l}, \mathbf{h}_{rw,l} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ ， $h_{sn,l}$ 表示第 l ($1 < l < L$) 轮基站 S 与 STAR-RIS 上第 n 个折射/反射原件之间的信道系数， $h_{nw,l}$ 是指第 l 轮第 n 个折射/反射原件与节点之间的信道系数，基站到 STAR-RIS 再到节点的信道增益由 $\mathbf{h}_{sr}^H \Theta_i \mathbf{h}_{rp}$ 表示，其中 $\Theta_i = \text{diag}(\sqrt{\beta_1^i} e^{j\theta_1^i}, \sqrt{\beta_2^i} e^{j\theta_2^i}, \dots, \sqrt{\beta_N^i} e^{j\theta_N^i})$ ， $i \in \{T, R\}$ 。假设 $\beta_1^R = \beta_2^R = \dots = \beta_N^R = \beta^R$ ， $\beta_1^T = \beta_2^T = \dots = \beta_N^T = \beta^T$ ， $\beta^R = \beta^T = \frac{1}{2}$ ，因此 $\Theta_R = \sqrt{\beta^R} \text{diag}(e^{j\theta_1^R}, e^{j\theta_2^R}, \dots, e^{j\theta_N^R})$ ， $\Theta_T = \sqrt{\beta^T} \text{diag}(e^{j\theta_1^T}, e^{j\theta_2^T}, \dots, e^{j\theta_N^T})$ 。

假设基站有两条消息 M_1 和 M_2 ，分别发送给车辆 P 和 Q。 M_1 和 M_2 又被分为两部分， M_1^p 和 M_1^q 是发送给车辆 P 的， M_2^q 和 M_2^c 是发送给车辆 Q 的。将 M_1^c 和 M_2^c 编码成公共消息 x_c ，将 M_1^p 和 M_2^q 分别编码成针对车辆 P 和 Q 的两个私有消息 $x_{p,l}$ 、 $x_{q,l}$ 。 x_c 、 $x_{p,l}$ 及 $x_{q,l}$ 的传输功率分别为 p_c 、 $p_{p,1}$ 和 $p_{q,2}$ ，其中 $P_c = \alpha_0 P_s$ 、 $P_{p,1} = \alpha_1 P_s$ 以及 $P_{q,2} = \alpha_2 P_s$ ， P_s 表示基站总的发射功率，则 $\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2 = 1$ ，且 $0 \leq \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2 \leq 1$ 表示发射功率的分配系数。

基站发射的叠加信号为：

$$x = \sqrt{\alpha_0 P_s} x_c + \sqrt{\alpha_1 P_s} x_{p,1} + \sqrt{\alpha_2 P_s} x_{q,2} \quad (1)$$

利用 HARQ 方案，初始传输设置为 l 。如果接收器不能成功解码数据包，它发送一个否定应答信号， l 增加，并请求重传。这个过程继续进行，直到接收方成功解码数据包，收到肯定应答，或者 l 增加到 L 。

车辆 P 处第 l 轮接收到的信号为：

$$y_{p,l} = \mathbf{h}_{sr,l}^H \Theta_T \mathbf{h}_{rp,l} x + n_p \quad (2)$$

其中, $n_p \sim CN(0, \delta_p^2)$ 。

车辆 Q 处第 l 轮接收到的信号为:

$$y_{q,l} = \mathbf{h}_{sr,l}^H \Theta_R \mathbf{h}_{rq,l} x + n_q \quad (3)$$

其中, $n_q \sim CN(0, \delta_q^2)$ 。

根据 RSMA 原则, 每个用户需要先解码公共消息, 然后将其他用户的私人消息视为干扰, 使用连续干扰消除来解码自己需要的私人消息。因此, 车辆 P 处接收并解码公共信息流的信干噪比为:

$$\gamma_p^c = \frac{\alpha_0 P_s |\mathbf{h}_{sr,l}^H \Theta_T \mathbf{h}_{rp,l}|^2}{(\alpha_1 + \alpha_2) P_s |\mathbf{h}_{sr,l}^H \Theta_T \mathbf{h}_{rp,l}|^2 + \delta_p^2} \quad (4)$$

在解码公共消息后, 进一步使用连续干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC), 从剩余信号解码自己私有消息流的信干噪比为:

$$\gamma_p^s = \frac{\alpha_1 P_s |\mathbf{h}_{sr,l}^H \Theta_T \mathbf{h}_{rp,l}|^2}{\alpha_2 P_s |\mathbf{h}_{sr,l}^H \Theta_T \mathbf{h}_{rp,l}|^2 + \delta_p^2} \quad (5)$$

