

# 面向室内 IoT 场景的 MIMO 逆反射光 ISAC 系统性能研究

王伟任<sup>1</sup>, 夏聖喆<sup>2</sup>, 王浩川<sup>1</sup>, 曾志宏<sup>1</sup>, 刘敏<sup>1</sup>, 陈晨<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 微电子与通信工程学院, 重庆 400030; 2. 西南民族大学 电子信息学院, 成都 610225)

**摘要:** 【目的】针对室内物联网 (Internet of Things, IoT) 场景中的信号传输和目标定位等实际需求, 提出一种基于多输入多输出 (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) 架构的逆反射光通感一体化 (Retroreflective Optical Integrated Sensing and Communication, RO-ISAC) 系统。【方法】为了提升 MIMO-RO-ISAC 系统的整体通信和感知性能, 首先设计了一种基于正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 和 Delta-Sigma 调制 (Delta-Sigma Modulation, DSM) 的联合波形, 即 OFDM-DSM 波形。针对 MIMO-RO-ISAC 系统中由目标位置改变引起的信道状态变化对系统通信和感知性能的影响问题, 进一步提出了两种空间预均衡 (Spatial Pre-Equalization, SPE) 方法, 包括基于通信信道增益的 SPE 与基于感知信道增益的 SPE。【结果】仿真结果表明, OFDM-DSM 波形具有比传统 OFDM 波形更为优越的互相关性能, 从而增强 MIMO-RO-ISAC 系统的感知性能。同时, OFDM-DSM 调制的引入也能够有效降低 MIMO-RO-ISAC 系统的通信误码率。另外, 基于通信信道增益的 SPE 能够同时改善 MIMO-RO-ISAC 系统的通信和感知性能, 而基于感知信道增益的 SPE 仅能提升系统的感知性能。【结论】所提 OFDM-DSM 波形和基于通信信道增益的 SPE 都能够同时显著提升室内 IoT 场景中 MIMO-RO-ISAC 系统的通信和感知性能。

**关键词:** 逆反射光通感一体化; 多输入多输出; 波形设计; 空间预均衡

**中图分类号:** TN929 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8788 (2024) 06—

## Performance Investigation of MIMO Retroreflective Optical ISAC System for Indoor IoT Scenarios

WANG Weiren<sup>1</sup>, XIA Shengzhe<sup>2</sup>, WANG Haochuan<sup>1</sup>, ZENG Zhihong<sup>1</sup>, LIU Min<sup>1</sup>, CHEN Chen<sup>1</sup>

(1. School of Microelectronics and Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. College of Electronics and Information, Southwest Minzu University, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** 【Objective】To meet the practical demand for signal transmission and target sensing in indoor Internet of Things (IoT) scenarios, a Retroreflective Optical Integrated Sensing and Communication (RO-ISAC) system based on a Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) structure is proposed. 【Methods】To enhance the overall communication and sensing performance of the MIMO-RO-ISAC system, a unified waveform based on Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) and Delta-Sigma Modulation (DSM), i.e., OFDM-DSM waveform, is first designed. Regarding the impact of channel state variations caused by target position changes on the communication and sensing performance of the MIMO-RO-ISAC system, two Spatial Pre-Equalization (SPE) techniques including communication channel gain based SPE and sensing channel gain based SPE are further proposed. 【Results】Simulation results show that OFDM-DSM waveform exhibits

收稿日期: 2023-08-08; 修回日期: 2023-08-20; 纸质出版日期: 2023-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62271091, 62501088); 重庆市自然科学基金资助项目 (cstc2021jcyj-msxmX0480); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2024CDJXY020)

作者简介: 王伟任 (1980-), 男, 重庆璧山人。博士, 主要研究方向为无线光通感一体化。

通信作者: 曾志宏, 助理研究员。E-mail: zhihong.zeng@cqu.edu.cn

通信作者: 陈晨, 教授。E-mail: c.chen@cqu.edu.cn

©Editorial Office of *Study on Optical Communications*. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

superior cross-correlation performance compared with conventional OFDM waveform, thereby enhancing the sensing performance of the MIMO-RO-ISAC system. Meanwhile, the introduction of OFDM-DSM modulation can also effectively reduce the communication bit error rate of the MIMO-RO-ISAC system. In addition, the communication channel gain based SPE can improve both the communication and sensing performance of the MIMO-RO-ISAC system, whereas the sensing channel gain based SPE can only enhance the system's sensing performance. 【Conclusion】 The proposed OFDM-DSM waveform and communication channel gain based SPE technique can both significantly enhance the communication and sensing performance of the MIMO-RO-ISAC system simultaneously in indoor IoT scenarios.

**Key words:** RO-ISAC; MIMO; waveform design; SPE

## 0 引言

作为第 6 代移动通信网络（6th Generation Mobile Networks, 6G）的核心技术，通信与感知一体化（Integrated Sensing and Communication, ISAC）成为近年来的研究热点<sup>[1-2]</sup>。与射频 ISAC 系统相比，无线光 ISAC 系统能够充分利用光波频带资源丰富的优势，同时实现高速通信和高精度感知<sup>[3]</sup>。为了提高光信号的反射效率，研究人员提出了一种逆反射光通感一体化（Retroreflective Optical Integrated Sensing and Communication, RO-ISAC）系统<sup>[4]</sup>。迄今为止，国内外研究人员已经在 RO-ISAC 系统的信道建模<sup>[5]</sup>、波形设计<sup>[6-10]</sup>、双向传输<sup>[11-12]</sup>等关键技术方面开展了相关理论和实验研究。鉴于 RO-ISAC 系统在通信和感知方面的优越性能，RO-ISAC 技术可广泛应用于室内<sup>[13]</sup>、水下<sup>[14]</sup>、和无人机<sup>[15]</sup>等不同场景。

