



DOI: 10.12086/oe.2018.180007

## BOTDR 中散射谱中心频率的 ESPRIT 估计算法研究

刘张云, 周黎明, 刘伟民, 程凌浩\*,  
梁浩, 关柏鸥

暨南大学光子技术研究院, 广东 广州 510632

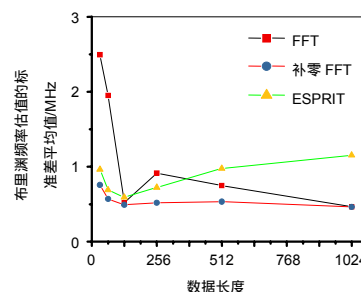
**摘要:** 在光纤布里渊光时域反射仪(BOTDR)系统中, 对光纤中各处的布里渊散射谱中心频率的估计是测量的关键, 也是最为费时的环节, 导致 BOTDR 系统难以做到快速响应。本文研究了 ESPRIT 算法用来估计 BOTDR 系统中的布里渊散射谱中心频率, 并与基于快速傅里叶变换(FFT)的频率估计算法进行了比较分析。结果表明, ESPRIT 算法具有与补零 FFT 算法配合上洛伦兹频谱拟合所得结果相近的性能。由于 ESPRIT 算法对数据长度的要求较低, 能够在短数据长度上获得较好的频率估计性能, 因此能够在保证较高空间分辨率和测量性能的情况下, 提高测量速度。

**关键词:** 分布式光纤传感; 布里渊光时域反射仪; ESPRIT 算法; 频谱估计

**中图分类号:** TN253

**文献标志码:** A

**引用格式:** 刘张云, 周黎明, 刘伟民, 等. BOTDR 中散射谱中心频率的 ESPRIT 估计算法研究[J]. 光电工程, 2018, 45(6): 180007



## Research on ESPRIT estimation algorithm for the central frequency of gain spectrum in Brillouin optical time-domain reflectometry

Liu Zhangyun, Zhou Liming, Liu Weimin, Cheng Linghao\*, Liang Hao, Guan Baiou

Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

**Abstract:** In fiber-optic Brillouin optical time-domain reflectometer (BOTDR) system, the estimation of the center frequency of Brillouin scattering spectrum in fiber is the key and the most time-consuming part of the measurement, which makes BOTDR system difficult to achieve fast response. In this paper, estimation of signal parameters via rotational invariance technique (ESPRIT) algorithm is proposed to estimate the center frequency of Brillouin scattering spectrum in BOTDR system. Due to fairly low requirement on data length, ESPRIT algorithm can obtain good frequency estimation over short data length, and makes it possible to increase measurement speed at high spatial resolution and measurement performance.

**Keywords:** distributed optical fiber sensing; Brillouin optical time domain reflectometer; ESPRIT algorithm; spectral estimation

**Citation:** Liu Z Y, Zhou L M, Liu W M, *et al.* Research on ESPRIT estimation algorithm for the central frequency of gain spectrum in Brillouin optical time-domain reflectometry[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(6): 180007

收稿日期: 2018-01-06; 收到修改稿日期: 2018-02-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11474133); 广州市科技计划项目资助课题(201707010338)

作者简介: 刘张云(1992-), 男, 硕士, 主要从事分布式光纤传感的研究。E-mail: 1061595417@qq.com

通信作者: 程凌浩(1977-), 男, 博士, 研究员, 主要从事光纤传感技术、光通信技术的研究。E-mail: chenglh@ieee.org

# 1 引言

近年来,由于光纤中的布里渊散射信号对温度和应变均敏感,基于布里渊散射的分布式光纤传感技术越来越受到重视,广泛应用在电力、石油、矿探、结构安全监测等领域<sup>[1]</sup>。目前,基于布里渊散射的分布式传感系统主要有两大类系统架构<sup>[2]</sup>:基于光时域反射技术的布里渊光时域反射仪(Brillouin optical time-domain reflectometer, BOTDR)和基于光时域分析技术的布里渊光时域分析仪(Brillouin optical time-domain analyzer, BOTDA)。其中,BOTDR系统由于采用了反射仪的结构,只需要在传感光纤的同一端发射和接收光信号,更易于在实际应用中使用,并且在光纤断裂的情况下具有更强的生存性,因此其应用领域更加广泛<sup>[3]</sup>。

