

DOI:10.20079/j.issn.1001-893x.220610002

一种基于分布式功率控制的侧行链路高谱效传输机制*

何小祥,王碧钗

(华为技术有限公司,广东 深圳 518129)

摘要:第五代(5th Generation, 5G)无线通信系统除了支持蜂窝通信,还支持侧行链路(Sidelink, SL)通信,即两个用户设备(User Equipment, UE)之间可以直接通信,而不需要经过基站中转,有利于降低传输时延、提升资源利用率。在现有的SL分布式系统中,主要通过简单的能量测量进行干扰规避,资源复用准则欠佳,导致中高用户密度场景下吞吐受限。为此,提出了一种基于分布式功率控制的SL高谱效传输机制。各发送UE基于目标链路的信道状态信息(Channel State Information, CSI)和其他干扰链路的CSI进行功率优化,以实现局部范围内多个通信链路的和吞吐最大化;进一步,设计了广播式的CSI测量上报机制能实现多链路的分布式功率控制和资源选择。仿真结果表明,所提方案相比于现有的SL分布式资源分配机制,在中高用户密度下可获得30%~100%的吞吐增益;此外,所提方案相比于现有WiFi的载波侦听多址(Carrier Sense Multiple Access, CSMA)分布式信道接入机制,在中高用户密度下可获得50%~200%的吞吐增益。

关键词:侧行链路通信;分布式功率控制;资源选择

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



微信扫描二维码
听独家语音释文
与作者在线交流
享本刊专属服务

中图分类号:TN911 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2024)02-0281-07

A Spectrum-efficient Sidelink Transmission Scheme Based on Distributed Power Control

HE Xiaoxiang, WANG Bichai

(Huawei Technologies Co., Ltd., Shenzhen 518129, China)

Abstract: In addition to cellular communication, sidelink (SL) communication has been supported in the fifth generation (5G) wireless communication systems, where two user equipments (UE) may directly communicate with each other without passing through a base station. This can reduce the transmission delay and improve resource utilization. In existing SL distributed systems, interference avoidance is mainly performed based on energy measurement, which resulted in limited throughput in a medium- or high-user density scenario. To address this problem, a spectrum-efficient SL transmission scheme based on distributed power control is proposed. Power control based on channel state information (CSI) from the target link and CSI from other interfering links is performed at each transmitting UE, so as to maximize sum throughput of a plurality of communication links in a local range. Furthermore, a broadcast CSI measurement and reporting mechanism is designed to enable distributed power control and resource selection. Simulation results show that compared with the existing SL distributed resource selection scheme, the proposed scheme can achieve 30%~100% throughput gain under medium or high user density. In addition, compared with the existing WiFi carrier sense multiple access (CSMA) scheme, the proposed solution can achieve a throughput gain of 50% to 200% under medium or high user densities.

Key words: sidelink communication; distributed power control; resource selection

* 收稿日期:2022-06-10;修回日期:2022-08-06
通信作者:王碧钗 Email:wq7712@163.com

0 引言

智能家居、元宇宙等产业的迅速发展对短距直连通信的关键性能指标 (Key Performance Indicator, KPI) 提出了越来越高的要求, 比如高清视频投屏、扩展现实 (Extended Reality, XR) 等业务要求吞吐达到百兆比特每秒乃至吉比特每秒以上^[1], 以满足极致的用户体验。

第三代合作伙伴计划 (3rd Generation Partnership Project, 3GPP) 的第 16 个版本 (Release 16, R16) 标准化了新空口 (New Radio, NR) 车联网 (Vehicle-To-Everything, V2X) 侧行链路 (Sidelink, SL) 技术^[2-4], 并对物理信道与信号, 以及同步、功率控制、资源分配、信道状态信息 (Channel State Information, CSI) 测量反馈等物理层过程进行了标准化^[5]。与传统的蜂窝网络不同, SL 通信可以支持用户设备 (User Equipment, UE) 之间的直接通信, 即用户数据直接在 UE 之间传输, 避免了蜂窝通信中用户数据经过基站中转传输, 从而可以降低传输时延并提升资源利用率。3GPP 的第 17 个版本 (Release 17, R17) 将 SL 的应用场景扩展到了面向消费者的商用场景, 以支持智能家居、可穿戴等业务的短距直连通信, 并以降低功耗和提升可靠性为目标, 在 NR V2X 的基础上对 SL 分布式资源分配机制进行了增强设计^[3]。

