

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.250103.

专题:海洋通信与传感网络

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 C, Ye Y, et al. Performance Investigation of Underwater Retroreflective Optical Integrated Sensing and Communication System [J]. Study on Optical Communications, 2025(4): 250103.

水下逆反射光通感一体化系统性能研究(特邀)

万欣¹,王浩川¹,叶洋¹,曾志宏¹,刘敏¹,冷敏²,陈晨¹

(1. 重庆大学 微电子与通信工程学院,重庆 400030; 2. 成都前锋电子仪器有限责任公司,成都 610000)

摘要:【目的】基于光波的逆反射光通感一体化(RO-ISAC)系统具有通信容量大和感知精度高的优势,能够为日益频繁的水下活动提供通信和感知能力。然而,水下RO-ISAC系统中角立方反射器(CCR)的有限视场角(FOV)严重限制了系统的有效感知范围,如何增大CCR的FOV来扩大系统有效感知范围是一个亟待解决的课题。另外,水下湍流对RO-ISAC系统通信与感知性能的影响也有待进一步探究。【方法】针对CCR的FOV有限问题,文章提出了一种基于角度分集结构的CCR阵列方案,该阵列由一个中心CCR单元和若干个呈圆周分布的边CCR单元组成,各个边CCR单元具有一定的倾斜角度。在基于角度分集CCR阵列的水下RO-ISAC系统中,采用正交频分复用(OFDM)作为通感融合波形,并通过Matlab软件仿真研究了该系统在水下湍流信道中的通信与感知性能。【结果】仿真结果表明,在相同等效反射面积情况下,角度分集CCR阵列能够显著增大CCR的FOV,并且随着角度分集CCR阵列中边CCR单元数量的增加,等效FOV随之增大,水下RO-ISAC系统的感知(即测距)性能也随之变好。同时,角度分集CCR阵列中边CCR单元的倾斜角度存在最佳区间,并且最佳倾斜角度区间与光信号的入射角度相关。另外,在基于OFDM通感融合波形的水下RO-ISAC系统中,水下湍流对系统的通信误码率(BER)性能影响较大,湍流越强,BER性能越差,而水下湍流对系统的测距性能并无明显影响。【结论】文章所提角度分集CCR阵列能够显著扩大水下RO-ISAC系统的有效感知范围,提升系统感知精度,同时,基于OFDM通感融合波形的水下RO-ISAC系统能够有效克服水下湍流对感知性能的不利影响。

关键词:角立方反射器阵列;水下湍流;正交频分复用;逆反射光通感一体化

中图分类号:TN929

文献标志码:A

Performance Investigation of Underwater Retroreflective Optical Integrated Sensing and Communication System

WAN Xin¹, WANG Haichuan¹, YE Yang¹, ZENG Zhihong¹, LIU Min¹, LENG Min², CHEN Chen¹

(1. School of Microelectronics and Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Chengdu Qianfeng Electronic Instrument Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract:【Objective】Lightwave-based Retroreflective Optical Integrated Sensing and Communication (RO-ISAC) systems have the advantages of large communication capacity and high sensing accuracy, which can offer communication and sensing capabilities for the underwater activities. However, the limited Field of View (FOV) of the Corner Cube Reflector (CCR) in underwater RO-ISAC systems greatly limits the effective sensing range of the system. Hence, how to increase the FOV of the CCR to expand the effective sensing range of the system is a subject that needs to be solved urgently. Moreover, the impact of underwater turbulence on the communication and sensing performance of the RO-ISAC system also remains to be further explored. 【Methods】For the limited FOV issue of the CCR, we propose a CCR array scheme based on an angle diversity structure. The proposed angle diversity CCR array consists of a central CCR unit and multiple side CCR units distributed in a circle, where each side CCR unit has a certain tilt angle. In the underwater RO-ISAC system based on the angle diversity CCR array, Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) is adopted as the ISAC waveform, and the communication and sensing performance of the RO-ISAC system in the underwater turbulence channel is studied through Matlab software simulation. 【Results】Simulation results show that, under the condition of the same equivalent reflection area, the angle diversity CCR array can significantly increase the FOV of the CCR. Moreover, as the number of side CCR units in the angle diversity CCR array increases, the equivalent FOV also increases, and the sensing (i. e., ranging) performance of the underwater RO-ISAC system improves accordingly. At the same time, there is an optimal interval for the tilt angle of the side CCR units in the angle diversity CCR array, which is highly related to the incident angle of the optical signal. In addition, in the underwater RO-ISAC system based on the OFDM waveform, underwater turbulence has a great impact on the Bit Error Rate (BER) performance of the system. When the turbulence is stronger, the BER performance is worse. In contrast, underwater turbulence has no obvious impact on the ranging performance of the system. 【Conclusion】The proposed angle diversity CCR array can significantly expand the effective sensing range of the under-

