

三阶双向 RFA 的 Φ -OTDR 传感距离分析仿真乔小瑞¹, 郑亮², 舒畅¹, 王瑛剑¹

(1. 海军工程大学 电子工程学院, 武汉 430033; 2. 中国人民解放军 91954 部队, 湖南 永州 425000)

摘要: 喇曼光纤放大器(RFA)可有效地提高相位敏感光时域反射计(Φ -OTDR)系统的传感距离。为了进一步提高 Φ -OTDR 的系统传感距离, 采用粒子群优化(PSO)算法对三阶双向 RFA 的泵浦光功率取值进行优化, 计算了基于三阶双向 RFA 的 Φ -OTDR 系统理论最远传感距离, 并设计了仿真实验。仿真分析结果表明: 当探测脉冲宽度大于 200 ns 时, Φ -OTDR 系统经三阶双向 RFA 放大传感距离可达到 200 km 以上。

关键词: 分布式光纤传感; 喇曼光纤放大器; 传感距离; Matlab 仿真

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)08-0014-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.08.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Analysis and simulation of Φ - OTDR sensing distance of third-order bidirectional RFAQIAO Xiaorui¹, ZHENG Liang², SHU Chang¹, WANG Yingjian¹

(1. School of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430000, China; 2. PLA 91954, Yongzhou Hunan 425000, China)

Abstract: Raman fiber amplifier (RFA) can effectively improve the sensing distance of phase sensitive optical time domain reflectometer(Φ -OTDR) system. In order to further improve the system sensing distance of Φ -OTDR, the particle swarm optimization(PSO) algorithm is used to optimize the pump optical power value of the third-order bidirectional RFA. The theoretical farthest sensing distance of Φ -OTDR system based on third-order bidirectional RFA is calculated and a simulation experiment is designed. The simulation and analysis results show that when the detection pulse width is greater than 200 ns, the Φ -OTDR system can reach more than 200 km through the third-order bidirectional RFA amplification sensing distance.

Key words: distributed fiber optic sensing; Raman fiber amplifier; sensing distance; Matlab simulation

0 引言

目前, 无中继海底光缆的长度已达到 200 km 以上, 而最长的相位敏感光时域反射计(Φ -OTDR)系统传感距离是 175 km。这是基于分区放大技术和采用三段不同布里渊频移光纤实现的^[1]。因此, 将 Φ -OTDR 应用于海底光缆监测时需解决长距离传感探测的问题。为了进一步提高 Φ -OTDR 的传感距离, 本文对三阶双向喇曼光纤放大器(RFA)在 Φ -OTDR 系统中的应用进行研究。

收稿日期: 2020-02-25。

作者简介: 乔小瑞(1983—), 男, 山西临汾人, 硕士, 讲师, 主要研究方向为海底光缆通信技术。主持或参与多项海底光缆领域科研项目, 主持研发多套海底光缆维修施工探测打捞专用设备, 参与完成国内重大海底光缆工程项目, 主编或参编国内首套“海缆工程技术丛书”中的多个分册。



1 三阶双向 RFA 的最优泵浦功率计算

1.1 粒子群优化(PSO)算法原理

PSO 算法是对鸟群寻找食物过程的模拟。PSO 算法首先需要在指定的搜索空间中随机生成指定数量的小鸟, 即搜寻“粒子”, 粒子自身有一定的移动速度和方向, 通过求解适应度函数, 会出现位置最优的粒子, 称为全局最优值。每个粒子自身在运动过程中也会记录个体的最优位置。粒子在飞行过程中受到全局最优和个体最优位置的影响, 最终所有的粒子汇聚到搜索空间的最优化位置处。

