

面向移动用户的智能反射表面 波束追踪与覆盖增强算法

Beam Tracking and Coverage Enhancement Algorithm for Mobile Users with Intelligent Reflecting Surface

摘要:虽然智能反射表面(IRS)单元可以通过改变相移和反射系数来增强系统性能,但是用户运动和时延等未知因素使反射波束无法准确覆盖用户。为此,提出一种面向移动用户的波束追踪与覆盖增强算法。首先,根据用户的初始位置、运动方向和速度等信息,估算IRS的目标 覆盖区域;然后,对IRS单元进行分组,并设计不同分组单元的反射相移使反射波束指向目标 区域的相邻位置,进而实现对用户可能位置的有效覆盖;最后,采用注水算法分配由基站 (gNB)发射在IRS不同分组单元上的波束功率,实现对目标区域覆盖的增强。

关键词:毫米波;IRS;相位设计;增强覆盖

Abstract: Although intelligent reflecting surface (IRS) unit can enhance system performance by changing phase shift and reflection coefficient, unknown factors such as user motion and time delay make the reflected beam still unable to accurately cover the user. To this end, the target coverage area of the IRS based on the user's historical position and speed information is first estimated. Then the IRS units are grouped and the reflection phase shifts of different grouping units are designed, making the reflected beam point to the adjacent position of the target area to achieve complete coverage of the target area. Finally, the water–filling algorithm is used to allocate the power of the gNB beams, which are transmitted on different IRS grouping units, to enhance the coverage of the target area.

Keywords: millimeter-wave; intelligent reflecting surface; phase shift design; coverage enhancement

郭雅婧/GUO Yajing1

章嘉懿/ZHANG Jiayi1

鲁照华/LU Zhaohua²

王明慧/WANG Minghui3

(1. 北京交通大学,中国 北京 100044; 2. 中兴通讯股份有限公司,中国 深圳 518057; 3. 中国电子学会,中国 北京 100036)

1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044. China:

2. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China;

3. Chinese Institute of Electronics, Beijing 100036, China)

DOI:10.12142/ZTETJ.202102012 网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/ detail/34.1228.TN.20200628.1055.002.html 网络出版日期:2020-06-28 收稿日期:2020-05-25

★波(mmWave)技术是5G网络的关键技术之一^[1-3]。通过利用mmWave频段上的大带宽,5G网络能够实现每秒千兆比特的通信速率^[4]。然而,mmWave通信仍然面临一个关键挑战:与在较低频段上的路径衰减相比,mmWave信号的路径损耗要大得多^[5]。为了补偿mmWave系统的严重路径损耗,通常会使用大型天线阵列来实现显著的波束成形增益,以进行数据传输^[6]。

高方向性使 mmWave 通信容易 受到遮挡物的影响,而遮挡物在室内 和密集的城市环境中是大量存在的。 由于mmWave信号的波束宽度窄、穿 透能力弱,很小的障碍物(如人体)都 会严重干扰链路^[7]。为了解决这一问 题,有些研究者使用中继来克服遮挡 问题,并尝试扩大mmWave信号的覆 盖范围^[8-10]。然而,采用中继的方式 具有成本高、耗能大的缺点。为了更 好地解决mmWave通信的遮挡问题, 智能反射表面(IRS)被提出。作为一 种极具应用前景的绿色通信技术, IRS可以在不大幅增加系统能耗的条 件下,主动调节入射信号的传播方 向。具体而言,IRS拥有由大量可重 新配置的无源元件组成的平面阵列, 其中每个元件都能够不受入射信号 影响独立地产生一定的相移和实时 配置反射系数,与连接的智能控制器 共同改变反射信号的传播,在视线链 路受到障碍物干扰时,辅助网络建立 可靠的mmWave连接^[11]。因此,IRS 可以在低成本、低功耗的条件下显著 提高mmWave通信系统的性能。