在室内物联网（Internet of Things, IoT）场景中，ISAC 能为 IoT 终端提供高速信号传输和精准目标定位服务，从而推动 IoT 系统从“万物互联”向“万物智联”演进，因此面向室内 IoT 场景的 RO-ISAC 技术在近年来受到了广泛关注<sup>[16-18]</sup>。为了进一步提升室内 RO-ISAC 系统的通感性能，本文提出一种多输入多输出逆反射光通感一体化（Multiple-Input Multiple-Output Retroreflective Optical Integrated Sensing and Communication, MIMO-RO-ISAC）系统架构。针对该系统架构，首先设计了一种基于正交频分复用（Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM）和 Delta-Sigma 调制（Delta-Sigma Modulation, DSM）的 OFDM-DSM 波形，并揭示了该波形能够同时提升系统的通信和感知性能。其次，分别提出了基于通信信道增益和基于感知信道增益的两种空间预均衡（Spatial Pre-Equalization, SPE）方法，并验证了基于通信信道增益的 SPE 方法也能够同时提升系统的通信和感知性能。

## 1 系统原理

图 1 所示为本文提出的室内 MIMO-RO-ISAC 系统基本架构，该系统架构包括多个位于天花板不同位置的光信号收发机以及位于接收平面的目标。其中，每个光信号收发机配备一个由发光二极管（Light-Emitting Diode, LED）或激光二极管（Laser Diode, LD）组成的光源和一个光电探测器（Photo Detector, PD），而目标接收机则配备了一个 PD 阵列和一个角立方反射器（Corner Cube Reflector, CCR）。由图 1 可见，各个收发机利用所配备的 LED/LD 光源向目标发射光信号，目标一方面利用所配备的 PD 阵列完成 MIMO 信号探测，而另一方面则通过 CCR 将来自不同收发机的光信号发射回对应的收发机。该室内 MIMO-RO-ISAC 系统不仅能够实现收发机阵列与目标 PD 阵列之间的 MIMO 通信，还能够通过 CCR 逆反射完成不同位置收发机与目标之间的测距功能，从而最终实现对目标的三维定位。本文所提室内 MIMO-RO-ISAC 系统是一个典型的室内被动定位与通信系统，旨在基于固定基础设施对移动目标进行感知。目标定位由位于天花板上的固定收发机根据目标 CCR 逆反射光信号来实现，无需目标本身进行定位计算，也不占用任何通信资源。室内 MIMO-RO-ISAC 系统具体服务的 IoT 设备包括工业物联网中的 AGV 小车、智能家居中的服务机器人、AR/VR 交互中的用户终端等，该类 IoT 设备在成本、功耗和尺寸方面能够有效支持配备 PD 阵列和 CCR。

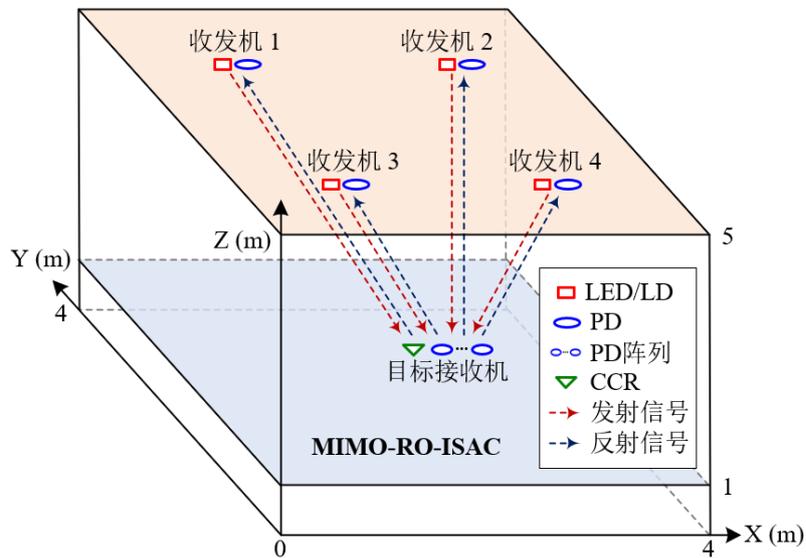


图 1 室内 MIMO-RO-ISAC 系统示意图

Figure 1 Illustration diagram of the indoor MIMO-RO-ISAC system

为了显著提升所提室内 MIMO-RO-ISAC 系统的整体通感性能，本文在该系统中引入了 OFDM-DSM 通感融合波形以及利用空间信道信息的 SPE 技术。基于 OFDM-DSM 调制和 SPE 的室内 MIMO-RO-ISAC 系统原理如图 2 所示，该系统由  $K$  个光信号收发机和一个目标接收机组成。在收发机侧， $K$  个收发机分别传输  $K$  路独立的二进制比特数据流，其中第  $k$

路二进制比特数据流可以表示为  $b_k$  ( $k=1, 2, \dots, K$ )。光信号收发机首先对各路二进制比特数据流进行 OFDM-DSM 调制, 该调制过程包括 OFDM 调制和 DSM 调制两个部分, 其中 OFDM 调制通过采用厄米共轭对称将输入二进制比特数据流调制为一个实值的 OFDM 数字信号<sup>[13]</sup>, 而 DSM 调制则是将 OFDM 数字信号转换为二进制比特序列, 从而提升 OFDM 信号的通信和感知性能<sup>[18]</sup>。随后, 对所产生的  $K$  路并行 OFDM-DSM 信号进行 SPE 处理, 再由数模转换 (Digital-to-Analog Conversion, D/A) 所得到的数字信号转换为模拟信号。为了得到支持强度调制/直接检测 (Intensity Modulation/Direct Detection, IM/DD) 实值非负信号, 需要进一步给模拟信号添加一个直流 (Direct Current, DC) 偏置。最后, 各个收发机中的 LED/LD 光源在实值非负信号的驱动下向目标接收机发射光信号。