假设在一个 D 维空间内粒子个数为 N , 第 i 个粒子的个体最优位置为 $P_{best} = (P_{i1}^t, P_{i2}^t, \dots, P_{iD}^t)$ $i=1, 2, \dots, N$, 整个粒子群的集体最优位置为 $g_{best} = (P_{g1}^t, P_{g2}^t, \dots, P_{gD}^t)$ 。其中, t 为迭代次数, g 为全局最优位置, P 为位置分量参数, 则该粒子每次更新速度和位置的公式可表示为^[3]:

$$V_{id}^{t+1} = W \cdot V_{id}^t + c_1 r_1 (P_{id}^t - X_{id}^t) + c_2 r_2 (P_{gd}^t - X_{id}^t) \quad (1)$$

$$X_{id}^{t+1} = X_{id}^t + V_{id}^{t+1} \quad (2)$$

其中, V_i 是第 i 个粒子的速度, $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{id})$; X_i 是第 i 个粒子的位置, $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{id})$; $c_1 > 0$ 、 $c_2 > 0$ 是学习因子, r_1 、 r_2 是 $[0, 1]$ 范围内的均匀随机数, W 是惯性权重。

1.2 算法设计

基于三阶双向 RFA 的 Φ -OTDR 系统两端一共有 6 个泵浦源, 再加上探测脉冲的初始功率, 一共有 7 个参数, 可看成是一个 7 维空间内求最优位置的 PSO 计算问题。其中, 探测脉冲功率的大小对系统的性能有直接的影响, 不能随意选取。

本文采用的是 RFA 的小信号模型, 信号功率越小求解越准确^[4]。因此, 探测脉冲功率的最大值应控制在 1 mW 以内。另外, 返回的瑞利散射光(BRS)由于是相干光, 光强度会出现剧烈的波动, 因此必须保证散射光功率峰值的最小值大于 2 倍的光电探测器通量阈值。综合考虑, 这里首先给出 2 个边界条件:

◆条件 1 为:

$$P_{\max} < \sigma_{\text{up}} \quad (3)$$

其中, σ_{up} 表示探测脉冲功率允许达到的最大值, $\sigma_{\text{up}} = 1 \text{ mW}$; $P_{\max}$ 表示探测脉冲的功率最大值。

◆条件 2 为:

$$P_{\min} > 2P_{\text{th}} \quad (4)$$

其中, $P_{\min}$ 为接收端 BRS 峰值功率的最小值, P_{th} 为平衡外差检测的通量阈值。

由于 PSO 算法主要用于寻找单极值的问题, 无法同时对 2 个条件做出响应, 因此本文将以上 2 个边界条件合并为一个公式, 构造总的边界条件 f 的表达式如式(5)所示。

$$f(i) = f_1(i) + f_2(i), i = 1, 2, \dots, N$$

$$f_1(i) = \begin{cases} P_{\max}^i - \sigma_{\text{up}}, & P_{\max}^i > \sigma_{\text{up}} \\ 0, & P_{\max}^i \leq \sigma_{\text{up}} \end{cases} \quad (5)$$

$$f_2(i) = \begin{cases} 2P_{\text{th}} - P_{\min}^i, & P_{\min}^i < 2P_{\text{th}} \\ 0, & P_{\min}^i \geq 2P_{\text{th}} \end{cases}$$

其中, $f(i)$ 表示第 i 个粒子的边界条件, N 表示生成的“粒子”的数目, $f_1(i)$ 表示第 i 个粒子的边界条件 1, $f_2(i)$ 表示第 i 个粒子的边界条件 2。由式(5)可知, 只有当粒子 i 同时满足条件 1 和条件 2 时, $f(i) = 0$ 。当所有粒子的 f 都不等于 0 时, 将 f 值最小的粒子设定为全局

最优; 当存在 $f=0$ 的粒子时, 求出该粒子对应的信号功率分布的均方差。由于均方差可以表示数据的离散程度, 均方差越小, 数据波动幅度越小, 因此给所有 $f=0$ 时粒子的均方差排序, 将均方差最小的粒子设定为全局最优(个体最优情况与全局最优同理)。根据上述内容, 本文利用 Matlab 软件编写计算三阶双向 RFA 最优泵浦功率的 PSO 算法, 算法流程图如图 1 所示。