对于车辆 Q, 解码公共信息流和私有信息流的信干噪比分别为:

$$\gamma_q^c = \frac{\alpha_0 P_s |\mathbf{h}_{sr,l}^H \Theta_R \mathbf{h}_{rq,l}|^2}{(\alpha_1 + \alpha_2) P_s |\mathbf{h}_{sr,l}^H \Theta_R \mathbf{h}_{rq,l}|^2 + \delta_q^2} \quad (6)$$

$$\gamma_q^s = \frac{\alpha_2 P_s |\mathbf{h}_{sr,l}^H \Theta_R \mathbf{h}_{rq,l}|^2}{\alpha_1 P_s |\mathbf{h}_{sr,l}^H \Theta_R \mathbf{h}_{rq,l}|^2 + \delta_q^2} \quad (7)$$

小尺度衰落模型: 本文假设每个 STAR-RIS 元素的信道是独立同分布 Nakagami-m 衰落信道, 多个元素引入复合信道。当 N 较大时, 复合通道功率增益 $|\mathbf{h}_{sr}^H \Theta_T \mathbf{h}_{rp}|^2$ 和 $|\mathbf{h}_{sr}^H \Theta_R \mathbf{h}_{rq}|^2$ 的分布可拟合为 Gamma 分布 $\Gamma(k, \theta)$, 其形状参数和尺度参数表示为[19]:

$$\begin{cases} k = \frac{\Gamma\left(m + \frac{1}{2}\right)^2}{4\left(m\Gamma(m)^2 - \Gamma\left(m + \frac{1}{2}\right)^2\right)} N \\ \theta = 4\Omega N - \frac{4\Omega}{m} \left(\frac{\Gamma\left(m + \frac{1}{2}\right)}{\Gamma(m)} \right)^2 N \end{cases}$$

其中, m 和 Ω 为 Nakagami-m 分布的形状参数和扩散参数。

3. 性能分析

3.1. 中断概率

在本节中, 通过推导分析所考虑系统的中断概率表达式, 分析 STAR-RIS 辅助 RSMA 网络的 HARQ 性能。更具体地说, 中断概率的特点是作为事件发生的概率, 累积相互在目的地收到的信息(I)低于传输

速率(R)。在 HARQ 协议下，基站连续传输新信号，直到接收到肯定应答或最大传输达到 L 轮。因此，中断概率可以表示为：

$$P_{out} = \left[\Pr(I < R) \right]^L \quad (8)$$

车辆 P 的中断概率

车辆 P 处的中断概率包含两部分，第一，车辆 P 不能成功解码公共信息流，即 $\gamma_p^c < \gamma_{p,c}^{th}$ ， $\gamma_{p,c}^{th} = 2^{R_{p,c}} - 1$ ， $R_{p,c}$ 是车辆 P 公共信息流部分的目标速率阈值；第二，车辆 P 不能成功解码属于自身的私有信息流，即 $\gamma_p^s < \gamma_{p,s}^{th}$ ， $\gamma_{p,s}^{th} = 2^{R_{p,s}} - 1$ ， $R_{p,s}$ 是车辆 P 私有信息流部分的目标速率阈值，车辆 P 处就会发生中断。经过 L 轮重传之后，车辆 P 处的中断概率表示如下：

$$\begin{aligned} P_{out}^p &= \left[\Pr(\gamma_p^c < \gamma_{p,c}^{th}, \gamma_p^s < \gamma_{p,s}^{th}) \right]^L \\ &= \left[1 - \Pr(\gamma_p^c \geq \gamma_{p,c}^{th}, \gamma_p^s \geq \gamma_{p,s}^{th}) \right]^L \\ &= \left[1 - \Pr \left(\frac{\alpha_0 P_s |\mathbf{h}_{sr}^H \Theta_T \mathbf{h}_{rp}|^2}{(\alpha_1 + \alpha_2) P_s |\mathbf{h}_{sr}^H \Theta_T \mathbf{h}_{rp}|^2 + \delta_p^2} \geq \gamma_{p,c}^{th}, \frac{\alpha_1 P_s |\mathbf{h}_{sr}^H \Theta_T \mathbf{h}_{rp}|^2}{\alpha_2 P_s |\mathbf{h}_{sr}^H \Theta_T \mathbf{h}_{rp}|^2 + \delta_p^2} \geq \gamma_{p,s}^{th}} \right) \right]^L \\ &= \left[1 - \Pr \left(|\mathbf{h}_{sr}^H \Theta_T \mathbf{h}_{rp}|^2 \geq \frac{\gamma_{p,c}^{th} \delta_p^2}{\alpha_0 P_s - (\alpha_1 + \alpha_2) P_s \gamma_{p,c}^{th}}, |\mathbf{h}_{sr}^H \Theta_T \mathbf{h}_{rp}|^2 \geq \frac{\gamma_{p,s}^{th} \delta_p^2}{\alpha_1 P_s - \alpha_2 P_s \gamma_{p,s}^{th}} \right) \right]^L \\ &= \left[1 - \Pr \left(|\mathbf{h}_{sr}^H \Theta_T \mathbf{h}_{rp}|^2 \geq \gamma_p^{th} \right) \right]^L \\ &= \left[\Pr \left(|\mathbf{h}_{sr}^H \Theta_T \mathbf{h}_{rp}|^2 \leq \gamma_p^{th} \right) \right]^L \\ &= F(\gamma_p^{th})^L \\ &= \begin{cases} \left[\frac{1}{\Gamma(k)} \gamma \left(k, \frac{\zeta_{p1}}{\theta} \right) \right]^L, \zeta_{p1} > \zeta_{p2} \\ \left[\frac{1}{\Gamma(k)} \gamma \left(k, \frac{\zeta_{p2}}{\theta} \right) \right]^L, \zeta_{p1} < \zeta_{p2} \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