在缺乏集中调度节点的 SL 分布式系统中, 各个通信链路需自主选择通信资源, 降低不同链路之间的干扰。现有的 SL 支持分布式资源分配机制, 即 Mode2 机制, 其主要包含资源感知与资源选择两个过程^[2-5]。具体而言, UE 首先设置一个触发时刻 n , 在时刻 n 之前设置一个资源感知窗, 在时刻 n 之后设置一个资源选择窗。在资源感知窗中, 该 UE 盲检测其他发送 UE 的物理 SL 控制信道 (Physical Sidelink Control Channel, PSCCH), 若成功解码其他发送 UE 的 PSCCH 所携带的 SL 控制信息 (Sidelink Control Information, SCI), 则可通过 SCI 中包含的预留资源指示信息判断其他发送 UE 所预留的资源位置; 进一步, 该 UE 可以通过其他发送 UE 的解调参考信号 (Demodulation Reference Signal, DMRS) 测量参考信号接收功率 (Reference Signals Received Power, RSRP), 用于判断和其他 UE 之间的干扰水平。若该 UE 和其他 UE 之间的干扰水平大于给定

阈值, 则将其他 UE 在资源选择窗中所预留的资源进行排除, 并在资源选择窗的剩余资源中选择用于传输的资源, 以降低不同通信链路之间的干扰。

除了 3GPP 的 SL 技术, 电气电子工程师学会 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) 802. 11 标准的 WiFi 技术也可以支持短距直连通信, 其主要采用载波侦听多址 (Carrier Sense Multiple Access, CSMA) 机制进行干扰规避^[6]。在 CSMA 机制中, UE 发送数据前首先通过能量检测判断信道的忙闲状态, 若检测到能量大于给定阈值, 则认为信道为繁忙状态, 否则认为信道是空闲状态, 只有认为信道空闲时才有可能接入信道, 并且可以通过随机回退降低冲突概率^[6]。

相比于 WiFi 的 CSMA 机制, SL 利用同步系统的优势, 通过资源预留可以实现更稳定的传输, 具有更优的服务质量 (Quality of Service, QoS) 保障^[7-8]。尽管如此, 现有的 SL 技术和 WiFi 技术均是基于干扰水平与阈值的比较来判断能否和其他链路复用相同的时频资源, 该资源复用准则对于实现最优性能既不是充分的也不是必要的, 能否成功解码依赖于目标链路的信号干扰噪声比 (Signal-to-Interference plus Noise Ratio, SINR)^[9], 而不仅仅是不同链路 UE 之间的干扰强度。因此, 现有的分布式资源复用方式存在对资源的不充分利用, 频谱效率较低, 尤其是在中高用户密度场景下吞吐受限, 影响用户体验。

为了提升短距直连通信的吞吐, 本文提出了一种基于分布式功率控制的 SL 传输机制。各发送 UE 在进行资源选择和功率控制时, 不仅考虑目标链路的 CSI, 而且考虑干扰链路的 CSI。设计了以和吞吐最大化为目标的功率分配优化算法以及广播式 CSI 测量上报机制, 降低链路间干扰, 以分布式的方式获得近集中式控制的性能。仿真结果表明, 所提方案可以有效提升吞吐, 改善用户体验。

1 系统模型

本文考虑如图 1 所示的分布式短距直连通信系统。假设共有 K 个通信链路, 每个通信链路包含一个发送 UE 和一个接收 UE; 假设频域资源共包含 N 个子带 (也可以称为子信道), 且一个子带内信道是平衰落的, 其中每个子带由多个连续的物理资源块 (Physical Resource Block, PRB) 构成, 每个子带包含

M 个资源粒子 (Resource Element, RE)。

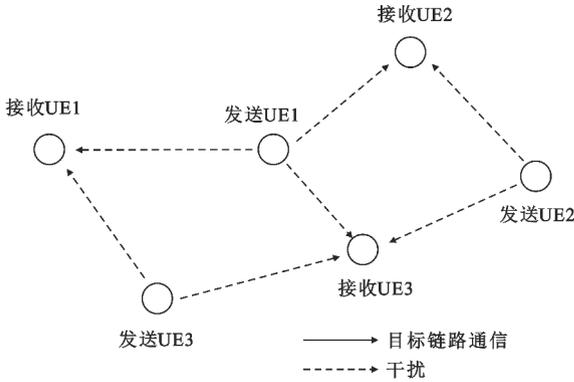


图 1 分布式通信系统

Fig. 1 Distributed communication system

第 k 个接收 UE 在第 n 个子带第 m 个 RE 的接收信号为

$$y_k[n, m] = h_{kk}[n] \cdot \sqrt{p_k[n]/M} \cdot s_k[n, m] + \sum_{j \neq k} h_{jk}[n] \cdot \sqrt{p_j[n]/M} + v_k[n, m] \quad (1)$$

