

基于栅格化的智能超表面辅助无线网络优化*

卢浩宇¹, 庄宏成¹, 陈曾平¹, 庞高昆²

1. 中山大学电子与通信工程学院, 广东 深圳 518107

2. 荣耀终端有限公司, 广东 深圳 518040

摘要: 随着无线网络密集化、网络覆盖容量日益立体化, 传统的自组织网络 (SON, self-organizing network) 技术愈发不能保障网络优化的稳定性。针对无线网络由于干扰、受障碍物遮挡等导致的弱覆盖问题, 提出了基于栅格化的智能超表面 (RIS, reconfigurable intelligent surface) 辅助覆盖优化的方法。建模弱覆盖问题为最大化覆盖问题区域的接收信号强度, 其优化变量为 RIS 的部署位置、入射角和相位。针对优化问题的解耦处理难以获得最优解, 通过覆盖问题区域栅格化确定 RIS 反射角集合, 提出了快速获得最优 RIS 相位的算法, 大大简化了原优化问题的求解。

关键词: 智能超表面; 自组织网络; 毫米波; 覆盖优化

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137 (2023) 05-0085-07

Gridization based reconfigurable intelligent surface-aided wireless network optimization

LU Haoyu¹, ZHUANG Hongcheng¹, CHEN Zengping¹, PANG Gaokun²

1. School of Electronics and Communication Engineering, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China

2. Honor Device Technologies Company Limited, Shenzhen 518040, China

Abstract: With the increasing densification of wireless networks and the need for multifaced network coverage and capacity, achieving stable network optimization becomes more challenging for SON technology. Aiming at the problem of weak coverage resulting from interference and obstacle blocking in wireless network, this paper proposes a gridization based RIS-aided optimization scheme. The weak coverage problem is formulated to maximize the received signal strength of the coverage problem area and its optimization variables are the location, incident angle and phase shift of RIS. Since traditional decoupling processing struggles to find the optimal solution, the scheme proposed by this paper specifies the set of reflection angles by rasterizing the coverage problem area, and then rapidly find the optimal phase shift of RIS, which simplifies the solving of original optimization problem significantly.

Key words: RIS; self-organizing network; millimeter wave; coverage optimization

无线网络节点的异构化、密集化, 使得网络的部署、配置、优化、管理和维护的复杂程度呈指数型增长。自组织网络 (SON) 作为无线网络的

关键使能技术 (Andrews et al., 2014), 主要目标是在网络内部提供智能, 实现自配置、自优化与自愈功能 (Aliu et al., 2013), 从而降低成本并提

* 收稿日期: 2023-03-10

录用日期: 2023-04-27

网络首发日期: 2023-06-28

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFA0716600)

作者简介: 卢浩宇 (1999 年生), 男; 研究方向: 智能超表面; E-mail: luh59@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 庄宏成 (1973 年生), 男; 研究方向: 移动通信; E-mail: zhuanghch@mail.sysu.edu.cn

升网络性能。SON通过调整基站的无线参数,自适应优化无线网络的性能(Zhuang et al., 2020)。但在网络密集化时,基站参数的调整容易引起相邻基站的参数调整,这种网络扩散效应可能导致网络的不稳定。6G通信建立在拥有巨大带宽的毫米波甚至太赫兹频段之上(Dang et al., 2020),意味着无线信号更容易被大气层吸收或受室外建筑物的遮挡,导致弱覆盖区域。同时网络密集化的无线干扰日益严重,也会导致弱覆盖区域。可编程智能超表面(RIS, reconfigurable intelligent surface)(Cui et al., 2014)技术为解决上述问题提供了另外一种可能。

相较于传统的大规模多入多出多天线阵列,RIS无源天线阵列仅需被动反射电磁波,避免了对信号进行额外处理,具有更低的信号传输延迟和系统能耗。同时,RIS能够控制电磁传播环境,还具有体积小、部署方便等诸多优点(Liu et al., 2021),因此有许多相关研究见诸报道。例如,文献(Zeng et al., 2021)研究了RIS的朝向和与基站的水平距离对信号覆盖范围的影响,并提出了覆盖范围最大化算法。文献(Hua et al., 2021)设计了无人机的轨迹和智能反射表面(IRS, intelligent reflecting surface)的相位,使得IRS传输信号的误码率最小。文献(Cheng et al., 2022)提出了自由远场空间下基于RIS的多入单出无线通信的综合优化问题,导出了波束赋形和相移的封闭解。文献(Boulogeorgos et al., 2021)在RIS辅助的太赫兹通信系统下考虑了不同温度、湿度对路径损耗的影响,给出了370~390 GHz以及430~455 GHz这两个易受水分子吸收的无线频段窗口。文献(Özdoğan et al., 2020)研究了RIS反射面反射信号的传播特性,以及信号经过RIS镜面反射和非镜面反射后的强度和空间角度分布状况。除了基于无线中继的应用外,RIS在物联网(Chu et al., 2021; Basharat et al., 2022)和车联网(Ai et al., 2021; Chen et al., 2021)等垂直行业中也具有一定的应用潜能。

