

面向密集光纤布拉格光栅传感网络的微波光子解调技术研究

张修文, 郑狄*, 邹喜华, 潘炜

西南交通大学信息科学与技术学院信息光子与通信研究中心, 四川 成都 611756

摘要 传统基于频域-时域变换的微波光子解调技术应用于光纤布拉格光栅(FBG)传感网络时,为精确解调每一个FBG峰值,须确保对应时域响应信号不发生叠加,这对传感网络中FBG的空间间隔和波长间隔提出了严格要求,限制了微波光子解调技术的应用范围。针对存在的问题,将一种有效的元启发式算法,即算术优化算法(AOA),引入到基于频域-时域变换的微波光子解调技术中,实现了在时域信号叠加下对FBG的精确解调。实验构建了包含6个FBG的传感网络,通过对某一FBG施加轴向应变,验证了在时域信号部分叠加和完全叠加下AOA对FBG峰值解调的可行性。此外,与其他6种元启发式算法进行对比分析,验证了AOA在解调精度、解调速度与收敛效率等方面的性能优势。AOA提升了微波光子解调技术面向密集光纤布拉格光栅传感网络的解调能力。

关键词 微波光子解调技术; 光纤布拉格光栅阵列; 算术优化算法

中图分类号 O439; TN911.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230983

1 引言

微波光子解调技术是一种将光域信息感知与微波域信息解调相结合的新型传感解调技术,利用先进的微波信号分析及处理方法,有望突破传统光域解调的性能瓶颈,近年来引起了科研人员的广泛关注^[1-5]。将微波光子解调技术用于多点或准分布式传感系统时,通常对传感系统的射频响应曲线进行离散傅里叶逆变换(IDFT),实现射频域到时域的变换,通过分析时域脉冲响应峰值点的幅值变化或时间轴上的位置变化,实现传感解调^[6-10]。

Ricchiuti等^[11]首次将基于频域-时域变换的微波光子解调技术应用于基于弱光栅阵列的传感系统中,实现了26.5 cm的最小可探测热源长度。随后,Xia等^[12]通过将该技术与匹配滤波器相结合,通过测量时域信号的幅值变化实现了对光纤光栅阵列的解调。需要指出的是,基于频域-时域变换的微波光子解调技术的解调精度由时域分辨率决定,为了提高时域分辨率,必须增大射频测量带宽,这大大增加了器件,即矢量网络分析仪(VNA)和电光调制器(EOM)等的工作带宽要求,增大了解调系统的成本。为解决该问题,文献^[13-14]采用了补零离散傅里叶逆变换,实现了低射频测量带宽下对FBG峰值的精确解调,实验中在

20 GHz的射频测量带宽下实现了14 pm的波长解调分辨率。随后,文献^[15]提出了Karhunen-Loeve变换(KLT),相比补零离散傅里叶逆变换,在相同的解调精度下,其时间复杂度进一步降低。KLT算法虽然在一定程度上提高了解调速率,但FBG的波长解调范围受到特征值周期的限制。为解决传统基于频域-时域变换的微波光子解调技术所面临的射频响应测量带宽、解调速率和解调精度相互制约的问题,本课题组^[16]提出了时域细化算法。实验结果表明,在相同时域分辨率下,所提算法所需的计算点数减少为补零离散傅里叶逆变换的1/200,解调速率提升14.5倍。

另一方面,传统基于频域-时域变换的微波光子解调技术应用于FBG传感网络时,为确保精确解调每一个FBG峰值,须确保其对应时域响应信号不发生叠加,这对传感网络中FBG的空间间隔和波长间隔提出了严格要求,限制了微波光子解调技术的应用范围。针对存在的问题,本文提出了一种基于AOA的时域重叠信号峰值检测方法,解决了传统基于频域-时域变换的微波光子解调技术在时域信号叠加下无法解调的问题。所提方法通过构造并求解时域重叠谱优化模型,实现了时域信号叠加下对FBG峰值的精确解调。在此基础上,通过对AOA与传统元启发式算法进行对比分析,进一步验证了AOA在解调精度、解调速度

收稿日期: 2023-05-15; 修回日期: 2023-06-07; 录用日期: 2023-07-03; 网络首发日期: 2023-08-02

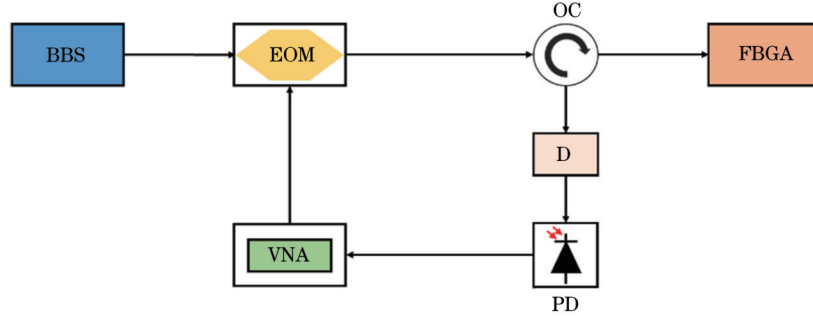
基金项目: 国家自然科学基金(62071395)、四川省自然科学基金面上项目(2023NSFSC0493)、中央高校基本科研业务费专项资金(2682023CG008)

