

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:为突破射频通感一体化(ISAC)系统的带宽瓶颈并提升光无线通信的传输距离与感知精度,系统研究了逆反射光通感一体化(RO-ISAC)系统,重点围绕信道建模、波形设计与双向传输机制展开分析。通过建立点光源与面光源感知信道模型,设计了脉冲序列感知-脉冲位置调制(PSS-PPM)、融合脉冲幅度调制(PAM)、限幅正交频分复用(OFDM)等多种通感融合波形,并提出了基于时分双工与波分双工的双向传输方案以抑制干扰。研究结果表明,RO-ISAC系统在室内、无人机及水下等多种典型场景中均可实现高精度感知与大容量通信,具备良好的应用前景。

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 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2025)05-0015-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.05.003

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: To break through the bandwidth bottleneck of radio-frequency integrated sensing and communication (ISAC) systems and improve the transmission distance and sensing accuracy of optical wireless communication, this paper systematically investigates the retroreflective optical integrated sensing and communication (RO-ISAC) system, focusing on its channel modeling, waveform design, and bidirectional transmission. By establishing sensing channel models for both point light sources and surface light sources, various integrated sensing and communication waveforms are designed, including pulse sequence sensing-pulse position modulation (PSS-PPM), fused pulse amplitude modulation (PAM), and clipped orthogonal frequency division multiplexing (OFDM). Additionally, bidirectional transmission schemes based on time-division duplex and wavelength-division duplex are proposed to mitigate interference. The results demonstrate that the RO-ISAC system can achieve high-precision sensing and high-capacity communication in various typical scenarios such as indoor environments, unmanned aerial vehicles, and underwater applications, showing promising potential for practical deployment.

Key words: retroreflective optical integrated sensing and communication, channel modeling, waveform design, bidirectional transmission

0 引言

随着第六代移动通信(6G)系统对大容量通信与

收稿日期:2025-07-21。

基金项目:国家自然科学基金项目(62271091)资助;重庆市自然科学基金项目(cstc2021jcyj-msxmX0480)资助;中央高校基本科研业务费项目(2024CDJXY020)资助。

作者简介:陈晨(1988—),男,博士,研究员。本硕均就读于电子科技大学,博士毕业于新加坡南洋理工大学,现任职于重庆大学微电子与通信工程学院,主要从事无线光通信、光传感及光通感一体化等方面的研究工作。



高精度感知一体化需求的日益增长,物联网、智能交通、人机交互及环境监测等新兴应用对多功能融合无线传输技术提出了更高要求。通感一体化(ISAC)作为6G关键使能技术之一,近年来受到广泛关注^[1-2]。现有研究多集中于射频(RF)频段的ISAC系统,然而频谱资源紧张,严重限制了RF-ISAC在通感性能方面的进一步提升^[3-4]。为突破带宽瓶颈,研究者将目光转向光频段,提出了基于可见光与红外光的无线光ISAC(O-ISAC)系统,充分利用光频段的丰富频谱资源,支撑更大容量通信与更高精度感知^[5-6]。为进一步克服光漫反射导致的传输距离限制,逆反射光通感一体化

陈晨,王伟任,万欣,等: 逆反射光通感一体化系统研究进展

(RO-ISAC)系统被提出,其通过逆反射模块增强回波信号,显著扩展了有效通感距离^[7]。

尽管已有研究在可见光通信与定位(VLCP)一体化等方面取得了一定进展,但仍存在频谱利用效率不高、系统结构复杂等问题^[8-10]。相比之下,RO-ISAC能够在同一频带实现通信与感知功能,具备更高的频谱效率和更低的硬件复杂度^[7]。然而,由于光无线传输普遍采用强度调制/直接检测(IM/DD)方式,传统RF-ISAC的技术方案无法直接迁移。此外,逆反射链路带来了信道特性的显著变化,系统的通感融合波形设计、上下行传输机制等关键问题仍待深入探索,其在多种典型场景下的应用潜力也需系统评估。

