

基于遗传算法与 Zoom FFT 的光频域 反射仪快速高精度频谱分析

郁胜过, 张 玲, 谢玮霖, 董 毅, 胡卫生

上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

摘要 分析了快速傅里叶变换(FFT)在光频域反射仪(OFDR)频谱分析中应用的局限性, 论述了快速傅里叶变换-分段 Chirp-Z 变换(FFT-SCZT)算法的不足。提出了一种基于改进的遗传算法(IGA)和 Zoom FFT(ZFFT)的快速高精度频谱分析(FFT-IGA-ZFFT)算法。描述了该算法的计算过程, 并推导了算法的时间复杂度。研究结果表明, 在同一运算平台下, 处理 10^7 个 OFDR 采样数据时, FFT 算法耗时 3.130 s, FFT-SCZT 算法耗时 1.993 s, 而 FFT-IGA-ZFFT 算法仅耗时 0.525 s 即可获得同等精度。FFT-IGA-ZFFT 算法在处理速度上具有明显的优势。

关键词 光通信; 频谱分析; 遗传算法; 高精度; 时间复杂度

中图分类号 TN913.7 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0406003

Fast and High-Resolution Spectrum Analysis of Optical Frequency Domain Reflectometry Based on Genetic Algorithm and Zoom FFT

Yu Shengguo, Zhang Ling, Xie Weilin, Dong Yi, Hu Weisheng

*State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*

Abstract We analyze the limitation of the fast Fourier transform (FFT) method applied to the spectrum analysis of the optical frequency domain reflectometry (OFDR). The shortcomings of the fast Fourier transform-segmented Chirp-Z transform (FFT-SCZT) algorithm are discussed. Based on an improved genetic algorithm (IGA) and Zoom FFT (ZFFT), a fast and high-resolution spectrum analysis algorithm, FFT-IGA-ZFFT algorithm, is proposed. The computation procedures of the proposed algorithm are described and its time complexity is deduced. The experimental result shows that the FFT algorithm costs 3.130 s, the FFT-SCZT algorithm costs 1.993 s, and the FFT-IGA-ZFFT algorithm costs 0.525 s when 10^7 OFDR sampling data is processed in the same computing platform and with the same resolution. The FFT-IGA-ZFFT algorithm is outstanding in term of processing speed.

Key words optical communications; spectrum analysis; genetic algorithm; high resolution; time complexity

OCIS codes 060.2300; 060.2330; 060.2630

1 引 言

光频域反射仪(OFDR)以线性扫频光信号为光源^[1],光经过 2×2 光耦合器后,一路作为本振光信号,另一路输出到待测光纤。将光纤的回波光信号与本振光信号进行相干拍频。经理论分析可知,拍频信号频率正比于回波信号的距离^[2]。因此,分析拍频信号频谱即可获得回波点位置。

快速傅里叶变换(FFT)广泛应用于 OFDR 的频谱分析,但存在固有缺陷:1)FFT 的分辨率取决于采样频率和采样点数,只能通过降低采样频率或增加采样点数来提高分辨率;2)在实际工程应用中,人们常常更关注某一频段的分辨率,而 FFT 的分辨率是针对全局频段而言的,增加了计算量。针对上述不足,研究人员

收稿日期: 2016-11-08; **收到修改稿日期:** 2016-12-27

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年基金(61225004)

作者简介: 郁胜过(1991—),男,硕士研究生,主要从事光纤通信和测量方面的研究。E-mail: rain_truman@sjtu.edu.cn

导师简介: 董 毅(1967—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光传输、微波光子学及光电测量方面的研究。

E-mail: yidong@sjtu.edu.cn(通信联系人)

