

逆反射光通感一体化系统研究进展

陈晨*, 王伟任, 万欣, 曾志宏, 王登科

(重庆大学 微电子与通信工程学院, 重庆 400030)

摘要: 本文综述了基于无线光传输的逆反射光通感一体化 (Retroreflective Optical Integrated Sensing and Communication, RO-ISAC) 系统在信道建模、融合波形设计和双向传输等方面的最新研究进展, 介绍了 RO-ISAC 系统在室内、无人机和水下等 6G 典型场景中的应用, 并进一步展望了 RO-ISAC 系统的未来发展趋势。

关键词: 逆反射光通感一体化; 信道建模; 波形设计; 双向传输

中图分类号: TN256 **文献标识码:** A

Research Progress on Retroreflective Optical Integrated Sensing and Communication System

CHEN Chen*, WANG Weiren, WAN Xin, ZENG Zhihong, WANG Dengke

(School of Microelectronics and Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: This paper reviews the research progress on retroreflective optical integrated sensing and communication (RO-ISAC) system in terms of channel modeling, integrated waveform design, and bidirectional transmission. The application of RO-ISAC systems in various 6G typical scenarios such as indoor, unmanned aerial vehicle (UAV) and underwater scenarios is further introduced. Finally, the future development trends of the RO-ISAC system are prospected.

Key words: retroreflective optical ISAC; channel modeling; waveform design; bidirectional transmission

0 引言

第 6 代移动通信系统 (6G) 需要能够同时提供大容量通信和高精度感知服务, 从而有效支持物联网、智能交通系统、人机交互和环境监测等新兴应用^[1,2]。作为 6G 关键使能技术之一, 通感一体化 (Integrated Sensing and Communication, ISAC) 在近年来受到了国内外研究人员的广泛关注^[3,4]。当前, 基于射频 (Radio Frequency, RF) 频段的 ISAC 系统已经得到了大量研究。然而, 受限于日益紧缺的 RF 频谱资源, 传统 RF-ISAC 系统难以实现大容量通信和高精度感知^[5,6]。相比之下, 基于可见光和红外光等光频段的无线光 ISAC (Optical ISAC, O-ISAC) 系统能够充分利用光频段带宽资源丰富的巨大优势, 可以基于无线光传输同时实现大容量通信和高精度感知功能^[7,8]。为了克服光波漫反射导致的通感距离有限问题, 研究人员进一步提出了基于逆反射模块的逆反射光通感一体化 (Retroreflective Optical Integrated Sensing and Communication, RO-ISAC) 系统^[9]。与漫反射 O-ISAC 系统相比, RO-ISAC 系统通过利用光波逆反射来提升反射光波的信号强度, 从而能够显著提升系统通信和感知的有效距离。作为室内 O-ISAC 的代表性技术, 可见光通信与定位 (Visible Light Communication and Positioning, VLCP) 一体化在近年来备受瞩目^[9,10]。VLCP 系统通常采用频分复用的方式来实现通信与定位功能的融合, 并且以收发分离的方式实施目标定位^[11]。与 VLCP 系统相比, RO-ISAC 系统可以在同一频带上同时实现高速通信以及收发一体的高精度感知, 感知信号无需占用额外带宽资源, 因此具有更高的频带利用效率和更低的硬件复杂度^[8]。

鉴于无线光传输通常采用强度调制/直接检测 (Intensity Modulation/Direct Detection, IM/DD) 的方式进行信号调制和解调, 传统 RF-ISAC 系统中的相关技术难以直接应用到 RO-ISAC 系统中。由于逆反射链路的引入, RO-ISAC 系统的信道模型与传统无线光通信 (Optical Wireless Communication, OWC) 系统的信道模型存在明显差异。另外, RO-ISAC 系统的通

感融合波形设计以及上下行双向传输等相关技术都是制约系统整体通感性能的关键因素。除此之外，研究人员对 RO-ISAC 系统在室内、无人机和水下等 6G 典型场景中的相关应用也进行了初步探索。

本文分别从信道建模、融合波形设计和双向传输等方面阐述 RO-ISAC 系统的最新研究进展，并简要介绍 RO-ISAC 系统在室内、无人机和水下等场景的相关应用，最后对 RO-ISAC 系统的未来发展趋势进行展望。

1 RO-ISAC 系统基本原理

本文所涉及的 RO-ISAC 系统基本原理如图 1 所示^[12]。可见，在 RO-ISAC 收发端，首先对下行输入比特进行下行调制，从而产生系统所需的通感融合波形，并进一步通过数模转换（Digital-to-Analog Conversion, D/A）得到待传输的模拟信号。为了适配下行链路 LED 或 LD 光源的 IM/DD 特性，通常还需要给所生成的模拟信号添加一个额外的直流偏置（Direct Current, DC）来确保光源驱动信号非负性。在目标端，到达的下行信号由光电探测器（Photo-Detector, PD）接收并输出模拟信号，再经过模数转换（Analog-to-Digital Conversion, A/D）产生相应的数字信号，最后通过下行调解得到下行输出比特。同时，目标收发机还配备一个逆反射模块，例如角立方反射器（Corner Cube Reflector, CCR），对下行信号进行逆反射，将到达目标收发机的下行光波原路反射回 RO-ISAC 收发机，从而确保 RO-ISAC 收发端能够利用回射光波完成感知功能。另外，上行输入比特在进行上行调制、D/A 和添加 DC 后用于驱动上行链路 LED 或 LD 光源发光。