目前,由IRS辅助的无线通信已 经引起学术界广泛关注^[12-13]。关注的 重点在于,通过联合优化基站(gNB) 的有源波束成形矢量和IRS的无源反射,来实现不同的性能优化目标。在利用由IRS辅助的多天线接入点(AP)为单用户服务的场景中,文献[14]通过联合优化有源和无源波束成形来最大程度地提高用户处接收信号的功率。在给定信干噪比的情况下,文献[15]通过优化有源和无源波束成形来最小化AP处的总发射功率。此外,文献[16]和文献[17]先后提出,通过联合优化发射功率来提高通信系统的频谱效率(SE)和能量效率(EE)等性能。

虽然目前已经有很多文献对由 IRS辅助的通信系统的性能进行分析 和优化,但是在直射路径中断后,由 IRS辅助的gNB对用户进行波束追踪 的研究仍然缺乏。另外,由于IRS控 制信号的时延和用户运动等,经IRS 反射的波束无法准确与用户对齐。 对此,本文提出一种面向移动用户的 波束追踪与覆盖增强算法,首先设计 IRS的相移以完成对用户的追踪覆 盖,然后通过分配gNB的发射功率来 实现覆盖区域的信号增强。

1系统模型

如图1所示,本文使用多输入单 输出的系统。其中,IRS由N_i个单元 构成,以辅助从多天线gNB到单天线 用户的通信。实际上,每个IRS单元 都配有一个控制器,该控制器通过单 独的链路与gNB通信,以协调和交换 有关的信道和控制信息,并为入射信 号调整IRS单元的反射相移。鉴于 mmWave信道的稀疏性和严重的路径 损耗,本文忽略经IRS两次或更多次 反射的信号,仅考虑经IRS单次反射 的信号。

本文主要考虑下行链路通信,重 点探讨下行链路通信对移动用户的 波束追踪覆盖与信号增强。在该研 究场景中,由于受到遮挡等影响,用 户设备(UE)与gNB的通信链路会发 生中断,设备仅通过IRS的反射波束 进行辅助通信。我们定义IRS距离地



面的高度为*H*,同时用g∈*C^{N_i×M}*、 *h_{r,k}*∈*C^{1×N_i}*来分别表示从gNB到IRS、 从IRS到UE的基带等效信道。IRS 的每个单元都可从gNB接收发射信 号。我们定义 $\varphi = [\varphi_1, \cdots \varphi_{N_i}]^T$ 为IRS 的反射矩阵系数,其中 $\varphi_i = \beta_i e^{p_i}$, $\theta_i \in [0,2\pi), \beta_i \in [0,1]$ 分别表示IRS 第*i*个单元的相移和幅度反射系数。 通常IRS不使用发射器模块,仅对接 收信号进行相位偏移,随后把信号反 射给目标用户。考虑到IRS没有发射 电路模块,在本文中,我们将IRS的幅 度反射系数设置为1。

当gNB与UE的通信链路中断 后,gNB根据UE链路中断前的位置 和速度信息来计算需要IRS辅助通信 的目标覆盖区域D。该目标覆盖区域 是以用户历史位置为中心点、在信号 处理时延内的用户位移(速度×处理 时延)为半径的区域。由于 mmWave 具有易被遮挡和被吸收的特性,因 此,通过IRS进行覆盖的区域仅由直 射路径确定(散射路径与直射路径相 比可忽略)。经过IRS反射单元的 gNB-IRS-UE组合信道是gNB-IRS信 道、IRS反射和IRS-UE信道的级联: $h_*\varphi * g = \varphi h_* g_o$ 我们定义 $\Psi =$ $\begin{bmatrix} \psi_1, \dots, \psi_N \end{bmatrix}$ 为 gNB-IRS 和 IRS-UE 的 串联信道,其中 $\psi_i \triangleq h_{ri} * g_i$ 。经IRS反 射单元的反射信号的复合 gNB-IRS-UE信道响应为 $h_r^H \varphi_g = \varphi \psi_\circ$ 其中, φ 是 IRS 单元的相移, $\psi = diag(h_r^H) \cdot g$ 是相应的复合信道。IRS单元的相移 如公式(1)所示:

$$\varphi_i = e^{j\pi\sin\theta_i \left[(m-1)\cos\phi_i + (n-1)\sin\phi_i \right]_0}$$
(1)