通信作者: *dzheng@swjtu.edu.cn

与收敛效率等方面的性能优势。

2 基于频域-时域变换的微波光子解调原理

图 1 为基于频域-时域变换的微波光子解调原理。



BBS: broadband light source; EOM: electronic optic modulator; OC: optical circulator; PD: photodetector; FBGA: fiber Bragg grating array; D: dispersive element; VNA: vector network analyzer

图 1 基于频域-时域变换的微波光子解调原理

Fig. 1 Schematic of microwave photonic interrogation based on frequency-time domain transformation

整个系统的频率响应^[17-18]可表示为

$$H(\omega) = \sum_{n=0}^{Q-1} P_n e^{-j\omega\tau_n}, \quad (1)$$

式中: Q 为传感阵列中 FBG 的数量; ω 为输入微波信号的角频率; P_n 是中心波长为 λ_n 的第 n 个光栅的反射功率; τ_n 是光信号从调制器经第 n 个 FBG 到 PD 的传播时间。 τ_n 由两部分组成, 一部分是与光纤物理长度相关的固定时间, 另一部分是由 FBG 波长变化引起的, 与色散介质的色散量成正比。系统的时域脉冲响应 $h_B(t)$ 可以通过对频率响应进行 IDFT 运算得到, 表达式为

$$h_B(t) = B \sum_{n=0}^{Q-1} P_n e^{j\pi B(t-\tau_n)} \text{sinc}[B(t-\tau_n)], \quad (2)$$

式中: B 为 VNA 的扫频带宽。由式(2)可以看出, 不同 FBG 反射的信号在时域上呈现出一系列离散的 sinc 脉冲。当 FBG 的中心波长发生改变时, 对应的时域 sinc 脉冲也随之偏移。因此, 通过测量 sinc 脉冲的峰值位置改变量 $\Delta\tau_n$, 即可解调第 n 个 FBG 的波长偏移量 $\Delta\lambda_n$,

$$\Delta\lambda_n = \frac{\Delta\tau_n}{D}, \quad (3)$$

式中: D 为色散介质的色散量。

传统基于频域-时域变换的微波光子解调技术解调 FBG 传感网络时, 为确保精确解调每一个 FBG 峰值, 须确保对应时域响应信号有足够的时域间隔。然而在实际应用中, 受限于 FBG 间的光路径间隔和波长间隔, 多个 FBG 对应的时域脉冲曲线可能发生重叠, 如图 2 所示。图 2 中虚线和密虚线分别为单独测量情况下 FBG₁ 和 FBG₂ 对应的时域 sinc 脉冲, 实线为叠加后的时域脉冲。从图 2 可以看出, 由于受到时域信号叠加影响, 传统峰值解调方法无法实现对两个 FBG 的分别解调。因此, 为了实现对时域重叠信号的解调, 本文将一种有效的元启发式算法, 即 AOA, 引入到基于

系统的光源采用宽带光源(BBS), 其发出的光信号在 EOM 处被 VNA 输出的微波信号调制, 随后被光环形器定向到 FBG 传感网络。FBG 传感网络反射的光信号经色散延迟介质后由光电探测器(PD)转换为电信号, 最终由 VNA 测得系统的频率响应。

频域-时域变换的微波光子解调技术中, 实现时域信号叠加下的多 FBG 解调, 进一步提升了微波光子解调技术面向密集光纤布拉格光栅传感网络的解调能力。

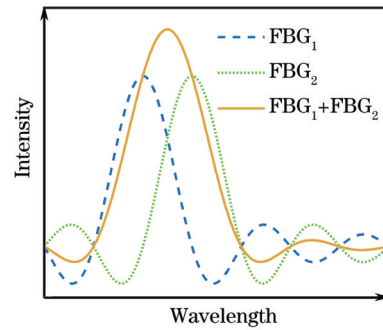


图 2 时域信号叠加示意图

Fig. 2 Schematic of time-domain signal superposition

3 算术优化算法

算术优化算法执行流程如图 3 所示, 主要包括初始化、探索及开发 3 个阶段。其中, 初始化阶段用于生成一组随机的候选解; 在探索和开发阶段, 依据运算符不同的分布特性, 在搜索空间中寻找最优目标解。

1) 初始化阶段

AOA 的优化过程是从一组随机生成的候选解 X 开始的, 将每次种群迭代过程中的最佳结果作为当前最优解, 并随着迭代次数的增加不断更新当前最优解, 从而达到寻优目的。