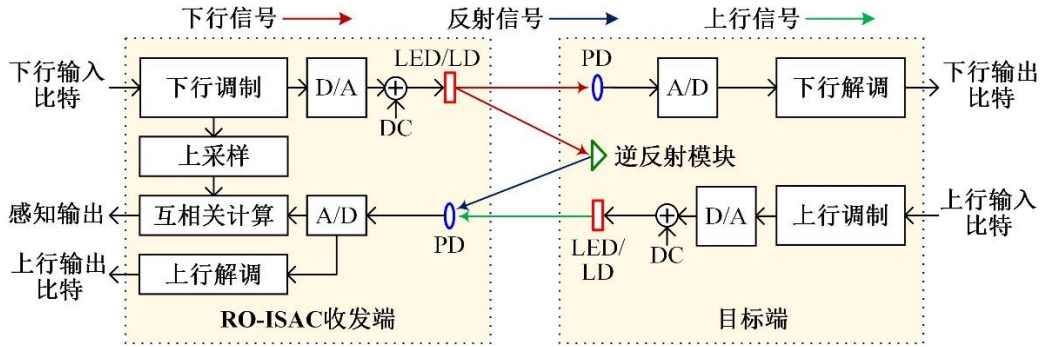


图 1 RO-ISAC 系统原理图^[12]

RO-ISAC 收发端的 PD 将接收到上行信号和下行反射信号，在经过 A/D 后得到相应的数字信号。该数字信号一方面用于上行解调从而得到上行输出比特，另一方面也用于实施互相关计算来得到感知输出。以点对点距离感知（即测距）为例，RO-ISAC 收发端利用回波信号 $y(n)$ 和上采样后的发射信号 $x(n)$ 进行互相关计算，从而估计出光波的飞行时间：

$$\hat{\tau} = \arg \max_{\tau} \sum_{n=0}^{W-1} y(n)x(n-\tau) \quad (1)$$

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 RO-ISAC 收发端与目标端之间的距离为 $\hat{d} = c\hat{\tau}/2$ ，其中 c 为光速。

如图 1 所示，基于点对点的 RO-ISAC 系统架构可以实现 RO-ISAC 收发端与目标端之间的测距功能。除了一维测距之外，还可以利用 RO-ISAC 系统实现二维/三维定位和测速等更为复杂的感知功能。为了实现二维/三维定位功能，通常需要在 RO-ISAC 系统中设置多个 RO-ISAC 收发端，从而获得各个 RO-ISAC 收发端与目标端之间距离估计，再根据所得到的多个距离估计来完成目标的二维/三维定位。为了实现测速功能，可以在一段给定的时间范围内估计目标的位置移动，从而利用移动距离和经历时间来估算目标的移动速度。

2 信道建模

与传统 OWC 系统相比, RO-ISAC 系统除了存在上下行通信链路之外, 还存在一个额外的逆反射感知链路, 因此需要对该逆反射感知链路进行精准的信道建模。考虑到窄波束 LD 和宽波束 LED 是两种常用的光源类型, 下面针对 LD 和 LED 光源分别介绍相应的点光源和面光源两种感知信道模型。

2.1 点光源感知信道模型

面向 RO-ISAC 系统的点光源感知信道模型中光束的半功率角较小, 光信号更加集中, 因而比较适用于基于精准捕获、跟踪、对准 (Acquisition, Tracking, and Pointing, ATP) 的远距离定向传输系统。点光源感知信道模型如图 2 所示, 其中 Ψ 表示 LD 的半功率角, d 表示有待估计的传输距离, φ 表示光信号的发射角, θ 表示光信号在目标侧的入射角。

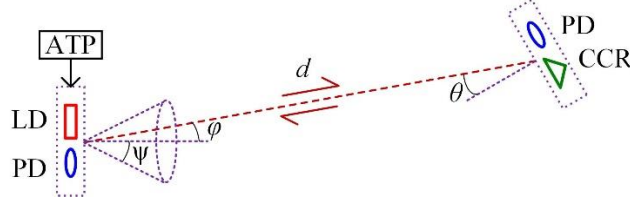


图 2 点光源感知信道示意图^[12]

点光源模型下感知信道的增益可由如下公式表示^[12]:

$$h_s^{\text{point}} = \begin{cases} \frac{(m+1)A\rho k}{8\pi d^2} \cos^{m+1}(\varphi) \kappa(\varphi) \cos(\theta), & 0 \leq \theta \leq \Phi_r \text{ 且 } 0 \leq \varphi \leq \Phi_s \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (2)$$

其中 $m = -\ln(2)/\ln(\cos(\Psi))$ 表示朗伯辐射阶数, A 和 ρ 分别表示 PD 的有效探测面积和探测灵敏度, k 表示目标侧 CCR 的反射率, Φ_r 表示目标侧 CCR 的半视场角, Φ_s 表示收发器侧 PD 的半视场角。由上述表达式可知, 感知信道中的光信号需要逆反射回到收发器侧 PD, 因此信道增益额外加入了 $\cos(\varphi)$, 式中 $\cos$ 项的指数变为 $m+1$ 。同时, 由于光信号经历了往返传输路径, 式中的传输距离变为 $2d$ 。

2.2 面光源感知信道模型

面向 RO-ISAC 系统的面光源感知信道模型中光束的半功率角较大, 光信号更加发散, 因而比较适用于基于大面积 LED 面板光源的近距离覆盖式传输系统。面光源感知信道模型如图 3 所示, 其中相关参数的定义与图 2 中点光源信道模型一致。