因此,每个gNB-IRS-UE有效信 道的增益是 $|\varphi\psi|^2$ 。在IRS覆盖区域 中,UE处接收到的信号为:y =

55

▲图1 系统模型

 $\sqrt{P} \varphi \psi + n_{\circ}$ 相应地,UE处接收信号 的功率为: $\gamma = |\varphi \psi|^2 P_{\circ}$

在 IRS 目标覆盖区域中,为了最 大化 UE 信号的接收功率,在 gNB 总 发射功率受限的条件下,我们需要联 合优化由 gNB 发射在 IRS 不同子阵列 上的信号功率和在 IRS 处的相移。对 应地,最大化目标覆盖区域下的信道 容量的问题(P1)如公式(2)-(5) 所示:

(P1): maximize
$$\sum_{k=1}^{S_{k} \cdot S_{r}} \log_{2} \left(1 + \frac{\left| \varphi_{k} \psi_{k} \right|^{2} \cdot P_{k}}{d_{k}^{2} \cdot \sigma^{2}} \right), (2)$$

s.t.
$$\sum_{k=1}^{S_k \cdot S_y} P_k \leq P,$$
 (3)

 $p_k \ge 0, k = 1, 2, \cdots, S_x \cdot S_y, \tag{4}$

$$0 \leq \varphi_k \leq 2\pi, \forall k = 1, \cdots, N_{\iota \circ}$$
 (5)

虽然所有约束条件都是凸的,但 是关于*P*和φ的目标函数是非凸的, 即问题(P1)是非凸优化问题。本文 中,我们将在接下来的两节内容中分 别提出IRS相移设计和gNB功率分配 算法,以求解交替优化和解决(P1) 问题。

2 IRS分组及相移设计算法

如图1所示,IRS面板距离地面 的高度为H,同时我们以IRS的左上 角为坐标原点,以竖直边为x轴、水平 边为y轴,并使z轴垂直于xy平面,来 建立空间坐标。IRS面板共有N_i = M×N个单元,其中M、N分别表示 IRS平板沿x、y轴的总单元数。为了 获得不同宽度的波束,我们将大型面 板阵列单元分为多个子阵列,并使它 们指向不同的位置,每次按需启动适 当的IRS单元。gNB可以计算并获得



▲图2 空间角坐标系示意图

目标覆盖区域相对于IRS 面板坐标系的区域位置坐标 $D = [x_{min}, x_{max}] \times [y_{min}, y_{max}]$ 。对于目标区域D,假设用户在地面运动,根据图2所示的几何结构,可以获得公式(6):

$$\theta = \arctan \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{H}_{\circ}$$

$$\phi = \arctan \frac{y}{x}$$
(6)

如图 2 所示,我们引入一对空间 角 (u,v)来解耦传统的仰角与方位角 (θ,ϕ) ,并定义 u 为波束方向与 x 轴正 方向之间的的夹角,v 为波束方向与 y轴正方向之间的夹角。由(u,v)与 (θ,ϕ) 之间的几何关系可得公式(7):

$$\begin{cases} \cos u = \sin\theta \cos\phi \\ \cos v = \sin\theta \sin\phi \end{cases}^{\circ}$$
(7)

将公式(7)代入公式(1),可获得 公式(8):

$$\varphi_i = \mathrm{e}^{j\pi \left[(m-1)\cos u_i + (n-1)\cos v_i \right]_0}$$
(8)

根据公式(6)和(7),可以获得 公式(9):

$$\begin{cases} u = \arccos \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + H^2}} \\ v = \arccos \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + H^2}} \end{cases}, \quad (9)$$

其中, $x, y \in \mathbf{R}, u, v \in [0, \pi]$ 。在高度 *H* 固定的情况下, (x, y)和(u, v)之间的 转换是一一对应的。对于任意目标 区域 D,我们始终可以在空间角坐标 中找到其空间角度的范围,并由此可 获得在空间角坐标系下目标覆盖区 域 的 坐 标 范 围 $\overline{D} = [u_{\min}, u_{\max}] \times [v_{\min}, v_{\max}]_{\circ}$