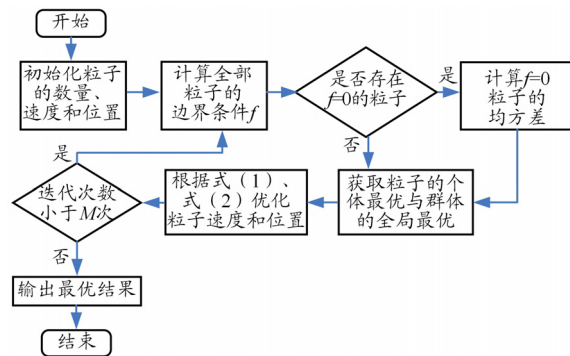


图 1 PSO 算法流程图

1.3 最优泵浦功率计算

PSO 算法的相关参数取值如表 1 所示^[5]。

每个粒子都包含 7 个维度, 各维度对应信息如表 2 所示。

表 2 中, $P_p(0)$ 的取值受 2 个边界条件的限制 (p 表示探测光脉冲发射功率), 取值范围与精度都较小; 同向的泵浦光功率需满足高阶大于低阶, 其范围和精度都是递进的关系。

本文根据设计的 PSO 算法计算得到不同传感距离对应的最优泵浦功率(间隔 10 km 时的功率取值), 具体如表 3 所示。

经多次计算, 当传感距离 $L=188 \text{ km}$ 时, f 的值最小取到 0.0137 ($f \neq 0$), 不满足边界条件, 说明此时已经不存在最优泵浦功率。

2 最远传感距离分析

由表 3 可得, 优化算法有解的最大距离是 187 km, 利用表中结果可以求出 $L=187 \text{ km}$ 时三阶双向 RFA 的最优泵浦功率分布、探测脉冲功率分布以及接收端 BRS 的峰值功率分布如图 2 所示。

图 2(a) 中, a 是一阶最优泵浦光功率分布曲线, 虚

表 1 PSO 计算所需参数

参数	取值
学习因子 c_1	1.8
学习因子 c_2	2.2
惯性权重 W	0.5
迭代次数 M	500
粒子数目 N	100
探测脉冲功率允许达到的最大值 σ_{up}	1 mW
平衡外差检测通量阈值 ^[6] P_{th}	-83 dBm

表 2 粒子的维度信息

维度	符号	取值范围	精度
1	探测光脉冲发射功率 $P_p(0)$	[0.01 mW, 1 mW]	0.0001 mW
2	前向一阶泵浦发射功率 $P_{R_1}^+$	[0, 10 W]	0.01 mW
3	前向二阶泵浦发射功率 $P_{R_2}^+$	[$P_{R_1}^+$, 10 W]	0.1 mW
4	前向三阶泵浦发射功率 $P_{R_3}^+$	[$P_{R_2}^+$, 10 W]	1 mW
5	后向一阶泵浦发射功率 $P_{R_1}^-$	[0, 10 W]	0.01 mW
6	后向二阶泵浦发射功率 $P_{R_2}^-$	[$P_{R_1}^-$, 10 W]	0.1 mW
7	后向三阶泵浦发射功率 $P_{R_3}^-$	[$P_{R_2}^-$, 10 W]	1 mW