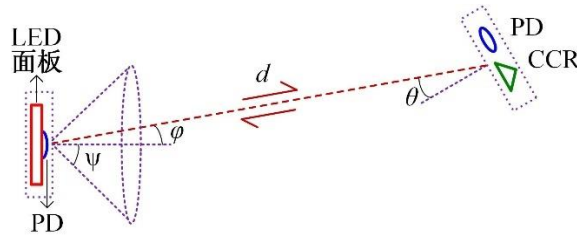


图 3 面光源感知信道示意图^[12]

受限于 CCR 器件的有限视场范围, LED 面板光源所发出的光波可能只有一部分被 CCR 逆反射回收发器侧。因此, 与点光源感知信道模型相比, 在计算面光源感知信道模型的信道增益时需要额外考虑 LED 面板光源部分逆反射的影响。假设 $\zeta(\varphi, \theta)$ 表示 LED 面板光源在 CCR 视场范围内的有效反射面积比例, 则面光源模型下感知信道的增益可表示如下^[12]:

$$h_s^{\text{area}} = \begin{cases} \frac{(m+1)A\rho k}{8\pi d^2} \cos^{m+1}(\varphi) \kappa(\varphi) \cos(\theta) \zeta(\varphi, \theta), & 0 \leq \theta \leq \Phi_r \text{ 且 } 0 \leq \varphi \leq \Phi_s \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (3)$$

进一步假设面光源感知信道中的 PD 嵌入在面光源中心位置, 并使用 A_{light} 和 A_{PD} 分别表示面

光源的总面积和 PD 的面积，则 LED 面板光源在 CCR 视场范围内的有效反射面积比例可由如下公式计算：

$$\zeta(\varphi, \theta) = \frac{A_{\text{eff}}(\varphi, \theta)}{A_{\text{light}} - A_{\text{PD}}} \quad (4)$$

其中 $A_{\text{eff}}(\varphi, \theta)$ 表示面光源中能够被 CCR 逆反射的有效发光面积，具体计算公式如下：

$$A_{\text{eff}}(\varphi, \theta) = \frac{2r^2}{\cos(\varphi)} \left(\cos^{-1} \left(\frac{2(L+L')\tan(\theta)}{r} \right) - \frac{2(L+L')\tan(\theta)}{r} \sqrt{r^2 - 4(L+L')^2 \tan^2(\theta)} \right) - \frac{A_{\text{PD}}}{\cos(\varphi)} \quad (5)$$

上式中 $r = D - L_{\text{PD}}/2$ ，其中 D 表示 CCR 的直径， L_{PD} 表示正方形 PD 的边长， L 和 L' 分别表示 CCR 的长度和凹进长度。

表 1 感知信道模型特点与适用场景对比

感知信道模型	模型特点	适用场景	参考文献
点光源模型	光束的半功率角较小，光信号更加集中	基于精准 ATP 的远距离定向传输系统	[12]
面光源模型	光束的半功率角较大，光信号更加发散	基于大面积 LED 面板光源的近距离覆盖式传输系统	

表 1 对上述感知信道模型的特点与适用场景进行了分析和对比。可见，点光源感知信道模型假设光信号较为集中，适用于远距离定向传输系统，而面光源感知信道模型假设光信号较为发散，适用于近距离覆盖式传输系统。

3 通感融合波形设计

RO-ISAC 系统的通信和感知性能在很大程度上由系统所采用的通感融合波形决定，因此设计性能优良的通感融合波形对于 RO-ISAC 系统来说至关重要。通感融合波形的设计可以分为通信为主、感知为主、以及通感折中这三类波形。其中，通信为主波形主要包括脉冲幅度调制（Pulse Amplitude Modulation, PAM）以及正交频分复用（Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM）等传统通信波形，旨在保证良好通信性能的同时额外支持感知功能；而感知为主波形则以各类相关性能优越的脉冲波形为主，旨在确保精准感知性能的同时额外传输低速通信数据。相比之下，通感折中波形则是能够通过对波形相关参数的动态调节来实现通信与感知性能的灵活折中，从而适用于通信和感知服务需求动态变化的 RO-ISAC 系统。

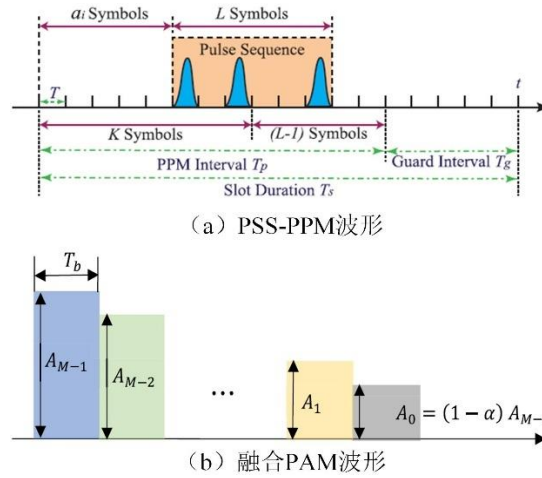


图 4 基于脉冲的通感融合波形方案：(a) PSS-PPM 波形^[13]；(b) 融合 PAM 波形^[14]

3.1 PSS-PPM 波形

图 4(a)展示了基于脉冲的脉冲序列感知-脉冲位置调制（Pulse Sequence Sensing and Pulse

Position Modulation, PSS-PPM) 波形^[13]。该波形采用单极性伪随机噪声 (Pseudo-Noise, PN) 码作为脉冲序列进行目标感知, PN 码具有近似理想的相关特性, 能够确保系统实现精准感知。同时, 系统的通信功能则是通过在 $K+L-1$ 个时隙中选择 L 个时隙来传输感知用的 PSS 符号, 具有较高的通信能效。