以 IRS 沿 *x* 轴方向的相移设计为 例,目标覆盖区域的波束宽度为 $\Delta_x = \cos u_{\min} - \cos u_{\max}$,单个 IRS 单元可实 现 的 3 dB 波 束 宽 度 为 $w_i = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\lambda}{\pi b \cos(\delta_i)}$ 。其中,*b*表示每个单

元的宽度, δ_i 表示 gNB 发射波束到 IRS 单元的入射角。当将 IRS 面板单 元分为多个子阵列时,3 dB 波束宽度 将随着子阵列 IRS 组合单元宽度的增 加而变窄。为了获得能够覆盖目标 区域的期望波束宽度,我们设计 IRS 单元相移,以使不同子阵列的反射波 束指向目标覆盖区域的相邻位置。 假设每个子阵列所包含的单元数为 M_s ,则每个子阵列的波束宽度为 $w_x = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\lambda}{\pi M_s b \cos(\theta_i)}$ 。相应地,IRS 单元

 $\begin{bmatrix} M_s \end{bmatrix}$ 沿 x 轴的波束宽度不小于 Δ_x , 需满足 公式(10):

$$w_{x} \times \left\lfloor \frac{M}{M_{s}} \right\rfloor \ge \Delta_{x \circ} \tag{10}$$

IRS的单元数越多,可获得的增益就越高。因此,我们选择满足公式(10)的最大Ms值作为每个子阵列的单元数。在划分好子阵列后,我们为每个子阵列单元设计相应的相移,以覆盖整个目标区域。第*i*个子阵列的IRS单元的转向角如公式(11)所示:

$$a_{x,i} = c_x - \frac{w_x \cdot S_x}{2} + \frac{w_x \cdot (2i - 1)}{2},$$

$$i = 1, \dots, S_{x^\circ}$$
(11)

相应地,由IRS单元生成的相移 如公式(12)所示:

$$\varphi_{x}\left[(i-1)M_{S}+m\right] = e^{j\pi\left[(i-1)M_{S}+m\right]a_{xi}},$$

$$1 \le i \le S_{x}, 1 \le m \le M_{S\circ}$$
(12)

同理,沿y轴方向由各个IRS单 元生成的相移如公式(13)所示:

$$\varphi_{y}\left[\left(l-1\right)N_{S}+n\right] = e^{j\pi\left[\left(l-1\right)N_{S}+n\right]a_{y,l}},$$

$$1 \le l \le S_{y}, 1 \le n \le N_{S\circ}$$
(13)

由于沿x轴和沿y轴的相移是独 立的,因此,我们可以将它们直接相 乘,就可以获得每个单元的相位偏移 $\varphi = \varphi_x \otimes \varphi_{y^\circ}$

3 gNB功率分配算法

gNB采用频分多址或时分多址 的方式,来区分发送在不同IRS子阵 列的波束^[18]。在IRS单元划分子阵列 且相移φ确定的情况下,要实现目标 覆盖区域下信道容量最大化还需要 对gNB进行恰当的功率分配。基于 IRS相移设计,我们将(P1)问题化简 为(P2)问题。为使经IRS反射的波束 具有不同的功率,且波束功率能够随 不同位置处UE出现概率的增大而增 大,本文采用注水算法解决(P2)中的 功率分配问题,如公式(14)—(16) 所示。

(P2): maximize
$$\sum_{k=1}^{S_{k} \cdot S_{y}} \log_{2} \left(1 + \frac{\left| \varphi_{k} \psi_{k} \right|^{2} \cdot P_{k}}{d_{k}^{2} \cdot \sigma^{2}} \right),$$
(14)

s.t.
$$\sum_{k=1}^{S_x \cdot S_y} P_k = P, \ k = 1, 2, \dots, S_x \cdot S_{y^\circ}$$
 (15)

$$p_k \ge 0, k = 1, 2, \cdots, S_x \cdot S_{y\circ} \tag{16}$$

由于
$$\log_2(1 + \gamma)$$
是非凸函数,因

此,优化问题(P2)是非凸优化问题。 对此,我们可采用拉格朗日乘数法来 求得全局最优解,如公式(17)所示:

