





# **Research on the Distributed Temperature and Strain Sensing System Based on BOTDR**



A Thesis Submitted to Chongqing University  
In Partial Fulfillment of the Requirement for the  
Master's Degree of Engineering

**By**  
**Yi Zhang**

**Supervised by Prof. Min Liu**  
**Specialty: Communication and Information System**

College of Communication Engineering of Chongqing University  
Chongqing, China

April, 2016



## 摘 要

基于布里渊光时域反射(BOTDR)的分布式光纤传感系统,具有良好的实时性、准确的空间分辨率和测量精度,系统结构也简单易实现,一经问世便得到国内外的广泛重视,现已发展成为光纤传感领域的主要技术。本文利用布里渊频移同温度和应变的变化关系,基于相干拍频探测法搭建了分布式传感系统,实现了对温度和应变变化的监测,并通过脉冲调制实验和后期的信号处理算法,提高了布里渊信号的信噪比,进而实现了对系统空间分辨率、测量精度等参数的优化。论文主要内容如下:

①介绍 BOTDR 技术的基本理论,阐述自发布里渊散射和受激布里渊散射各自的产生机理。研究布里渊信号的频率和光强同温度和应力变化的定量关系。讨论系统的两类实现方式:直接探测和相干拍频探测,并详细介绍系统的主要性能参数及其各自的影响因素。

②实验搭建基于 BOTDR 的分布式传感系统,并对组成系统的重要器件:布里渊激光器和掺铒光纤放大器进行特殊设计,通过实验对各器件的性能参数进行测试和改进。介绍了声光调制器(AOM)的工作原理,实验分析调制脉冲对传感光纤中自发布里渊散射的影响。

③采用 10km 的传感光纤,通过多次脉冲调制实验,分析不同脉冲宽度和幅值对传感光纤中散射信号的影响。选择 380mV-300ns 的调制脉冲进行温度传感实验,得出温度变化同布里渊频移的定量关系,求得布里渊频移的温度变化系数为 1.2MHz/°C,系统空间分辨率 15m。采用 2km 的传感光纤,选择 600mV-100ns 的调制脉冲进行应力传感实验,得出应力变化同布里渊频移的定性关系,实现系统的空间分辨率 2m。

④在信号处理部分,首先通过累加平均去噪的方式实现信号信噪比的提高。选择高斯窗函数分段多次截取采集到的时域上的信息,进行短时傅立叶变换,将得到的频域上的信息点进行拟合,得出传感光纤各处的布里渊频率。通过增大高斯窗函数的长度,将温度传感实验中系统的空间分辨率由 15m 提高至 3m 甚至更高。

通过选择合适的调制脉冲,可以有效避免非线性效应带来的影响并同时提高系统的信噪比,实现了对温度和应变的检测,并对系统的空间分辨率进行了优化。该系统结构简单且成本较低,进一步提高系统性能将在未来的实际应用中发挥出更大的作用及价值。

©KdB  $\text{\AA}$ 分布式传感，脉冲调制，温度应力传感，算法优化，空间分辨率

## ABSTRACT

Distributed optical fiber sensing technology uses optical fiber as the transmission medium and sensing unit, and this technology can monitor the information in continuous time and space. The distributed optical fiber sensing system based on Brillouin Optical Time Domain Reflectometry (BOTDR) has good real-time performance, accurate spatial resolution and measurement accuracy, and the system structure is simple and easy to implement. The distributed optical fiber sensing system based on BOTDR has gained wide attention at home and abroad, and it has become the main technology in the field of optical sensing. In this thesis, according to the relationship between the Brillouin frequency and the temperature and stress, a distributed sensing system to monitor the change in temperature and strain is built based on the coherent heterodyne detection. Through the pulse modulation experiment and the signal processing algorithm, the signal-noise ratio (SNR) of Brillouin signal has been improved greatly, and the spatial resolution and measurement accuracy of the system have been also optimized. The main contents of this thesis are as following:

①The fundamental theory of BOTDR technology and the generation mechanism of spontaneous Brillouin scattering and stimulated Brillouin scattering are described briefly. The quantitative relationship between Brillouin signals' frequency and intensity and the temperature & stress, is investigated. Direct detection and coherent heterodyne detection are two main structural models of the sensing system. The system's main performance parameters and the factors that affect them are introduced in detail.

②The distributed optical fiber sensing system based on BOTDR is designed and built. The performance parameters of the key components such as Brillouin fiber laser and Erbium-doped Fiber Amplifier (EDFA) are specially designed and tested experimentally. According to the working principle of the acoustic optical modulator (AOM), we analyze the effects of modulation pulse on spontaneous Brillouin scattering in sensing optical fibers.

③The influence of different pulse width and amplitude on the scattering signal in a 10km sensing optical fiber is analyzed. The temperature sensing experiment is carried out with 380mV-300ns modulation pulse, through which the quantitative relationship between temperature variation and Brillouin frequency shift is obtained. It's obtained that the Brillouin frequency shift coefficient of temperature is  $1.2\text{MHz}/^\circ\text{C}$  and the

system's spatial resolution is 15 m by this modulation pulse. According to a 2km sensing optical fiber, the 600mV-100ns modulation pulse is chosen to carry out stress sensing experiments, and the qualitative relationship between the stress variation and the Brillouin frequency shift is obtained. It's shown that the spatial resolution of the system is 2m.

④As for the signal processing part, the signal's SNR is improved by the average cumulative denoising method. Gauss window function is selected to intercept the information collected in time domain, and through short-time Fourier transform (STFT), the information points in the frequency domain are obtained. The Brillouin frequency along the sensing optical fiber can be achieved by fitting the points obtained from the STFT. By increasing the length of the Gauss window function, the spatial resolution of the temperature sensing system has been improved from 15m to 3m or even higher.

The experimental research indicates that an appropriate modulation pulse can effectively avoid the generation of nonlinear effects and improve the SNR of the system at the same time. The temperature and strain are detected, and the spatial resolution of the system is optimized. The system has simple structure and low cost, and it will play a more significant role in the practical application in the future by means of further improving the system performance.

**Keywords:** distributed optical fiber sensing, pulse modulation, temperature and stress sensing, algorithm optimization, spatial resolution



中文摘要.....	I
英文摘要.....	III
<b>1 绪 论</b> .....	1
1.1 课题研究背景及意义.....	1
1.2 分布式光纤传感技术的分类.....	1
1.3 基于布里渊散射的光纤传感技术.....	3
1.3.1 BOTDA 技术.....	3
1.3.2 BOTDR 技术.....	4
1.4 本文主要研究内容及创新点.....	5
1.4.1 本文主要研究内容.....	5
1.4.2 本文创新点.....	6
<b>2 基于 BOTDR 的分布式传感技术的基本理论</b> .....	9
2.1 光纤中的布里渊散射.....	9
2.1.1 自发布里渊散射.....	9
2.1.2 受激布里渊散射.....	11
2.2 布里渊频率同温度和应变的关系.....	12
2.3 布里渊光强同温度和应变的关系.....	13
2.4 小结.....	14
<b>3 基于 BOTDR 的分布式传感系统的原理与分析</b> .....	15
3.1 系统的实现方式.....	15
3.1.1 直接探测法.....	15
3.1.2 相干拍频探测法.....	17
3.2 系统的主要性能参数.....	19
3.2.1 信噪比.....	19
3.2.2 动态范围.....	19
3.2.3 空间分辨率.....	20
3.2.4 温度应变测量精度.....	21
3.3 小结.....	22
<b>4 基于 BOTDR 的分布式传感系统的设计及关键技术研究</b> .....	23
4.1 基于 BOTDR 的分布式传感系统的设计.....	23
4.2 种子光源.....	25

<b>4.3 声光调制器 (AOM)</b> .....	27
4.3.1 调制脉冲幅度对后向散射光的影响.....	29
4.3.2 调制脉冲宽度对后向散射光的影响.....	31
<b>4.4 布里渊激光器</b> .....	33
4.4.1 SBS 阈值和带宽 .....	34
4.4.2 自由频谱宽 (FSR) .....	35
4.4.3 线宽和频漂.....	38
<b>4.5 掺铒光纤放大器</b> .....	41
4.5.1 EDFA 的基本结构.....	41
4.5.2 EDFA 的泵浦方式.....	42
<b>4.6 小结</b> .....	42
<b>5 基于 BOTDR 分布式传感系统的温度和应变实验及分析</b> .....	43
<b>5.1 系统的信号分析处理流程</b> .....	43
5.1.1 数字累加平均算法.....	43
5.1.2 短时傅里叶变换.....	44
5.1.3 非线性最小二乘拟合法.....	45
<b>5.2 温度传感实验与分析</b> .....	47
5.2.1 脉冲调制实验.....	47
5.2.2 温度和 Brillouin 频率的关系.....	51
<b>5.3 应变传感实验与分析</b> .....	55
5.3.1 脉冲调制实验.....	55
5.3.2 应变和 Brillouin 频率的关系.....	58
<b>5.4 实验问题分析</b> .....	61
5.4.1 本实验不足之处.....	62
5.4.2 进一步优化实验.....	63
<b>5.5 小结</b> .....	68
<b>6 总结及工作展望</b> .....	69
<b>6.1 总结</b> .....	69
<b>6.2 下一步工作展望</b> .....	70
<b>致    谢</b> .....	71
<b>参考文献</b> .....	73

## 1.5 Aö

### 1.1 B4NĪ.J0-7 ¥ E •

光纤传感技术始于 20 世纪 70 年代，以光纤作为载体实现对外界信号的感知及传输。光在光纤中传输时，其本身的特征参数如：强度、频率、相位、偏振态、波长等受到外界因素的影响会发生不同程度的变化，该过程就是外界参数对所传输的光信号的调制过程，光纤将经过调制后的信号传送至光探测器进行解调，通过分析处理就可以得出被测量如温度、应变、振动、电压、流量的变化。

同传统传感器相比，光纤传感具有以下优点：敏感度高，光纤易于接受外界各种场的加载，是一种优良的敏感元件；抗干扰性强，光纤本身是绝缘材料，抗辐射，能够抵御外界复杂电磁环境的干扰；应用范围广，光纤具有工作频带宽，传输损耗低，质量轻，体积小，易弯折等特点，是一种优良的传输材料。

分布式光纤传感技术作为一种新型的光纤传感技术，其发展也经历了准分布式、分布式两个阶段。相较于准分布式，分布式传感技术能够获取传感光纤沿途随时间和空间变化的连续信息，具有以下优点：

- ① 测量精度高，空间分辨率高，测量范围大；
- ② 可以在光纤长度范围内进行连续的实时测量，相较于只能获得局部分段信息的准分布式传感器，具有更优化的性能和更低的成本；
- ③ 结构简单，易于搭建。分布式传感系统的信号传感器件仅为光纤，便于搭建多股以达到被测区域信息的多维空间分布情况。

基于以上优点，光纤传感技术一经问世便受到极大重视，被广泛应用于国防系统、工业生产、交通运输、安全监测、环境保护、生物医学、精密测量等各领域<sup>[1]</sup>。

本论文基于横向课题“高压输电线温度应变监测系统”完成，与项目组成员朱敏同学共同完成。本论文侧重于利用共同搭建的实验平台分别完成对温度与应力的监测，并运用软件算法对系统空间分辨率进行优化。

### 1.2 < 9 E •4Ú V U ¶ e,° <2±

分布式传感系统按传感原理可以分为干涉型、散射型、偏振型等分布式光纤传感系统，其中散射型分布式传感系统可以按照光在光纤中传播时产生的散射光的不同(如图 1.1)，分别基于瑞利(Rayleigh)散射、拉曼(Raman)散射、布里渊(Brillouin)散射构成分布式光纤传感系统。

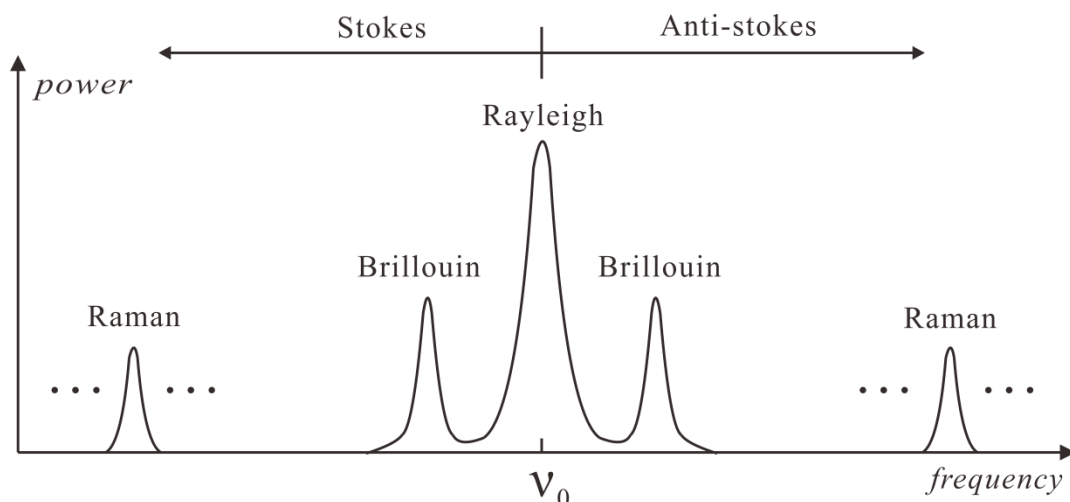


图 1.1 光纤中三种散射光的光谱关系

Fig.1.1 Spectrum of three kinds of scattered light in optical fiber

拉曼散射是一种非弹性散射，光在光纤中传播时激起光纤中光学声子之间产生非弹性碰撞从而产生拉曼散射光。相较于入射光而言，拉曼散射光由频率上移的反斯托克斯光和频率下移的斯托克斯光组成。在自发拉曼散射中，反斯托克斯光的功率受温度的调制，随着温度的升高呈指数规律增加；而斯托克斯光的强度几乎不受温度变化的影响。因此可把反斯托克斯光作为信号通道，斯托克斯光作为参考通道，通过计算二者光强的比值，可解调出待测区域的温度变化信息。基于拉曼散射的分布式光纤传感器采用双通道检测方式，可以有效消除光源频率不稳定，光传播过程中的固有损耗以及其它不均匀性变化造成的影响。但是由于拉曼散射光的功率要比入射光小 50-60dB，导致测量距离受限<sup>[2,3]</sup>。

瑞利散射是光在传播过程中与光纤介质中的微观粒子发生弹性碰撞引起的弹性散射<sup>[4,5]</sup>，沿光纤传播的光一部分与传播方向呈 180 度向后散射返回光源，而后向散射光的强度会受沿途光纤的瑞利散射系数、损耗特性的影响，通过监测瑞利散射光的强度来判断光纤的衰减特性和连续性，从而确定光纤各处的损耗、光纤故障点、断点的位置，这就是光时域反射计（OTDR）的原理。目前基于瑞利散射的用来监测光纤断点故障的光时域传感器已经非常成熟。后来根据瑞利散射系数受温度的影响，通过观察散射光强度的变化实现对光纤沿途温度场的监测，不过由于在传统的石英光纤中，散射光强对温度变化并不明显，导致检测精度较低，目前已采取温敏系数较高的液芯光纤来实现基于瑞利散射的分布式温度传感器<sup>[6]</sup>。总体说来，瑞利散射光的波长同入射光源一致，光功率相较于其它两种散射也是最强的，用 OTDR 技术来确定光纤各处的损耗、故障点、断点的位置已经相当成熟，但是由于瑞利散射的光功率对温度、应变的变化都不敏感，因此作为分布式传感器的研究与应用远逊于其它两种技术。

布里渊散射同拉曼散射一样，也是一种非弹性散射。由于光纤介质内部分子时刻在进行着振动，导致微观上光纤的折射率在时间和空间上会发生周期性的变化产生一个自发的声波场。光进入光纤后，光学光子和光学声子发生非弹性碰撞产生布里渊散射。由于是非弹性碰撞产生的散射，所以散射光频率相对于入射光有大约 11GHz 左右的频移<sup>[7,8,9]</sup>。当光纤材料特性受温度和应变的影响发生改变时，受光纤材料特性影响的布里渊散射光的特性也会发生变化。基于此可以实现对外界温度和应力等其他的同时测量，此外基于布里渊散射的分布式传感器还具有测量范围广、空间分辨率高、测量精度大等优点，一经问世便得到行业内人员的广泛关注。但是该技术系统较为复杂，成本较高，未来还需要实现在理论和技術上的进一步突破，以达到在工程上的广泛应用<sup>[10,11]</sup>。

### 1.3 0 Å 9H \$@ ™ ;, ° •4Ú V U ¶ e

基于布里渊散射的光时域分布式传感系统利用布里渊散射光的功率和温度敏感特性，能够实现长距离、高精度的应变和温度检测。根据散射机理的不同可以分为：基于受激布里渊散射的光时域分析(Brillouin Optical Time Domain Analysis, BOTDA)技术、基于自发布里渊散射的光时域反射(Brillouin Optical Time Domain Reflectometry, BOTDR)技术。

#### 1.3.1 BOTDA ¶ e

BOTDA 技术最初是由 Horiguchi 等人提出用作检测光纤损耗<sup>[12]</sup>，其系统的基本原理结构如图 1.2 所示。两路不同的光源分别从测试光纤的两端打入测试光纤，通过不断调节两路光源的频差，当两路光源的频差刚好与光纤中某区域的布里渊频移  $\nu_B$  相等时，就会在该区域产生布里渊散射效应（即受激布里渊散射），该现象被称为受激布里渊放大。在 BOTDA 系统中，其中一路光源先被调制成脉冲光打入测试光纤，另一路则直接以连续光的形式打入测试光纤。当脉冲光的频率比连续光高  $\nu_B$  从而产生布里渊散射效应时，脉冲光的能量会向连续光转移，该传感方式称之为布里渊增益型。反之当脉冲光的频率比连续光低  $\nu_B$  从而产生布里渊散射效应时，此时连续光的能量会向脉冲光转移，该传感方式称之为布里渊损耗型。

在实际探测过程中，当测试光纤的某一部分受到温度或应力的作用其布里渊频移发生改变时（由  $\nu_B$  变为  $\nu_B'$ ），该部分散射回来的信号光的功率会发生急剧的衰减。此时通过调节两路光源的频差，来获得该部分信号光的最强功率，此时两路光源的频差就是该部分的布里渊频移，通过对信号的进一步解调分析即可获得该部分发生的温度或是应变信息。

由于在布里渊增益型传感系统中，脉冲光的能量不断减小导致脉冲光在测试光纤中的传输距离有限，导致整个系统的监测距离受限；而布里渊损耗型传感系

统中，脉冲光的能量不断增强，有利于系统进行更长距离的探测<sup>[13]</sup>。

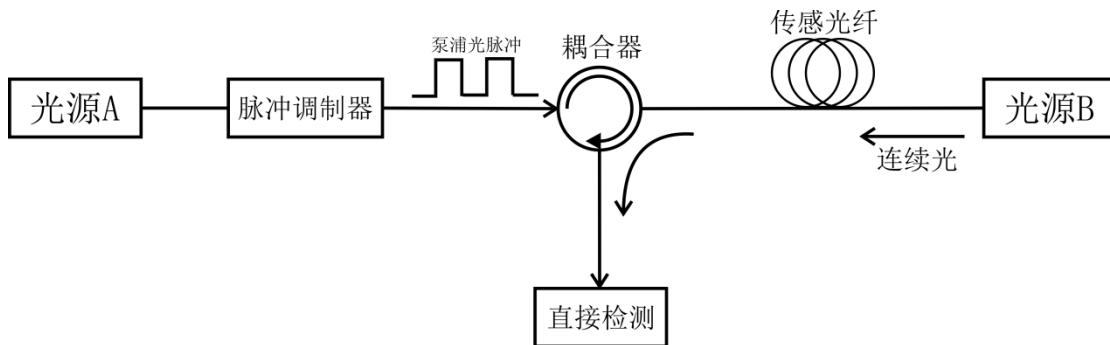


图 1.2 BOTDA 系统的原理结构

Fig. 1.2 Schematic diagram of BOTDA system

在上世纪 80 年代末 Horiguchi 和 D. Culverhousf 首先提出了基于 BOTDA 的分布式光纤传感系统并初步实现了对应力的测量<sup>[14]</sup>。1993 年加拿大的 Bao Xiaoyi 等人实现了对 32km 长光纤沿途温度的监测，达到了 5m 的空间分辨率。随后 Bao 教授又与加拿大 OZ 公司合作，实现了温度和应变的同时检测，并进一步提高了系统的空间分辨率<sup>[15]</sup>。随着对系统的不断优化，2012 年 Soto, Marcelo A 等人利用 Simplex 编码和拉曼放大技术，实现了 120km 的传感距离和 1m 的空间分辨率<sup>[16]</sup>。

BOTDA 技术具有测量精度高，测量范围大等优点，但是由于需要双光源输入，系统较为复杂，不便于搭建，无法测量断点，由温度和应变引起的变化较难区分。

### 1.3.2 BOTDR ¶ e

BOTDR 技术是在传统的 OTDR 技术上发展起来的。在光时域反射仪(OTDR)中，通过对光纤中向后散射的瑞利光强度的分析，可以实现光纤断点、故障点的监测以及光纤沿途温度变化的监测。在 BOTDR 技术中，后向的自发布里渊散射代替了瑞利散射光，由于布里渊散射光的功率和频移受温度和应变的影响，通过对散射信号解调，即可获得沿途温度和应变的变化情况。同瑞利散射光不同的是，后向的自发布里渊信号十分微弱，一般比入射光功率小 50-60dB，相较于瑞利信号也低 20dB 左右，导致监测起来较为困难，测量距离也受限。同 BOTDA 不同的是 BOTDR 采用单端输入，其系统基本结构较为简单，如图 1.3 所示。泵浦光调制成脉冲光后打入传感光纤，通过耦合器在传感光纤的同端收集散射回来的自发布里渊信号，经由探测器接收检测<sup>[17]</sup>。常用的检测方法有直接检测法和相干检测法。

直接检测法是将散射回来的信号经过滤波，取出有用的布里渊信号，通过对布里渊信号进行解调得出温度和应变的信息。当入射光的波长为 1550nm 时，散射回来的布里渊信号的频率约为 11GHz，这对滤波器的要求较高，而且由于返回的

布里渊信号本身就非常微弱，滤波器的插入损耗等因素会进一步影响测量的精度。

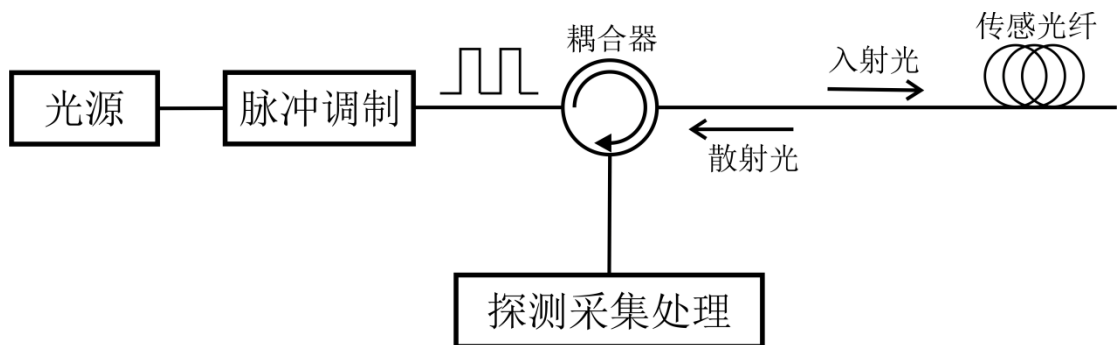


图 1.3 BOTDR 系统的原理结构

Fig.1.3 Schematic diagram of BOTDR system

相干检测法是将激光器发出的泵浦光分成两路，一路直接打入传感光纤，另一路经调制使频率跟散射回来的自发布里渊信号的频率相近。这样跟散射回来的布里渊信号经过探测器拍频后可用窄带相干接收机直接接收，实现低频相干检测，同时便于后续的信号处理。

1993 年日本电话电报公司的 T. Kurashima 等人利用 BOTDR 系统，采用相干检测的方式，在 11.57km 的范围内实现了温度和应变的同时监测，空间分辨率为 100m。随着技术的不断成熟，日本的 ANDO 公司的 AQ860X 系列产品的监测范围达 80km，中国电子科技集团 41 所的产品 AV6419 实现监测范围 80km，应变检测空间分辨率达 1m<sup>[18]</sup>。