式中: $s_k[n, m]$ 是第 k 个发送 UE 在第 n 个子带第 m 个 RE 的发送符号且满足 $E(s_k) = 1$; $p_k[n]$ 是第 k 个发送 UE 在第 n 个子带上的发射功率; $h_{jk}[n]$ 是第 j 个发送 UE 与第 k 个接收 UE 之间在第 n 个子带上的信道增益; $v_k[n, m]$ 是第 k 个接收 UE 在第 n 个子带第 m 个 RE 的接收噪声且服从高斯分布 $CN(0, \sigma^2/M)$ 。根据公式(1), 第 k 个接收 UE 在第 n 个子带的 SINR 可以表示为

$$\text{SINR}_k[n] = \frac{|h_{kk}[n]|^2 \cdot p_k[n]}{\sum_{j \neq k} |h_{jk}[n]|^2 \cdot p_j[n] + \sigma^2} \quad (2)$$

根据香农公式, 第 k 个通信链路可以实现的最大吞吐率可以表示为

$$R_k = \sum_{n=1}^N B \cdot \text{lb}(1 + \text{SINR}_k[n]) \quad (3)$$

式中: B 是每个子带的信道带宽。

本文以最大化多个通信链路的和吞吐为目标, 优化问题可以表示为

$$\begin{aligned} & \max_{\{p_k[n]\}} \sum_{k=1}^K R_k \\ \text{s. t. C1: } & \sum_{n=1}^N p_k[n] \leq P_{k, \max}, \forall k \\ & \text{C2: } p_k[n] \geq 0, \forall k, n \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $P_{k, \max}$ 是第 k 个发送 UE 的最大发射功率。

通过求解优化问题(4), 可以获得每个发送 UE 在各个子带的发射功率, 各个通信链路的发送 UE 均基于优化的发射功率进行传输, 可以使得多个链路的和吞吐最大化。

2 方案设计

2.1 功率分配优化算法

由于目标函数的非凸性, 优化问题(4)是一个非凸问题, 难以获得全局最优解。为了解决这一非凸优化问题, 本文利用 SINR 与最小均方误差 (Minimum Mean Square Error, MMSE) 的等价变换关系将目标函数转换为凸函数^[10], 并通过迭代优化的方式获得局部最优解。

具体而言, 公式(2)中的 SINR 与 MMSE 的变换关系可以表示为^[10]

$$(1 + \text{SINR}_k[n])^{-1} = \min_{c_k[n]} e_k[n] \quad (5)$$

式中: $e_k[n]$ 是第 k 个接收 UE 在第 n 个子带进行信号检测的均方误差, 即

$$e_k[n] = E\{|s_k[n] - c_k[n] \cdot y_k[n]|^2\} \quad (6)$$

式中: $s_k[n]$ 是第 k 个发送 UE 在第 n 个子带上的发送符号; $y_k[n]$ 是根据公式(1)得到的接收信号; $c_k[n]$ 是均衡系数。将根据公式(1)得到的 $y_k[n]$ 表达式代入公式(6)可得

$$\begin{aligned} e_k[n] = & 1 - 2 \cdot \text{Re}(c_k[n] \cdot h_{kk}[n] \cdot \sqrt{p_k[n]/M}) + \\ & |c_k[n]|^2 \cdot \left(\sum_{j=1}^K |h_{jk}[n]|^2 \cdot p_j[n]/M + \sigma^2/M \right) \end{aligned} \quad (7)$$

对公式(7)求导可以得到 $c_k[n]$ 的最优值, 即

$$\begin{aligned} & \left. \frac{\partial e_k[n]}{\partial c_k[n]} \right|_{c_k[n] = c_{o,k}[n]} = 0 \Rightarrow \\ & c_{o,k}[n] = \frac{h_{kk}[n] \cdot \sqrt{p_k[n]} \cdot \sqrt{M}}{\sum_{j=1}^K |h_{jk}[n]|^2 \cdot p_j[n] + \sigma^2} \end{aligned} \quad (8)$$