其中， $\gamma_p^{th} = \max \{ \zeta_{p1}, \zeta_{p2} \}$ ， $\zeta_{p1} = \frac{\gamma_{p,c}^{th} \delta_p^2}{\alpha_0 P_s - (\alpha_1 + \alpha_2) P_s \gamma_{p,c}^{th}}$ ， $\zeta_{p2} = \frac{\gamma_{p,s}^{th} \delta_p^2}{\alpha_1 P_s - \alpha_2 P_s \gamma_{p,s}^{th}}$ 。

车辆 Q 的中断概率

同理，车辆 Q 处的中断概率也包含两部分，第一，车辆 Q 不能成功解码公共信息流，即 $\gamma_q^c < \gamma_{q,c}^{th}$ ， $\gamma_{q,c}^{th} = 2^{R_{q,c}} - 1$ ， $R_{q,c}$ 是车辆 Q 公共信息流部分的目标速率阈值；第二，车辆 Q 不能成功解码属于自身的私有信息流，即 $\gamma_q^s < \gamma_{q,s}^{th}$ ， $\gamma_{q,s}^{th} = 2^{R_{q,s}} - 1$ ， $R_{q,s}$ 是车辆 Q 私有信息流部分的目标速率阈值，车辆 Q 处就会发生中断。经过 L 轮重传之后，车辆 Q 处的中断概率表示如下：

$$\begin{aligned} P_{out}^q &= \left[\Pr(\gamma_q^c < \gamma_{q,c}^{th}, \gamma_q^s < \gamma_{q,s}^{th}) \right]^L \\ &= \left[1 - \Pr(\gamma_q^c \geq \gamma_{q,c}^{th}, \gamma_q^s \geq \gamma_{q,s}^{th}) \right]^L \\ &= \left[1 - \Pr \left(\frac{\alpha_0 P_s |\mathbf{h}_{sr}^H \Theta_R \mathbf{h}_{rq}|^2}{(\alpha_1 + \alpha_2) P_s |\mathbf{h}_{sr}^H \Theta_R \mathbf{h}_{rq}|^2 + \delta_q^2} \geq \gamma_{q,c}^{th}, \frac{\alpha_2 P_s |\mathbf{h}_{sr}^H \Theta_R \mathbf{h}_{rq}|^2}{\alpha_1 P_s |\mathbf{h}_{sr}^H \Theta_R \mathbf{h}_{rq}|^2 + \delta_q^2} \geq \gamma_{q,s}^{th}} \right) \right]^L \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \left[1 - Pr \left(\left| \mathbf{h}_{sr}^H \Theta_R \mathbf{h}_{rq} \right|^2 \geq \frac{\gamma_{q,c}^{th} \delta_q^2}{\alpha_0 P_s - (\alpha_1 + \alpha_2) P_s \gamma_{q,c}^{th}}, \left| \mathbf{h}_{sr}^H \Theta_R \mathbf{h}_{rq} \right|^2 \geq \frac{\gamma_{q,s}^{th} \delta_q^2}{\alpha_2 P_s - \alpha_1 P_s \gamma_{q,s}^{th}} \right) \right]^L \\
&= \left[Pr \left(\left| \mathbf{h}_{sr}^H \Theta_R \mathbf{h}_{rq} \right|^2 \leq \gamma_q^{th} \right) \right]^L \\
&= F \left(\gamma_q^{th} \right)^L \\
&= \begin{cases} \left[\frac{1}{\Gamma(k)} \gamma \left(k, \frac{\zeta_{q1}}{\theta} \right) \right]^L, & \zeta_{q1} > \zeta_{q2} \\ \left[\frac{1}{\Gamma(k)} \gamma \left(k, \frac{\zeta_{q2}}{\theta} \right) \right]^L, & \zeta_{q1} < \zeta_{q2} \end{cases} \\
\text{其中, } \gamma_q^{th} &= \max \left\{ \zeta_{q1}, \zeta_{q2} \right\}, \quad \zeta_{q1} = \frac{\gamma_{q,c}^{th} \delta_q^2}{\alpha_0 P_s - (\alpha_1 + \alpha_2) P_s \gamma_{q,c}^{th}}, \quad \zeta_{q2} = \frac{\gamma_{q,s}^{th} \delta_q^2}{\alpha_2 P_s - \alpha_1 P_s \gamma_{q,s}^{th}}.
\end{aligned} \tag{10}$$

