

智能反射表面辅助的 MISO 通信系统的物理层安全设计方案

景小荣^{1,2}, 宋振远¹, 高维¹, 雷维嘉^{1,2}, 陈前斌^{1,2}

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2. 重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065)

摘要: 智能反射表面 (IRS) 可通过调整反射单元的相位来提升无线通信物理层安全。针对 IRS 辅助的多输入单输出 (MISO) 通信系统, 提出一种基于交替迭代的物理层安全设计方案。首先基于安全速率最大化原则, 构建一个含有非凸约束的非凸目标函数; 然后采用丁克尔巴赫算法和黎曼流形优化算法将非凸问题转化为一系列易于求解的子问题; 最后采用交替迭代法实现发送波束成形和 IRS 相移矩阵的优化设计。仿真结果表明, 与现有方案相比, 所提方案在计算复杂度与系统安全速率之间取得了更好的折中。

关键词: 智能反射表面; 物理层安全; 丁克尔巴赫算法; 黎曼流形优化; 安全速率

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2022018

Design scheme of physical layer security for intelligent reflecting surface-assisted MISO communication system

JING Xiaorong^{1,2}, SONG Zhenyuan¹, GAO Wei¹, LEI Weijia^{1,2}, CHEN Qianbin^{1,2}

1. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China
2. Chongqing Key Lab of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract: Intelligent reflecting surface (IRS) improves the physical layer security of the communication systems by adjusting the phases of the reflecting units. A scheme of physical layer security design based on alternative iteration was proposed for IRS-assisted multiple input single output (MISO) communication system. Firstly, aiming at maximizing the secrecy rate, a non-convex objective function with non-convex constraints was constructed. Secondly, the Dinkelbach algorithm and Riemannian manifold optimization algorithm were adopted to transform the non-convex problem into a series of solvable sub-problems. Finally, the alternate iteration method was used to achieve the optimization design of transmit beamforming and IRS phase shift matrix. The simulation results show that, compared with the several existing schemes, the proposed scheme can achieve a better tradeoff between computational complexity and system security rate.

Keywords: intelligent reflecting surface, physical layer security, Dinkelbach algorithm, Riemannian manifold optimization, security rate

0 引言

智能反射表面 (IRS, intelligent reflecting surface) 作为一种全新的革命性技术, 通过利用大量低成本无源反射元件, 可实现对无线通信环境的智能配置^[1], 从而显著提高无线通信网络的性能。因

此, IRS 有望在未来无线通信中得到广泛应用。

近几年, IRS 被学术界广泛研究。针对 IRS 辅助的多输入单输出 (MISO, multiple input single output) 系统, 文献[2]从理论上分析了 IRS 单元数、调制阶数和盲相位对系统符号错误概率的影响及其渐进性能; 文献[3]则基于信道统计特性, 从理论

收稿日期: 2021-11-05; 修回日期: 2022-01-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61701062); 重庆市基础与前沿研究计划基金资助项目 (No.cstc2019jcyj-msxmX0079)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61701062), Chongqing Research Program of Basic Research and Frontier Technology (No.cstc2019jcyj-msxmX0079)

上推导了 IRS 辅助通信系统的频谱效率理论上限。除了从理论层面对 IRS 辅助的无线通信系统展开研究外,大量研究集中在 IRS 辅助无线通信系统的波束成形、功率分配及信道估计等方面。以最小化接入点 (AP, access point) 发送功率为目标,对发送波束成形和 IRS 单元离散相位进行联合优化设计^[4]。基于贝叶斯最小均方误差 (MMSE, minimum mean square error) 准则,文献[5]提出一种信道估计方法,进而以最大化用户最小信干噪比为目标,联合优化设计基站 (BS, base station) 预编码以及 IRS 相移矩阵。文献[6]从能效角度,对 IRS 辅助的多用户 MISO 系统的发送功率和 IRS 相移矩阵进行了优化设计。文献[7]针对 IRS 增强的正交频分复用 (OFDM, orthogonal frequency division multiplexing) 系统,研究了信道估计和 IRS 单元相位的联合优化。文献[8]基于深度学习和压缩感知理论来实现 IRS 信道估计,并从能量效率和频谱效率对系统性能进行分析。

无线通信以电磁波作为信息传输的载体,具有在空间开放传播的特性,该特性恰好为恶意攻击提供了便利。作为无线安全的颠覆性技术,物理层安全利用无线信道的内生安全机制^[9],为实现安全与通信一体化提供了一种可行解决方案。在 IRS 辅助的无线通信系统中,由于 IRS 能够通过调整相移矩阵,重构信道信息,即在合法接收者处将反射信号与非反射信号建设性叠加,在窃听者处将反射信号与非反射信号破坏性叠加,最终增强合法接收者的安全性。因此,结合 IRS 来增强无线物理层安全作为当前的热点,被众多学者深入研究。文献[10]针对 IRS 辅助的无线信息与功率传输 (SWIPT, simultaneous wireless information and power transfer) 系统,在满足安全速率的条件下,以最大化能量收集器 (EHR, energy harvesting receiver) 能量为目标,实现发送波束成形和 IRS 相移矩阵的优化设计。文献[11]以最大化安全速率为目标,基于块坐标下降 (BCD, block coordinate descent) 和最小化最大化方法,来联合优化设计发送波束成形和 IRS 相移矩阵。当合法接收者和窃听者通信链路存在空间强相关时,文献[12]基于半定松弛 (SDR, semi-definite relaxation) 算法提出一种发送波束成形和 IRS 相移矩阵联合优化设计算法,但其复杂度偏高;同时,采用高斯随机化来确定 IRS 相位信息,因此,该算法只能得到安全速率的近似解。文献[13]为降低计

算复杂度,采用优化最小化 (MM, minorize-minimization) 和二分搜索相结合的算法,在降低复杂度的同时,安全速率得到了进一步提升。文献[14]考虑系统中存在多个合法接收者以及多个窃听者,以最大化最小安全速率为目标,提出采用路径跟踪算法来实现发送波束成形和 IRS 相移矩阵的联合设计。文献[15]针对 IRS 辅助的多输入多输出 (MIMO, multiple-input multiple-output) 系统,对于 IRS 相移系数取连续值和离散值 2 种情况,以最大化安全速率为目标,基于交替迭代优化算法来实现物理层安全设计。文献[16]针对 IRS 辅助通信系统存在一个合法接收者和多个窃听者场景,且在 AP 仅确知窃听者非完美信道状态信息条件下,以最小化发送功率为目标,通过优化发送预编码矢量和 IRS 相移矩阵来实现物理层安全设计。

在上述分析的基础上,本文针对 IRS 辅助的 MISO 系统,以最大化安全速率为目标,构建一个非凸优化函数,进而利用优化函数的限定条件不存在互相耦合的特点,提出基于交替迭代的物理层安全设计方案。具体来讲,该方案为了实现优化问题求解,以交替迭代方式来实现发送波束成形矢量和 IRS 相移矩阵的次优设计,其中在设计 IRS 相移矩阵时,与文献[12-14]不同的是,本文结合丁克尔巴赫算法^[15]和黎曼流形优化算法将非凸优化问题转变为一列易于求解的子问题。数值仿真结果表明,与现有方案相比,本文方案在计算复杂度与系统安全速率提升方面取得了更好的折中。

1 系统模型和问题提出

1.1 系统模型

类似于文献[12-13],考虑如图 1 所示的 IRS 辅助的 MISO 通信系统的下行链路,包括配置有 N_t 根天线的 BS、一个合法接收者、一个窃听者和包含 M 个移相器的 IRS,其相位通过 IRS 控制器来调整。