收稿日期:2025-03-30; 修回日期:2025-04-16; 纸质出版日期:2025-08-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62271091);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:万欣(1984—),男,湖北武汉人。博士,主要研究方向为水下光通信和光通感一体化。

通信作者:冷敏,工程师。E-mail: lengmin@126.com

陈晨,研究员。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.

water RO-ISAC system and improve the sensing accuracy. At the same time, the underwater RO-ISAC system based on the OFDM waveform can effectively overcome the adverse effects of underwater turbulence on the sensing performance.

Key words: CCR array; underwater turbulence; OFDM; RO-ISAC

0 引言

随着海洋勘探等水下活动的日益频繁,第六代移动通信技术(6th Generation Mobile Communication Technology, 6G)无线通信网络覆盖范围需要拓宽至水下海洋环境^[1-3]。鉴于水下无线光通信(Underwater Optical Wireless Communication, UOWC)在通信带宽和传输容量等方面的优势,研究人员针对 UOWC 系统中的信号传输^[4]、湍流抑制^[5]和信号识别^[6]等课题开展了大量研究。除了通信之外,水下活动的顺利开展也离不开对水下人员和设备等目标的距离和位置等信息的精准感知。作为 6G 潜在核心技术之一,通感一体化(Integrated Sensing and Communication, ISAC)能够同时为目标提供通信和感知服务,在近年来受到了国内外研究人员的广泛关注^[7-8]。基于光波频段的光通感一体化(Optical Integrated Sensing and Communication, OIS-AC)系统具有传输容量大和感知精度高的优势,逐渐成为当前的研究热点^[9-14]。为了有效增强目标侧的光波反射,研究人员进一步提出了逆反射光通感一体化(Retroreflective Optical Integrated Sensing and Communication, RO-ISAC)技术来扩展系统感知范围,提高感知精度^[15-17]。

与自由空间信道相比,水下信道更为复杂多变,水下湍流不仅会导致 RO-ISAC 系统上下行设备之间光路偏移,还会引起接收信号幅值的深度衰落。针对水下湍流的影响,本文首先提出了基于角度分集角立方反射器(Corner Cube Reflector, CCR)阵列的水下 RO-ISAC 系统,然后进一步研究了该系统

在水下湍流信道中的通信与感知性能。

1 水下 RO-ISAC 系统原理

本文所提水下 RO-ISAC 系统的原理如图 1 所示,该系统由一个 RO-ISAC 收发机和一个 RO-ISAC 接收机组成。在 RO-ISAC 收发机中,输入比特经过正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)调制生成实值 OFDM 时域数字信号。所生成的数字信号经过数/模(Digital-to-Analog, D/A)转换且添加直流偏置(Direct Current, DC)后驱动发光二极管(Light Emitting Diode, LED)或激光二极管(Laser Diode, LD)发射光信号。光信号经过水下湍流信道传输后,被 RO-ISAC 接收机的光电探测器(Photo Director, PD)所接收,经过模/数(Analog-to-Digital, A/D)转换和 OFDM 解调得到输出比特,完成通信过程。RO-ISAC 接收机所接收到的通信信号的信道增益 h_c 为^[15]

$$h_c = \frac{(m+1)A_c\rho_c}{2\pi d^2} \cos^m \varphi \kappa(\theta) \cos \theta, \quad (1)$$