3.2 融合 PAM 波形

图 4(b)展示了基于脉冲的融合 PAM 波形, 该波形由 M 个幅度不同的脉冲组成^[14]。对于通信而言, 不同符号间的幅度差异越大, 通信性能越好; 而对于感知而言, 符号间的平均功率越高, 感知性能越好。因此, 在发射机最大峰值功率的约束下, 存在符号间的幅度差异和平均功率之间的折中, 可以对融合 PAM 波形进行性能优化。

3.3 限幅 OFDM 波形

除了基于脉冲的通感融合波形外, 多载波 OFDM 也是一种较为常用的通感融合波形。相比于 PAM, OFDM 能够采用如正交振幅调制 (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) 之类的二维星座传输数据, 因此具有更加优越的通信性能。鉴于 OFDM 存在较高的峰均功率比 (Peak-to-Average-Power Ratio, PAPR), 对 OFDM 时域波形进行限幅处理能够显著降低峰均功率比, 从而提升 OFDM 信号传输性能。

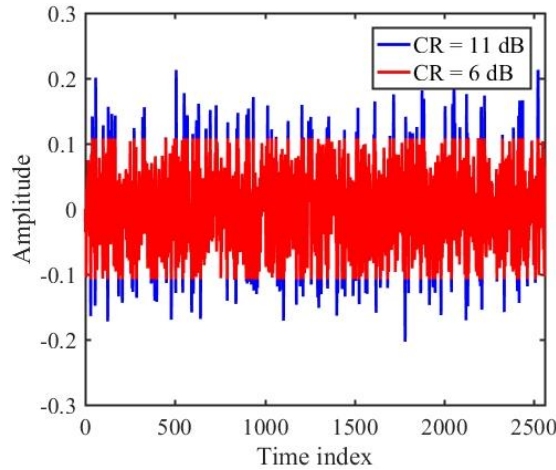


图 5 限幅 OFDM 波形示意图^[15]

图 5 展示了在不同限幅比 (Clipping Ratio, CR) 下的限幅 OFDM 波形^[15]。可见, 随着 CR 值由 11dB 降低为 6dB, 限幅 OFDM 波形的幅度波动显著减小, 整体波形更加接近脉冲的形状。前期研究表明, 在通信方面, 存在一个最佳的 CR 值使得通信误码率最低。然而在感知方面, 随着 CR 值的不断降低, 系统的测距误差也随之不断减小。另外, 可以通过调节 CR 值, 在通信和感知之间获得一定程度的性能折中。

3.4 混合 PAM/OFDM 波形

鉴于 PAM 波形通常具有更好的感知性能, 而 OFDM 波形通常具有更好的通信性能, 我们有针对性地提出了混合 PAM/OFDM 通感融合波形^[13]。该波形由 PAM 符号和 OFDM 符号在时域上按照一定比例进行组合生成, 通过将 PAM 信号的时域上采样倍数和 OFDM 信号的频域上采样倍数设为一致, 可以保证该混合波形在采用相同阶数的调制星座下保持相同的通信速率, 且该速率不随 PAM 与 OFDM 符号的混合比例改变而改变。

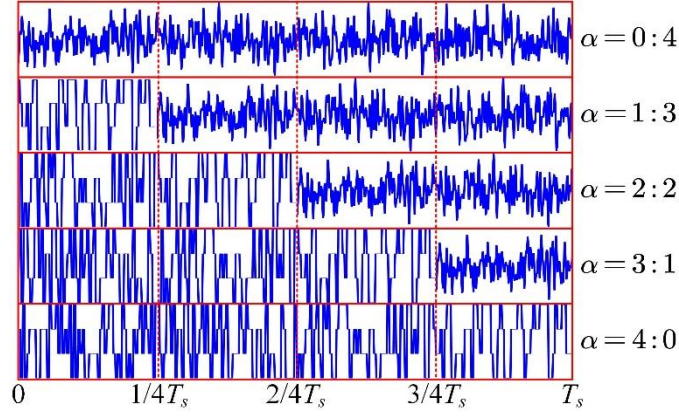


图 6 混合 PAM/OFDM 波形示意图^[16]

图 6 展示了在不同混合比例 α 下的混合 PAM/OFDM 波形^[16]。可见，当 $\alpha=0$ 时，混合 PAM/OFDM 波形为纯 OFDM 波形，而当 $\alpha=\infty$ 时，混合 PAM/OFDM 波形为纯 PAM 波形。我们的前期研究证实，PAM 波形比 OFDM 波形具有优越的互相关性能。同时，通过调节 PAM 符号和 OFDM 符号的混合比例可实现通感性能的灵活折中。

3.5 OFDM 内嵌 MLS 波形

考虑到 PAM 和 OFDM 都是通信为主的波形，基于 PAM 和 OFDM 所设计的通感融合波形无法取得理想的感知效果。与通信波形相比，最大长度序列（Maximum Length Sequence, MLS）等相关性较强的感知波形可以与通信波形进行有机融合，从而确保系统同时具备优越的通信和感知性能。