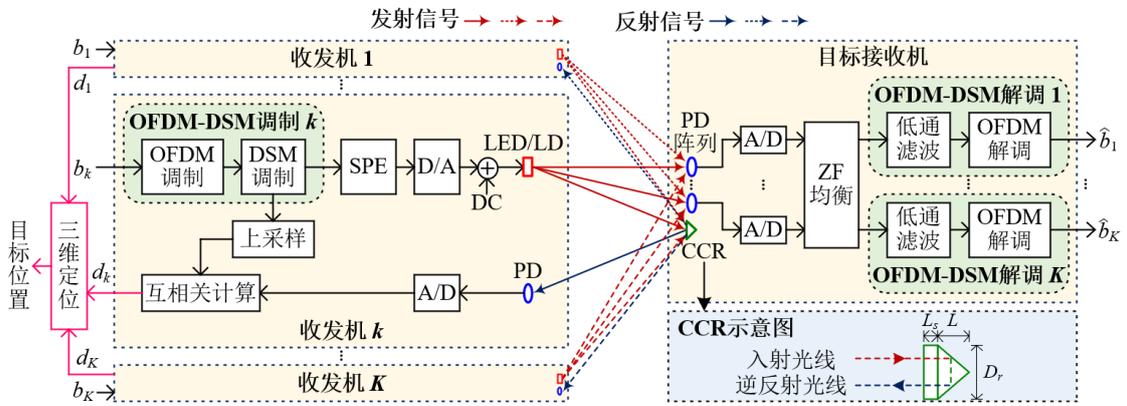


图 2 基于 OFDM-DSM 调制和 SPE 的室内 MIMO-RO-ISAC 系统原理图

Figure 2 Schematic diagram of the indoor MIMO-RO-ISAC system based on OFDM-DSM modulation and SPE

在目标接收机侧, 来自收发机阵列的  $K$  路光信号由包含  $K$  个 PD 单元的 PD 阵列进行信号探测, 所得到的  $K$  路模拟电信号再由模数转换 (Analog-to-Digital Conversion, A/D) 产生  $K$  路数字信号。在经过迫零 (Zero Forcing, ZF) 均衡和并行 OFDM-DSM 解调后, 即可恢复出所传输的  $K$  路二进制比特数据流  $\hat{b}_k$  ( $k=1, 2, \dots, K$ )。由图 2 可见, OFDM-DSM 解调包括低通滤波和 OFDM 解调两个步骤<sup>[21]</sup>。同时, 目标接收机所配备的 CCR 将  $K$  路入射光信号逆反射回各个收发机, 由对应收发机中的 PD 完成逆反射光信号的探测。在收发机侧, PD 所探测到的模拟电信号通过 A/D 转换为数字信号, 用于后续的测距计算。通过对所发射的数字 OFDM-DSM 信号进行上采样处理, 使得上采样后的 OFDM-DSM 信号与 A/D 得到的逆反射数字信号具有相同的采样频率。基于上采样后的 OFDM-DSM 信号和 A/D 得到的逆反射数字信号, 通过互相关计算可以估计出各个收发机与目标之间的距离  $d_k$  ( $k=1, 2, \dots, K$ ), 再根据  $K$  个距离估计即可实现三维定位, 从而得到目标的具体位置<sup>[9]</sup>。

本文提出的 OFDM-DSM 通感融合波形是在实值 OFDM 波形的基础之上通过进一步实施 DSM 调制所产生，DSM 调制能够将 OFDM 数字信号转换为二进制比特序列，从而提升通感融合波形的整体通信和感知性能。本文所采用的一阶 DSM 调制原理如图 3 所示，首先对数字 OFDM 信号进行上采样处理，接着对过采样信号的变化（即其增量）进行编码，再通过将所得信号相加（即求和），可以提高“增量”调制的精度，并最后应用 1 比特量化来输出二进制比特序列，即数字 OFDM-DSM 信号<sup>[19]</sup>。