BOTDR 技术对单一分布参数的测量具有很好的空间分辨率和测量精度，同时系统的结构也较为简单。由于布里渊信号频移较小、线宽窄，这就对泵浦光源的稳定性和线宽提出了较高的要求，增加了系统的成本。

## 1.4 基于布里渊散射的 BOTDR 系统

### 1.4.1 基于布里渊散射的 BOTDR 系统

基于 BOTDR 的分布式传感技术在温度、应变的测量方面具有高精度、大动态范围、高空间分辨率等优势，一经问世便得到广泛关注和研究，成为全分布式光纤传感器研究的热点领域。该技术在理论以及实验方面均已取得了突破性成果，但是仍然存在许多问题需要进一步研究。

本课题以布里渊散射为背景，汲取了国内外诸多相关课题组的研究成果，对基于 BOTDR 的分布式传感器中的关键技术做了较多研究，并且在理论及实验方面都取得了一些成果。本文各章节的安排内容如下：

第一章介绍了目前分布式传感系统的分类，对目前基于布里渊散射的两种分布式传感技术：BOTDR 技术和 BOTDA 技术的基本原理和各自特点作详细分析。

第二章首先阐述自发布里渊散射和受激布里渊散射在光纤中各自的产生机理，介绍布里渊光谱的两个重要参数：中心频率和功率以及它们的数学表达式，分析布里渊光的中心频率和光强受温度和应力影响而发生变化的原因，并从理论上推导中心频率同温度和应变的关系，光强同温度和应变的关系。

第三章介绍目前基于 BOTDR 分布式系统信号检测方面的两种主要方式：直接检测法和相干拍频检测法。其中相干拍频检测又主要包括：微波外差结构，基于声光频移的自外差结构和基于电光频移的自外差结构。对基于 BOTDR 分布式系统的重要性能参数：信噪比、动态范围、空间分辨率、温度应变测量精度各自的定义以及影响因素作详细介绍，为后面实验优化上述性能指标做准备。

第四章介绍本实验搭建的基于 BOTDR 的分布式传感系统，阐述基于该系统来实现对温度和应变监测的原理。介绍系统中各核心器件的选用或搭建：种子光源的选用标准以及自行搭建的两台布里渊激光器，通过对比激光器的 SBS 阈值、带宽、自由频谱宽、频率稳定性等参数，确定本实验选用的激光器。介绍声光调制器 (AOM) 的工作原理，通过实验分析调制脉冲对传感光纤中自发布里渊散射的影响。介绍自行搭建的掺铒光纤放大器的基本结构和工作原理，通过实验对放大器的放大性能进行测试。

第五章采用 10km 长的传感光纤，首先进行脉冲调制实验，选择合适的脉宽和幅值，使系统的动态范围、空间分辨率以及测量精度都得以兼顾。采用脉宽为 300ns、幅值为 380mV 的调制脉冲，进行温度传感实验，测得不同温度下布里渊信号的频移情况，得出布里渊频移与温度的定量关系。同样，对于应力传感实验，经试验选择脉宽为 100ns、幅值为 600mV 的调制脉冲，对 2km 传感光纤末端 20m 施以不同程度的应力，得出布里渊频移与应变的定性关系。对采集到的时域信息进行处理，通过累加平均去噪的方式提高信号的信噪比。选择高斯窗函数分段多次截取采集到的时域上的信息，进行短时傅立叶变换，将得到的频域上的信息点进行拟合，得出传感光纤各处的布里渊频率。实验发现通过增大高斯窗函数的长度，可以大大提高系统的空间分辨率。

第六章对全文工作进行总结，并对该课题的进一步工作和研究方向进行展望。

#### 1.4.2 脉冲调制实验

①在脉冲调制实验中，发现增大调制脉冲的幅值和脉宽，均会造成传感光纤中散射信号出现非线性效应和自发布里渊信号功率的增强。但是两者的侧重点不同：调制脉冲的幅值主要影响非线性效应，调制脉冲的脉宽主要影响自发布里渊信号的功率。由此可以选择合适的调制脉冲参数，来控制散射信号的非线性效应，



控制布里渊信号的信噪比，从而优化系统性能。

②通过算法优化，在对采集到的信号进行时频转化时，增加每次参与短时傅里叶变换的点数，可以实现对系统的空间分辨率理论值数十倍以上的提升。



## 2 0 Å BOTDR, ° < 9 E V U ¶ e, ° 0 b\* < A ð

### 2.1 •4Ú c, ° 9H \$@ ™ :

光在光纤中传播时,并不是百分之百完全向前传输的,其中一部分光会向其他方向发生散射现象。从微观量子理论上来看,是因为光在传播过程中,光子与传输介质中的分子原子等微观粒子发生弹性或非弹性碰撞引起的,碰撞的过程遵循动量能量守恒定律,碰撞的结果使一部分本来向前运动的光子方向发生偏离,有一部分向后运动,形成了散射光。从宏观上来讲,由于光纤介质的颗粒状结构,光纤拉制过程中成分的不均匀等原因导致介质的不均匀性,导致了光在传输过程中的散射现象,而根据产生介质不均匀性的原因,可以将散射光分为瑞利散射,布里渊散射和拉曼散射<sup>[19,20]</sup>,其中瑞利散射是光子同微观粒子发生弹性碰撞引起的,而布里渊和拉曼散射是非弹性碰撞引起的。

布里渊散射是入射光波的光子和光纤介质中的声学声子碰撞耦合引起的散射现象<sup>[21,22]</sup>。由于二者之间发生的是非弹性碰撞<sup>[23]</sup>,因此布里渊散射光的频率成分会发生改变,分别为相较于入射光频率上移的反斯托克斯成分和相较于入射光频率下移的斯托克斯成分。布里渊散射分为自发布里渊散射和受激布里渊散射。发生自发布里渊散时光纤的光学特性未发生改变,这时斯托克斯分量和反斯托克斯分量的功率相等。当入射光的功率超过布里渊散射的阈值时,光纤的光学特性发生改变,产生受激布里渊散射,反斯托克斯分量的功率会高于斯托克斯分量。

#### 2.1.1 8 9H \$@ ™ :

组成光纤的微观粒子(如分子、原子)时时刻刻进行不停的热运动引起的弹力学振动,在光纤中形成自发的声波场<sup>[24,25]</sup>。该声波场使光纤介质产生疏密相间的变化,引起光纤折射率在空间上发生周期性的变化,同时这种声波场可以被看作是一个沿光纤运动的折射率光栅,当入射光作用在该光栅上发生衍射时,会产生自发布里渊散射(Spontaneous Brillouin Scattering, SpBS)现象。根据多普勒效应,当入射光的传播方向同光栅的运动方向相同时,衍射出频率减小的斯托克斯分量;当入射光的传播方向同光栅的运动方向相反时,衍射出频率增大的斯托克斯分量。从微观量子学的角度解释:当泵浦光的光子同声学声子发生碰撞时,产生一个新的频率较低的斯托克斯光子和一个新的声子,而这个新的声子也可以同其它的光子结合,产生一个频率较高的反斯托克斯光子<sup>[26]</sup>。由于一个光子释放一个新的声子和另一个光子吸收这个新的声子是一一对应的,因此在自发布里渊散射过程中,斯托克斯光和反斯托克斯光的功率相同。布里渊散射的频移同入射光的波长、介质的材料属性相关。其计算公式为:

$$v_B = \frac{2nV_A}{\lambda_p} \quad (2.1)$$

其中  $V_A$  为声波场的速度（也可看作光纤光栅的传播速度）， $n$  为光纤的折射率， $\lambda_p$  为入射光在真空中的波长。就普通的石英光纤而言，其折射率  $n=1.44$ ， $V_A$  约为  $5900\text{m/s}$ ，当入射光的波长为  $1550\text{nm}$  时，可以求得布里渊频移  $v_B=10.96\text{GHz}$ 。如果把入射光的频率作为  $\nu_0$ ，在自发布里渊散射中，斯托克斯光的频率为  $\nu_0 - v_B$ ，反斯托克斯光的频率为  $\nu_0 + v_B$ 。

若令光纤中的自发声波场呈函数  $\exp(-t/\Gamma_B)$  衰减，则布里渊能量谱符合洛仑兹曲线分布。根据式(2.2)：

$$g_B(\nu) = \frac{(\Delta\nu_B/2)^2}{(\nu - \nu_B)^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} g_p \quad (2.2)$$

在频移为  $\nu_B$  时取得布里渊散射谱的峰值功率  $g_p$ ， $\Delta\nu_B$  为布里渊增益谱的二分之一峰值谱宽，如图 2.1 所示。 $\Delta\nu_B = \Gamma_B/2\pi$ ， $\Gamma_B$  是声子寿命的倒数，对于普通的石英光纤，声子寿命通常在  $10\text{ns}$  左右，因此一般光纤的自发布里渊散射谱宽约在几十  $\text{MHz}$ 。对于布里渊散射光的峰值功率  $g_p$ ，通常由光纤材料的折射率、纵向弹光系数、光纤材料的密度、入射光波长等因素决定，对于普通的石英光纤，当入射光波长为  $1550\text{nm}$  时，布里渊增益系数约为  $5 \times 10^{-11} \text{m/W}^{[27]}$ 。以上是在输入光为连续光且输入光的线宽远小于布里渊的谱宽  $\Delta\nu_B$  时得到的数据。布里渊增益系数会随着入射泵浦光线宽的变窄而提高。

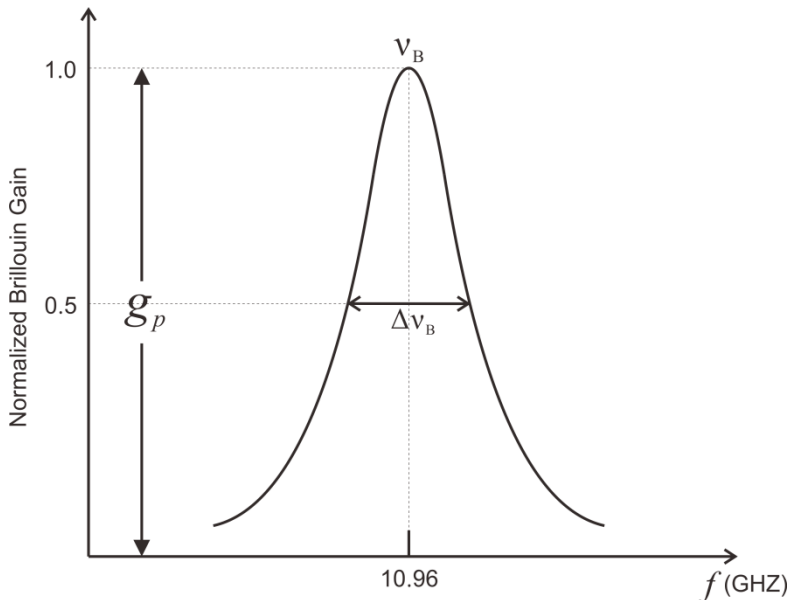


图 2.1 布里渊增益谱

Fig.2.1 Brillouin gain spectrum

### 2.1.2 受激布里渊散射 (SBS) :

自发布里渊散射是光纤本身产生的自发弱声波场同入射光相互作用的结果。而受激布里渊散射 (Stimulated Brillouin Scattering, SBS) 是入射光引起的强声波场同入射光相互作用的结果。入射光进入光纤后, 在传输的过程中会产生向后传播的布里渊散射光, 其光强会随着入射光功率的增加而增强, 当后向传播的布里渊散射光增强到一定程度时, 会同入射光发生干涉形成强干涉条纹, 从而导致该区域光纤的折射率大大增加, 产生电致伸缩效应<sup>[28]</sup>。电致伸缩效应使光纤产生周期性的振动, 从而在光纤内部产生一个沿光纤以声速  $V_A$  运动的声波场, 同时该声波场也可以看作是一个折射率光栅, 入射的泵浦光和该光栅作用发生布拉格衍射, 由于多普勒效应, 就产生了受激布里渊散射光。

由于声波场是由入射光和向后传输的布里渊散射光发生干涉引起的, 而入射光再同声波场进一步作用产生的布里渊散射又加强了后向散射的布里渊光。布里渊光加强, 由它同入射光产生的声波场又被进一步加强, 如此循环往复, 入射光的能量逐步转移到布里渊散射光上, 形成受激布里渊散射, 原理如图 2.2。从微观量子角度来分析: 产生一个斯托克斯光子的同时还会产生一个声子, 产生的声子会进一步加强声波场, 加强的声波场又会进一步催生出更多的斯托克斯光子和声子<sup>[29]</sup>。由于入射光激发出的声波场同入射光的方向相同, 若不考虑自发布里渊散射, 散射光只有斯托克斯光一种分量。

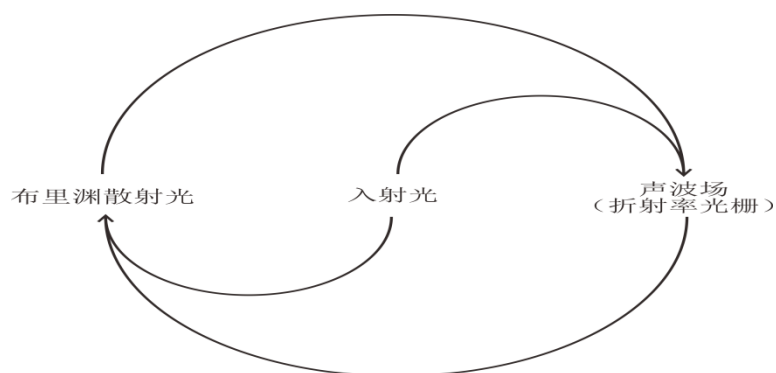


图 2.2 受激布里渊散射示意图

Fig.2.2 Diagram of Stimulated Brillouin Scattering

同自发布里渊散射不同, 受激布里渊散射需要当入射光达到某一阈值时, 受激现象才会产生。受激布里渊散射的阈值可以从两方面来定义: 一是当斯托克斯光的增益大于损耗时的入射光的功率; 二是当斯托克斯光的功率开始迅速增加或传输光的功率开始出现饱和时入射光的功率。无论以哪种方式定义, 受激布里渊散射的阈值均受传输光纤的材料、光纤的有效长度等因素的影响, 对某一固定光

纤，SBS 阈值会随着光纤长度的增加而减小直到趋于一个固定值。

## 2.2 布里渊散射光的频率和强度

布里渊散射光的频率和强度受光纤材料声速的影响，而光纤中声波场的速度由光纤的声学特性和弹力学特性决定，当温度和应力的变化作用于光纤上时，光纤材料中声波场的速度发生改变，进而影响到布里渊散射光的频率和强度<sup>[30,31]</sup>。

入射光同光纤中的折射率光栅相互作用，根据多普勒效应，产生的布里渊散射光的频率应该跟入射光的频率、折射率光栅在光纤中的运动速度（即声波场的传播速度  $V_A$ ）相关<sup>[32]</sup>。此外，布里渊散射光的频率和散射光的散射角  $\theta$  有关，对于普通的石英光纤来讲，其散射光主要发生在后向，即  $\theta = \pi$ <sup>[33]</sup>。当入射光的频率为  $\nu_0$  时，布里渊散射光的斯托克斯分量的频率为  $\nu_0 - \nu_B$ ，反斯托克斯分量的频率为  $\nu_0 + \nu_B$ ， $\nu_B$  为光纤中的布里渊频移：

$$\nu_B = 2\nu_0 \frac{nV_A}{c} \sin(\theta/2) = 2nV_A/\lambda_0 \quad (2.3)$$

其中  $\theta$  是散射光的散射角，取作  $\pi$ ， $n$  为光纤材料的折射率， $V_A$  为声波场的速度， $c$  为光速，其中声波场的速度可表示为

$$V_A = \sqrt{(1-k)E/[(1+k)(1-2k)\rho]} \quad (2.4)$$

其中  $E$  是杨氏模量， $k$  为泊松比， $\rho$  为光纤纤芯的密度。由于杨氏模量，泊松比，纤芯密度以及光纤的折射率都是温度  $T$  和应变  $\varepsilon$  的函数，可以分别记为  $E(T, \varepsilon)$ 、 $k(T, \varepsilon)$ 、 $\rho(T, \varepsilon)$ 、 $n(T, \varepsilon)$ ，代入式(2.4)，布里渊频移  $\nu_B$  可表示为：

$$\nu_B = \frac{2}{\lambda_0} n(T, \varepsilon) \sqrt{\frac{[1-k(T, \varepsilon)]E(T, \varepsilon)}{[1+k(T, \varepsilon)][1-2k(T, \varepsilon)]\rho(T, \varepsilon)}} \quad (2.5)$$

为了探究温度对布里渊频移的影响，令应变  $\varepsilon = 0$ ，代入式(2.5)，得到布里渊频移同温度变化的关系为：

$$\nu_B = \frac{2}{\lambda_0} n(T, 0) \sqrt{\frac{[1-k(T, 0)]E(T, 0)}{[1+k(T, 0)][1-2k(T, 0)]\rho(T, 0)}} \quad (2.6)$$

令温度的变化量为  $\Delta T$ ，在无应变的情况下，将上述四参量  $E(T, \varepsilon)$ 、 $k(T, \varepsilon)$ 、 $\rho(T, \varepsilon)$ 、 $n(T, \varepsilon)$  按泰勒级数展开，并忽略一阶以上级数得：

$$\begin{cases} E(T, 0) \approx E(T_0, 0) + E_T \cdot \Delta T \\ k(T, 0) \approx k(T_0, 0) + k_T \cdot \Delta T \\ \rho(T, 0) \approx \rho(T_0, 0) + \rho_T \cdot \Delta T \\ n(T, 0) \approx n(T_0, 0) + n_T \cdot \Delta T \end{cases} \quad (2.7)$$

式中  $T_0$  为参考温度，取为 293K， $\Delta T$  是温度相对于参考温度的变化量， $E_T$ 、 $k_T$ 、 $\rho_T$ 、 $n_T$  分别是杨氏模量、泊松比、纤芯密度以及光纤折射率的温度系数。

将式(2.7)代入(2.6)并做二项式展开，取  $T$  的一次项可得：

$$\nu_B(T, 0) \approx \nu_B(T_0, 0) [1 + (\Delta E_T + \Delta k_T + \Delta \rho_T + \Delta n_T) \Delta T] \quad (2.8)$$

其中  $\Delta E_T = \frac{E_T}{2E(T_0, 0)}$ ， $\Delta k_T = \frac{k_T k(T_0, 0) [2 - k(T_0, 0)]}{[1 - k^2(T_0, 0)][1 - 2k(T_0, 0)]}$ ， $\Delta \rho_T = \frac{-\rho_T}{2\rho(T_0, 0)}$ ， $\Delta n_T = \frac{n_T}{n(T_0, 0)}$ ，

当 $T_0=20^\circ\text{C}$ 时, 式(2.8)中的各参数可以求出, 得到在普通的单模光纤中, 布里渊频移同温度的关系式为:

$$v_B(T, 0) \approx v_B(T_0, 0)(1 + 1.18 \times 10^{-4} \Delta T) \quad (2.9)$$

从式(2.9)中可以得出, 单模光纤中, 在不受外界应变的条件下, 布里渊光的频移量跟温度的变化量呈线性关系, 在一定范围内, 随着温度变化的增加频移量增大。在 2.1.1 章节中已得出, 对于普通的单模石英光纤, 当入射光的波长为 1550nm 时, 布里渊光的频移量约为 10.8GHz。由式(2.9)可以进一步得出, 在上述条件下, 光纤的温度每变化 1K, 布里渊光谱约频移 1.2MHz。

为探究应变和布里渊频移的关系, 控制温度不发生变化, 以外界参考温度  $T_0$  为 293K 为例, 布里渊频移量  $v_B$  和应变变量  $\varepsilon$  的关系可表示为:

$$v_B = \frac{2}{\lambda_0} n(T_0, \varepsilon) \sqrt{\frac{[1-k(T_0, \varepsilon)]E(T_0, \varepsilon)}{[1+k(T_0, \varepsilon)][1-2k(T_0, \varepsilon)]\rho(T_0, \varepsilon)}} \quad (2.10)$$

光纤的应变属于微小应变, 将上式在  $\varepsilon=0$  处进行泰勒级数展开, 忽略一阶以上高次项得:

$$v_B(T_0, \varepsilon) \approx v_B(T_0, 0)[1 + (\Delta E_T + \Delta k_T + \Delta \rho_T + \Delta n_T)\varepsilon] \quad (2.11)$$

其中  $E_\varepsilon$ 、 $k_\varepsilon$ 、 $\rho_\varepsilon$ 、 $n_\varepsilon$  分别是杨氏模量、泊松比、纤芯密度以及光纤折射率的应变系数, 它们的变化量可表示为:  $\Delta E_\varepsilon = \frac{E_\varepsilon}{2E(T_0, 0)}$ ,  $\Delta k_\varepsilon = \frac{k_\varepsilon k(T_0, 0)[2-k(T_0, 0)]}{[1-k^2(T_0, 0)][1-2k(T_0, 0)]}$ ,  $\Delta \rho_\varepsilon = \frac{-\rho_\varepsilon}{2\rho(T_0, 0)}$ ,  $\Delta n_\varepsilon = \frac{n_\varepsilon}{n(T_0, 0)}$ 。在单模光纤中, 当入射光波长为 1550nm 时, 将  $\Delta E_\varepsilon = 2.88$ ,  $\Delta k_\varepsilon = 1.49$ ,  $\Delta \rho_\varepsilon = 0.33$ ,  $\Delta n_\varepsilon = -0.22$ , 代入式(2.11)得到  $v_B$  和  $\varepsilon$  的关系式:

$$v_B(T_0, \varepsilon) \approx v_B(T_0, 0)(1 + 4.48\varepsilon) \quad (2.12)$$

从式(2.12)中可以看出, 单模光纤中布里渊频移量同外界的应变变量也是一种线性变化关系, 当入射光频率  $\lambda_0=1550\text{nm}$  时, 光纤所受的应力每变化  $10^{-3}$ , 引起的布里渊频移约为 50MHz。

### 2.3 Rayleigh 散射光强与温度的关系

温度和应变在对布里渊频移产生作用的同时, 对布里渊散射光的光强也会产生影响, 在 Rayleigh 散射光光强公式的基础上, 可以类似推出布里渊光强的表达式:

$$P_B = P_0 S \alpha W v / 2 \quad (2.13)$$

其中  $P_0$  是入射光功率,  $W$  为脉冲宽度,  $v$  为入射光在光纤中的传播速度,  $S$  为布里渊散射的背向捕捉系数,  $\alpha$  为布里渊散射的损耗系数,  $S$  和  $\alpha$  会受到温度和应变的影响而变化, 可以分别表示为:

$$\begin{cases} S = \left(\frac{\lambda}{n}\right)^2 / (4\pi A_{eff}) \\ \alpha_B = \left(\frac{8}{3}\right) \left(\frac{\pi^3}{\lambda^4}\right) kT (n^8 p_{12}^2 / \rho V_A^2) \end{cases} \quad (2.14)$$

式(2.14)中,  $\lambda$  为真空中入射光波长,  $A_{eff}$  为光纤的有效面积,  $k$  为波尔兹曼常数,  $p_{12}$  为光纤的弹光系数。受温度和应力影响的参数为: 光纤的折射率  $n$ 、外界温度  $T$ 、光纤的材料密度  $\rho$ 、光纤中声波场的传输速度  $V_A$ 。

温度的变化会引起参数  $T$ 、光纤折射率  $n$ 、声波场速度  $V_A$  变化。在外界应力  $\varepsilon = 0$  的条件下, 通过计算  $[P_B(T) - P_B(0)]/[TP_B(0)]$  可以得出布里渊光强随温度变化的系数。应力的变化会引起光纤折射率  $n$ 、声波场速度  $V_A$ 、光纤的材料密度  $\rho$  发生变化。在外界温度为某一固定值不变时, 通过计算  $[P_B(\varepsilon) - P_B(0)]/[\varepsilon P_B(0)]$  可以得出布里渊光强随应变变化的系数。根据文献中的实验结果, 当入射光波长为 1550nm 时, 布里渊温度变化系数为  $(0.36 \pm 0.06)\%/K$ , 应力变化系数为  $(-7.7 \pm 1.4) \times 10^{-4}\%/ \mu\varepsilon^{[34]}$ , 可以看出, 布里渊散射光功率随温度的变化明显, 受应变的影响微弱, 可以忽略不计。而布里渊散射光的中心频率同时受温度和应变的影响, 基于此可以采用双参量矩阵法, 实现系统对温度和应变的同时测量。