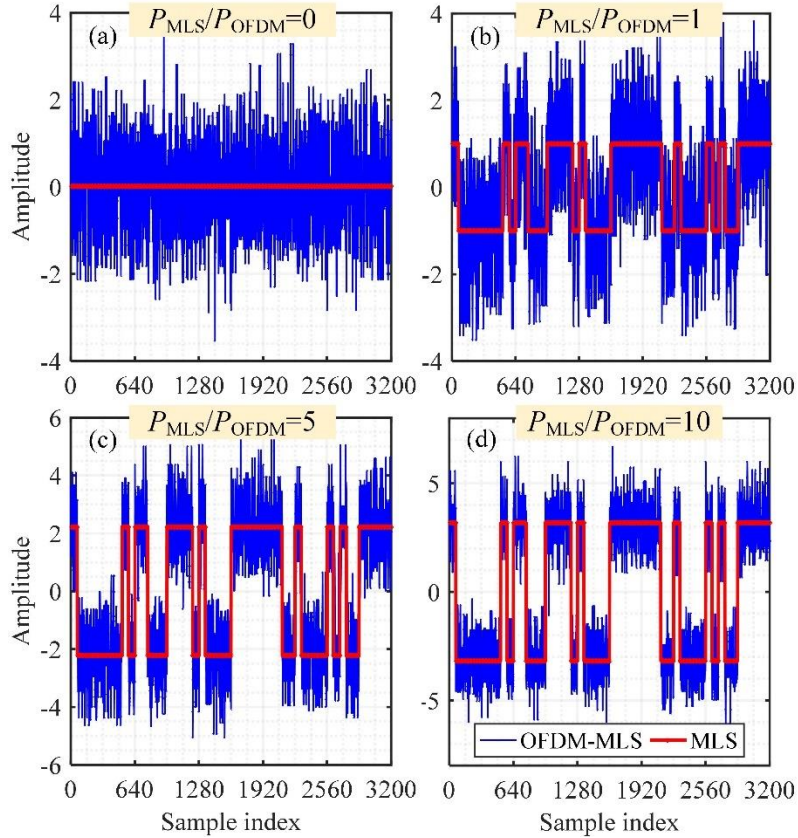


图 7 OFDM 内嵌 MLS 波形示意图^[17]

图 7 展示了我们所提出的 OFDM 内嵌 MLS 波形^[17]，该波形将双极性零均值的 OFDM 信号与双极性 MLS 信号进行叠加，从而得到一种新型的通感融合波形。由图 7 可见，通过

改变 MLS 信号与 OFDM 信号之间的功率分配比 $P_{\text{MLS}}/P_{\text{OFDM}}$ ，可以得到介于 OFDM 和 MLS 之间的融合信号，从而在通信和感知之间实现灵活的性能折中。

表 2 通感融合波形设计方案的优缺点对比

波形设计方案	优点	缺点	参考文献
PSS-PPM	感知能力较强、能效较高、复杂度较低	通信能力较弱	[13]
融合 PAM	复杂度较低	通信与感知能力都一般	[14]
限幅 OFDM	通信能力较强	感知能力较弱	[15]
混合 PAM/OFDM	一定程度的通感性能折中	感知能力较弱	[16]
OFDM 内嵌 MLS	较好的通感性能折中	MLS 无法传输额外数据	[17]

表 2 对上述通感融合波形设计方案的优缺点进行了分析和对比。可见，基于脉冲的 PSS-PPM 波形和融合 PAM 波形在通信能力方面相对较弱，而限幅 OFDM 波形和混合 PAM/OFDM 波形在感知能力方面存在不足。相比之下，OFDM 内嵌 MLS 波形能够取得较好的通感性能折中，缺点是 MLS 无法传输额外通信数据。

4 双向传输

面向实际应用的 RO-ISAC 系统通常需要能够支持包括下行链路和上行链路的双向信号传输功能，从而实现 RO-ISAC 收发端与目标端之间的信息互联。与传统双向 OWC 系统不同的是，RO-ISAC 系统中上行链路 PD 将收到来自目标端的上行信号以及被目标端逆反射模块逆反射回来的下行信号，从而在 RO-ISAC 收发端形成双向传输干扰。因此，为了在 RO-ISAC 系统中实现上下行双向传输，需要对双向传输干扰进行有效抑制。

4.1 基于时分双工的双向传输

作为经典双工传输方式之一，时分双工通过在时间维度对上下行链路的信号传输进行时分复用，可以避免在 RO-ISAC 收发端形成双向传输干扰，从而有效支持 RO-ISAC 系统上下行双向传输。图 8 展示了基于时分双工和限幅 OFDM 波形的双向 RO-ISAC 系统原理图^[15]，其中基于时分双工的双向传输帧结构如子图(b)所示，整体时间帧被划分为三个时段，即下行时段 T_{downlink} 、上行时段 T_{uplink} 和保护间隔（Guard Interval, GI）时段 T_{GI} 。需要注意的是，下行与上行设备需保持同步，以确保基于时分双工的双向传输能够顺利实施。设 $N_{\text{bits}}^{\text{downlink}}$ 和 $N_{\text{bits}}^{\text{uplink}}$ 分别表示一个时间帧内下行和上行 OFDM 符号传输的比特数，则基于时分双工的双向 RO-ISAC 系统的总数据速率可表示为

$$R = \frac{N_{\text{bits}}^{\text{downlink}} + N_{\text{bits}}^{\text{uplink}}}{T_{\text{downlink}} + T_{\text{uplink}} + T_{\text{GI}}} \quad (6)$$