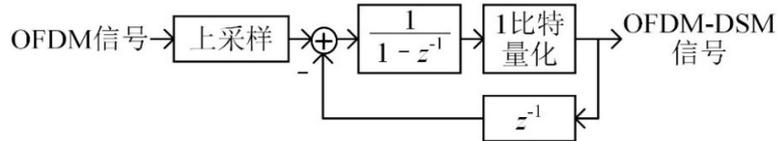


图 3 一阶 DSM 调制原理图

Figure 3 Schematic diagram of the first-order OFDM-DSM modulation

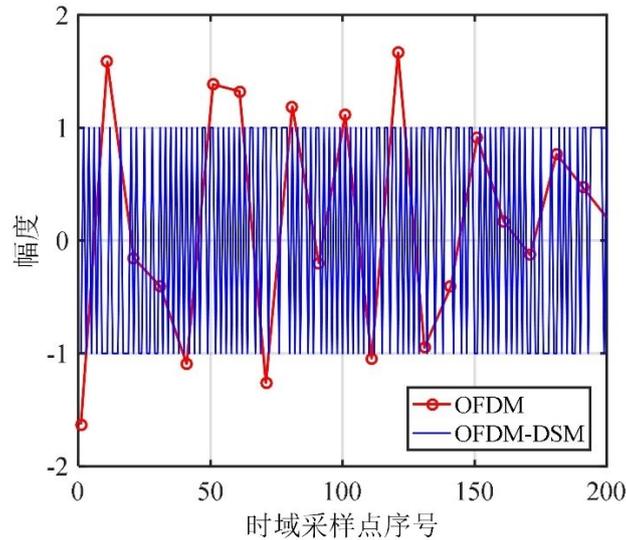


图 4 OFDM 与 OFDM-DSM 时域波形对比图

Figure 4 Time-domain waveform comparison between OFDM and OFDM-DSM

图 4 对比了 OFDM 波形和基于一阶 DSM 调制的 OFDM-DSM 波形。可见，OFDM 波形的幅值存在较大的波动，一些采样点的幅值可以接近 0 值，而 OFDM-DSM 波形则是标准的双极性二进制序列，呈现出明显的脉冲特性。从通信的角度来看，二进制序列的解调需要较低的信噪比，而 OFDM 信号的解调通常需要较高信噪比，因此 OFDM-DSM 波形能够取得比 OFDM 波形更为出色的通信性能；从感知的角度来看，二进制序列比 OFDM 信号具有更为优秀的互相关性能，因此能够取得更为优越的感知性能。然而，由图 3 可知，OFDM-DSM 波形的产生需要对 OFDM 信号进行上采样处理，因此基于 OFDM-DSM 波形的室内 MIMO-RO-ISAC 系统需要在收发机侧采样具有更高采样率的 D/A 和 A/D 模块，这是 OFDM-DSM 波形取得通信和感知性能优势的前提条件。由图 2 可见，DSM 解调可以利用低通滤波

来实现，滤波后的信号可以直接用于 OFDM 解调。

为了克服由目标位置改变引起的信道状态变化对系统通信和感知性能造成的影响，本文进一步在室内 MIMO-RO-ISAC 系统中引入 SPE 技术，该技术通过在发射端对空间信道差异进行预补偿来提升系统整体通信和感知性能。假设收发机中待传输的 OFDM-DSM 信号向量为  $\mathbf{x}=[x_1, x_2, \dots, x_K]^T$ ，目标接收机所接收到的 OFDM-DSM 信号向量为  $\mathbf{y}_c=[y_{c,1}, y_{c,2}, \dots, y_{c,K}]^T$ ，收发机所接收到的逆反射 OFDM-DSM 信号向量为  $\mathbf{y}_s=[y_{s,1}, y_{s,2}, \dots, y_{s,K}]^T$ ，则接收向量  $\mathbf{y}_c$  和  $\mathbf{y}_s$  可以分别表示如下：

$$\mathbf{y}_c = \mathbf{H}_c \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{n}_c \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_s = \mathbf{H}_s \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{n}_s \quad (2)$$

其中  $\mathbf{H}_c$  为  $K \times K$  通信信道矩阵， $\mathbf{H}_s$  为  $K \times K$  感知信道矩阵， $\mathbf{A}$  为 SPE 矩阵， $\mathbf{n}_c$  为通信信道加性噪声向量， $\mathbf{n}_s$  为感知信道加性噪声向量。假设通信信道和感知信道中的加性噪声都是高斯白噪声，噪声功率为  $P_n = N_0 B$ ，其中  $N_0$  为噪声功率谱密度， $B$  为系统调制带宽。

在目标接收机中，ZF 均衡后的 OFDM-DSM 信号向量可表示为：

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{H}_c^{-1} \mathbf{y}_c = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{H}_c^{-1} \mathbf{n}_c \quad (3)$$

其中  $\mathbf{H}_c^{-1}$  表示  $\mathbf{H}_c$  的伪逆。经过 ZF 均衡后的 OFDM-DSM 信号向量  $\hat{\mathbf{x}}$  可用来进行并行 OFDM-DSM 解调恢复二进制比特数据流。

假设系统中光源发光服从朗伯分布<sup>[5]</sup>，则第  $k$  个 RO-ISAC 收发机光源与目标接收机 PD 阵列中第  $r$  个 PD 之间的通信信道增益可计算如下：

$$h_{c,kr} = \frac{(m+1)A\rho}{2\pi d^2} \cos^m \varphi \kappa(\theta) \cos \theta \quad (4)$$

其中  $m = -\ln 2 / \ln(\cos(\Psi))$  为 LED/LD 光源的朗伯系数， $\Psi$  为光源的半功率半角， $A$  和  $\rho$  分别为 PD 的有效面积和响应系数， $d$  为收发机与目标接收机之间的距离， $\varphi$  为辐射角， $\theta$  为入射角， $\kappa(\theta)$  为目标接收机侧接收光学系统增益。

假设基于 CCR 逆反射的感知信号服从点光源信道模型<sup>[5]</sup>，则第  $k$  个收发机所对应的感知信道的信道增益可计算如下：

$$h_{s,k} = \frac{(m+1)A\rho\alpha}{8\pi d^2} \cos^{m+1} \varphi \kappa(\varphi) \cos \theta \quad (5)$$

其中  $\alpha$  为 CCR 的反射率， $\kappa(\varphi)$  为收发机侧接收光学系统增益。

在室内 MIMO-RO-ISAC 系统中，第  $k$  个收发机利用所接收到的逆反射 OFDM-DSM 信号  $y_{s,k}(n)$  和上采样后的发射信号  $x_k(n)$  进行互相关计算，从而估计出光波的飞行时间<sup>[5]</sup>：

$$\hat{\tau} = \arg \max_{\tau} \sum_{n=0}^{W-1} y_{s,k}(n)x_k(n-\tau) \quad (6)$$

其中  $W$  为互相关计算的时间窗口长度。根据所得到的光波往返飞行时间  $\hat{\tau}$ ，可以进一步推算出第  $k$  个收发机与目标之间的距离为  $\hat{d}_k = c\hat{\tau}/2$ ，其中  $c$  为光速。基于所得  $K$  个距离估计，可以利用线性最小二乘估计法算出目标的三维位置，具体三维定位的数学表述请参考文献[13]中的公式(4)到公式(9)。