$$L\left(\lambda, P_{1}, P_{2}, \cdots P_{S_{s}}\right) = \sum_{k=1}^{S_{s} \cdot S_{y}} \log_{2} \left(1 + \frac{\left|\varphi_{k}\psi_{k}\right|^{2} \cdot P_{k}}{d_{k}^{2} \cdot \sigma^{2}}\right) + \lambda \left(\sum_{k=1}^{S_{s} \cdot S_{y}} P_{k} - P\right)_{\circ}$$
(17)

$$\left[\overline{\Pi}\right] \overline{\Pi} \stackrel{\text{d}}{,} \frac{\partial L}{\partial P_k} = \sum_{k=1}^{S_k \cdot S_j} \left[\frac{1}{\frac{d_k^2 \cdot \sigma^2}{\left|\varphi_k \psi_k\right|^2} + P_k} \cdot \frac{1}{\ln 2} \right] -$$

$$\lambda$$
,我们令 $\frac{\partial L}{\partial P_k} = 0$,则有公式(18):

$$P_{k}^{*} = \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{d_{k}^{2} \cdot \sigma^{2}}{\left|\varphi_{k}\psi_{k}\right|^{2}}\right)^{+}$$
(18)

在注水算法的最佳功率分配下, 目标覆盖区域能够达到的最大信道 容量如公式(19)所示:

$$C_{u,k}^{*} = \frac{1}{S_{x} \cdot S_{y}} \sum_{k=1}^{S_{x} \cdot S_{y}} \log_{2} \left(1 + \frac{\left| \varphi_{k} \psi_{k} \right|^{2} \cdot P_{k}^{*}}{d_{k}^{2} \cdot \sigma^{2}} \right) \circ$$
(19)

4 仿真结果与分析

图 3 是在 UE 历史位置为(10,10)、 运动速度为 3 m/s 的情况下, IRS 的波 束覆盖与增强的效果图。图 3 中, 横 坐标表示 UE 位置的 x 坐标, 纵坐标表 示 UE 位置的 y 坐标, xy 平面内每点处 的颜色表示此位置的波束增益值。 由图 3 仿真结果可以看出,本文提出 的 IRS 相移设计和 gNB 功率分配能够 显著提高 IRS 对 UE 运动区域波束覆 盖的增益。

在图4-5中,实线表示在注水功

技术广角 面向移动用户的智能反射表面波束追踪与覆盖增强算法 郭雅婧等 ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

率分配算法下的波束覆盖范围内可 实现的信道容量,虚线表示在平均功 率分配下覆盖范围内的信道容量。

图4比较了不同IRS距地高度对 IRS波束追踪覆盖的影响。在不同的 场景中,如室内、体育场馆和商业街 区,我们需要根据UE普遍高度和运动特性来选择合适的IRS安装高度, 以使IRS达到最佳性能。由图4可 知,当gNB总发射功率为15W时,在 注水功率分配算法下的信道容量提 高了7%,即我们实现了7%的覆盖增





强。因此,在采用相移设计算法完成 波束覆盖的基础上,与平均功率分配 相比,注水功率分配算法可提高目标 区域的信道容量,实现覆盖增强。

图 5 比较了不同 UE 运动速度对 IRS 用户覆盖的影响。由不同 UE 运动速度下的仿真结果可以看出, UE 运动速度越大,覆盖区域内的波束增 益越小。这是因为 UE 运动速度越 大,在信号处理时延内 UE 产生的位 移就越大,目标覆盖区域也会越大。 这意味着需要更多的波束来实现对 目标区域的覆盖。然而,每个波束分 配到的功率会随波束数目的增多而 减小。相应地,整个覆盖区域内获得 的波束增益就会减小。因此,虽然覆 盖性能会随 UE 运动速度的增加而下 降,但是采用注水功率分配算法可实 现平均7%~10% 的性能提升。

5 结束语

由于mmWave具有易被遮挡的特性,因此需要利用IRS辅助gNB来保障UE服务链路的连续性。本文中,我们提出联合使用IRS相移设计





和 gNB 功率分配算法来增强 UE 运动 范围的波束覆盖,同时提高 mmWave 通信对遮挡的鲁棒性,进而满足 UE 对通信服务的需求。尽管如此,IRS 的波束覆盖在很多方面仍有进一步 提升的空间,例如不同的相移设计与 功率分配算法、IRS 同时服务多用户、 IRS 仅有有限离散相位等,这些都将 是我们未来研究的方向。