## 2.4 E5

本章介绍了光在光纤中发生的散射现象, 分别从宏观和微观上分析了自发布里渊散射和受激布里渊散射的散射机理并阐明了两者的异同点。研究了自发布里渊散射中布里渊光谱的频移和光强同外界温度和应变之间的关系表达式, 得到布里渊频移同温度和应变的量化关系, 为后面章节搭建 BOTDR 系统平台, 分析实验数据起指导和验证作用。



### 3 0 Å BOTDR, ° < 9 E V U315, ° Ö\* < D < Æ

基于布里渊散射的分布式光纤传感系统大体上可以分为三种：基于布里渊光时域反射(Brillouin Optical Time Domain Reflectometry, BOTDR)技术的分布式系统、基于布里渊光时域分析(Brillouin Optical Time Domain Analysis, BOTDA)技术的分布式系统、基于布里渊光频域分析(Brillouin Optical Frequency Domain Analysis, BOFDA)技术的分布式系统。同 BOTDA 技术和 BOFDA 技术相比，BOTDR 技术对单一参数的测量具有很高的精度和空间分辨率，同时由于系统采用单端输入，结构较为简单，便于在工程上安装使用。

#### 3.1 315, ° Ö)æ ï E

在第一章中已经对 BOTDR 技术作过简单介绍，该技术是将自发布里渊散射同光时域反射技术(OTDR)结合起来进行传感。系统的基本实现模式为：泵浦光经调制成脉冲光后打入传感光纤，通过检测光纤散射回来的自发布里渊信号，分析其频率和功率变化量，来实现对光纤沿途温度和应变的监测。通过布里渊散射光和脉冲光的时间延迟可以确定温度或应力变化的位置信息，如图 3.1 所示。检测点的位置信息  $L$  可以通过公式  $L=(c\Delta t)/(2n)$  求出，其中  $c$  为真空中光速， $n$  为光纤折射率， $\Delta t$  从脉冲光进入光纤到散射回来的时间间隔。根据自发布里渊散射光的频率特性和功率特性，BOTDR 系统的检测方式有直接检测和相干检测两种方式。



图 3.1 空间位置信息定位原理

Fig.3.1 The positioning principle of spatial location information

#### 3.1.1 -\* Û Ø#•#

直接检测的 BOTDR 系统结构简单，其系统的基本框架如图 3.2 所示。泵浦光经调制成脉冲光后，经环行器进入传感光纤，入射光在光纤传播的过程中，向后传输的散射光通过发端的环行器输出，经过滤波器将散射光中的自发布里渊散射信号从瑞利光中分离出来，最后经过光电转换后由采集卡进行数据采集和处理。

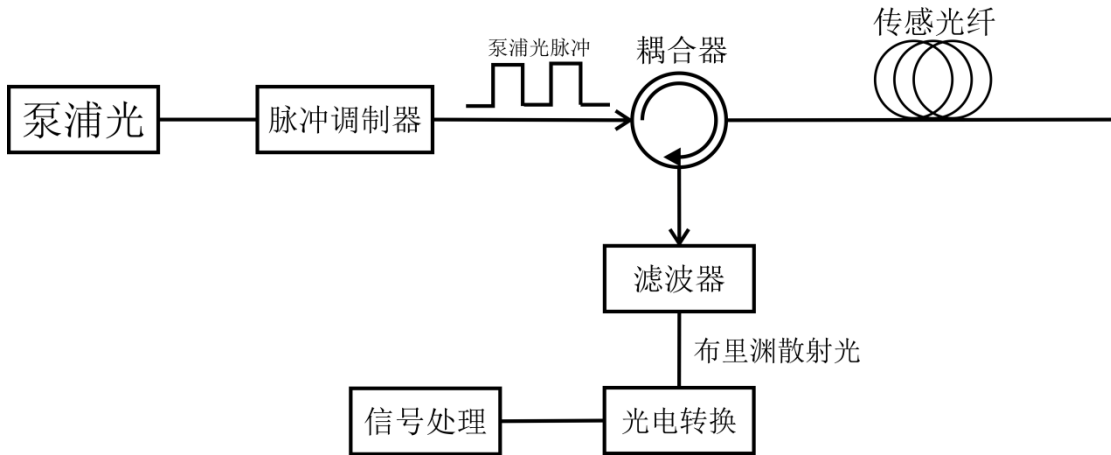


图 3.2 基于直接检测的 BOTDR 系统原理图

Fig.3.2 Schematic of BOTDR system based on direct detection

直接检测法对光学滤波器的要求较高。由于后向散射光非常微弱，为了保证系统的传感精度，要求系统的光学滤波器应具有高稳定性和低损耗特性。由于光学滤波器自身的原因，该系统仅能对布里渊散射光的功率进行检测，而应力变化对布里渊光功率的影响极其微弱，几乎可以忽略不计，因此直接检测的 BOTDR 系统主要用于对温度场变化的检测。实际中通过测量瑞利光同布里渊光的功率比，即朗道比(Landau-Placzek Ratio, LPR)，来减小传输损耗、插入损耗等各类损耗对测量精度的影响。

目前常用的光学滤波器有：法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)干涉仪、马赫-曾德尔(Mach-Zehnder, M-Z)干涉仪和光纤布拉格光栅滤波器(Fiber Bragg Grating Filter, FBGF)<sup>[35]</sup>。对于普通的石英光纤，环境温度 T 可以表示为：

$$T = \frac{1}{K_T} \left[ 1 - \frac{LPR(T)}{LPR(T_R)} \right] + T_R \quad (3.1)$$

式中  $K_T$ -----传感器温度灵敏度；

$T_R$ -----参考温度；

$LPR(T_R)$  -----参考温度下瑞利光同布里渊光的功率比；

$LPR(T)$  -----实时温度下瑞利光同布里渊光的功率比。

基于直接检测的系统结构简单，实现成本较低，系统实时性较好，但是该方式对泵浦光的功率和脉宽都有严格的限制要求。由于直接检测系统的测量精度跟待测信号的信噪比成正比关系，而后向散射光中自发布里渊信号的功率又相对微弱，因此为了提高布里渊信号功率，需要尽可能加大泵浦光的功率。另一方面，当泵浦光的功率达到受激布里渊散射的阈值时，光纤中发生受激布里渊散射现象，斯托克斯光的能量急剧增加并超过瑞利散射光，导致散射光的能量大部分集中在光纤近端，从而影响系统的探测距离，因此需要将泵浦光的功率控制在一个合适

的范围内。由于散射光谱中布里渊信号和瑞利信号的频率相差不大，为了防止二者的光谱重叠过多，甚至布里渊信号被瑞利覆盖，泵浦光的线宽不得超过布里渊信号的线宽（40MHz 左右），光源应采用窄线宽激光。

### 3.1.2 相干检测技术

相干检测技术是基于 BOTDR 的分布式传感系统目前广泛采用的探测方式。该方式的核心思想是，在散射光进行信号分析处理模块之前，与另一路参考信号进行拍频<sup>[36,37]</sup>。相较于直接检测，相干拍频检测通过混频将原本 GHz 级的高频信号频移至中频段，大大降低了对探测器的性能要求，中频信号也更加便于解调处理。直接检测中，自发布里渊散射信号十分微弱，如果提高泵浦光功率，可能会引起受激布里渊散射，影响系统的检测范围。相干检测通过将布里渊散射光同参考光拍频，得到拍频后的信号功率  $P_c$  为：

$$P_c = 2\sqrt{P_B P_{LO}} \quad (3.2)$$

其中  $P_B$  和  $P_{LO}$  分别为 Brillouin 光和参考光的功率。在探测器的工作范围内，可以通过提高参考光的功率来提高系统的信噪比，优化了系统的测量精度和检测范围。由于相干探测法将入射光分为两路，拍频可以消除入射光频漂的影响，所以可以进一步提高系统的稳定性。

基于相干检测的系统结构主要有三种：微波外差结构、基于声光频移的自外差结构、基于电光频移的自外差结构。

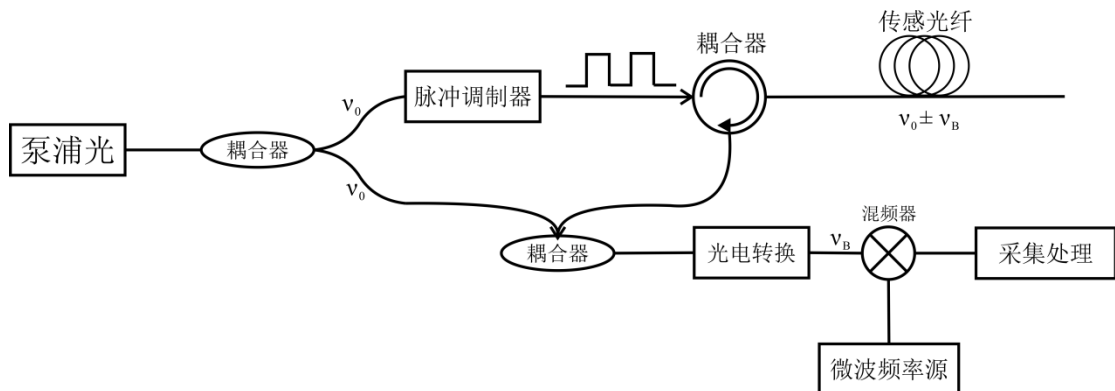


图 3.3 微波外差结构系统图

Fig.3.3 System diagram of microwave heterodyne detection structure

微波外差结构的系统原理如图 3.3 所示。泵浦光从光源发出后经耦合器分为上下两路，频率均为  $v_0$ ，上路激光经过脉冲调制器调制成脉冲信号进入传感光纤，散射回来的自发布里渊信号有  $v_0 \pm v_B$  两个分量， $v_B$  为自发布里渊信号的频移。上路的布里渊信号同下路参考光经耦合器进入双平衡探测器进行拍频，得到频率为  $v_B$  的信号。经过拍频的信号约为 11GHz，对于采集卡来说该频率过高，需要同微波频率源进行混频，通过连续改变微波频率源的频率，可以构建布里渊频谱，对频

谱进行洛仑兹拟合可以得到布里渊频移。该方案对微波频率源的稳定性和精确度都有较高要求。

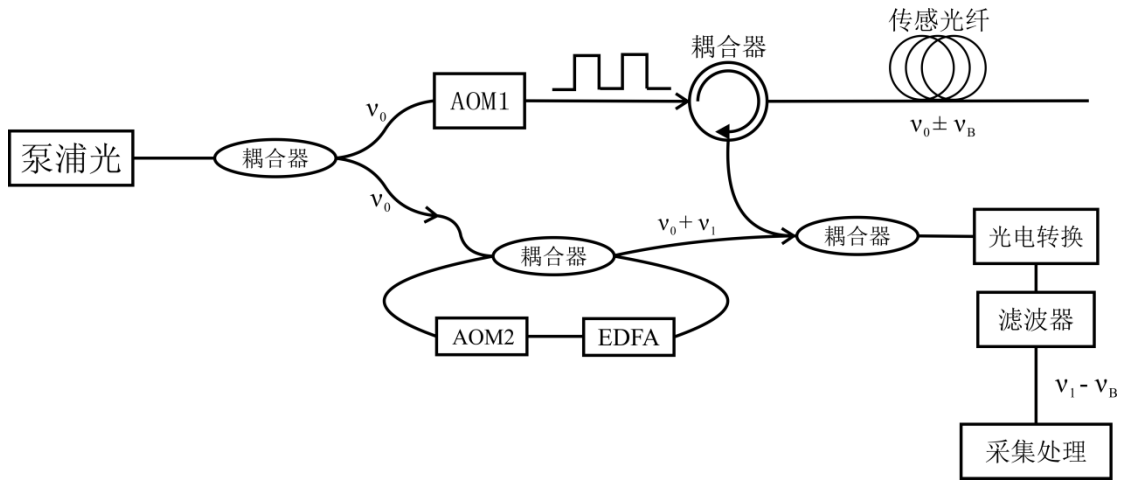


图 3.4 声光频移自外差结构的系统图

Fig.3.4 System diagram of acoustic optical frequency shift self heterodyne structure

基于声光频移的自外差结构系统如图 3.4 所示。同微波外差系统一样，泵浦光从光源发出后经耦合器分为上下两路光，频率均为  $v_0$ ，上路光经过声光脉冲调制器（AOM）调制成脉冲信号进入传感光纤，得到自发布里渊信号，下路光经过声光调制器 AOM2 产生频移。上路信号经自发布里渊散射产生的频移约为 11GHz，为了使上下两路的拍频信号在较低频段，下路信号经声光调制后的频移也应与上路的布里渊频移量相当。由于传统的声光调制器产生的频移为 110MHz 左右<sup>[38]</sup>，因此需要构建一个声光频移环路，通过对入射信号进行重复调制并放大，使下路信号也具有 11GHz 左右的频移。声光频移系统需要经过上百次的频移和频率精确可调的声光调制器才能构建出完整的布里渊频谱，为了保证系统的精度，要求声光频移器具有极佳的性能。

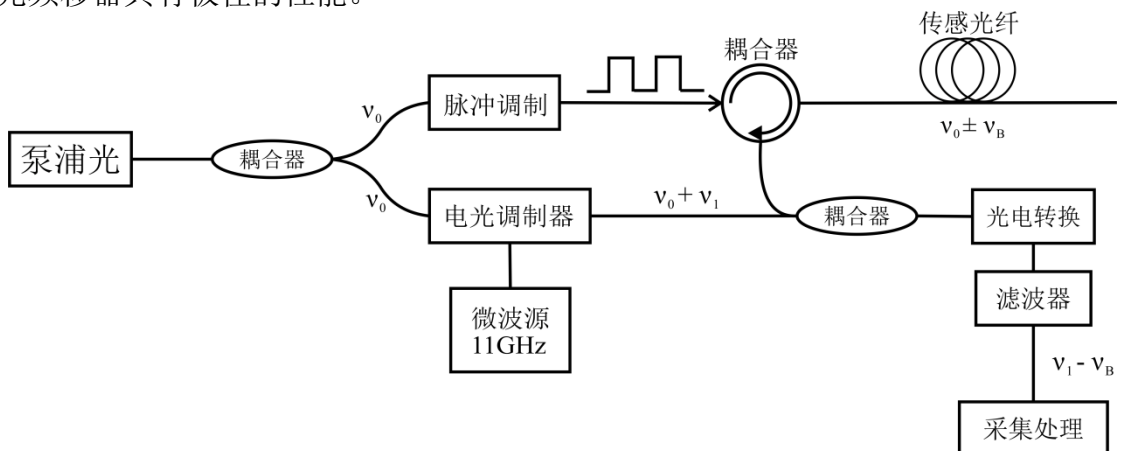


图 3.5 电光频移自外差结构的系统图

Fig.3.5 System diagram of Electro optical frequency shift self heterodyne structure

基于电光频移的自外差结构系统如图 3.5 所示。系统结构同声光频移的结构类似，电光频移采用 11GHz 左右的微波源去驱动电光调制器，来完成下路光信号的频移，不同的是电光频移的调制光路可以一次完成 11GHz 左右的频移，相对可以简化光路，提高系统精确度。但是为了精确控制调制器的频移量，驱动微波源的频率稳定性应满足较高要求，一般微波源产生的信号的频率波动不应超过 1MHz<sup>[39,40]</sup>，同时电光调制器对入射光的偏振特性提出了较高的要求。

相干拍频探测法的参考光和布里渊散射光来自于同一个光源，可以减小光源稳定性产生的误差，通过拍频使信号落在低频频段，从而减小信号处理难度。比较上述三种系统：微波外差结构要求光电转换器的带宽在 11GHz 以上，器件成本太高，同时要求微波频率源具有高频率稳定性和分辨率；声光频移自外差结构，需要建立一个平衡环路，增加系统复杂度，多次移频也会造成光噪声的积累，使系统的稳定性降低；电光频移自外差结构，不需要多次移频，可以简化系统，但是需要保证驱动微波源的分辨率和频率稳定度。

## 3.2 315 ,° q?· ]73 ø !

BOTDR 系统的信噪比、动态范围、空间分辨率以及温度应力测量精度是系统的重要性能指标，本节对以上性能参数进行简要分析。

### 3.2.1 "

在基于 BOTDR 的分布式系统中，采集模块处理的数据是经过光电转换器处理的中频信号，因此系统的主要噪声就是光电转换器引起的噪声<sup>[41]</sup>。根据外插检测信噪比的推导过程，可以大致定性地分析基于外差检测的系统信噪比：

$$\text{SNR}=10\log_{10}\frac{\alpha P_s}{q\Delta f} \quad (3.3)$$

式中  $\alpha$  为光电转换器的响应度， $P_s$  是经过功率放大后的布里渊散射信号， $q$  为电荷电量， $\Delta f$  为接收机的带宽。其中  $\alpha$ 、 $q$ 、 $\Delta f$  为已知参数或可以直接测得， $P_s$  是散射布里渊信号经过 EDFA 放大后的功率，EDFA 的放大倍数是已知参量。散射布里渊信号功率的推导在第二章已作详细阐述，根据第二章中“布里渊光强同温度和应变关系”一节，散射布里渊信号功率可由入射光波长、光纤有效面积、光纤弹光系数、光纤材料密度、光纤中声波场传输速度等参量通过式(2.13)和式(2.14)求出。

高响应度的光电转换器和高功率的布里渊信号光是系统具有高信噪比的保证，同时也可以通过增加外插检测的平均叠加次数有效提高系统的信噪比。

### 3.2.2 p 799 \*

系统的动态范围是指系统能够检测外界温度等变化量的最大距离，它主要由进入传感光纤的信号信噪比决定，信噪比越大，信号在传感光纤中的有效传感距离就越长，系统能够检测的范围就越大。系统的动态范围目前尚没有一个统一的

定量计算标准，影响动态范围的各参数关系可由下式定性表示<sup>[21]</sup>：

$$D_{\gamma} = 0.5(P_P + R_B + T_S - L_C - P_d + SNIR/2 - SNR_{\gamma}/2) \quad (3.4)$$

式中  $P_P$ ——入射脉冲光的峰值功率；

$R_B$ ——自发布里渊散射因子；

$T_S$ ——布里渊散射选择比；

$L_C$ ——系统中器件的插入损耗总和；

$P_d$ ——光电转换器的灵敏度；

$SNIR$ ——信号通过处理后的信噪比增量；

$SNR_{\gamma}$ ——满足系统温度和应变测量精度所需要的最小信噪比。

其中  $P_P$ 、 $L_C$ 、 $P_d$ 、 $SNR_{\gamma}$  为已知参数或可以通过直接测量得出， $R_B$  是自发布里渊散射因子，可以定义为传感光纤中某处自发布里渊散射光的功率同入射光功率的比值。 $R_B$  和  $T_S$  可由下列式子表示：

$$R_B = 10 \lg \frac{P_B}{P_P} = 10 \lg (S \alpha_B \frac{c\tau}{2n}) \quad (3.5)$$

$$T_S = 10 \lg \left( \frac{2B}{\pi \cdot \Delta\nu_B} \right) \quad (3.6)$$

式(3.5)中， $S$  为传感光纤纤芯的横截面积， $\alpha_B$  为布里渊散射系数。式(3.6)中  $B$  为滤波器带宽， $\Delta\nu_B$  为布里渊散射谱的带宽。

综合式(3.4)、(3.5)、(3.6)可以得出，要提高系统的动态范围：可以通过提高入射光脉冲的峰值功率，但是一味增加入射光的功率会引起受激布里渊散射，使散射光集中在传感光纤的发端，反而影响系统的检测范围。此外还可以通过提升信噪比的方式：通过一些算法进行信号处理来提高接收机的信噪比，对系统进行优化，尽量减小系统噪声。提高接收机的灵敏度，也可以实现对系统动态范围的提升。

### 3.2.3 $0^\circ L^* < E\tau)^{1/2}$

空间分辨率是系统的另一项重要参数，用来表征整段光纤上能检测到外界场发生变化的最短长度。基于 BOTDR 的分布式系统能够实现对整段光纤上各个“点”处受到外界变化进行检测，这里所说的某“点”其实是对应光纤上的某段距离，系统的空间分辨率越高，该段距离就越短，空间分辨率越低，该段距离就越长。影响系统空间分辨率的主要因素有：单模光纤的色散值、接收机对光脉冲的响应时间、光与光纤作用的弛豫时间以及入射光脉冲的脉宽<sup>[42,43]</sup>。单模光纤每公里的色散在纳秒级，光与光纤作用的弛豫时间在为皮秒级，均可忽略不计。若不考虑接收机的相应时间，当输入脉冲光的脉宽为  $\tau$  时，系统的空间分辨率  $s$  可由下式给出：

$$s = (\tau v)/2 \quad (3.7)$$

式中  $v$  代表光在光纤中的传播速度，由真空中光速除以光纤折射率得出。在  $\tau$  的时间范围内，传感光纤中长度为  $s$  的一段光纤内所有的后向布里渊散射光会在某一

“时刻  $t$ ”集体到达光纤发端，而  $s$  之外其它位置的散射光会在“ $t$ 时刻”之外的其它时间到达。

当光脉冲的脉宽  $\tau$  取 100ns 时，系统的空间分辨率  $s = 10\text{m}$ ，该情况下光纤某点处的温度应变情况实际上是该点前方 10m 范围内所受到的温度应变变化情况。当  $\tau$  取 10ns 时，系统的空间分辨率可达 1m。光纤中声子的寿命约 10ns，当入射脉冲的宽度接近甚至小于声子的寿命时，后向散射的布里渊光谱会急剧展宽，会影响对被测量参量的测量精度。因此 10ns 左右的脉冲脉宽达到的 1m 的空间分辨率，是目前工程上应用的最高精度。

减小入射光的脉冲宽度是提升系统空间分辨率的主要方法，但是随着脉冲光脉冲宽度的减小，脉冲光功率的峰值势必会随之减小。上节提到，提高系统动态范围的有效方式是增加入射光脉冲的峰值功率。由此可见在某种程度上系统的动态范围和空间分辨率是相互矛盾的，因此需要选择合适的脉冲光，使动态范围和空间分辨率得到兼顾。

### 3.2.4 基于 BOTDR 的分布式光纤传感系统中，通过对散射回来的自发布里渊信号的频移进行检测，可以推出温度和应变的变化情况，因此温度和应变的测量精度其实就是对布里渊频移进行确定所能达到的准确程度<sup>[44]</sup>。在对布里渊频谱进行洛仑兹拟合时，将拟合曲线中心频率的标准差的两倍作为布里渊频移测量量的不确定度<sup>[45]</sup>，也称作系统最小可测量的布里渊频移变化量，记为 $\delta\nu_B$ 。根据布里渊频移的不确定度通过温度系数和应变系数反推出温度分辨率 $\delta T$ 和应变分辨率 $\delta\varepsilon$ ：

$$\delta T = \frac{\delta\nu_B}{C_{T,\nu}} \quad (3.8)$$

$$\delta\varepsilon = \frac{\delta\nu_B}{C_{\varepsilon,\nu}} \quad (3.9)$$

式中  $C_{T,\nu}$  为温度频移系数， $C_{\varepsilon,\nu}$  为应变频移系数，其中系统最小可测量的布里渊频移变化量  $\delta\nu_B$  又由信噪比和布里渊谱宽决定：

$$\delta\nu_B = \frac{\Delta\nu_{Be}}{\sqrt{2SNR_o}} = \frac{\Delta\nu_{Be}}{\sqrt{2SNR_e}^{1/4}} \quad (3.10)$$

式(3.10)中， $\Delta\nu_{Be}$  是实测布里渊增益谱的谱宽，它是自然布里渊增益谱谱宽（由声子寿命决定）和入射脉冲光谱宽的卷积，当脉冲光的脉宽远大于声子的寿命时，实测布里渊光谱的谱宽同自然布里渊增益谱谱宽基本一致，二者的峰值也基本相当。当入射脉冲光的脉宽减小并逐渐接近声子寿命时，相较于自然布里渊增益谱谱宽，实测布里渊增益谱会逐渐展宽，峰值功率也会随之减小，系统测量精确度也会随之降低。 $SNR_o$  和  $SNR_e$  分别为系统的光学信噪比和电学信噪比。显然，系统的测量精度会随着系统信噪比的增加而提高，此外电学信噪比  $SNR_e$  还同光电转换器的带宽相关，窄带宽的光电转换器有助于抑制系统的噪声，从而优化系统的测

量精度。

### 3.3 E5

本章分别介绍了基于直接检测和相干拍频检测的 BOTDR 分布式光纤传感系统，重点阐述了三种基于相干检测的 BOTDR 系统：微波外差结构、基于声光频移的自外差结构、基于电光频移的自外差结构。通过分析三种结构的实现方式，得出每种结构各自的优缺点并进行了对比。

