



研究与开发

基于 IRS 辅助的 OFDM-IM 系统设计

赵萌萌, 何立明, 刘芳芳

(长安大学信息工程学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 索引调制 (index modulation, IM) 和智能反射面 (intelligent reflecting surface, IRS) 是新兴的移动通信技术。为了提高传统正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 系统的可靠性, 设计一种基于 IRS 的索引调制正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing-index modulation, OFDM-IM) 系统。首先, 使用空间调制和频域调制设计 OFDM-IM 系统, 增大子载波间的欧几里得距离。其次, 通过建立等效电路模型, 设计实用的 IRS 模型。最后, 使用交替优化算法联合优化接入点 (access point, AP) 的主动发射功率和 IRS 处的被动波束形成。仿真结果表明, 基于 IRS 辅助的 OFDM-IM 系统与基准方案相比, 其误符号率 (symbol error rate, SER) 或误码率 (bit error rate, BER) 可以降低 60%~90%, 在较高信噪比情况下, 系统 SER 或 BER 可达到 1.0×10^{-6} , 这说明 IM 和 IRS 技术的引入优化了端到端通信系统的链路传输质量。此外, 以基于 IRS 辅助的 OFDM-IM 系统为标准, 仿真结果证明了 IRS 模型和 IM 中各参数对系统的影响, 并得出了系统中各模型参数要根据信道状态信息 (channel state information, CSI) 合理选择的结论。

关键词: 智能反射面; 索引调制; 正交频分复用; 相移模型

中图分类号: TN929

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023136

Design of OFDM-IM system based on IRS-assisted

ZHAO Mengmeng, HE Liming, LIU Fangfang

School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China

Abstract: Index modulation (IM) and intelligent reflecting surface (IRS) are emerging mobile communication technologies. In order to improve the reliability of traditional orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) system, an orthogonal frequency division multiplexing with index modulation (OFDM-IM) system based on IRS-assisted was designed. Firstly, the OFDM-IM system was designed by using spatial modulation and frequency domain modulation to increase the Euclidean distance between subcarriers. Then, by establishing an equivalent circuit model, a practical IRS model was obtained. Finally, an alternating optimization algorithm was used to optimize the active transmission power of the access point (AP) and passive beamforming of the IRS jointly. The simulation results show that compared to the benchmark scheme, the symbol error rate (SER) or bit error rate (BER) of the OFDM-IM system based on IRS-assisted can be reduced by 60%~90%. Especially in the case of high signal-to-noise ratio, the SER or BER of the system can reach 1.0×10^{-6} , which indicates that the introduction of IM and IRS technologies has optimized the

收稿日期: 2023-04-24; 修回日期: 2023-06-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51308058)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.51308058)



link transmission quality of end-to-end communication system. In addition, based on the IRS-assisted OFDM-IM system as the standard, simulations are conducted to demonstrate the impact of various parameters from the IRS model and IM. It concludes that the parameters in the system should be selected reasonably according to channel state information (CSI).

Key words: intelligent reflecting surface, index modulation, orthogonal frequency division multiplexing, phaseshift model

0 引言

索引调制 (IM) 技术不直接改变信号波形来传递信息, 而是通过选择不同的索引序号传递信息, 由于索引序号可以来自不同的域, 因此 IM 技术包括多种调制方式。其中, 频域 IM 是指把频域资源的序号作为索引进行调制, 如果在 OFDM 系统中将子载波的序号作为调制资源, 则形成 OFDM-IM 系统。文献[1]分析了该技术的可实现性, 并指出该技术对于传输速率相对低的情况是有利的。在此基础上, 众多研究尝试提高 OFDM-IM 系统的性能。文献[2]提出了同时优化功率分配与天线选择, 进一步增强系统可靠性。文献[3]提出了一种新的空间频率指数调制方案, 利用结合了传输媒体资源与指数调制的二维索引调制来实现更高的吞吐量和更低的能耗。文献[4]将极化码应用于具有索引调制的 OFDM 系统的修改版本, 并证明极化编码可以提高系统的误码率性能。然而, 这些研究均从调制的角度出发, 优化现有的调制方法。

IRS 作为新一代移动通信中有潜力的技术之一, 凭借其无源、全双工传输、对信道环境可控等基本特性与低成本、低功耗、易部署等优势应用于各个不同场景^[5], 并有效帮助通信链路传输。例如, 文献[6]借助 IRS 最小化非正交多址系统的发射功率。文献[7]利用 IRS 技术建立等效级联信道, 对毫米波通信系统进行信道估计。文献[8]通过改变基于 IRS 的反射镜阵列的数量提高平行车辆可见光通信 (visible light communication, VLC) 系统性能。文献[9]与文献[10]