在 BOTDR 系统中,需要对光纤沿线的布里渊散射谱的中心频率,即布里渊频移进行测量,以反演出光纤沿线的温度或者应变的分布情况。因此,需要对光纤布里渊散射信号进行频谱分析,以获得布里渊散射谱峰值处所对应的频率,即布里渊频移。传统上,可以通过频率扫描<sup>[4]</sup>的方式来获得这一信息,即将布里渊散射信号通过一个中心频率可调谐的窄带通滤波器,测量滤波器输出的信号功率随滤波器中心频率的变化来获得布里渊散射谱,进而确定散射谱峰的频率。这种方案的优点在于结构简单,窄带接收也使得后续的信号处理更加容易。但是这种方案由于扫描的不连续性,间隔太大得到的频谱精细度不好,导致提取的中心频率信息误差大,而间隔太小的话又会增加信号处理的时间,从而降低系统的实时性。另外一种方案则是采用宽带接收的方案,即全频带的将光纤沿线各处散射回来的布里渊散射信号接收下来,然后通过时频分析的方法来分析光纤沿线各处的布里渊散射谱。这种方案对接收带宽和信号处理要求比较高,但是由于避免了逐点扫描,其测量速度比较快,具有很好的应用前景。

在宽带接收的方案中,不可避免地会遇到空间分辨率与测量精度之间相互制约的问题<sup>[5]</sup>。当要求空间分辨率高时,则意味着只能用很短的数据长度来分析布里渊散射谱,而数据长度短则意味着频谱的分辨率低,导致测量精度变差。比如,时频分析领域常用的短时傅里叶变换方法就存在频谱泄露和栅栏效应的问题<sup>[6]</sup>,频率估计结果方差性能较差,在短数据长度、低信噪比的情况下更加明显。

为了改善宽带接收方案的 BOTDR 系统中空间分辨率与测量精度之间相互制约的问题,并提高测量速度,本文研究了基于旋转不变技术的信号参数估计技术(estimation of signal parameters via rotational invariance technique, ESPRIT)的布里渊频移估计方法,能够在保证较高空间分辨率和测量性能的情况下,以较短的数据长度获得较好的频率估计性能,从而可以提高测量速度。

# 2 基本原理

ESPRIT 是一种现代谱估计算法,其含义就是利用旋转不变子空间估计信号参数。它具有计算量小、对噪声不敏感、无需对整个时域进行谱峰搜索等特点,在信号处理领域得到广泛使用<sup>[7]</sup>。通常基于周期图或者短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, STFT)的频谱分析方法,其频率分辨能力受到数据长度的制约,在数据长度较短时其频谱分辨能力变差。而理论上,ESPRIT 算法则不受该问题的制约,能对短数据量的频谱进行高分辨率的分析。因此,ESPRIT 算法非常适合 BOTDR 分布式光纤传感系统中布里渊散射谱中心频率在高空间分辨率情况下的快速估计。

用 ESPRIT 算法估计信号参数时,要求阵列的几何结构存在不变性。而这个不变性可以通过两种手段获得:一种是阵列本身存在两个或两个以上的相同子阵;二是通过某些变换获得两个或两个以上的相同子阵。而存在两个完全相同的子阵是 ESPRIT 算法最基本的假设。假设一个信号含有  $p$  个频率分量,且存在两个结构完全相同的子阵,子阵间距为  $\Delta$ 、阵元数为  $m$ 。则对于同一信号而言,由观测数据序列构成的两个子阵的输出只有一个相位差  $\phi_i, i \in [1, p]$ 。下面假设第一个子阵的接收数据为  $X_1$ ;第二个子阵的接收数据为  $X_2$ ,  $N$  是均值为零、方差为  $\sigma^2$  的高斯白噪声。根据阵列模型知识<sup>[8]</sup>可得:

$$X_1 = AS + N, \tag{1}$$

$$X_2 = A\phi S + N, \tag{2}$$

式中:子阵列(1)的范德蒙德矩阵  $A_1=A$ ;子阵列(2)的范德蒙德矩阵  $A_2=A\phi$ ;  $S$  是一对角矩阵,且有  $\phi = \text{diag}[e^{jw_1}, e^{jw_2}, \dots, e^{jw_p}]$ ,其中  $\phi$  为一酉矩阵,它将两个子阵列联系在一起; $w_p$  为第  $p$  个信号的角频率。由以上推导可知,信号的频率信息包含在矩阵  $\phi$  中。因此只要得到两个子阵间的旋转不变关系  $\phi$  就可以方便地得到关于信号的频率信息。若要得到两子阵列间的关系,需先将其模型进行合并,即:

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ A\phi \end{bmatrix} S + N = AS + N \quad (3)$$

在理想条件下，可对上式的协方差矩阵  $R$  进行特征分解，可得：

$$R = E[XX^T] = \sum_{i=1}^{2m} \lambda_i e_i e_i^T = U_s \Sigma_s U_s^T + U_n \Sigma_n U_n^T \quad (4)$$

显然，上式中得到的特征值，有如下关系： $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_N \geq \lambda_{N+1} = \dots = \lambda_{2m}$ 。且  $U_s$  为大特征值对应的特征矢量张成的信号子空间， $U_n$  为小特征值对应的特征矢量张成的噪声子空间。由阵列模型知识，存在一个唯一的非奇异矩阵  $T$  使下式成立：

$$U_s = \begin{bmatrix} U_{s1} \\ U_{s2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} AT \\ A\phi T \end{bmatrix} \quad (5)$$

由于阵列流型间的旋转不变性，进一步可推导出两个子阵的信号子空间的关系是

$$U_{s2} = U_{s1} T^{-1} \phi T = U_{s1} \Psi \quad (6)$$

其说明了两个子阵的阵列接收数据的信号子空间的旋转不变性<sup>[9-10]</sup>。若阵列流型  $A$  是满秩矩阵，则  $\Psi$  的特征值组成的对角阵一定等于  $\phi$ 。而矩阵  $T$  的各列就是矩阵  $\Psi$  的特征矢量，所以一旦得到上述的旋转不变关系矩阵  $\Psi$ ，就可以得到信号的频率信息。总而言之，ESPRIT 算法的基本原理就是基于式(6)的旋转不变性。

在对布里渊散射信号进行分析时，设布里渊散射信号  $x(n)$  由一系列幅值按指数规律变化的正弦信号与白噪声的组合，在采样时刻  $n$ ，其表达式如下：

$$x(n) = \sum_{i=p}^P s_i(n) e^{j\omega_i n} + \omega(n) \quad (7)$$

式中： $s_i(n)$  和  $\omega_i \in (-\pi, \pi)$  分别是第  $i$  个正弦信号的归一化幅值和频率， $\omega(n)$  是加性高斯白噪声。则由观测数

据序列  $x(0), x(1), \dots, x(k-1)$  可构造相应数据矩阵  $X$ ：

$$X = [x(0), x(1), \dots, x(L-1)]^T = \begin{bmatrix} x(0) & x(1) & \dots & x(M-1) \\ x(1) & x(2) & \dots & x(M) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x(L-1) & x(L) & \dots & x(k-1) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中： $L > p, M > p, L+M-1=k$ 。因此可以按照式(4)~式(6)构造协方差矩阵和特征分解从而计算出布里渊谱信号的中心频率。由于 ESPRIT 算法对在有噪声时性能会劣化，因此本文在得到布里渊谱信号的协方差矩阵前进行了噪声白化处理。具体而言，是将带有布里渊信号的接收数据的功率谱除以不带布里渊信号的噪声功率谱，将其结果经傅里叶逆变换后得到自相关函数，进而求得协方差矩阵后采用 ESPRIT 算法估计布里渊谱中心频率。