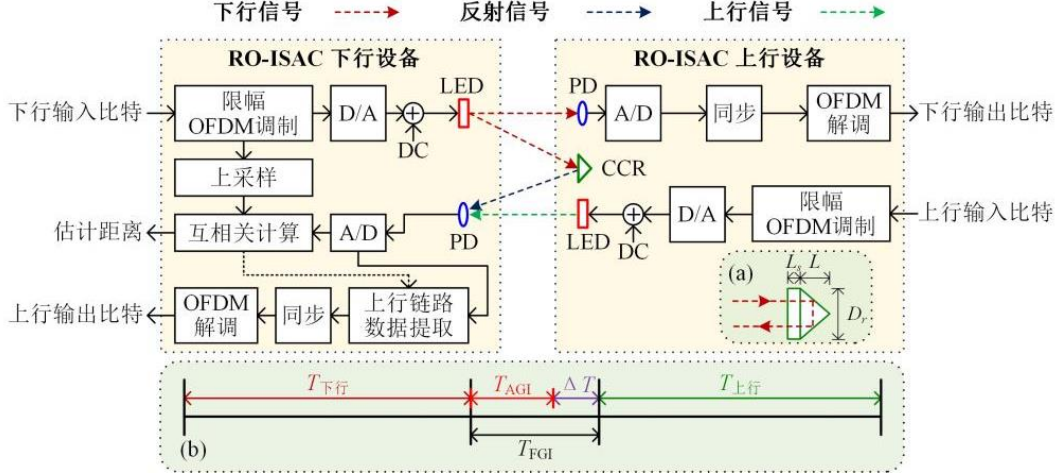


图 8 基于时分双工和限幅 OFDM 波形的双向 RO-ISAC 系统原理图^[15]

由图 8(b)可见，插入合适的 GI 对干扰抑制起到关键作用。同时，GI 越大，系统总数据速率越小。针对干扰抑制要求，首先设计了一种固定 GI 方案。考虑到双向 RO-ISAC 系统存在最大测距距离 $d_{\max}$ ，可合理假设系统的实际距离不会超过该最大测距距离，因此在下行与上行时段之间插入时长为 $T_{FGI} = d_{\max}/c$ 的固定 GI，即可避免逆反射下行信号与上行信号之间的干扰。然而，双向 RO-ISAC 系统的实际传输距离可能远远小于最大测距距离 $d_{\max}$ ，因此选用长度为 T_{FGI} 的固定 GI 将无可避免的造成时间资源浪费，降低系统总数据速率。为了保证干扰抑制且同时提升系统总数据速率，进一步设计了一种自适应 GI (Adaptive GI, AGI) 方案。该方案充分利用系统实时估计的传输距离 $\hat{d}$ ，设置 AGI 时长为 $T_{AGI} = \hat{d}/c + T_0$ ，其中 T_0 为补偿测距误差所引起的时间偏移而设置的时间间隙。假设双向 RO-ISAC 系统能达到理想的测距性能（即测距误差不超过其测距分辨率 Δd ），则可合理设置 $T_0 = \Delta d/c$ ，因此 AGI 的时长可表示为 $T_{AGI} = (\hat{d} + \Delta d)/c$ 。用 T_{AGI} 代替 T_{FGI} 后，所需 GI 时长减少了 $\Delta T = (d_{\max} - \hat{d} - \Delta d)/c$ ，因此系统总数据速率能够得到有效提升。

4.2 基于波分双工的双向传输

虽然时分双工能够实现 RO-ISAC 系统上下行双向传输，但仅能支持半双工传输模式，上下行链路无法同时进行数据传输，因此系统总数据速率较低。为了提升系统总数据速率，需要设计相应的全双工双向传输方案。

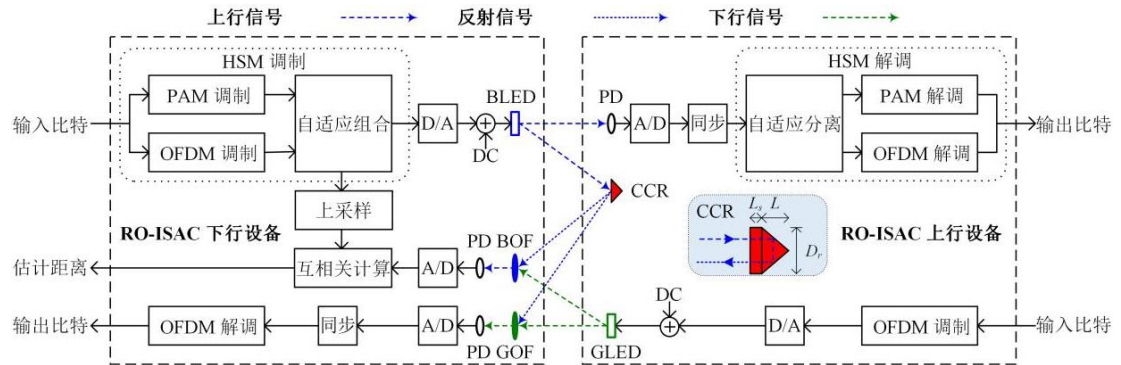


图 9 基于波分双工和混合 PAM/OFDM 波形的双向 RO-ISAC 系统原理图^[16]

图 9 展示了基于波分双工和混合 PAM/OFDM 波形的双向 RO-ISAC 系统原理图^[16]，其中上下行链路通过采用不同波长的光载波进行数据传输来克服双向干扰。具体而言，下行链路采用蓝光 LED (Blue LED, BLED) 作为光源，而上行链路采用绿光 LED (Green LED, GLED) 作为光源。在 RO-ISAC 收发端，采用蓝光滤波器 (Blue Optical Filter, BOF) 和绿光滤波器 (Green Optical Filter, GOF) 从所接收到的混合光波中分别滤出蓝光信号和绿光信