参考文献

- RAPPAPORT T S, MURDOCK J N, GUTIERREZ F. State of the art in 60 GHz integrated circuits and systems for wireless communications [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(8): 1390–1436. DOI: 10.1109/JPROC.2011.2143650
- [2] RANGAN S, RAPPAPORT T S, ERKIP E. Millimeter-wave cellular wireless networks: potentials and challenges [J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 102(3): 366–385. DOI: 10.1109/ JPROC.2014.2299397
- [3] 彭琳, 段亚娟, 别业楠. B5G 毫米波和太赫兹技 术的背景、应用和挑战 [J]. 中兴通讯技术, 2019 (3): 82–86. DOI: 10.12142/ZTETJ.201903011
- [4] MEZZAVILLA M, ZHANG M, POLESE M, et al. End-to-end simulation of 5G mmWave networks [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2018, 20(3): 2237–2263
- [5] SHAFI M, ZHANG J, TATARIA H, et al. Microwave vs. millimeter-wave propagation channels: key differences and impact on 5G cellular systems [J]. IEEE communications magazine, 2018, 56(12): 14–20. DOI: 10.1109/MCOM.2018.1800255
- [6] DAI L, WANG B, PENG M, et al. Hybrid precoding-based millimeter-wave massive MIMO-NO-MA with simultaneous wireless information and power transfer [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2018, 37(1): 131–141. DOI: 10.1109/JSAC.2018.2872364
- [7] PETROV V, KOMAROV M, MOLTCHANOV D, et al. Interference and SINR in millimeter wave and terahertz communication systems with blocking and directional antennas [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2017, 16(3): 1791–1808. DOI: 10.1109/ TWC.2017.2654351

- [8] XU S M, YANG N, HE B, et al. Coverage analysis of relay assisted millimeter wave cellular networks with spatial correlation [EB/OL]. [2020-05-15]. https://arxiv.org/abs/1912.12096
- [9] JIANG L S, JAFARKHANI H. MmWave amplifyand-forward MIMO relay networks with hybrid precoding/combining design [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2020, 19(2): 1333– 1346. DOI: 10.1109/TWC.2019.2953032.
- [10] NIU Y, DING W G, WU H, et al. Relay-assisted and QoS aware scheduling to overcome blockage in mmWave backhaul networks [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2019, 68(2): 1733–1744. DOI: 10.1109/TVT.2018.2890308
- [11] BASAR E, DI RENZO M, DE ROSNY J, et al. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces [J]. IEEE access, 2019, 7: 116753–116773. DOI: 10.1109/AC– CESS.2019.2935192
- [12] ZHANG L, CHEN X Q, LIU S, et al. Spacetime-coding digital metasurfaces [J]. Nature communications, 2018, 9(1): 1–11. DOI: 10.1038/s41467–018–06802–0
- [13] ZHAO J. A survey of intelligent reflecting surfaces: towards 6G wireless communication networks [EB/OL]. [2020–05–15]. https: //arxiv.org/abs/1907.04789
- [14] WU Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network: joint active and passive beamforming design [C]//2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Abu Dhabi, United Arab Emirates: IEEE, 2018: 1–6. DOI: 10.1109/GLO– COM.2018.8647620
- [15] WU Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2019, 18(11): 5394–5409. DOI: 10.1109/ TWC.2019.2936025
- [16] PARK P, ERGEN S C, FISCHIONE C, et al. Wireless network design for control systems: a survey [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2017, 20(2): 978–1013. DOI: 10.1109/COMST.2017.2780114
- [17] WANG D, BAI B, ZHAO W, et al. A survey of optimization approaches for wireless physical layer security [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2018, 21(2): 1878–1911. DOI: 10.1109/COMST.2018.2883144
- [18] ZHENG B X, WU Q Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface–assisted multiple access with user pairing: NOMA or OMA? [J]. IEEE communications letters, 2020. DOI: 10.1109/ LCOMM.2020.2969870