本文旨在系统梳理RO-ISAC系统的最新研究进展,重点从信道建模、波形设计和双向传输3个核心方面进行分析,并探讨其在室内、无人机及水下等场景的应用前景,最后对该技术的未来发展方向作出展望。

1 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^[7]。

在目标端,到达的下行信号由光电探测器(PD)接收并转换为模拟信号,经模/数转换器(ADC)后形成数字信号,最终通过下行解调恢复为下行输出比特。同时,目标收发机配备逆反射模块(如角立方反射器,CCR),将接收到的下行光波沿原路反射回RO-ISAC收发端,使其可利用回波实现感知功能。此外,上行输入比特经过上行调制、D/A转换与添加DC偏置后,驱动上行链路光源发光。

在RO-ISAC收发端,首先对下行输入比特进行下行调制,生成系统所需的通感融合波形,再通过数/模转换器(DAC)得到待传输的模拟信号;为适配下行链路发光二极管(LED)或激光二极管(LD)光源的IM/DD特性,通常需为模拟信号添加额外直流(DC)偏置,以

确保光源驱动信号的非负性。该端PD同时接收上行信号与下行反射信号,经ADC转换后得到数字信号,该信号一方面通过上行解调获取上行输出比特,另一方面用于执行互相关运算以实现感知输出。以点对点距离感知(测距)为例,RO-ISAC收发端利用回波信号 $y(n)$ 与上采样后的发射信号 $x(n)$ 进行互相关计算,从而估计光波往返飞行时间 $\hat{\tau}$,其表达式为

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

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 $\hat{\tau}$,可进一步计算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。

基于点对点架构的RO-ISAC系统可实现收发端与目标端之间的测距功能。除一维测距外,该系统还可扩展至二维/三维定位与测速等更复杂的感知任务。实现二维/三维定位通常需在系统中部署多个RO-ISAC收发端,通过获取各收发端与目标端的距离估计,联合解算目标位置。测速功能则可通过估计目标在特定时间范围内的位置变化,结合移动距离与时间间隔推算其运动速度。

2 信道建模

与传统无线光通信(WOC)系统相比,RO-ISAC系统不仅包含上下行通信链路,还具备一条额外的逆反射感知链路,因此需对该感知链路进行精确的信道建模。窄波束LD与宽波束LED是常用的2类光源,以下分别针对LED/LD介绍对应的点光源与面光源感知信道模型。

2.1 点光源感知信道模型

在面向RO-ISAC系统的点光源感知信道模型中,光束半功率角较小,光信号更集中,适用于基于精准捕获、跟踪与对准(ATP)机制的远距离定向传输系统。该模型结构如文献[7]中图2(a)所示。