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,j} & \cdots & x_{1,d} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{i,1} & \cdots & x_{i,j} & \cdots & x_{i,d} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{N_s,1} & \cdots & x_{N_s,j} & \cdots & x_{N_s,d} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

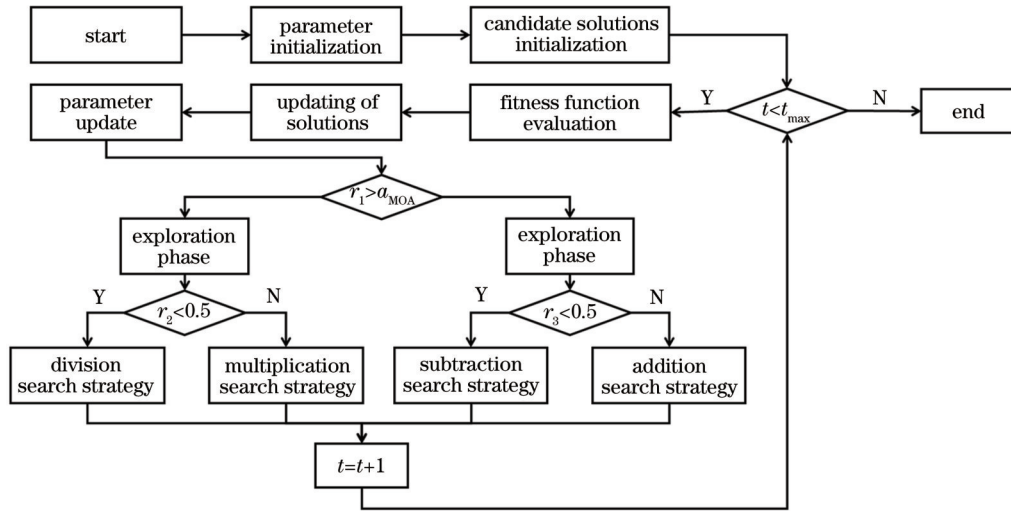


图 3 AOA 执行流程

Fig. 3 AOA execution flowchart

式中: N_s 是候选解的数量; d 为待求解变量的维度。

在种群迭代开始之前, AOA 依据数学优化加速 (MOA) 函数和服从 $[0, 1]$ 均匀随机分布的随机参数 r_1 选择搜索阶段 (探索或开发阶段)。当 $r_1 > a_{MOA}$ 时进入探索阶段, 实现全局寻优; 否则进入开发阶段, 深入搜索区域, 实现局部寻优能力的增强。MOA 的计算公式为

$$a_{MOA}(t) = a_{MOA \min} + t \times \left(\frac{a_{MOA \max} - a_{MOA \min}}{t_{\max}} \right), \quad (5)$$

式中: t_{\max} 为最大种群迭代次数; t 为当前种群迭代次数; $a_{MOA \min}$ 和 $a_{MOA \max}$ 分别为 MOA 的最小值和最大值, 取值分别为 0.2 和 1。

2) 探索阶段

在探索阶段, AOA 利用乘法和除法运算符高度分布难以接近目标的特性, 完成搜索空间中的全局寻优。探索阶段的位置更新公式为

$$X_{i,j}(t+1) = \begin{cases} \text{best}(x_j) / (p_{MOP} + \epsilon) \times [(B_{Uj} - B_{Lj}) \times \mu + B_{Lj}], & r_2 < 0.5 \\ \text{best}(x_j) \times p_{MOP} \times [(B_{Uj} - B_{Lj}) \times \mu + B_{Lj}], & r_2 \geq 0.5 \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $X_{i,j}(t+1)$ 为 $t+1$ 次迭代时第 i 个解的第 j 维变量; $\text{best}(x_j)$ 为第 t 次迭代获得的最优解的第 j 维变量; ϵ 为一个小整数; B_{Uj} 和 B_{Lj} 分别为第 j 维变量的上限和下限值; μ 是调节搜索过程的控制参数, 取值为 0.499; r_2 服从 $[0, 1]$ 均匀随机分布, 当 $r_2 < 0.5$, 采用除法搜索策略, 否则采用乘法搜索策略。为了更为全面地寻找搜索空间中的其他区域, 防止陷入局部最优, 在式 (6) 引入数学优化概率 (MOP), 表示为

$$p_{MOP}(t) = 1 - \frac{t^{1/\alpha}}{t_{\max}^{1/\alpha}}, \quad (7)$$

式中: α 为敏感参数, 其决定了种群迭代过程中的探索精度, 取值为 0.5。

3) 开发阶段

在开发阶段, AOA 利用加法和减法运算符分布密度低且易接近目标的特性, 实现搜索空间中的局部寻优。开发阶段的位置更新公式为

$$X_{i,j}(t+1) = \begin{cases} \text{best}(x_j) - p_{MOP} \times [(B_{Uj} - B_{Lj}) \times \mu + B_{Lj}], & r_3 < 0.5 \\ \text{best}(x_j) + p_{MOP} \times [(B_{Uj} - B_{Lj}) \times \mu + B_{Lj}], & r_3 \geq 0.5 \end{cases}, \quad (8)$$