考虑准静态平坦衰落信道模型,假设 BS 确知全部信道状态信息 (CSI, channel state information)^[12,14]。当窃听者用户是系统中的活跃用户,但对于合法接收者是不可信时,基站可通过信道估计的方式获得窃听者的 CSI^[12]。令 $\mathbf{H}_{\text{BI}} \in \mathbb{C}^{M \times N_t}$ 、 $\mathbf{h}_{\text{IL}} \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ 和 $\mathbf{h}_{\text{BL}} \in \mathbb{C}^{1 \times N_t}$ 分别表示 BS 到 IRS 的信道系数矩阵、IRS 到合法接收者的信道系数矢量以及 BS 到合法接收

者的信道系数矢量，则合法接收者的接收信号为

$$y_L = (\mathbf{h}_{BL} + \mathbf{h}_{IL}\Phi\mathbf{H}_{BI})\mathbf{f}x + n_L \quad (1)$$

其中， $\Phi = \text{diag}(\beta_1 e^{j\theta_1}, \beta_2 e^{j\theta_2}, \dots, \beta_M e^{j\theta_M})$ 表示 IRS 系数矩阵， $\theta_k \in [0, 2\pi]$ 和 $\beta_k \in [0, 1]$ 分别表示 IRS 第 k 个单元的相位和幅度；假设 IRS 具有最大反射功率增益^[12]，则设定 $\beta_k = 1, k = 1, 2, \dots, M$ ； x 表示 BS 发送的保密信息，假设其为服从零均值、单位方差的随机变量； $\mathbf{f} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 表示 BS 波束成形矢量，满足功率约束 $\|\mathbf{f}\| \leq \sqrt{P_{AP}}$ ， P_{AP} 表示基站最大发送功率； n_L 表示在合法接收者处的背景噪声，满足 $n_L \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_L^2)$ 。

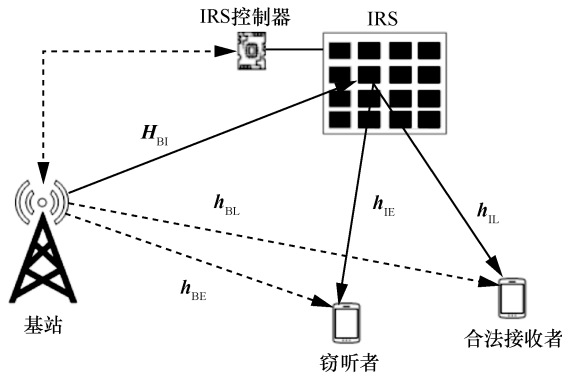


图1 IRS 辅助的 MISO 下行链路模型

同理，窃听者的接收信号为

$$y_E = (\mathbf{h}_{BE} + \mathbf{h}_{IE}\Phi\mathbf{H}_{BI})\mathbf{f}x + n_E \quad (2)$$

其中， $\mathbf{h}_{BE} \in \mathbb{C}^{1 \times N_t}$ 和 $\mathbf{h}_{IE} \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ 分别表示 BS 到窃听者的信道系数矢量和 IRS 到窃听者的信道系数矢量； n_E 表示在窃听者处的背景噪声，满足 $n_E \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_E^2)$ 。

由式(1)和式(2)可知，遵循一般意义上对安全速率的定义，IRS 辅助的 MISO 系统的安全速率为^[11-13]

$$R_{\text{sec}} = [R_L - R_E]^+ \quad (\text{单位为 bit/(s}\cdot\text{Hz)}) \quad (3)$$

其中， $[x]^+$ 表示 x 与 0 两者中取较大者； R_L 表示合法接收者的接收速率， R_E 表示窃听者的窃听速率，具体为

$$R_L = \text{lb} \left(1 + \frac{|(\mathbf{h}_{BL} + \mathbf{h}_{IL}\Phi\mathbf{H}_{BI})\mathbf{f}|^2}{\sigma_L^2} \right) \quad (4a)$$

$$R_E = \text{lb} \left(1 + \frac{|(\mathbf{h}_{BE} + \mathbf{h}_{IE}\Phi\mathbf{H}_{BI})\mathbf{f}|^2}{\sigma_E^2} \right) \quad (4b)$$

1.2 问题提出

观察式(3)可知，为了最大化系统安全速率 R_{sec} ，需联合设计 BS 波束成形矢量 \mathbf{f} 与 IRS 相移矩阵 Φ 。移除式(3)中操作符 $[]^+$ ，最大化系统安全速率则等效于求解式(5)的优化问题^[12-13]。

$$\begin{aligned} \{\mathbf{f}_{\text{opt}}, \Phi_{\text{opt}}\} = \arg \max_{\mathbf{f}, \Phi} & \left\{ \text{lb} \left(1 + \frac{|(\mathbf{h}_{BL} + \mathbf{h}_{IL}\Phi\mathbf{H}_{BI})\mathbf{f}|^2}{\sigma_L^2} \right) \right. \\ & \left. \text{lb} \left(1 + \frac{|(\mathbf{h}_{BE} + \mathbf{h}_{IE}\Phi\mathbf{H}_{BI})\mathbf{f}|^2}{\sigma_E^2} \right) \right\} \\ \text{s.t. } & \|\mathbf{f}\|^2 \leq P_{AP} \\ & |\Phi_{i,i}| = 1, i \in \{1, 2, \dots, M\} \end{aligned} \quad (5)$$

进一步，利用 $\text{lb}(\cdot)$ 的递增特性，式(5)可转化为式(6)。

$$\begin{aligned} \{\mathbf{f}_{\text{opt}}, \Phi_{\text{opt}}\} = \arg \max_{\mathbf{f}, \Phi} & \frac{1 + \frac{|(\mathbf{h}_{BL} + \mathbf{h}_{IL}\Phi\mathbf{H}_{BI})\mathbf{f}|^2}{\sigma_L^2}}{1 + \frac{|(\mathbf{h}_{BE} + \mathbf{h}_{IE}\Phi\mathbf{H}_{BI})\mathbf{f}|^2}{\sigma_E^2}} \\ \text{s.t. } & \|\mathbf{f}\|^2 \leq P_{AP} \\ & |\Phi_{i,i}| = 1, i \in \{1, 2, \dots, M\} \end{aligned} \quad (6)$$

观察式(6)可知，限定条件 2 为一系列非凸约束项；同时，目标函数中 2 个优化变量 \mathbf{f} 、 Φ 互相耦合，使目标函数为非凹函数。受上述条件限制，无法直接获得式(6)中 \mathbf{f} 和 Φ 的最优解。但仔细分析发现，式(6)中限定条件 1 仅针对 \mathbf{f} ，而限定条件 2 也仅针对 Φ 。因此，可采用交替迭代法来分别设计 \mathbf{f} 和 Φ ，直至目标函数收敛。

2 基于交替迭代的物理层安全设计

按照上述分析，下面将以交替迭代的方式，来优化设计 \mathbf{f} 和 Φ 。

2.1 固定 IRS 相移矩阵 Φ ，设计 BS 波束成形矢量 \mathbf{f}
固定 Φ 时，式(6)中目标函数仅为变量 \mathbf{f} 的函数。于是，式(6)变为如下优化问题。

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_{\text{opt}} = \arg \max_{\mathbf{f}} & \frac{1 + \frac{|(\mathbf{h}_{BL} + \mathbf{h}_{IL}\Phi\mathbf{H}_{BI})\mathbf{f}|^2}{\sigma_L^2}}{1 + \frac{|(\mathbf{h}_{BE} + \mathbf{h}_{IE}\Phi\mathbf{H}_{BI})\mathbf{f}|^2}{\sigma_E^2}} \\ \text{s.t. } & \|\mathbf{f}\|^2 \leq P_{AP} \end{aligned} \quad (7)$$