式中: $m = -\ln 2 / \ln(\cos \Psi)$ 为 LED 或 PD 光源的朗伯系数, Ψ 为光源的半功率半角; A_c 和 ρ_c 分别为 RO-ISAC 接收机通信链路中 PD 的有效面积和响应系数; d 为 RO-ISAC 收发机与接收机之间的距离; φ 为辐射角; θ 为入射角; $\kappa(\theta)$ 为接收光学系统增益。因此, RO-ISAC 接收机所接收到的通信信号 y_c 可表示为

$$y_c = h_c x + w_c, \quad (2)$$

式中: x 为 RO-ISAC 收发机所发出的 OFDM 信号; w_c 为 RO-ISAC 接收机端的加性白噪声。

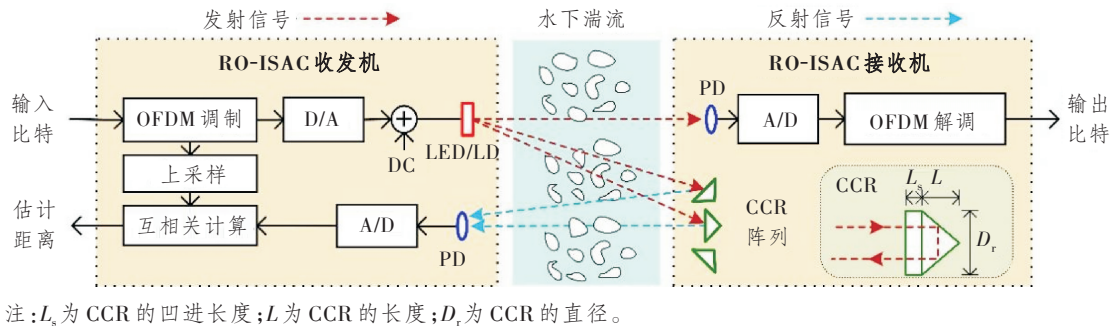


图 1 水下 RO-ISAC 系统原理图

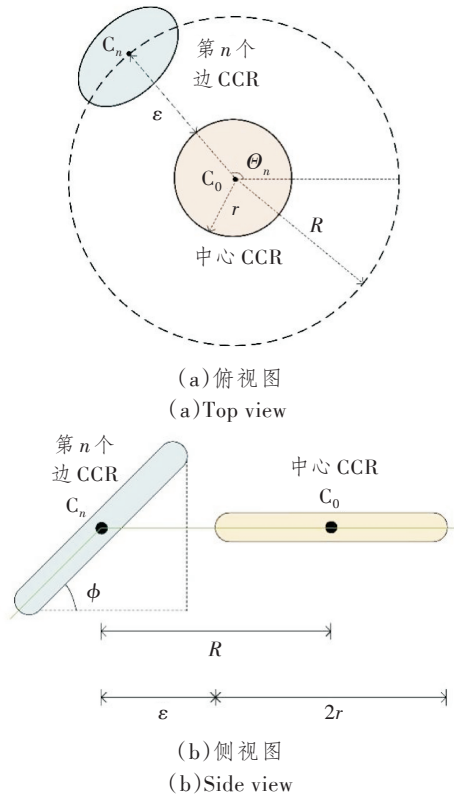
Figure 1 Schematic diagram of the underwater RO-ISAC system

为了实现测距功能,在 RO-ISAC 接收机处放置一个角度分集 CCR 阵列。光信号传输至 RO-

ISAC 接收机时也会被角度分集 CCR 阵列以逆反射的形式反射回 RO-ISAC 收发机,被阵列中不同

CCR 单元逆反射回去的多个反射光信号会在 RO-ISAC 收发机的 PD 处合并,并被其探测接收。考虑到 RO-ISAC 收发机中 A/D 转换过程中的上采样操作所探测到的反射信号经过 A/D 转换后会与上采样后的原始 OFDM 信号进行互相关计算,从而得到当前系统实际传输距离的估计值^[15]。假设 RO-ISAC 收发机中 A/D 转换的采样率为 S ,则 RO-ISAC 收发机的测距精度 Δd 可表示为 $\Delta d = c/2S\mu$,式中: c 为真空中的光速; μ 为水的折射率。假设在测距过程中一共采用 W 个采样点进行互相关计算,则对应的测距量程为 $d_{\max} = \Delta d(W-1) = c(W-1)/2S\mu$ 。

本文所设计的角度分集 CCR 阵列结构如图 2 所示,图 2(a)和图 2(b)分别为俯视图和侧视图。由图可知,角度分集 CCR 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,阵列中每个 CCR 单元具有相同的半径 r 和相同的光电性能。如图 2(a)所示,中心 CCR 单元位于中心位置 C_0 ,而所有边 CCR 单元均位于以 C_0 为中心、半径为 R 的圆周上。边 CCR 单元圆心与中心 CCR 单元之间的距离为 ϵ ,第 n 个 CCR 单元的方向角为 Θ_n 。