3.2. 吞吐量分析

在给定目标数据速率的情况下，该模型的系统吞吐量由两个用户成功接收的数据总和决定[20]。因此，经过 L 轮重传后，RSMA 系统吞吐量被计算为[20]：

$$\begin{aligned}
T_{total} &= R_{p,c} \left[Pr \left(\gamma_p^c \geq \gamma_{p,c}^{th} \right) \right]^L + R_{p,s} \left[Pr \left(\gamma_p^c \geq \gamma_{p,c}^{th}, \gamma_p^s \geq \gamma_{p,s}^{th} \right) \right]^L \\
&\quad + R_{q,c} \left[Pr \left(\gamma_q^c \geq \gamma_{q,c}^{th} \right) \right]^L + R_{q,s} \left[Pr \left(\gamma_q^c \geq \gamma_{q,c}^{th}, \gamma_q^s \geq \gamma_{q,s}^{th} \right) \right]^L \\
&= R_{p,c} \left(1 - P_{out}^p \Big|_{\gamma_p^{th} = \zeta_{p1}} \right) + R_{p,s} \left(1 - P_{out}^p \right) + R_{q,c} \left(1 - P_{out}^q \Big|_{\gamma_q^{th} = \zeta_{q1}} \right) + R_{q,s} \left(1 - P_{out}^q \right)
\end{aligned} \tag{11}$$

其中， P_{out}^p 表示车辆 P 的中断概率，由式(9)给出， P_{out}^q 为车辆 Q 的中断概率，由式(10)给出。

3.3. 能量效率

本节将分析系统的能量效率，为更好地评估系统的能效，需建立一个能效模型。首先，BS 的功耗包括功率放大器(P_{PA})和模拟电路(P_{PAc})两部分[21] [22]。 P_{PA} 值是根据发射功率计算得出，并假设模拟电路的功耗固定。 ϑ 为功率放大器效率。 P_R 表示 STAR-RIS 的每个元件所消耗的功率，其中 P_p 和 P_q 分别为接收车辆 P 和 Q 的电路功耗。

$$P_{PA} = \frac{P_s}{\vartheta} \tag{12}$$

经过 L 轮重传之后，总的功耗就表示为：

$$P_{total} = \left(\frac{P_s}{\vartheta} + P_{PAc} + M P_R + P_p + P_q \right) * L \tag{13}$$

最后，系统的能量效率表达式为：

$$\begin{aligned}
\eta_{EE} &= \frac{T_{total}}{P_{total}} \\
&= \frac{R_{p,c} \left(1 - P_{out}^p \Big|_{\gamma_p^{th} = \zeta_{p1}} \right) + R_{p,s} \left(1 - P_{out}^p \right) + R_{q,c} \left(1 - P_{out}^q \Big|_{\gamma_q^{th} = \zeta_{q1}} \right) + R_{q,s} \left(1 - P_{out}^q \right)}{\left(\frac{P_s}{\vartheta} + P_{PAc} + M P_R + P_p + P_q \right) * L}
\end{aligned} \tag{14}$$

4. 数值模拟

本节将通过 MATLAB 提供数值结果, 验证前面推导的理论表达式, 除特殊说明外, 系统参数设置如下: $\delta_p^2 = 170 \text{ dBm}$, $\delta_q^2 = 190 \text{ dBm}$, $m = 2$, $\Omega = 1$, $R_{p,c} = 0.8$, $R_{p,s} = 0.2$, $R_{q,c} = 0.6$, $R_{q,s} = 0.4$, $\alpha_0 = 0.5$, $\alpha_1 = 0.2$, $\alpha_2 = 0.3$, $P_s = 30 \text{ dBm}$ 。