式中: r_3 服从 $[0, 1]$ 均匀随机分布, 当 $r_3 < 0.5$, 采用减法搜索策略, 否则采用加法搜索策略。

4 分析与讨论

为了验证 AOA 的解调性能, 搭建了时域信号重

叠下的微波光子解调系统, 如图 4 所示。传感网络由 6 个不同峰值波长的 FBG 组成, 其中 $FBG_3 \sim FBG_6$ 的波长分别为 1550.0 nm、1552.5 nm、1557.5 nm、1560 nm, 反射率均为 90%。FBG₁ 和 FBG₂ 的波长分别为 1537 nm 和 1517 nm, 反射率分别为 60% 和 90%。

需要指出的是,FBG₁和FBG₂的反射率不同是为了区分重叠的时域脉冲峰值。

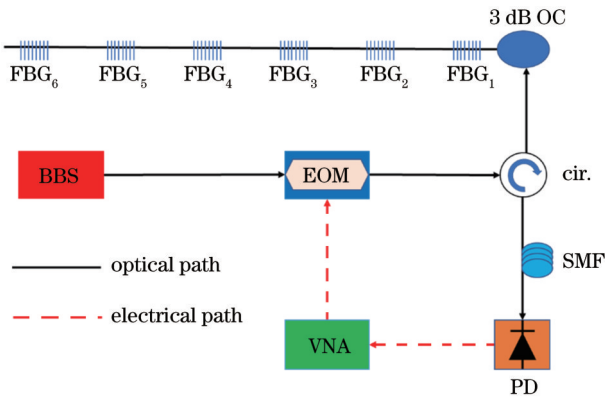


图 4 时域信号重叠下的微波光子解调系统的实验装置图

Fig. 4 Experimental setup diagram of microwave photonic interrogation system under time-domain signal overlap

由式(2)可知,不同FBG反射的信号在时域呈现出一系列离散的 sinc 脉冲。FBG₁和FBG₂对应的 sinc 脉冲在时域上的延时差 Δt 可以表示为

$$\Delta t = DL(\lambda_2 - \lambda_1) + \frac{2n_{\text{eff}}\Delta L}{c}, \quad (9)$$

式中: λ_1 和 λ_2 分别为FBG₁和FBG₂的峰值波长; c 为真空中的光速; D 为色散介质的色散量; n_{eff} 为光纤有效折射率; ΔL 为连接FBG₁和FBG₂的单模光纤长度; L 是作为色散元件的单模光纤的总长度。实验中FBG₁和FBG₂的波长差为 20 nm,所用单模光纤的 $n_{\text{eff}} = 1.45$, $D = 17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。为确保FBG₁和FBG₂所对应 sinc 脉冲在时域发生重叠,选取 ΔL 约为 35 cm,作为色散元件的单模光纤的长度为 10 km。

实验中的数据集是由 VNA 扫频获得的, VNA 扫频范围设置为 10 MHz~5 GHz, 采样分辨率设置为 5 MHz, 总共包含 1000 个采样点。实验中, 将 FBG₁ 的两端固定在 2 个三轴位移平台之间, 两固定点之间的间距为 10 cm, 通过调节其中一个三轴位移平台, 改变施加在 FBG₁ 上的轴向应变值。施加在 FBG₁ 上的应

变从 0 $\mu\epsilon$ 线性增加到 2000 $\mu\epsilon$, 步长为 100 $\mu\epsilon$, 所有 FBG 均处于相同的恒温环境下以消除温度波动对解调结果的影响。需要指出的是, 通过改变施加在 FBG₁ 上的应变值, FBG₁ 和 FBG₂ 所对应的时域 sinc 峰值将经历不重叠、部分重叠及完全重叠三种情况。

部分重叠和完全重叠情况下系统的频谱响应曲线如图 5 所示。对于空间间隔和波长间隔均处于非等间距条件下的光纤光栅传感阵列, 其频谱响应曲线具有非周期性振荡的特点, 无论是处于部分重叠还是完全重叠情况下的频谱响应曲线, 均表现出杂乱无章的特性, 分析频谱响应曲线的幅值或频率变化的传统方式难以实现对光纤光栅阵列中 FBG 的精确解调。图 6 为不同应变下时域细化算法^[16]得到的时域冲击响应曲线, 其中时域细化算法的时域细化倍数 R 取值为 200, 图 6 中的两个脉冲峰值分别对应于 FBG₁ 和 FBG₂。需要指出的是, 时域冲击响应的幅值已归一化到 0~1。从图 6 可以看出, 刚开始两个 FBG 对应的 sinc 脉冲峰值可以清晰分辨, 但是随着施加在 FBG₁ 上的应变逐渐增大, 两个 sinc 脉冲逐渐发生重叠, 难以有效识别每个 sinc 脉冲的峰值。由于两个 FBG 的反射率不同, 处于未重叠情况下的两个时域脉冲峰值点的幅值有较为明显的差异。此外, 图 6 中幅值低于 0.4 的脉冲为两个主脉冲的旁瓣。