注: ϕ 为边 CCR 单元平面与中心 CCR 平面之间的倾斜角。

图 2 角度分集 CCR 阵列结构

Figure 2 Structure of angle diversity CCR array

对于具有 N 个 CCR 单元的角度分集 CCR 阵列而言,假设第 1 个边 CCR 单元的方位角固定为 $\Theta_1 = 0^\circ$,则第 n 个边 CCR 单元的方位角 Θ_n 可表示为

$$\Theta_n = 360^\circ \times \frac{n-1}{N-1}, n=2, \dots, N-1. \quad (3)$$

在角度分集 CCR 阵列中,第 n 个 CCR 单元的倾斜角 ϕ_n 可表示为

$$\phi_n = \begin{cases} 0^\circ, & \text{if } n = 0 \\ \phi, & \text{if } n = 1, \dots, N-1 \end{cases} \quad (4)$$

同时,边 CCR 单元可以绕其圆心 C_n 旋转,使倾斜角 ϕ 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的范围内变化。 C_0 与 C_n 之间的距离 R 可由 $R = \epsilon + r$ 得到。令 (x_0, y_0, z_0) 和 (x_n, y_n, z_n) 分别表示点 C_0 和 C_n 的坐标,经过几何计算,可以得到 (x_0, y_0, z_0) 和 (x_n, y_n, z_n) 之间的关系为

$$\begin{cases} x_n = x_0 + (\epsilon + r) \cos \Theta_n \\ y_n = y_0 + (\epsilon + r) \sin \Theta_n \\ z_n = z_0 \end{cases}, n=1, \dots, N-1. \quad (5)$$

由文献[18]可知,第 n 个边 CCR 单元的入射角 θ_n 可表示为

$$\cos \theta_n = \frac{[(x_0 - x_n) \cos \Theta_n + (y_0 - y_n) \sin \Theta_n] \sin \phi + (z_0 - z_n) \cos \phi}{\sqrt{(x_0 - x_n)^2 + (y_0 - y_n)^2 + (z_0 - z_n)^2}}. \quad (6)$$

因此,角度分集 CCR 阵列中第 n 个边 CCR 单元所对应的第 n 路反射信号的信道增益 $h_{s,n}$ 为^[18]

$$h_{s,n} = \frac{(m+1) A_s \rho_s k}{8\pi d^2} \cos^{m+1} \varphi \kappa(\varphi) \cos \theta_n, \quad n=1, \dots, N-1, \quad (7)$$

式中, A_s 和 ρ_s 分别为 RO-ISAC 收发机感知链路中 PD 的有效面积和响应系数; k 为 CCR 的反射系数。以 $w_{s,n}$ 表示第 n 路反射信号的加性白噪声,则 RO-ISAC 收发机所接收到的感知信号 y_s 可表示为

$$y_s = \sum_{n=0}^{N-1} (h_{s,n} x + w_{s,n}). \quad (8)$$

在水下 RO-ISAC 系统中,水下湍流是一个非常关键的信道影响因素,会造成通信信号以及感知信号的随机波动,产生信号衰落。在上述信道模型的基础之上,本文进一步采用 Gamma-Gamma 分布来模拟水下湍流所造成的信号强度波动,该分布适用于从弱到强的所有湍流条件^[19]。在 Gamma-Gamma 水下湍流模型中,归一化辐照度可以看作是二个独立的 Gamma 分布式随机变量 I_x 和 I_y 的乘

积,其分别由大尺度和小尺度湍流涡流产生。Gamma-Gamma 湍流模型的概率密度函数 $p(I_t)$ 可表示为^[20]

$$p(I_t) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I_t^{(\frac{\alpha+\beta}{2}-1)} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}I_t), I_t > 0, \quad (9)$$

式中: t 为时间系数, I_t 为 t 时刻的光强; α 和 β 分别为散射过程中大尺度和小尺度涡流的有效数目; $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数, $K_i(\cdot)$ 为 i 阶第二类修正贝塞尔函数。 α 和 β 的取值可分别由下式决定:

$$\alpha = \left[\exp\left(\frac{0.196\sigma_l^2}{(1+0.18\delta^2+0.186\sigma_l^{12/5})^{6/7}}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (10)$$

$$\beta = \left[\exp\left(\frac{0.204\sigma_l^2(1+0.23\sigma_l^{12/5})^{-5/6}}{1+0.9\delta^2+0.207\delta^2\sigma_l^{12/5}}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (11)$$