将公式(5)代入公式(3)可以得到

$$R_k = \sum_{n=1}^N B \cdot \max_{c_k[n]} (-\text{lb}(e_k[n])) \quad (9)$$

为了进一步简化目标函数, 可以基于引理 1^[10] 将公式(9)转换为线性函数, 具体如下:

引理 1 令 $f(a) = -\frac{a \cdot b}{\ln 2} + \text{lb}(a) + \frac{1}{\ln 2}$, a 是正实数, 则

$$\max_{a>0} f(a) = -\text{lb}(b) \quad (10)$$

证明: 令 $f(a)$ 对变量 a 的导数等于 0, 可以获得使得 $f(a)$ 取最大值的 a 的取值, 即

$$\left. \frac{\partial f(a)}{\partial a} \right|_{a=a_o} = 0 \Rightarrow a_o = \frac{1}{b} \quad (11)$$

根据公式(11)可以获得 $f(a)$ 的最大值为

$$\max_{a>0} f(a) = -\frac{1}{\ln 2} + \text{lb}\left(\frac{1}{b}\right) + \frac{1}{\ln 2} = -\text{lb}(b) \quad (12)$$

由此引理 1 得到证明。

根据引理 1, 公式(9)可以转化为

$$R_k = \sum_{n=1}^N B \cdot \max_{c_k[n]} \max_{a_k[n] e_k[n] > 0} \left(\frac{a_k[n] \cdot e_k[n]}{\ln 2} + \text{lb}(a_k[n]) + \frac{1}{\ln 2} \right) \quad (13)$$

根据公式(13), 优化问题(4)可以转化为如下优化问题:

$$\begin{aligned} & \max_{\{p_k[n]\}} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N B \cdot \\ & \max_{c_k[n]} \max_{a_k[n] e_k[n] > 0} \left(\frac{a_k[n] \cdot e_k[n]}{\ln 2} + \text{lb}(a_k[n]) + \frac{1}{\ln 2} \right) \\ \text{s. t. C1: } & \sum_{n=1}^N p_k[n] \leq P_{k, \max}, \forall k \\ \text{C2: } & p_k[n] \geq 0, \forall k, n \end{aligned} \quad (14)$$

优化问题(14)中共包含 3 组变量, 即 $\{c_k[n]\}$, $\{a_k[n]\}$, $\{p_k[n]\}$, 这 3 组变量可以通过迭代优化的方式进行求解。具体而言, 假设第 t 次迭代后 $\{p_k[n]\}$ 的最优解为 $\{p_k^{(t)}[n]\}$, 则根据公式(8)可以获得第 $(t+1)$ 次迭代 $\{c_k[n]\}$ 的最优解, 即

$$c_k^{(t+1)}[n] = \frac{h_{kk}[n] \cdot \sqrt{p_k^{(t)}[n]} \cdot \sqrt{M}}{\sum_{j=1}^K |h_{jk}[n]|^2 \cdot p_j^{(t)}[n] + \sigma^2} \quad (15)$$

将公式(15)代入公式(7)可得

$$e_{o,k}^{(t+1)}[n] = 1 - \frac{|h_{kk}[n]|^2 \cdot p_k^{(t)}[n]}{\sum_{j=1}^K |h_{jk}[n]|^2 \cdot p_j^{(t)}[n] + \sigma^2} \quad (16)$$

根据公式(11)和公式(16)可以获得第 $(t+1)$ 次迭代 $\{a_k[n]\}$ 的最优解, 即

$$a_k^{(t+1)}[n] = \frac{1}{e_{o,k}^{(t+1)}[n]} = \frac{1}{1 - c_k^{(t+1)}[n] \cdot h_{kk}[n] \cdot \sqrt{p_k^{(t)}[n]/M}} \quad (17)$$

获得第 $(t+1)$ 次迭代 $\{c_k[n]\}$ 和 $\{a_k[n]\}$ 的最优解后, 第 $(t+1)$ 次迭代 $\{p_k[n]\}$ 的最优解可通过求解以下优化问题获得:

$$\begin{aligned} & \min_{\{p_k^{(t+1)}[n]\}} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N a_k^{(t+1)}[n] \cdot e_k^{(t+1)}[n] \\ \text{s. t. C1: } & \sum_{n=1}^N p_k[n] \leq P_{k, \max}, \forall k \\ \text{C2: } & p_k[n] \geq 0, \forall k, n \end{aligned} \quad (18)$$