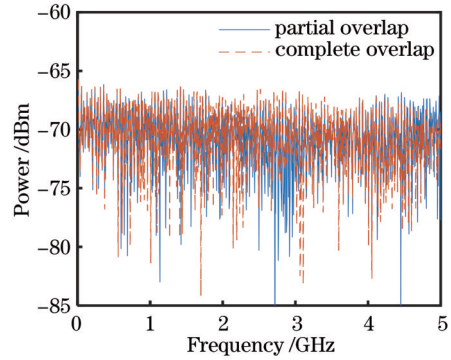


图 5 FBG 传感阵列的频谱响应曲线

Fig. 5 Frequency spectrum response curve of FBG sensing array

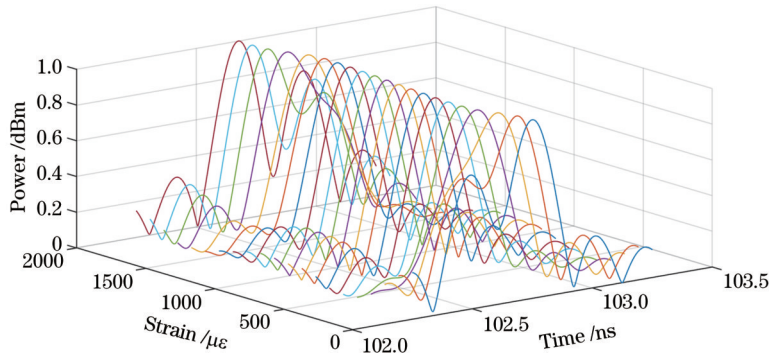


图 6 不同应变下的时域重叠谱

Fig. 6 Time-domain overlapping spectra under different strains

为了对时域重叠信号进行精确的解调,引入了一种强有力的元启发式算法,即 AOA。在使用 AOA 进行解调之前,首先需要将 FBG 传感网络的时域重叠信号解调问题转为函数优化问题,FBG₁和 FBG₂在时域对应的重叠谱可表示为

$$h_B(t) = BP_1 e^{j\pi B(t-\tau_1)} \text{sinc}[B(t-\tau_1)] + BP_2 e^{j\pi B(t-\tau_2)} \text{sinc}[B(t-\tau_2)] + N(t), \quad (10)$$

式中: τ_1 和 τ_2 分别为 FBG₁和 FBG₂对应的时域脉冲峰值点; $N(t)$ 为系统噪声。为解调各时域脉冲峰值点(τ_1 和 τ_2),可引入变量 $s_i(i=1,2)$ 构造出一个理论的时域重叠谱函数,即

$$\begin{cases} \hat{h}_B(t,s) = BP_1 e^{j\pi B(t-s_1)} \text{sinc}[B(t-s_1)] + \\ BP_2 e^{j\pi B(t-s_2)} \text{sinc}[B(t-s_2)] \\ s = [s_1, s_2] \end{cases}, \quad (11)$$

式中: $s_i(i=1,2)$ 的取值范围为所选定的时域细化区间,通过改变其取值,可以得到该传感网络下所有可能的理论时域重叠谱。通过理论构造的时域重叠谱 $\hat{h}_B(t,s)$ 去逼近目标时域重叠谱 $h_B(t)$,两者的差异可以用差异度函数来表示,即

$$D(s) = \int_0^{\infty} |h_B(t) - \hat{h}_B(t,s)| dt. \quad (12)$$

当且仅当 $s_i = \tau_i(i=1,2)$,差异度函数 $D(s)$ 取得最小值。因此,通过求解式(12)的最小值即可获得各时域脉冲峰值点,从而实现 FBG₁和 FBG₂的解调。完整的时域重叠谱优化模型可表述为

$$\begin{aligned} \min D(s) = & \int_0^{\infty} |h_B(t) - \hat{h}_B(t,s)| dt, \\ & t_{\min} \leq s_1, s_2 \leq t_{\max}, \end{aligned} \quad (13)$$

式中: t_{\max} 和 t_{\min} 分别为拟定时域细化区间的上下限。综上所述,时域重叠信号解调问题可以转换为多参数寻优问题。通过引入 AOA 对该优化模型进行求解,即可实现对 FBG 传感网络时域重叠信号的高精度解调。