然而,目前大多数基于RIS无线中继的研究是对RIS相关参数的调整以及对RIS到覆盖问题区域的视距链路(LOS)的研究。有关覆盖问题区域处理方法的研究较少,且缺少基站到覆盖问题区域的非视距链路(NLOS)的详细提及。因此,本文提出了一种基于栅格化的RIS辅助无线覆盖优化的方法,通过基站识别上报覆盖异常位置,并将覆盖问题区域栅格化,以确定RIS到栅格化区域的反射角和距离集合、部署RIS及参数配置,并通过

3GPP标准室外模型对NLOS链路进行建模,达到使栅格化区域的平均信噪比最大的目的。

1 系统模型与优化

首先考虑一个单RIS辅助的下行链路通信系统,如图1所示。该系统由1个基站、1个RIS阵列和1片覆盖问题区域组成。由于阻挡产生的覆盖问题区域,通过RIS阵列接收基站发送的无线信号。

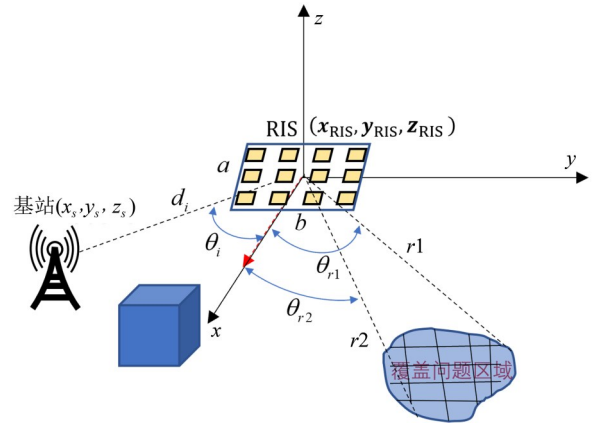


图1 RIS辅助覆盖优化的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of RIS-aided coverage optimization

覆盖问题区域接收的信号 $f(s)$ 可表示为

$$f(s) = (\sqrt{\beta_{sd}} e^{-j\phi_{sd}} + \sqrt{\beta_{RIS}^s} \mathbf{H}_{rd}^T \Phi \mathbf{H}_{sr})s + w, \quad (1)$$

其中 s 为基站的发送信号, w 为零均值、方差 σ^2 为加性的高斯白噪声, β_{sd} 和 $e^{-j\phi_{sd}}$ 分别为基站到覆盖问题区域的信道增益和归一化信道, β_{RIS}^s 为基站经过RIS某个单元到覆盖问题区域的级联信道增益(Özdoğan et al., 2020)。

$$\beta_{RIS}^s(r, d_i, \theta_r) = \frac{G_s G_r}{(4\pi)^2} \left(\frac{ab}{N_a N_b d_i r} \right)^2 \cos^2(\theta_i) \times \left[\frac{\sin\left(\frac{\pi b}{\lambda} (\sin \theta_s - \sin \theta_r)\right)}{\frac{\pi b}{\lambda} (\sin \theta_s - \sin \theta_r)} \right]^2, \quad (2)$$

其中 G_s 为基站发射天线增益; G_r 为覆盖问题区域的接收天线增益; d_i 为基站到RIS中心的距离; r 为RIS到覆盖问题区域中心的距离; θ_i 为基站信号到RIS的入射角; θ_r 为覆盖问题区域的反射角,表示RIS指向覆盖问题区域中心的方向; θ_s 为经过RIS修正过的信号波束期望反射角; N_a 和 N_b 为RIS两边单元的数目, $N = N_a N_b$ 。