由文献[17]知, BS 采用最大发送功率可使系统安全速率最大化。于是, 将式(7)中限定条件松弛为 $\|\mathbf{f}\|^2 = P_{AP}$, 并令 $\hat{\mathbf{f}} = \mathbf{f}/\sqrt{P_{AP}}$, 则式(7)中目标函数的分子分母可分别表示为

$$1 + \frac{|(\mathbf{h}_{BL} + \mathbf{h}_{IL}\Phi\mathbf{H}_{BI})\mathbf{f}|^2}{\sigma_L^2} = \hat{\mathbf{f}}^H \hat{\mathbf{f}} + \frac{P_{AP}}{\sigma_L^2} \hat{\mathbf{f}}^H (\mathbf{h}_{BL} + \mathbf{h}_{IL}\Phi\mathbf{H}_{BI})^H (\mathbf{h}_{BL} + \mathbf{h}_{IL}\Phi\mathbf{H}_{BI}) \hat{\mathbf{f}} = \hat{\mathbf{f}}^H \mathbf{X}_L \hat{\mathbf{f}} \quad (8)$$

$$1 + \frac{|(\mathbf{h}_{BE} + \mathbf{h}_{IE}\Phi\mathbf{H}_{BI})\mathbf{f}|^2}{\sigma_E^2} = \hat{\mathbf{f}}^H \hat{\mathbf{f}} + \frac{P_{AP}}{\sigma_E^2} \hat{\mathbf{f}}^H (\mathbf{h}_{BE} + \mathbf{h}_{IE}\Phi\mathbf{H}_{BI})^H (\mathbf{h}_{BE} + \mathbf{h}_{IE}\Phi\mathbf{H}_{BI}) \hat{\mathbf{f}} = \hat{\mathbf{f}}^H \mathbf{X}_E \hat{\mathbf{f}} \quad (9)$$

其中,

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{I}_{N_i} + \frac{P_{AP}}{\sigma_i^2} (\mathbf{h}_{BL} + \mathbf{h}_{IL}\Phi\mathbf{H}_{BI})^H (\mathbf{h}_{BL} + \mathbf{h}_{IL}\Phi\mathbf{H}_{BI}), i \in \{L, E\} \quad (10)$$

于是, 优化问题式(7)可转化为

$$\hat{\mathbf{f}}_{opt} = \arg \max_{\|\hat{\mathbf{f}}\|=1} \frac{\hat{\mathbf{f}}^H \mathbf{X}_L \hat{\mathbf{f}}}{\hat{\mathbf{f}}^H \mathbf{X}_E \hat{\mathbf{f}}} \quad (11)$$

显然, 优化问题式(11)的目标函数为一广义瑞利熵。因此, 为了最大化式(11)的目标函数, $\hat{\mathbf{f}}_{opt}$ 应与矩阵束 $(\mathbf{X}_L, \mathbf{X}_E)$ 最大广义特征值所对应的特征向量, 即

$$\mathbf{f}_{opt} = \sqrt{P_{AP}} \hat{\mathbf{f}}_{opt} = \sqrt{P_{AP}} \boldsymbol{\lambda}_{max} (\mathbf{X}_E^{-1} \mathbf{X}_L) \quad (12)$$

其中, $\boldsymbol{\lambda}_{max} (\mathbf{X}_E^{-1} \mathbf{X}_L)$ 表示与矩阵束 $(\mathbf{X}_L, \mathbf{X}_E)$ 的最大广义特征值所对应的特征向量。

2.2 固定 BS 波束成形矢量 \mathbf{f} , 求解 IRS 相移矩阵 Φ

固定 \mathbf{f} , 式(6)中目标函数仅为变量 Φ 的分式函数, 则优化问题又可表示为

$$\Phi_{opt} = \arg \max_{\Phi} \frac{1 + \frac{|(\mathbf{h}_{BL} + \mathbf{h}_{IL}\Phi\mathbf{H}_{BI})\mathbf{f}|^2}{\sigma_L^2}}{1 + \frac{|(\mathbf{h}_{BE} + \mathbf{h}_{IE}\Phi\mathbf{H}_{BI})\mathbf{f}|^2}{\sigma_E^2}} \quad \text{s.t. } |\Phi_{i,j}| = 1, i \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (13)$$

利用矩阵变换

$$\mathbf{h}_{i_l}\Phi\mathbf{H}_{BI} = \mathbf{v}^T \text{diag}(\mathbf{h}_{i_l}) \mathbf{H}_{BI}, i \in \{L, E\} \quad (14)$$

其中, $\mathbf{v} = [e^{j\theta_1}, e^{j\theta_2}, \dots, e^{j\theta_M}]^T$ 。式(13)的分子可表示为

$$1 + \frac{|(\mathbf{h}_{BL} + \mathbf{h}_{IL}\Phi\mathbf{H}_{BI})\mathbf{f}|^2}{\sigma_L^2} = 1 + \frac{1}{\sigma_L^2} |(\mathbf{h}_{BL} + \mathbf{v}^T \text{diag}(\mathbf{h}_{i_L}) \mathbf{H}_{BI})\mathbf{f}|^2 = \mathbf{v}^H \mathbf{A}_L \mathbf{v} + \mathbf{v}^H \mathbf{b}_L + \mathbf{b}_L^H \mathbf{v} + c_L + 1 \quad (15)$$

其中, $\mathbf{A}_L = \frac{1}{\sigma_L^2} \text{diag}(\mathbf{h}_{i_L}^*) \mathbf{H}_{BI}^* \mathbf{f} \mathbf{f}^* \mathbf{H}_{BI}^T \text{diag}(\mathbf{h}_{i_L}^T)$, $\mathbf{b}_L = \frac{1}{\sigma_L^2} \text{diag}(\mathbf{h}_{i_L}^*) \mathbf{H}_{BI}^* \mathbf{f} \mathbf{f}^* \mathbf{h}_{BL}^T$, $c_L = \frac{1}{\sigma_L^2} \mathbf{h}_{BL}^* \mathbf{f} \mathbf{f}^* \mathbf{h}_{BL}^T$ 。

同理, 式(13)的分母可表示为

$$1 + \frac{|(\mathbf{h}_{BE} + \mathbf{h}_{IE}\Phi\mathbf{H}_{BI})\mathbf{f}|^2}{\sigma_E^2} = 1 + \frac{1}{\sigma_E^2} |(\mathbf{h}_{BE} + \mathbf{v}^T \text{diag}(\mathbf{h}_{i_E}) \mathbf{H}_{BI})\mathbf{f}|^2 = \mathbf{v}^H \mathbf{A}_E \mathbf{v} + \mathbf{v}^H \mathbf{b}_E + \mathbf{b}_E^H \mathbf{v} + c_E + 1 \quad (16)$$

其中, $\mathbf{A}_E = \frac{1}{\sigma_E^2} \text{diag}(\mathbf{h}_{i_E}^*) \mathbf{H}_{BI}^* \mathbf{f} \mathbf{f}^* \mathbf{H}_{BI}^T \text{diag}(\mathbf{h}_{i_E}^T)$, $\frac{1}{\sigma_E^2} \text{diag}(\mathbf{h}_{i_E}^*) \mathbf{H}_{BI}^* \mathbf{f} \mathbf{f}^* \mathbf{h}_{BE}^T$, $c_E = \frac{1}{\sigma_E^2} \mathbf{h}_{BE}^* \mathbf{f} \mathbf{f}^* \mathbf{h}_{BE}^T$ 。