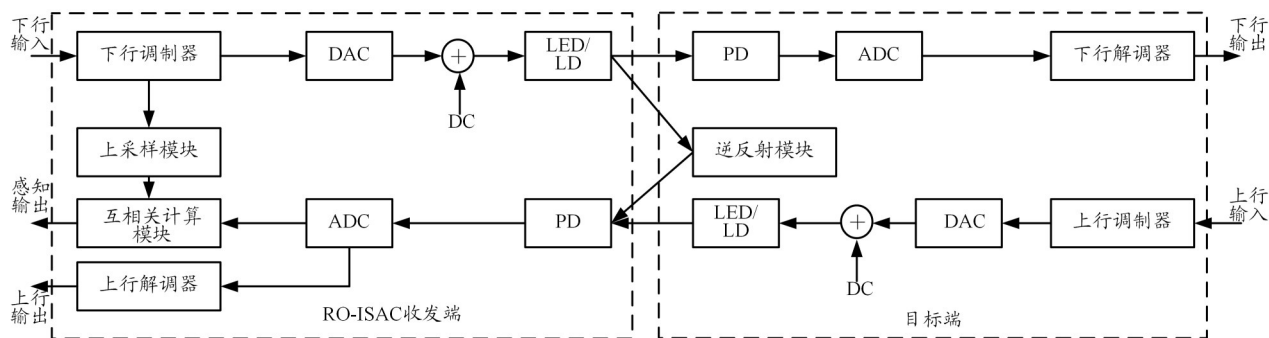


图1 RO-ISAC系统原理图

点光源模型下的感知信道增益^[7]可表示为

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

其中, d 为待估计的传输距离, φ 为光信号发射角, θ 为目标侧入射角, $m = -\ln 2 / \ln(\cos \Psi)$ 为朗伯辐射阶数, Ψ 为 LED 的半功率角, A 和 ρ 分别为 PD 的有效探测面积和探测灵敏度, k 为目标侧 CCR 的反射率, Φ_R 为目标侧 CCR 的半视场角, Φ_s 为收发器侧 PD 的半视场角。由于感知信道中光信号需逆反射回收发端 PD, 信道增益中额外引入 $\cos^{m+1}\varphi$ 项, 同时因光信号经历往返传输, 传输距离扩展为 $2d$ 。

2.2 面光源感知信道模型

在面向 RO-ISAC 系统的面光源感知信道模型中, 光束半功率角较大, 光信号更发散, 适用于基于大面积 LED 面板光源的近距离覆盖式传输系统。该模型结构如文献[7]中图 2(b) 所示, 相关参数定义与点光源模型一致。

受 CCR 器件有限视场范围的限制, LED 面板光源所发射的光波中仅有一部分能被 CCR 逆反射回收发端。因此, 在计算面光源感知信道增益时, 需额外考虑 LED 面板中有效反射面积的比例。设 $\xi(\varphi, \theta)$ 表示 CCR 视场范围内 LED 光源的有效反射面积比例, 则面光源模型下的感知信道增益^[7]可表示为

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

假设 PD 嵌入在面光源中心, 并以 A_{light} 和 A_{pd} 分别表示面光源的总面积和 PD 的面积, 则 LED 面板在 CCR 视场范围内的有效反射面积比例可计算为

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

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:

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

其中, r 表示一个由 CCR 和 PD 联合决定的系数 ($r =$

$D - L_{\text{pd}}/2$), 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。

2 种感知信道模型的特点及适用场景对比情况如表 1 所示^[10]。可以看出, 点光源模型适用于光信号集中、传输距离较远的定向系统, 而面光源模型更适用于光信号发散、覆盖范围较小的近距系统。

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
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
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

3 通感融合波形设计

RO-ISAC 系统的通信与感知性能在很大程度上取决于所采用的通感融合波形, 因此设计高性能的融合波形对系统至关重要。通感融合波形可分为 3 类: 以通信性能为主的波形、以感知性能为主的波形, 以及兼顾通信与感知性能的波形。以通信为主的波形主要包括脉冲幅度调制 (PAM) 和正交频分复用 (OFDM) 等传统通信波形, 在保障通信性能的同时兼顾感知功能; 以感知为主的波形则多采用相关性优良的脉冲波形, 在实现高精度感知的同时支持低速数据传输; 而通感折中的波形可通过动态调整波形参数, 灵活平衡通信与感知性能, 适用于服务需求动态变化的 RO-ISAC 系统。针对上述 3 类通感融合波形, 近年来研究者提出了多种具体实现方案。以下将重点介绍几种具有代表性的波形设计。

3.1 PSS-PPM 波形

脉冲序列感知-脉冲位置调制 (PSS-PPM) 波形结构如文献[11]中图 2 所示。该波形采用单极性伪随机噪声 (PN) 码作为脉冲序列进行感知。PN 码具有近似理想的自相关特性, 有利于实现高精度感知。通信功能则通过从多个时隙中选择部分时隙传输 PSS 符号实现, 具有较高的能量效率。