### 3 实验结果与分析

装置示意图如图 1 所示。实验中激光器工作波长为 1550.12 nm，线宽小于 100 kHz，其输出经耦合器后分为两路。其中一路经过开关型半导体光放大器进行脉冲调制后变成脉冲光并经过光脉冲放大器放大再进入传感光纤；另一路作为参考光进入平衡探测器用于接收布里渊散射信号。第一路光在传感光纤中传输时，会产生后向自发布里渊散射光，经环形器和掺铒光纤放大器后再在平衡探测器中与参考光进行相干检测并转换为 10.8 GHz 附近的微波信号。在与 10.5 GHz 本振信号混频后，接收到的 10.8 GHz 布里渊散射信号被变频到 500 MHz 以内。数据的采集速率为 1 Gsps，传感光纤长度为 2 km，其中有一段约 400 m 长度光纤被置于水浴锅中加热。注入传感光纤的光脉冲宽度为

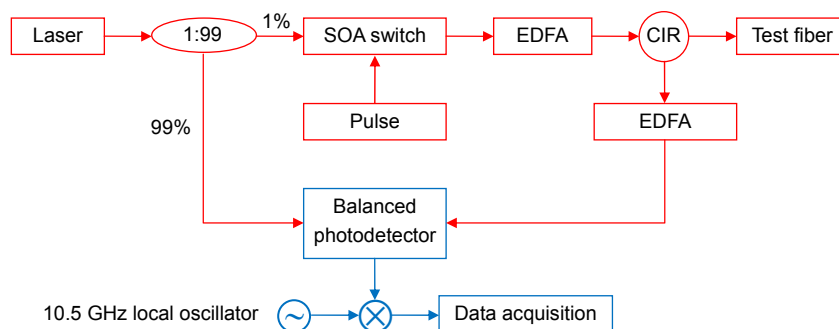


图 1 BOTDR 实验装置示意图。SOA: 半导体光放大器；EDFA: 掺铒光纤放大器；CIR: 光环形器

Fig. 1 The schematic diagram of experiment device. SOA: semiconductor optical amplifier; EDFA: erbium-doped fiber amplifier; CIR: circulator

250 ns。所采集到的数据中属于被加热段光纤的数据用于做频谱分析。

基于 STFT 算法和基于 ESPRIT 算法的布里渊频率估计进行对比分析。由于 STFT 算法的频谱分辨率与 FFT(fast Fourier transformation)的分析点数有关,因此我们分别考虑了分析点数等于原始数据长度的算法和将分析点数通过对原始数据补零到 1024 点后进行 FFT 分析的算法,分别简称为 FFT 和补零 FFT 算法。另外,对于基于 STFT 的两种算法,在经过 FFT 分析后,还对频谱进行了洛伦兹拟合以进一步提高算法的性能。

首先比较了在数据长度足够时各算法的性能。图 2 显示当数据长度为 1024 个采样点时,FFT、补零 FFT 和 ESPRIT 算法在不同温度下所估计出的布里渊频率值。算法使用 1024 个连续的采样数据进行分析,且对于每个温度下的频率估计。图 2 所示的结果都是对 2500 组脉冲的分析结果的叠加平均。如图 2 所示,在数据长度为 1024 时,FFT、补零 FFT 和 ESPRIT 算法所估计出的布里渊频率和温度都具有良好的线性度。三种算法得到的斜率非常接近,其中 FFT 和补零 FFT 算法为 1.1178 MHz/°C,ESPRIT 算法为 1.0148 MHz/°C,表明 ESPRIT 算法可以有效地估计布里渊频率。

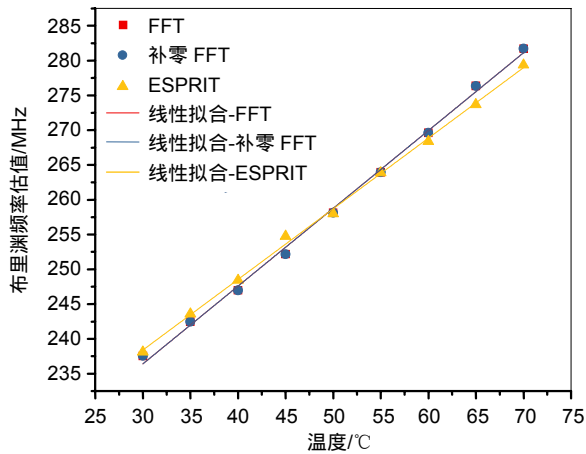


图 2 当数据长度为 1024 采样点时,不同温度下不同算法估计所得的布里渊频率

Fig. 2 Brillouin frequency estimated by different algorithms at different temperatures using 1024 samples