由式(15)和式(16), 优化问题式(13)转化为

$$\mathbf{v}_{opt} = \arg \max_{\mathbf{v}} \frac{\mathbf{v}^H \mathbf{A}_L \mathbf{v} + \mathbf{v}^H \mathbf{b}_L + \mathbf{b}_L^H \mathbf{v} + c_L + 1}{\mathbf{v}^H \mathbf{A}_E \mathbf{v} + \mathbf{v}^H \mathbf{b}_E + \mathbf{b}_E^H \mathbf{v} + c_E + 1} \quad \text{s.t. } |v_i| = 1, i \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (17)$$

其中, v_i 表示 \mathbf{v} 中第 i 个元素。显然, 式(17)仍为带有非凸约束项的分式规划问题, 很难获得全局最优解。因此, 利用丁克尔巴赫算法^[18], 将式(17)中的目标函数改写成非分式形式, 即

$$\arg \max_{\mathbf{v}} (\mathbf{v}^H (\mathbf{A}_L - \lambda \mathbf{A}_E) \mathbf{v} + \mathbf{v}^H (\mathbf{b}_L - \lambda \mathbf{b}_E) + (\mathbf{b}_L^H - \lambda \mathbf{b}_E^H) \mathbf{v} + (c_L + 1) - \lambda (c_E + 1)) \quad \text{s.t. } |v_i| = 1, i \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (18)$$

其中, $\lambda \geq 0$ 为辅助变量。

优化问题式(18)依然包含非凸约束项, 因此, 其仍属非凸优化问题。为了求解该问题, 可在给定 λ 初始值的条件下, 首先利用黎曼流形法消除非凸约束项^[19], 将式(18)转化为无约束优化问题, 进而基于黎曼流形的共轭梯度下降法来求解 \mathbf{v} ; 然后以

\mathbf{v} 为基础，利用丁克尔巴赫算法来迭代更新 λ ；最后利用更新后的 λ 值，基于黎曼流形的共轭梯度下降法来更新 \mathbf{v} 。上述过程交替进行，直至丁克尔巴赫算法收敛；与丁克尔巴赫算法收敛时的 λ 值所对应的矢量 \mathbf{v} 即为最优相移矢量 \mathbf{v}_{opt} 。按照该思路，下面给出详细的分析过程。

2.2.1 基于黎曼流形的共轭梯度下降法求解 $\mathbf{v}^{(n)}$

假设丁克尔巴赫算法经第 n 次迭代后，得到 λ_n ，则优化问题式(18)可转化为

$$\begin{aligned} \mathbf{v}^{(n)} = \arg \min_{\mathbf{v}} & \left(\mathbf{v}^H (\lambda_n \mathbf{A}_E - \mathbf{A}_L) \mathbf{v} + \mathbf{v}^H (\lambda_n \mathbf{b}_E - \mathbf{b}_L) + \right. \\ & \left. (\lambda_n \mathbf{b}_E^H - \mathbf{b}_L^H) \mathbf{v} + \lambda_n (c_E + 1) - (c_L + 1) \right) \\ \text{s.t. } & |v_i| = 1, i \in \{1, 2, \dots, M\} \end{aligned} \quad (19)$$

为了求解式(18)，令 $h(\mathbf{v}) = \mathbf{v}^H (\lambda_n \mathbf{A}_E - \mathbf{A}_L) \mathbf{v} + \mathbf{v}^H (\lambda_n \mathbf{b}_E - \mathbf{b}_L) + (\lambda_n \mathbf{b}_E^H - \mathbf{b}_L^H) \mathbf{v} + \lambda_n (c_E + 1) - (c_L + 1)$ ，并利用限定条件 $|v_i| = 1, i \in \{1, 2, \dots, M\}$ 构造如图 2 所示的黎曼子流形以及切空间，用符号 $\mathcal{M}_{\text{cc}}^M$ 表示，即 $\mathcal{M}_{\text{cc}}^M = \{\mathbf{v} \in \mathbb{C}^M : |v_1| = |v_2| = \dots = |v_M| = 1\}$ 。

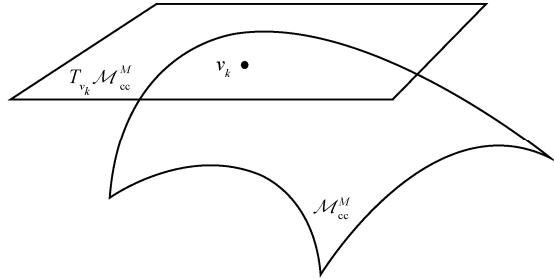


图 2 黎曼子流形以及切空间

而穿过流形 $\mathcal{M}_{\text{cc}}^M$ 上点 \mathbf{v}_k 构成的切空间则用符号 $T_{\mathbf{v}_k} \mathcal{M}_{\text{cc}}^M$ 表示，即

$$T_{\mathbf{v}_k} \mathcal{M}_{\text{cc}}^M = \left\{ \mathbf{z} \in \mathbb{C}^M : \Re \{ \mathbf{z} \circ \mathbf{v}_k^* \} = \mathbf{0}_M \right\} \quad (20)$$

其中，符号 \circ 表示哈达玛乘积。与欧氏空间类似，在黎曼切空间中，存在一切矢量或方向使目标函数变化最快，该矢量或方向称作黎曼梯度，用符号 $\nabla_{\text{R}} h(\bullet)$ 表示。由于复环流形 $\mathcal{M}_{\text{cc}}^M$ 是一个黎曼子流形，因此函数 $h(\mathbf{v})$ 在点 \mathbf{v}_k 处的黎曼梯度可用共轭欧氏梯度在切空间中的正交投影表示，如图 3 所示。于是，则有

$$\begin{aligned} \nabla_{\text{R}} h(\mathbf{v}_k) &= \text{Proj}_{T_{\mathbf{v}_k} \mathcal{M}_{\text{cc}}^M} \nabla_{\text{E}} h(\mathbf{v}_k) = \\ & \nabla_{\text{E}} h(\mathbf{v}_k) - \Re \left\{ \nabla_{\text{E}} h(\mathbf{v}_k) \circ \mathbf{v}_k^* \right\} \circ \mathbf{v}_k \end{aligned} \quad (21)$$

其中， $\nabla_{\text{E}} h(\mathbf{v}_k)$ 表示式(19)在点 \mathbf{v}_k 处的共轭欧氏梯度。

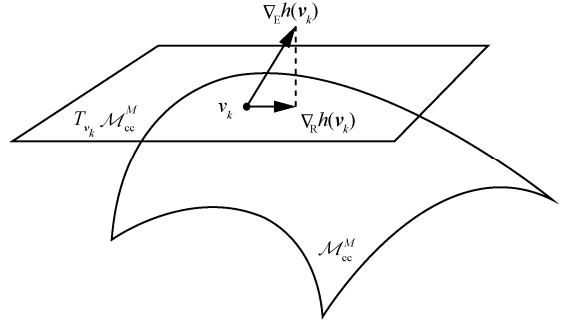


图 3 共轭欧氏梯度与黎曼梯度

$$\nabla_{\text{E}} h(\mathbf{v}_k) = \frac{\partial h(\mathbf{v}_k)}{\partial \mathbf{v}_k^*} = (\lambda \mathbf{A}_E - \mathbf{A}_L) \mathbf{v}_k + (\lambda \mathbf{b}_E - \mathbf{b}_L) \quad (22)$$

