

# 数字副载波复用光纤通感融合系统干涉衰落抑制研究



## Interference Fading Suppression in Fiber-Optic Integrated Sensing and Communication Systems Using Digital Subcarrier Multiplexing

张兵兵/ZHANG Bingbing<sup>1</sup>, 向梦/XIANG Meng<sup>1,2,3</sup>,  
张泽彬/ZHANG Zebin<sup>1</sup>, 付松年/FU Songnian<sup>1,2,3</sup>,  
秦玉文/QIN Yuwen<sup>1,2,3</sup>

(1. 广东工业大学, 中国 广州 510006;

2. 广东工业大学通感融合光子技术教育部重点实验室, 中国 广州 510006;

3. 广东省信息光子技术重点实验室, 中国 广州 510006)

(1. Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Key Laboratory of Photonic Technology for Integrated Sensing and Communication, Ministry of Education of China, Guangzhou 510006, China;

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Information Photonics Technology, Guangzhou 510006, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202506005

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/34.1228.tn.20251218.1454.006>

网络出版日期: 2025-12-19

收稿日期: 2025-11-03

**摘要:** 针对数字副载波复用光纤通感融合 (DSM-ISAC) 系统中相干探测型相位敏感光时域反射仪 ( $\Phi$ -OTDR) 因干涉衰落导致传感性能劣化和可靠性下降的挑战, 提出了一种接收端多域集成数字信号处理衰落抑制方案。通过在接收端引入相位域的相移变换 (PST)、频率域的脉冲内频分 (IFD) 和空间域的移动旋转矢量平均 (MRVA), 实现对干涉衰落的协同抑制。为了验证所提方案的有效性, 搭建了 DSM-ISAC 实验平台, 利用 DSM 信号的频谱灵活分配特点来优化子载波间保护间隔, 在同一波长信道中生成 36 GBaud DP-16QAM DSM 通信信号与线性调频 (LFM) 脉冲传感信号, 并经过 920 m 标准单模光纤传输, 完成了对系统干涉衰落抑制的实验验证。与传统干涉衰落抑制方案相比, 所提出的 PST-IFD-MRVA 方案可显著抑制干涉衰落, 提高强度信噪比近 10 dB 且增强应变灵敏度到 9.09  $\text{p}\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$ , 成功解调出施加于光纤 820 m 处的 10 kHz 扰动信号。实验结果表明该研究方案在提升 DSM-ISAC 系统的传感可靠性方面具有可行性。

**关键词:** 光纤通感融合系统; 数字副载波复用; 相位敏感光时域反射仪; 干涉衰落抑制

**Abstract:** As for fiber-optics integrated sensing and communication systems enabled by digital subcarrier multiplexing (DSM-ISAC), the coherent-detection based phase-sensitive optical time-domain reflectometer ( $\Phi$ -OTDR) suffers from impaired sensing performance and insufficient reliability due to the interference fading effect. A receiver-side multi-domain integrated fading suppression scheme is proposed. Our proposed scheme sequentially applies phase shift transformation (PST) in the phase domain, inner-pulse frequency division (IFD) in the frequency domain, and moving rotation vector averaging (MRVA) in the spatial domain to achieve joint suppression of interference fading. To verify its performance, a DSM-ISAC experimental platform is established. Leveraging the flexibility of spectral allocation in DSM signals, a 36 GBaud DP-16QAM DSM communication signal and a linear frequency modulated (LFM) pulse sensing signal are generated within the same wavelength channel and co-propagated over 920 m of standard single-mode fiber (SSMF), with an optimized protection interval bandwidth between the two central subcarriers. Experimental results indicate that, in comparison with conventional suppression schemes, the proposed PST-IFD-MRVA scheme significantly enhances fading suppression performance, achieving an improvement in signal-to-noise ratio of nearly 10 dB and a strain sensitivity of 9.09  $\text{p}\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$ . Meanwhile, a 10 kHz vibration signal applied at the position of 820 m of SSMF is successfully demodulated. These findings validate the feasibility and promising potential of the proposed scheme in enhancing the sensing reliability of DSM-ISAC systems.

**Keywords:** fiber-optics integrated sensing and communication; digital subcarrier multiplexing; phase-sensitive optical time-domain reflectometer; interference fading suppression

**引用格式:** 张兵兵, 向梦, 张泽斌, 等. 数字副载波复用光纤通感融合系统干涉衰落抑制研究 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(6): 29-38. DOI: 10.12142/ZTETJ.202506005

**Citation:** ZHANG B B, XIANG M, ZHANG Z B, et al. Interference fading suppression in fiber-optic integrated sensing and communication systems using digital subcarrier multiplexing [J]. ZTE technology journal, 2025, 31(6): 29-38. DOI: 10.12142/ZTETJ.202506005

光纤通信系统作为现代信息社会的基础承载设施，凭借低损耗、超宽带和抗干扰等优越传输特性，在全球范围内得到广泛部署。目前光纤光缆铺设总长度已超过  $5 \times 10^8$  km，构建了覆盖全球的通信网络。与此同时，分布式光纤传感技术不仅赋予光纤信息传输能力，还能对温度、振动、应变等环境参数进行高精度分布式监测，具备对外界扰动的实时感知与智能监控能力<sup>[1]</sup>。由于高速光纤通信与分布式光纤传感在信号调制、复用和探测方式等方面具有高度相似性，利用同一根光纤实现兼具通信与感知功能的通感融合（ISAC）系统逐渐成为全球研究热点，被视为信息光子技术的重要发展方向。

现有光纤通感融合系统主要包括两类：基于前向通信信号的通感融合系统和基于瑞利背向散射（RBS）<sup>[4]</sup>的通感融合系统。前者利用前向传输信号完成通信功能，并通过相干接收解调相位<sup>[2]</sup>和偏振态<sup>[3]</sup>信息实现环境扰动感知，但该方案依赖于整条光纤链路的相位累积或偏振演化信息，难以实现多扰动事件的同时定位，且定位精度有限。相比而言，基于RBS<sup>[4]</sup>的通感融合系统通常采用相位敏感光时域反射仪（ $\Phi$ -OTDR）实现环境扰动定位，能够区分同时发生的多个事件，具备定位精度高、感知灵敏度高、单端接入和无需时间同步等性能优势。为降低通信与感知信号间的干扰并提升频谱利用率，基于RBS的共波长信道数字副载波复用光纤通感融合（DSM-ISAC）<sup>[5-6]</sup>架构近年来受到广泛关注。

相干探测<sup>[7]</sup>是长距离感知的关键技术。本振光（LO）与RBS混频后，可提高RBS信噪比，增强感知灵敏度。然而，相干探测同时面临偏振衰落和干涉衰落的问题。偏振衰落源于LO与RBS的偏振态失配，目前业界通常采用偏振分集接收技术<sup>[8]</sup>进行抑制。干涉衰落则源于光纤的非均匀折射率分布对RBS相位的随机调制<sup>[9]</sup>，当大量散射体产生的RBS发生干涉相消时，会形成信号衰落点。在这些低信噪比区域，解调出相位信息误差大，扰动信息失真，继而引发ISAC系统漏报或误报，严重限制了系统可靠性。

本文在数字副载波复用光纤通感融合系统框架下，针对相干探测 $\Phi$ -OTDR的干涉衰落问题开展了干涉衰落抑制研究，提出了一种接收端多域集成数字信号处理衰落抑制方案，并进行了系统参数优化，最终完成了实验验证和衰落抑制性能对比分析。