表 3 $\tau=100$ ns 时不同传感距离对应的最优泵浦功率与探测脉冲发射功率

传感距离 L/km	最优泵浦功率 $P_p(0)/\text{mW}$	探测脉冲发射功率					
		$P_{R_1}^+/\text{mW}$	$P_{R_2}^+/\text{mW}$	$P_{R_3}^+/\text{mW}$	$P_{R_1}^-/\text{mW}$	$P_{R_2}^-/\text{mW}$	$P_{R_3}^-/\text{mW}$
100	0.1587	7.95	100.8	2219	4.13	102.5	2191
110	0.1238	8.20	106.5	2202	4.58	118.4	2213
120	0.1226	8.21	118.9	2310	4.36	123.9	2324
130	0.1084	8.93	127.6	2296	4.88	130.1	2407
140	0.1178	9.12	132.2	2331	5.15	139.4	2452
150	0.1081	8.64	146.3	2467	5.09	146.7	2519
160	0.1031	8.79	153.4	2573	4.48	155.3	2629
170	0.0961	8.07	162.6	2601	4.08	167.3	2710
180	0.0905	8.46	174.7	2643	4.88	174.8	2757
187	0.0879	8.59	178.1	2665	4.82	182.9	2810

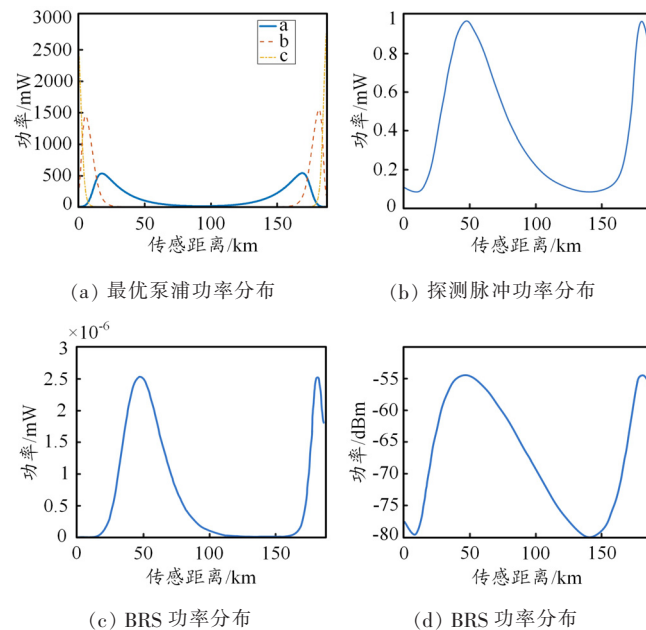


图 2 传感距离 187 km 时的功率分布

线 b 是二阶最优泵浦光功率分布曲线, 虚线 c 为三阶最优泵浦光功率分布曲线。图 2(b)中的信号光功率为 0.9951 mW 时刚好满足边界条件 1; 将图 2(c)的纵轴单位转换为 dBm 后, BRS 曲线如图 2(d)所示, BRS 最小值 $P_{\min}=-79.94$ dBm, 其半功率值为 -82.94 dBm, 刚好满足边界条件 2。由于下一距离 188 km 处已经不存在满足边界条件的泵浦功率, 所以系统探测脉冲宽度 $\tau=100$ ns 时, 基于三阶双向 RFA 的 Φ -OTDR 系统, 其传感距离理论上最远只能达到 187 km。由式(6)可求出对应的系统探测精度^[7]为:

$$\sigma_D = \frac{v\tau}{2} = \frac{c\tau}{2n_0} \quad (6)$$

其中, v 是探测脉冲在光纤内的传播速度, c 是真空光速, n_0 是光纤折射率。设 $c=3.0 \times 10^8$ m/s, $n_0=1.467$, 此时系统探测精度 $\sigma_D=10.2$ m。 $P_{\min}$ 的大小与 Φ -OTDR 系统探测脉冲的宽度 τ 有关, 由于光纤各点处总的 BRS 是半个脉冲宽度内的 BRS 的叠加, τ 越大相应的 $P_{\min}$ 的功率也就越大, 意味着 Φ -OTDR 的传感距离可以延伸到更远。计算不同脉冲宽度时的最远传感距离如图 3 所示。可以看出, 通过增大探测脉冲的宽度, 可以提高传感距离。当 $\tau > 200$ ns 时, 基于三阶双向 RFA 的 Φ -OTDR 系统最远传感距离可以达到 200 km 以上。