研究系统的安全保密性能, 分别以功率和相移、服务质量为约束, 提高信道的保密率。由此推断, IRS 技术同样可以辅助 OFDM-IM 系统通信。但是, 常见 IRS 模型为理想模型, 理想模型的硬件难以实现且忽略了电路参数对系统的影响。针对这一问题, 文献[11]提出了一种实用的相移模型, 该模型可以捕获 IRS 反射系数中与相位相关的幅度变化, 但未考虑两者与频率的关系, 只适用于窄带信号。文献[12]提出 IRS 辅助下 OFDM 宽带系统的实用建模方案, 研究了信号的相位、幅度和频率的关系, 但模型被拟合为正切函数, 若系统中的子载波数或 IRS 反射元件数过多, 则会导致计算复杂度上升。

综上, 本文提出了新的 IRS 实用模型, 模型不仅满足 IRS 参数之间的物理关系, 而且更加简化。并借助此模型, 从通信的物理层角度出发, 辅助宽带 OFDM-IM 系统通信, 从而提高系统的可靠性。

1 构建模型

1.1 链路模型

考虑从单天线接入点到单天线用户 (user, UE) 的通信, 在传输链路中使用由 I 个反射元件组成的 IRS 辅助链路通信, 链路模型如图 1 所示。令 $\mathbf{G}=[\mathbf{g}_1, \dots, \mathbf{g}_Q] \in \mathbb{C}^{I \times Q}$ 和 $\mathbf{H}_r=[\mathbf{h}_{r,1}, \dots, \mathbf{h}_{r,Q}] \in \mathbb{C}^{I \times Q}$ 分别表示反射链路 AP-IRS 和 IRS-UE 的基带等效信道, $\mathbf{H}_d=[\mathbf{h}_{d,1}, \dots, \mathbf{h}_{d,Q}] \in \mathbb{C}^Q$ 表示直接链路 AP-UE 的基带等效信道。假设 CSI 完全已知, 并且可以及时传输至 AP, 那么在 AP 处可以找到最佳的 IRS 反射系数, 此反射系数通过专用信道控制 IRS 的响应。

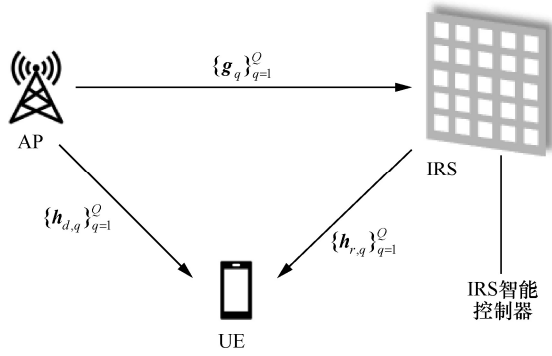


图 1 链路模型

1.2 OFDM-IM 系统模型

系统模型采用具有 Q 个子载波的 OFDM-IM 系统, 所有子载波被均分为 R 个子块, 每个子块包含 $N=Q/R$ 个子载波。每个子块可以用 $\mathbf{Y}_r = [Y_{r,1}, \dots, Y_{r,N}]^T, r=1, \dots, R$ 表示, 那么发射信号为:

$$\tilde{\mathbf{X}} = [\mathbf{Y}_0^T, \dots, \mathbf{Y}_R^T]^T \quad (1)$$

每个子块 $\mathbf{Y}_r$ 中的 N 个子载波彼此相邻。若 Q 较大, 则可以假设每个子块的子载波的信道系数基本相关。但是, 如果相干带宽与总的子块数 R 的比值小于子载波间隔, 则可以假定子块 $\mathbf{Y}_r$ 的子载波的信道系数是独立的^[13]。在 OFDM-IM 系统中, 子块是信息调制的基本单元, 可以写为:

$$\mathbf{Y}_r = [0, \dots, 0, A_{r,1}, 0, \dots, 0, A_{r,2}, 0, \dots, 0, \dots, A_{r,K}, 0, \dots, 0]^T \quad (2)$$

其中, $A_{r,k} (k=1, \dots, K)$ 代表 M 进制正振幅调制 (quadrature amplitude modulation, QAM) 的信号, $\mathbf{Y}_r \in \mathcal{A}$, $\mathcal{A}$ 是所有可能的信号向量的集合。 $\mathbf{Y}_r$ 表明每个子块中有 $p_1 = \lfloor \log_2 C_N^K \rfloor$ 比特来激活 K 个子载波, C_N^K 代表二项式系数, 同时 $p_2 = K \log_2 M$ 比特被映射到 M 元信号星座, 以便选择调制有源子载波的数据符号。因此, 每个子块共调制 $p_1 + p_2$ 比特的信息, OFDM-IM 系统的所有符号共调制 $R(p_1 + p_2)$ 比特的信息。

1.3 IRS 模型

IRS 分层结构如图 2 所示, 主要由 3 个层板 (控制电路板、铜板、IRS 智能控制器所连接的金属贴片所在板面) 和 1 个 IRS 智能控制器构成。

外层部署大量金属贴片单元, 直接作用于撞击在其上的信号; 中间层放置一块铜板, 防止信号能量泄漏; 内层是一个控制电路板, 控制并调节外层每个元件对信号的作用^[14]。