AOA 的相关参数设置如下:种群数量 $N_s = 30$,最大迭代次数 $t_{\max} = 100$,待求解参数的维度 $d = 2$,参数的取值范围均为 $[t_c - N/2BR, t_c + N/2BR]$,其中 t_c 为待细化分析的时域中心点, N 为采样点数, B 为射频带宽。AOA 的迭代过程如图 7 所示,可以看出当迭代次数达 7 时,算法基本收敛。需要指出的是,适应度值越接近零,表明应变解调结果越精确。AOA 的解调结果如图 8 所示,其中实线为不同重叠情况下各 FBG 对应的 RMSE。从图 8 可以看出,当两个时域脉冲部分重叠或完全重叠时,AOA 拥有确定各时域脉冲峰值的能力。其中 FBG₁的最大应变解调误差为 $6.165 \mu\epsilon$,平均应变解调误差为 $2.406 \mu\epsilon$;FBG₂的最大应变解调误差为 $9.246 \mu\epsilon$,平均应变解调误差为 $3.769 \mu\epsilon$ 。在使用

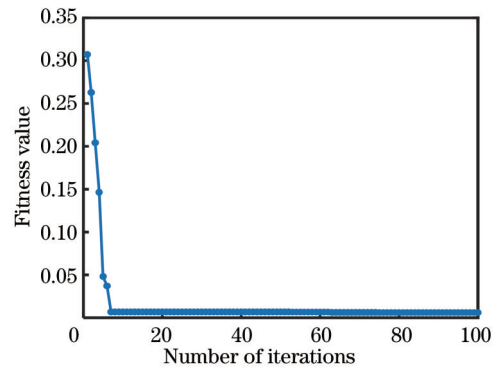


图 7 AOA 的迭代过程

Fig. 7 AOA iteration process

AOA 进行解调的过程中,由于其初始化阶段生成的候选解是随机的,并且在探索阶段和开发阶段的选择系数 r_1, r_2, r_3 具有随机性,因此在每次解调的过程中可能会出现部分重叠情况下对应的解调误差比完全重叠情况下对应的解调误差更高的情况。

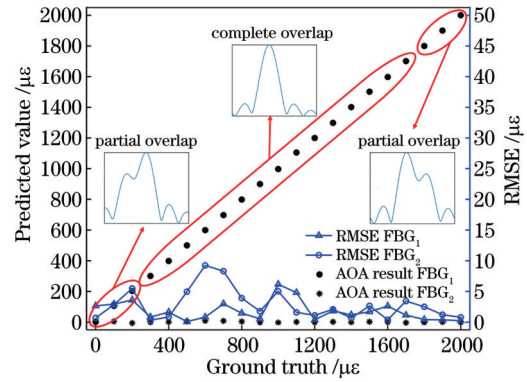


图 8 AOA 解调结果

Fig. 8 AOA demodulation result

为了进一步验证 AOA 的解调性能,将 AOA 与另外 6 种元启发式算法,即遗传算法(GA)、粒子群优化算法(PSO)、差分进化算法(DE)、麻雀搜索算法(SSA)、鲸鱼优化算法(WOA)、混沌博弈算法(CGO)进行了比较。同时为了公平地对比算法的性能,每种元启发式算法的种群数量 N_s 均设置为 30,最大迭代次数 t_{\max} 均设置为 100,所有算法均运行 100 次。图 9 为 7 种元启发式算法的迭代过程,可以看出,在算法迭代过程中 AOA 和 CGO 的收敛速度最快,DE 的收敛速度最慢。结果表明,AOA 不仅可以高精度地求解施加在 FBG 的应变值,且具有较好的收敛性能。

为了更直观地对比 AOA 与其他 6 种元启发式算法在解调性能上的差异,表 1 从算法解调时间、FBG₁的 RMSE、FBG₂的 RMSE 三个方面进行总结分析。从表 1 可以看出:AOA 与 CGO 的解调精度最高,但是 CGO 的耗时较长,是 AOA 耗时的 4 倍;其他 5 种元启发式算法的耗时与 AOA 相似,但应变解调精度较差,在时域脉冲完全重叠的情况下,其余 5 种元启发式算

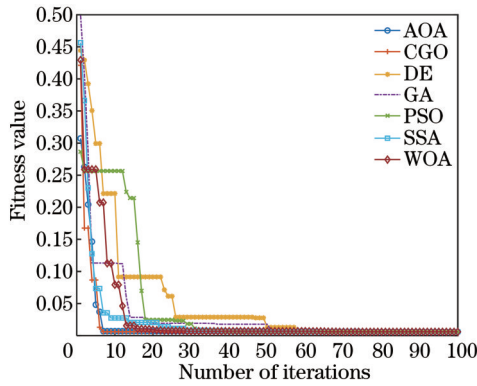


图 9 7 种元启发式算法的迭代过程

Fig. 9 Iterative process of seven meta-heuristic algorithms

表 1 7 种元启发式算法的性能对比

Table 1 Performance comparison of seven meta-heuristic algorithms

Algorithm	Demodulation time /s	RMSE of $FBG_1 / \mu\epsilon$	RMSE of $FBG_2 / \mu\epsilon$
AOA	5.158	2.406	3.769
GA	5.468	4.317	7.577
PSO	5.562	3.513	5.035
DE	5.381	3.913	8.052
SSA	6.717	3.235	4.488
WOA	5.412	2.904	4.783
CGO	21.677	2.541	3.614