为了将切向量从切空间中映射至流形 $\mathcal{M}_{\text{cc}}^M$ 上新的点，将流形 $\mathcal{M}_{\text{cc}}^M$ 上穿过点 \mathbf{v}_k 的搜索方向 $\boldsymbol{\gamma}_k$ 以回溯步长 δ_k 进行收缩映射^[17]（用符号 $\text{Ret}_{\mathbf{v}_k}(\delta_k \boldsymbol{\gamma}_k)$ 表示），得到流形上新一點 \mathbf{v}_{k+1} ，如图 4 所示，即

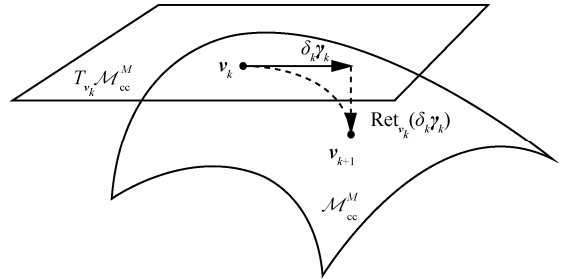


图 4 切空间中切矢量的映射

$$\mathbf{v}_{k+1} = \text{Ret}_{\mathbf{v}_k}(\delta_k \boldsymbol{\gamma}_k) \triangleq$$

$$T_{\mathbf{v}_k} \mathcal{M}_{\text{cc}}^M \mapsto \mathcal{M}_{\text{cc}}^M : \delta_k \boldsymbol{\gamma}_k \mapsto \text{unt} \left(\frac{\mathbf{v}_k + \delta_k \boldsymbol{\gamma}_k}{|\mathbf{v}_k + \delta_k \boldsymbol{\gamma}_k|} \right) \quad (23)$$

其中，符号 \mapsto 表示映射关系， $\text{unt}(\cdot)$ 表示矢量单位化操作。经收缩映射后，按照式(22)可确定点 \mathbf{v}_{k+1} 在欧氏空间的梯度 $\nabla_{\text{E}} h(\mathbf{v}_{k+1})$ ，进而在点 \mathbf{v}_{k+1} 处的搜索方向 $\boldsymbol{\gamma}_{k+1}$ 可表示为

$$\boldsymbol{\gamma}_{k+1} = -\nabla_{\text{E}} h(\mathbf{v}_{k+1}) + \zeta_k \boldsymbol{\gamma}_k \quad (24)$$

其中， $\boldsymbol{\gamma}_k$ 表示在点 \mathbf{v}_k 处的搜索方向， ζ_k 表示 Polak-Ribiere 参数^[20]。

在黎曼流形优化中，搜索方向 $\boldsymbol{\gamma}_k$ 与 $\boldsymbol{\gamma}_{k+1}$ 属于不同的切空间，因此，需建立 $\boldsymbol{\gamma}_k$ 与 $\boldsymbol{\gamma}_{k+1}$ 间的矢量转移关系。

将流形 \mathcal{M}_{cc}^M 上点 \mathbf{v}_k 处的切矢量 $\boldsymbol{\gamma}_k$ 转移至点 \mathbf{v}_{k+1} 处, 可用符号 $T_{P_{\mathbf{v}_k \rightarrow \mathbf{v}_{k+1}}}(\boldsymbol{\gamma}_k)$ 表示, 如图5所示, 即

$$\begin{aligned} T_{P_{\mathbf{v}_k \rightarrow \mathbf{v}_{k+1}}}(\boldsymbol{\gamma}_k) &= T_{\mathbf{v}_k} \mathcal{M}_{cc}^M \mapsto \mathcal{M}_{cc}^M \\ &= \boldsymbol{\gamma}_k \mapsto \boldsymbol{\gamma}_k - \Re\{\boldsymbol{\gamma}_k \circ \mathbf{v}_{k+1}^*\} \circ \mathbf{v}_{k+1} \end{aligned} \quad (25)$$

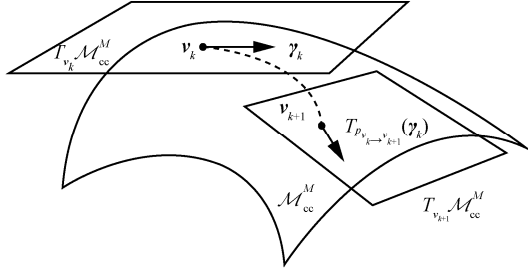


图5 切矢量的转移

进一步, 由式(24)和式(25), 根据共轭梯度下降法更新黎曼流形中的搜索方向

$$\boldsymbol{\gamma}_{k+1} = -\nabla_{\mathbf{R}} h(\mathbf{v}_{k+1}) + \zeta_k T_{P_{\mathbf{v}_k \rightarrow \mathbf{v}_{k+1}}}(\boldsymbol{\gamma}_k) \quad (26)$$

上述梯度搜索方向不断更新, 直至满足收敛条件; 收敛后黎曼流形上的点即式(19)的解 $\mathbf{v}^{(n)}$ 。算法1对上述求解 $\mathbf{v}^{(n)}$ 的步骤进行了总结。

算法1 求解 $\mathbf{v}^{(n)}$

输入 $\lambda_n, \mathbf{v}_0 = \mathbf{v}^{(n-1)}, k=0, \boldsymbol{\gamma}_0 = -\nabla_{\mathbf{R}} h(\mathbf{v}_0)$

输出 $\mathbf{v}^{(n)} = \mathbf{v}_k$

while $\|\nabla_{\mathbf{R}} h(\mathbf{v}_k)\|^2 > \varepsilon$

- 1) 计算回溯步长 δ_k
- 2) 由 $\mathbf{v}_{k+1} = \text{Ret}_{\mathbf{v}_k}(\delta_k \boldsymbol{\gamma}_k)$ 更新 \mathbf{v}_k
- 3) 由式(21)确定 $\nabla_{\mathbf{R}} h(\mathbf{v}_{k+1})$
- 4) 由式(25)确定 $T_{P_{\mathbf{v}_k \rightarrow \mathbf{v}_{k+1}}}(\boldsymbol{\gamma}_k)$
- 5) 选择参数 ζ_k
- 6) 由式(26)更新搜索方向
- 7) $k = k + 1$

end while

2.2.2 基于丁克尔巴赫算法更新 λ_n

根据算法1得到矢量 $\mathbf{v}^{(n)}$, 对应存在函数 $F(\lambda_n)$, 即

$$\begin{aligned} F(\lambda_n) &= -\lambda_n (\mathbf{v}^{(n)\text{H}} \mathbf{A}_E \mathbf{v}^{(n)} + \mathbf{v}^{(n)\text{H}} \mathbf{b}_E + \mathbf{b}_E^{\text{H}} \mathbf{v}^{(n)} + c_E + 1) + \\ &\quad (\mathbf{v}^{(n)\text{H}} \mathbf{A}_L \mathbf{v}^{(n)} + \mathbf{v}^{(n)\text{H}} \mathbf{b}_L + \mathbf{b}_L^{\text{H}} \mathbf{v}^{(n)} + c_L + 1) \end{aligned} \quad (27)$$

文献[15]指出 $F(\lambda_n)$ 为关于变量 λ_n 的递减函数, 根据丁克尔巴赫算法来更新变量 λ_n , 即

$$\lambda_{n+1} = \frac{\mathbf{v}^{(n)\text{H}} \mathbf{A}_L \mathbf{v}^{(n)} + \mathbf{v}^{(n)\text{H}} \mathbf{b}_L + \mathbf{b}_L^{\text{H}} \mathbf{v}^{(n)} + c_L + 1}{\mathbf{v}^{(n)\text{H}} \mathbf{A}_E \mathbf{v}^{(n)} + \mathbf{v}^{(n)\text{H}} \mathbf{b}_E + \mathbf{b}_E^{\text{H}} \mathbf{v}^{(n)} + c_E + 1} \quad (28)$$