IRS 理想模型的主要特点: 一方面, 将反射单元幅度和相移视作两个独立的变量, 对两者进行独立调节; 另一方面, 理想模型对入射信号的幅度调整恒为 1, 相移调整是一个周期内的连续值。而实际上, 这一理想模型并不准确, 因为反射系数会受偏置电压和入射信号频率的影响, 这意味着反射系数的幅度和相移并不是独立的, 且两者之间存在某种基本关系。另外, 硬件很难实现理想情况下的连续相移, 现有实际模型一般将相移设置为固定的离散值。

为证明反射系数的幅度和相移之间的关系, 现将 IRS 元件的响应等效地建模为并联谐振电路, 如图 2 所示。

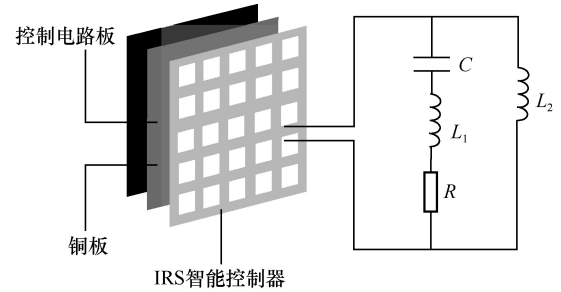


图 2 IRS 分层结构

其中, L_1, L_2 表示等效电感, C 和 R 分别表示可变电容器和损耗电阻。因此, 对于入射频率为 f 的信号, 反射元件的阻抗可以写为:

$$Z(C, f) = \frac{j2\pi f L_2 \left(j2\pi f L_1 + \frac{1}{j2\pi f C} + R \right)}{j2\pi f L_2 + j2\pi f L_1 + \frac{1}{j2\pi f C} + R} \quad (3)$$

由于元件并联谐振电路阻抗和自由空间阻抗 $Z_0=377 \Omega$ 之间存在不连续性, 会引起可配置电磁波的反射, 利用这种特性, 元件反射系数可以描述为:

$$\phi(C, f) = \frac{Z(C, f) - Z_0}{Z(C, f) + Z_0} \quad (4)$$



显然, 反射系数 $\phi(C, f)$ 是电容 C 和入射信号频率 f 的函数。这意味着每个反射元件的反射系数会受可变电容的影响。为验证这一现象的正确性, 模拟一个 IRS 辅助的宽带通信系统。令 ϕ_c 表示中心频率处信号的反射系数, 观察在其他电路参数固定的情况下, 随着电容 C 的改变^[15], 不同频率的信号的幅度 $|\phi_c|$ 和相移 $\angle\phi_c$ 的变化。反射幅度和相移随电容变化如图 3 所示, 幅度随电容变化曲线自左向右分别对应 2.45 GHz、2.4 GHz、2.35 GHz 的频率信号, 相移随电容变化曲线自上而下分别对应 2.35 GHz、2.4 GHz、2.45 GHz 的频率信号。其中, L_1 为 2.5 nH, L_2 为 0.7 nH, R 为 1 Ω , 3 个频率由中心频率 f_c 为 2.4 GHz、带宽 Bw 为 100 MHz 的频带均分得到。

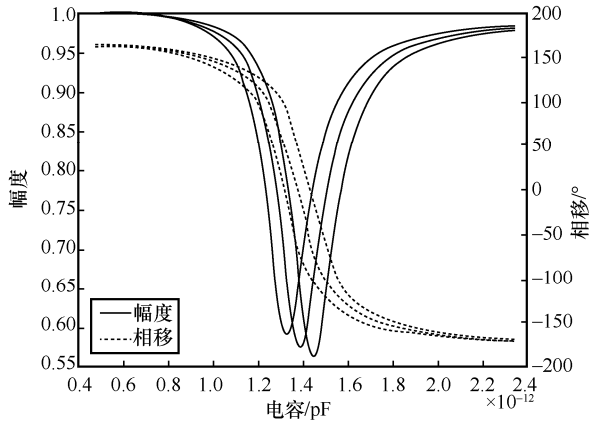


图 3 反射幅度和相移随电容变化

为表征幅度或相移和频率之间的基本关系, 定义 IRS 的第 i 个元件的反射系数为:

$$\phi_i = A_i e^{j\theta_i}, \forall i \quad (5)$$

从图 3 可以看出, 反射元件对信号幅度和相移的调整确实随着电路参数的变化呈现出一定的规律性。此外还观察到不同频率的曲线差异较小, 因此, 可以对不同频率使用统一的拟合函数。文献[16]在分析 IRS 元件的反射系数与入射波频率之间的关系时, 将同一元件在不同频率下的反射系数建模为:

$$\begin{aligned} F_1(\angle\phi_c) &= \alpha_1 \sin(\beta_1 \angle\phi_c + \gamma_1) + \alpha_2 \sin(\beta_2 \angle\phi_c + \gamma_2) \\ F_2(\angle\phi_c) &= \alpha_3 \sin(\beta_3 \angle\phi_c + \gamma_3) + \alpha_4 \sin(\beta_4 \angle\phi_c + \gamma_4) \\ A_i(\angle\phi_c, f) &= \alpha_i \theta_i^2(\angle\phi_c, f) + \\ \beta_i \theta_i(\angle\phi_c, f) + \gamma_i \theta_i(\angle\phi_c, f) &= F_1(\angle\phi_c) f + F_2(\angle\phi_c) \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $\angle\phi_c$ 表示 IRS 元件在中心频率 f_c 处的相移; A_i 和 θ_i 分别表示第 i 个 IRS 元件的幅度和相移, 分别是 $\angle\phi_c$ 和 f 的函数; $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, i \in 1, 2, 3, 4, 5$ 是在文献[16]中根据特定电路实现得出的精确参数。

2 反射系数优化

2.1 信号传输

根据式 (2), 基带等效 OFDM-IM 符号可以表示为:

$$s_m = \sum_{q=1}^Q X_q e^{j \frac{2\pi q m}{Q}}, 1 \leq m \leq Q \quad (7)$$

发射信号通过传统 OFDM 系统传输, 在接收器处经过去除循环前缀 (cyclic prefix, CP) 和快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 处理, 收到的第 q 个子载波频域信号可以表示为:

$$y_q = \sqrt{P_q} (\mathbf{h}_{r,q}^H \phi_q \mathbf{g}_q + \mathbf{h}_{d,q}) X_q + V_q, \forall q \quad (8)$$

其中, $\sqrt{P_q}$ 代表第 q 个子载波的信号传输功率, $\mathbf{h}_{r,q} \in \mathbb{C}^I$ 、 $\mathbf{g}_q \in \mathbb{C}^I$ 分别是信道矩阵 $\mathbf{H}_r$ 、 $\mathbf{G}$ 的第 q 列, $\mathbf{h}_{d,q}$ 是直接链路 $\mathbf{H}_d$ 的第 q 个元素。 $V_q \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 是服从均值为 0、方差为 σ^2 的加性白高斯噪声 (additive white Gaussian noise, AWGN)。

$\phi_q = \text{diag}([\phi_{q,1}, \dots, \phi_{q,I}]) \in \mathbb{C}^{I \times I}$, $|\phi_{q,i}|$ 和 $\angle\phi_{q,i}$ 分别表示第 i 个 IRS 元件对第 q 个子载波的幅度和相移调整, 根据式 (6) 表示的实用模型, $|\phi_{q,i}|$ 和 $\angle\phi_{q,i}$

可以被表示为:

$$\begin{aligned} |\phi_{q,i}| &= A_i(\angle\phi_{c,i}, f_q) \\ \angle\phi_{q,i} &= \theta_i(\angle\phi_{c,i}, f_q), \forall i, \forall q \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $\angle\phi_{c,i}$ 表示第 i 个 IRS 元件对中心频率 f_c 子载波的相移值, 在实际应用中, 每个 IRS 元件在中心频率处的相移由 B 位控制, 那么 $\angle\phi_{c,i}$ 具有 2^B 个离散的相移值, 即:

$$\angle\phi_{c,i} \in \mathbf{S} \triangleq \left\{ \frac{2\pi}{2^B} b - \pi \mid b=0, \dots, 2^B - 1 \right\}, \forall i \quad (10)$$

其中, f_q 表示第 q 个子载波的中心频率, 可以描述为 $f_q \triangleq f_c + \left(q - \frac{Q+1}{2} \right) \frac{\text{Bw}}{Q}$ 。通过式 (8) 定义的 OFDM-IM 系统的接收信号模型, 进一步考虑反射系数优化问题。

2.2 反射系数设计

现有大多数针对 OFDM 系统的设计研究主要考虑系统的可实现速率性能最大化^[17], 考虑系统每个子块的可实现速率不同, 本文基于最大化平均可实现速率准则解决 OFDM-IM 系统的反射系数优化问题。

要求解平均可实现速率, 首先需要知道第 r 个子块的接收信号, 其表达式为:

$$\mathbf{y}_r = (\mathbf{H}_{r,r}^H \boldsymbol{\phi} \mathbf{G}_r + \mathbf{H}_{d,r}) \mathbf{X}_r + \mathbf{V}_r = \tilde{\mathbf{H}}_r \mathbf{X}_r + \mathbf{V}_r \quad (11)$$