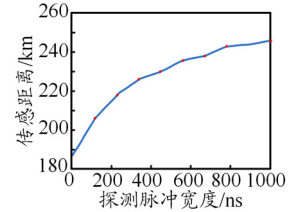


图 3 探测脉冲宽度与最远传感距离的关系图

$\tau=200$ ns 时的最远传感距离、最优泵浦功率和探测脉冲初始功率如表 4 所示。

表 4 $\tau=200$ ns 时的最远传感距离、最优泵浦功率和探测脉冲发生功率

传感距离 L/km	最优泵浦功率 $P_p(0)/\text{mW}$	探测脉冲发生功率					
		$P_{R_1}^+/\text{mW}$	$P_{R_2}^+/\text{mW}$	$P_{R_3}^+/\text{mW}$	$P_{R_1}^-/\text{mW}$	$P_{R_2}^-/\text{mW}$	$P_{R_3}^-/\text{mW}$
206	0.038	11.81	189.1	2754	2.37	181.8	3179

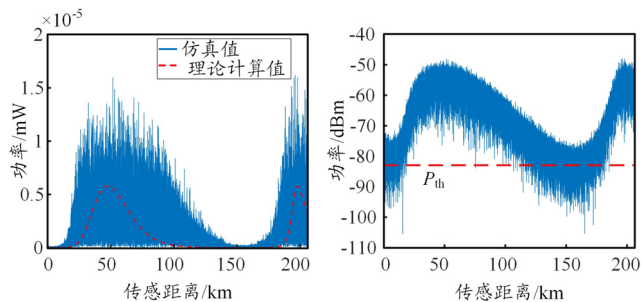
根据式(6)可求得 $\tau=200$ ns 时 Φ -OTDR 系统的探测精度为 20.4 m。因此, 通过增大脉冲宽度来提高传感距离, 会相应地降低探测精度。图 3 中, 当 $\tau=1000$ ns 时虽然可以实现 246 km 的传感距离, 但是探测精度相应地下降为 102 m。

3 仿真模型设计与结果分析

为进一步验证延长探测距离后是否能真正地探测到振动信号。本文利用以下步骤对整根传感光纤上的 BRS 求解。仿真模型工作流程图如图 4 所示。其中,

L 为传感距离, ΔL 为迭代光脉冲的前进距离。本文根据仿真模型结构, 仿真得到沿光纤分布的 BRS 曲线如图 5 所示。由图 5(a) 可知, 仿真得到 BRS 曲线与理论计算的结果(图中虚线)相吻合。将纵轴单位转换为 dBm 后, BRS 曲线如图 5(b) 所示, 图中虚线是平衡外差检测的通

量阈值 P_{th} (-83 dBm), 可以看到曲线大部分都位于通量阈值之上。理论计算得到的 BRS 功率最小值点位于 156 km 位置处, 在此处加入一个应变大小为 $100 \mu\epsilon$ 的振动, 若这个振动可以被测出, 则说明系统在整根光纤上依然具有分布式传感的能力。本文设振动频率为 20 Hz、120 Hz 和 240 Hz 时分别仿真得到 500 个周期的 BRS 曲线, 给曲线添加 -83 dBm 的噪声(平衡外差检测的通量阈值), 利用移动平均和移动差分的方式进行信号处理, 对差分后的曲线取绝对值并将各点的最大值输出, 得到定位图像如图 6 所示。



(a) BRS 曲线与理论值

(b) BRS 曲线与 P_{th}

图 5 仿真得到的 BRS 曲线

图 6(a) 是振动频率为 20 Hz 时的定位图像, 从图中可以清晰地分辨出振动位置。图 6(b) 是振动频率为 120 Hz 时的定位图像, 依然可以看出在 156 km 位置处存在峰值, 但是峰值较低已经不太容易分辨。图 6(c) 是振动频率为 240 Hz 时的定位图像, 可以看出在 156 km 处已经不存在峰值, 说明此时已经无法定位振动位置。