## 1 数字副载波复用光纤通感融合系统

DSM技术不仅因其子载波的灵活可调而天然适用于信号复用，还对光纤非线性效应及均衡增强相位噪声（EENP）<sup>[10]</sup>表现出高容忍度，从而保障了通信链路的稳定性和鲁棒性。在传感方面，为克服传统 $\Phi$ -OTDR中空间分辨率与脉冲宽度之间的性能制约，采用线性调频脉冲（LFM）结合匹配滤波（MF）脉冲压缩技术，以同时实现高空间分辨率与长距离探测能力<sup>[11]</sup>。

### 1.1 通感融合信号产生

如图1所示，DSM通信信号由多个灵活可调的子载波构成，在中间相邻两个子载波之间预留保护间隔，并插入窄带传感信号，从而实现共波长信道的通感融合信号一体化。发射端DSM通信信号的电场表达式为：

$$S_{\text{DSM}}(t) = \sum_{k=1}^{N_{\text{sc}}} s_k(t) \cdot \exp(j2\pi f_k t) \quad (1),$$

其中， $N_{\text{sc}}$ 为子载波数目， $s_k(t)$ 为第 $k$ 个子载波基带信号， $f_k$ 为第 $k$ 个子载波中心频率。

发射端产生的调频脉冲传感信号 $S_{\text{CP}}(t)$ 可表示为：

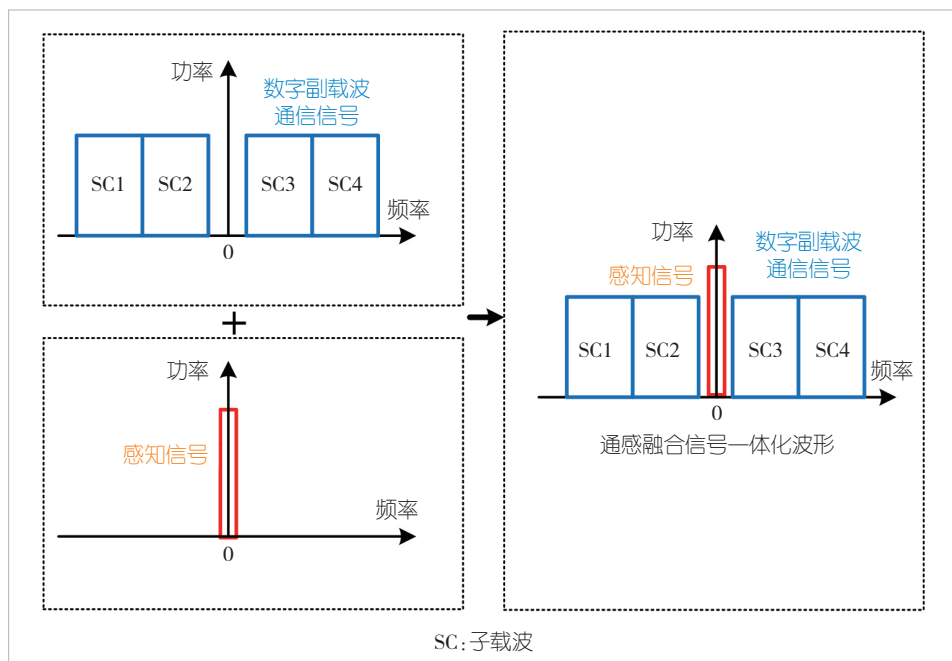


图1 基于数字副载波复用的通感融合信号产生

基金项目：国家自然科学基金项目（62435004、U21A20506、62475051）；广东省“珠江人才计划”引进创新创业团队项目（2021ZT09X044）

$$S_{\text{CP}}(t) = \exp j(2\pi f_0 t + \pi k t^2) \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{\tau_p}\right) \quad (2),$$

其中,  $f_0$  为起始频率,  $k = B/\tau_p$  为调频速率,  $B$  为调频带宽,  $\tau_p$  为脉冲持续时间。

经过频分复用后可以得到通感融合光信号  $S_{\text{ISAC}}(t)$  的表达式为:

$$S_{\text{ISAC}}(t) = [S_{\text{CP}}(t) + S_{\text{DSM}}(t)] \cdot \exp j(2\pi f_c t) \quad (3),$$

其中,  $f_c$  为光载波中心频率。

## 1.2 通感融合信号接收

经过单模光纤前向传输后, 通感融合信号首先进入高速相干接收机, 通过数字域窄带滤波完成通感信号分离, 最后通过数字均衡, 恢复出通信信号。携带了外界扰动信息的 RBS 光信号经环形器到达传感信号接收端。背向 ISAC 信号经过滤波器滤除通信信号以及放大自发辐射 (ASE) 噪声, 得到调频脉冲对应的背向散射信号。在相干探测方案中, RBS 表示为:

$$E_{\text{RBS}}(t) = \sum_{i=1}^N r(i) \exp\left(-\alpha \frac{c\tau_i}{n}\right) \exp\left[j\left[2\pi(f_c + f_0)(t - \tau_i) + \pi k(t - \tau_i)^2\right]\right] \text{rect}\left(\frac{t - \tau_i}{T_p}\right) \quad (4),$$

其中,  $N$  为整个光纤链路的散射点数,  $r(i)$  为瑞利散射系数,  $\alpha$  为光纤损耗系数,  $\tau_i$  为光从第  $i$  个散射点返回到传输接收端的飞行时间,  $c$  为真空中的光速,  $n$  为纤芯折射率, 本振光的光场表达式为:

$$E_{\text{LO}}(t) = \sqrt{P_{\text{LO}}} \exp j(2\pi f_c t) \quad (5).$$

背向散射光与本振光拍频后的电信号表达式为:

$$I(t) = R \sum_{i=1}^N r(i) \exp\left(-\alpha \frac{c\tau_i}{n}\right) \cos\left[2\pi f_0(t - \tau_i) + \pi k(t - \tau_i)^2 - 2\pi f_c \tau_i\right] \quad (6),$$

其中,  $R$  为光电探测器的响应度, 在数字信号处理中, 对  $I(t)$  作希尔伯特变换可得到复数拍频信号, 其表达式为:

$$I(t) = R \sum_{i=1}^N r(i) \exp\left(-\alpha \frac{c\tau_i}{n}\right) \exp j\left[\frac{2\pi f_0(t - \tau_i) + \pi k(t - \tau_i)^2 - 2\pi f_c \tau_i}{2}\right] \text{rect}\left(\frac{t - \tau_i}{T_p}\right) = \int_0^{T_r} R r \cdot \exp\left(-\alpha \frac{c\tau}{n}\right) \exp j\left[\frac{2\pi f_0(t - \tau) + \pi k(t - \tau)^2 - 2\pi f_c \tau}{2}\right] \text{rect}\left(\frac{t - \tau}{T_p}\right) d\tau = R[h(t) \otimes S_{\text{CP}}(t)] \quad (7),$$