当需要提高分布式传感的空间分辨率时,随着空间上分析长度的缩短,用来进行频谱分析的数据长度也会缩短,进而导致算法的性能下降。如图 3 所示是数据长度为 32 个采样数据时,FFT、补零 FFT 和 ESPRIT 三种算法在不同温度下所得到的布里渊频率估计值。可以看到,补零 FFT 和 ESPRIT 算法所得

的结果和 1024 点数据长度时的结果很接近,但 FFT 算法所得结果则与 1024 点数据长度时的结果有较大偏差,算法的准确性变差。并且,FFT 算法所得结果的斜率为 0.9235 MHz/°C,相比数据长度为 1024 时的斜率减小了 17.4%。与之对比,补零 FFT 和 ESPRIT 算法所得结果的斜率分别为 1.1256 MHz/°C和 1.0935 MHz/°C,相比数据长度为 1024 时的斜率分别增加了 0.7%和 5%,表现出更好的稳定性。

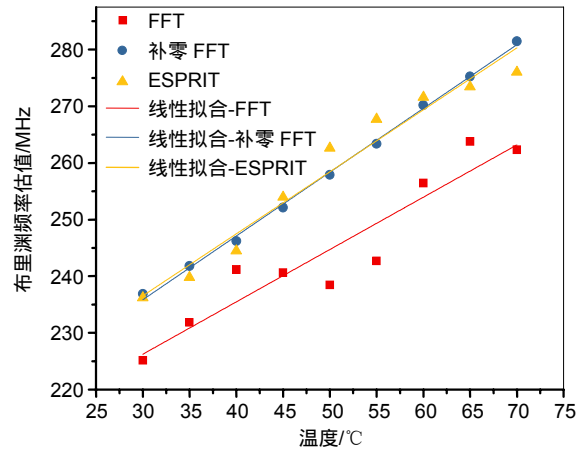


图 3 当数据长度为 32 采样点时,不同温度下不同算法估计所得的布里渊频率

Fig. 3 Brillouin frequency estimated by different algorithms at different temperatures using 32 samples

为了衡量算法的稳定性,对各算法所得测量结果的标准差进行了分析。同时,标准差也是衡量算法的测量精度的重要指标。图 4 显示了不同数据长度下,FFT、补零 FFT 和 ESPRIT 算法对同一批采样数据的布里渊频率进行估计所得结果的标准差的平均值。为了计算标准差,将 2500 个脉冲的采样数据均分成 10 组,每组 250 个脉冲。针对每一个待测温度,由每组的采样数据估计出一个布里渊频率,再由 10 组采样数据所得的 10 个布里渊频率估计值计算出该温度下布里渊频率估计值的标准差,进而将几个待测温度下的标准差求平均值,让其代表该数据长度下的标准差。从图 4 可以看出,当数据长度大于 128 时,补零 FFT 算法的标准差最小,约为 0.5 MHz。FFT 和 ESPRIT 算法的标准差也不太大,分别为约 0.66 MHz 和约 0.86 MHz。当数据长度为 128 甚至更小时,ESPRIT 算法的标准差接近于补零 FFT 算法,虽然二者均会有小幅增加,但是即使在数据长度为 32 时,标准差也不超过 1 MHz。而 FFT 算法的标准差随着数据长度的减小急剧增大,在数据长度为 32 时增大到 2.5 MHz。

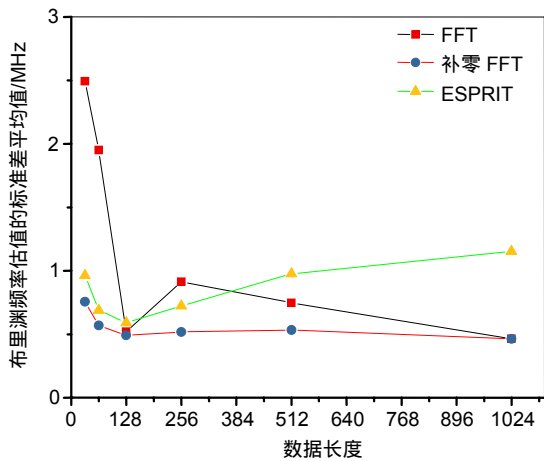


图 4 不同数据长度下各算法多次测量时测量值的标准差平均值

Fig. 4 Average value of standard deviation of measured values by various algorithms under different data length