号。所得蓝光信号用于后续互相关计算进行测距，而绿光信号则用于上行数据解调。由于蓝绿光能够被相应滤波器有效分离，基于波分双工的双向 RO-ISAC 系统可以在消除双向干扰的同时实现上下行链路全双工双向传输，从而显著提升系统总数据速率。

表 3 双向传输方案的双工模式及优缺点对比

双向传输方案	双工模式	优缺点	参考文献
时分双工	半双工	无需光学滤波，结构简单，但是需要收发同步，系统总数据速率较低	[15]
波分双工	全双工	需要光学滤波，结构复杂，但是无需收发同步，系统总数据速率较高	[16]

表 3 对上述双向传输方案的优缺点进行了分析和对比。可见时分双工仅能支持半双工传输，而波分双工则能支持全双工传输。与时分双工相比，波分双工能够实现更高的系统总数据速率，但是需要引入额外的光学滤波器件。

5 应用场景

鉴于 RO-ISAC 系统所兼具的通信容量大和感知精度高的先天优势，其在 6G 空天地海等多个场景具有非常巨大的应用潜力，能够为 6G 网络提供高速通信和精准感知能力。下面简要介绍 RO-ISAC 系统在室内、无人机和 underwater 三个典型场景中的应用。

5.1 室内场景

图 10 展示了面向室内场景的 RO-ISAC 系统示意图^[18]，包括多个位于天花板上的 LED/PD 收发模块以及位于室内接收平面的目标终端，其中目标终端配备有 CCR 逆反射模块，通过将下行光波逆反射回天花板收发模块来实现目标的被动定位。在室内场景中，位于天花板上的 LED/PD 收发模块通常具有固定的位置，而目标终端可以在接收平面内自由移动。根据各个 LED/PD 收发模块所估计得到的与目标终端之间的距离，利用线性最小二乘估计算法可以得到目标终端在接收平面上的具体位置。

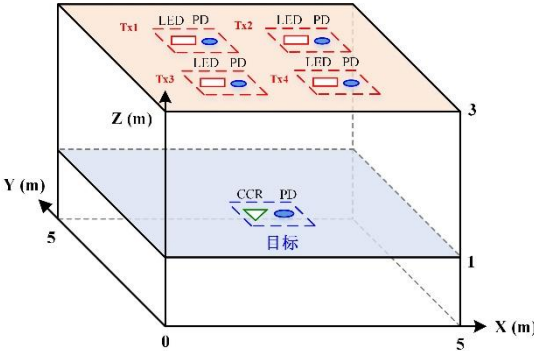


图 10 室内场景 RO-ISAC 系统示意图^[18]

5.2 无人机场景

图 11 展示了面向无人机场景的 RO-ISAC 系统示意图^[19]，其中每架无人机均搭载一个光源和一个 PD，而目标则配备一个 CCR 和一个 PD。目标通过 PD 接收来自无人机的光信号，以实现通信功能。同时，CCR 用于将光信号逆反射回无人机，每架无人机通过 PD 检测反射信号以进行距离估计，并利用四个估计距离计算目标的三维位置。为了进一步提高无人机场景 RO-ISAC 系统的通信和感知性能，可在无人机上装备由 LED 阵列组成的角度分集发射机（Angle Diversity Transmitter, ADT），以增强边缘覆盖区域的通感信号强度，从而提升整体通感性能。

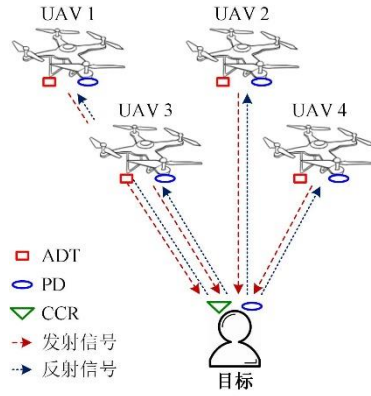


图 11 无人机场景 RO-ISAC 系统示意图^[19]

5.3 水下场景

图 12 展示了面向水下场景的 RO-ISAC 系统示意图^[20]，其中着重考虑了 CCR 的有限视场角（Field Of View, FOV）以及水下湍流对系统通信和感知性能的影响。针对 CCR 的 FOV 有限问题，设计了一种新型的角度分集 CCR 阵列，该阵列由一个中心 CCR 单元和若干个呈圆周分布于中心 CCR 单元周围的边 CCR 单元所组成。结果表明，角度分集 CCR 阵列结构能够有效增大目标侧逆反射的等效 FOV，从而显著扩大水下 RO-ISAC 系统的有效感知范围。此外，角度分集 CCR 阵列中边 CCR 单元的倾角存在最佳区间，并且最佳倾斜角度区间与随之接收光信号入射角度的增大而整体变大。针对水下湍流问题，通过仿真分析发现，水下湍流对基于 OFDM 波形的 RO-ISAC 系统通信性能和测距性能的影响明显不同。当存在水下湍流时，OFDM 波形的幅度会出现随机波动，从而降低接收信噪比，造成通信性能恶化，但是 OFDM 波形幅度的随机波动不会改变波形的相关性，因此不会改变测距性能。

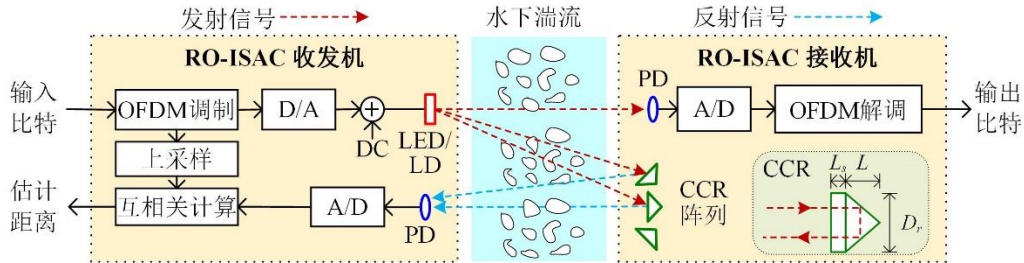


图 12 水下场景 RO-ISAC 系统示意图^[20]