开发了许多新型频谱分析算法,典型的算法包括:1) FFTW (FFT in the west)方法是一种快速计算离散傅里叶变换(DFT)的C程序实现方法^[3],相比于FFT,FFTW可以自动适应缓存,但该算法只是在处理器级别优化了FFT的计算,并没有改进FFT存在的不足;2)快速傅里叶变换-分段Chirp-Z变换(FFT-SCZT)方法先用FFT获得粗略频谱,然后用半交叠滤波器对频谱进行滤波处理,找出可能的谱峰,再用SCZT细化谱峰附近的频谱^[4]。FFT-SCZT实现了粗算全局、细化局部的功能,但存在以下不足:1)使用半交叠滤波器,在提高谱峰检测准确度和信号重建能力的同时,也增加了计算量^[4-5];2)通过阈值比较定位谱峰的方法依赖于阈值设置的合理性,需要根据不同的测量环境调整阈值;3)当谱峰间距很小并发生交叠时,SCZT无法细化分离^[6-8]。

针对上述问题,本文提出了一种基于改进的遗传算法(IGA)和Zoom FFT(ZFFT)的快速高精度频谱分析算法(FFT-IGA-ZFFT),该算法先对小点数作FFTW,得到粗略频谱,再将频谱零交叠地等长分组,将每个分组看作独立个体。以分组编号为基因,以组内信号模值之和为适应度,运用改进的遗传算法智能搜索谱峰,获得需要细化的频段,最后用ZFFT细化该频段。该算法不需要复杂的滤波运算,降低了计算量;采用遗传算法智能搜索谱峰,避免了人为调整阈值;采用ZFFT细化算法,避免了因谱峰交叠而无法细化的问题。考虑到OFDR频谱可能存在多个有效谱峰,本文提出变参数迭代的遗传算法,实现了多个有效谱峰的搜索。

2 算法原理

2.1 算法构成

设采样频率为 f_s ,采样点数为 N ,FFT-IGA-ZFFT算法具体分为以下三个步骤。

1) FFTW全局粗算:对原始数据的前 N_1 个点作FFTW,得到频谱 $X(f)$ 。以宽度 A 对 $X(f)$ 作分组处理,则分组个数 $K = N_1/A$,各组记为 $Y(k)$, $0 \leq k < K$,基因值为 k ,对应的傅里叶频率范围是 $kA \sim (k+1)A - 1$, $0 \leq k < K$ 。

2) IGA谱峰搜索:IGA是一种改进的遗传算法^[9],运用IGA实现谱峰搜索。

第1步,为防止种群迭代过程中基因变异到无效范围,将 K 扩展至最接近的2的 p 次方值,记为 $K_p = 2^p$,则个体基因的长度为 p ,满足

$$2^{p-1} \leq K \leq 2^p. \quad (1)$$

第2步,计算各组内 $X(f)$ 模值之和 S ,记为 $S(k)$:

$$S(k) = \begin{cases} \sum_{i=kA}^{(k+1)A-1} |X(i)|, & 0 \leq k < K \\ 0, & K \leq k < K_p \end{cases}. \quad (2)$$

第3步,根据第1步确定的种群规模 K_p ,从中随机选出 Q 个个体作为进化的初始种群,基因值记为 Y_0, Y_1, \dots, Y_{Q-1} ,则每个个体的适应度为

$$\text{Fit}(i) = S(Y_i) / \sum_{i=0}^{Q-1} S(Y_i). \quad (3)$$

第4步,根据(3)式的计算结果划分概率区域,如图1所示。产生 $0 \sim 1$ 之间的随机数,根据随机数落在哪段概率区域来确定哪个个体被选中。重复 Q 次,从而得到进化后的种群。



图1 IGA个体适应度概率分布图

Fig. 1 Probability distribution of IGA individual fitness

第5步,以概率 P_{cross} 对新产生的种群进行交叉变异。对种群内个体随机配对,当迭代次数小于 G_0 (G_0 为变换交叉方式的迭代数)时,采用正交变异,否则采用多位点变异。用 Y_{ah} 和 Y_{al} 表示基因值 Y_a 的高位和低位

位,用 Y_{Ah} 和 Y_{Al} 表示基因值 Y_A 的高位和低位,用 Y_{bh} 和 Y_{bl} 表示基因值 Y_b 的高位和低位,用 Y_{Bh} 和 Y_{Bl} 表示基因值 Y_B 的高位和低位,如图 2 所示。