图 5 通过计算不同数据长度下三种算法所得的布利渊频率估计结果换算所得的温度测量值与实际温度的绝对差值的均值来比较各算法对布利渊频率估计的准确性。由图 5 可以看出, FFT 和 ESPRIT 算法测量温度与实际温度的差值总体随着数据长度的减小而增大, 补零 FFT 算法始终保持在 0.58 °C 左右。这是因为 FFT 算法随着数据长度减小, 频率分辨率相应变大, 随之误差增大; 补零 FFT 算法由于数据长度始终保持 1024, 所以频率分辨率不变, 误差也比较稳定; 而 ESPRIT 算法随着数据长度减小, 接收数据的协方差矩阵估计出的参数不可靠, 造成误差增大。此外, 由图

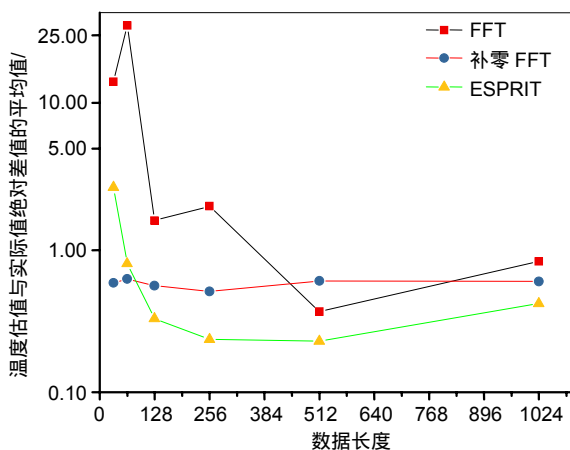


图 5 不同数据长度下各算法测量温度与实际温度绝对差值的平均值

Fig. 5 Distribution of the mean value of the absolute difference between measured temperatures and actual temperatures for different data lengths

还可以看出当数据长度大于或等于 128 时, ESPRIT 算法测量温度与实际温度差值的平均值比 FFT 和补零 FFT 算法都要小。其中 ESPRIT 算法为 0.31 °C 左右; 补零 FFT 算法为 0.57 °C 左右; FFT 算法为 1.21 °C 左右, 比 ESPRIT 大了约 0.9 °C。但是在数据长度小于 128 时, ESPRIT 算法测量温度与实际温度的差值虽然稍高于补零 FFT 算法, 但显著优于 FFT 算法。

虽然采用 ESPRIT 算法可以利用较小的数据长度实现较高的测量精度。但由于 BOTDR 系统中空间分辨率还受脉冲宽度的制约, 例如在 1 Gsp/s 采样率下, 当脉冲宽度为 250 ns 时, 即使数据长度小于 250 个点也并不会提高系统的空间分辨率。对于在保证较高分辨率的情况下, 脉冲宽度和数据长度如何较好选取这一问题, 我们分别在 30 °C 和 70 °C 两个温度时计算了不同脉冲宽度下 ESPRIT 算法测量温度与实际温度的绝对差值来进一步分析, 如图 6 所示。图中温度差值的绝对值为不同脉冲宽度下, 数据长度取相应脉冲宽度值时计算得到, 即 ESPRIT 算法在理论上能达到最高空间分辨率的情况。从图中可以看出 ESPRIT 算法在各个脉冲宽度上均有效, 意味着最终的空间分辨率仍然是决定于脉冲宽度, 而非算法所使用的数据长度。空间分辨率随着脉冲宽度的增加而逐渐降低, 但是当脉冲宽度接近或者小于声子寿命(约为 10 ns, 对应单模光纤空间长度 1 m)时, 由于后向布利渊散射谱急剧展宽, 使得无法准确获得叠加后的散射谱中心频率, 造成测量精度的降低。在本次实验中, 当脉冲宽度取 256 ns, 数据长度取 256 时, ESPRIT 算法的测量精度