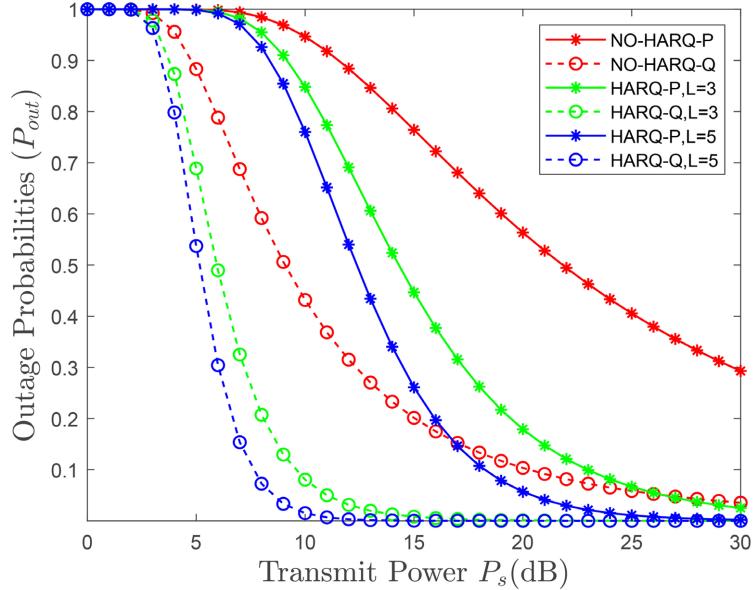


Figure 2. Relationship curve of base station transmit power P_s vs. outage probability ($N = 30$)
图 2. 基站发射功率 P_s 与中断概率的关系曲线($N = 30$)

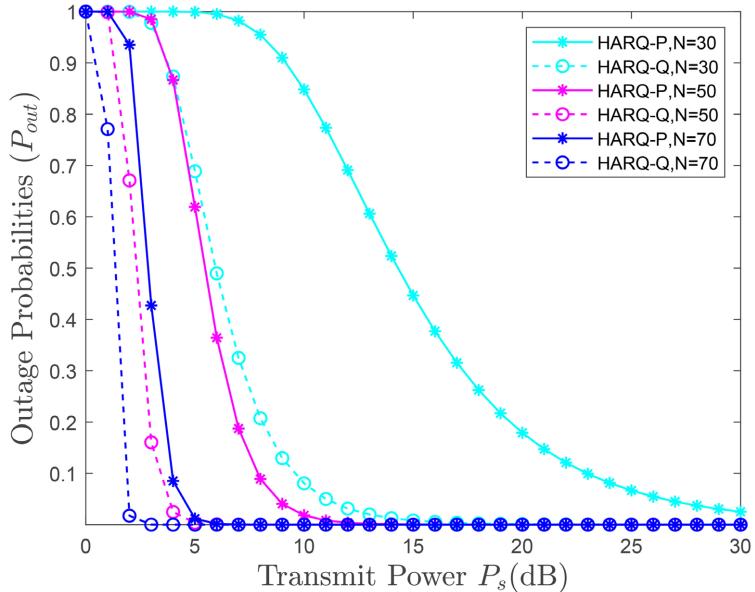


Figure 3. Relationship curve of base station transmit power P_s vs. outage probability ($L = 3$)
图 3. 基站发射功率 P_s 与中断概率的关系曲线($L = 3$)

图 2 表明, 当 STAR-RIS 的元素个数 $N = 30$ 时, 随着基站发射功率 P_s 的增大, 车辆 P 和 Q 处的中断概率逐渐变小。对比采用 HARQ 和不采用 HARQ 方案, 图中显示采用 HARQ 方案可有效降低中断概率,

并随着最大重传次数 L 的增大，车辆 P 和 Q 处的中断概率有明显降低。表明随着 L 的增加，系统提供了更多的有效信息，使接收车辆能够更准确、更有效地纠正错误数据。这一结果表明，HARQ 协议的引入显著提高了 V2I 通信的整体可靠性。此外，我们还发现车辆 Q 比车辆 P 具有更好的可靠性。这是因为车辆 Q 被分配了更多的传输功率，从而有更可靠的传输性能。