其中,  $T_r$  表示最大往返时间,  $S_{\text{CP}}(t)$  为探测光信号, 公式

(7) 可以表示为探测光信号  $S_{\text{CP}}$  与光纤冲击响应  $h(t)$  的卷积形式, 即  $I(t) = R \cdot [h(t) \otimes S_{\text{CP}}(t)]$ , 其中  $\otimes$  表示卷积。这时的空间分辨率由脉冲持续时间决定。为了提高空间分辨率, 对拍频信号进行匹配滤波处理:

$$I_{\text{MF}}(t) = R \cdot [h(t) \otimes S_{\text{CP}}(t) \otimes S_{\text{CP}}^*(-t)] = R \cdot [h(t) \otimes P(t)] \quad (8),$$

其中,  $S_{\text{CP}}^*(-t)$  为匹配滤波器,  $P(t)$  为压缩后的脉冲信号, 然后求解差分相位, 可以恢复出外界扰动信号。

## 2 干涉衰落抑制

干涉衰落作为  $\Phi$ -OTDR 的重要研究挑战, 已有多种衰落抑制方案被提出并验证。其中, 频率分集 (FD) 方案利用不同频率脉冲在空间上具有独立衰落特性, 已成为主流技术路线<sup>[12]</sup>。此外, 波长分集 (WD)<sup>[13]</sup> 与相位分集 (PD)<sup>[14]</sup> 等方案亦被证明能够有效产生相互独立的信号分量。这类分集方案的共同特征在于产生并合成多个独立的 RBS, 以抑制在特定光纤位置处的信号衰落。然而, 由于这些分量均为复数信号, 且相位各不相同, 直接叠加可能因相位抵消而无法增强信号。为此, 研究人员提出了旋转矢量和 (RVS) 方案<sup>[15]</sup>, 通过先对各分路信号进行相位旋转以实现相位对齐, 再进行矢量叠加, 从而有效消除信号衰落点, 并利用矢量平均降低噪声, 提高信噪比。尽管上述分集技术具有良好的抑制效果, 但其实现往往依赖复杂器件或特殊光纤, 导致系统复杂度和成本显著增加。鉴于此, 如何在 not 增加系统硬件复杂度的前提下实现高效的干涉衰落抑制, 成为前沿研究方向。其中, 基于接收端数字信号处理的干涉衰落抑制方案因具备灵活性与成本优势而受到广泛关注。

### 2.1 脉冲内频分法

为将频率分集思想引入基于 LFM 的  $\Phi$ -OTDR 系统, 文献<sup>[15]</sup>提出了脉冲内频分法 (IFD) 以抑制干涉衰落。当 LFM 光脉冲在光纤中传播时, 其 RBS 因弹性散射特性, 能够完整保留原始调频特征。在调频带宽  $F$  足够大的条件下, 可利用数字滤波器将每次探测得到的 RBS 划分为多个子带信号。若将调频范围  $F$  划分为  $M$  个子带, 则每个子带的带宽为:

$$\Delta F = \frac{F}{M}, m = 1, 2, \dots, M \quad (9).$$

通过构建匹配滤波器组, 其中每个滤波器仅与原始调频脉冲的特定频谱子带相对应, 即可从单次探测的 RBS 中解调出多个经脉冲压缩的瑞利信号:

$$s_m(z) = \int r(t, z) h_m^*(t) dt \quad (10),$$

其中,  $r(t, z)$  表示在位置  $z$  处接收到的 RBS,  $h_m^*(t)$  表示与第  $m$  个子带相匹配的滤波器。脉冲压缩后的瑞利信号在形式上与单频  $\Phi$ -OTDR 获取信号一致, 其中心频率由对应的调频范围决定, 因此各子信号的中心频率各不相同, 从而具有相互独立的衰落特性。最终, 通过 RVS 算法对这些子信号进行相位对齐与矢量叠加:

$$S(z) = \sum_{m=1}^M s_m(z) e^{-j\phi_m} \quad (11)。$$

一般而言, 子信号数量  $M$  越多, 衰落抑制效果越显著。但由于边际效应的存在, 过度增加  $M$  并不能无限提升衰落抑制性能, 反而会导致空间分辨率的下降。

## 2.2 相移变换法

相位分集的核心思想是通过将原始信号施加  $\pi$  相移, 构造一个在幅度上与原始信号互补的信号, 从而抑制干涉衰落。具体而言, 可以通过选择幅值更高的信号进行相位解调或将原始信号与互补信号通过 RVS 算法合成实现衰落抑制。为了在数字域上实现相位分集, 文献[16]提出了相移变换法 (PST), 首先对采集到的时域背向散射信号  $r(t, z)$  进行快速傅里叶变换 (FFT), 得到频域信号  $R(f, z)$ :

$$R(f, z) = \mathcal{F}r(t, z) \quad (12)。$$

然后, 在频域中, 将信号乘以特定符号函数  $H(f)$ ,

$$\begin{aligned} \tilde{R}(f, z) &= R(f, z) \cdot H(f), \\ H(f) &= \begin{cases} -1, & f \in \text{选定子频段} \\ 1, & \text{其他频段} \end{cases} \end{aligned} \quad (13)。$$

该操作相当于对选定频段信号施加  $\pi$  相移, 从而获得与原始信号幅度互补的子信号。随后, 通过逆傅里叶变换 (IFFT) 将频域信号转换回时域, 得到互补信号:

$$\tilde{r}(t, z) = \mathcal{F}^{-1} \tilde{R}(f, z) \quad (14)。$$

单次相移变换可能无法覆盖所有信号衰落情况, 因此需要通过多次调整频域滤波函数, 生成多个相移子信号并进行优化, 以实现干涉衰落的完全抑制。在文献[16]的实验中, 通过生成并合成 6 个相移子信号, 成功消除了所有信号衰落点。然而, 增加子信号数量会显著提升计算复杂度。

## 2.3 移动旋转矢量平均法

在使用 RVS 算法来合成独立子带信号时, 由于各向同性噪声的随机分布, 旋转后的每个子带信号实际上并不处于完全相同的方向, 导致存在残留衰落。因此, 文献[17]提出

了移动旋转矢量平均法 (MRVA) 来抑制随机噪声。MRVA 作为一种空间域 (SSD) 的信号合成方式, 通过在一个时间窗口内, 先旋转对齐各个空间点的信号矢量以消除其固有的随机相位差, 然后进行矢量平均, 这个过程可以表示为:

$$v_{\text{SSD}}(z_m, t_i) = \sum_{\xi=1}^S \left[ \left( \frac{1}{M} \sum_{k=m}^{m+M-1} A_{s,\xi}(z_k, t_i) e^{j\theta(z_m, t_i)} \right) \right] \quad (15),$$

其中,  $v_{\text{SSD}}$  为空间域合成后的信号,  $S$  为子信号个数,  $M$  为窗口宽度,  $A_{s,\xi}$  为信号振幅,  $e^{j\theta(z_m, t_i)}$  为旋转因子。利用空间上相邻点的、幅度更强的信号来补偿衰落点的信号, 同时平均消除不相关噪声, 提升了衰落点的信噪比, 实现了干涉衰落的抑制。为了获得更好的衰落抑制效果, 需要增加滑动窗口的长度, 然而增加窗口长度会牺牲系统的空间分辨率, 因此在实际应用中需要做出权衡。