式中: $\delta = \sqrt{kD^2/4l}$, l 为传输距离, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为光的波长, D 为接收器孔径大小; σ_l^2 为 Rytov 方差。在水下湍流中, $\sigma_l^2 = 0.2$ 通常对应弱湍流状态, $\sigma_l^2 = 0.35$ 通常对应强湍流状态。

2 系统仿真及结果分析

为了研究基于角度分集 CCR 阵列水下 RO-ISAC 系统的通信和感知性能, 本文建立了基于 Matlab 软件的数值仿真系统。在仿真水下 RO-ISAC 系统中, OFDM 调制解调所用到的逆傅里叶变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)和傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)的长度均为 256, 有效数据子载波数量为 64, 调制星座为二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)。RO-ISAC 收发机中的 D/A 采样率设为 300 MSa/s, 则 OFDM 信号的有效带宽为 $300 \times 64 / 256 = 75$ MHz。RO-ISAC 收发机和接收机中的 A/D 采样率均设为 3 GSa/s, 对应的上采样倍数为 10, 测距分辨率为 5 cm, 测距量程设为 10 m。角度分集 CCR 阵列中 CCR 单元的视场角(Field of View, FOV)设为 30° 。

图 3 所示为不同 CCR 单元数量和接收光信号入射角情况下测距均方根误差与边 CCR 单元倾角的关系, 其中发射信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)为 115 dB。