算法2 基于丁克尔巴赫算法更新 λ_n

输入 $n=0, \lambda_n = 0, \mathbf{v}^{(0)} = \mathbf{1}_M$

输出 $\lambda_n, \mathbf{v}^{(n)}$

while $F(\lambda_n) > \varepsilon$

- 1) 利用算法1求解式(19)得到 $\mathbf{v}^{(n)}$
- 2) 根据式(27)计算 $F(\lambda_n)$
- 3) 根据式(28)计算 λ_{n+1}
- 4) $n = n + 1$

end while

当 $|\lambda_{n+1} - \lambda_n| \leq \varepsilon$ 时, 函数 $F(\lambda_n)$ 达到收敛。此时, 变量 λ_n 对应的矢量 \mathbf{v} 即为问题的解。算法2给出基于丁克尔巴赫算法更新 λ_n 的过程。

当 $F(\lambda_n) \leq \varepsilon$ 时, 丁克尔巴赫算法收敛。此时, 由算法1更新得到的 $\mathbf{v}^{(n)}$ 即为最优的 IRS 相移矢量, 则有 $\mathbf{v}_{\text{opt}} = \mathbf{v}^{(n)}$, 此时, IRS 相移矩阵 $\boldsymbol{\Phi}_{\text{opt}} = \text{diag}(\mathbf{v}_{\text{opt}})$ 。

2.3 基于交替迭代的物理层安全设计方案

通过2.1节和2.2节, 可得到BS波束成形矢量 \mathbf{f} 和 IRS 相移矩阵 $\boldsymbol{\Phi} = \text{diag}(\mathbf{v}_{\text{opt}})$; 将其代入式(3), 得到系统安全速率 $R_{\text{sec}} = R_L - R_E$ 。通过交替迭代更新 \mathbf{f} 和 $\boldsymbol{\Phi}$, 使系统安全速率逐渐增大, 直至满足收敛条件, 算法3给出基于交替迭代的物理层安全设计的完整步骤。

算法3 基于交替迭代的物理层安全设计

输入 $k=0, \mathbf{f}^{(0)} = \frac{\mathbf{h}_{\text{Bl}}^{\text{H}}}{\|\mathbf{h}_{\text{Bl}}^{\text{H}}\|}, \boldsymbol{\Phi}^{(0)} = \text{diag}(\mathbf{1}_M), R_{\text{sec}}^{(0)}, \varepsilon =$

1×10^{-6}

输出 $\mathbf{f}^{(k)}, \boldsymbol{\Phi}^{(k)}, R_{\text{sec}}^{(k)}$

- 1) repeat
- 2) $k = k + 1$
- 3) 根据 $\boldsymbol{\Phi}^{(k-1)}$, 利用式(12)更新 $\mathbf{f}^{(k)}$
- 4) 根据 $\mathbf{f}^{(k)}$, 利用算法2求解 λ_n
- 5) 利用2.2.1节得到 \mathbf{v}_{opt} , 进而令 $\boldsymbol{\Phi}^{(k)} = \text{diag}(\mathbf{v}_{\text{opt}})$
- 6) 令 $R_{\text{sec}}^{(k)} = R_L(\mathbf{f}^{(k)}, \boldsymbol{\Phi}^{(k)}) - R_E(\mathbf{f}^{(k)}, \boldsymbol{\Phi}^{(k)})$
- 7) until $\frac{|R_{\text{sec}}^{(k)} - R_{\text{sec}}^{(k-1)}|}{R_{\text{sec}}^{(k)}} \leq \varepsilon$

3 算法复杂度分析

本文所给出的物理层安全设计的复杂度主要由算法3中步骤3)和步骤2)中第二步构成, 其中算法3中步骤3)求BS波束成形矢量 \mathbf{f} 的复杂度约为

$O(N_t^3)$ ，而算法 2 中步骤 2) 第二步求解 IRS 相移矢量 $\mathbf{v}^{(n)}$ 复杂度约为 $O(M^{1.5})$ [21]，因此，其总复杂度约为 $O(N_{\text{iter}}(N_t^3 + K_{\text{iter}}M^{1.5}))$ ，其中 N_{iter} 为算法 3 的迭代次数， K_{iter} 为算法 2 迭代的次数。文献[12]利用 SDR 算法求解相移矢量 \mathbf{v} 的复杂度约为 $(M+1)^{4.5}$ [22]，因此，文献[12]方案的总复杂度约为 $O(T_{\text{iter}}(N_t^3 + (M+1)^{4.5}))$ ，其中 T_{iter} 表示迭代次数。文献[13]基于特征值分解利用 MM 算法来求解相移矢量 \mathbf{v} ，所需复杂度约为 $O(M^3)$ ，因此，文献[13]方案总复杂度约为 $O(T_{\text{iter}}(N_t^3 + J_{\text{iter}}M^3))$ ，其中 J_{iter} 表示 MM 算法的迭代次数。与文献[12-13]相比，本文方案在计算 IRS 相移矢量 $\mathbf{v}^{(n)}$ 上的复杂度有明显的降低，因此本文方案计算复杂度相对较低。

4 数值仿真与分析

在本节将对提出的基于交替迭代的 IRS 辅助通信系统的物理层安全方案进行性能评估。仿真条件如下：BS 配置 $N_t = 4$ 根天线，IRS 反射单元数 $M = 64$ ； $\mathbf{h}_{\text{BL}} = \sqrt{\xi_0 d_{\text{BL}}^{-\alpha_{\text{BL}}}} \mathbf{g}_{\text{BL}}$ ，其中 $\xi_0 = -30$ dB， d_{BL} 表示 BS 到合法接收者的距离， \mathbf{g}_{BL} 表示 Rayleigh 衰落的小尺度衰落， $\alpha_{\text{BL}} = 3.5$ 表示 BS 到合法接收者链路的路径损耗指数；同理，假设 BS 到 IRS 链路、BS 到窃听器链路、IRS 到合法接收者、IRS 到窃听者的信道模型与 \mathbf{h}_{BL} 类似，除非特别说明，对应路径损耗指数分别为 $\alpha_{\text{BI}} = 2.2$ ， $\alpha_{\text{BE}} = 3.5$ ， $\alpha_{\text{IL}} = 3$ ， $\alpha_{\text{IE}} = 3$ ，用以验证对系统安全速率的影响；同时，类似文献[13]，设置 BS 坐标为 (0,5)，合法接收者坐标为 (150,0)，窃听器坐标为 (145,0)，IRS 坐标为 (145,5)；噪声功率 $\sigma_L^2 = \sigma_E^2 = -80$ dBm，收敛因子 $\varepsilon = 1 \times 10^{-6}$ 。在仿真中，将本文方案与下列方案进行对比。

1) 最大比率传输 (MRT, maximum ratio transmission) 方案。BS 向 IRS 发射波束成形矢量 $\mathbf{f} = \sqrt{P_{\text{AP}}} \frac{\mathbf{h}_{\text{BI}}^H}{\|\mathbf{h}_{\text{BI}}\|}$ ，其中 \mathbf{h}_{BI} 表示 \mathbf{H}_{BI} 中任意一行矢量，IRS 相移矩阵 Φ 的设计采取与本文同样的方法。