为了在收发机实施 SPE，需要提前构建 SPE 矩阵  $\mathbf{A}$ 。本文分别提出基于通信信道增益和基于感知信道增益的两种 SPE 矩阵构建方法。利用公式(4)和公式(5)，基于通信信道增益和感知信道增益的 SPE 矩阵可分别表示如下：

$$\mathbf{A}_c = \sqrt{\frac{K}{h_{c,11}^2 + \dots + h_{c,KK}^2}} \begin{bmatrix} h_{c,11} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & h_{c,KK} \end{bmatrix}^{-1} \quad (7)$$

$$\mathbf{A}_s = \sqrt{\frac{K}{h_{s,1}^2 + \dots + h_{s,K}^2}} \begin{bmatrix} h_{s,1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & h_{s,K} \end{bmatrix}^{-1} \quad (8)$$

其中  $h_{c,kk}$  ( $k = 1, 2, \dots, K$ ) 表示第  $k$  个 RO-ISAC 收发机光源与目标接收机 PD 阵列中第  $k$  个 PD 之间的通信信道增益， $h_{s,k}$  ( $k = 1, 2, \dots, K$ ) 表示第  $k$  个收发机所对应的感知信道的信道增益， $[\cdot]^{-1}$  表示矩阵的求逆运算。

## 2 仿真分析

为了验证本文提出的基于 OFDM-DSM 调制和 SPE 的室内 MIMO-RO-ISAC 系统的性能优越性，采用编程语言 Matlab 2024 建立了  $4 \times 4$  的室内 MIMO-RO-ISAC 数值仿真系统。所建立的仿真验证系统包含 4 个收发机和 1 个通感目标，目标侧使用 1 个包含 4 个雪崩光电二极管 (Avalanche Photodiode, APD) 的 PD 阵列进行信号接收，从而构建一个  $4 \times 4$  的 MIMO 传输链路。在仿真系统中，4 个收发机的空间三维坐标分别为 (1m, 1m, 5m)、(1m, 3m, 4.5m)、(3m, 1m, 4.5m) 和 (3m, 3m, 5m)。在评估室内 MIMO-RO-ISAC 系统的通感性能时，首先考虑一个代表性目标位置 (1.5m, 1.5m, 1m)，然后再测量整个接收平面上的通信误码率分布和三维定位误差分布。系统中光源半功率半角为  $65^\circ$ ，APD 有效面积、响应系数和间距分别为 19.6

mm<sup>2</sup>、15 A/W 和 1 cm<sup>[20]</sup>，CCR 反射率和视场角分别为 0.92 和 45°，收发机侧和目标接收机侧接收光学系统增益均为 1。在 OFDM-DSM 调制解调时，逆傅里叶变换/傅里叶变换 (Inverse Fast Fourier Transform/Fast Fourier Transform, IFFT/FFT) 长度为 256，数据子载波数目为 64，正交振幅调制 (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) 星座阶数为 2，DSM 上采样倍数为 10。另外，D/A 采样率为 1 GSa/s，A/D 采样率为 10 GSa/s，A/D 上采样倍数为 10，系统调制带宽为 25 MHz，噪声功率谱密度为 10<sup>-22</sup> A<sup>2</sup>/Hz，测距时用了 4 个 OFDM 符号进行互相关计算。为了有效验证基于 OFDM-DSM 调制和 SPE 的室内 MIMO-RO-ISAC 系统的性能优越性，在仿真过程中考虑如下对比方案：1) OFDM 波形，无 SPE (OFDM, w/o SPE)；2) OFDM 波形，基于通信信道增益的 SPE (OFDM, w/ SPEC)；3) OFDM 波形，基于感知信道增益的 SPE (OFDM, w/ SPES)；4) OFDM-DSM 波形，无 SPE (OFDM-DSM, w/o SPE)；5) OFDM-DSM 波形，基于通信信道增益的 SPE (OFDM-DSM, w/ SPEC)；6) OFDM-DSM 波形，基于感知信道增益的 SPE (OFDM-DSM, w/ SPES)。在室内 MIMO-RO-ISAC 系统中，由于各个光源-PD 链路的距离和发射/入射角均存在差异，对应的通信/感知信道增益也各不相同，因此无法用统一的接收信噪比来统一衡量系统性能。为了确保性能分析和对比的公平性，本文基于发射信噪比对系统的通感性能展开研究，发射信噪比表示信号发射功率与噪声功率之间的比值<sup>[20]</sup>。在上述仿真设置中，接收平面大部分区域的通信信道增益和感知信道增益均在 10<sup>-6</sup> 数量级，对应的信道衰减为 120 dB。当发射信噪比位于 125 到 130 dB 时，所对应的接收信噪比大约在 5 到 10 dB 范围。

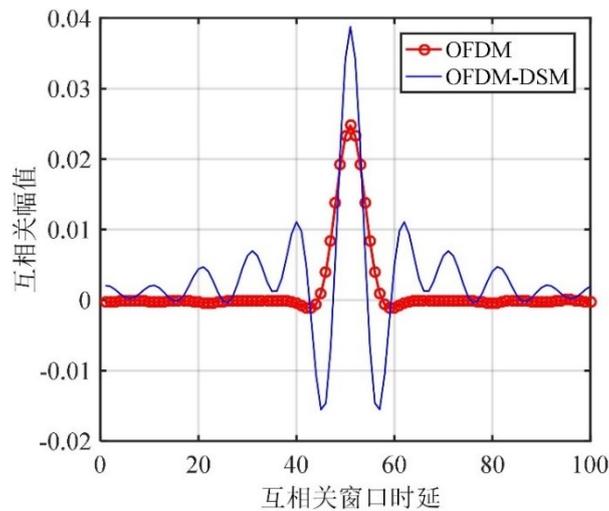


图 5 OFDM 与 OFDM-DSM 波形的时域互相关性能对比图

Figure 5 Time-domain cross-correlation performance comparison between OFDM and OFDM-DSM waveforms