式中:

$$\begin{aligned} e_k^{(t+1)}[n] &= 1 - 2 \cdot \text{Re}(c_k^{(t+1)}[n] \cdot h_{kk}[n] \cdot \\ & \sqrt{p_k^{(t+1)}[n]/M}) + |c_k^{(t+1)}[n]|^2 \cdot \\ & \left(\sum_{j=1}^K |h_{jk}[n]|^2 \cdot p_j^{(t+1)}[n]/M + \frac{\sigma^2}{M} \right) = \\ & (c_k^{(t+1)}[n] \cdot |h_{kk}[n]| \cdot \sqrt{p_k^{(t+1)}[n]/M} - 1)^2 + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j \neq k} (c_k^{(t+1)}[n])^2 \cdot |h_{jk}[n]|^2 \cdot \\ & p_j^{(t+1)}[n]/M + (c_k^{(t+1)}[n])^2 \cdot \sigma^2/M \end{aligned} \quad (19)$$

根据拉格朗日乘子法, 优化问题(18)可以转化为如下优化问题:

$$\begin{aligned} & \min_{\{p_k^{(t+1)}[n] \geq 0, \lambda_k\}} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N a_k^{(t+1)}[n] \cdot e_k^{(t+1)}[n] + \\ & \sum_{k=1}^K \lambda_k \cdot (\sum_{n=1}^N p_k^{(t+1)}[n] - P_{k, \max}) \end{aligned} \quad (20)$$

式中: $\lambda_k \geq 0$ 为拉格朗日乘子。

优化问题(20)为凸优化问题, 可以将目标函数对 $\{p_k^{(t+1)}[n]\}$ 求导数获得最优解, 即

$$\begin{aligned} & p_k^{(t+1)}[n] = \\ & \frac{a_k^{(t+1)}[n] \cdot c_k^{(t+1)}[n] \cdot |h_{kk}[n]| / \sqrt{M}}{\sum_{j=1}^K a_k^{(t+1)}[n] \cdot (c_k^{(t+1)}[n])^2 \cdot |h_{jk}[n]|^2 \cdot p_j^{(t)}[n]/M + \lambda_k} \end{aligned} \quad (21)$$

式中: λ_k 可通过二分法进行求解, 以满足

$$\sum_{n=1}^N p_k[n] \leq P_{k, \max} \circ$$

在每次迭代中, 通过公式(15)、(17)、(21)获得的 $\{c_k[n]\}$, $\{a_k[n]\}$, $\{p_k[n]\}$ 均为当次迭代的最优解, 因此迭代更新 $\{c_k[n]\}$, $\{a_k[n]\}$, $\{p_k[n]\}$ 可以使得优化问题(14)中的目标函数取值增大或不变, 在每个发送 UE 最大发射功率的约束下, 优化问题(14)中的目标函数取值将会收敛到全局或局部最大值。

在每次迭代中, 通过公式(15)和(17)计算 $\{c_k[n]\}$ 和 $\{a_k[n]\}$ 的计算复杂度分别为 $O(K \cdot N)$, 通过公式(21)计算 $\{p_k[n]\}$ 的计算复杂度为 $O(K \cdot N \cdot \text{lb}(1/\delta))$, 其中 $\delta > 0$ 为二分法搜索的精度。因此, 上述迭代优化算法的计算复杂度为 $O(T_{\max} \cdot K \cdot N \cdot \text{lb}(1/\delta))$, T_{\max} 为最大迭代次数。

2.2 基于广播式 CSI 测量上报的分布式功率控制

由公式(15)、(17)、(21)可知, 第 k 个发送 UE 为了计算在第 n 个子带的最优发射功率, 需要获得与目标链路接收 UE 之间的信道增益 $h_{kk}[n]$ 以及与其他干扰链路接收 UE 之间的信道增益 $\{h_{jk}[n]\}_{j \neq k}$ 。为了获得上述信息, 如图 2 所示, 需要每个链路的接收 UE 测量与各个链路发送 UE 之间的 CSI, 并将 CSI 以广播的形式上报给各个链路的发送 UE, 其中每个接收 UE 上报的 CSI 包含该接收 UE 与目标链路发送 UE 之间的信道增益以及与其他干扰链路发送 UE 之间的信道增益; 每个链路的发送 UE 收集来自各个链路接收 UE 上报的 CSI, 然后基于这些信息根据 2.1 节的算法进行功率优化。