其中, $\mathbf{G}_r$ 、 $\mathbf{H}_{r,r}$ 、 $\mathbf{H}_{d,r}$ 分别是第 r 个子块从 AP 到 IRS、IRS 到 UE 和 AP 到 UE 的信道, 即信道矩阵 $\mathbf{G}$ 、 $\mathbf{H}_r$ 、 $\mathbf{H}_d$ 的第 r 列。 $\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{H}_r^H \boldsymbol{\phi} \mathbf{G} + \mathbf{H}_d$ 是 AP 到 UE 的级联信道和直接信道的叠加信道频率响应 (channel frequency response, CFR), $\tilde{\mathbf{H}}_r$ 是第 r 个子块的 CFR, $\mathbf{X}_r$ 、 $\mathbf{y}_r$ 分别是第 r 个子块的发送符号和接收向量。那么整体的平均可实现速率为:

$$R_v = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \text{lb} \left(1 + \frac{P_r |\mathbf{H}_{r,r}^H \boldsymbol{\phi} \mathbf{G}_r + \mathbf{H}_{d,r}|^2}{\sigma^2} \right) \quad (12)$$

此时, 优化反射系数转化为求最大化问题:

$$\begin{aligned} & \max_{P, \phi_c} R_v \\ & \text{s.t.} \sum_{r=1}^R P_r \leq P \\ & \phi_{q,i} = A_i(\angle\phi_{c,i}, f_q) e^{j\theta_i(\angle\phi_{c,i}, f_q)}, \forall q, i \\ & \angle\phi_{c,i} \in \mathbf{S}, \forall i \end{aligned} \quad (13)$$

其中, P 表示 AP 处的最大发射功率。为了有效地解决这个非凸问题, 使用块坐标下降法^[18]将该问题分解为两个子问题, 分别求解 ϕ_c 和 P , 然后使用交替优化算法迭代地找到非凸问题的最优解。

在给定 ϕ_c 的情况下, 通过注水算法获得条件最优的功率分配 P_r 。在给定 P_r 的情况下, 式 (13) 可以被重新表述为:

$$\begin{aligned} & \max_{\phi_c} R_v \\ & \text{s.t.} \phi_{q,i} = A_i(\angle\phi_{c,i}, f_q) e^{j\theta_i(\angle\phi_{c,i}, f_q)}, \forall q, i \\ & \angle\phi_{c,i} \in \mathbf{S}, \forall i \end{aligned} \quad (14)$$

接下来, 需要连续找到在中心频率处的最佳相移。为了找到最佳的 $\angle\phi_{c,i}$, 通过穷举搜索算法遍历集合 $\mathbf{S}$ 中的所有可能值, 并根据所提出的模型为其他子载波计算相应的反射系数, 然后根据信道响应求得可以提供最大平均可实现速率的一组 $\angle\phi_c$ 。为简化问题, 这里假定 IRS 所有元件针对某一频率的入射信号施加相同的影响。

2.3 算法步骤

本节总结了所提出的算法: 反射波束形成算法、注水算法、交替优化算法。

算法 1 反射波束形成算法

输入 $\mathbf{H}_{r,r}, \mathbf{G}_r, \mathbf{H}_{d,r}, \mathbf{S}, \sigma^2$

输出 ϕ_c^*

初始化 $\angle\phi_{c,i}, i=1, \dots, I, P_r = (1/R)P$

循环每一个离散相移值

给 $\angle\phi_{c,i} \in \mathbf{S}$ 分配一个值

循环每一个子载波

得到 $|\phi_{q,i}|$

结束循环

计算 R_v

结束循环

找到令 R_v 最大的 $\angle\phi_{c,i}$, 得到 ϕ_c^*

算法 2 注水算法

输入 $\mathbf{H}_{r,r}, \mathbf{G}_r, \mathbf{H}_{d,r}, \mathbf{S}, \sigma^2, \phi_c^*$

输出 P_r^*

迭代循环

对所有子载波的信道矩阵进行奇异值分解

累加 $\text{lb}(1 + P_q \lambda_q)$, λ_q 是信道衰减系数的简化

使用拉格朗日乘数法, 引入拉格朗日因子 μ



计算得 $P_q = \mu - 1/\lambda_q$

若 $P_q < 0$ ，则该子载波不参与功率分配

若 P_q 均大于 0，则执行下一步

结束循环

算法 3 交替优化算法

输入 $\mathbf{H}_{r,r}, \mathbf{G}_r, \mathbf{H}_{d,r}, \mathbf{S}, \sigma^2, \phi_c^*, P_r^*$

输出 R_v

循环交替优化 ϕ_c^* 和 P_r^* ， t 为迭代次数

根据 $\max R_v$ 求解 ϕ_c^*

固定 ϕ_c^* 求 P_r^*

若 $\max R_v(t+1) < \max R_v(t)$ ，则 $P_r^*(t+1) = P_r^*(t)$

若 R_v 收敛或达到最大迭代次数，则执行下一步

结束循环

2.4 算法可行性分析与复杂度

由于系统中的子载波个数和噪声功率是特定值，发射功率和信号为有限输入，随机产生的信道系数是服从特定分布的，因此式 (12) 存在上限。另外，在算法 3 中步骤 4 对目标函数优化进一步约束，保证了目标函数是不减的。因此，目标函数具有收敛性，即算法 3 具有可行性。