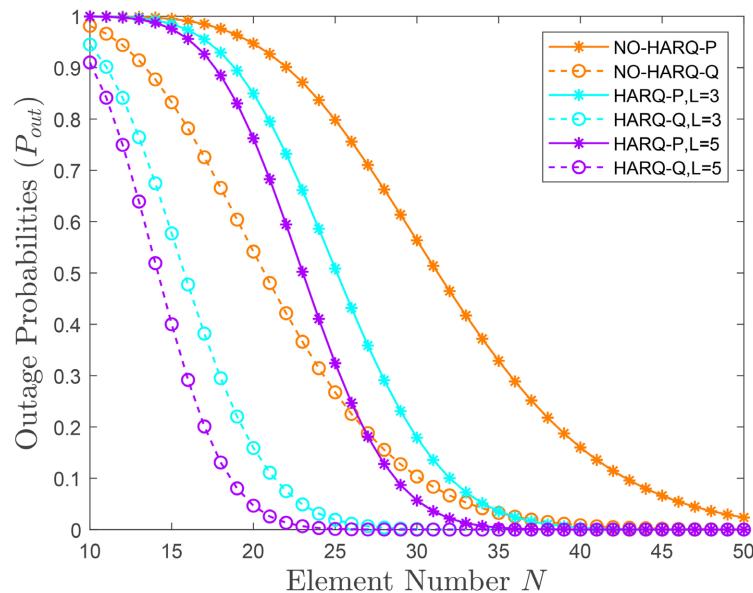


Figure 4. Relationship curve of the number of STAR-RIS components N vs. outage probability ($P_s = 20$ dBm)
图 4. STAR-RIS 元件个数 N 与中断概率的关系曲线($P_s = 20$ dBm)

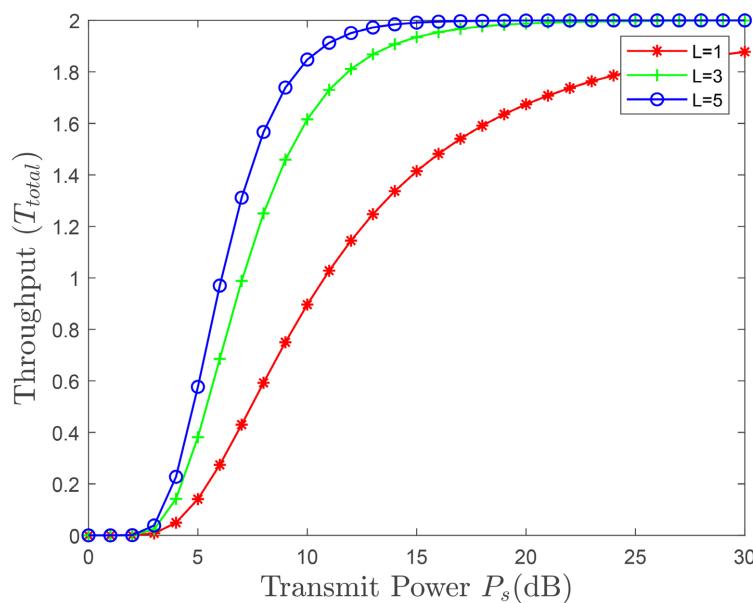


Figure 5. Relationship curve of base station transmit power P_s vs. system throughput ($N = 30$)
图 5. 基站发射功率 P_s 与系统吞吐量的关系曲线($N = 30$)

图 3 描述了当最大重传次数 $L = 3$ 时，改变 STAR-RIS 的元件个数 N ，当 N 分别取 30、50、70 时，基站的发射功率 P_s 与中断概率之间的变化趋势。图中显示，随着元件个数 N 的增长，车辆 P 和 Q 处的中

断概率会越来越小。表明 STAR-RIS 元件个数的变化有效地提高了信号强度，增加了信道容量，从而显著提高了整体系统的可靠性。此外，在相同的条件下，车辆 Q 具有更高的传输功率，因此比车辆 P 具有更好的可靠性，这与图 2 所示的结论一致。

图 4 是固定基站发射功率 $P_s = 20 \text{ dBm}$ ，改变 HARQ 最大重传次数 L 的值，STAR-RIS 元件个数 L 与中断概率的关系曲线的关系曲线。首先，随着 L 的增长，车辆 P 和 Q 处的中断概率减小，表明 STAR-RIS 设备的完善能有效改善通信质量；其次，进一步分析 L 、 N 与中断概率之间的关系，发现随着 L 的增大，车辆 P 和 Q 处的中断概率在同一个 N 值下会越来越小，说明本文引入的 HARQ 方案可以有效提高 V2I 通信链路的可靠性。