基站到RIS的归一化信道 \mathbf{H}_{sr} 为

$$\mathbf{H}_{sr} = [e^{-j\phi_{sr}^1}, \dots, e^{-j\phi_{sr}^N}]. \quad (3)$$

RIS到覆盖问题区域的归一化信道 \mathbf{H}_{rd}^T 为

$$\mathbf{H}_{rd}^T = [e^{-j\phi_{r1}^*}, \dots, e^{-j\phi_{rn}^*}]^T. \quad (4)$$

RIS各单元的相位为

$$\Phi = \text{diag}(e^{-j\phi_{r1}}, \dots, e^{-j\phi_{rn}}). \quad (5)$$

最大化覆盖问题区域接收信号的强度, 则RIS辅助无线网络覆盖优化可建模为

$$(d_i^*, r^*, \theta_i^*, \Phi^*) \\ = \arg \max \left(\left| \sqrt{\beta_{sd}^S} e^{-j\phi_{sd}} + \sqrt{\beta_{RIS}^S} \mathbf{H}_{rd}^T \Phi \mathbf{H}_{sr} \right|^2 \right); \quad (6)$$

$$\text{sub.to } \theta_i \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right), \theta_r \in (0, \pi).$$

最大的接收信号强度由RIS位置(d_i^*, r^*)、相位以及入射角确定。

2 栅格化求最佳相位优化方案

问题(6)的求解可以解耦为RIS位置(d_i^*, r^*)子问题和RIS相位子问题, 但很难获得最优解。在实际的RIS辅助通信场景中, RIS的部署位置是有限的、不是任意的, 利用这点可简化问题(6)的求解。为了保障覆盖问题区域整个区域的覆盖性能, 本文进一步对覆盖问题区域进行了栅格化处理, 将覆盖问题区域划分为 M 个栅格。

在给定的RIS位置下, 基于栅格化, 可确定覆盖问题区域的RIS反射角集合 $\theta_r = \{\theta_m, m = 1, 2, \dots, M\}$ 。 θ_m 为第 m 个栅格的反射角, 表示RIS指向栅格 m 中心的方向。

当某个栅格 m 的中心位于波束期望反射的方向 θ_s 上, 有 $\theta_m = \theta_s$, 此时公式(2)可写为

$$\beta_{RIS}^S(r, d_i, \theta_s) = \frac{G_s G_r}{(4\pi)^2} \left(\frac{ab}{N_a N_b d_i r} \right)^2 \cos^2 \theta_i. \quad (7)$$

调整RIS各个单元的相位, 使栅格 m 获得最大的接收信号强度。此时RIS各单元的相位应满足

$$\phi_m = -\phi_{sd} + \phi_m^{sr} + \phi_m^{rd}. \quad (8)$$

考虑在远场模型下, 基站经过RIS所有单元到覆盖问题区域栅格 m 的级联信道增益均为 β_{RIS}^S 。假设RIS各单元相位均已实现最佳, 则基站经过RIS阵列到覆盖问题区域栅格 m 的级联信道增益为

$$\beta_{RIS}(r, d_i, \theta_m) = (N \sqrt{\beta_{RIS}^S(r, d_i, \theta_m)})^2. \quad (9)$$

此时, 栅格 m 的信噪比为

$$\text{SNR}_m = \frac{(\sqrt{\beta_{RIS}^S} + \beta_{sd}^S)^2 P_s}{\sigma^2}, \quad (10)$$

其中 P_s 为基站发射功率。在RIS辅助覆盖优化下, 我们希望覆盖问题区域的每个栅格都能满足覆盖优化的需求, 即使得最差栅格的信噪比都大于预设门限。此时, 优化问题(6)可以简化为

$$\Phi^* = \arg \max \left(\frac{1}{M} \sum_m \text{SNR}_m \right); \quad (11)$$

$$\text{sub.to } \theta_i \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right), \theta_r \in (0, \pi), \min(\text{SNR}_m) \geq \text{SNR}_{thr}.$$