交替优化算法作为主体算法，其计算复杂度主要来源于反射波束形成算法和注水算法两部分，反射波束形成算法的计算复杂度为 $\mathcal{O}(I + IQ)$ ，由于假定所有 IRS 对同一频率的入射信号做相同的调整，因此计算复杂度为 $\mathcal{O}(I + Q)$ 。注水算法的计算复杂度为 $\mathcal{O}[Q(Q-1)]$ ，主要体现在循环子载波和舍弃分配功率为负值的信道两方面。所以算法的整体复杂度为 $\mathcal{O}[T(I + Q^2)]$ ，其中 T 为交替迭代次数。

3 实验分析

3.1 数据描述

本节提供数值示例来验证所提算法的有效性。本文考虑由单天线 AP、单天线 UE 和具有

$I=64$ 个反射元件的 IRS 组成的 OFDM-IM 系统。系统包含 $Q=64$ 个子载波，子载波被分为 $R=16$ 个子块，每个子块有 $K=1$ 个子载波被激活，采用 4QAM，中心频率为 2.4 GHz，带宽为 100 MHz。将 IRS、UE 和 AP 的分布建立在三维坐标系中，其中 AP 处的均匀线性阵列 (uniform linear array, ULA) 和 IRS 处的均匀平面阵列 (uniform planar array, UPA) 分别位于 x 轴和 yo z 平面中，IRS 与 AP 水平相距 50 m，垂直相距 2 m，用户可以随机位于 IRS 反射区域内，它们之间的距离为 2 m，天线间距为半波长，单用户仿真设置如图 4 所示。IRS 具有由 3 位控制的 8 个可能的离散相移值。所有通道都涉及瑞利衰落，并且在 1 m 处参考距离的信号衰减设置为 30 dB。对于 AP-IRS、IRS-UE 和 AP-UE 之间的信道，路径损耗指数分别设置为 2.5、2.8 和 3.5，路径损耗模型参考文献[18]。

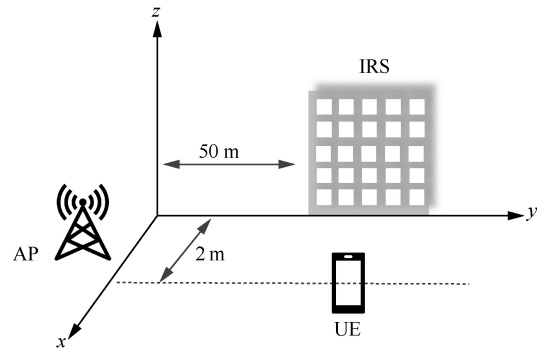


图 4 单用户仿真设置

3.2 仿真说明

OFDM、OFDM-IM 系统性能随比特信噪比 (E_b/N_0) 的变化分别如图 5 和图 6 所示，分别展示了 OFDM 系统和 OFDM-IM 系统分别在没有 IRS 辅助、有 IRS 辅助但无频率选择性和有 IRS 辅助且有频率选择性情况下，SER 和 BER 随 E_b/N_0 的变化。可以看出，在任一系统中，IRS 的辅助可以有效提高系统的信息传输质量。尤其在宽带系统中，若 IRS 具备频率选择性，对不同载波施加不同的影响，可以对系统的性能有进一步的提升。

从图6可以看出,在IRS的辅助下,当 E_b/N_0 为20 dB时, SER 或 BER 可下降 49%~68%; 当 E_b/N_0 为25 dB或30 dB时, SER 或 BER 可下降约90%; 当 E_b/N_0 为30 dB和35 dB时,有/无频率选择性的 IRS 辅助的系统 SER 或 BER 分别达到 10^{-6} 。同时,对比图5、图6可以发现, OFDM-IM 系统在不同情况下的 SER 和 BER 均优于 OFDM 系统,这说明 IM 技术通过增大子载波间的欧几里得距离实现了对 OFDM 系统可靠性的优化。