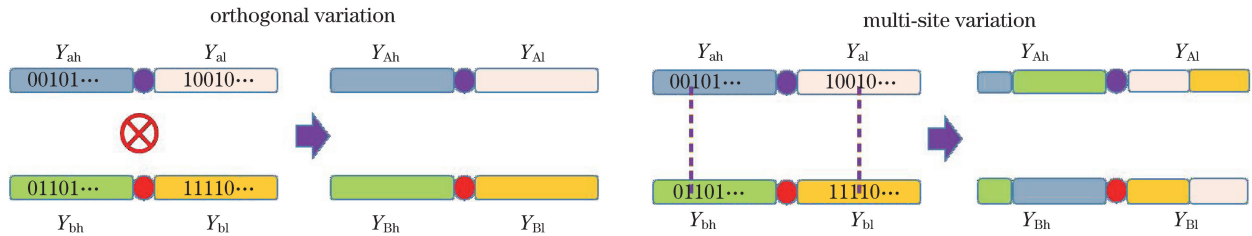


图 2 IGA 正交变异法与多位点变异法

Fig. 2 Orthogonal variation method and multi-site variation of IGA

正交变异法是将已配对的个体按基因值作异或运算,得到新的个体 Y_A ,对 Y_A 基因值按位取反得到另一个新的个体 Y_B ,即

$$\begin{cases} Y_{Ah} = Y_{ah} \otimes Y_{bh}, Y_{Al} = Y_{al} \otimes Y_{bl} \\ Y_{Bh} \approx Y_{Ah}, Y_{Bl} \approx Y_{Al} \end{cases} \quad (4)$$

多位点变异法是随机定位低位和高位的变异点,并交换变异点之后的基因。

第 6 步,对个体的基因值以极小的概率 $P_{mutation}$ 进行基因突变。随机定位低位和高位的基因突变点,对突变点的基因取反,如图 3 所示。

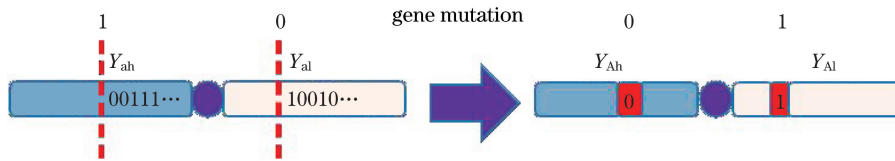


图 3 IGA 基因突变

Fig. 3 Gene mutation of IGA

第 7 步,当迭代次数小于繁衍迭代数 G_1 时跳回第 4 步继续进化,否则退出进化,此时繁衍出的种群即为最优解^[9-10]。在优选种群中, S 值最大的分组 $Y(K_0)$ 即为谱峰所在组。

在上述计算过程中,分组宽度 A 过大不利于频谱细化,过小则无法体现个体适应度的差异。考虑到 OFDR 宽带稀疏的频谱结构, A 取 5 比较适合。当 N_1 无法被 A 整除时,假设余数为 R ,则有 $R < A$,此时可以适当增加采样点数 N ,进而增大 N_1 ,使得 $R = 0$ 。由于 $A \ll N_1$,则有 $R \ll N_1$,因此只需要增加很小的采样点数,即可实现整除。初始种群数量 Q 的范围为 30~160 为宜,视种群规模而定。IGA 中繁衍迭代数 G_1 取 100 时迭代结果趋于稳定,适当地调整 P_{cross} (通常大于 0.7)、 $P_{mutation}$ (通常小于 0.1) 以及 G_0 的值 (G_0 的取值方法见参考文献[9]),直到搜索谱峰的准确率保持在 98% 以上,最终确定的参数适用于以后测量信号的谱峰搜索^[9-11]。