6 结束语

本文系统综述了 RO-ISAC 系统的信道建模、融合波形设计、双向传输和 6G 典型场景应用等方面的最新研究进展。在信道建模方面，分别介绍了点光源模型和面光源模型这两种具有代表性的感知信道模型；在融合波形设计方面，分别介绍和对比了 PSS-PPM 波形、融合 PAM 波形、限幅 OFDM 波形、混合 PAM/OFDM 波形和 OFDM 内嵌 MLS 波形；在双向传输方面，分别介绍了时分双工（半双工）和波分双工（全双工）等两种双工方式；在场景应用方面，分别介绍了室内、无人机和水下等三个典型 6G 应用场景。

虽然 RO-ISAC 系统的相关关键技术已经得到了一定程度的研究和探索，但是仍然存在诸多技术难题和挑战有待进一步解决。针对 RO-ISAC 系统存在的多用户联合通感、通感能三者融合、以及 RO-ISAC 系统在实际场景中的应用等问题，可以从如下几个方面展开研究：

1) 多目标联合通感。目前关于 RO-ISAC 系统的研究主要考虑单目标情况，然而实际应用场景中可能需要同时服务多个目标，传统的多址接入技术在多目标 RO-ISAC 系统中可能

无法取得理想性能, 因此需要考虑如何对多用户接入和多目标感知进行联合设计。

2) 通感能三者融合。在当前的 RO-ISAC 系统架构中, 可以进一步引入太阳能电池或光伏板来实现基于无线光传输的通信、感知与传能三个功能的融合统一^[21], 重点研究通感能融合系统中的融合波形设计、多功能融合信号接收机结构、以及融合系统多维度资源分配、调度与优化算法等。

3) RO-ISAC 系统实际应用。6G 空天地海等实际应用场景对 RO-ISAC 系统性能提出了更高的要求, 例如室内场景中光路阻挡和多径干扰、无人机场景中无人机和目标的高移动性、以及水下场景中光信号较大的传输衰减等, 如何符合实际应用要求是需要深入研究和不断探索的课题。

随着 6G 的不断发展和推进, 本文所介绍的 RO-ISAC 技术也将迎来新的发展机遇, 同时支持大容量通信和高精度感知的 RO-ISAC 系统将在 6G 空天地海不同场景发挥积极作用, 其发展前景十分广阔。

参考文献:

- [1] WANG C X, YOU X, GAO X, et al. On the road to 6G: Visions, requirements, key technologies, and testbeds[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2023, 25 (2) : 905-974.
- [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.
- [3] LIU F, CUI Y, MASOUIROS 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.
- [4] 徐金雷, 赵俊渥, 卢华兵, 等. 面向 6G 的多维扩展通感一体化研究综述[J]. 电子与信息学报, 2024, 46 (5): 1672-1683.
- [5] GONZALEZ-PRELCIC N, KESKIN MF, KALTIOKALLIO O, et al. The integrated sensing and communication revolution for 6G: Vision, techniques, and applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2024, 112 (7) : 676-723.
- [6] LIANG C, LI J, LIU S, et al. Integrated sensing, lighting and communication based on visible light communication: A review[J]. Digital Signal Processing, 2024 (145) : 104340.
- [7] CHI N, ZHOU Y, WEI Y, et al. Visible light communication in 6G: Advances, challenges, and prospects[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2020, 15 (4) : 93-102.
- [8] 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.
- [9] YANG H, ZHONG W, CHEN C, et al. Integration of visible light communication and positioning within 5G networks for Internet of Things[J]. IEEE Network, 2020, 34 (5) : 134-140.
- [10] ZHANG S, DU P, YANG H, et al. Recent progress in visible light positioning and communication systems [Invited][J]. IEICE Transactions on Communications, 2023, E106.B (2) : 84-100.
- [11] CHEN C, ZENG Z. Visible light positioning and its integration with visible light communication[M]. In: Yu, K., Lohan, ES., Oppermann, I. (eds) Handbook of Wireless Positioning. Springer, Singapore, 2025.
- [12] 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.
- [13] 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.

- [14] 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.
- [15] WANG H, CHEN C, ZENG Z, et al. Bidirectional retroreflective optical ISAC using time division duplexing and clipped OFDM[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2025, 37 (10) : 587-590.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] WANG H Wang, ZENG Z, CHEN C, et al. Retroreflective optical ISAC supporting 3D positioning in indoor environments[C]//Proceedings of the Asia Communications and Photonics Conference/Information Photonics and Optical Communications (ACP/IPOC), November 2-5, 2024, Beijing, China. 2024: 1-5.
- [19] WANG W, WANG H, ZENG Z, et al. UAV-aided flying retroreflective optical ISAC with angle diversity transmitters[C]//Proceedings of the OptoElectronics and Communications Conference/International Conference on Photonics in Switching and Computing (OECC/PSC), June 29-July 3, 2025, Sapporo, Japan.
- [20] 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.
- [21] CHU T, YE J, CHEN C, et al. Revolutionizing 6G: Experimental validation of an optical integrated communication, sensing, and power transfer system[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2025.