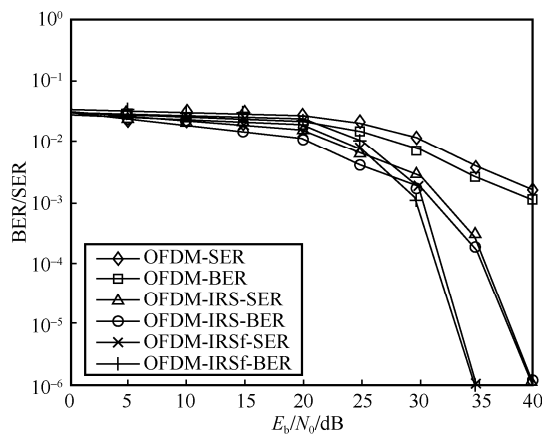


图5 OFDM 系统性能随 E_b/N_0 的变化

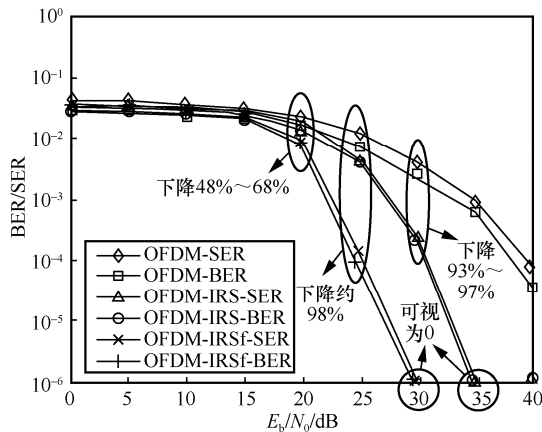


图6 OFDM-IM 系统性能随 E_b/N_0 的变化

OFDM-IM-IRS 系统性能在不同的有源子载波个数下随 E_b/N_0 的变化如图7所示。可以看出,随着有源子载波数的增加,系统的可靠性降低。这是因为当频率空间固定时,子载波数越多,产生越多的相位-幅度-频率失真,这给反射波束形成优化带来了困难。另外, OFDM-IM-IRS 系统对

频偏和噪声敏感,若子载波个数增加,峰值平均功率比也会增加,此时正交子载波信号叠加产生最大峰值功率的可能性变大,为保证具有高峰均功率比的信号在传输中不失真,发送端对高功率放大器的线性度要求更加严格,这也会导致 OFDM-IM-IRS 系统的性能下降^[19]。因此,子载波个数要根据信道情况合理选择。

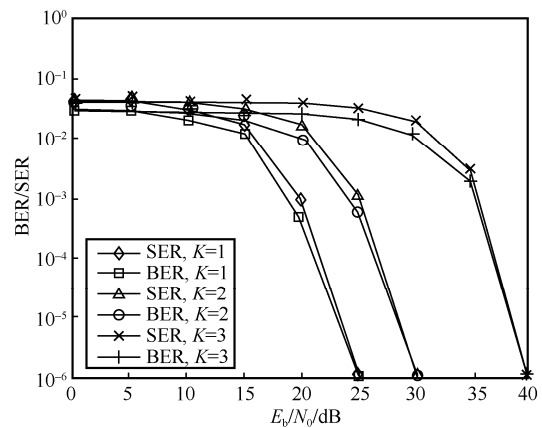


图7 OFDM-IM-IRS 系统性能在不同的有源子载波个数下随 E_b/N_0 的变化

OFDM-IM-IRS 系统性能在不同的离散相移值个数下随 E_b/N_0 的变化如图8所示。可以看出,相移个数越大,系统的误码率性能越好。这是因为系统的位分辨率提高,对入射信号的调整更加准确,若离散相移的个数趋于无穷大,则等价于理想的连续相移模型,随之 IRS 控制器的复杂度也会增大。

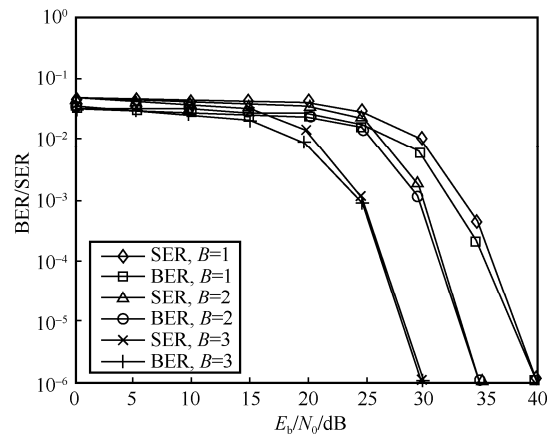


图8 OFDM-IM-IRS 系统性能在不同的离散相移值个数下随 E_b/N_0 的变化



4 结束语

本文首先验证了 IRS 元件对入射信号幅度和相移的控制与信号频率的关系, 建立 IRS 实用模型。其次, 将空间域索引调制技术扩展到频域, 应用于子载波索引, 建立 OFDM-IM 系统。最后, 让 IRS 实际模型辅助 OFDM-IM 宽带系统通信。重点使用块坐标下降算法、穷举搜索算法、注水算法、交替优化算法求解 AP 端发射功率和 IRS 处反射系数, 最大化系统的可实现速率。理论推导和仿真结果表明, 有频选 IRS 模型、IM 技术与 OFDM 系统可以有效地结合, 且能够降低的系统 SER 或 BER 达 60% 以上。此外可以根据系统自身, 结合信道状态信息, 确定合适的离散相移个数、有源子载波个数等参数进一步优化系统性能。

下个阶段工作将考虑在 CSI 不确定情况下, 用 IRS 辅助估计无线信道^[20], 以验证 IRS 能否改善通信系统整体的误码率或误符号率性能。

参考文献:

- [1] LI Q, WEN M W, CLERCKX B, et al. Subcarrier index modulation for future wireless networks: principles, applications, and challenges[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(3): 118-125.
- [2] LUO J S, WANG S L, WANG F G. Joint transmitter-receiver spatial modulation design via minimum Euclidean distance maximization[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(9): 1986-2000.
- [3] CAO R, LEI X, XIAO Y, et al. Space-frequency index modulation for combating ICI in intelligent mobility communications[J]. IEEE Access, 2020(8): 21272-21281.
- [4] ZHANG S Y, SHAHRAVA B. Polar-coded OFDM with index modulation[J]. IEEE Access, 2020(9): 237-247.
- [5] 姚建文, 王楠. 智能反射面: 大有前景的 6G 技术[J]. 电信快报, 2020(7): 8-13.
- YAO J W, WANG N. Intelligent reflector—a promising 6G technology[J]. Telecommunications Information, 2020(7): 8-13.
- [6] 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, 24(4): 753-757.
- [7] WANG P L, FANG J, DUAN H P, et al. Compressed channel estimation for intelligent reflecting surface-assisted millimeter wave systems[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2020(27): 905-909.
- [8] ZHAN L, ZHAO H, ZHANG W H, et al. Performance analysis and node selection of intelligent reflecting surface-aided visible light communication for parallel vehicles[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2022: 1-11.
- [9] 朱政宇, 侯庚旺, 黄崇文, 等. 基于并行 CNN 的 RIS 辅助 D2D 保密通信系统资源分配算法[J]. 通信学报, 2022, 43(3): 172-179.
- ZHU Z Y, HOU G W, HUANG C W, et al. Systems resource allocation algorithm for RIS-assisted D2D secure communication based on parallel CNN[J]. Journal on Communications, 2022, 43(3): 172-179.
- [10] KUMAR V, FLANAGAN M F, KWAN N D W, et al. On the secrecy rate under statistical QoS provisioning for RIS-assisted MISO wiretap channel[C]//Proceedings of 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-6.
- [11] ABEYWICKRAMA S, ZHANG R, YUEN C. Intelligent reflecting surface: practical phase shift model and beamforming optimization[C]//Proceedings of ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [12] CAI W H, LI H Y, LI M, et al. Practical modeling and beamforming for intelligent reflecting surface aided wideband systems[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(7): 1568-1571.
- [13] HIDIR E K, BASAR E, CIRPAN H A. On practical RIS-aided OFDM with index modulation[J]. IEEE Access, 2023(11): 13113-13120.
- [14] WU Q Q, ZHANG S W, ZHENG B X, et al. Intelligent reflecting surface-aided wireless communications: a tutorial[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(5): 3313-3351.
- [15] JUNG M, SAAD W, DEBBAH M, et al. On the optimality of reconfigurable intelligent surfaces (RISs): passive beamforming, modulation, and resource allocation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(7): 4347-4363.
- [16] LI H Y, CAI W H, LIU Y, et al. Intelligent reflecting surface enhanced wideband MIMO-OFDM communications: from practical model to reflection optimization[J]. IEEE Transactions

on Communications, 2021, 69(7): 4807-4820.

- [17] 徐勇军, 高正念, 王茜竹, 等. 基于智能反射面辅助的无线供电通信网络鲁棒能效最大化算法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(7): 2317-2324.

XU Y J, GAO Z N, WANG Q Z, et al. Robust energy efficiency maximization algorithm for intelligent reflecting surface-aided wireless powered-communication networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(7): 2317-2324.

- [18] ÖZDOĞAN Ö, BJÖRNSSON E, LARSSON E G. Intelligent reflecting surfaces: physics, propagation, and pathloss modeling[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(5): 581-585.

- [19] BUDIMAN A, SUGIHARTONO, ARSENO D. PAPR reduction by data subcarriers and null subcarriers switching[C]//Proceedings of 2015 1st International Conference on Wireless and Telematics (ICWT). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.

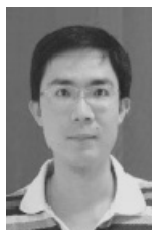
- [20] 朱政宇, 王梓恒, 徐金雷, 等. 智能反射面辅助的未来无线通信: 现状与展望[J]. 航空学报, 2022, 43(2): 198-212.

ZHU Z Y, WANG Z X, XU J L, et al. Future wireless communication assisted by intelligent reflecting surface: state of art and prospects[J]. Acta Aeronauticae Astronautica Sinica, 2022, 43(2): 198-212.

[作者简介]



赵萌萌(1999—), 女, 长安大学信息工程学院硕士生, 主要研究方向为智能反射面辅助无线通信。



何立明(1978—), 男, 博士, 长安大学信息工程学院副教授, 主要研究方向为智能交通系统信息采集及融合。



刘芳芳(1997—), 女, 长安大学信息工程学院硕士生, 主要研究方向为深度学习轨迹预测。