IGA 谱峰搜索中,谱峰所在组会逐渐占据大部分种群空间。当频谱中存在多个谱峰时,无法完成多谱峰搜索。文献[12]提出的改进的小生境遗传算法可用于多谱峰搜索,但其运算复杂度较大,且随着求解个数增加搜索成功率会降低,亦无法做到只搜索有效谱峰。为此,本研究提出变参数迭代的 IGA 算法,该算法可支持多个有效谱峰的搜索,也就是将第 7 步获得的最大分组 $Y(K_0)$ 的适应度降低,并存储 K_0 ,然后从第 4 步开始重复迭代。由于此时获得的优选种群的适应度较高,可以使用较小的迭代数 G_2 来获得新的优选种群,由此得到新的分组 $Y(K_1)$,并存储 K_1 。如此重复 $m-1$ 次,得到 $Y(K_0), Y(K_1), \dots, Y(K_{m-1})$ 共 m 个互不相同的优选分组。

3) ZFFT 细化:ZFFT 分为移频、滤波、重采样和 FFT 4 个过程^[13],如图 4 所示。其中, $x(n)$ 为原始采样数据, f_d 取细化频段的中心频率。经移频滤波之后得到 $l(n)$,该信号是约束在 ΔB 范围内的带限信号。设 $D = f_s / \Delta B$,信号频率范围经滤波后缩小为原来的 $1/D$,故以采样频率 $f_{sm} = f_s / D$ 对 $l(n)$ 重采样得到 $y(m)$,频谱不会混叠。对 $y(m)$ 作 FFT,则细化分辨率为

$$\Delta f_{\text{ZFFT}} = f_{\text{sm}} / (N/D) = f_s / N = \Delta f_N. \quad (5)$$

可见,ZFFT 细化频段与 N 点 FFT 有相同的物理分辨率^[14]。

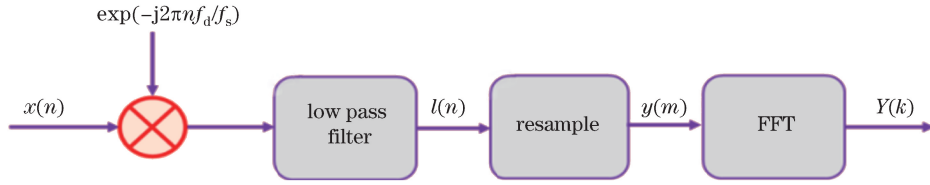


图 4 ZFFT 基本原理

Fig. 4 Fundamental principle of ZFFT

2.2 时间复杂度计算

算法分组宽度取 A , 种群规模为 K_p , 对 $S(k)$ 进行初始化, 此过程的时间复杂度为

$$O(\text{Group}) \sim \log_2 K_p + KA + K_p - K. \quad (6)$$

运用 IGA 搜索出 m 个分组, 初始种群规模为 Q , 繁衍迭代数为 G_1 , 多谱峰繁衍迭代数为 G_2 , 则

$$O(\text{IGAfind}) \sim Q\{2 + 7[G_1 + (m - 1)G_2]\}/2. \quad (7)$$

在 ZFFT 中, 低通滤波器采用 4 阶有限冲激响应滤波器(FIR)^[15-16] 结构, 则

$$O(\text{ZFFT}) \sim N + 4N + N/D + (N/D) \log_2(N/D). \quad (8)$$

3 算法对比

3.1 选取细化频段的时间复杂度对比

FFT-SCZT 中设 Bin Width^[4] 为 B , 则 Bin 个数为 $2N_1/B$ 。将 Bin(采用 4 阶 FIR)对粗算频谱作滤波运算, 则 $O(\text{BinsFilter}) \sim 8N_1^2/B$, 遍历选出超过阈值的 m 个 Bin, 则

$$O(\text{BinsFind}) \sim 2mN_1. \quad (9)$$

整个过程的时间复杂度为

$$O(\text{Traverse}) = O(\text{BinsFilter}) + O(\text{BinsFind}) \sim 8N_1^2/B + 2mN_1. \quad (10)$$