在栅格反射角集合的辅助下, 式(11)的求解尤为简化, 其具体步骤如表1所示。

表1 RIS最佳相位的求解算法

Table 1 RIS optimal phase solving algorithm

输入: 栅格反射角集合 θ_r

输出: 使平均SNR最大的期望反射角所在栅格 m 和期望反射角 θ_s

1: 令 $\theta_s = \theta_r$

2: **FOR** m in θ_s **DO**

3: 根据式(9)计算得到不同的 β_{RIS}

4: 根据式(10)计算得到不同 θ_s 下的 $\sum_m \text{SNR}_m$

5: $\text{AVG_SNG} = \sum_m \text{SNR}_m / M$

6: 计算每个 θ_s 下最小信噪比 $\min(\text{SNR}_{nm})$

7: **IF** $\min(\text{SNR}_m) \geq \text{SNR}_{thr}$ **THEN**

8: $index$ 为满足条件的所有栅格

9: **END IF**

10: **END FOR**

11: $[\text{MAX_AVG_SNR}, m] = \max(\text{AVG_SNG}(index))$

12: **RETURN** m

13: **RETURN** m 对应的 θ_s

14: 由 θ_s 决定RIS的相位

3 仿真结果分析

在3GPP TR38.901中的城区微基站模型上对室外场景进行建模。因基站到覆盖问题区域的视距链路被建筑物遮挡, 此时基站到覆盖问题区域栅格 m 的非视距链路信道增益为

$$\beta_{sd} = \text{PL}_{\text{UMi-NLOS}} - \mu + G_s + G_r \\ = 22.4 - 35.3 \lg(d_m) - 21.3 \lg(f_c) - \mu + G_s + G_r, \quad (12)$$

其中 d_m 为基站到栅格 m 中心的空间距离, f_c 为载波频率, μ 为阴影衰落。

3.1 单基站下不同优化方案对比

分析单基站下三种不同优化方案对区域平均接收信噪比的影响, 相关参数如表2-3所示。方案1为RIS镜面反射, 其不对RIS做任何优化调整, 仅调整RIS单元的摆姿来改变信号的入射和反射角; 方案2为RIS非镜面反射, 其在改变反射角的基础之上同时手动调整RIS的相位, 让信号在某个方向上相干叠加; 方案3为本文提出的栅格化优化

方案。首先依靠基站上报问题区域并栅格化,自计算获取覆盖问题区域最大平均信噪比,并在满足 SNR 门限的条件下自动得到 RIS 最佳相位。仿真结果如图 2-5 所示。结果显示:在入射角为 60° 的情况下,方案 3 的信噪比相较于方案 2 提升了 5%,相较于无 RIS 辅助通信的情况提升 134%。

表 2 单基站仿真相关参数

Table 2 Single base station simulation related parameters

参数	取值
基站高度/m	10
基站到 RIS 的距离/m	50
栅格化个数	15
栅格反射角度范围/ $^\circ$	20~50
基站到覆盖问题区域中心的距离/m	75.33
RIS 到覆盖问题区域中心的距离/m	40
入射角/ $^\circ$	60
载波频率/GHz	28
基站天线增益/dBi	15
接收天线增益/dBi	1
基站发射功率/dBm	40
噪声功率/dBm	-100
吸收和衰落损耗/dB	30

表 3 RIS 相关参数

Table 3 RIS related parameters

参数	取值
横向 RIS 单元数量	8
纵向 RIS 单元数量	8
RIS 单元长度	2λ
RIS 单元宽度	2λ
RIS 相位调整范围/ $^\circ$	0~90

图 2 为接收信噪比随 RIS 到覆盖问题区域的距离的变化。图 2 中,在没有 RIS 的情况下,由于较大的信号衰减,导致接收端的信噪比降低。使用方案 1 时,即加入 RIS 对信号进行反射后,信噪比有了较大提升。比如,在距离 $r = 40$ m 的情况下提升了 61%;其次,在方案 2 中,人工手动调整 RIS 相位,让信号在覆盖问题区域中心相干叠加,可以获得比方案 1 更高的信噪比。但由于覆盖问题区域中每个栅格的信噪比不一,仅依靠手动调整 RIS 相位难以使覆盖达到最优化。

图 3 给出了接收信噪比与 RIS 到基站的距离之间的关系。可以看出,变化情况与图 2 基本一致;