由图 3(a)可知, 当接收光信号入射角度为 0°

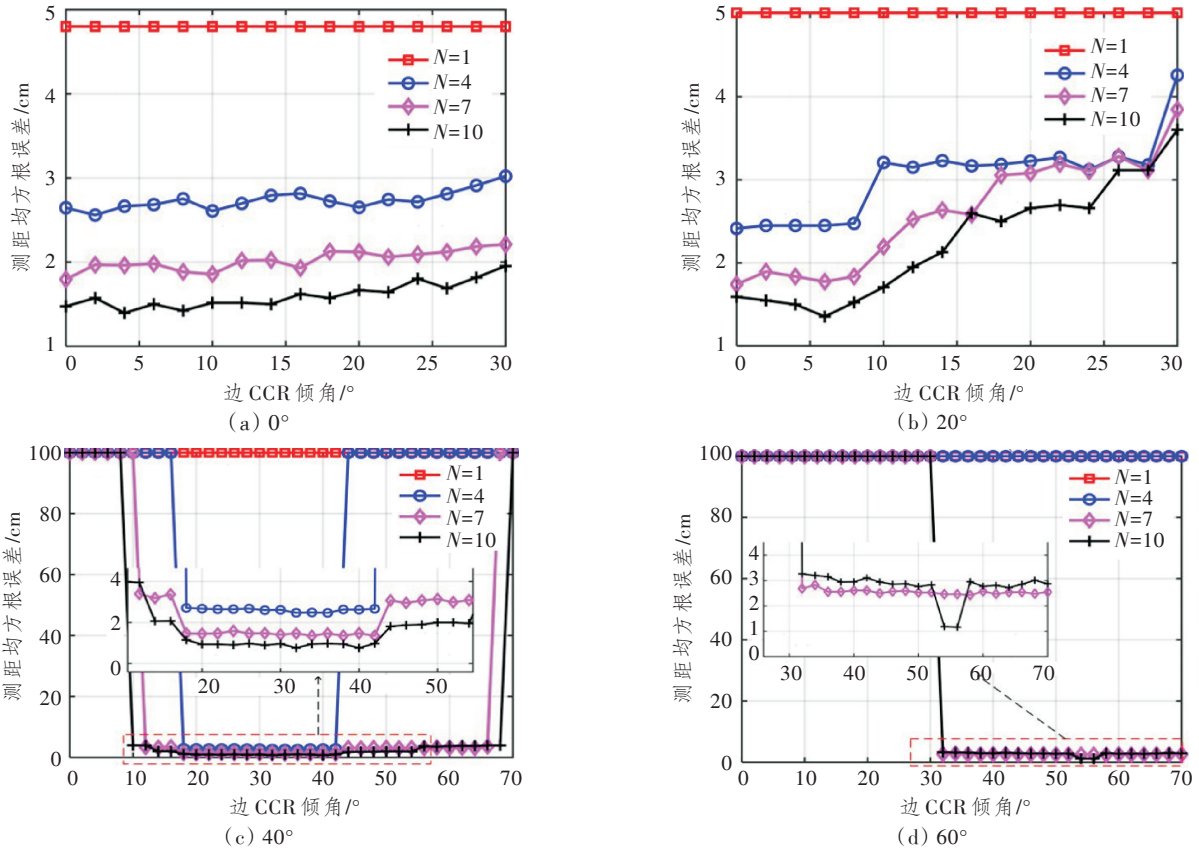


图 3 入射角为 0° 、 20° 、 40° 和 60° 时, 不同 CCR 单元数量 N 下测距均方根误差与边 CCR 单元倾角的关系

Figure 3 Ranging root mean square error vs. inclination angle of side CCR units for different numbers of CCR units N when the incident angle is 0° , 20° , 40° and 60°

时,角度分集 CCR 阵列中边 CCR 单元的倾角对于测距均方根误差的影响较小,并且角度分集 CCR 阵列中 CCR 单元数量越多,所得到的测距均方根误差越小。具体而言,当角度分集 CCR 阵列中 CCR 单元数量由 1 增加到 4 时,测距均方根误差由接近 5 cm 降低到不到 3 cm。当接收光信号入射角度为 20° 时,由图 3(b)可知,角度分集 CCR 阵列中边 CCR 单元的倾角大小对测距均方根误差有较为明显的影响。当 CCR 单元数量较大时,边 CCR 单元在 $0\sim 30^\circ$ 范围内存在最佳倾角使得测距均方根误差取得极小值。由图 3(c)和图 3(d)可知,当接收光信号入射角度较大且超过中心 CCR 单元的 FOV 时,单一的中心 CCR 单元已经无法反射光信号实现测距功能,而角度分集 CCR 阵列中部分边 CCR 单元在合适倾角下仍然可有效反射光信号。因此,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,并且最佳倾角角度区间随着接收光信号入射角度的增大而整体变大。在实际水下 RO-ISAC 系统中,可以根据系统的预期感知范围以及测距精度来联合优化设计角度分集 CCR 阵列中边 CCR 单元的数量以及倾斜角度。

图 4 所示为不同 CCR 单元数量和接收光信号入射角情况下,测距均方根误差与发射 SNR 的关系,其中,角度分集 CCR 阵列中边 CCR 单元的倾角均设置为最优值。由图可知,水下 RO-ISAC 系统的测距均方根误差随着发射 SNR 的增大逐渐减小,当发射 SNR 足够大时,系统可以实现无误差测距。当接收光信号入射角度为 0 和 20° 时,如图 4(a)和图 4(b)所示,中心 CCR 单元仍能有效发射光信号完成测距,但是测距性能较差。与单一的中心 CCR 单元测距相比,使用角度分集 CCR 阵列能够明显降低系统测距均方根误差,并且测距均方根误差随着角度分集 CCR 阵列中 CCR 单元数量的逐渐增大变得越来越小。由图 4(c)和图 4(d)可知,当接收光信号入射角度增大到 40 和 60° 时,接收光信号超出了中心 CCR 单元的 FOV,仅具有较多 CCR 单元的角度分集 CCR 阵列能够有效反射光信号并完成测距功能。当接收光信号入射角度为 60° 时,只要保证水下 RO-ISAC 系统的发射 SNR 不低于 120 dB ,采用包含 10 个 CCR 单元的角度分集 CCR 阵列可以实现测距均方根误差为 10 cm 以下的精准测距。