## 2.4 多域集成衰落抑制方案

现有的 IFD、PST 以及 MRVA 均是从单一维度对干涉衰落进行抑制, 各有局限性。为进一步增强信号衰落抑制效果, 本文提出了一种多域集成抑制策略, 将相位、频率和空间维度技术相结合<sup>[18]</sup>, 并将这一思想推广到基于线性调频脉冲的 DSM-ISAC 系统中, 以实现更鲁棒的干涉衰落协同抑制。需要指出的是, 由于匹配滤波和 PST 均依赖完整的信号频谱, 若先行实施 IFD 分解, 可能导致频谱截断并破坏 PST 构造的互补关系, 因此在所有集成路径中, 必须确保 PST 操作优先于 IFD 分解。基于这一原则, 本文设计了 6 种不同的算法路径, 如图 2 所示。方案 (I): 仅采用 PST 生成互补信号对, 随后利用 RVS 算法进行信号合成; 方案 (II): 利用 3 个中心频率各异的匹配滤波器将原始信号分解为 3 路子信号, 并通过 RVS 算法完成信号合成; 方案 (III): 首先经过 PST 生成互补信号对, 然后将 IFD 分解为 6 路子信号, 最后利用 RVS 算法进行合成; 方案 (IV)、(V) 和 (VI): 这 3 种方案在分解流程上与方案 (I)、(II)、(III) 相同, 但在信号合成阶段采用 MRVA 算法实现空间域合成。其中, 方案 (VI) 实现了相位、频率和空间域的级联抑制, 在理论上可达到最佳的衰落抑制效果, 但相应的计算复杂度也最高。在实际应用中, 可根据系统需求和应用场景灵活选择不同的干涉衰落抑制算法, 在提高衰落抑制性能的同时兼顾计算效率。这种多域集成抑制策略为  $\Phi$ -OTDR 系统在复杂干涉环境下的稳定运行提供了新的解决思路。

## 3 实验装置与结果

为验证多域集成衰落抑制算法在 DSM-ISAC 系统架构中

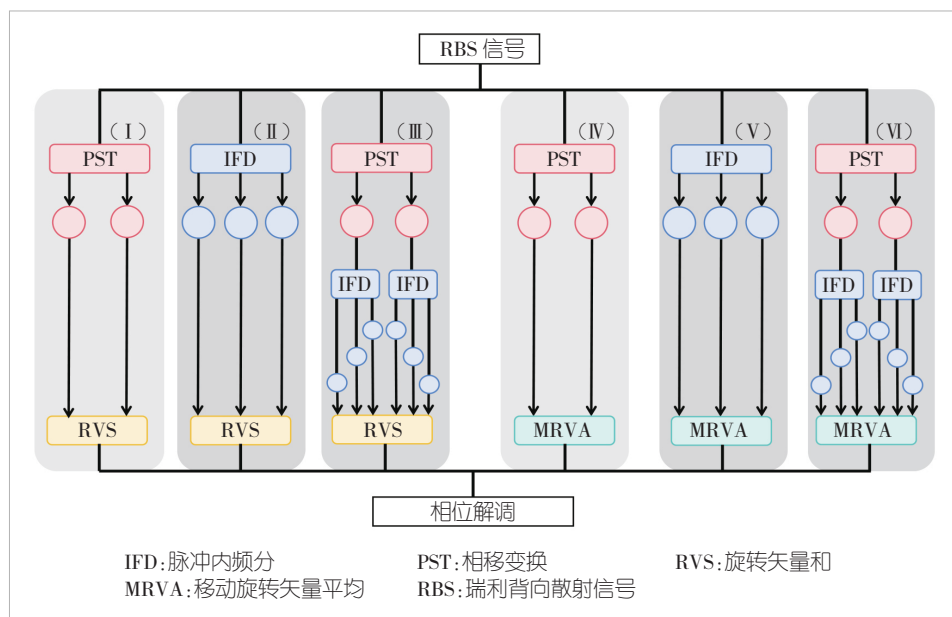


图2 多域集成信号衰落抑制实施方案

的有效性，我们搭建了实验平台，如图3所示。

### 3.1 实验设置

我们采用一台中心波长为1 550 nm、线宽100 Hz、输出功率16 dBm的超窄线宽半导体激光器作为光源，并将输出光均分为两路，分别用于传感与通信信号的产生。在上支路中，首先利用任意函数发生器（AFG）产生线性调制电压信

号，以驱动压控振荡器（VCO）输出线性调频电信号。该信号进一步驱动IQ调制器（IQM）产生调频光信号，经过放大与滤波后，再经声光调制器（AOM）调制为脉宽200 ns、带宽500 MHz的线性调频光脉冲，用于传感。在下支路中，首先离线生成包含4个副载波、总波特率为36 GBaud的双偏振16阶正交幅度调制（DP-16QAM）数字副载波复用信号，并采用滚降因子为0.01的根升余弦（RRC）滤波以压缩带宽，并在中间两路副载波之间预留保护间隔（PI）。经重采样后，该信号可以加载到采样率为120 GSa/s、分辨率为8 bit的任意波

形发生器（AWG），转换为电信号后，再送入相干驱动调制器（CDM）调制生成光通信信号。最终，光通信信号与光传感信号在光纤耦合器中复用，形成ISAC信号。

ISAC信号经820 m标准单模光纤传输后，在光纤末端通过压电陶瓷换能器（PZT）施加外界扰动。PZT缠绕光纤长度为13.17 m，施加的正弦扰动频率为10 kHz。前向传输光