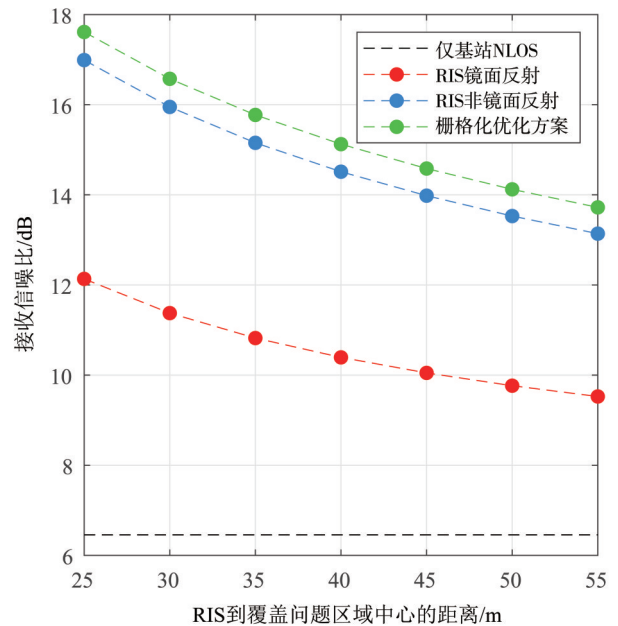


图 2 接收信噪比与 RIS 到覆盖问题区域中心的距离

Fig. 2 SNR & distance between RIS and coverage problem area

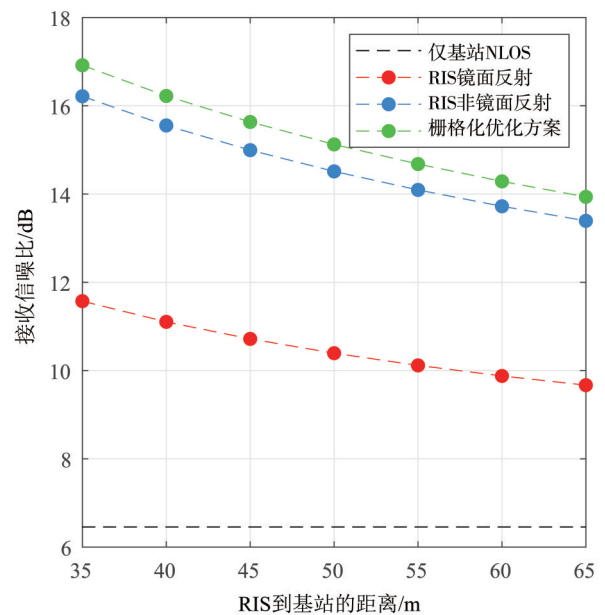


图 3 接收信噪比与 RIS 到基站的距离

Fig. 3 SNR & distance between RIS and base station

由图 2 和图 3 发现,相较于减小 d_i ,减小 r 对信噪比的提升效果更好。因此,在条件允许时应该优先考虑将 RIS 部署在距离接收机更近的地方。

图 4 比较了不同反射单元数目下三种优化方案的信噪比情况。图 4 中,随着反射单元数目的增加,接收信噪比的整体趋势是提升的。在反射单元数目为 64 和 100 时,方案 3 对信噪比的提升比方案 2 明显。对于方案 1,当反射单元从 64 个增加到

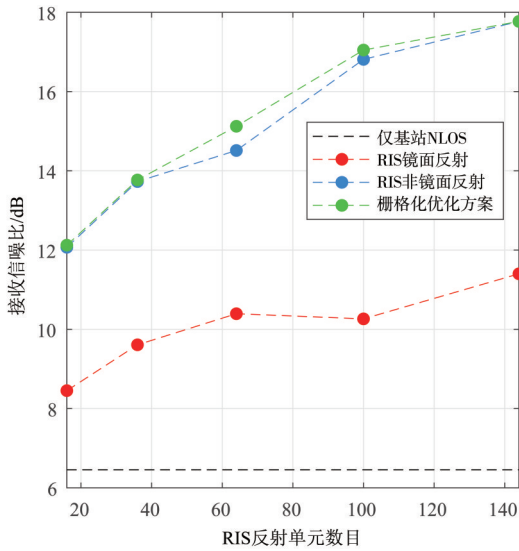


图4 不同反射单元数目下的信噪比

Fig. 4 SNR with different RIS unit number

100个时, 信噪比下降, 这是因为RIS单元或总面积增加, 信号波束3 dB带宽变窄, 从而导致非反射方向栅格的信噪比和平均信噪比下降。

入射角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 内变化时, 信噪比的变化如图5所示。从图5中可知, 当入射角在栅格反射角范围内, 方案1可取得较高的信噪比, 但该方案的信噪比曲线有很多的波峰, 变化不稳定; 而方案2和方案3可以取得平滑变化的信噪比曲线; 在入射角 $\theta_i = 0^\circ$ 时, 方案2和方案3的信噪比取得最大值, 且方案3的信噪比始终比方案2要高。