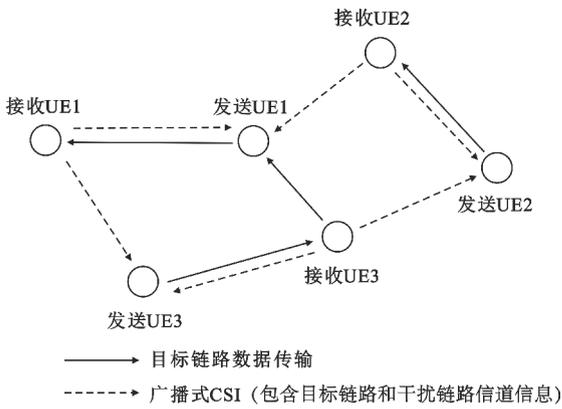


图 2 广播式 CSI 上报
Fig. 2 Broadcast CSI reporting

特别地,各个发送 UE 可以首先基于如图 3 所示的现有 SL 资源感知与资源选择过程选择干扰较小的时隙,选择相同时隙的多个发送 UE 可以通过分布式功率控制提高频谱效率。

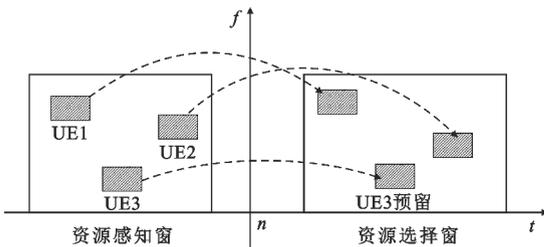


图 3 SL Mode2 分布式资源分配
Fig. 3 SL Mode2 distributed resource allocation

为了让发送 UE 明确需要和哪些链路的发送 UE 进行分布式功率控制以及获得功率优化所需的信息,可以建立发送信道状态信息参考信号(Channel State Information Reference Signal, CSI-RS)的资源与发送数据的资源之间的关联关系,且不同通信链路可以采用默认的发送功率发送正交的 CSI-RS 序列。具体而言,一个 CSI-RS 资源可以与 Q 个时隙的物理 SL 共享信道(Physical Sidelink Shared Channel, PSSCH)资源相关联,其中 PSSCH 可以携带通信数据,一个 CSI-RS 资源在时域上包含一个或多个正交频分复用(Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, OFDM)符号,在频域上每个子带包含 Q 个 PRB 集合,每个 PRB 集合的资源可以用于发送一个完整的 CSI-RS 序列。如图 4 所示,假设时隙 T_i 的 CSI-RS 资源与时隙 $T_j, T_{j+1}, T_{j+2}, T_{j+3}$ 共 4 个时隙的 PSSCH 资源相关联,其中时隙 T_i 的 CSI-RS 资源在每个子带上包含 4 个 PRB 集合,分别对应 4 个时隙;比如一个发送 UE 通过资源感知与资源选择过

程选择了时隙 T_{j+1} 作为候选传输时隙,则该发送 UE 在时隙 T_i 的 CSI-RS 资源每个子带的第 2 个 PRB 集合上发送 CSI-RS。由于不同发送 UE 的 CSI-RS 序列是正交的,每个链路的接收 UE 可以根据检测到的 CSI-RS 序列判断 CSI-RS 资源关联的每个时隙上的发送 UE 集合,并可以测量与这些发送 UE 之间的信道增益。接收 UE 可以在时隙 T_i 与时隙 T_j 之间以广播的形式将测量到的 CSI 上报给各发送 UE,选择相同时隙的发送 UE 基于目标链路接收 UE 以及干扰链路接收 UE 上报的 CSI 分别进行功率优化,且不同发送 UE 采用相同的优化参数。

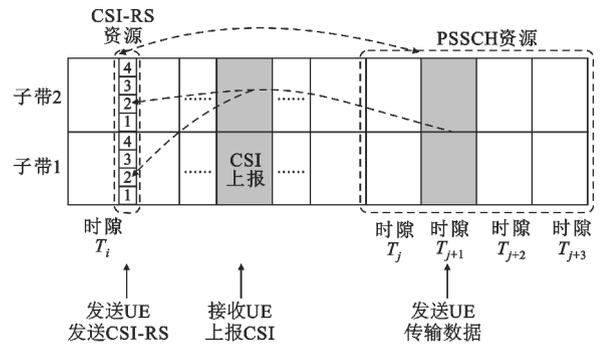


图 4 CSI-RS 资源与 PSSCH 资源的关联关系
Fig. 4 Association between CSI-RS resources and PSSCH resources