图 5 展示和对比了 OFDM 与 OFDM-DSM 波形的时域互相关性能。可见，OFDM 波形和 OFDM-DSM 波形在相同的互相关窗口时延下达到最大互相关幅值，OFDM 波形的最大互相关幅值为 0.25，而 OFDM-DSM 波形的最大互相关幅值为 0.39，因此在 OFDM 调制后引入 DSM 调制能够显著提升波形的互相关性能，从而增强室内 MIMO-RO-ISAC 系统的感知性能。

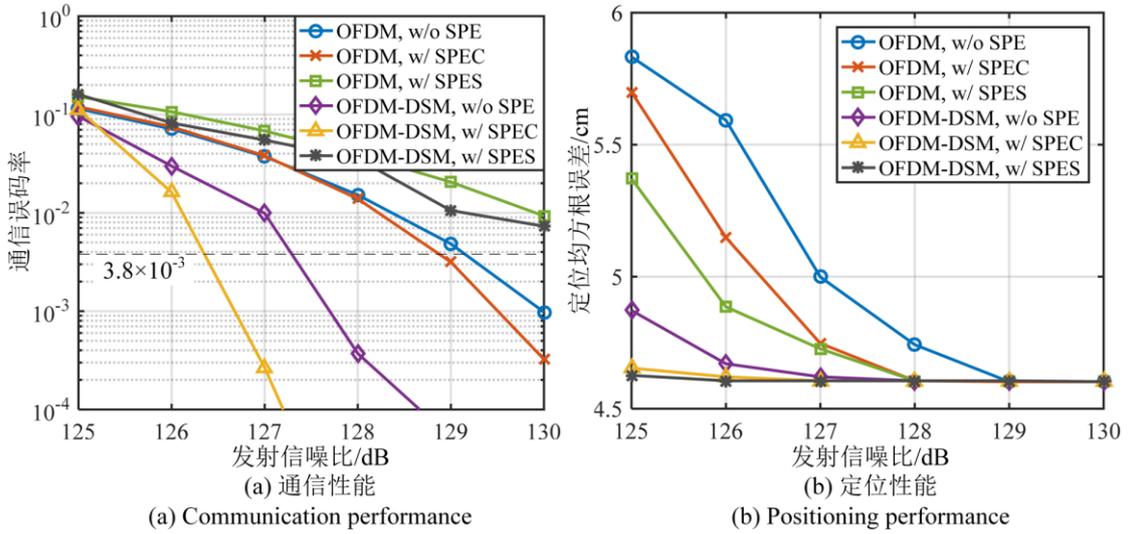


图 6 目标位于(1.5m, 1.5m, 1m)时通信和定位性能与发射信噪比的关系

Figure 6 Communication and positioning performance vs. transmitted signal-to-noise ratio at target position (1.5 m, 1.5 m, 1 m)

图 6(a)和(b)分别展示了目标位于(1.5m, 1.5m, 1m)位置时通信和定位性能与发射信噪比的关系。对于通信性能而言，由图 6(a)可见，在没有实施 SPE 的情况下，OFDM 需要 129.2 dB 的发射信噪比来达到 7%前向纠错码（forward error correction, FEC）所对应的误码率阈值  $3.8 \times 10^{-3}$ ，而 OFDM-DSM 仅需要 127.3 dB 发射信噪比来达到误码率阈值  $3.8 \times 10^{-3}$ 。因此，采用 OFDM-DSM 波形能够将所需发射信噪比降低 1.9 dB。由图 6(a)还可以发现，不管是采用 OFDM 波形还是采用 OFDM-DSM 波形，只有基于通信信道增益的 SPE 才能够改善系统通信性能，而基于感知信道增益的 SPE 反而会大幅恶化系统通信性能。这是因为基于通信信道增益的 SPE 能够补偿信道差异带来的整体误码性能降低，而基于感知信道增益的 SPE 不仅无法补偿信道差异，反而进一步增大了信道差异，导致整体误码性能变得更差。对于定位性能而言，由图 6(b)可见，在没有实施 SPE 和发射信噪比为 125 dB 的情况下，基于 OFDM 波形的定位均方根误差为 5.8 cm，而基于 OFDM-DSM 波形的定位均方根误差为 4.9 cm。可见，DSM 调制的引入能够有效降低系统的定位误差，提升定位精度。另外，基于通信信道增益的 SPE 和基于感知信道增益的 SPE 都能够一定程度改善系统的定位性能，且两者的性