3.2 两基站下的小区容量

对比SON和栅格化优化方案对小区容量的影响, 仿真示意图和相关参数如图6和表4所示。

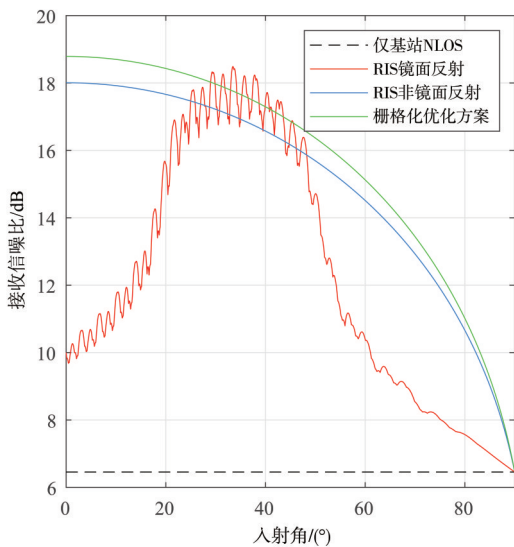


图5 信噪比随入射角的变化

Fig. 5 The SNR varies with incidence angle

表4 两基站的仿真参数

Table 4 Simulation parameters of two base stations

参数	取值
基站1用户数量	55
基站2用户数量	20
基站高度/m	10
基站1到RIS的距离/m	20
基站2到RIS的距离/m	80
栅格化个数	12
栅格反射角度范围/ $^\circ$	20~30
基站1到栅格的平均距离/m	40.83
基站2到栅格的平均距离/m	89.17
RIS到栅格的平均距离/m	37.5
基站1入射角/ $^\circ$	60
基站2入射角/ $^\circ$	120
载波频率/GHz	28
带宽/MHz	200
子载波间隔/KHz	60
PRB数目	264
PRB子载波数目	12
基站天线增益/dBi	15
接收天线增益/dBi	1
基站发射功率/dBm	40
噪声功率/dBm	-100
吸收和衰落损耗/dB	30

该仿真模拟了基站1过载的场景。在此场景下, 假设每个用户的最低速率需求为30 Mbps, 基站按信噪比从大到小优先分配PRB, 超出PRB数目后, 剩下的用户不予分配。在默认情况下, 基站不做任何调整, 用户终端自行根据信噪比的大小选择接入基站1或基站2, 每个用户的速率及小区容量如图7所示。

图7中, 基站1在过载的情况下, 仅有不到40个用户能达到最低速率需求, 其他用户无法正常获得服务, 用户满意度约为70%, 网络总容量约为1.78 Gbps。

传统上, 解决基站过载的问题是通过人工或SON技术对基站参数进行调整。本次仿真对基站1和基站2的切换参数进行调整(Chen et al., 2012), 使一部分原本接入基站1的用户切换到基站2, 达到负载均衡的效果, 结果如图8所示。