2) 基于 SDR 算法的方案 [12]。采取与本文相同方法设计 \mathbf{f} ，但采用 SDR 算法设计 Φ 。

3) 基于 MM 算法和二分搜索的方案 [13]。 \mathbf{f} 的设计与本文相同，但采用 MM 算法和二分搜索确定 Φ 。

4) 随机相位选取方案。 \mathbf{f} 的设计与本文相同，RIS 相移矩阵 Φ 中元素的相位由随机函数生成。

5) 无 IRS 辅助的方案。设定 $\Phi = \mathbf{0}_M$ ，由式(13)设计 \mathbf{f} 。

本文方案和其他 5 种方案的系统安全速率随 BS 最大发送功率的变化情况如图 6 所示。由图 6 可知，本文方案的安全速率优于文献[12-13]方案，这是由于文献[12]方案对非凸约束项采取松弛处理，同时 IRS 相移矩阵利用高斯随机化来确定，因而存在一定误差；文献[13]方案采用 MM 算法和二分搜索，与本文方案都是得到问题的次优解。由于原问题是一非凸问题，采用不同方法会获得不同的次优解，从而导致性能上的差异。但在当前路径损耗指数条件下，本文采用丁克尔巴赫算法和黎曼流形优化算法得到更准确的 IRS 相移系数矢量，从而导致其性能优于基于 MM 算法和二分搜索的方案；MRT 方案仅利用 BS 到 IRS 之间的信道信息来设计波束成形矢量 \mathbf{f} ，导致其安全速率必然低于本文方案；随机相位选取方案没有充分利用 IRS 带来的信道增益，因此性能较差。此外，受益于 IRS 对无线通信环境的智能配置，无 IRS 辅助的方案的安全速率明显低于 IRS 辅助的方案。

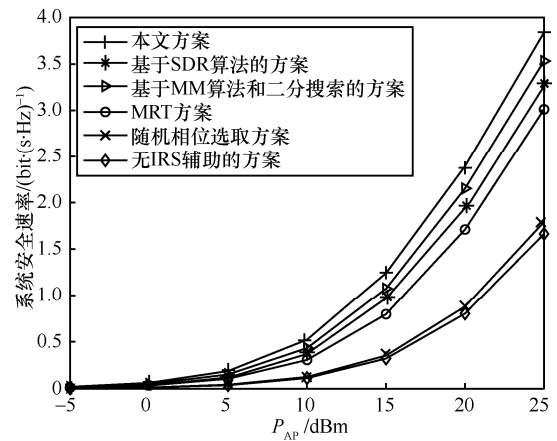


图 6 系统安全速率随 BS 最大发送功率的变化情况

BS 端 $P_{\text{AP}} = 15$ dBm 时系统安全速率随 IRS 单元数的变化情况如图 7 所示。由图 7 可知，相较于对比方案，本文方案的系统安全速率随着 IRS 单元数增加提升得非常明显。这是由于随着 IRS 单元数的增加，通过合理设计 IRS 相移矩阵，合法接收者能够接收更多的信号能量，而窃听器只能接收较少的信号能量，使合法接收者与窃听器

的信噪比比值逐渐增大，导致系统的安全速率能够明显提升。从图 7 中还可看出，当 IRS 相移矩阵采取随机相位选取方案时，系统安全速率与无 IRS 辅助的方案的安全速率十分接近，这从侧面验证了合理设计 IRS 相移矩阵的重要性。另外，由于 MRT 方案没有合理设计 BS 波束成形矢量，因而相比于本文方案，在系统安全速率性能上存在较大差距。

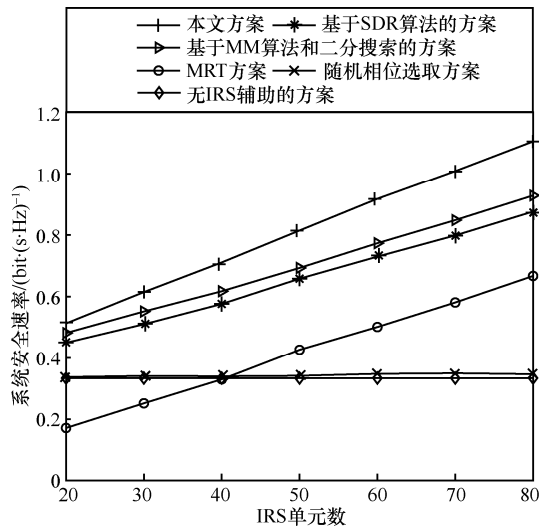


图 7 系统安全速率随 IRS 单元数的变化情况

当 BS 到 IRS、IRS 到合法接收者以及 IRS 到窃听器之间的路径损耗指数相同，即 $\alpha_{BI} = \alpha_{IL} = \alpha_{IE} = \alpha_{IRS}$ 时，系统安全速率随路径损耗指数 α_{IRS} 的变化情况如图 8 所示。由图 8 可知，随着路径损耗指数增加，本文方案以及对方案的系统安全速率均明显降低，这是由于信号在传输损耗随路径损耗指数增加而增加所导致的。进一步，放大与 IRS 相关的路损指数在 3.4~3.6 的仿真结果，发现本文方案在路损指数在 3.4~3.6 的性能略优于 SDR 算法，但略低于基于 MM 算法和二分搜索的方案。这是由于当与 IRS 相关的路损指数过大时，与 IRS 相关的链路质量很差，即系统无法充分利用 IRS 来增强物理层安全，因此导致本文方案在性能上略低于基于 MM 算法和二分搜索的方案。但纵观所有对比算法，当路损指数在 3.4~3.6 时，即使对于基于 MM 算法和二分搜索的方案，其系统安全速率与无 IRS 辅助的方案安全速率也相差不大，即当与 IRS 相关的链路路损指数过大时，即使在通信系统中放置 IRS 来辅助通信，其优势也是无法充分发挥出来的。然而，本文方案对与 IRS 相关的链路质量相对较好时，其性能明显

优于基于 MM 算法和二分搜索的方案，且其确定 IRS 相移系数矢量的计算复杂度却比基于 MM 算法和二分搜索的方案要低。此外，当 α_{IRS} 较小时，MRT 方案的性能优于文献[12]中的方案，但随 α_{IRS} 增大，MRT 方案性能明显低于文献[12]方案和其他对比方案。这是因为 MRT 方案性能由 BS 到 IRS 之间的链路质量决定，当 BS 与 IRS 之间链路的路径损耗指数较小时，该链路质量较好，因而 MRT 方案能获得较好性能，但随着路径损耗数增加，这种优势逐渐消失，进而导致其性能急剧下降。

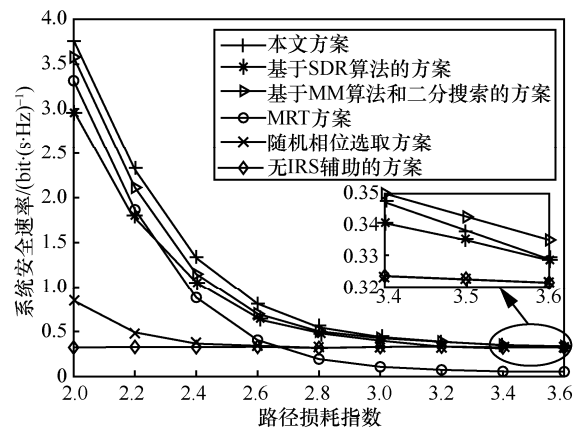


图 8 系统安全速率随路径损耗指数 α_{IRS} 的变化情况

各种物理层安全设计方案中合法接收者移动时对系统安全速率的影响如图 9 所示。在仿真中，令 BS 坐标为(0,0)，窃听器坐标为(50,0)，IRS 坐标为(60,2)，合法接收者在坐标(10,0)与(80,0)之间移动。由仿真结果可知，尽管本文方案在性能上对比方案的系统安全速率存在优势，但当合法接收者远离 BS 时，所有方案性能均明显降低；当合法接收者移动至距离基站[50,70]时，IRS 辅助通信系统的物理层安全设计方案的系统安全率先上升后下降，这表明在合法接收者距离 IRS 较远时，BS 到合法接收者以及 BS 到窃听器之间的链路起主导作用；当合法接收者接近 IRS 时，IRS 到合法接收者以及到窃听器之间的链路起决定作用。进一步，由图 9 可知，对于 d_{BL} 在 10~20，本文方案在性能上依旧略优于基于 SDR 算法的方案、基于 MM 算法和二分搜索的方案和随机相位选取方案，但性能明显提升仍在距离 IRS 较近的区域，这表明在 IRS 辅助的通信系统中，根据用户位置，合理部署 IRS 对系统安全性能影响很大。