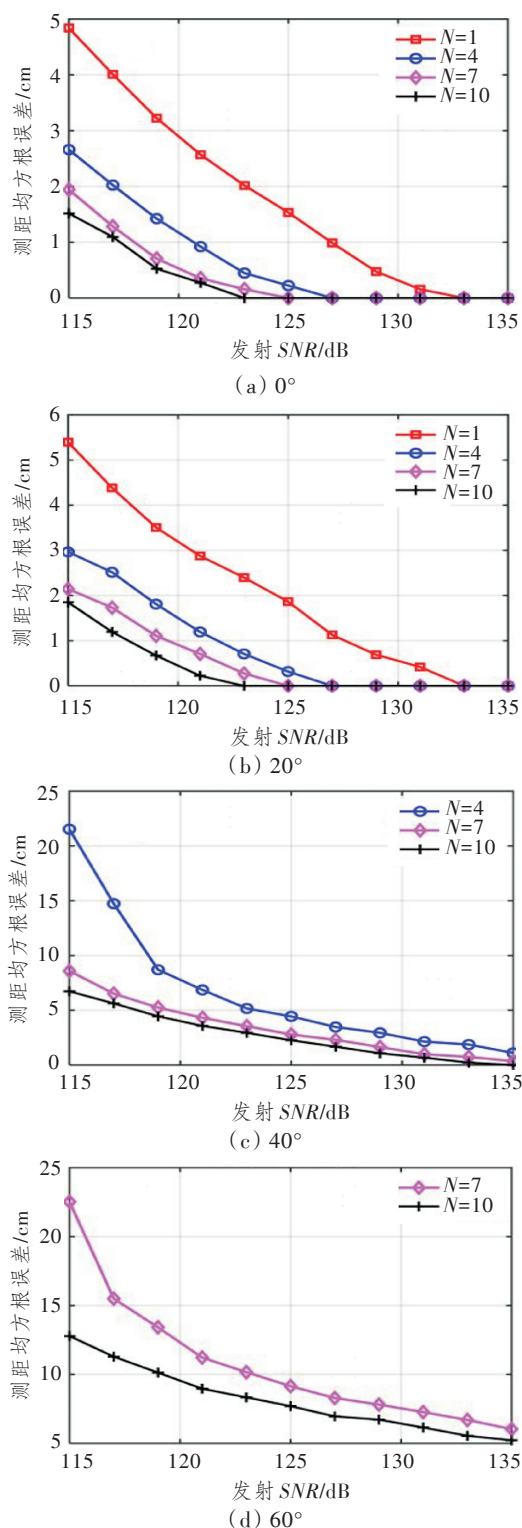
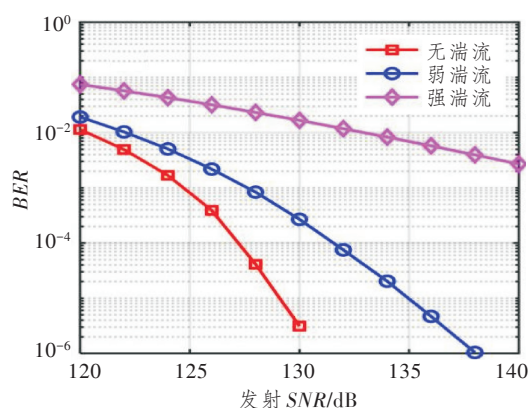


图 4 入射角 $=0^\circ$ 、 20° 、 40° 和 60° 时,不同 CCR 单元数量 N 下测距均方根误差与发射 SNR 的关系

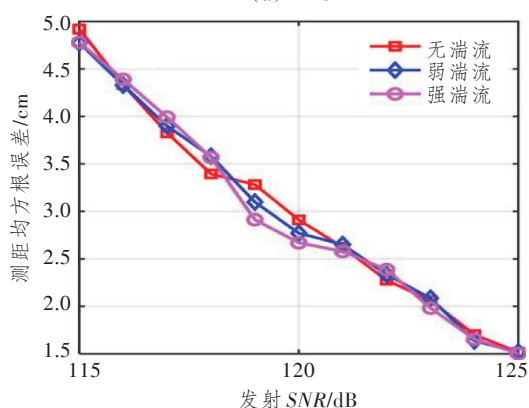
Figure 4 Ranging root mean square error vs. transmitting SNR for different numbers of CCR units N when the incident angle $= 0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$ and 60°

图 5(a)和图 5(b)所示为不同湍流条件下水下 RO-ISAC 系统通信误码率(Bit Error Rate, BER)和测距均方根误差与发射 SNR 的关系,其中接收光

信号的入射角度固定为 20° , 并且角度分集 CCR 阵列中只包含单一的中心 CCR 单元。由图 5(a) 可知, 系统通信 BER 受水下湍流因素影响非常显著, 误码性能随着湍流强度的增大而急剧恶化。相比之下, 如图 5(b) 所示, 系统测距均方根误差在不同湍流条件下几乎保持一致, 水下湍流因素对测距性能的影响可以忽略不计。根据上述结果可知, 水下湍流对 RO-ISAC 系统通信性能和测距性能的影响明显不同, 这是因为通信性能由 OFDM 波形的 SNR 决定, 而测距性能由 OFDM 波形的相关性决定。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 SNR, 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。