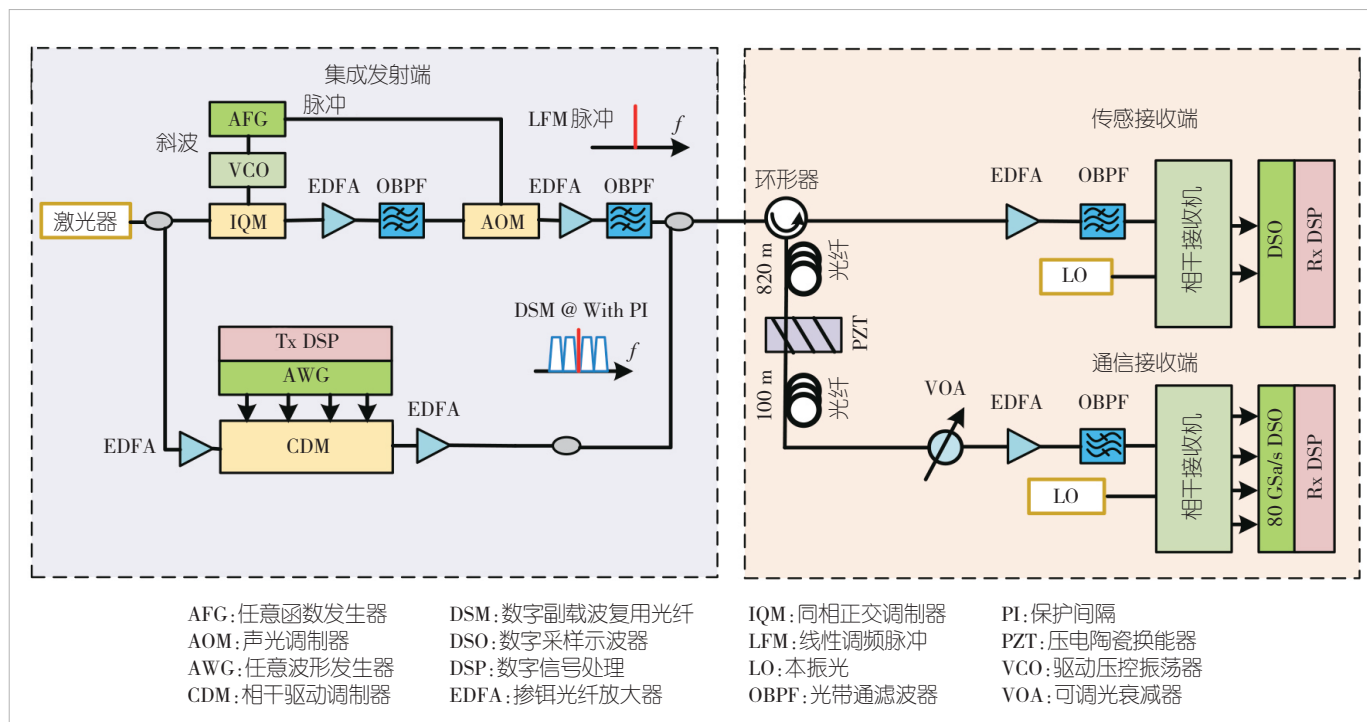


图3 光纤传感融合实验示意图

在进入接收端前经过光放大和光滤波，再与线宽为 100 kHz 的外腔激光器产生的本振光在相干接收机中进行相干检测。相干接收机输出的电信号由采样率为 80 GSa/s 的数字采样示波器（DSO）采集。通信接收端的数字信号处理（DSP）流程包括色散补偿（CDC）、粗频偏估计与补偿（FOC）、副载波解复用、自适应均衡、载波相位恢复以及平均误码率（BER）计算。在副载波解复用过程中，RRC 滤波器不仅用于副载波提取，还能有效滤除调频脉冲信号。

携带外界扰动信息的 RBS 经环形器进入传感信号接收端。背向散射光信号首先通过光滤波器去除通信分量和 ASE 噪声，得到与调频脉冲对应的背向散射分量。随后，利用相干接收机对信号进行相干检测，并由示波器采集以便在数字域进行信号处理。以 PST-IFD-MRVA 方案为例，数字信号处理流程包括 PST、IFD、MRVA 合成、相位解调、相位差分以及扰动波形重构。需要注意的是，PST 仅对信号的相位谱进行调制，而不改变幅度谱，因此生成的互补信号对需使用同一匹配滤波器以保持相位对应关系。在 IFD 处理中，两路信号分别通过同一组子带匹配滤波器。最终，选择 25  $\mu$ s 窗口长度以兼顾衰落抑制效果以及空间分辨率。

### 3.2 数字副载波复用光纤通感融合系统性能优化

我们首先研究了不同通信波特率下传感信号对系统传输性能的影响，实验结果如图 4（a）所示。实验中，DP-16QAM DSM 信号中间两副载波之间预留的保护间隔（PI）带

宽为 8 GHz。随着通信波特率由 30 GBaud 提升至 42 GBaud，系统误码率持续上升。更高的波特率信号占用了更宽的 DSM 信号带宽，从而加剧了由于器件带宽受限导致的码间串扰。当传感信号同时存在时，通信信号的 BER 进一步恶化，这表明引入传感功能会对通信应用带来额外损伤。

随后，我们进一步分析了不同 PI 带宽对通信性能的影响，如图 4（b）所示。在无传感信号时，随着 PI 由 2 GHz 增加至 10 GHz，通信信号带宽逐渐增大，受限于光电器件带宽，通信信号 Q 因子由 8.32 dB 下降至 7.20 dB。当存在传感信号时，通信信号 Q 因子由 7.70 dB 下降至 6.88 dB，相应的 Q 因子损伤则由 0.62 dB 减小至 0.32 dB。结果表明，适当增大 PI 能够有效缓解传感信号对通信信号的串扰。总体而言，传感信号的引入确实会引起通信性能的恶化。尽管通信与传感信号在频域上实现了正交复用，但光纤的非线性效应仍会使传感信号对通信信号产生非线性串扰。此外，通信接收端的数字示波器需同时采集包含传感信息的复用信号，在量化比特有限条件下，这会降低通信信号的有效分辨率，从而进一步削弱通信性能。综合考虑后，本文最终选用 36 GBaud DP-16QAM DSM 信号作为通信信号，并将 PI 设置为 8 GHz，以在通信与传感性能之间实现平衡。

### 3.3 衰落抑制

我们首先验证了不同方法的应变解调能力，实验结果如图 5 所示。

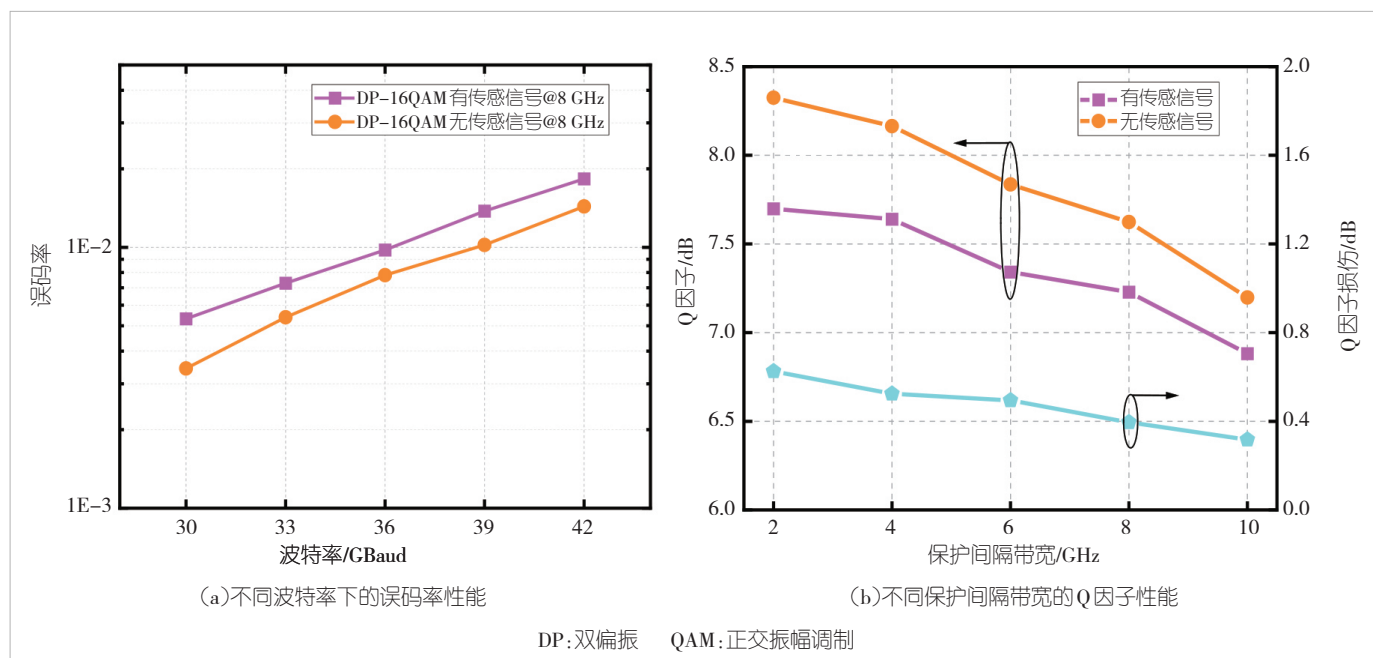


图4 不同波特率的通信信号与保护间隔优化

图5(a) — (f) 左图分别展示了各方案在820 m位置恢复的10 kHz正弦扰动的时域波形, 右图则给出了对应的幅度谱密度(ASD)。可以看出, 所有方法均能够准确重构扰动信号, 且重构的时域波形无明显畸变, 说明各衰落抑制方案均具备应变跟踪能力。相应地, 在ASD中均可观察到位于10 kHz处的显著主瓣峰值, 其主瓣带宽与窗函数设定保持一致, 表明各方案对扰动的幅度和频率均能实现精确定位。