从图8可以看出, 采用SON方案调整基站负载均衡后, 基站2容量上升; 大部分用户都可以保

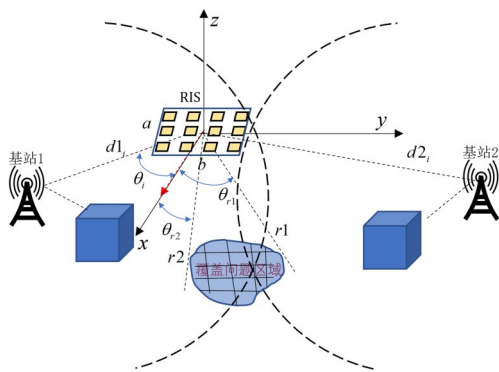


图 6 两基站下 RIS 辅助通信示意图

Fig. 6 Schematic diagram of RIS-aided communication under two base stations

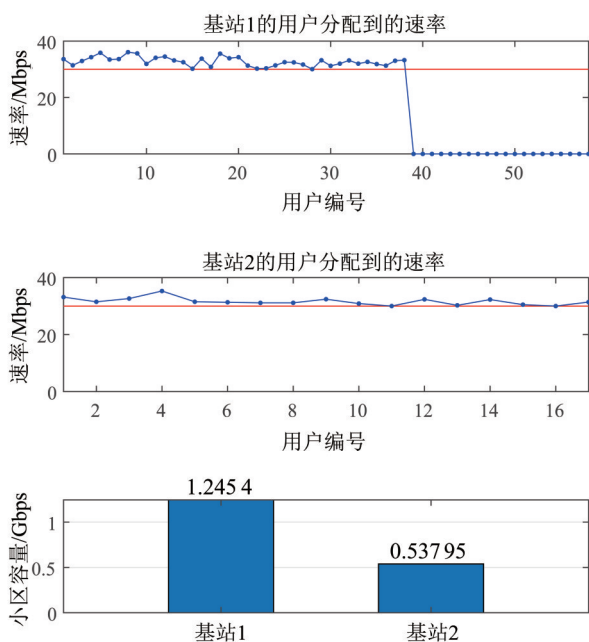


图 7 基站不做任何调整时的用户速率和小区容量

Fig. 7 User date rate and cell capacity without any adjustments

证最低的速率需求,缓解了基站1的压力,此时用户满意度约为78%,网络总容量约为1.97 Gbps;但大量的用户接入基站2后,基站2开始出现过载,过载问题得不到根本解决。且基站参数的调整,可能会引起严重的越区覆盖,导致乒乓效应,增加信令开销,影响网络稳定性。

本文提出的栅格化优化方案,即在基站1中加入RIS并采用栅格化的方法使弱覆盖区域平均信噪比最大,其仿真结果如图9所示。该方案提高了基站1区域用户的信噪比、降低了基站1的负荷,让每个用户都能获得最低速率保障;相对于SON方案,用户满意度从78%提升至100%,网络总容量

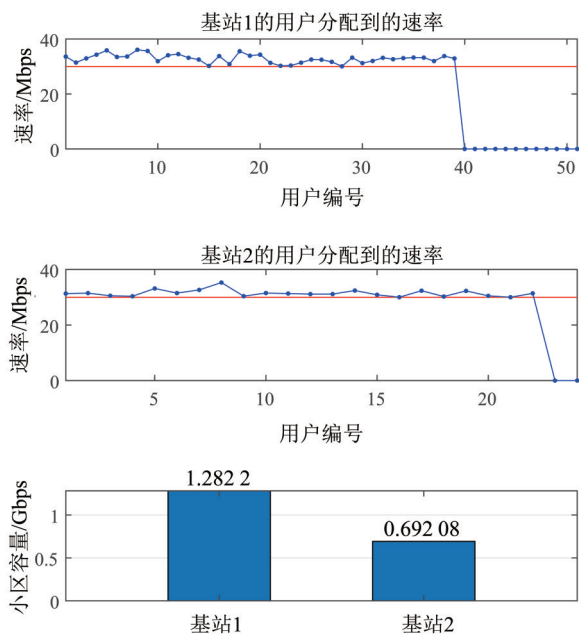


图 8 基站采用 SON 技术调整时的用户速率和小区容量

Fig. 8 User date rate and cell capacity with SON adjustments

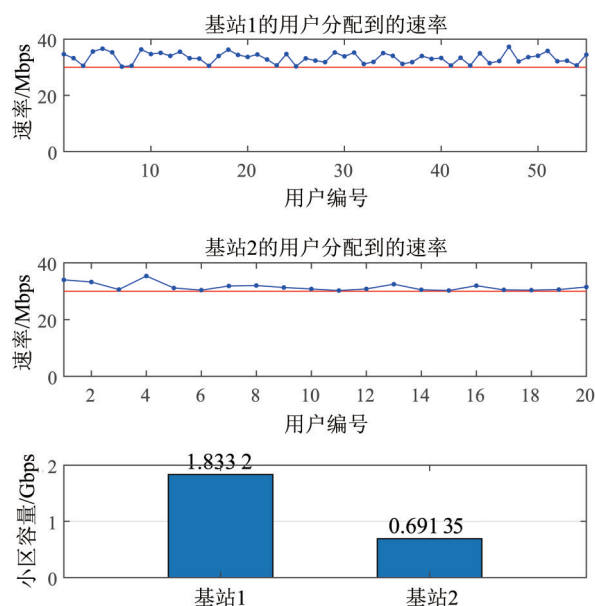


图 9 栅格化优化调整时的用户速率和小区容量

Fig. 9 User date rate and cell capacity with gridization optimization

从1.97 Gbps提升至2.52 Gbps。而且,该方案无需调整基站参数,避免了传统网络优化方法可能带来的扩散效应等负面影响,高效增强了网络覆盖。

4 结论

无线网络密集化和高频化是无线通信的发展趋势,由于干扰和障碍物阻挡等导致的弱覆盖问

题日益严重,传统的SON方法难以保障网络的稳定性。本文所提出的基于栅格化的RIS辅助无线覆盖优化方法可以让基站计算每个栅格反射角下的平均信噪比,使RIS自适应改变自身相位,以保证覆盖问题区域的平均信噪比最大。