法在搜索过程中易陷入局部最优,因此应变解调精度较差。实验结果表明,与其他的元启发式算法相比, AOA 具有收敛速度快、运算时间短、应变解调精度高的特点,能有效准确地实现时域重叠信号解调。

5 结 论

对于 FBG 传感阵列,利用传统基于频域-时域变换的微波光子技术进行解调时,须保证时域响应曲线的脉冲信号不发生重叠,否则会导致 FBG 的解调产生巨大的误差,这极大程度上限制了微波光子解调技术的应用范围。针对存在的问题,在传统基于频域-时域变换的微波光子解调技术中引入一种基于算术优化算法的时域重叠信号峰值检测方法。所提方法通过将时域重叠信号解调问题转换为多参数寻优问题,以数学建模的方式实现了对信号重叠下时域峰值的精确解调。通过与其他 6 种元启发式算法进行对比可知, AOA 在收敛效率、解调速度、解调精度等方面都表现出良好的特性,且进一步解决了传统元启发式算法易陷入局部最优解的缺陷,有效提升了微波光子解调技术面向密集光纤布拉格光栅传感网络的解调能力。

参 考 文 献

[1] Yao J P. Microwave photonic sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(12): 3626-3637.

[2] Zheng D, Madrigal J, Barrera D, et al. Microwave photonic filtering for interrogating FBG-based multicore fiber curvature sensor[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(20): 1707-1710.

[3] Zou X H, Bai W L, Chen W, et al. Microwave photonics for featured applications in high-speed railways: communications, detection, and sensing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(19): 4337-4346.

[4] Wang G Y, Liao B L, Cao Y, et al. Microwave photonic interrogation of a high-speed and high-resolution temperature sensor based on cascaded fiber-optic Sagnac loops[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(12): 4041-4048.

[5] 崔益峰, 汪弋平, 施青云, 等. 基于微波光子滤波器的高分辨率光纤横向负载传感器[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1206004. Cui Y F, Wang Y P, Shi Q Y, et al. High-resolution transverse load fiber sensor based on microwave photonic filter[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1206004.

[6] Ricchiuti A L, Barrera D, Sales S, et al. Long fiber Bragg grating sensor interrogation using discrete-time microwave photonic filtering techniques[J]. Optics Express, 2013, 21(23): 28175-28181.

[7] Huang J, Lan X W, Luo M, et al. Spatially continuous distributed fiber optic sensing using optical carrier based microwave interferometry[J]. Optics Express, 2014, 22(15): 18757-18769.

[8] Wu N S, Xia L, Song Y M, et al. Simultaneous differential interrogation for multiple FBGs based on crossed Sagnac loops and microwave network[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(23): 5953-5960.

[9] Benitez J, Bolea M, Mora J. Demonstration of multiplexed sensor system combining low coherence interferometry and microwave photonics[J]. Optics Express, 2017, 25(11): 12182-12187.

[10] Hua L W, Song Y, Cheng B K, et al. Coherence-length-gated distributed optical fiber sensing based on microwave-photonic interferometry[J]. Optics Express, 2017, 25(25): 31362-31376.

[11] Ricchiuti A, Hervas J, Barrera D, et al. Microwave photonics filtering technique for interrogating a very-weak fiber Bragg grating cascade sensor[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(6): 5501410.

[12] Xia L, Cheng R, Li W, et al. Identical FBG-based quasi-distributed sensing by monitoring the microwave responses[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(3): 323-325.

[13] Hervás J, Fernández-Pousa C R, Barrera D, et al. An interrogation technique of FBG cascade sensors using wavelength to radio-frequency delay mapping[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(11): 2222-2227.

[14] Werzinger S, Bergdolt S, Engelbrecht R, et al. Quasi-distributed fiber Bragg grating sensing using stepped incoherent optical frequency domain reflectometry[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(22): 5270-5277.

[15] Hervás J, Tosi D, García-Miquel H, et al. KLT-based interrogation technique for FBG multiplexed sensor tracking[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(16): 3387-3392.

[16] 张修文, 郑狄, 邹喜华, 等. 基于频域-时域变换的高精度微波光子滤波解调技术[J]. 光学学报, 2022, 42(23): 2306003. Zhang X W, Zheng D, Zou X H, et al. High-precision microwave photon filtering demodulation technology based on frequency-time domain transform[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(23): 2306003.

[17] 张梓平, 牛晓晨, 黄杰, 等. 基于光纤环谐振腔的高性能微波光子滤波器[J]. 光学学报, 2020, 40(21): 2106001. Zhang Z P, Niu X C, Huang J, et al. High-performance microwave photonic filter based on fiber ring resonator[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(21): 2106001.