基于上述广播式 CSI 测量上报流程,可以实现多个通信链路的分布式功率控制。若第 k 个发送 UE 优化后的发送功率大于预设的阈值,即 $\sum_{n=1}^N p_k[n] > P_{k,min}$,其中 $0 \leq P_{k,min} \leq P_{k,max}$,则第 k 个发送 UE 可以将功率大于 0 的子带作为传输资源,并根据分布式功率控制的结果计算 SINR,以选择合适的调制和编码(Modulation and Coding, MCS)方案;若第 k 个发送 UE 优化后的发送功率小于或等于预设的阈值,即 $\sum_{n=1}^N p_k[n] \leq P_{k,min}$,则第 k 个发送 UE 重新选择候选传输时隙。

3 仿真分析

本节对所提方案进行性能验证,仿真参数如表 1 所示。具体而言,本文采用 Python 作为仿真平台;仿真中考虑如图 1 所示的分布式短距直连通信系统,其包含 K 个通信链路,每个通信链路有一个发送 UE 和一个接收 UE,以模拟诸如手机与大屏通信、手机与 XR 眼镜通信等多链路共存的场景;在生成用户分布时,首先生成 K 个发送 UE 的位置,每个发送 UE 的位置服从在 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 范围内的均匀分

布,然后生成 K 个接收 UE 的位置,其中第 k 个接收 UE 和第 k 个发送 UE 之间的距离服从 $2\sim 5$ m 之间的均匀分布;仿真中采用 5G NR 的 MCS 表,即 3GPP TS 38.214 中的表 5.1.3.1-1 和表 5.1.3.1-2^[5],发送 UE 可以根据接收 UE 反馈的 CSI 进行链路自适应,从表中选取最优的 MCS。考虑业务周期为 10 ms,在每个周期内,每个发送 UE 占据 20 MHz 带宽,传输时长共 2.5 ms,因此可以允许 4 个发送 UE 占据完全正交的时频资源,当通信链路数超过 4 时,至少有两个发送 UE 占据的时频资源会全部或部分重叠,本文将这种情况认为是中高用户密度场景。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameter

参数	设置
载波频率/GHz	5.8
信道带宽/MHz	20
子载波间隔/kHz	30
最大发射功率/dBm	10
用户分布	20 m×20 m 范围内均匀分布, 发送 UE 和接收 UE 距离 2~5 m
信道模型	TR 38.901 InH-Office ^[11]

为了验证所提方案的有效性,本文考虑如下 3 种分布式传输机制:①CSMA 机制^[6],其中能量检测阈值设为 -72 dBm;②SL Mode2 机制^[3,5],其中初始资源感知阈值设为 -112 dBm,若资源选择窗中的候选资源数小于 20%,则将资源感知阈值增加 3 dB 后重新选择候选资源;③本文所提的 SL 分布式功率控制机制,功率优化时的初始功率为各子带等功率分配,优化迭代次数为 3。对于每个链路数的取值,仿真次数均为 1 000 次,以获得吞吐的统计平均值。

图 5 给出了平均每个通信链路的吞吐随着通信链路数的变化,可以看出,随着通信链路数的增加,不同链路之间的干扰增加,从而导致平均每个通信链路的吞吐下降。仿真结果表明所提方案通过分布式功率控制可以有效提升吞吐:相比于 SL Mode2 机制,在通信链路数为 5 时可以获得 30% 的吞吐增益,在通信链路数为 8 时可以获得 107% 的吞吐增益;相比于 WiFi 的 CSMA 机制,在通信链路数为 5 时可以获得 50% 的吞吐增益,在通信链路数为 8 时可以获得 209% 的吞吐增益。由此可见,所提方案在资源复用时充分考虑了目标链路和干扰链路的信道信息,中高用户密度场景下可以实现更有效的干