对外差式系统的主要性能参数：系统信噪比、动态范围、空间分辨率、温度应变测量精度做了系统地介绍。针对每一个性能参数，分析各参量变化的影响，提出了对各性能参数进行优化的方案，为设计和调试系统打下理论基础。



## 4 0 Å BOTDR ,° < 9 E V U315 ,° AôAx ©Kd ¶ e.J0-

### 4.1 0 Å BOTDR ,° < 9 E V U315 ,°AôAx

本文采用基于相干检测的 BOTDR 分布式光纤传感系统来实现对外界温度场和应力场的测量。根据第三章对相干检测结构的介绍，本文设计的系统整体框架如图 4.1 所示。

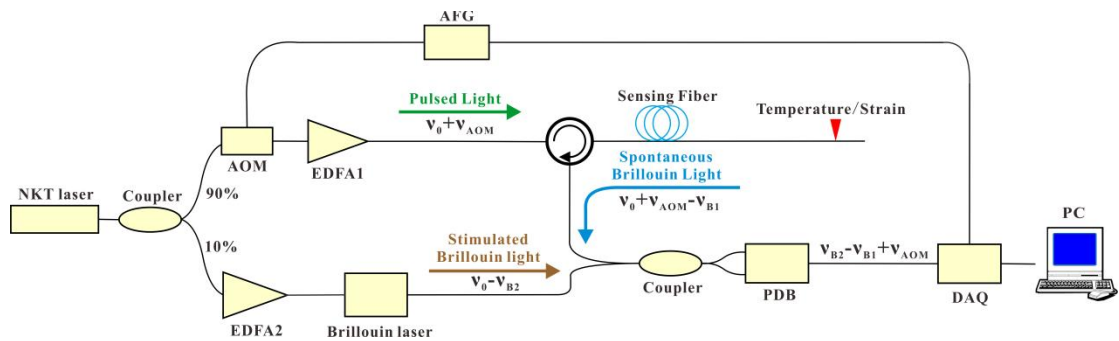


图 4.1 系统整体框架

Fig.4.1 Overall framework of the system

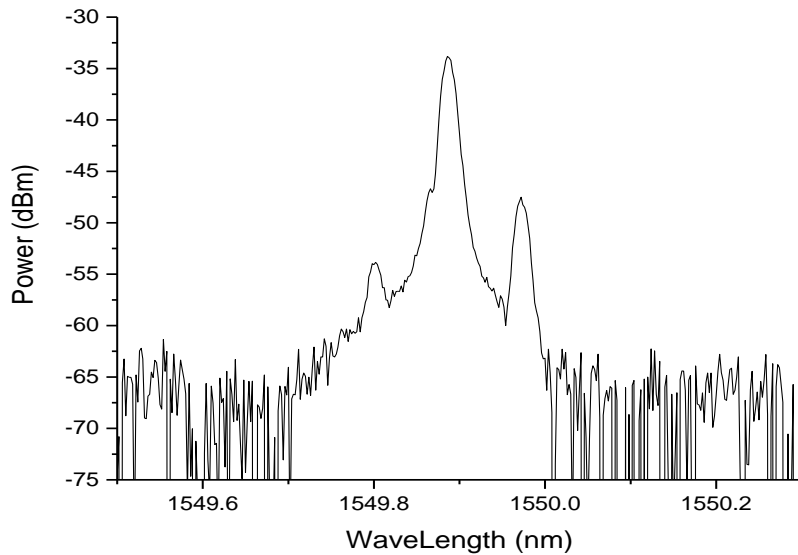


图 4.2 触发脉冲脉宽 300ns，幅值为 380mW 时，自发布里渊信号的功率为 17.78nW

Fig.4.2 The power of Brillouin signal is 17.78nW with trigger pulse width and amplitude of 300ns and 380mW respectively

系统光源采用波长为 1549.9nm 的窄线激光，设置输出功率为 12mW，频率为  $\nu_0$  的连续光。光源发出的光作为泵浦光经 9:1 的耦合器后分别进入上下两路，上路

为探测光路，采用声光调制器调制，泵浦光经过声光调制器（AOM）调制成脉冲光，由于 AOM 本身有一个固有频移，经调制后的脉冲光频率为  $\nu_0 + \nu_{AOM}$ 。AOM 由脉冲发生器 AFG 驱动，通过改变触发脉冲波的幅值和占空比，得到不同参数的调制脉冲光，可以直接影响上路自发布里渊信号的功率。调制脉冲光经过掺铒光纤放大器（EDFA）放大至 57mW 后再经过 FBG 滤波，经环形器进入 10km 的测试光纤，光在测试光纤传播过程中，后向散射回来的瑞利信号的频率  $\nu_0 + \nu_{AOM}$ ，斯托克斯光中自发散射布里渊信号的频率为  $\nu_0 + \nu_{AOM} - \nu_{B1}$ （ $\nu_{B1}$  是单模光纤 SMF 的布里渊频移），功率在几十 nW 量级，如图 4.2 所示。

下路为参考光路，泵浦光经过 EDFA2 后功率放大至 250mW 左右，进入布里渊激光器，得到频率为  $\nu_0 - \nu_{B2}$  的受激布里渊信号（ $\nu_{B2}$  为布里渊激光器中 1060nm 的 SMF 单模光纤引起的布里渊频移），该受激布里渊信号的功率 2mW 左右，如图 4.3 所示。

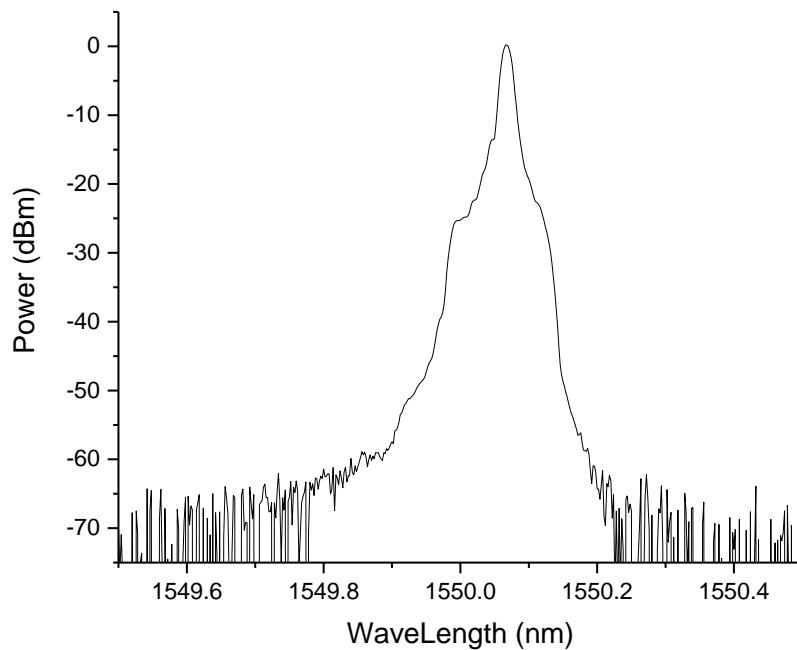


图 4.3 下路稳定的受激布里渊信号，功率为 0.25dBm，即 1.77mW

Fig.4.3 The power of the stable stimulated Brillouin signal at the drop port is 0.25dBm, 1.77mW

上路的自发布里渊信号和下路的受激布里渊信号经过双平衡光电探测器（PDB430C）进行拍频，得到两个频率信号  $\nu_{B2} + \nu_{AOM}$ （频率在 10~11GHz）， $\nu_{B2} - \nu_{B1} + \nu_{AOM}$ （频率在 350MHz 以内），本系统采用的 THORLABS 公司的光电探测器，带宽为 350MHz，因此高频信号  $\nu_{B2} + \nu_{AOM}$  被滤除，上下两路的布里渊差频信号  $\nu_{B2} - \nu_{B1} + \nu_{AOM}$  转换为电信号，由高速率数据采集卡，将信号采集保存下来，在

PC 端进行平均去噪，通过时频分析解调出传感相关的信号。

本文中采用的外差检测 BOTDR 分布式光纤传感系统的主要器件有：泵浦光源、声光调制器、掺铒光纤放大器、布里渊激光器、双平衡光电探测器、高速数据采集卡等。

## 4.2 种子光源

种子光源是整个系统的一个重要部分，不同中心波长的光在光纤传输过程中有不同的损耗和衰减，进而会影响散射回来的布里渊信号的强度和频率。由于自发布里渊散射的光功率十分微弱，为了提高系统的动态范围，应使散射回来的布里渊光的功率尽量达到最大。在普通单模石英光纤中，自发布里渊散射光的功率随着光源中心波长的增加而减小，但是由于光在 1550nm 窗口传输时光本身的损耗和衰减最小，综合考虑上述两方面，光源的中心波长应选在 1550nm 左右。

本系统中，上路系统的光学滤波器件 FBG 的中心波长为 1549.9nm（该 FBG 的中心波长本来为 1550nm，由于温度应变传感实验是在冬季进行，低温造成了该光学滤波器的中心波长偏移至 1549.9nm），当入射光波长为 1550nm 时，滤波器的旁瓣叠加在散射回来的斯托克斯分量上，造成散射光光谱失真，系统信噪比无法保证，如图 4.4。为求得最好的滤波效果，提高系统的信噪比，本实验采用中心波长为 1549.9nm 的泵浦光作为种子激光，解决了上述问题，如图 4.5。上路系统中自发布里渊信号的频移为 10~11GHz。

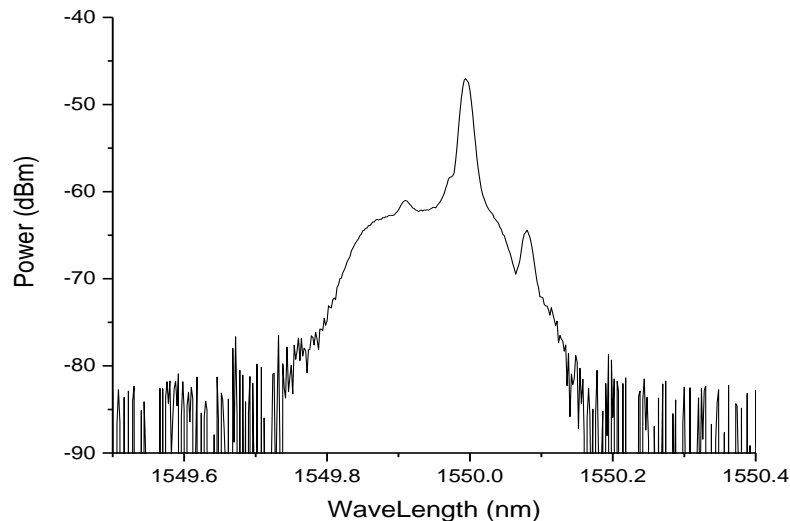


图 4.4 入射波长  $\lambda_0=1550\text{nm}$ ，散射信号光谱

Fig.4.4 Scattering signal spectrum when the incident wavelength is 1550nm

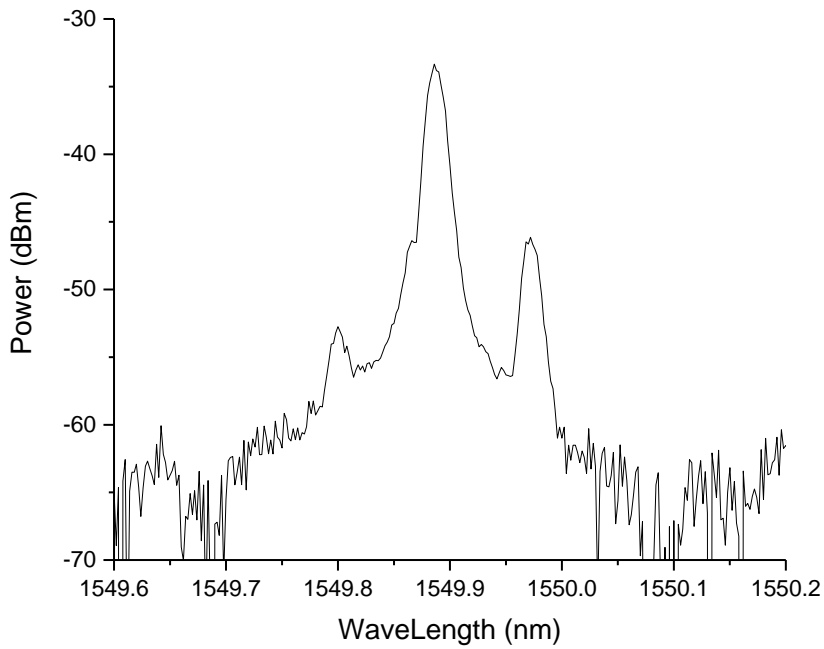


图 4.5 入射波长  $\lambda_0=1549.9\text{nm}$ ，散射信号光谱

Fig.4.5 Scattering signal spectrum when the incident wavelength is 1549.9nm

在章节 2.1.1 中介绍过，自发布里渊散射的峰值功率  $g_p$ ，不仅由入射光波长、光纤材料的折射率、纵向弹光系数等因素决定，而且光源的功率和线宽也会影响自发布里渊信号的强度，光源的功率越大，线宽越窄，散射回来的布里渊信号强度越强。此外，由于温度每升高一摄氏度，布里渊信号的频移改变 1.2MHz，为了使频移前后的布里渊频谱不发生重叠，如果要使测量精度为 1℃，那么种子光源的线宽至少为 1.2M。

本系统采用丹麦 NKT Photonics 公司生产的 SuperK 系列超连续谱白光光源，如图 4.6。输出波长范围为 500~2400nm，中心频率设为 1549.9nm，线宽为 200Hz，完全满足上述的线宽要求，如图 4.7。



图 4.6 本实验选用的窄线宽种子激光器

Fig.4.6 Narrow line-width seed laser

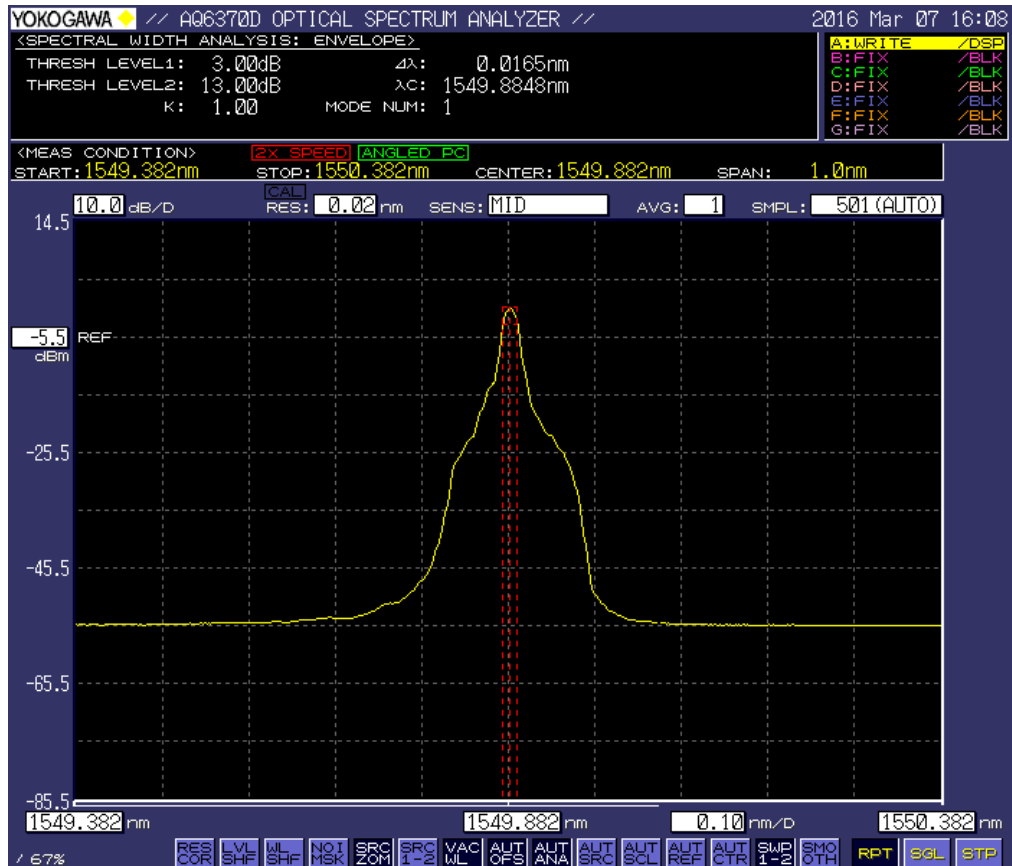


图 4.7 中心波长  $\lambda_c=1549.9\text{nm}$ ，输出功率为 5mW 时的波形

Fig.4.7 Output waveform when the center wavelength and the power are 1549.9nm and 5mW respectively.

### 4.3 声光调制器 AOM $\mu$

由于声波是一种弹性波，声波在光纤中传播产生的应变或应力会引起光纤密度的疏密交替，从而使光纤的折射率发生周期性变化，形成折射率光栅。当光在介质中传播时会产生衍射，衍射光的特性（如频率、强度、方向等）会受到超声场的影响。声光调制就是基于这种特性来实现的。采用声光调制器 AOM 来调制具有消光比高、工作稳定、光信号受偏振态的影响小等优点。

探测脉冲光的稳定性决定了整个系统的整体性能和测量精度，探测脉冲光的宽度直接决定了系统的空间分辨率，因此对泵浦光进行声光调制是整个上路系统的重要部分，其结构如图 4.8 所示。

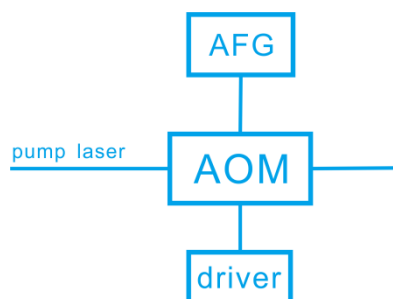


图 4.8 声光调制结构示意图

Fig.4.8 Schematic diagram of AOM



图 4.9 声光调制器

Fig.4.9 Acoustic optical modulator



图 4.10 AOM 的驱动器

Fig.4.10 Driver of AOM

本系统采用 Gooch&Housego 公司的 AOM 和射频驱动器(如图 4.9、4.10 所示), 美国 Tektronix 公司的 AFG3102 型函数发生器为 AOM 提供触发脉冲信号进行调制。AFG3102 型任意波形函数发生器可以产生最高频率为 100MHz, 最窄脉宽为 8ns 的脉冲信号。通过改变 AFG3102 产生的脉冲的幅值和占空比, 可以调制 AOM 产生出不同功率, 脉宽以及重复频率的光脉冲。

入射光经过 AOM 调制后, 其功率的损耗随着调制电压的不同而不同, AOM 的调制输入端口的调制电压范围为 0-1V, 随着调制电压的增大, AOM 的插入损耗会降低, 在调制电压为 1V 时, AOM 的插入损耗会降至 3dB 左右, 如图 4.11 所示。因此在保证系统其它性能参数和器件可承受范围的条件下, 应尽量采用较高的调制电压。

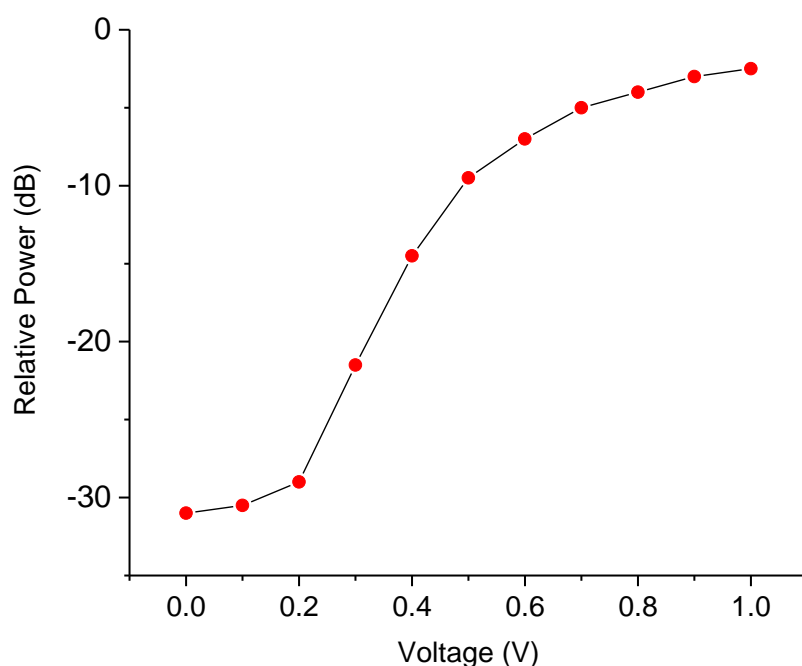


图 4.11 AOM 的插入损耗和调制电压的关系

Fig.4.11 Relationship between the modulation voltage and the insertion loss of AOM

本系统分别用 23.1V 的电压和波形发生器产生的脉冲作为功率驱动和触发脉冲。根据公式(4.1):

$$L = \tau c / 2n \quad (4.1)$$

其中  $L$  为传感光纤的长度,  $c$  为真空中的光速,  $n$  为光纤折射率,  $\tau$  为光脉冲在光纤中传播一个来回的时间。为了避免两个光脉冲之间相互干扰, 经 AOM 调制产生的调制脉冲的周期应大于  $\tau$ , 即让一个光脉冲在传感光纤中走完一个来回后再发出下一个脉冲。

#### 4.3.1 实验结果及讨论

本文上路采用 10km 长的测试光纤, 根据式(4.1)求出光脉冲在测试光纤中传播一个来回需要的时间  $\tau$  为 0.1ms, 因此经 AOM 调制产生的调制脉冲的周期应大于 0.1ms, 即频率小于 10KHz, 将波形发生器 (AFG) 产生的驱动脉冲的频率设置为 8kHz。当种子光波长为 1549.9nm, 驱动脉冲宽度设为 300ns, 即空间分辨率为 30m 时, 设置不同幅值的调制电压: 340mV, 350mV, 360mV, 370mV, 380mV, 390mV, 400mV, 观测不同调制电压下的后向散射光的光谱。上述七种调制电压对应的自发布里渊散射的斯托克斯光的功率分别为 -53dBm, -51.5dBm, -50.5dBm, -49.1dBm, -47.5dBm, -46dBm, -44dBm, 可见随着调制电压的增加, 自发布里渊散射信号的功率呈上升趋势, 如图 4.12。

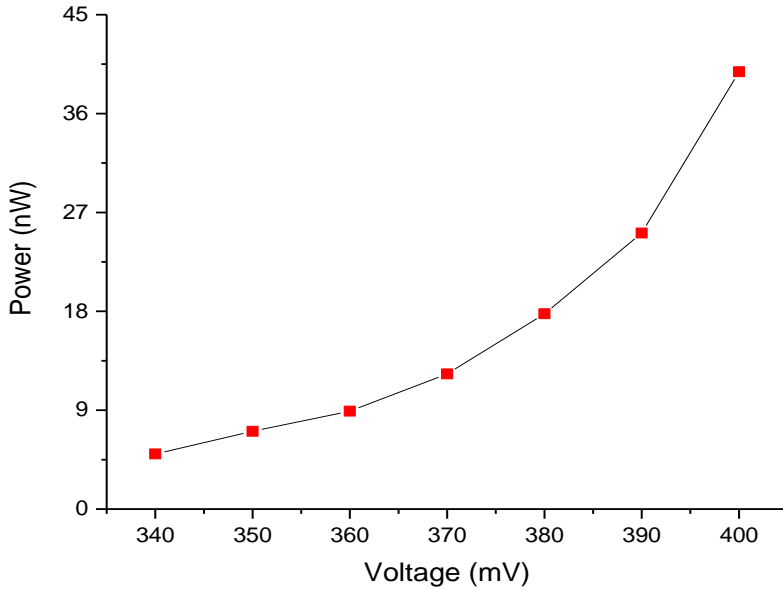


图 4.12 布里渊信号的光强同调制电压的关系

Fig.4.12 Relationship between the modulation voltage and the power of Brillouin signal

由第二章的内容可知，自发布里渊信号的功率越强，在传感光纤中传输的有效距离就越远，系统的空间范围就越大。为了获得较大的空间测量范围，应尽可能提高调制脉冲的幅值。但是，通过对比调制电压为 340mV~400mV 时的波形，如图 4.13，我们可以看出当调制电平为 390mV 和 400mV 时，距中心波长 0.35 ~ 0.4nm 的两侧出现了两个新的频率分量，并且随着调制电压的进一步增加，这两个分量的功率会进一步增强，即产生了非线性效应。