为进一步验证所提方案的衰落噪声抑制性能, 我们对比较了7种处理方法, 包括6种衰落抑制方法以及不采用任何衰落抑制的原始信号处理方法。图6展示了7种不同的处理方法所得到强度、差分相位以及相位标准差(SD)曲线。

实验结果表明, 当未采用任何抑制手段时, 存在大量深度衰落点, 差分相位曲线出现密集波动, 对应位置的信噪比极低。这会导致相位解调严重失真, 相位标准差显著增大, 振动信号完全淹没于噪声之中。采用单一域方法时, 衰落现象得到部分缓解。其中, PST算法能够有效减少部分衰落点和相位波动, 但在非振动区域仍出现错误, 且在曲线末端难以区分振动与噪声; IFD算法则表现更优, 强度衰落点和相位波动均明显减少, 相位标准差整体下降, 仅在个别位置出现错误, 振动特征已能够被辨识。然而, 单一域方法仍难以完全消除衰落噪声。相比之下, 多域集成方法充分结合了相

位域、频域与空间域的互补优势, 使强度曲线中的多个衰落位置得到完全消除, 相位标准差曲线平滑连续, 非振动区域未出现错误, 差分相位曲线末端的振动特征亦能清晰呈现。特别是在PST-IFD-MRVA级联方案下, 衰落抑制效果最为显著, 这进一步证明了多域集成抑制方法在提升ISAC系统鲁棒性的优势。

为了定量评估不同方法的衰落抑制能力, 我们计算并比较了4项性能指标, 包括平均幅度波动、强度信噪比(SNR)、应变灵敏度以及振动信噪比。具体而言, 平均幅度波动被定义为在非扰动区域内, 单条迹线归一化幅度的最大值与最小值之比, 并对多条迹线的结果进行平均。该指标直接反映了信号衰落严重程度, 其值越小表明衰落抑制效果越好。强度SNR则用于衡量信号的稳定性, 其计算公式为:

$$\text{IntensitySNR} = 10 \log_{10} \left( \frac{\sum_z (E[A(z, t)])^2}{\sum_z \text{Var}[A(z, t)]} \right) \quad (16),$$

其中,  $A(z, t)$ 表示信号幅值,  $E()$ 和 $\text{var}()$ 分别表示时间平均与方差,  $\sum_z()$ 表示沿光纤距离的累加。该指标值越高, 说明信号强度越稳定。在评估解调性能方面, 应变灵敏度通过计算无扰动区域内应变信号ASD的平均值来确定, 用于刻画系统可探测最小应变能力。振动SNR则定义为扰动频谱中信号峰值功率与噪声基底平均功率的比值, 用来衡量系统在

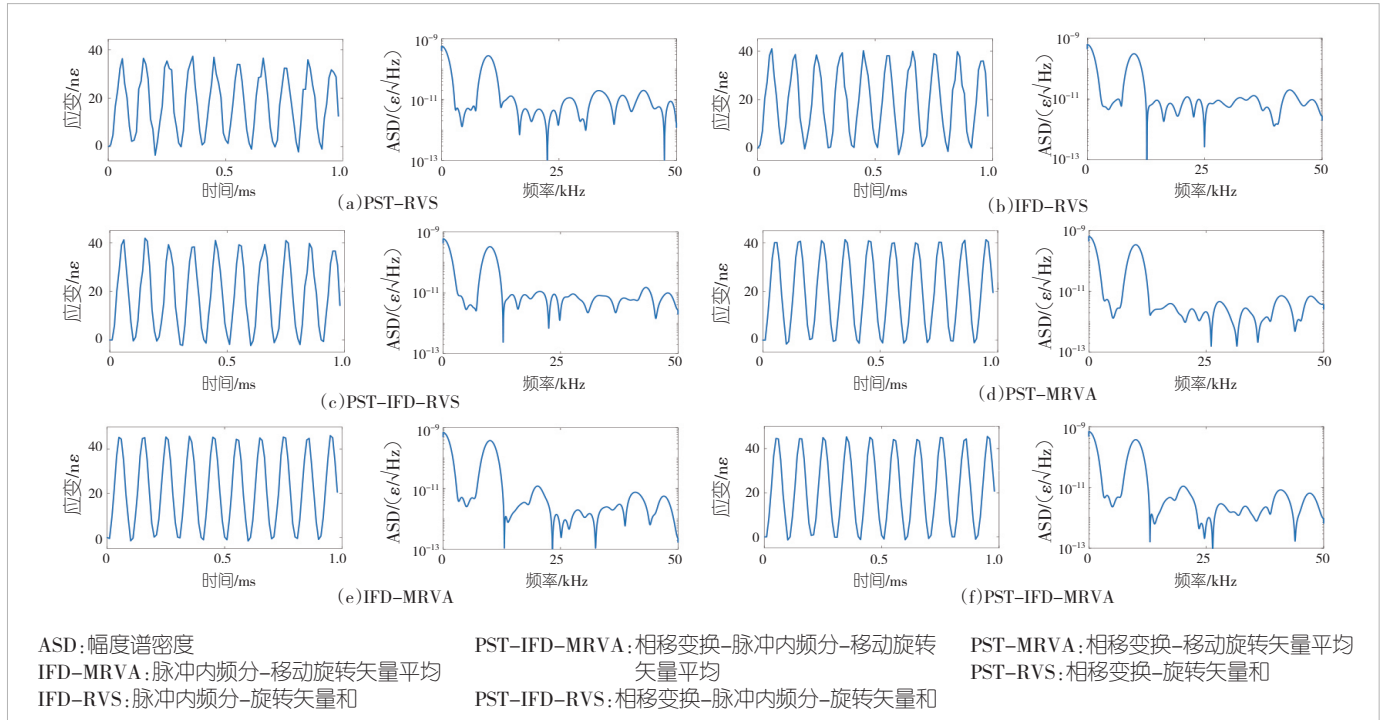
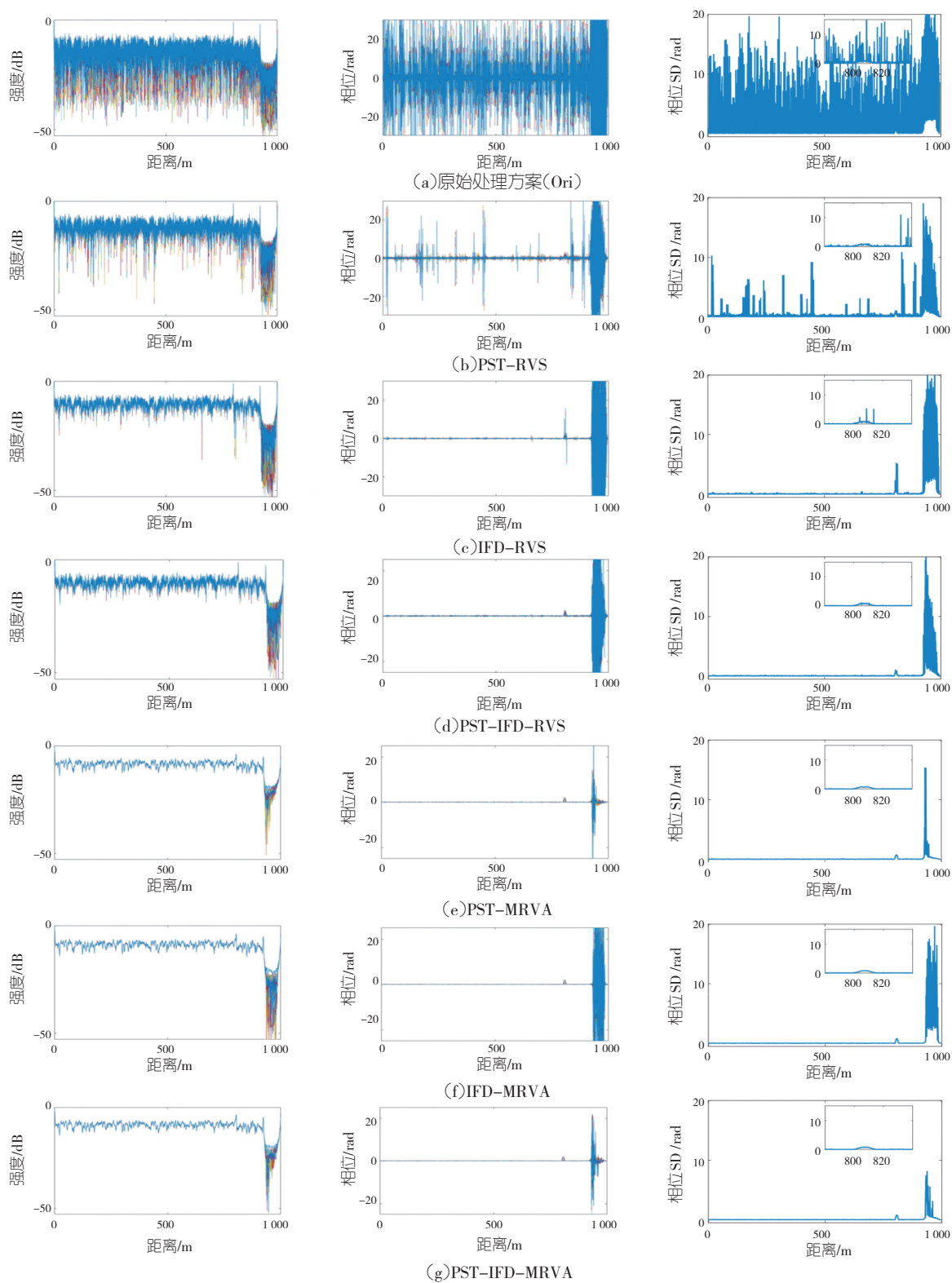