(1)传统的SON技术在增强覆盖范围、提高小区容量上具有一定的作用,但无法很好解决基站过载问题,并且还会带来新的影响,如越区覆盖、扩散效应等。

(2)加入RIS后,基站对弱覆盖区域进行栅格

化优化能够提高小区容量、防止基站过载,同时可以避免SON调整所带来的影响;而且,相对传统的RIS辅助方法,覆盖问题区域的平均信噪比提升了5%。

(3)在计算性能有巨大提升的情况下,采用基站对覆盖问题区域栅格化的优化方法可以满足高质量、更高速率的通信要求,大规模采用RIS辅助通信的方式有望在未来的无线网络中得到广泛的应用。

参考文献:

- AI Y, DEFIGUEIREDO F A P, KONG L, et al, 2021. Secure vehicular communications through reconfigurable intelligent surfaces[J]. *IEEE Trans Veh Technol*, 70(7): 7272–7276.
- ALI U O G, IMRAN A, IMRAN MA, et al, 2013. A survey of self organisation in future cellular networks [J]. *IEEE Commun Surv & Tutor*, 15(1): 336–361.
- ANDREWS J G, BUZZI S, CHOI W, et al, 2014. What will 5G be? [J]. *IEEE J Sel Areas Commun*, 32(6): 1065–1082.
- BASHARAT S, ALI HASSAN S, MAHMOOD A, et al, 2022. Reconfigurable intelligent surface-assisted backscatter communication: A new frontier for enabling 6G IoT networks[J]. *IEEE Wirel Commun*, 29(6): 96–103.
- BOULOGHEORGOS A A A, ALEXIOU A, 2021. Coverage analysis of reconfigurable intelligent surface assisted THz wireless systems [J]. *IEEE Open J Veh Technol*, 2: 94–110.
- CHEN J, ZHUANG H, ANDRIAN B, et al, 2012. Difference-based joint parameter configuration for MRO and MLB [C]// *IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. Yokohama, Japan:IEEE:1–5.
- CHEN Y, WANG Y, ZHANG J, et al, 2021. QoS-driven spectrum sharing for reconfigurable intelligent surfaces (RISs) aided vehicular networks [J]. *IEEE Trans Wirel Commun*, 20(9): 5969–5985.
- CHU Z, ZHU Z, ZHOU F, et al, 2021. Intelligent reflecting surface assisted wireless powered sensor networks for Internet of Things [J]. *IEEE Trans Commun*, 69(7): 4877–4889.
- CHENG X, LIN Y, SHI W, et al, 2022. Joint optimization for RIS-assisted wireless communications: From physical and electromagnetic perspectives [J]. *IEEE Trans Commun*, 70(1): 606–620.
- CUI T J, QIM Q, WAN X, et al, 2014. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials [J]. *Light Sci Appl*, 3(10): e218.
- DANG S, AMIN O, SHIHADA B, et al, 2020. What should 6G be? [J]. *Nat Electron*, 3(1): 20–29.
- HUAM, YANG L, WU Q, et al, 2021. UAV-assisted intelligent reflecting surface symbiotic radio system [J]. *IEEE Trans Wirel Commun*, 20(9): 5769–5785.
- LIU Y W, LIU X, MU X D, et al, 2021. Reconfigurable intelligent surfaces: Principles and opportunities [J]. *IEEE Commun Surv & Tutor*, 23(3): 1546–1577.
- ÖZDOĞAN Ö, BJÖRNSSON E, LARSSON E G, 2020. Intelligent reflecting surfaces: Physics, propagation, and pathloss modeling [J]. *IEEE Wirel Commun Lett*, 9(5): 581–585.
- ZENG S, ZHANG H, DI B, et al, 2021. Reconfigurable intelligent surface (RIS) assisted wireless coverage extension: RIS orientation and location optimization [J]. *IEEE Commun Lett*, 25(1): 269–273.
- ZHUANG H, CHEN J, GILIMYANOV R, 2020. Hierarchical energy optimization with more realistic power consumption and interference models for ultra-dense networks [J]. *IEEE Trans Wirel Commun*, 19(7): 4507–4518.