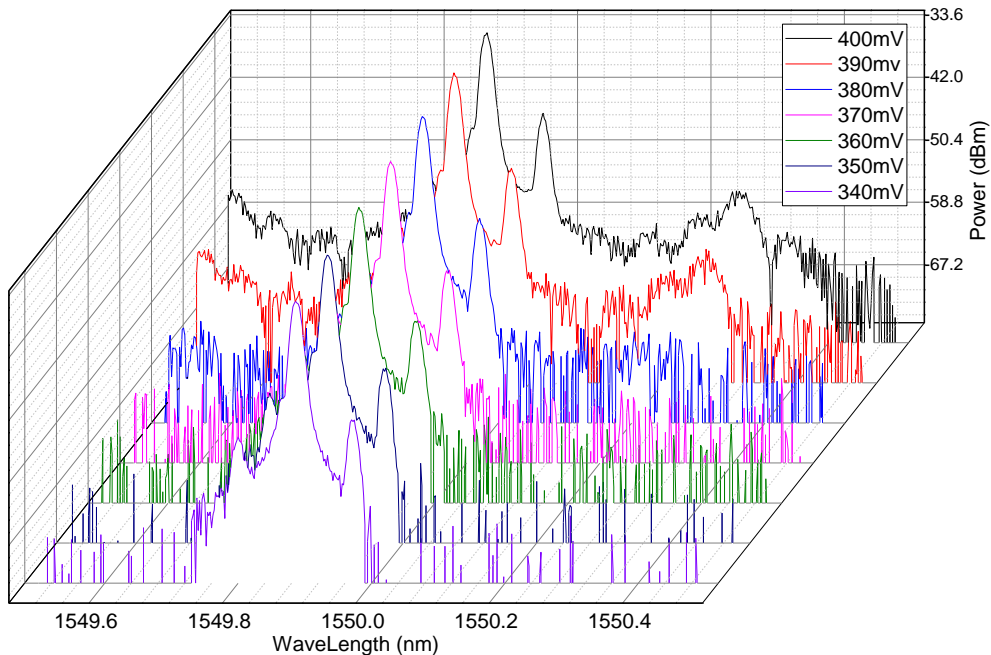


图 4.13 340~400mV 范围内后向散射光谱的对比

Fig.4.13 Comparison of backscattering spectra in the range of 340~400mV



非线性效应是指强光作用下由于介质的非线性极化而产生的效应，包括倍频，光学谐波、受激拉曼散射（SRS）、受激布里渊散射（SBS）、双光子吸收、自散焦、自聚焦等。自发布里渊散射是一个非线性过程，光在光线中传输的过程中，光纤不同位置的自发布里渊信号具有不同的偏振态，这种随机的偏振态直接表现为大量的幅度噪声，光纤中的色散和非线性效应也会对信号产生影响，引入一定的相位噪声，该非线性过程直接影响系统的信噪比（SNR）。

本文中随着调制电压的逐步增大，导致脉冲光的峰值逐步增大，高功率的脉冲光在传输过程中产生了非线性效应。这种非线性效应表现为在散射光谱中出现了新的频率分量，该新增的频率分量的功率会随着调制电平的增加而升高，即非线性效应增强。这种非线性效应会消耗入射光的能量，随着入射光能量的增强，使本应分配给瑞利和布里渊信号的能量被新增频率的分量吸收，使系统的信噪比降低，继而影响系统的测量精度和动态范围。

通过实验发现，当调制电压从 340mV 升至 400mV 的过程中，在 380mV 时散射布里渊光的功率较高，非线性效应也可以得到较好抑制，如图 4.14。

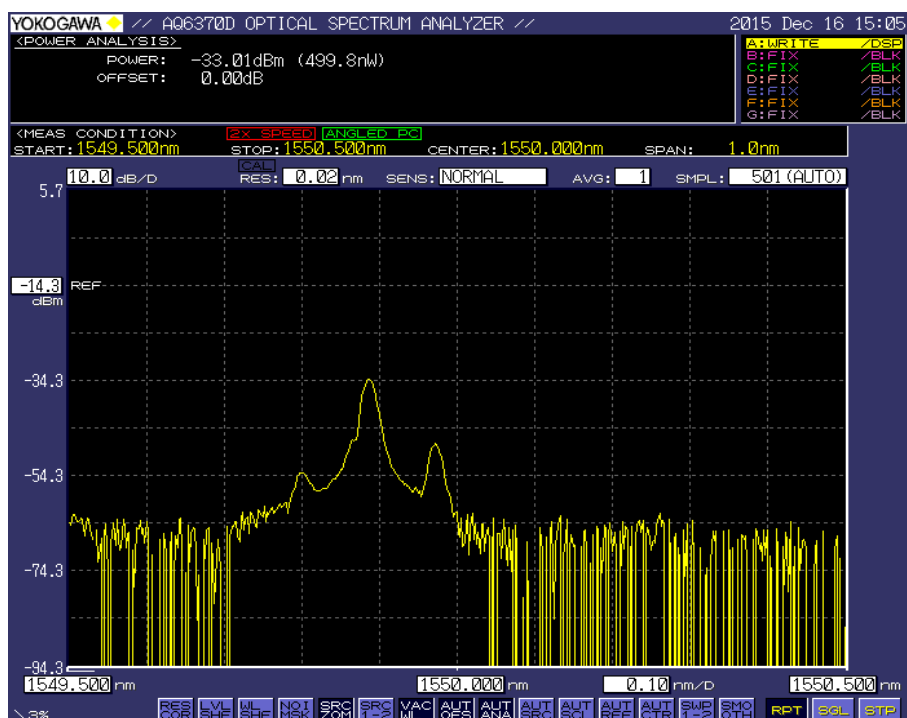


图 4.14 调制电平为 380mV 时的散射光谱

Fig.4.14 Scattering spectrum when the modulation voltage is 380mV

### 4.3.2 BOTDR 分布式光纤传感系统的空间分辨率是该系统能识别的传感光纤上最

BOTDR 分布式光纤传感系统的空间分辨率是该系统能识别的传感光纤上最

短长度上的温度或应变情况。影响 BOTDR 系统空间分辨率的主要因素在上一章已做过详细介绍，本文实验中系统的空间分辨率主要由调制脉冲的宽度决定。根据公式  $s = \tau c / 2n$ ，随着脉冲宽度随着  $\tau$  值的增大，系统的空间分辨率逐渐降低。在调制电平为 380mV 的条件下，重复频率为 8kHz 的条件下，分别取  $\tau$  值为 100ns, 200ns, 300ns, 400ns, 500ns, 600ns，对应的空间分辨率分别为 10-60m，其散射光光谱如图 4.15 所示。

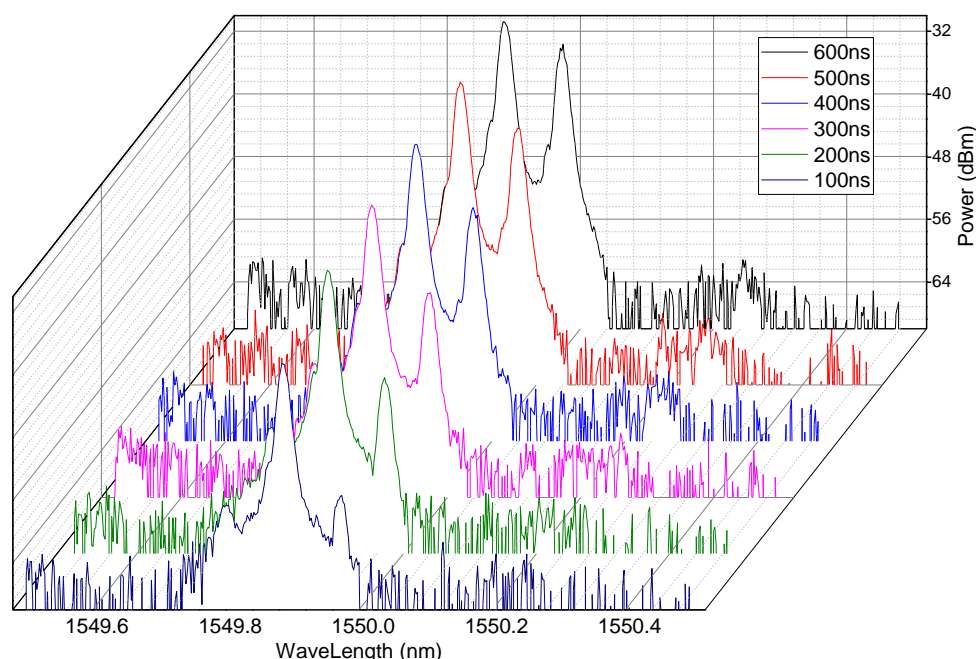


图 4.15 100~600ns 范围内后向散射光光谱的对比

Fig.4.15 Comparison of backscattering spectra in the range of 100~600ns

由于上路自发布里渊信号的功率 (nW 级) 远小于下路受激布里渊信号的功率，为了提高拍频信号信噪比，提高系统的动态范围，应尽量提高上路信号的功率。从图 4.15 中可以看出，随着调制脉冲的脉宽从 100ns 增加至 600ns，上路中自发布里渊信号的功率逐渐增强。当调制脉冲的脉宽为 300ns 时，从图中可以看出有出现非线性效应的趋势（即有出现新的频率分量的趋势）。当脉宽为 400ns 时，在光谱中，距中心波长 0.35 ~ 0.4nm 的两侧（图中左侧未予显示）出现了两个新的频率分量，随着脉宽的进一步增大，新增的频率分量的功率也逐渐增强，即非线性效应增强。

可见如果调制脉宽变宽，势必会引起调制脉冲的功率增大，不仅使系统的空间分辨率下降，过高的调制脉冲功率会引起上路散射光谱出现非线性效应，导致散射信号的前端重复性降低，同时在后端出现对比度下降的现象；也就是说上路

散射光的能量集中在传感光纤的前端，光纤后端能量微弱，影响系统的性能。

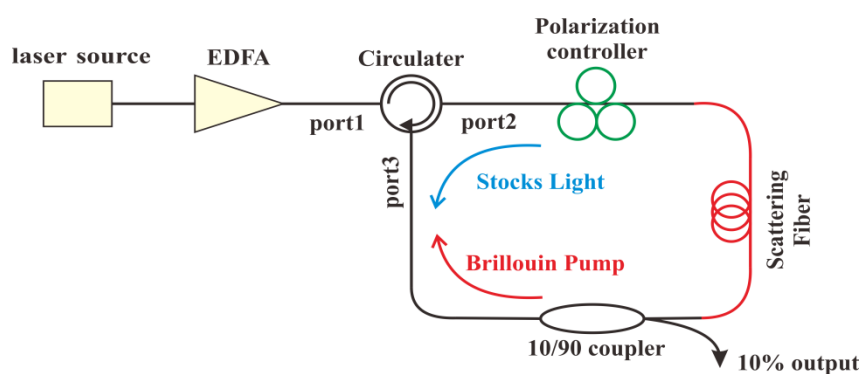
通过上述脉冲调制实验可以得出，随着调制脉冲脉宽和幅值的增加，都会引起调制脉冲整体功率的增加，导致两个结果：自发布里渊信号功率增强，出现非线性效应。但是对非线性效应而言，增加脉冲幅值产生的效果更加明显，对提升自发布里渊信号的功率而言，增加脉冲宽度产生的效果更加明显。这是由于增加脉冲幅值，调制脉冲的峰值功率会显著增大，而总功率的增加并不明显，而峰值功率过高是产生非线性效应的主要因素。增加脉冲脉宽会导致总功率显著增加，而这是造成布里渊信号受激的主要原因，也就体现在布里渊信号功率迅速增加。

综合考虑系统的动态范围、空间分辨率、信噪比等因素，应在保证系统信噪比的条件下，尽可能选择较小的调制脉冲宽度，获得良好的空间分辨率，以及避免出现非线性效应。综合以上数据，决定选择电压为 380mV，脉宽为 300ns 的调制脉冲信号。

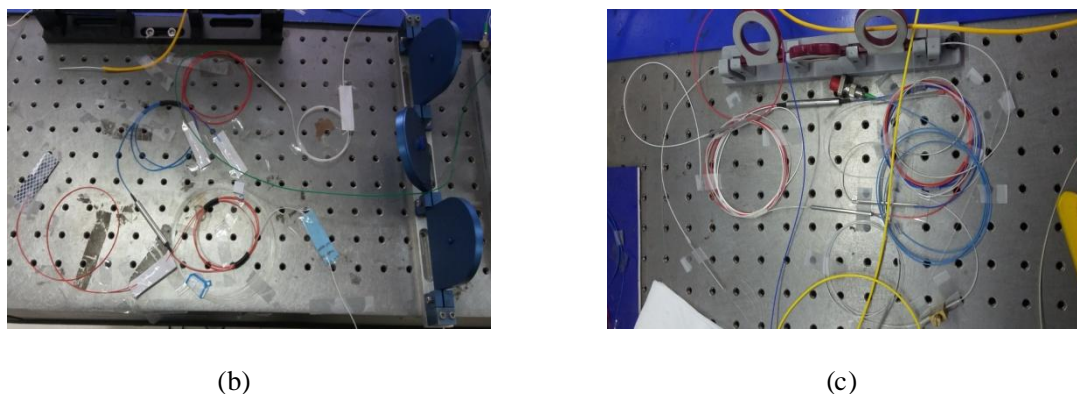
#### 4.4 布里渊激光器

布里渊激光器（BFL）具有极窄的线宽、极低的阈值功率、波长间隔稳定以及功率稳定等特点<sup>[46]</sup>，广泛应用于光纤传感<sup>[47]</sup>、光谱分析<sup>[48]</sup>、密集波分复用等领域<sup>[49]</sup>。

为了进一步了解布里渊激光器的结构以及工作原理，进而设计出参数指标满足系统需求的 BFL。本文分别用 20m 长飞单模光纤和 100m 1060nm 波长的 SMF 光纤搭建了两台布里渊激光器，并分别从受激布里渊散射（SBS）阈值及带宽、自由频谱宽（FSR）、布里渊线宽、和布里渊频率稳定性四方面进行对比分析。两种布里渊激光器的结构如图 4.16 所示。



(a)



4.16(a) 基于环行器的布里渊光纤激光器结构模型 (b) 20m 腔长布里渊激光器 (c) 100m 腔长布里渊激光器

Fig.4.16 (a) Structure model of Brillouin fiber laser based on circulator (b)20m cavity length Brillouin laser (c)100m cavity length Brillouin laser

#### 4.4.1 SBS $L > r \hat{\Delta} \setminus \acute{o}$

布里渊激光器的阈值定义为斯托克斯光强呈指数增长时输入的泵浦光的功率值，也就是开始产生受激布里渊信号时泵浦光的功率。该阈值受布里渊增益的相关特性<sup>[50]</sup>如布里渊腔长<sup>[51]</sup>等因素的影响。就光纤谐振腔的腔长而言，腔长越长，阈值越低，因此可以通过增加谐振腔光纤的长度来获得低阈值的布里渊激光器。另一个影响阈值的因素是斯托克斯光的偏振特性，通过调节结构中的光纤偏振器（PC），使泵浦光和斯托克斯光达到同一偏振态，可以在输入光一定的条件下获得最大的布里渊增益。经测量，20m 长飞单模光纤（HNF）和 100m 1060nm SMF 光纤两个激光器的阈值分别为 1.052mW 和 0.883mW。

自发布里渊散射的带宽较宽，一般为几十 MHz<sup>[52]</sup>，受激布里渊光的带宽很窄，一般在 10MHz 以下<sup>[53]</sup>，并随着腔长的减小逐渐降低直至趋于稳定<sup>[54,55]</sup>。对于布里渊激光器，随着入射光功率的增加，激光器产生的布里渊光的带宽会经历一个先减小达到稳定然后增大的过程。这是因为一开始布里渊散射光还尚未达到完全受激的状态，随着泵浦光功率的加大，布里渊光完全受激，带宽减小。继续增大泵浦光，受激布里渊处于一个稳定的状态，如果继续增加泵浦功率，受激布里渊光中的噪声就会明显增大，这就增大了信号的带宽。为了获得窄带宽的布里渊激光器，就应该选择合适的泵浦光功率和较小的腔长。本文设计的两种布里渊激光器的带宽都在 5MHz 左右，20mHNF 腔的布里渊激光器的腔长较 100m 的短，因此它的带宽也更窄一些。选用 NKT 窄线宽激光器作为种子光源泵浦，20mHNF 激光器产生的布里渊光和泵浦光的谱线如图 4.17 所示，从图中可以看出，布里渊信号具有良好的带宽。

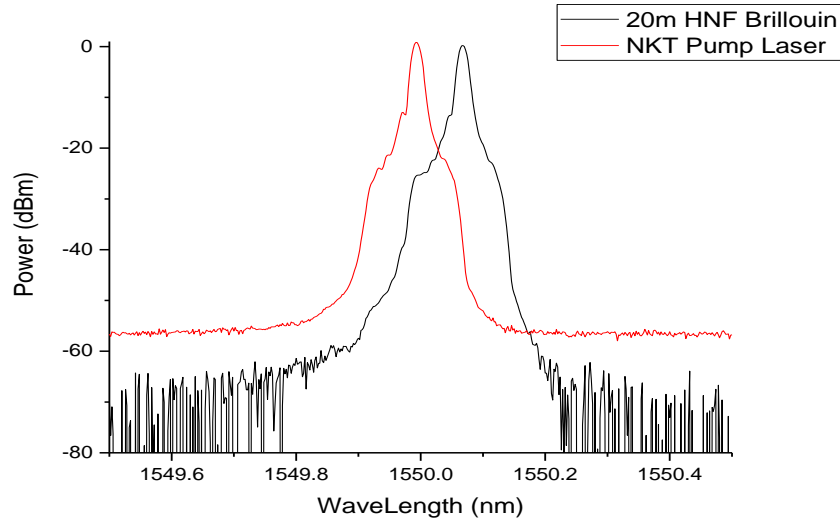


图 4.17 泵浦光和腔长 20m 的布里渊激光器的信号光谱对比

Fig.4.17 Spectrum comparison between pump signal and Brillouin signal

#### 4.4.2 自由频谱宽和 FSR

自由频谱宽是激光器的重要参数，它是两个纵模之间的间隔<sup>[56,57,58]</sup>，如图 4.18 所示。FSR 主要由光纤腔长和光纤材料决定，计算公式为：

$$\text{FSR} = \frac{c}{L \cdot n} \quad (4.2)$$

其中  $n$  为谐振腔光纤的折射率， $L$  为谐振腔光纤的长度， $c$  为真空中光速。

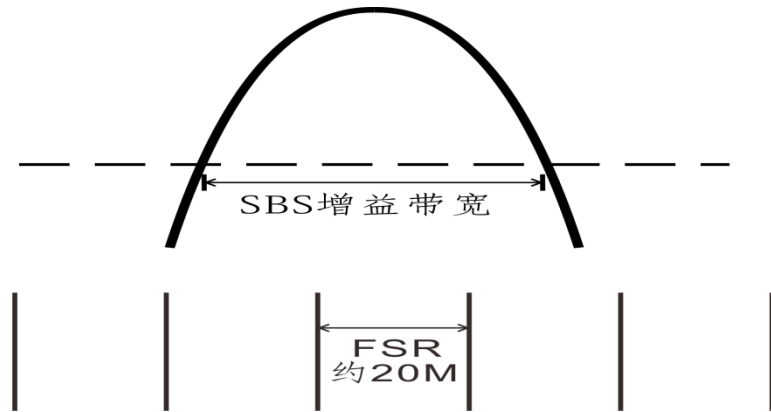
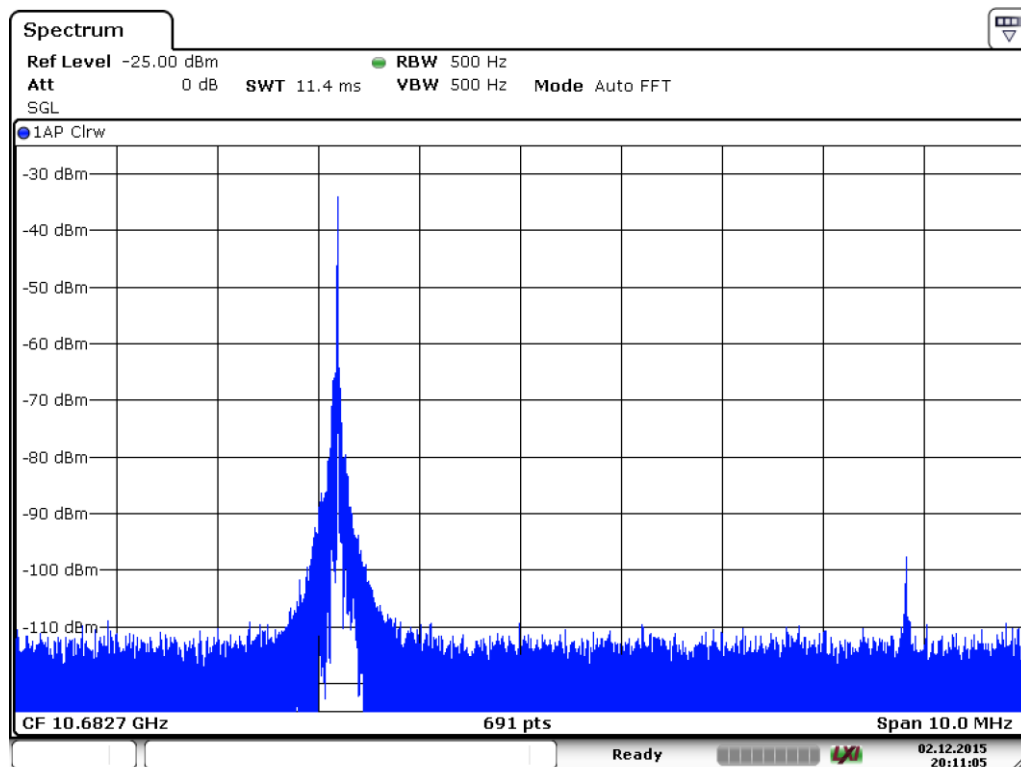


图 4.18 布里渊信号的增益带宽和自由频谱宽 (FSR)

Fig.4.18 Gain bandwidth and free spectral range of Brillouin signal

如果光纤中 SBS 的增益带宽约为 10MHz 左右，因此当谐振腔的长度大于 20m 时，其增益带宽会同时存在多个纵模，为了实现稳定的单纵模输出，FSR 应大于 SBS 的增益带宽。本文搭建的腔长分别为 20m 长飞光纤和 100mSMF 光纤的布里渊激光器，经测量其增益带宽均在 5MHz 左右，对于 5MHz 的增益谱，为了实现

稳定的单纵模输出，理论上布里渊激光器的腔长不应超过 40m，显然腔长为 100mSMF 的激光器无法完全实现单纵模输出，可以通过调节系统中的偏振片等措施，加强边模抑制比，以实现接近单纵模输出的状态。



Date: 2.DEC.2015 20:11:05

图 4.19 20m 腔长激光器的 FSR 约为 6MHz

Fig.4.19 ~ 6MHz laser's FSR for the 20m cavity length

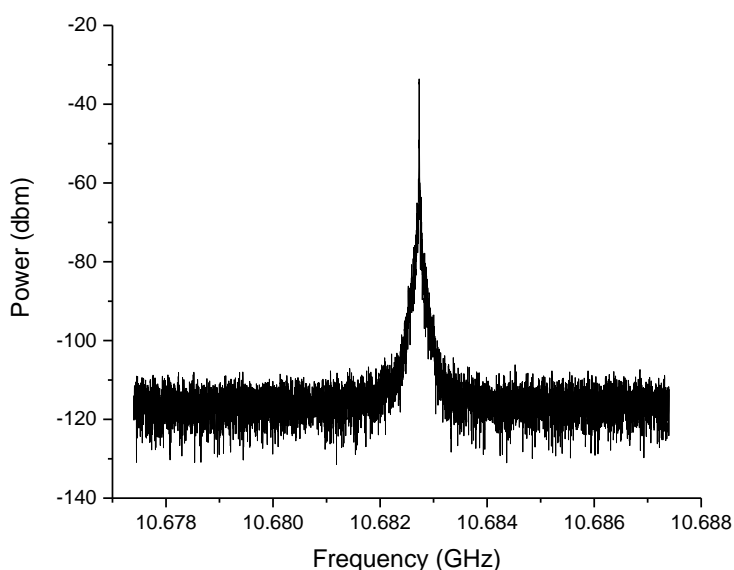


图 4.20 20m 腔长激光器稳定的单纵模输出

Fig.4.20 Stable single longitudinal mode output from the 20m cavity length laser

本文中泵浦光经 10:90 的环行器后,10% 的一路经过 EDFA 放大至 249mW 输入到 20m 腔长的激光器,输出的受激布里渊信号和 90%的那一路泵浦光拍频,经高频探测器接入到频谱仪上观察,如图 4.19 所示。频谱仪的分辨率设为 500Hz, Span 为 10MHz,图中主模和边模之间相隔 6MHz,即 FSR 为 6MHz 左右。调节偏振片 PD 和衰减器,使激光器产生稳定的单纵模输出,中心频率为 10.6824GHz,如图 4.20 所示。