用 FFT-IGA-ZFFT 多次调整确定以下参数: $Q=40, G_0=20, G_1=100, G_2=0.5G_1$, 搜索准确率保持在 98% 以上, 则 IGA 的时间复杂度为

$$O(\text{IGA}) = O(\text{Group}) + O(\text{IGAfind}) \sim p + K(A - 1) + K_p + 7000(m - 1) + 14040. \quad (11)$$

由(1)式可得

$$K_p = 2 \cdot 2^{p-1} \leq 2K \leq 2^{p+1} = 2K_p, \quad (12)$$

进而可得

$$K_p \leq 2K = 2N_1/A, \quad (13)$$

因此,

$$O(\text{IGA}) \sim N_1 + 2N_1/A + 7000(m - 1) + 14040. \quad (14)$$

在(10)、(14)式中, A 和 B 为常数, $N_1 \geq 10^5$ 。显而易见 $O(\text{IGA}) < O(\text{Traverse})$ 。

3.2 细化频段的时间复杂度对比

为获得圆滑的分析频谱, 将选出的分组扩展到相邻分组以构成细化频段。对于 ZFFT, 若细化频段由 r_z 个分组构成, 如前所述, $\Delta f_{\text{ZFFT}} = \Delta f_N$, 且有 $D = f_s / \Delta B = N_1 / (r_z A)$ 。对于 SCZT, 若细化频段由 r_s 个 Bins 组成, 则细化分辨率为^[15]

$$\Delta f_{\text{SCZT}} = (r_s \cdot B/2)(f_s/N)/G_s. \quad (15)$$

将 N 点数据分成 L_s 段, 每段包含 M_s 个点, 参数 G_s 表示经过 SCZT 变换后的频域数据长度, 则 SCZT 的时间复杂度为^[16]

$$O(\text{SCZT}) \sim 3 \times L_s (M_s + G_s) \log_2(M_s + G_s). \quad (16)$$

当细化频段大小相同时, 取 $A = B$, 则有 $r_z = r_s/2$ 。为使 $\Delta f_{\text{SCZT}} = \Delta f_N$, 应有 $G_s = r_s B/2 = r_z A$, 则

$D=N_1/G_s$,进而(8)式可转化为

$$O(\text{ZFFT}) \sim 5N + G_s N/N_1 + (G_s N/N_1) \log_2(G_s N/N_1). \quad (17)$$

实验中取 $N_1=N/10$,则有

$$O(\text{ZFFT}) \sim 5N + 10G_s[1 + \log_2(10G_s)]. \quad (18)$$

定义变量 $R_{\text{TCR}}=O(\text{SCZT})/O(\text{ZFFT})$ 来表征两算法时间复杂度的比值,根据(16)、(18)式绘制图5。其中, $N_{\text{top}}、N_{\text{mid}}、N_{\text{bot}}$ 对应的点数分别为 $2 \times 10^5、4 \times 10^5、1 \times 10^6$ 。由图5可知,ZFFT的计算量明显小于SCZT。尽管可以不断调节 L_s 来缩小这一差距^[4],但可调节范围有限(范围约束在图5蓝色点与坐标轴以内的区域),且随着点数的改变,需对 L_s 进行适当调整。同时,SCZT细化频谱的本质是通过插值提高细化频段内的计算分辨率,实现对频段的细化。但这并不能提高物理分辨率^[14],只有增加原始数据采样点数才能有效解决这一问题^[7]。ZFFT则不存在这一问题,且运算时间更短。