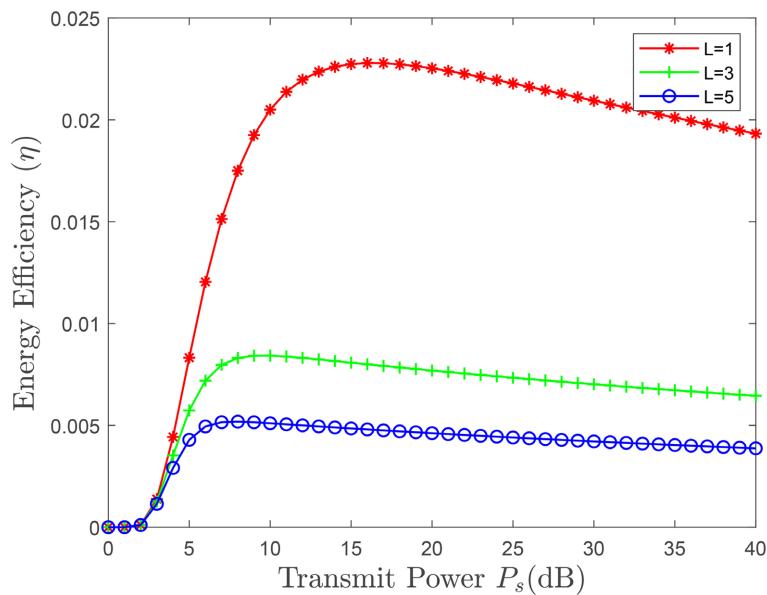


Figure 6. Relationship curve of base station transmit power P_s vs. energy efficiency ($N = 40$)
图 6. 基站发射功率 P_s 与能量效率的关系曲线($N = 40$)

图 5 描述了 $N = 30$ 时， L 分别为 1、3、5 的三种情况下，基站发射功率 P_s 对于吞吐量的影响。可以看到，随着传输功率的增大，吞吐量的曲线呈现上升趋势，这是由于传输功率越大，中断概率会越小，慢慢趋向 0，则成功传输的概率会增大，趋向 1，吞吐量随着传输功率的增大，慢慢趋向一个定值。在 N 不变、 L 改变的情况下，图 5 反映出 L 越大，吞吐量就会越大，而 L 的增大会降低系统中断概率，保障了通信质量。

图 6 给出了 $N = 40$ 不变， L 分别为 1、3、5 时的基站发射功率与能效之间的变化曲线。能效首先随着 P_s 的增大而上升，在某一 P_s 值处达到顶峰，随着 P_s 的持续增大，又会呈现下降趋势。这是由于在此之前，功耗相对不占优势，但随着 P_s 的增大，情况则相反，并且随着 L 的增大，中断概率趋于 1 的能量就浪费得越多，导致能效降低。

5. 结论

本章主要考虑 V2I 通信中 STAR-RIS 辅助 RSMA 网络，分析 HARQ 协议下的系统性能。基于 RSMA 原理，得到车辆 P 和车辆 Q 处的信干噪比，采用 Nakagami-m 衰落近似信道分布，推导出 HARQ 协议下车辆 P 和车辆 Q 各自的中断概率表达式，进一步给出系统吞吐量以及能量效率表达式。通过仿真验证理论推导的正确性，给出了基站发射功率、STAR-RIS 元件个数以及最大重传次数与系统中断概率、吞吐量

和能效之间的变化曲线，揭示了系统性能随上述参数的变化规律。数值结果表明，随着 HARQ 最大重传次数的增大，系统的中断概率降低，吞吐量提高，能效有明显变化，并对采用 HARQ 和不采用 HARQ 的系统性能作比较，发现引入 HARQ 协议可以显著提高所考虑系统的稳定性。