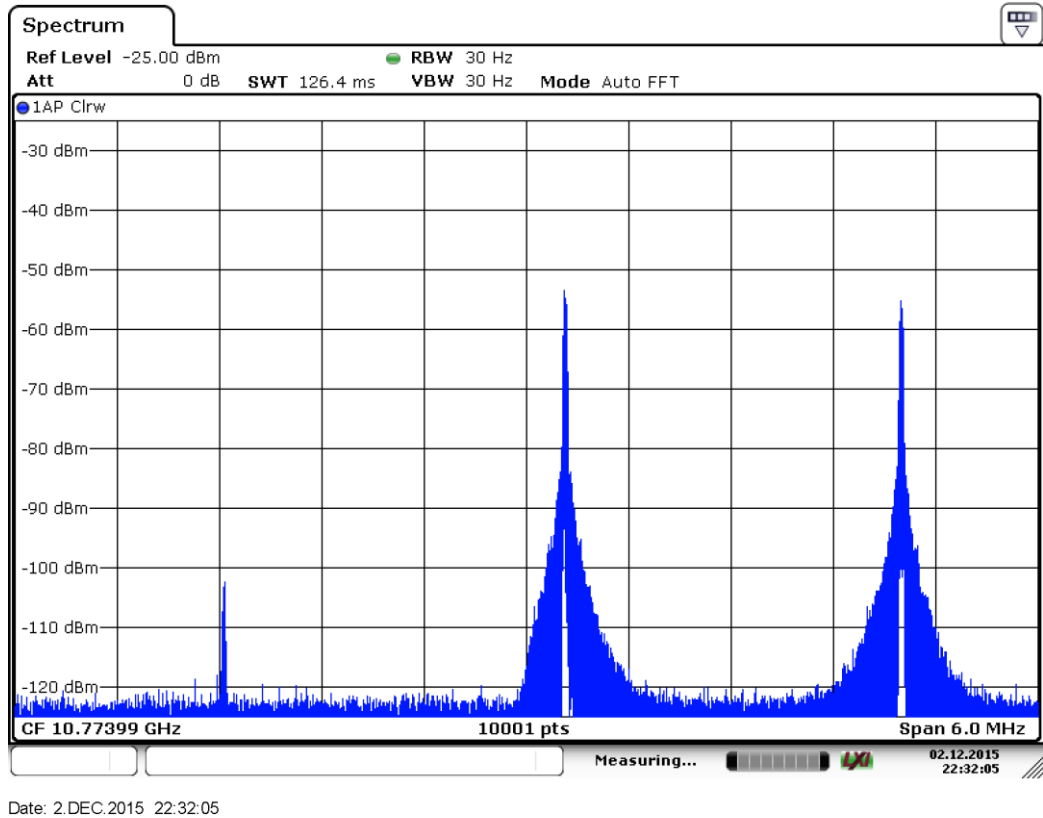


图 4.21 100m 腔长激光器的 FSR 约为 2MHz

Fig.4.21 ~ 2MHz FSR for the 100m cavity length

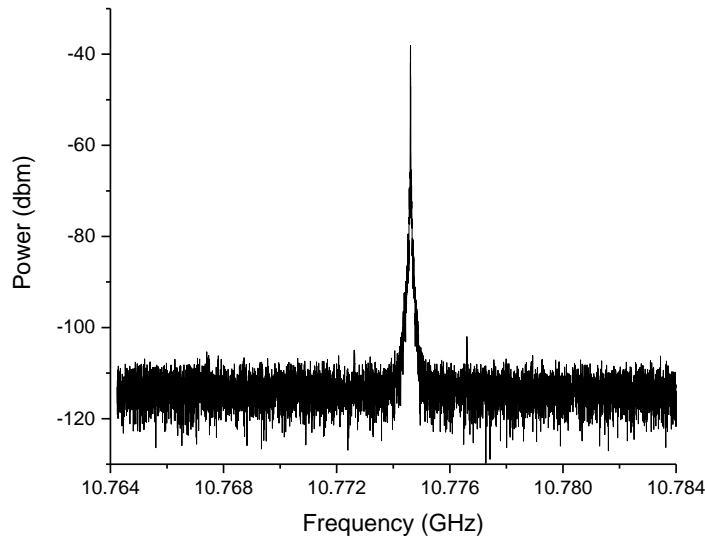


图 4.22 100m 腔长激光器的输出，SMSR 约为 110dB

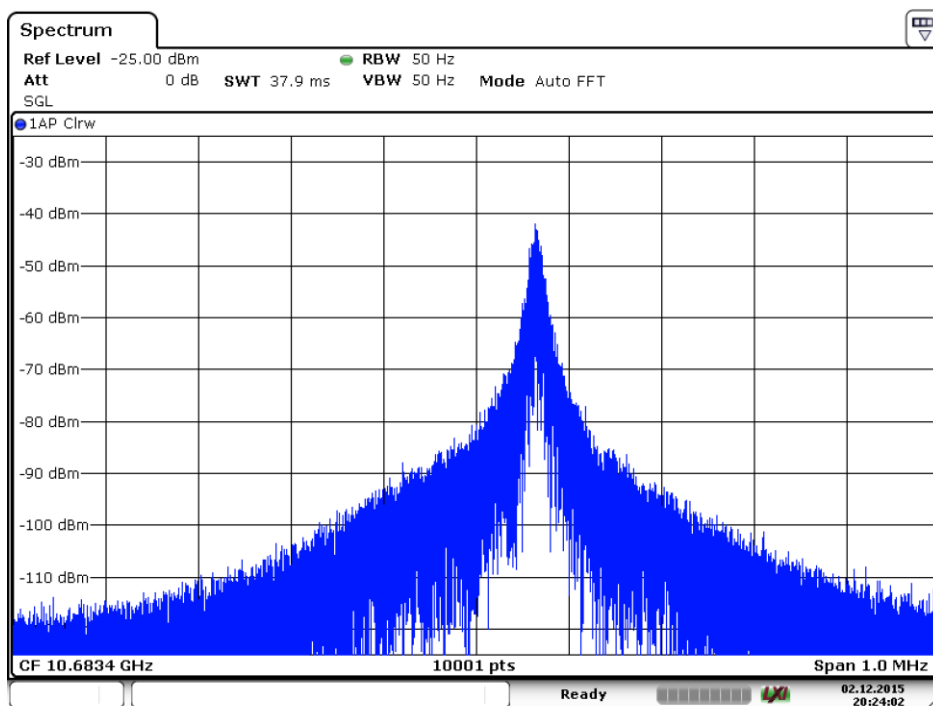
Fig.4.22 ~ 110dB SMSR for the 100m cavity length laser

同样的，100 米腔长的激光器输出信号和 90% 一路泵浦光拍频后，在频谱仪上的波形如图 4.21 所示，分辨率为 30Hz，Span 为 6MHz，FSR 从图中可看出为 2MHz 左右。调节偏振片 PD 和衰减器，减小边模强度，虽然没有达到完全的单纵模输出，但是已将边模抑制比升（SMSR）至 110dB，中心频率为 10.77424GHz，如图 4.22 所示。对比发现，腔长  $L$  越长，布里渊激光器的自由频谱宽 FSR 越小，符合公式 (4.2)。

#### 4.4.3 4.4.3 4.4.3 4.4.3

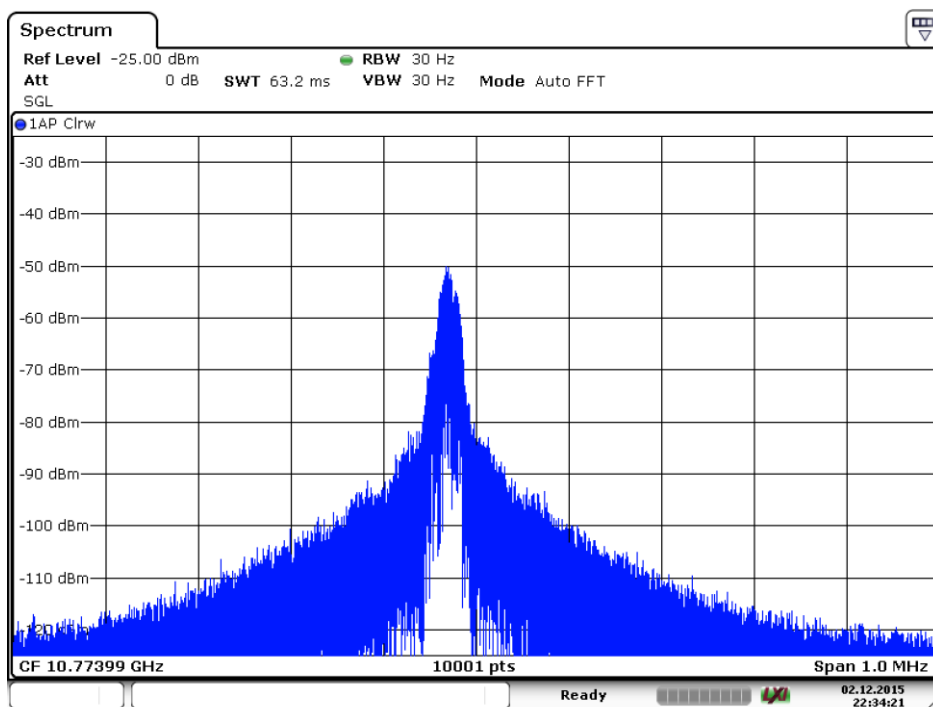
总体说来，布里渊激光器的线宽受输入光线宽的影响（理论上为泵浦光线宽的百分之一），也和腔长有关<sup>[58]</sup>。随着腔长的减小，布里渊激光器的线宽也逐渐减小。本文中 20m 腔长和 100m 腔长的布里渊激光器同泵浦光拍频后得到的信号的 3dB 线宽分别为 17.53kHz 和 17.78kHz，如图 4.23 所示。由于泵浦光的参数是固定不变的，拍频后信号的线宽越窄，说明布里渊激光器产生的布里渊信号的线宽越窄。本实验中 20m 腔长的布里渊激光器线宽指标更优，其产生的布里渊信号的线宽同泵浦光线宽很接近，均为 200Hz 左右，如图 4.24 所示。





Date: 2.DEC.2015 20:24:02

(a)



Date: 2.DEC.2015 22:34:21

图 4.23 (a) 20m 腔长线宽 17.53kHz (b) 100m 腔长线宽 17.78kHz

Fig.4.23 (a) 17.53kHz line-width for the 20m cavity length laser (b) 17.78kHz line-width for the 100m cavity length laser

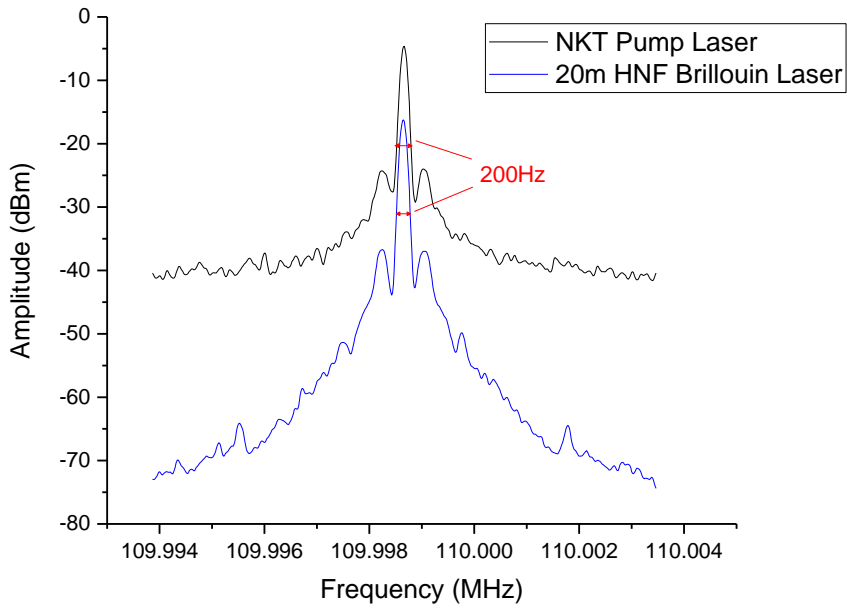


图 4.24 泵浦光经 20m 腔长布里渊激光器前后的线宽

Fig.4.24 The linewidth of laser source(black line) through the Brillouin laser (blue line)

良好的布里渊激光器频漂应该控制在一个极小的范围，即具有一个稳定的输出频率，而输出信号的频率稳定性主要由三个因素影响：频率牵引效应（FPE）、Kerr 效应和热效应。当布里渊激光器处于稳定的振荡状态时（即布里渊增益等于损耗），FPE 效应会使布里渊激光器的振荡范围缩小，如图 4.25 所示。Kerr 效应和热效应分别表示泵浦光功率和外界温度的变化会引起布里渊频移的变化。实现布里渊激光器的稳定主要通过将激光器的频率同谐振腔的频率相匹配，一般通过两种方式实现，一种是用来稳定激光器输出频率，另一种用来稳定谐振腔腔长以匹配谐振腔频率与激光器频率。实验中 20m 腔长的激光器的频漂范围在  $\pm 4\text{MHz}$ ，100m 腔长的激光器的频漂范围在  $\pm 6\text{MHz}$ 。

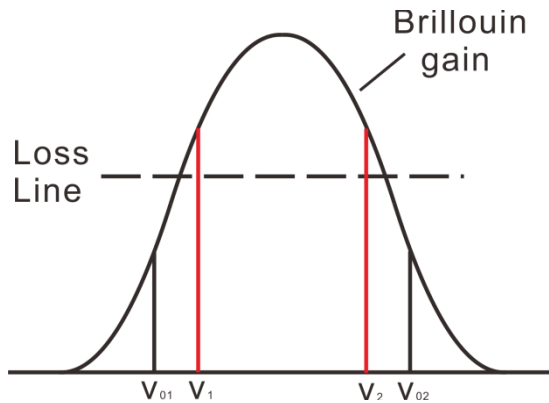


图 4.25 FPE 效应，振荡频率由  $V_{01}\sim V_{02}$  减小为  $V_1\sim V_2$

Fig.4.25 FPE effect, and the oscillation frequency decreases from  $V_{01}\sim V_{02}$  to  $V_1\sim V_2$

通过以上分析初步得出，激光器的腔长越长，阈值功率越低；腔长越短，激光器的线宽越窄，同时也越容易实现稳定的单纵模输出。综合考虑阈值功率、线宽宽度、频率稳定度等因素，本文选择 20m 腔长的布里渊激光器产生的激光作为下路的拍频信号。该激光器的阈值功率为 1.052mW，线宽为 17.53kHz，输出频率为  $10.6824\text{GHz}\pm 6\text{MHz}$ 。

## 4.5 掺铒光纤放大器

本文中上路种子激光经 AOM 调制过后，再进入测试光纤之前，需要经过 EDFA 将功率放大至一个合适的水平以保证从测试光纤中散射回来的斯托克斯信号的强度。掺铒光纤放大器（EDFA）的增益媒介是铒离子，通过给光纤纤芯中加入铒离子，对光信号使用泵浦光进行直接放大。

### 4.5.1 EDFA 的搭建

构成掺铒光纤放大器的核心器件主要有掺铒光纤、泵浦源、波分复用器和光隔离器。本文中搭建的 EDFA 如图 4.26 所示。

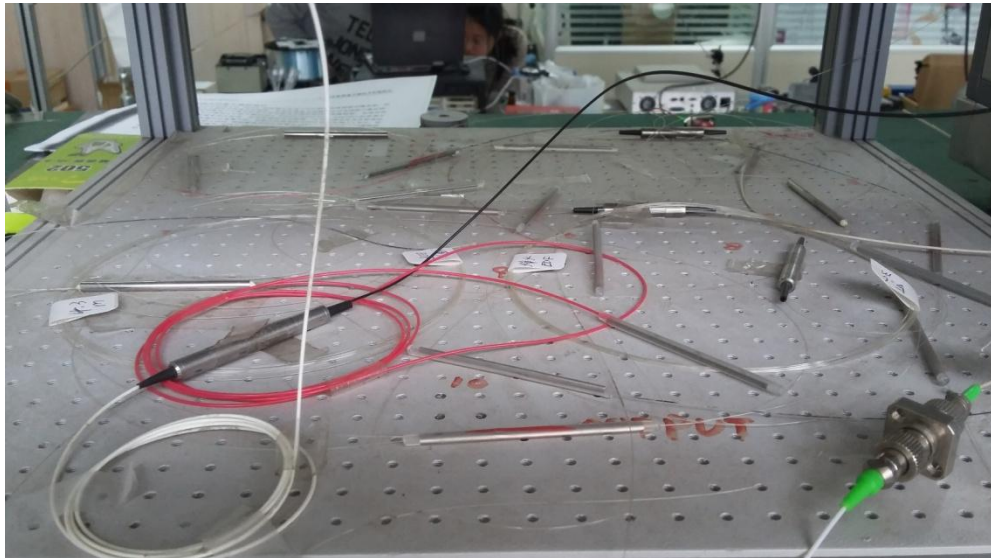


图 4.26 掺铒光纤放大器

Fig.4.26 The erbium-doped Fiber Amplifier

掺铒光纤的放大特性能够实现对光信号的放大功能，通过改变放大器中掺铒光纤的参数，如光纤纤芯的尺寸结构、纤芯中铒离子的掺杂浓度、光纤长度等，可以实现对 EDFA 放大增益的调节。

泵浦源应具备长时间、大功率，能够在多个波长有效激励掺铒光纤等特性。本实验采用的是 980nm 波长的泵浦，具有低噪声、高增益系数和输出功率等优点，

能够与 EDFA 的带宽相匹配。

波分复用(WDM)是一种光纤传输技术,把不同波长的光信号复用到一根光纤中进行传送<sup>[59,60]</sup>。在 EDFA 中波分复用的功能是将信号光和泵浦光复合在一起,干涉滤波器是 EDFA 中比较常用的 WDM 器件,它具有信号频带平坦,与极化无关,低插入损耗等优点。

光隔离器是为了减弱光路中的反射,进而降低系统工作的噪声,提高系统的信噪比。光隔离器需要分别加在系统的输入端和输出端。

#### 4.5.2 EDFA 的同向泵浦

光放大器的泵浦方式有同向泵浦、反向泵浦、双向泵浦,同等条件下放大倍数从低到高依次是同向、反向和双向。在未饱和状态,三种模式的噪声系数从小到大依次为同向、双向和反向。由于双向泵浦方式需要另增一泵浦源,从节约成本等各方面考虑,本文选择同向泵浦。本实验中搭建的 EDFA 结构如图 4.26 所示。采用 980nm 的泵浦源,通过 980nm/1550nm 的 WDM 将种子光和泵浦光复用,两个 WDM 之间的隔离器可以滤掉前向传输的自发辐射噪声,本结构采用两段掺铒光纤的两级放大模式,可以获得更高的放大功率和更低的噪声系数,各器件之间通过熔接的方式连接,避免进一步引入插入损耗。同时为了保证上路散射布里渊信号的线宽以及频率稳定性,入射光经过该 EDFA 放大后线宽不能发生较大展宽。经过测试,我们将种子激光器产生的 200Hz 线宽的光经该 EDFA 放大后,发现线宽为 210Hz,几乎不会对入射光的线宽进行展宽,符合系统要求。

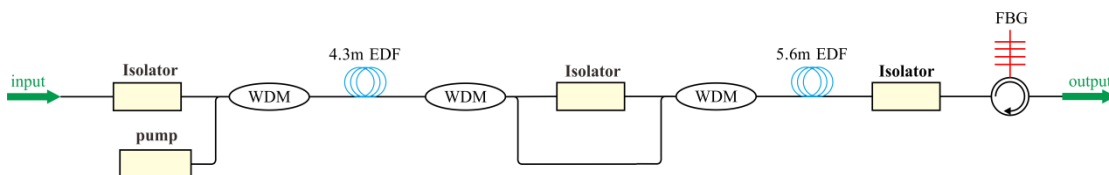


图 4.27 同向泵浦两级放大的结构框图

Fig.4.27 Schematic diagram of two-stage pre-pump EDFA

## 4.6 E5

本章介绍了实验搭建的传感系统,并对构成系统的主要器件进行了研究。光源采用窄线宽激光器。上路的 EDFA 采用自己搭建的掺铒光纤放大器。通过对声光调制器进行实验分析,认为当调制脉冲光的脉宽或幅值过高时,会引起脉冲光功率过高,导致上路的自发布里渊散射产生非线性效应,使散射光集中在光纤前端,后端能量不足,从而影响系统的动态范围和测量精度。通过对搭建的两种不同腔长的布里渊激光器的分析比较,得出腔长同激光器阈值、激光器线宽、激光器纵模间隔等参量的关系。实现了 20m 腔长的布里渊激光器单纵模窄线宽稳定输出,降低了激光器的频率稳定度,为提高系统的温度应力测量精度作保障。

## 5 0 Ä BOTDR < 9 E V U315 ,°\$ \_ Ü Â Ê ÔPÂ < Æ

根据上一章节对分布式传感系统整体的介绍以及对各主要模块的测试以及分析,本章节将着重分析调制脉冲的实验方法,并基于此方法进行温度和应变的传感实验。此外本章还对实验采用的数字累加平均去噪算法和信号的提取及拟合算法进行简要介绍,并通过以上算法实现温度和应变传感实验的数据解调。

### 5.1 315 ,° - < Æ : \* < # w0A

本实验系统中,上下两路布里渊光经过光电探测器(PD)拍频处理后,将光信号转化为电信号,同时信号的频率也由11GHz左右降为1GHz左右的低频信号,然后用高速数据采集卡对模拟电信号进行模电转换,采集处理。

#### 5.1.1 !•3e Ö © }1Í#

系统上下两路的信号均伴随着大量的噪声,尤其是实验需要的布里渊信号,由于本身比较微弱,更容易被淹没在大量的噪声中,造成采集到的信号难以被解调得出有用数据。这些噪声中含有 EDFA 在进行光功率放大时产生的噪声、因光纤介质不均匀产生的噪声、光电探测器将光信号转化成电信号产生的噪声等,这些噪声波形、相位、幅度都是随机的,可以看作是随机白噪声。为了提高布里渊信号的信噪比,优化系统的特性,本实验中采用数字累加平均算法去除这些随机噪声。而布里渊散射信号是确定的信号,其信号强度经多次累加平均后不会发生衰减,通过累加平均,可以将有用信号解调出来。如果将采集到的信号用  $x(t)$  表示,则:

$$x(t) = s(t) + n(t) \quad (5.1)$$

其中  $s(t)$  表示有用信号,  $n(t)$  表示随机噪声。在一段时间内对整段光纤进行多次采样,得到非常多组采样数据,在第  $i$  组采样中的第  $j$  个采样点  $x_{ij}$ , 可以表示为:

$$x_{ij}(t_j) = s_i(t_j) + n_i(t_j) \quad (5.2)$$

由于  $s(t)$  是一个确定的信号,而且  $s(t)$  表征的温度和应力的变化相对采集周期来说也是一个缓慢变化的量。就本实验而言,10km 长的传感光纤,系统发射的调制脉冲的频率 8kHz,那么采集卡完成一组完整数据的采集也仅需要 0.125ms,也就是说采集卡连续采集两组完整的数据,中间仅间隔 0.125ms,在如此短的时间内,光纤上的某一点不可能发生温度或应力的突变。因此,对于不同的采样周期  $i$  来讲,第  $j$  个采样点的值都基本相同。而上述所说的各类噪声信号  $n(t)$  都是随机的,其取值既与  $i$  相关又与  $j$  相关,因此式(5.2)可以改写为:

$$x_{ij} = s_j + n_{ij} \quad (5.3)$$

把系统的噪声看作零均值的高斯白噪声， $n(t)$ 的均方根值为  $\sigma_n$ ，在累加之前，信号  $x_{ij}$  的信噪比为：

$$SNR_0 = s_j / \sigma_n \quad (5.4)$$

经过线性累加  $n$  次后得到：

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = \sum_{i=1}^n s_i + \sum_{i=1}^n n_{ij} \quad (5.5)$$