扰管理,提升资源利用率。

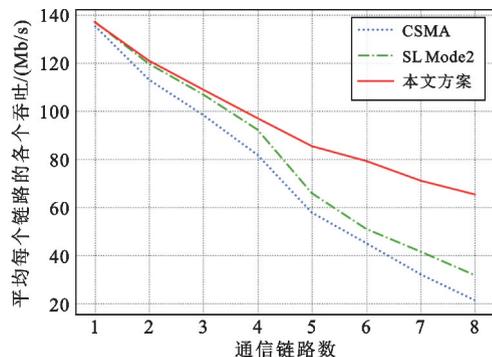


图 5 平均每个链路的吞吐与链路数之间的关系

Fig. 5 Average throughput per link versus the number of links

图 6 给出了不同机制在时延预算内正确传输包大小的累计分布函数 (Cumulative Distribution Function, CDF),其中通信链路数为 5,时延预算为 10 ms。特别地,对于 2K 视频业务,平均每帧的大小为 125 kb。从图 6 可以看出,在相同的时频资源下,CSMA 机制可以有 70% 的用户满足 2K 视频业务需求,SL Mode2 机制可以有 90% 的用户满足 2K 视频业务需求,所提方案可以有 95% 的用户满足 2K 视频业务需求。因此,本文提出的基于分布式功率控制的 SL 传输机制可以实现高效的资源利用,有效提升用户体验。

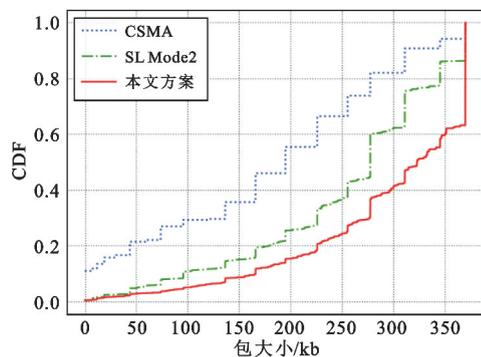


图 6 包大小分布

Fig. 6 CDF of packet size

4 结论

本文以最大化和吞吐为目标,设计了基于分布式功率控制的 SL 传输机制。首先,对 SL 多链路分布式通信系统的功率优化问题进行了建模;然后,根据 SINR 与 MMSE 的等价变换关系,将非凸功率优化问题转化为多个凸优化子问题,并通过迭代优化获得局部最优解;最后,设计了广播式 CSI 测量上报

机制,使能多链路的分布式功率控制和资源选择。仿真结果表明,本文所提方案可以有效提升分布式系统的吞吐,改善用户体验。

参考文献:

- [1] 3GPP. Service requirements for the 5G system: TS 22. 261 V18. 6. 1[S]. Valbonne:3GPP Support Office, 2022:1-115.
- [2] LIEN S Y, DENG D J, LIN C C, et al. 3GPP NR sidelink transmissions toward 5G V2X[J]. IEEE Access, 2020, 8:35368-35382.
- [3] GARCIA M H C, MOLINA-GALAN A, BOBAN M, et al. A tutorial on 5G NR V2X communications [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(3):1972-2026.
- [4] LE T T T, MOH S. Comprehensive survey of radio resource allocation schemes for 5G V2X communications[J]. IEEE Access, 2021, 9:123117-123133.
- [5] 3GPP. Physical layer procedure for data: TS 38. 214 V17. 2. 0[S]. Valbonne:3GPP Support Office, 2022:1-228.
- [6] BELLALTA B. IEEE 802. 11 ax: High-efficiency WLANs [J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(1):38-46.
- [7] BAZZI A, CECCHINI G, MENARINI M, et al. Survey

and perspectives of vehicular Wi-Fi versus sidelink cellular-V2X in the 5G era[J]. Future Internet, 2019, 11(6):12201-12220.

- [8] NAIK G, CHOUDHURY B, PARK J M. IEEE 802. 11 bd & 5G NR V2X: evolution of radio access technologies for V2X communications[J]. IEEE Access, 2019, 7:70169-70184.
- [9] 郑天宇, 章辉, 周超, 等. 基于改进图着色的 D2D 资源分配和功率控制[J]. 电讯技术, 2020, 60(11):1342-1347.
- [10] ZHANG Q, LI Q, QIN J. Robust beamforming for nonorthogonal multiple-access systems in MISO channels [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(12):10231-10236.
- [11] 3GPP. Study on channel model for frequencies from 0. 5 to 100 GHz: TR 38. 901 V17. 0. 0[S]. Valbonne:3GPP Support Office, 2022:1-98.

作者简介:

何小祥 男, 1971 年生于安徽安庆, 1995 年获学士学位, 现为中级工程师, 主要研究方向为无线通信技术。

王碧钗 女, 1993 年生于山西临汾, 2020 年获博士学位, 现为高级工程师, 主要研究方向为短距无线通信、多址接入、资源分配。