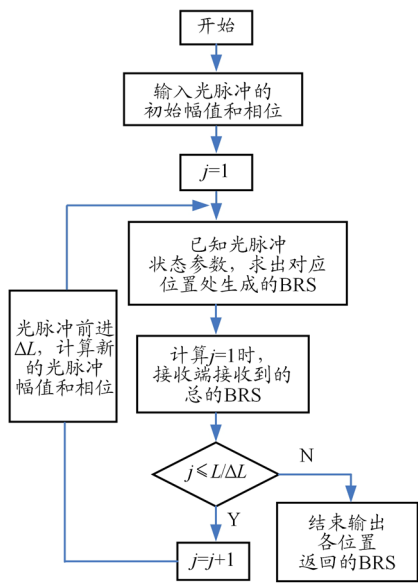
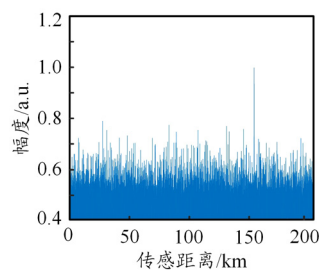
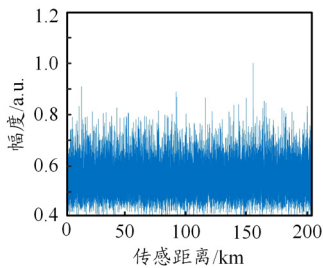


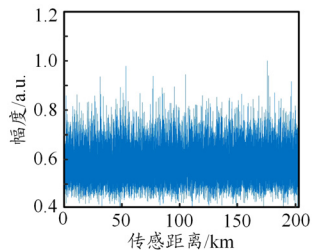
图 4 仿真模型工作流程图



(a) 振动频率为 20 Hz



(b) 振动频率为 120 Hz



(c) 振动频率为 240 Hz

图 6 Φ -OTDR 系统对不同频率振动的定位图像

对图 6 的分析可知, 当传感距离达到 206 km、 $\tau=200$ ns 时, 基于三阶双向 RFA 的 Φ -OTDR 系统依然可以实现振动定位, 这与第 2 节的结论相吻合。但是, 由于传感距离延长造成系统最高响应频率降低, 此时系统只能用于检测频率在 120 Hz 以内的低频振动信号。

4 结束语

分布式喇曼放大技术是延长 Φ -OTDR 传感距离的关键技术。本文利用优化算法计算 $\tau=100$ ns 时 Φ -OTDR 系统在不同传感距离下的最优泵浦功率, 并且发现此时系统的理论最远传感距离可以达到 187 km。当 $\tau \geq 200$ ns 时, Φ -OTDR 系统的最远传感距离可达到 200 km 以上。当 $\tau=200$ ns 时,

Φ -OTDR 系统经三阶 RAF 放大传感距离虽然可达到 200 km 以上, 系统此时却只能用于低频振动信号的检测。因此, 在提高传感距离的同时, 必须同步解决系统最高响应频率下降的问题, 这对于延长 Φ -OTDR 系统的传感距离具有重要意义。

参考文献:

- [1] 饶云江. 长距离分布式光纤传感技术研究进展 [J]. 物理学报, 2017, 66(7): 158-176.
- [2] 臧可. 高阶光纤喇曼放大器的特性研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.
- [3] 焦重阳, 周清雷, 张文宁. 约减的自适应粒子群算法的测试数据自动生成 [J]. 小型微型计算机系统, 2017, 38(6): 1294-1298.
- [4] 程竞驰. 相干光通信系统分布式喇曼放大研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [5] 温正. 精通 MATLAB 智能算法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [6] 彭程. $2 \mu\text{m}$ 相干测风激光雷达的双平衡外差探测技术研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [7] 何茜. 基于 Φ -OTDR 的光纤分布式宽频振动传感技术研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2015.