图5 不同衰落抑制方案解调出的环境扰动以及ASD



IFD-MRVA: 脉冲内频分-移动旋转矢量平均

IFD-RVS: 脉冲内频分-旋转矢量和

PST-IFD-MRVA: 相移变换-脉冲内频分-移动旋转矢量平均

PST-IFD-RVS: 相移变换-脉冲内频分-旋转矢量和

PST-MRVA: 相移变换-移动旋转矢量平均

PST-RVS: 相移变换-旋转矢量和

SD: 标准差

图6 不同方案得到的强度、差分相位以及相位标准差曲线

振动识别上的有效性。图7给出了性能指标的对比结果。首先,在平均幅度波动方面,原始信号高达81.97 dB,而PST-IFD-MRVA方案显著降低到27.26 dB,降幅超过66%,这展现出最强的衰落抑制能力。在强度SNR方面,原始信号仅22.58 dB,所有衰落抑制方案均实现强度SNR提升,其中PST-IFD-MRVA增益最为显著,达到32.41 dB,提升幅度接近10 dB。在应变灵敏度方面,原始方案为445.3  $\mu\text{e}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,而衰落抑制方案均大幅降低了该值。其中,基于MRVA的方案整体表现最好,尤其是PST-IFD-MRVA,可将灵敏度进一步降低至9.09  $\mu\text{e}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。在振动SNR方面,基于MRVA的方案可以将性能提升至40 dB左右,其中PST-IFD-MRVA方案

相比原始信号提升超过17 dB,从而显著增强了对微弱振动的识别能力。

#### 4 结束语

本文针对DSM-ISAC中因干涉衰落效应导致传感性能下降与可靠性不足的研究挑战,提出并实验验证了一种接收端多域集成数字信号处理衰落抑制方案。通过依次引入PST、IFD和MRVA,实现干涉衰落的协同抑制。实验结果表明,受益于DSM信号频谱分配的灵活性,通过优化子载波间保护间隔,在920 m标准单模光纤上,实现了36 GBaud DP-16QAM通信信号与线性调频传感脉冲的共波长信道通感融