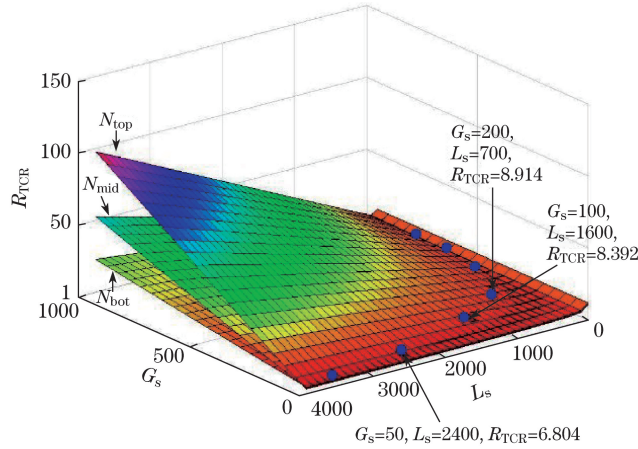


图5 SCZT与ZFFT的时间复杂度对比

Fig. 5 Comparison of time complexity between SCZT and ZFFT

4 实验验证

为验证所提算法的有效性,在OFDR实验系统^[17]中进行实际测试,系统原理如图6所示。

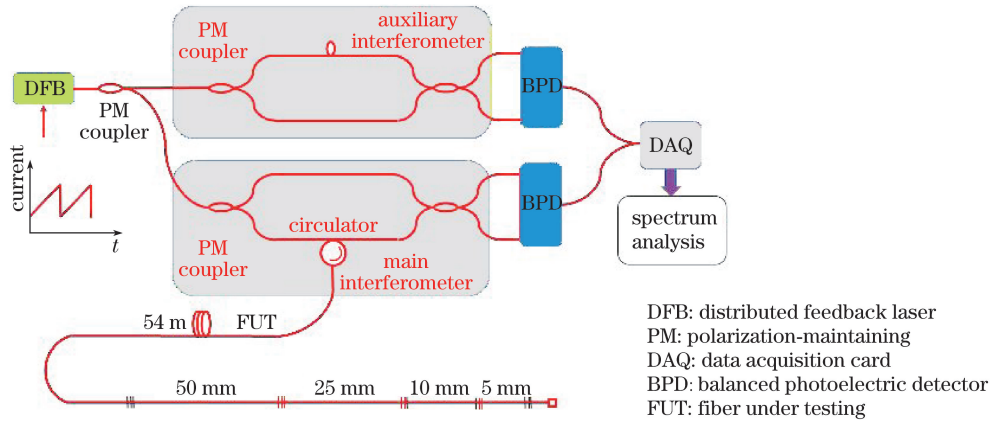


图6 OFDR基本原理

Fig. 6 Fundamental principle of OFDR

若 f 表示拍频信号频率,则回波信号距离 x 可表示为^[17]

$$x = cf/(2n_t\gamma), \quad (19)$$

式中 c 为真空光速, n_t 为光纤折射率, γ 为激光源的扫频速率。可见,拍频信号频率正比于回波信号的距离,分析拍频信号频谱即可获得回波点位置。实验中采用波长为 1550.12 nm、线宽为 650 kHz 的分布反馈式激光器作为扫频激光源,线性扫频光信号的扫频周期为 100 ms,扫频范围为 48.97 GHz。将光束分为两路,一

路输入与待测光纤相连的主干涉臂,另一路输入辅助干涉臂,用于实现对激光相位噪声的补偿^[18-20]。两路光束由平衡光电探测器(BPD)接收,经数据采集(DAQ)后进行频谱分析,采样频率为 100 MHz。待测光纤由串接 5 个布拉格光栅(FBG)的 54 m 光纤构成,为了使探测光信号能够在每级 FBG 上透射和反射,使用相同规格的 FBG,反射中心波长为 1550 nm,反射率为 5%,3 dB 带宽为 1.2 nm,相邻 FBG 的距离分别为 5,10,25,50 mm,误差小于 2 mm。因此在拍频信号频谱中存在 5 个间距很小的谱峰,这样便于考察算法的频率分辨能力。

系统的采样点数为 9.45×10^6 ,图 7 对比了全部点(9.45×10^6) FFTW(蓝线)与小点数(9.45×10^5) FFTW(红线)获得的频谱。由图 7 可见,粗算频谱体现了信号频谱的概貌。实验中,经多次调整确定了 IGA 参数, $P_{\text{cross}}=0.9$, $P_{\text{mutation}}=0.08$ 。搜索 5 个分组,搜索结果如表 1 所示。