参考文献

- [1] Datta, S.K., Da Costa, R.P.F., Harri, J. and Bonnet, C. (2016) Integrating Connected Vehicles in Internet of Things Ecosystems: Challenges and Solutions. *2016 IEEE 17th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, Coimbra, 21-24 June 2016, 1-6. <https://doi.org/10.1109/wowmom.2016.7523574>
- [2] Datta, S.K., Haerri, J., Bonnet, C. and Ferreira Da Costa, R. (2017) Vehicles as Connected Resources: Opportunities and Challenges for the Future. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, **12**, 26-35. <https://doi.org/10.1109/mvt.2017.2670859>
- [3] Basar, E., Di Renzo, M., De Rosny, J., Debbah, M., Alouini, M. and Zhang, R. (2019) Wireless Communications through Reconfigurable Intelligent Surfaces. *IEEE Access*, **7**, 116753-116773. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2935192>
- [4] Zou, X., Yao, J., Chung, K.L., Lai, G., Zeng, W. and Gu, W. (2022) A Comparative Study between Reconfigurable Intelligent Surface and Reflectarray Antenna. *2022 IEEE 5th International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT)*, Hefei, 21-23 August 2022, 846-848. <https://doi.org/10.1109/iceict55736.2022.9909101>
- [5] Xu, J., Liu, Y., Mu, X. and Dobre, O.A. (2021) STAR-RISs: Simultaneous Transmitting and Reflecting Reconfigurable Intelligent Surfaces. *IEEE Communications Letters*, **25**, 3134-3138. <https://doi.org/10.1109/lcomm.2021.3082214>
- [6] Yadav, S. and Rishi, R. (2024) Deep Reinforcement Learning Based Energy-Efficient Design for STAR-IRS Assisted V2V Users. *Recent Trends in Image Processing and Pattern Recognition*, Derby, 7-8 December 2023, 130-143. https://doi.org/10.1007/978-3-031-53082-1_11
- [7] Zhou, G., Mao, Y. and Clerckx, B. (2022) Rate-Splitting Multiple Access for Multi-Antenna Downlink Communication Systems: Spectral and Energy Efficiency Tradeoff. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **21**, 4816-4828. <https://doi.org/10.1109/twc.2021.3133433>
- [8] Mishra, A., Mao, Y., Dizdar, O. and Clerckx, B. (2022) Rate-Splitting Multiple Access for Downlink Multiuser MIMO: Precoder Optimization and PHY-Layer Design. *IEEE Transactions on Communications*, **70**, 874-890. <https://doi.org/10.1109/tcomm.2021.3138437>
- [9] Clerckx, B., Mao, Y., Jorswieck, E.A., Yuan, J., Love, D.J., Erkip, E., et al. (2023) A Primer on Rate-Splitting Multiple Access: Tutorial, Myths, and Frequently Asked Questions. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, **41**, 1265-1308. <https://doi.org/10.1109/jsac.2023.3242718>
- [10] Karim, F., Singh, S.K., Singh, K., Prakriya, S. and Li, C. (2023) Performance Analysis for RSMA-Empowered STAR-RIS-Aided Downlink Communications. *2023 IEEE 34th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Toronto, 5-8 September 2023, 1-6. <https://doi.org/10.1109/pimrc56721.2023.10293803>
- [11] Xiao, F., Chen, P., Xu, S., Pang, X. and Liu, H. (2023) Physical Layer Security of STAR-RIS-Aided RSMA Systems. *Physical Communication*, **61**, Article ID: 102192. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2023.102192>
- [12] Sheng, X. (2024) Effective Capacity of STAR-RIS Assisted RSMA Network with Imperfect SIC. *Physical Communication*, **66**, Article ID: 102449. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2024.102449>
- [13] Fan, X., Duan, W. and Choi, J. (2024) RSMA-Aided V2X Communications: A Multi-Layer Perspective. *Physical Communication*, **65**, Article ID: 102392. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2024.102392>
- [14] Shi, Z., Tsiftsis, T.A., Tan, W., Yang, G., Ma, S. and Alouini, M. (2019) Effective Capacity for Renewal Service Processes with Applications to HARQ Systems. *IEEE Transactions on Communications*, **67**, 6556-6571. <https://doi.org/10.1109/tcomm.2019.2921768>
- [15] Wang, H., Shi, Z., Fu, Y. and Song, R. (2021) Outage Performance for Noma-Aided Small Cell Networks with HARQ. *IEEE Wireless Communications Letters*, **10**, 72-76. <https://doi.org/10.1109/lwc.2020.3020938>
- [16] Abidrabbu, S., Ali, S.R. and Arslan, H. (2024) A Novel HARQ Design for RSMA Networks. *IEEE Internet of Things Journal*, **11**, 11907-11918. <https://doi.org/10.1109/jiot.2023.3332096>
- [17] Zheng, Y., Tang, J., Zheng, B., Davydov, M. and Wong, K. (2024) In-Depth Analysis of HARQ Performance in Active RIS-Assisted RSMA Systems. *IEEE Wireless Communications Letters*, **13**, 3074-3078. <https://doi.org/10.1109/lwc.2024.3445503>
- [18] Liu, Y., Mu, X., Xu, J., Schober, R., Hao, Y., Poor, H.V., et al. (2021) STAR: Simultaneous Transmission and Reflection for 360° Coverage by Intelligent Surfaces. *IEEE Wireless Communications*, **28**, 102-109. <https://doi.org/10.1109/mwc.001.2100191>

- [19] Xie, Z., Yi, W., Wu, X., Liu, Y. and Nallanathan, A. (2022) STAR-RIS Aided NOMA in Multicell Networks: A General Analytical Framework with Gamma Distributed Channel Modeling. *IEEE Transactions on Communications*, **70**, 5629-5644. <https://doi.org/10.1109/tcomm.2022.3186409>
- [20] Vu, T., Pham, Q. and Kim, S. (2024) On Performance of Downlink THz-Based Rate-Splitting Multiple-Access (RSMA): Is It Always Better than NOMA? *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **73**, 4435-4440. <https://doi.org/10.1109/tvt.2023.3325244>
- [21] Choi, J., Park, J. and Lee, N. (2022) Energy Efficiency Maximization Precoding for Quantized Massive MIMO Systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **21**, 6803-6817. <https://doi.org/10.1109/twc.2022.3152491>
- [22] Niu, H., Lin, Z., An, K., Wang, J., Zheng, G., Al-Dhahir, N., et al. (2023) Active RIS Assisted Rate-Splitting Multiple Access Network: Spectral and Energy Efficiency Tradeoff. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, **41**, 1452-1467. <https://doi.org/10.1109/jsac.2023.3240718>