3.2 融合 PAM 波形

基于脉冲的融合 PAM 波形结构如文献[12]中图 3 所示。由 M 个幅度不同的脉冲组成。通信性能随符号间幅度差异增大而提升, 感知性能则随平均功率提高而增强。在发射机峰值功率约束下, 需对幅度差异与平均功率进行权衡, 从而对该波形进行优化。

3.3 限幅 OFDM 波形

除脉冲类波形外,多载波 OFDM 也是一种常用的通感融合波形。与 PAM 相比,OFDM 可采用正交振幅调制(QAM)类的二维星座传输数据,通信性能更优。由于 OFDM 具有较高的峰均功率比(PAPR),对其时域波形进行限幅处理可有效降低 PAPR,从而改善传输性能。

随着限幅比(CR)逐渐减小,限幅 OFDM 波形的幅度波动显著降低,整体形态更接近脉冲。已有研究表明^[13],在通信方面存在一个最优 CR 值使误码率最低;而在感知方面,测距误差随 CR 降低而减小。因此,可通过调整 CR 实现通信与感知性能之间的折中。

3.4 混合 PAM/OFDM 波形

鉴于 PAM 波形通常感知性能更优,而 OFDM 波形通信性能更好,本文作者团队提出了一种混合 PAM/OFDM 通感融合波形^[14]。该波形由 PAM 符号与 OFDM 符号按一定比例在时域组合生成。通过将 PAM 信号的时域上采样倍数与 OFDM 信号的频域上采样倍数设为一致,可保证在相同调制阶数下通信速率不变,且不随混合比例改变。

不同混合比例 α 下的波形示意图如文献[14]中图 2 所示。当 $\alpha=0$ 时,波形为纯 OFDM;当 $\alpha \rightarrow \infty$ 时,则为纯 PAM。研究显示,PAM 波形具有更优的互相关性能。通过调节 PAM 与 OFDM 符号的混合比例,可实现通信与感知性能的灵活权衡。

3.5 OFDM 内嵌最大长度序列(MLS)波形

考虑到 PAM 和 OFDM 均以通信为主,基于它们设计的融合波形在感知方面仍有局限。与通信波形相比,MLS 具有强相关特性的感知波形可与通信波形有效融合,从而同时实现优越的通感性能。

OFDM 内嵌 MLS 波形结构如文献[15]中图 2 所示。该结构通过将双极性零均值 OFDM 信号与双极性 MLS 信号叠加,形成新型融合波形;调整 MLS 与 OFDM 信号的功率分配比 P_{MLS}/P_{OFDM} ,可生成介于 OFDM 与 MLS 之间的融合信号,进而实现通感性能的灵活折中。

各类通感融合波形的优缺点对比情况如表 2 所示。可以看出,基于脉冲的 PSS-PPM 和融合 PAM 波形在通信能力方面较弱,而限幅 OFDM 和混合 PAM/OFDM 波形在感知性能方面存在不足。相比之下,OFDM 内嵌 MLS 波形能够实现较好的通感折中,但其缺点在于 MLS 本身无法用于传输额外通信数据。

4 双向传输

面向实际应用的 RO-ISAC 系统通常需支持包含

表 2 通感融合波形的优缺点对比

波形	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	[11]
融合 PAM	复杂度较低	通信与感知能力均一般	[12]
限幅 OFDM	通信能力较强	感知能力较弱	[13]
混合 PAM/OFDM	一定程度的通感性能折中	感知能力较弱	[14]
OFDM 内嵌 MLS	较好的通感性能折中	MLS 无法传输额外数据	[15]

下行与上行链路的双向信号传输,以实现收发端与目标端之间的信息交互。与传统双向 WOC 系统不同,RO-ISAC 系统中上行链路的 PD 将同时接收来自目标端的上行信号以及经逆反射模块反射回的下行信号,从而在收发端引入双向传输干扰。为实现可靠的双向传输,必须对该干扰进行有效抑制。