表 1 IGA 搜索结果
Table 1 IGA search results

Selected group	Range of points	Frequency band /Hz
Group 0	[2681, 2685]	283650-284179
Group 1	[2676, 2680]	283121-283650
Group 2	[2686, 2690]	284179-284708
Group 3	[2671, 2675]	282592-283121
Group 4	[2691, 2695]	284708-285237

IGA 的搜索结果表明,在信号谱峰两侧的分组 Group 3 和 Group 4 的 S 值比较大,也会被当作优选分组。为解决相邻分组误判的问题,将搜索出的相邻分组再做 S 值比较。如果 S 值相差不大,则联合起来构成细化频段;如果 S 值差值在 10 dB 以上,则剔除优选分组中 S 值较小的组,将剩下的分组成组成细化频段。由图 7 可知,在优选的分组中存在非理想的分组,因此去掉 S 值较小的分组(图 7 中的 Group 3 和 Group 4),保留 S 值较大的分组(图 7 中的 Group 0、Group 1 和 Group 2),并组成细化频段。

图 8 将 ZFFT 细化结果(蓝线)与 N 点(9.45×10^6) FFT(红线)作对比,可见,ZFFT 较为精准地细化了频段,与 FFT 的结果没有明显差异。由图 8 可知,布拉格光栅的反射点位置分别为 54686.28,54737.28,54761.76,54771.96,54776.04 mm。间距分别为 51.00,24.48,10.20,4.08 mm,符合实验预期。在同一运行环境下,处理相同的数据量,FFT、FFT-SCZT 和 FFT-IGA-ZFFT 三种算法的计算时间分别为 3.130,1.993,0.525 s。由此可见,所提算法在运算速度上具有明显优势。

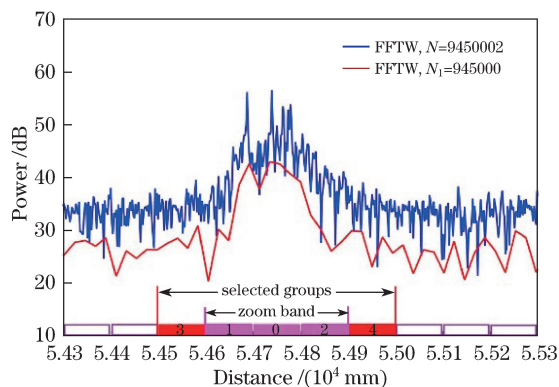


图 7 N 点与 N_1 点 FFTW 频谱

Fig. 7 Frequency spectra of N-point and N_1 -point FFTW

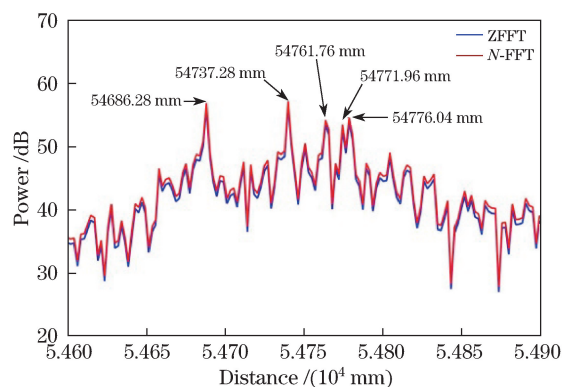


图 8 ZFFT 细化结果与 N 点 FFT 对比

Fig. 8 Comparison between ZFFT division result and N-point FFT

5 结 论

研究了 FFT 在频谱分析中的局限性,分析了 FFT-SCZT 在 OFDR 应用中存在的不足,提出了 FFT-IGA-ZFFT 算法,描述了该算法的实施方法和步骤,对比分析了该算法选取和细化频段的时间复杂度。同时,采用变参数迭代的遗传算法实现了多个有效谱峰的搜索。在 OFDR 系统中对提出的算法进行了实验