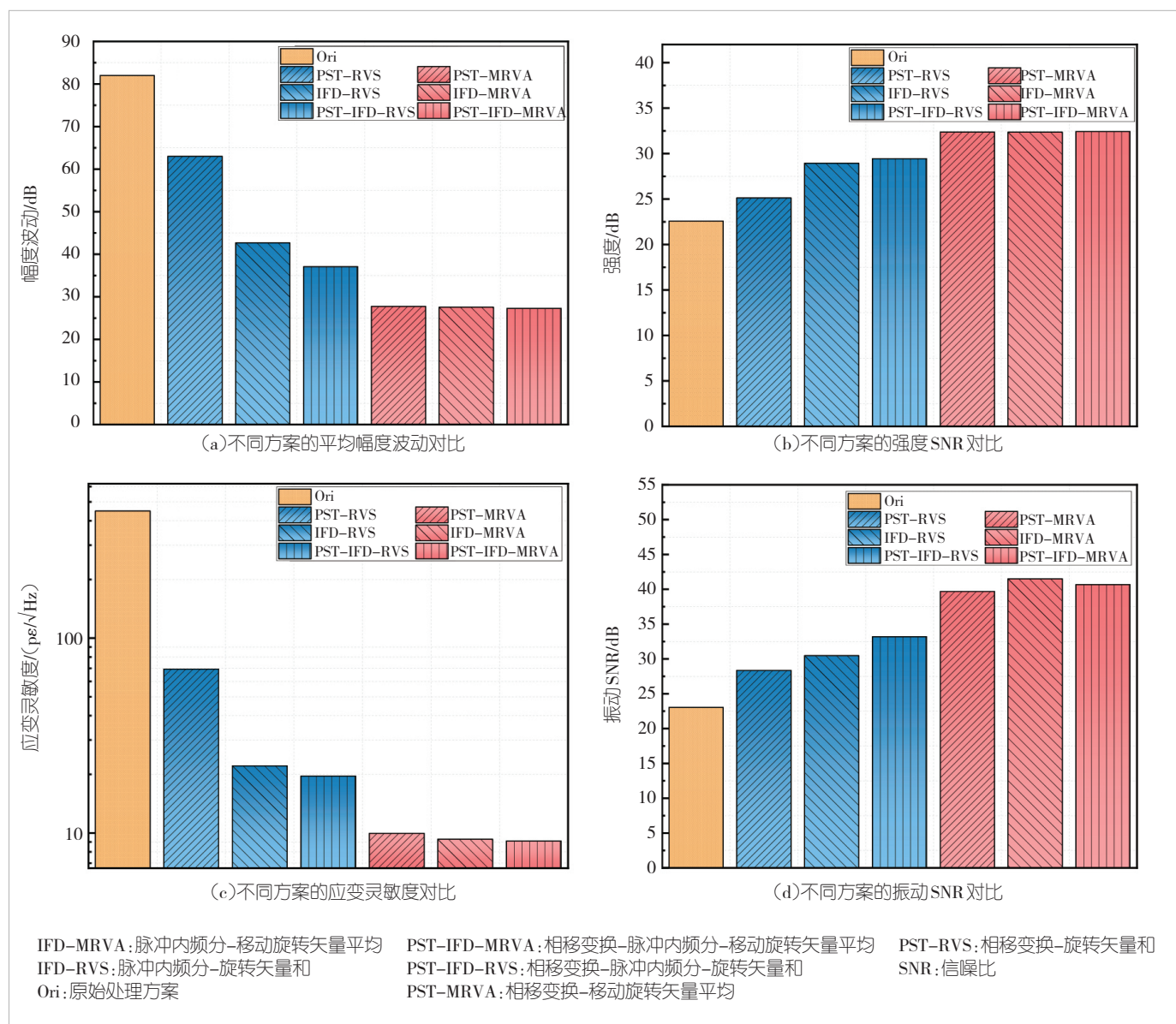


图7 不同衰落抑制方案的性能对比

合。与传统信号的处理方法相比,所提的多域集成衰落抑制方案使信号强度信噪比提升近 10 dB,应变灵敏度提高至 9.09  $\text{ps}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,并成功解调出 10 kHz 振动信号,从而显著改善了 ISAC 系统性能。

#### 参考文献

- [1] LONG J, JIANG L, XIAO C, et al. Large-scale distributed fiber-optic hydrophone towing array and lake trial performance test [J]. Acta optica sinica, 2024, 44(1): 0106019
- [2] IP E, HUANG Y K, WELLBROCK G, et al. Vibration detection and localization using modified digital coherent telecom transponders [J]. Journal of lightwave technology, 2022, 40(5): 1472–1482. DOI: 10.1109/JLT.2021.3137768
- [3] MAZUR M, CASTELLANOS J C, RYF R, et al. Transoceanic phase and polarization fiber sensing using real-time coherent transceiver [EB/OL]. [2025–11–13]. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9748741>
- [4] IP E, HUANG Y K, WANG T, et al. Distributed acoustic sensing for datacenter optical interconnects using self-homodyne coherent detection [EB/OL]. [2025–11–13]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9748716>
- [5] GU L, XIANG M, ZHANG Z B, et al. Co-wavelength-channel integration of ultra-low-frequency distributed acoustic sensing and high-capacity communication [EB/OL]. [2025–11–10]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10810040>
- [6] 向梦, 张泽彬, 古龙, 等. 面向甚低频分布式声波感知的标准单模光纤通感融合系统(特邀)[J]. 光学学报, 2025, 45(13): 1306025
- [7] LU Y, ZHU T, CHEN L, et al. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR [J]. Journal of lightwave technology, 2010, 28(22): 3243–3249. DOI: 10.1109/JLT.2010.2078798
- [8] REN M Q, LU P, CHEN L, et al. Theoretical and experimental analysis of  $\Phi$ -OTDR based on polarization diversity detection [EB/OL]. [2025–11–09]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7343742>
- [9] ZHOU J, PAN Z Q, YE Q, et al. Characteristics and explanations of interference fading of a  $\Phi$ -OTDR with a multi-frequency source [J]. Journal of lightwave technology, 2013, 31(17): 2947–2954. DOI: 10.1109/JLT.2013.2275179
- [10] XIANG M, YAN S, ZHOU G, et al. EEPN-free carrier phase recovery for spectral-efficient digital subcarrier multiplexing transmissions [J]. Journal of lightwave technology, 2025, 43(2): 513–521. DOI:10.1109/JLT.2024.3466173
- [11] LIU Q, FAN X, HE Z. Time-gated digital optical frequency domain reflectometry with 1.6-m spatial resolution over entire 110-km range [J]. Optics express, 2015, 23(20): 25988–25995. DOI: 10.1364/OE.23.025988
- [12] ZHOU J, PAN Z Q, YE Q, et al. Phase demodulation technology using a multi-frequency source for discrimination of interference-fading induced false alarms in a  $\Phi$ -OTDR system [J]. Chinese journal of lasers, 2013, 40(9): 905003. DOI: 10.3788/cjl201340.0905003
- [13] LI H, LIU T, FAN C, et al. Fading suppression for distributed acoustic sensing assisted with dual-laser system and differential-vector-sum algorithm [J]. IEEE sensors journal, 2022, 22(10): 9417–9425. DOI:10.1109/JSEN.2022.3164695
- [14] WANG X, LU B, WANG Z, et al. Interference-fading-free  $\Phi$ -OTDR based on differential phase shift pulsing technology [J]. IEEE photonics technology letters, 2018, 31(1): 39–42. DOI: 10.1109/LPT.2018.2881757
- [15] CHEN D, LIU Q W, HE Z Y. Phase-detection distributed fiber-optic vibration sensor without fading-noise based on time-gated digital OFDR [J]. Optics express, 2017, 25(7): 8315–8325
- [16] HE H, YAN L, QIAN H, et al. Suppression of the interference fading in phase-sensitive OTDR with phase-shift transform [J]. Journal of lightwave technology, 2020, 39(1): 295–302. DOI: 10.1109/JLT.2020.3023699
- [17] QIAN H, LUO B, HE H, et al. Fading-free  $\Phi$ -OTDR evaluation based on the statistical analysis of phase hopping [EB/OL]. [2025–11–05]. <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-61-23-6729>
- [18] YU F, LIU S, XU D, et al. Integrated fading suppression for phase-sensitive OTDR: an algorithm set [J]. Journal of lightwave technology, 2024, 42(5): 1754–1764. DOI: 10.1109/JLT.2023.3323394

#### 作者简介



张兵兵, 广东工业大学在读硕士研究生; 主要研究方向为光纤通感融合。



向梦, 广东工业大学教授; 主要从事基于新波段、新光纤、新放大的高速光传输关键技术研究。



张泽彬, 广东工业大学在读硕士研究生; 主要研究方向为光纤通感融合。



付松年, 广东工业大学教授、博士生导师, 中国光学工程学会光通信与信息技术专委会常务委员, 《中国激光》《Optics Express》和《IEEE Photonics Journal》编委, 广东省“珠江人才计划”引进创新创业团队负责人; 长期从事光纤通信关键技术研究; 主持“十四五”重点研发计划项目、国家自然科学基金杰出青年科学基金和重点项目。



秦玉文, 广东工业大学教授、博士生导师, 广东工业大学先进光子技术研究院院长, 通感融合光子技术教育部重点实验室主任, 广东省信息光子技术重点实验室主任; 主持国家重点研发计划、国家自然科学基金重点项目, 以及广东省重大专项等项目; 发表学术论文 150 余篇, 获授权发明专利 60 余项。