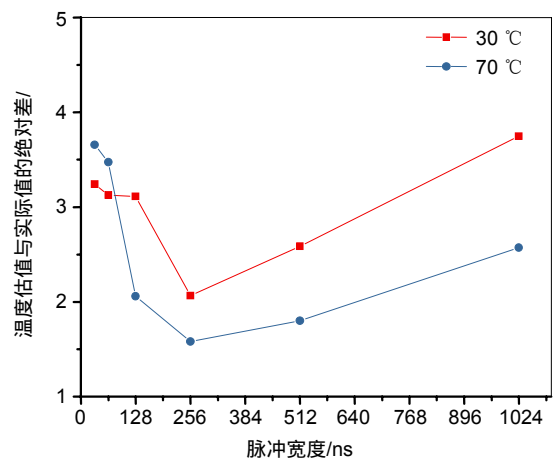


图 6 不同脉冲宽度下 ESPRIT 算法测量温度与实际温度的绝对差值

Fig. 6 The absolute difference between measured temperatures and actual temperatures by ESPRIT algorithm under different pulse width

达到了最优。更低的脉冲宽度和数据长度提高了空间分辨率，但是也带来了测量精度的牺牲。

总体而言，补零 FFT 算法表现出了最优的性能，ESPRIT 算法次之但优于 FFT 算法。但是，为了保证频谱的分析精度，补零 FFT 算法需要将短数据长度补零到很长的分析长度，其运算量随着频谱分析精度的提高而显著增加，并不随着数据长度的减小而降低运算量。在分布式传感要求的空间分辨率较高时，补零 FFT 算法在数据存储空间和运算速度方面，都有较大的挑战。补零 FFT 因为拟合和寻峰操作，需要存储线路上各处的傅里叶变换后的谱。当补零 FFT 的点数比较大时，需要很大的存储空间，内存与计算单元之间的数据吞吐是个很大的瓶颈，严重制约运算速度。以 1024 点补零 FFT 算法和 128 点 ESPRIT 算法比较，前者需要的存储空间是后者的 8 倍，因此前者的运算速度受到内存读写的影响会更严重。而 ESPRIT 算法在数据长度减小时性能劣化较小，但运算量则显著下降，数据吞吐量也没有显著增加，因此在高空间分辨率的快速分布式传感方面具有一定的优势。

## 4 结 论

采用 ESPRIT 算法对 BOTDR 系统中布里渊散射谱中心频率进行估计，具有与补零 FFT 算法配合上洛伦兹频谱拟合所得结果相近的性能。在较短数据长度下，ESPRIT 算法比 FFT 算法拥有更好的多次测量稳定性和单次测量准确性，能够使空间分辨率和测量性能达到一个良好的平衡。并且 ESPRIT 算法本身具有计算量小、对噪声不敏感、无需对整个频域进行谱峰搜索等特点，因此非常适合在保证较高空间分辨率和测量性能的情况下，快速地估计 BOTDR 系统中的布里渊