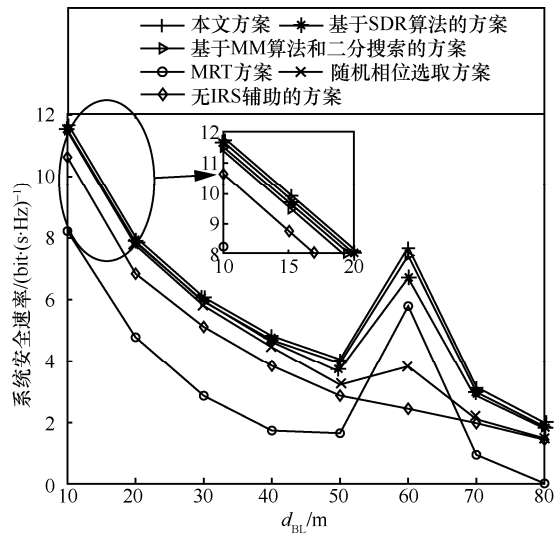


图9 合法接收者移动时对系统安全速率的影响

5 结束语

本文针对 IRS 辅助的 MISO 通信系统，基于交替迭代提出了一种更高效的物理层安全设计方案。在该方案中，为使带有非凸约束项的目标函数可解，采用丁克尔巴赫算法和黎曼流形优化算法将非凸分式优化问题转化为一系列可求解的子问题，进而采取交替迭代法对其求解，从而获得目标函数的次优解。仿真结果表明，相较其他方案，本文方案可明显地提高系统的安全速率，同时降低所需计算复杂度，从而在计算复杂度与系统安全速率间取得更好的折中。此外，本文所采用的物理层安全系统模型中，假设 IRS 相移矩阵元素幅度恒定、相位取连续值，因此，对于 IRS 相移矩阵相位采用有限离散值、幅度在 $0 \sim 1$ 变化等因素对系统安全速率的影响，将在后续研究中深入展开。

参考文献：

[1] HU S, RUSEK F, EDFORS O. Beyond massive MIMO: the potential of positioning with large intelligent surfaces[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(7): 1761-1774.

[2] BASAR E. Transmission through large intelligent surfaces: a new frontier in wireless communications[C]//*Proceedings of 2019 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 112-117.

[3] HAN Y, TANG W K, JIN S, et al. Large intelligent surface-assisted wireless communication exploiting statistical CSI[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(8): 8238-8242.

[4] WU Q Q, ZHANG R. Beamforming optimization for intelligent re-

fecting surface with discrete phase shifts[C]//*Proceedings of ICASSP 2019 - 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 7830-7833.

- [5] NADEEM Q U A, ALWAZANI H, KAMMOUN A, et al. Intelligent reflecting surface-assisted multi-user MISO communication: channel estimation and beamforming design[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2020, 1: 661-680.
- [6] HUANG C W, ZAPPONE A, ALEXANDROPOULOS G C, et al. Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(8): 4157-4170.
- [7] ZHENG B X, ZHANG R. Intelligent reflecting surface-enhanced OFDM: channel estimation and reflection optimization[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(4): 518-522.
- [8] TAHA A, ALRABEIAH M, ALKHATEEB A. Enabling large intelligent surfaces with compressive sensing and deep learning[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 44304-44321.
- [9] 吴宣利, 许智聪, 王禹辰, 等. 基于信道相关性的物理层安全性能分析[J]. *通信学报*, 2021, 42(3): 65-74.
- WU X L, XU Z C, WANG Y C, et al. Performance analysis of physical layer security based on channel correlation[J]. *Journal on Communications*, 2021, 42(3): 65-74.
- [10] SHI W P, ZHOU X B, JIA L Q, et al. Enhanced secure wireless information and power transfer via intelligent reflecting surface[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(4): 1084-1088.
- [11] YU X H, XU D F, SCHOBBER R. Enabling secure wireless communications via intelligent reflecting surfaces[C]//*Proceedings of 2019 IEEE Global Communications Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [12] CUI M, ZHANG G C, ZHANG R. Secure wireless communication via intelligent reflecting surface[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 8(5): 1410-1414.
- [13] SHEN H, XU W, GONG S L, et al. Secrecy rate maximization for intelligent reflecting surface assisted multi-antenna communications[J]. *IEEE Communications Letters*, 2019, 23(9): 1488-1492.
- [14] CHEN J, LIANG Y C, PEI Y Y, et al. Intelligent reflecting surface: a programmable wireless environment for physical layer security[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 82599-82612.
- [15] JIANG W H, ZHANG Y, WU J S, et al. Intelligent reflecting surface assisted secure wireless communications with multiple-transmit and multiple-receive antennas[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 86659-86673.
- [16] WANG D Q, ZHANG J, ZHANG Q, et al. Intelligent reflecting surface-assisted secrecy wireless communication with imperfect CSI[J]. *Physical Communication*, 2021, 44: 101235.
- [17] SHAFIEE S, ULUKUS S. Achievable rates in Gaussian MISO channels with secrecy constraints[C]//*Proceedings of 2007 IEEE International Symposium on Information Theory*. Piscataway: IEEE Press, 2007: 2466-2470.
- [18] ZAPPONE A, JORSWIECK E. Energy efficiency in wireless networks via fractional programming theory[M]. Hannover: Now Publishers, 2015.
- [19] ABSIL P A, MAHONY R, SEPULCHRE R. Optimization algorithms on matrix manifolds[M]. Princeton: Princeton University Press, 2008.

[20] HAGER W W, ZHANG H C. A survey of nonlinear conjugate gradient methods[J]. Pacific Journal of Optimization, 2006, 2(1):35-58.

[21] SHEWCHUK J. An introduction to the conjugate gradient method without the agonizing pain[R]. 1994.

[22] YU X H, XU D F, SUN Y, et al. Robust and secure wireless communications via intelligent reflecting surfaces[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(11): 2637-2652.



高维（1987- ），女，重庆开州人，重庆邮电大学博士生，主要研究方向为无线通信及信号处理。

[作者简介]



景小荣（1974- ），男，甘肃平凉人，博士，重庆邮电大学教授、博士生导师，主要研究方向为无线通信系统信号与信息处理。



雷维嘉（1969- ），男，云南元谋人，博士，重庆邮电大学教授，主要研究方向为认知无线电、物理层安全。



宋振远（1994- ），男，河南民权人，重庆邮电大学硕士生，主要研究方向为无线通信、信号处理。



陈前斌（1967- ），男，四川营山人，博士，重庆邮电大学教授、博士生导师，主要研究方向为通信网理论与技术、无线通信、多媒体信息传输与处理。