[18] 孙良辰, 李金野, 贾倩倩, 等. 基于微环的响应可切换微波光子滤波器[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(9): 0913001.

Microwave Photonic Demodulation Technology for Dense Fiber Bragg Grating Sensor Network

Zhang Xiuwen, Zheng Di*, Zou Xihua, Pan Wei

Center for Information Photonics and Communications, the School of Information Science & Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China

Abstract

Objective As an interdisciplinary topic, microwave photonics has important applications in fields of broadband optical wireless communications, radars, and electronic warfare, due to the intrinsic characteristics of large bandwidth, high resolution, tunability, reconfiguration, and immunity to electromagnetic interference. In recent years, demodulation techniques based on microwave photonics have attracted considerable research interest, through the sensing information conversion from the optical domain to the microwave domain and high-resolution electrical spectrum analysis and processing techniques. When microwave photonic demodulation technology is applied to multi-point or quasi-distributed fiber Bragg grating (FBG) sensing systems, the RF response curve of the sensing system is usually transformed from the RF domain to the time-domain by discrete inverse Fourier transform (IDFT). Meanwhile, the sensor demodulation is realized by analyzing the amplitude of the peak point of impulse response in the time domain or the position change on the time axis. When traditional microwave photonic demodulation technology based on frequency-time transformation is applied to the FBG sensor network, it is necessary to ensure that no superposition is generated in the corresponding time-domain response signal for guaranteeing accurate demodulation of each FBG. This puts forward strict requirements for the spatial interval and wavelength separation between FBGs and limits the application range of microwave photonic demodulation technology. To this end, an effective meta-heuristic algorithm, arithmetic optimization algorithm (AOA) is introduced into the microwave photonic demodulation technology based on frequency-time transformation to realize precise demodulation of multiple FBG peaks under the time-domain signal superposition.

Methods AOA is a newly developed meta-heuristic search technique that simulates the distribution characteristics of the basic arithmetic operations of addition, subtraction, multiplication, and division and has been employed to solve some real-world optimization problems. It is mainly divided into three stages including initialization, exploration, and development. During the exploration stage, Math optimizer accelerated functions are adopted to select different search strategies. At the beginning of this stage, AOA takes advantage of the characteristic that the multiplication and division operators are widely distributed and are difficult to approach the target to complete the global optimization in the search space and thus jump out of the local optimum. At the end of the exploration stage, AOA leverages the characteristic that the addition and subtraction operators are lowly distributed and easy to approach the target to achieve local optimization in the search space and further improve demodulation accuracy in a more accurate search space.

Results and Discussions In a proof-of-concept experiment, a sensor network consisting of six FBGs with different wavelengths is built. The scanning range of vector network analyzer (VNA) is set to 10 MHz–5 GHz, the sampling resolution is 5 MHz, and a total of 1000 sampling points are included. In the experiment, the two ends of the sensing FBG are fixed on the two 3-axis translation stages via AB glue, with the distance between the two fixed points being 10 cm. The strain applied on the sensing FBG can be adjusted by moving one of the two translation stages, and it is linearly increased from 0 $\mu\epsilon$ to 2000 $\mu\epsilon$ with a step size of 100 $\mu\epsilon$. It should be pointed out that by changing the strain applied to the sensing FBG, the time-domain sinc peaks corresponding to two FBGs will experience three conditions of non-overlapping, partially overlapping, and completely overlapping. The experiment results show that AOA can determine the central wavelength of each FBG regardless of the overlapping situation of the time-domain pulse signal, indicating that this method is suitable for the demodulation of time-domain overlapping signals (Fig. 8). To further validate AOA's demodulation performance, we conduct a comparison between AOA and other six meta-heuristic methods. The results confirm that, compared with other meta-heuristic algorithms, AOA has better performance in convergence efficiency, demodulation speed, and demodulation precision. Additionally, AOA solves the defect that the traditional meta-heuristic

algorithm is prone to fall into the local optimal solution (Fig. 9 and Table 4).

Conclusions When traditional microwave photonic technology based on frequency-time transformation is employed in the demodulation of FBG sensor arrays, it is necessary to ensure that the pulse signals of the time-domain response curve do not overlap, otherwise, huge demodulation errors will be caused to severely limit the application range of microwave photonic demodulation technology. To solve this problem, we introduce a time-domain overlapping signal peak detection method based on an arithmetic optimization algorithm. The proposed method transforms the demodulation of time-domain overlapping signals into multi-parameter optimization and achieves precise demodulation of time-domain peaks under signal overlapping through mathematical modeling. Comparison with the other six meta-heuristic algorithms shows that AOA exhibits sound performance in convergence efficiency, demodulation speed, and demodulation accuracy. Meanwhile, it solves the defect that traditional meta-heuristic algorithms are prone to fall into local optima to improve the demodulation of microwave photonic demodulation technology for dense FBG sensing networks.

Key words microwave photonic demodulation technology; fiber Bragg grating array; arithmetic optimization algorithm