能较为接近，基于感知信道增益的 SPE 性能在低信噪比情况下略微优于基于通信信道增益的 SPE。

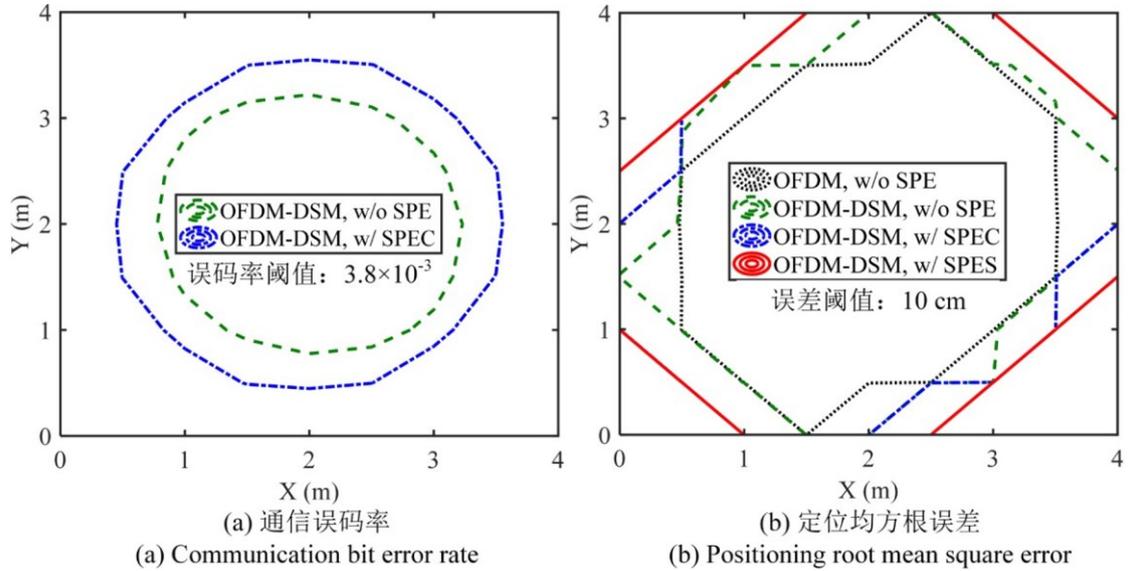


图 7 发射信噪比为 130 dB 时通信误码率与定位均方根误差在接收平面上的等高线分布  
Figure 7 Contour distribution of communication bit error rate and positioning root mean square error across the receiving plane with the transmitted signal-to-noise ratio of 130 dB

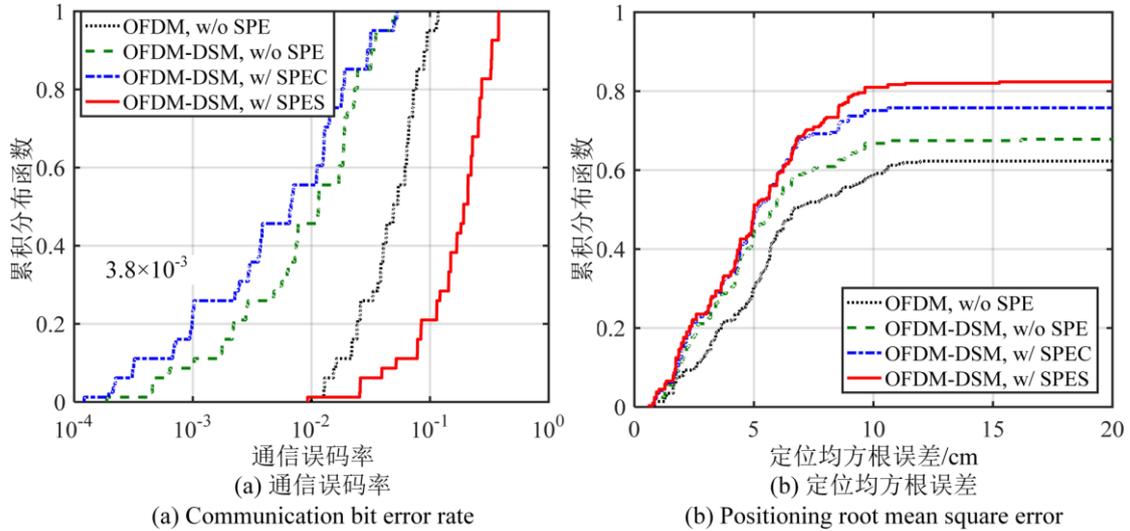


图 8 发射信噪比为 130 dB 时通信误码率与定位均方根误差在接收平面上的累积分布函数  
Figure 8 Cumulative distribution function of communication bit error rate and positioning root mean square error across the receiving plane with the transmitted signal-to-noise ratio of 130 dB

图 7(a)和(b)分别展示了发射信噪比为 130 dB 时通信误码率与定位均方根误差在接收平面上的等高线分布，其中通信误码率的阈值为  $3.8 \times 10^{-3}$ ，而定位均方根误差的阈值为 10 cm。对于通信性能而言，由图 7(a)可见，仅没有实施 SPE 的 OFDM-DSM 和基于通信信道增益 SPE 的 OFDM-DSM 两种方案能够在接收平面达到误码率阈值，而没有实施 SPE 的 OFDM 和基于感知信道增益 SPE 的 OFDM-DSM 两种方案在整个接收平面的误码率均高于阈值

$3.8 \times 10^{-3}$ 。对于定位性能而言,由图 7(b)可见,没有实施 SPE 的 OFDM 方案能够在接收平面中间一定区域达到 10 cm 以下的定位精度,而 OFDM-DSM 波形的引入和两种 SPE 方法的实施都能有效扩大 10 cm 定位误差阈值下的覆盖范围。图 8(a)和(b)分别展示了发射信噪比为 130 dB 时通信误码率与定位均方根误差在接收平面上的累积分布函数。对于通信性能而言,由图 8(a)可见,基于通信信道增益 SPE 的 OFDM-DSM 方案能够获得最佳通信性能,而基于感知信道增益 SPE 的 OFDM-DSM 方案通信性能最差。对于定位性能而言,由图 8(b)可见,实施了 SPE 的 OFDM-DSM 方案的定位性能明显优于没有实施 SPE 的 OFDM-DSM 方案,且基于感知信道增益的 SPE 定位性能仅在较高误差情况下略微优于基于通信信道增益的 SPE。综上可知,基于通信信道增益 SPE 的 OFDM-DSM 方案能兼顾通信和定位需求,整体性能较为优越。