其中有用信号  $s_j$  经过  $n$  次累加后幅值变为原来的  $n$  倍，而噪声信号  $n_{ij}$  的能量是随机变化的，因此不能直接简单的用  $n$  倍表示，经过统计学计算，经过  $n$  次累加后噪声的均方值  $\overline{n_j^2}$  为：

$$\overline{n_j^2} = E(n_{1j} + n_{2j} + \dots + n_{ij} + \dots + n_{nj})^2 = E(\sum_{i=1}^n n_{ij}^2) + 2E(\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{l=i+1}^n n_{ij} n_{lj}) \quad (5.6)$$

其中  $E(\sum_{i=1}^n n_{ij}^2)$  随机噪声 2 每组样本值平方和的期望， $2E(\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{l=i+1}^n n_{ij} n_{lj})$  表示随机噪声两个不同时刻样本值乘积之和的期望值。在信号周期足够大的条件下，同一组采样周期  $j$  中，不同时刻  $i$  和  $j$  的噪声样本值  $n_{ij}$  和  $n_{lj}$  互不相关，因此它们乘积的期望为零，上式可以改写为：

$$\overline{n_j^2} = E(\sum_{i=1}^n n_{ij}^2) + n\sigma_n^2 \quad (5.7)$$

累加  $n$  次后噪声信号的均方根为  $\overline{n_j}$  为：

$$\overline{n_j} = \sqrt{n} \sigma_n \quad (5.8)$$

累加  $n$  次后信号的信噪比  $SNR_n$  和信噪比改善  $SNIR$  分别用式(5.9)和式(5.10)表示：

$$SNR_n = \frac{ns_j}{\sqrt{n}\sigma_n} = \frac{\sqrt{n}s_j}{\sigma_n} \quad (5.9)$$

$$SNIR = \frac{SNR_n}{SNR_0} = \sqrt{n} \quad (5.10)$$

可以看出，如果系统的随机噪声是高斯白噪声，那么经过  $n$  次累加平均后，可以将信号的信噪比提高至原来的  $\sqrt{n}$  倍。

### 5.1.2 .# , »H , ~

信号经高速采集卡采集后，初步得到时域上的信息。本实验采用北京坤驰公司的 QT1125 型高速数据采集卡，采样率为 5GHz。采集卡在一个采样周期中，采集获得若干个点，这些点反映了一个采样周期内整段传感光纤上的时域信息，如图 5.1 中的蓝线所示（其实是大量的离散的点，这里用线来代替表示）。通过对一个周期时域上的点进行一段一段的短时傅立叶变换，将时域信息转化成频域信息。短时傅立叶变换需要一个时频局部化的窗函数  $g(t)$ ，用  $g(t)$  同时域上的信号相乘，从而计算出各个不同时刻的功率谱。本文选择高斯窗函数来截取时域信号上的点进行短时傅立叶变换，图 5.1 中短时傅立叶变换的长度  $L$  就是高斯窗函数的长度。 $n$  表示相邻两次短时傅立叶变换之间间隔的点数，理论上每次向后推进一个点，进行短时傅里叶变换，所得到的信息效果最好，时频分辨率最佳，但是由于一个采样周期会采将近百万个点，如果每次仅间隔一个点进行短时傅里叶变换，所需要

处理信息量太大。因此需要选择合适的  $n$  值，来兼顾处理效果和工作量。

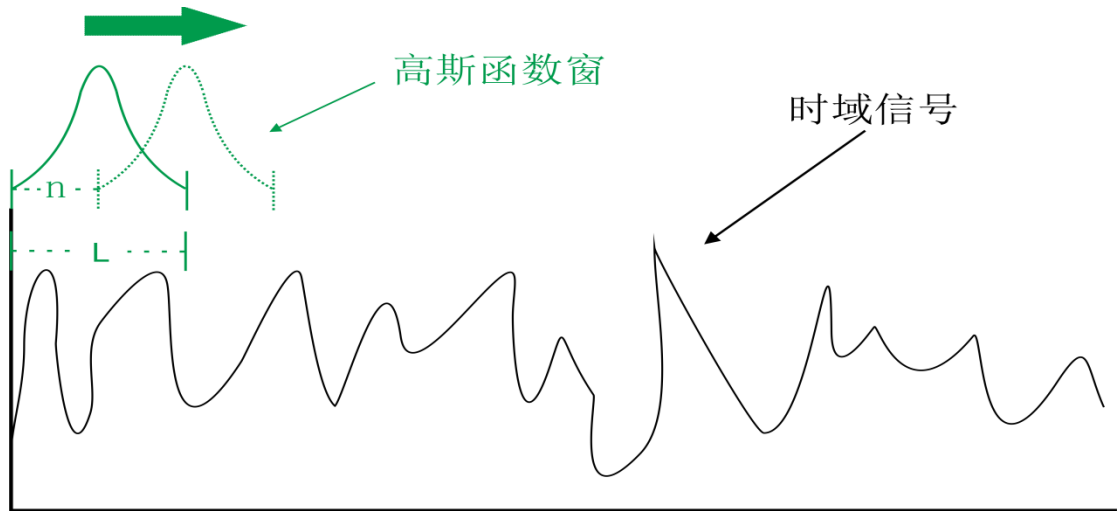


图 5.1 数据处理

Fig.5.1 Data processing

通过对时域上的点进行一二次的短时傅立叶变换，可以得出频域信息。在对某一段的点进行短时傅立叶变换前，为了获得更高的频率分辨率，需要对截取的点进行补零处理，然后再进行 FFT。经过实际操作发现，如果对截取的某一段只进行一次短时傅里叶变换，得到的数据并不能较好地反应频域信息，因此需要对某一段进行多次短时傅里叶变换，将每次得到的数据进行平均，以消除误差等不确定因素，获得更加准确的频域信息。

### 5.1.3 数据拟合

数据拟合就是用一种与数据变化规律相适应的解析式  $y=f(x,a)$  来反映  $x$  与  $y$  之间的关系，使解析式所表示的关系与已知数据能最佳地契合。解析式  $y=f(x,a)$  被称为拟合模型，式中  $a=(a_1,a_2, \dots,a_n)$  是待定参数。由第二章可知，布里渊频谱的形状服从洛仑兹分布，如图 2.1 所示。根据布里渊频谱的形状对布里渊信号进行洛仑兹拟合，本实验采用基于 Levenberg-Marquardt(LM)算法的非线性最小二乘拟合法。

布里渊信号谱中，频率和光强的关系可由式(2.2)表示，由此可以建立洛仑兹拟合的模型函数：

$$f(t) = \frac{a_1}{1+[(t-a_2)/(a_3/2)]^2} \quad (5.11)$$

式中  $a_1$  是布里渊信号谱的峰值， $a_2$  是布里渊谱的中心频率， $a_3$  是布里渊谱的谱宽。则待求向量  $x$  可以表示为：

$$x = [a_1 \ a_2 \ a_3]^T \quad (5.12)$$

用经过短时傅里叶变换得到的数据对 $[(t_m, y_m)]$ 进行最小二乘拟合，使通过拟合得到的函数与已知数据的残差的平方和 $S(x)$ 最小，即：

$$S_{\min}(x) = \sum_{m=1}^N [r_m(x)]^2 = \sum_{m=1}^N [y_m - f(t_m | x)]^2 \quad (5.13)$$

其中 $r_i(x)$ 是关于 $x$ 的非线性方程，令 $r(x)$ ：

$$r(x) = [r_1(x), r_2(x), \dots, r_N(x)]^T \quad (5.14)$$

则 $S_{\min}(x)$ ：

$$S_{\min}(x) = r(x)^T r(x) \quad (5.15)$$

本实验采用 LM 算法对此进行求解，通过优化拟合函数 $f(t)$ 的参量 $x$ 使残差的平方和 $S(x)$ 达到最小。LM 算法是一种求解非线性实数多元函数局部最小值的迭代算法，该算法首先要求对待拟合的函数关系中的未知量 $a_1, a_2, a_3$ 赋予一个初始值，在初始值的选择方面，该初始值应该最接近待求未知量 $a_1, a_2, a_3$ 真实值。

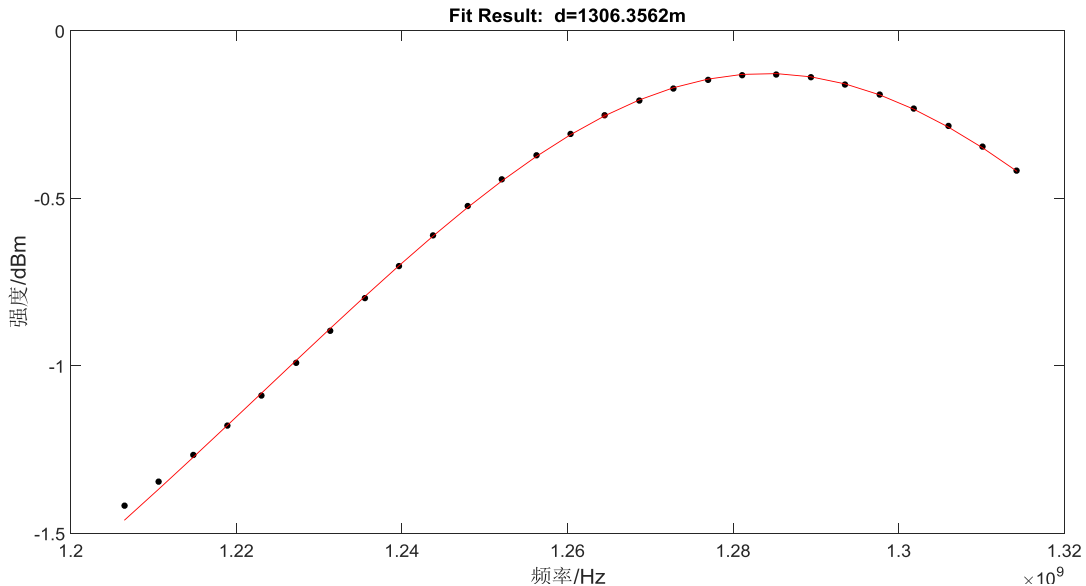


图 5.2 选取 27 个反映频域信息的点拟合出某处的布里渊频谱

Fig.5.2 Fitting the Brillouin spectrum with 27 points reflecting the frequency domain information

我们对时域上的信号点作短时傅立叶变换，得到了反映光纤某一小段处的频域信号的若干个点，对这些点进行拟合，即可得到反映传感光纤该处的布里渊频率的一条曲线，如图 5.2 所示。在 10km 传感光纤的 1.306km 处，对采集到的反映时域信息的点进行短时傅立叶变换，得到反映频域信息的点，对这些点进行非线性最小二乘拟合法拟合，采用 LM(Levenberg-Marquardt)算法。

根据布里渊光谱的形状，拟合程序选择用高斯函数来作为拟合的模型，然后确定高斯函数的四个未知量：高斯函数的峰值、高斯函数的中心轴、高斯函数的线宽、高斯函数的最小值。以上四个未知量就是控制拟合出的高斯函数的参数，



该四个未知量的初值的确定是进行拟合的关键，合适的初值可以使程序运行流畅，得出精确的结果；初值选择不当则会导致拟合出的函数收敛不到想要的结果。

在确定初值之前，首先要确定采用哪些频域上的点来进行高斯函数的拟合。如图 5.2 所示，本文选择布里渊频谱中低频部分和中频部分的一小段进行拟合，之所以不选择关于中心频率对称的点是因为本实验中高频部分叠加噪声较大，经测试如果拟合包括了高频部分会导致拟合出的曲线中心频率右移，不能准确反映布里渊谱的中心频率。确定了采用的点的范围后，再确定上述四个未知量的初值。本文选择所有参与拟合的点的最大值作为高斯函数的峰值，该最大点的频率作为高斯函数的中心轴，高斯函数的线宽采用一个固定值，经多次尝试本实验选择  $80e6$ ，采用所有参与拟合的点的最小值作为高斯函数的最小值，确定高斯函数的最小值是作拟合曲线图需要。

初值确定后根据 Levenberg-Marquardt 算法进行循环迭代，画出拟合的高斯函数曲线。其中高斯函数的峰值就是该处光纤中布里渊频谱的峰值，高斯函数的中心轴就是布里渊频谱的中心频率，高斯函数的线宽就是布里渊谱宽。这样通过拟合就得出实验需要的参数：传感光纤中布里渊信号的中心频率。

如上述介绍软件处理部分中，首先对采集到的数据进行 500 次的累加平均去噪，然后对时域信号进行短时傅立叶变换，在对得到的频域信号采用基于 Levenberg-Marquardt 算法的非线性最小二乘拟合法进行拟合，得出实验结果。

## 5.2 温度传感实验

### 5.2.1 实验原理

在进行温度传感实验之前，首先要对系统中各参数进行设定，尤其是对上路传感系统中调制脉冲参数的设定尤为关键，因为调制脉冲的脉宽和幅值直接影响系统的信噪比、空间分辨率、动态范围等核心参数。对于温度传感实验（传感光纤的长度为 10km，环境温度  $15^{\circ}\text{C}$ ），在尚未施以温度变化时，固定调制脉冲的电压，改变调制脉冲的脉宽，得到不同脉宽下光纤中信号的时域信息和传感光纤沿途的布里渊信号，如图 5.3、5.4 所示。

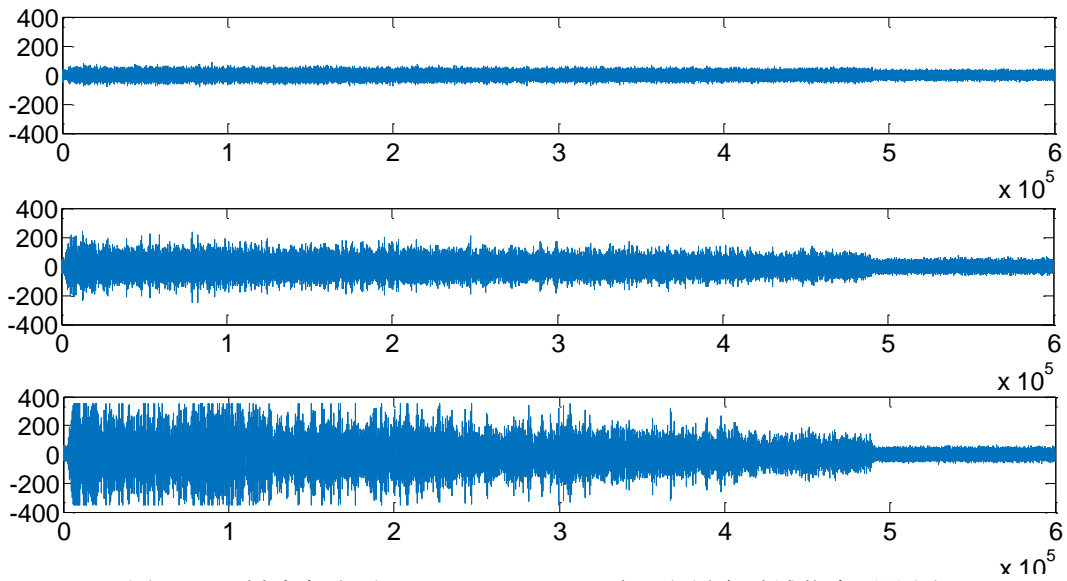


图 5.3 调制脉宽分别 100、300、500ns 时，光纤中时域信息对比图

Fig.5.3 Comparison of time domain information in optical fibers when the modulation pulse width is 100, 300 and 500ns

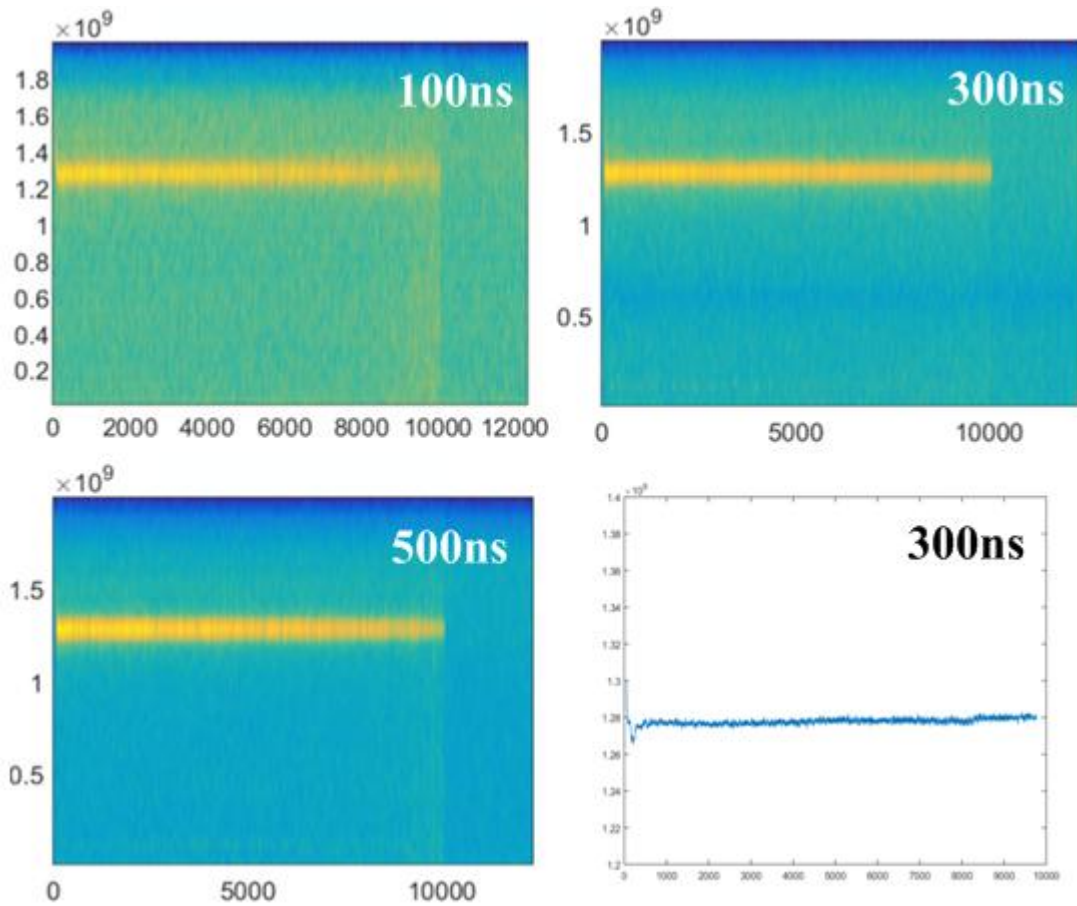


图 5.4 调制脉宽分别 100、300、500ns 时，传感光纤沿途的布里渊频移

Fig.5.4 Brillouin frequency shift along the sensing fiber when the modulation pulse width is 100, 300 and 500ns

图 5.3 中，横轴表示一个采样周期中采集卡在一整段传感光纤上采集的点数，纵轴表示采集到的信号的强度。温度传感实验中调制脉冲的触发频率设置为 8kHz，采集卡的采样率为 5GSa/s，因此一个采样周期中采集的点数为 0.6M，最后约 0.1M 个点由于光纤中没有信号，采集到的是纯噪声。本实验中采集卡模数转换的范围是 -350~350mv，因此图中纵轴显示范围的上限是  $\pm 350\text{mw}$ 。从图 5.3 中的第一幅图可以看出，当调制脉冲的幅值为 380mv 固定不变，调制脉宽为 100ns 时，此时系统的空间分辨率为 10m，但是由于此时脉宽较窄，导致调制得到的脉冲光的功率过低，此时信号的信噪比非常不理想，前面信号的功率几乎和最后末段采集到的纯噪声的功率相当。当调制脉宽为 300ns 时，此时系统的空间分辨率为 30m，脉冲光的功率增强，信号的信噪比提高，继续增大调制脉宽至 500ns，此时信号的信噪比进一步增强，但是此时系统的空间分辨率降至 50m，同时有非线性效应的出现（散射光能量有在光纤前端聚集的趋势）。

图 5.4 将时域信息转换成对应的空间信息，反映了 10km 空间上布里渊信号的中心频率以及强度分布情况。图中黄色亮条的位置指示布里渊信号的中心频率，亮条颜色的深浅指示布里渊信号强度的大小，从图中可以看出随着脉宽的增加，亮度增强，即布里渊信号的功率增强。图中可以看出布里渊信号的中心频率在 1.2~1.4GHz，经拟合得到精确值为 1.278GHz 左右。

上述实验可以看出，提高调制脉冲的脉宽，可以提高信号的信噪比，但是为了保证系统的空间分辨率，同时抑制由于调制脉冲光功率过大造成的非线性效应，不能一味增加脉宽。由于调制脉冲的功率还受脉冲幅值的影响，因此可以通过提高脉冲幅值来提高信号的信噪比。

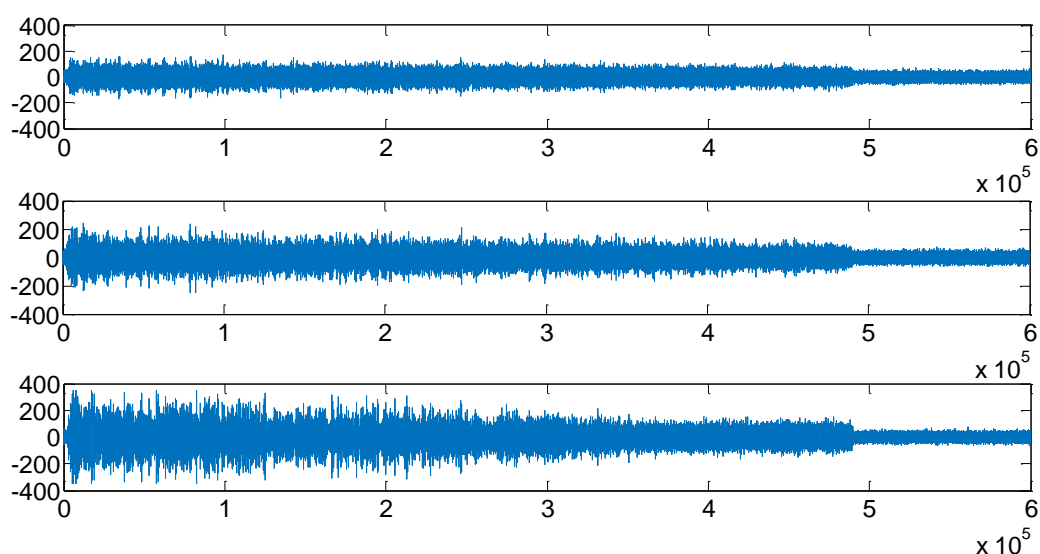


图 5.5 调制脉冲幅值分别 350、380、400mV 时，光纤中时域信息对比图  
Fig.5.5 Comparison of time domain information in optical fiber when the modulation pulse amplitude is 350、380、400mV