4.1 基于时分双工(TDD)的双向传输

作为经典的双工方式之一,TDD 通过在时间上对上下行信号进行复用,可避免 RO-ISAC 收发端出现双向干扰,从而支持系统实现双向传输。基于 TDD 与限幅 OFDM 波形的双向 RO-ISAC 系统结构如文献[13]中图 1 所示,其帧结构如图 1(b)所示。整个时间帧被划分为 3 个时段:下行时段 T_{down} 、上行时段 T_{up} 和保护间隔(GI)时段 T_{GI} 。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_{bits}^{down} 和 N_{bits}^{up} 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

$$R = \frac{N_{bits}^{down} + N_{bits}^{up}}{T_{down} + T_{up} + T_{GI}} \quad (6)$$

由式(6)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,文献[13]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 $T_{FCI} = d_{max}/c$ 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小于最大测距距离 d_{max} ,因此选用长度为 T_{FCI} 的固定 GI 将无可避免地造成时间资源浪费,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,文献[13]进一步设计了一种自适应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_{FCl} 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(WDD)的双向传输

尽管TDD可实现RO-ISAC系统的双向传输,但其仅支持半双工模式,上下行不能同时传输,限制了系统总速率。为提升数据速率,需设计支持全双工的双向传输方案。

基于WDD与混合PAM/OFDM波形的双向RO-ISAC系统结构如文献[14]中图1所示。该方案中,上下行链路采用不同波长的光载波传输数据以克服干扰。具体而言,下行链路使用蓝光LED(BLED)作为光源,上行链路采用绿光LED(GLED)。在RO-ISAC收发端,通过蓝光滤波器(BOF)和绿光滤波器(GOF)从接收到的混合光信号中分别提取蓝光与绿光成分。蓝光信号用于后续互相关计算实现测距,绿光信号则用于上行数据解调。由于蓝、绿光信号可被相应滤波器有效分离,基于WDD的RO-ISAC系统可在抑制双向干扰的同时实现全双工传输,显著提高系统总数据速率。

2种双向传输方案的特点如表3所示。可以看出,TDD仅支持半双工传输,而WDD可实现全双工。相比TDD,WDD能够提供更高的系统总数据速率,但需引入额外的光学滤波器件。

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
TDD	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	[13]
WDD	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	[14]

5 应用场景

RO-ISAC系统兼具通信容量大与感知精度高的

优势,在6G空地海一体化网络中具有广泛的应用潜力,可为未来网络提供高速率通信与高精度感知能力。以下简要介绍该系统在室内、无人机及水下3种典型场景中的应用。

5.1 室内场景

面向室内应用的RO-ISAC系统结构如文献[16]中图3所示。系统包含多个部署于天花板的LED/PD收发模块,以及位于室内接收平面、配备CCR逆反射模块的目标终端。目标终端通过CCR将下行光波原路反射回天花板模块,实现被动定位。室内场景中,天花板上的收发模块位置固定,目标终端可在接收平面内自由移动。通过各收发模块对目标终端距离的估计,可基于线性最小二乘算法解算其在接收平面上的具体位置。

5.2 无人机场景

无人机场景下的RO-ISAC系统结构如文献[17]中图1所示。每架无人机搭载一个光源与一个PD,目标终端则配备CCR及PD。目标通过PD接收无人机发射的光信号以获取通信数据,并利用CCR将光信号反射回无人机。各无人机通过PD接收反射信号进行距离估计,结合4个距离观测值可计算目标的三维位置。为进一步提升系统通感性能,可在无人机上配置由LED阵列构成的角度分集发射机(ADT),以增强边缘区域信号强度,从而改善通信与感知的整体表现。