散射谱中心频率。

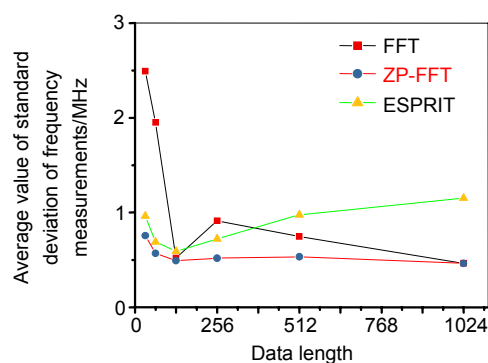
## 参考文献

- [1] Bao X Y, Chen L. Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors[J]. *Sensors*, 2011, **11**(4): 4152–4187.
- [2] Hotate K. Fiber distributed Brillouin sensing with optical correlation domain techniques[J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, **19**(6): 700–719.
- [3] Thévenaz L. Brillouin distributed time-domain sensing in optical fibers: state of the art and perspectives[J]. *Frontiers of Optoelectronics in China*, 2010, **3**(1): 13–21.
- [4] Maughan S M, Kee H H, Newson T P. Simultaneous distributed Fibre temperature and strain sensor using microwave coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter[J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, **12**(7): 834–842.
- [5] Naruse H, Tateda M. Trade-off between the spatial and the frequency resolutions in measuring the power spectrum of the Brillouin backscattered light in an optical fiber[J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(31): 6516–6521.
- [6] Zheng E R, Yang R X, Gao S. Study on problems about detecting harmonic based on FFT in power system[J]. *Relay*, 2006, **34**(18): 52–57.  
郑恩让, 杨润贤, 高森. 关于电力系统 FFT 谐波检测存在问题的研究[J]. *继电器*, 2006, **34**(18): 52–57.
- [7] Zhang J J, Yang H G. TLS—ESPRIT for interharmonic estimation[J]. *Proceedings of the Chinese Society of Universities*, 2010, **22**(2): 70–75.  
张君俊, 杨洪耕. 间谐波参数估计的 TLS—ESPRIT 算法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2010, **22**(2): 70–75.
- [8] Zhang X D. *Modern Signal Processing*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 138–151.  
张贤达. *现代信号处理*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 138–151.
- [9] Paulraj A, Roy R, Kailath T. Estimation of signal parameters via rotational invariance techniques-esprit[C]//*Proceedings of 19th Asilomar Conference on Circuits, Systems and Computers*, 2002: 83–89.
- [10] Roy R, Kailath T. ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1989, **37**(7): 984–995.

# Research on ESPRIT estimation algorithm for the central frequency of gain spectrum in Brillouin optical time-domain reflectometry

Liu Zhangyun, Zhou Liming, Liu Weimin, Cheng Linghao\*, Liang Hao, Guan Baiou

Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China



Distribution of average value of standard deviation of measured values by various algorithms under different data length

**Overview:** Brillouin scattering based on distributed fiber-optic sensing system is very promising for wide range applications. Brillouin optical time-domain reflectometry (BOTDR) and Brillouin optical time-domain analyzer (BOTDA) are two widely employed schemes. Normally, BOTDR is of interest in practical implementation due to its single-end launch and receiving configuration, making it more robust in events of fiber fracture.

To recover temperature and strain information from Brillouin scattering signal in BOTDR, one has to obtain the distribution of Brillouin frequency shift along the fiber, which can be done by spectral analysis of Brillouin scattering signal to find the frequency of the peak of the Brillouin gain spectrum. In many schemes, a frequency scanning configuration is employed to find this Brillouin frequency shift by measuring the signal strength at various frequency points one by one. Obviously, such schemes take very long time to finish one measurement because tens of frequency points have to be measured. To shorten the measurement time, broadband schemes can be used by receiving all spectrum of the Brillouin scattering signal followed by spectral analysis through algorithms. Fast Fourier transform (FFT) is a popular algorithm in spectral analysis of Brillouin gain spectrum. However, to enhance the spatial resolution of BOTDR, one has to use data as few as possible, which results in great degradation of spectral resolution and hence temperature and strain resolution through FFT. Zero-padded FFT algorithm can be used to keep high spectral resolution but it increases computational complexity, imposing stringent requirement on computational resources.

In this paper, ESPRIT algorithm is proposed to estimate the center frequency of Brillouin scattering spectrum in BOTDR system. Experiments are set up to analyze the performance of three algorithms: FFT with Lorentz spectrum fitting, zero-padded FFT with spectrum fitting and ESPRIT. The linearity, accuracy and stability of these algorithms for the same data are compared. It shows that the performance of ESPRIT algorithm is much better than that of FFT with Lorentz spectrum fitting and is closed to that of zero-padded FFT algorithm with Lorentz spectrum fitting. ESPRIT algorithm works very well on short data length with a quite good performance of accuracy and stability. Moreover, the computational complexity decreases on short data length for ESPRIT, making fast measurement possible. Therefore, ESPRIT algorithm proposed in this paper can obtain good frequency estimation over short data length, making it possible to increase measurement speed at high spatial resolution and measurement performance.

**Citation:** Liu Z Y, Zhou L M, Liu W M, *et al.* Research on ESPRIT estimation algorithm for the central frequency of gain spectrum in Brillouin optical time-domain reflectometry[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(6): 180007

Supported by National Natural Science Foundation of China (11474133) and Guangzhou Science and Technology Project (201707010338)

\* E-mail: chenglh@ieee.org