### 3 结束语

本文面向室内 IoT 场景,研究和分析了基于 OFDM-DSM 调制和 SPE 的室内 MIMO-RO-ISAC 系统性能。首先,介绍了室内 MIMO-RO-ISAC 系统的基本原理,讨论了如何在系统中同时实现 MIMO 通信功能以及基于 CCR 逆反射的三维定位功能。其次,描述了一阶 DSM 调制与解调原理,阐明了实现 DSM 调制的详细步骤以及利用低通滤波可以实现 DSM 解调。随后,介绍了两种 SPE 方法,即基于通信信道增益的 SPE 与基于感知信道增益的 SPE,并构建了相应的 SPE 矩阵。最后,通过仿真实验证明,本文所提 OFDM-DSM 波形和基于通信信道增益的 SPE 都能够同时显著提升室内 MIMO-RO-ISAC 系统的通信和感知性能,从而验证了这两个技术在室内 MIMO-RO-ISAC 系统中的有效性与优越性。在未来工作中,将通过理论和实验深入研究光路遮挡和器件非线性等实际因素对室内 MIMO-RO-ISAC 系统通感性能的影响,并进一步提出相应的解决方案,从而提升 MIMO-RO-ISAC 技术在真实室内 IoT 场景中的实用性。

#### 参考文献:

- [1] Liu F, Cui Y, Masouros C, et al. Integrated Sensing and Communications: Toward Dual-Functional Wireless Networks for 6G and Beyond[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 40(6): 1728–1767.
- [2] 陈亮, 余少华. 6G 移动通信关键技术趋势初探(特邀)[J]. 光通信研究, 2019(5): 1–8+51.  
Chen L, Yu S H. Preliminary Study on the Key Technologies of 6G Mobile Communication[J]. Study on Optical Communications, 2019(5): 1–8+51.
- [3] Wen Y, Yang F, Song J, et al. Optical Integrated Sensing and Communication: Architectures, Potentials and Challenges[J]. IEEE Internet of Things Magazine, 2024, 7(4): 68–74.

- [4] Chu T, Chen C, Ye J, Xiong X, Shao S H, Zeng Z H, Wang D K, Yang F L, Xu G J, and Haas H, "Retroreflective Optical ISAC for 6G: Technologies, Applications and Future Directions," arXiv: 2512.01275.
- [5] Cui Y, Chen C, Cai Y, et al. Retroreflective Optical ISAC Using OFDM: Channel Modeling and Performance Analysis[J]. Optics Letters, 2024, 49(15): 4214–4217.
- [6] Wen Y, Yang F, Song J, et al. Pulse Sequence Sensing and Pulse Position Modulation for Optical Integrated Sensing and Communication[J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(6): 1525–1529.
- [7] Wang J, Huang N, Gong C, et al. PAM Waveform Design for Joint Communication and Sensing Based on Visible Light[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(11): 20731–20742.
- [8] Muller E, Silva V, Monteiro P, et al. Joint optical wireless communication and localization using OFDM[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2022, 34(14): 757–760.
- [9] Wen Y, Yang F, Song J, et al. Free-Space Optical Integrated Sensing and Communication Based on DCO-OFDM: Performance Metrics and Resource Allocation[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(2): 2158–2173.
- [10] Du J, Chen C, Zeng Z, et al. Flexible Waveform Design for RO-ISAC Based on OFDM-Embedded Maximum Length Sequence[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2025, 14(10): 3334–3338.
- [11] Wang H, Chen C, Zeng Z H, et al. Bidirectional Retroreflective Optical ISAC Using Time Division Duplexing and Clipped OFDM[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2025, 37(10): 587–590.
- [12] Chen S, Chen C, Zeng Z, et al. Full-Duplex RO-ISAC System: Wavelength Division Duplexing and Hybrid Waveform Design[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2025, 37(15): 869–872.
- [13] Wang H, Zeng Z H, Chen C, et al. Retroreflective Optical ISAC Supporting 3D Positioning in Indoor Environments[C]// Asia Communications and Photonics Conference (ACP), Beijing, China: IEEE, 2024: 1–5.
- [14] 万欣, 王浩川, 叶洋, 等. 水下逆反射光通感一体化系统性能研究[J]. 光通信研究, 2025(4): 250103.  
Wan X, Wang H, Ye Y, et al. Performance Investigation of Underwater Retroreflective Optical Integrated Sensing and Communication System[J]. Study on Optical Communications, 2025(4): 250103.
- [15] Wang W, Wang H, Zeng Z, et al. UAV-Aided Flying Retroreflective Optical ISAC with Angle Diversity Transmitters[C]// OptoElectronics and Communications Conference/International Conference on Photonics in Switching and Computing (OECC/PSC), Sapporo, Japan: IEEE, 2025: 1–4.
- [16] Cui Y, Liu F, Jing X, et al. Integrating Sensing and Communications for Ubiquitous IoT: Applications, Trends and Challenges[J]. IEEE Network, 2021, 35(3), 158-167.
- [17] Zhang R, Shao Y, Li M, et al. Optical Integrated Sensing and Communication with Light-Emitting Diode[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(9), 12896-12911.
- [18] 陈晨, 王伟任, 万欣, 等. 逆反射光通感一体化系统研究进展[J]. 光通信技术, 2025, 49(5): 15-20.  
Chen C, Wang W, Wan X, et al. Research Progress on Retroreflective Optical Integrated Sensing and Communication System[J]. Optical Communication Technology, 2025, 49(5): 15-20.
- [19] Li C, Hu R, Li H, et al. Digital OFDM-PON Based on Delta-Sigma Modulation Employing Binary IM-DD Channels[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 9(2): 7902107.
- [20] Chen C, Zhong X, Fu S, et al. OFDM-Based Generalized Optical MIMO[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(19): 6063-6075.