5.3 水下场景

水下RO-ISAC系统结构如文献[18]中图1所示,需重点考虑CCR有限视场角(FOV)及水下湍流对系统性能的影响。针对CCR视场有限的问题,文献[18]设计了一种角度分集CCR阵列结构,该阵列由一个中心CCR单元和多个环绕分布的边缘CCR单元组成。研究表明,该结构可有效扩展目标侧逆反射的等效FOV,显著增大系统的有效感知范围。此外,边缘CCR单元的最优倾斜角度区间随接收光信号入射角的增大而相应增加。

针对水下湍流的影响,仿真分析表明,湍流对基于OFDM波形的RO-ISAC系统通信与感知性能的影响具有差异:湍流引起OFDM信号幅度随机波动,导致接收信噪比下降、通信性能恶化;然而,这种波动不影响波形相关性,因此测距性能保持不变。

6 结束语

本文系统综述了RO-ISAC系统在信道建模、融合波形设计、双向传输机制及6G典型场景应用等方面的

陈晨,王伟任,万欣,等: 逆反射光通感一体化系统研究进展

最新研究进展。在信道建模部分,分别阐述了点光源与面光源2类代表性感知信道模型;在波形设计方面,详细介绍并对比了PSS-PPM、融合PAM、限幅OFDM、混合PAM/OFDM及OFDM内嵌MLS等多种通感融合波形;在双向传输方面,分析了基于TDD(半双工)和WDD(全双工)2种模式的传输机制;在应用方面,探讨了室内、无人机与水下3类6G典型应用场景中的系统部署与性能特点。

尽管RO-ISAC系统的若干关键技术已得到初步研究与探索,但是仍存在诸多技术难题与挑战亟待解决。面向该系统在多用户联合通感、通感能一体化融合及实际场景应用等方面的问题,未来可从以下方向展开深入研究:

1)多目标联合通感:现有研究多集中于单目标场景,然而实际应用中常需同时服务多个目标。传统多址接入技术在多目标RO-ISAC系统中可能难以实现理想性能,因此需探索多用户接入与多目标感知的联合设计机制。

2)通感能一体化融合:可在现有RO-ISAC架构中引入太阳能电池或光伏器件,实现通信、感知与能量传输的功能融合。应重点研究通感能融合波形设计、多功能一体化接收机结构,以及系统在多维资源分配、调度与优化方面的算法。

3)RO-ISAC系统的实际应用:6G空天地海一体化场景对系统性能提出更高要求,例如室内环境中的光路遮挡与多径干扰、无人机场景的高机动性要求,以及水下光信号的高衰减特性等。如何使系统设计贴合实际应用需求,是值得持续探索的重要课题。

随着6G技术的不断推进,RO-ISAC作为同时支持大容量通信与高精度感知的新型传输架构,将在空天地海多种场景中发挥关键作用,其发展前景广阔且充满潜力。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 徐金雷,赵俊涅,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.
- [3] 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.

- [4] 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): 104340-1-104340-21.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] CHEN C, ZENG Z. Visible light positioning and its integration with visible light communication[M]. Singapore: Springer, 2025.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] DU J, CHEN C, ZENG Z, et al. Flexible waveform design for RO-ISAC based on OFDM-embedded maximum length sequence[EB/OL]. (2025-07-28)[2025-07-30]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11098738>.
- [16] WANG H Wang, ZENG Z, CHEN C, et al. Retroreflective optical ISAC supporting 3D positioning in indoor environments[C]//The Asia Communications and Photonics Conference/Information Photonics and Optical Communications (ACP/IPOC), November 2-5, 2024, Beijing, China. Beijing: IEEE, 2024: 1-5.
- [17] WANG W, WANG H, ZENG Z, et al. UAV-aided flying retroreflective optical ISAC with angle diversity transmitters[C]//The OptoElectronics and Communications Conference/ International Conference on Photonics in Switching and Computing (OECC/PSC), June 29-July 3, 2025, Sapporo, Japan. Sapporo: IEEE, 2025: 1-4.
- [18] 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): 32-38.