(a) BER



(b) 测距均方根误差

(b) Ranging root mean square error

图 5 不同湍流条件下系统通信 BER 和测距均方根误差与发射 SNR 的关系

Figure 5 Communication BER and ranging root mean square error vs. transmitting SNR under different turbulence conditions

3 结束语

水下 OISAC 技术对海洋勘探、海洋环境监测

和海洋安全等水下活动的顺利开展具有重要意义, 不仅能实现大容量水下数据传输, 还能支持高精度水下目标感知。本文基于光波的逆反射原理提出了一种新型水下 RO-ISAC 系统方案, 该方案采用角度分集 CCR 阵列来增大 CCR 的等效 FOV, 从而显著扩大了水下 RO-ISAC 系统的有效感知范围, 提升了系统感知精度。另外, 研究表明, 水下湍流对 RO-ISAC 系统的通信 BER 性能影响较大, 而对系统的测距性能并无不利影响。本文所提基于角度分集 CCR 阵列的水下 RO-ISAC 系统具有感知范围广和精度高等优势, 在未来水下海洋环境中具有较好的应用前景。本文所提基于角度分集 CCR 阵列的水下 RO-ISAC 系统目前仅局限于单目标通信和测距功能的实现。在未来工作中, 我们将在目标三维定位以及多目标联合感知等方面开展进一步研究。同时, 我们也将搭建实验平台开展相关实验研究。

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] Xu J. Underwater Wireless Optical Communication: Why, What, and How? [J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(10): 100007.
- [3] 刘润芃, 佟首峰, 张鹏, 等. 水下光通信技术研究[J]. 光通信研究, 2023(4): 11–13.
- [4] Liu R P, Tong S F, Zhang P, et al. Research on Underwater Optical Communication Technology [J]. Study on Optical Communications, 2023(4): 11–13.
- [5] Deng B, Chen C, Huang H, et al. Three-dimensional Transmission based UOWC in Complex Underwater Environments [J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(24): 8748–8759.
- [6] Liu W, Xu Z, Yang L. SIMO Detection Schemes for Underwater Optical Wireless Communication Under Turbulence[J]. Photonics Research, 2015, 3(3): 48–53.
- [7] Zhang X, Zeng Z, Du P, et al. Intelligent Index Recognition for OFDM with Index Modulation in Underwater OWC Systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2024, 36(20): 1249–1252.
- [7] 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 Se-

- lected Areas in Communications, 2022, 40(6): 1728–1767.
- [8] 王熹, 邓磊, 陶坤宇, 等. 空间激光通信与测距一体化研究[J]. 光通信研究, 2024(3): 27–34.
Wang X, Deng L, Tao K Y, et al. Research on the Integration of Space Laser Communication and Ranging[J]. Study on Optical Communications, 2024(3): 27–34.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Wen Y, Yang F, Song J, et al. Free Space Optical Integrated Sensing and Communication based on LFM and CPM [J]. IEEE Communications Letters, 2024, 28(1): 43–47.
- [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] Muller E B, Silva V N H, Monteiro P P, et al. Joint Optical Wireless Communication and Localization Using OFDM [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2022, 34(14): 757–760.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Wang H, Zeng Z, Chen C, et al. Retroreflective Optical ISAC Supporting 3D Positioning in Indoor Environments [C]//2024 Asia Communications and Photonics Conference (ACP) and International Conference on Information Photonics and Optical Communications (IP-OC). Beijing, China: IEEE, 2024: 10809915.
- [17] 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 (99): 587–590.
- [18] Chen C, Zhong W D, Yang H, et al. Reduction of SINR Fluctuation in Indoor Multi-cell VLC Systems Using Optimized Angle Diversity Receiver[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(17): 3603–3610.
- [19] Andrews L C, Phillips R L, Hopen C Y. Laser Beam Scintillation with Applications[M]. Bellingham, WS, US: SPIE, 2001.
- [20] Fu Y, Huang C, Du Y. Effect of Aperture Averaging on Mean Bit Error Rate for UWOC System over Moderate to Strong Oceanic Turbulence [J]. Optics Communications, 2019, 451: 6–12.