验证。实验结果表明, FFT-IGA-ZFFT 算法在同等谱分析精度下, 运算速度明显优于 FFT 算法和 FFT-SCZT 算法。

参 考 文 献

- [1] Geng J H, Spiegelberg C, Jiang S B. Narrow linewidth fiber laser for 100-km optical frequency domain reflectometry [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(9): 1827-1829.
- [2] Soller B J, Gifford D K, Wolfe M S, *et al.* High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies[J]. Optics Express, 2005, 13(2): 666-674.
- [3] Frigo M, Johnson S G. FFTW: Fastest Fourier transform in the west[J]. Astrophysics Source Code Library, 2012, 1: 01015.
- [4] Ma C, Zhou Q, Qin J, *et al.* Fast spectrum analysis for an OFDR using the FFT and SCZT combination approach[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(6): 657-660.
- [5] Oppenheim A V, Schafer R W. Discrete-time signal processing[M]. Delhi: Pearson Higher Education, 2010.
- [6] Rabiner L, Schafer R W, Rader C M. The chirp z-transform algorithm[J]. IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, 1969, 17(2): 86-92.
- [7] Ding Kang, Pan Chenghao, Li Weihua. Comparison of spectral analysis between FFT and Chirp-Z transform [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(6): 9-12.
丁 康, 潘成灏, 李巍华. ZFFT 与 Chirp-Z 变换细化选带的频谱分析对比[J]. 振动与冲击, 2006, 25(6): 9-12.
- [8] Zhao Hongqiang. Analysis of spectrum zoom algorithms[J]. Journal of Sichuan Military Science and Technology, 2013, 34(5): 105-109.
赵宏强. 频谱细化算法分析[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(5): 105-109.
- [9] Liang Ying, Jin Ming, Qiao Xiaolin. An improved genetic algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 20(15): 3636-3639.
梁 影, 金 铭, 乔晓林. 一种改进的遗传算法[J]. 科学技术与工程, 2012, 20(15): 3636-3639.
- [10] Deb K, Pratap A, Agarwal S, *et al.* A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [11] Golberg D E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning[M]. Boston: Addison-Wesley, 1989: 102.
- [12] Huang M, Liu N, Liang X. An improved niche genetic algorithm[C]. IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems, 2009, 2: 291-293.
- [13] Hoyer E A, Stork R F. The zoom FFT using complex modulation[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1977, 2: 78-81.
- [14] Hu Guangshu. Digital signal processing: Theory, algorithm and implementation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
胡广书. 数字信号处理: 理论, 算法与实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [15] Cetin A E, Gerek O N, Yardimci Y. Equiripple FIR filter design by the FFT algorithm[J]. IEEE Signal Processing Magazine IEEE, 1997, 14(2): 60-64.
- [16] Pun C K S, Chan S C, Yeung K S, *et al.* On the design and implementation of FIR and IIR digital filters with variable frequency characteristics[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, 2002, 49(11): 689-703.
- [17] Xie Weilin, Dong Yi, Zhou Qian, *et al.* Phase noise analysis of optical frequency domain reflectometry[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0706003.
谢玮霖, 董 毅, 周 潜, 等. 光频域反射技术中激光相位噪声影响分析[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0706003.
- [18] Qin J, Zhou Q, Xie W L, *et al.* Coherence enhancement of a chirped DFB laser for frequency-modulated continuous-wave reflectometry using a composite feedback loop[J]. Optics Letters, 2015, 40(19): 4500-4503.
- [19] Xu Yan, Qin Jie, Xie Weilin, *et al.* Linearized frequency-swept laser source generation based on pre-distortion and optical phase-locked loop[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(2): 0202002.
许 妍, 秦 杰, 谢玮霖, 等. 基于预畸变和光锁相的线性扫频激光源生成[J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0202002.
- [20] Zhou Q, Xie W L, Xia Z Y, *et al.* Compensation of phase error in optical frequency-domain reflectometry using delay-matched sampling[J]. Optical Engineering, 2014, 53(7): 074103.