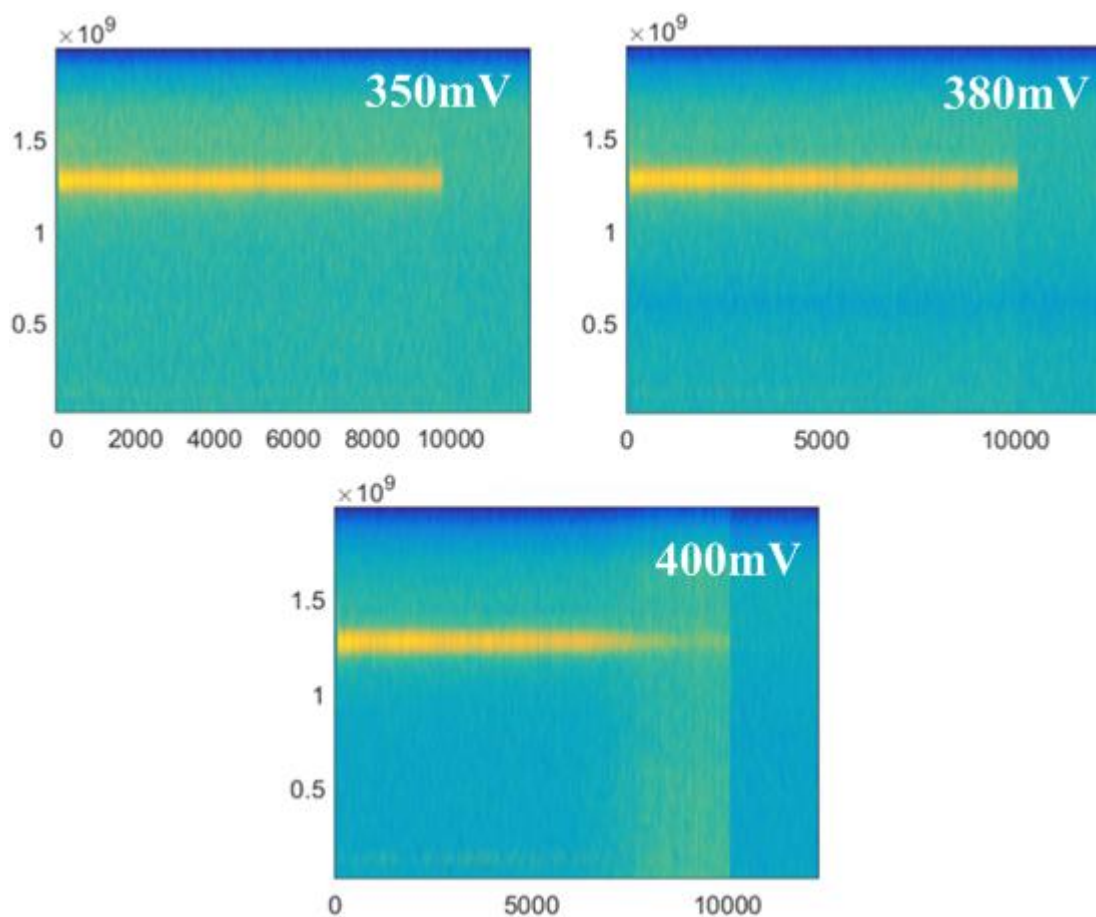


图 5.6 调制脉冲幅值分别 350、380、400mV 时，传感光纤沿途的布里渊频移

Fig.5.6 Brillouin frequency shift along the sensing fiber when the modulation pulse amplitude is 350、380、400mV

从图 5.5 中可以看出，当调制脉宽固定为 300ns 时，随着脉冲幅值从 350mV 增至 380mV，光纤中时域信号的强度增强，当脉冲幅值进一步增强至 400mV 时，光纤中的散射光出现非线性效应，导致散射光的能量在光纤前端聚集，光纤后端的能量微弱，大大影响了系统的动态范围。从图 5.6 的第三幅图可以更加直观的看出，由于非线性效应的出现，传感光纤末端的布里渊信号的强度极其微弱。

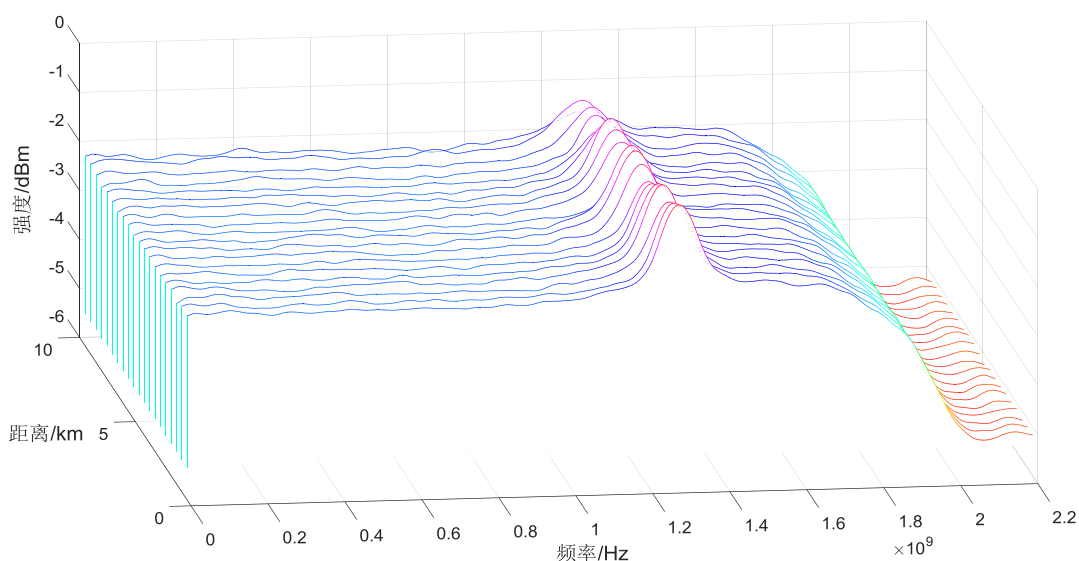


图 5.7 10km 传感光纤沿途布里渊信号的分布情况（环境温度 15℃）

Fig.5.7 The distribution of the Brillouin signal along the 10km sensing optical fiber (ambient temperature 15℃)

通过测试调制脉冲不同的幅值和脉宽，综合考虑不同参数下系统的信噪比、动态范围、空间分辨率以及变化场的测量精度，温度传感实验选择调制脉冲的宽度为 300ns，脉冲幅度为 380mV。通过对采集到的信息进行处理得出在环境温度为 15℃ 的条件下，10km 传感光纤沿途布里渊信号的分布情况如图 5.7，图中可以看出未对光纤施以温度变化的条件下，整个传感光纤上布里渊信号的频率一致，信号的强度范围在 -2dBm~-1dBm 之间。

### 5.2.2 温度传感实验示意图

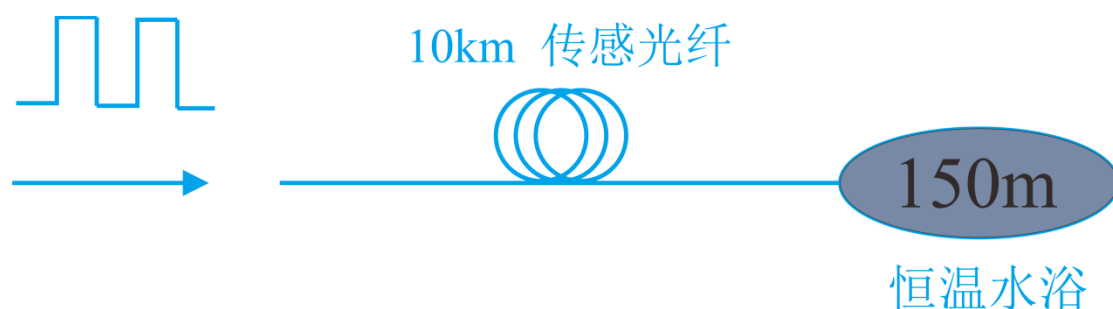


图 5.8 温度传感实验示意图

Fig.5.8 Schematic diagram of temperature sensing experiment

在探究温度同布里渊频移的关系时，将 10km 长的传感光纤的最后 150m 放置恒温水浴中，通过恒温水浴的方式对最后 150m 传感光纤加热至不同的温度，分别记录 60℃、70℃、78℃、90℃、95℃ 时布里渊频移的变化，分析数据得出布里渊频移同温度的关系。

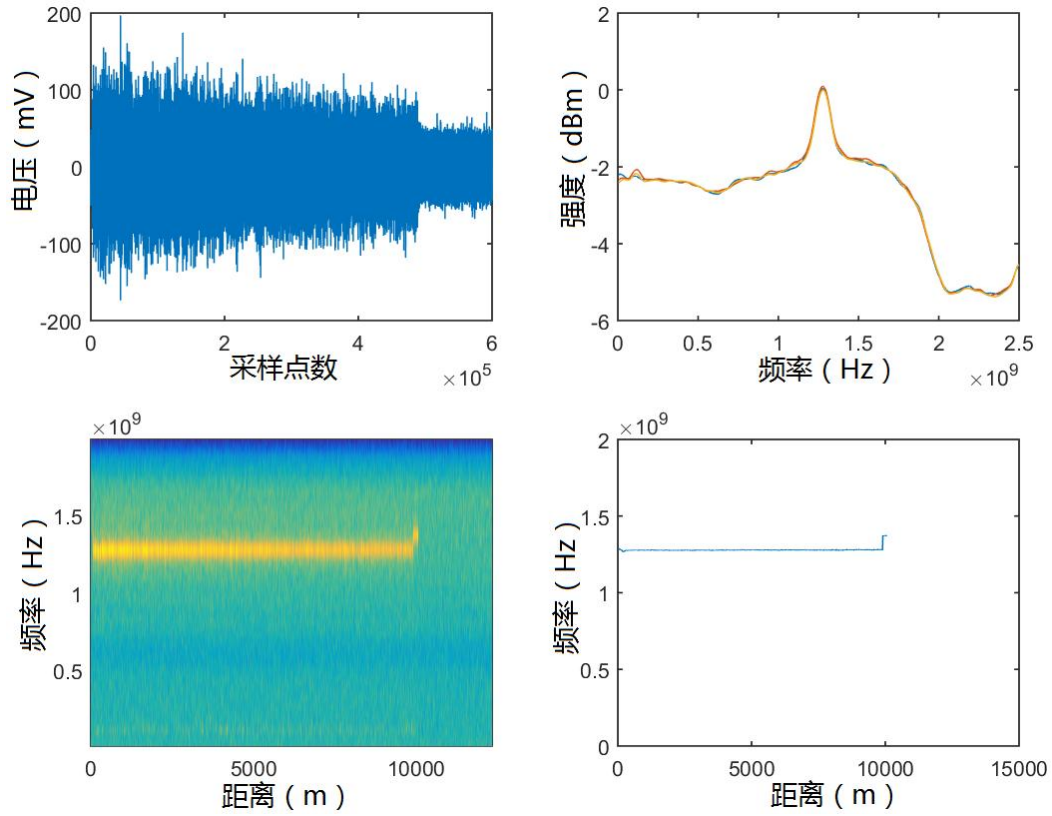


图 5.9 加热至 95℃时的布里渊信号

Fig.5.9 Brillouin signal when the fiber is heated to 95℃

如图 5.9 展示了对末端 150m 光纤加热至 95℃时，布里渊信号的变化情况，从图中可以明显看出在最后 150m 内，布里渊信号的频率发生了明显的偏移。传感光纤在环境温度 15℃中的部分的布里渊信号的频率为 1.28GHz，最后 150m 内的布里渊信号的频率为 1.373GHz，频率偏移了 93MHz 左右。

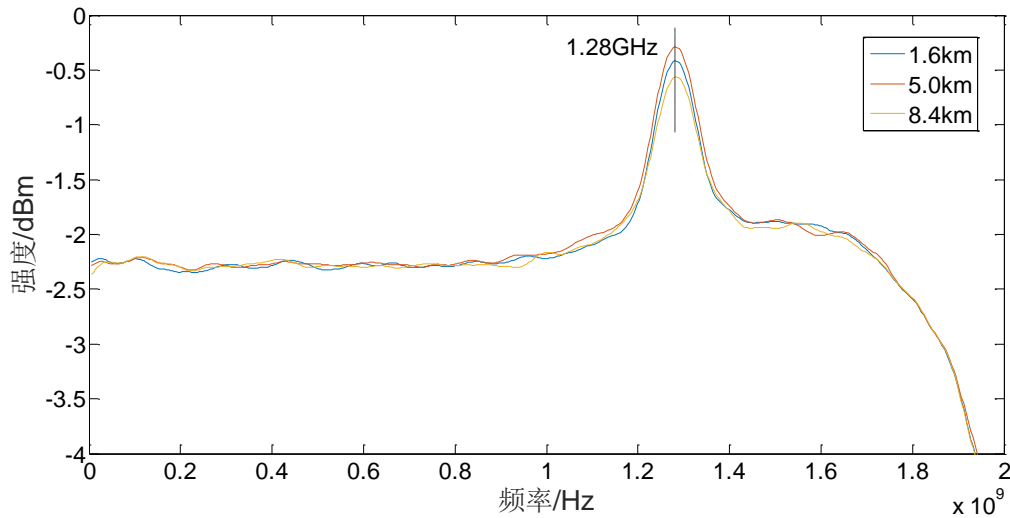


图 5.10 传感光纤三个不同位置处信号的频谱

Fig.5.10 Frequency spectrum of signal at three different locations of sensing optical fiber

对图 5.9 中的第二幅图的分辨率进行调整，得到图 5.10。图中显示了在传感光纤 1.6km、5.0 km、8.4 km 三处信号的频谱，由于这三处位置所处的环境温度均为 15℃，从图中可以看出三处布里渊信号的中心频率在 1.28GHz。

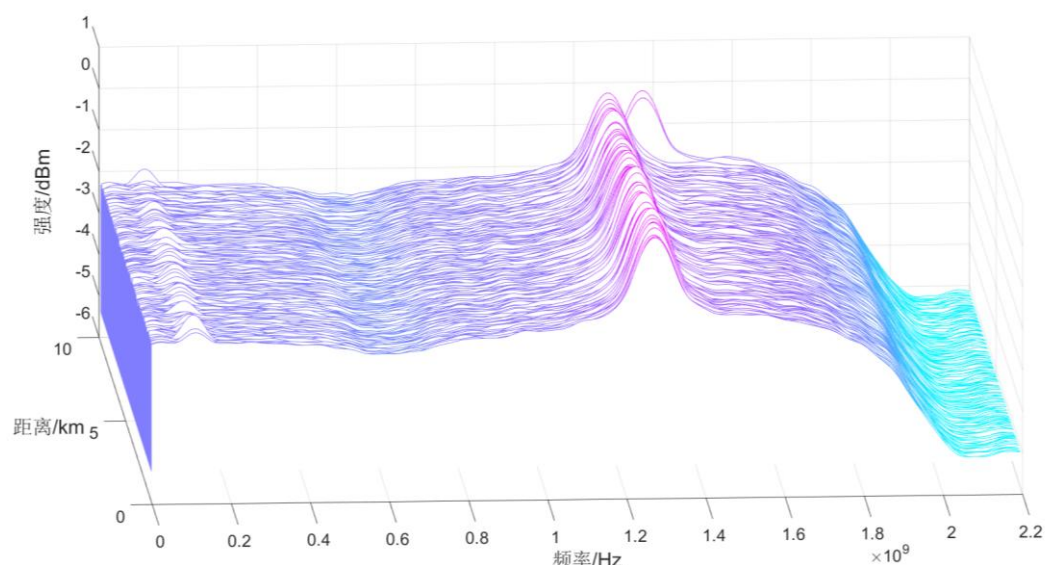


图 5.11 95℃时整段光纤上布里渊信号的分布

Fig.5.11 Distribution of Brillouin signal on the whole optical fiber at 95℃

图 5.11 显示了末端加热至 95℃后整段光纤上布里渊信号分布的三维效果图，同图 5.7 相比，可以看出最后 150m 部分布里渊信号的频率明显发生了偏移。此外从图中可以看出在 110MHz 处还有一个波峰，这是光经过 AOM 产生的固有偏移，在第四章介绍 AOM 的特性时已经说明。

同样的，改变恒温水浴的温度，分别得到在 60℃、70℃、78℃、90℃时布里渊信号的频率变化情况，如图 5.12 所示。从图中可以看出随着温度的升高，布里渊信号的频率向高频处移动。

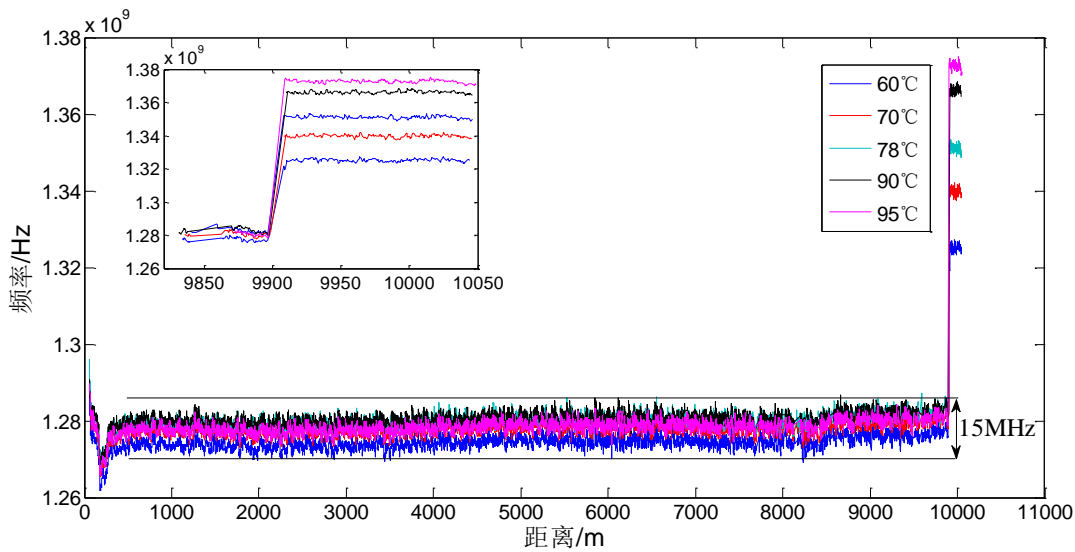


图 5.12 不同温度下的布里渊信号的频率

Fig.5.12 Frequencies of Brillouin signals at different temperatures

经过处理得到在 15℃、60℃、70℃、78℃、90℃、95℃时布里渊信号的中心频率分别为 1.28 GHz、1.325 GHz、1.34 GHz、1.352 GHz、1.366GHz。根据以上数据通过一元线性回归预测作出布里渊中心频率同温度的关系，如图 5.13 所示。最小均方差  $R^2$  为 0.9929，此时频率  $y$  随温度  $x$  变化的关系式为  $y = 0.0012x + 1.2601$ ，布里渊频率随温度的变化系数为  $0.0012\text{GHz}/^\circ\text{C}$ ，与文献中布里渊频率的温度系数： $1.2\text{MHz}/^\circ\text{C}$ 一致。

在图 5.12 中注意到，在传感光纤未加热的部分，布里渊信号的频率也不是一成不变的。在同一条线上（比如紫色线），如图 5.14 所示，布里渊信号的频率在不断发生抖动（约 8MHz）；在不同的线之间，如图 5.12，在环境温度 15℃下布里渊信号的频率抖动范围在 1.27GHz~1.281GHz（约 15MHz）。对某一条特定线，布里渊信号中心频率的抖动范围是 8MHz 左右，这是由于多方面的原因造成：首先，下路布里渊激光器输出信号的稳定性，本实验搭建的布里渊激光器产生的受激布里渊信号的中心频率的波动范围约是  $\pm 6\text{MHz}$ ；其次，上路的自发布里渊散射信号在传感光纤传输的过程中叠加的噪声，光电探测器的产生的噪声等其它系统噪声也是造成拍频后的信号中心频率不稳定的重要因素。对于 8MHz 范围的频率抖动，本实验中布里渊频率的温度系数是  $1.2\text{MHz}/^\circ\text{C}$ ，那么系统的温度检测精确度为  $6.6^\circ\text{C}$ 左右。

在不同的线之间（即不同组实验之间），拍频后信号的频率抖动范围增至 15MHz 左右，不同组实验之间信号中心频率发生波动的主要原因就是下路布里渊激光器的不稳定性造成的。同时温度检测精确度也是需要进一步优化的地方。



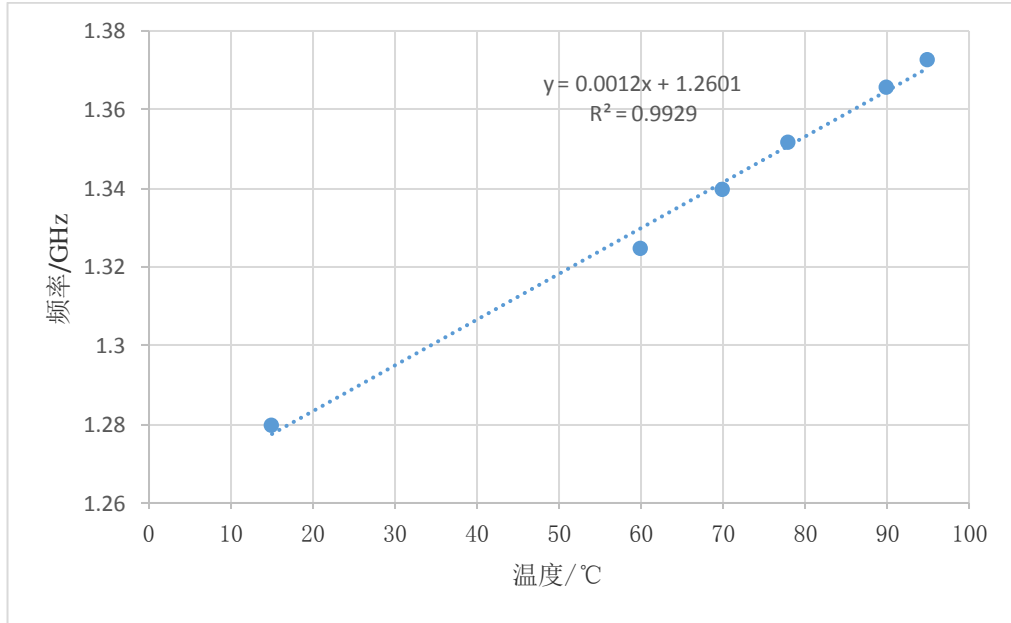


图 5.13 布里渊频率同温度的线性关系

Fig.5.13 Linear relationship between Brillouin frequency and temperature

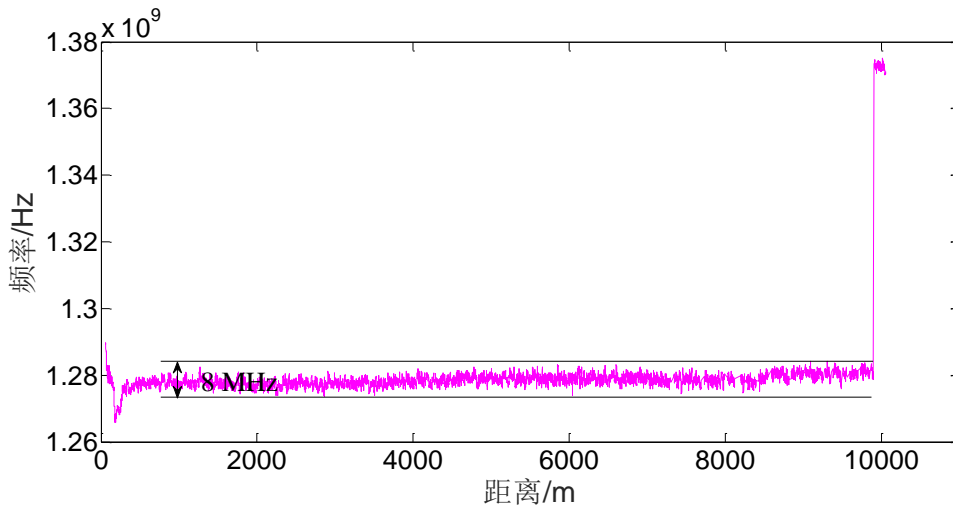


图 5.14 单次实验中，拍频后的信号中心频率的波动范围约为 8MHz

Fig.5.14 In one experiment, the fluctuation range of the signal's center frequency is about 8MHz

## 5.3 应变传感实验

### 5.3.1 实验原理

进行应变传感实验，采用 2km 的传感光纤，对末端 20m 左右的部分施以应力变化，测得传感光纤中布里渊中心频率与应力的关系。之所以没有选择温度传感实验中 10km 长的光纤，是因为本实验对光纤施加应力的方式是最直接的直线拉伸，因此对光纤施加应力需要大范围的实验空间。如果仍然选择 10km 长的传感光纤，为了保证整段光纤上特别是光纤末端上的布里渊散射信号能够较为均匀的分布并

保证一定的强度和信噪比，调制脉冲的幅值不能过低，调制脉冲的宽度也不能过窄。根据实验测试，调制脉冲的宽度至少应达到 300ns，这样采集到的信号才会有较理想的处理效果。当脉冲宽度达到 300ns 时，系统的空间分辨率为 30m，这样就至少对空间分辨率两倍以上长度范围施加应力，处理数据后才可以明显地观察到由应力引起的频偏。为了使测试部分受力均匀，本实验应力的施加方式采取将光纤直线拉伸的方式，宽度达到 300ns 时需要长 30m 的实验空间范围，实验室中难以达到。本文中应力传感实验采用 2km 长的传感光纤，由于传感距离缩短，在保证传感光纤中布里渊信号强度和信噪比的条件下，对调制脉冲的幅值和脉宽的要求就大大降低。经过实验测得，对于 2km 长的传感光纤，当调制脉冲幅值为 600mV、脉宽为 100ns 时，布里渊散射信号具有良好的信噪比。此时系统的空间分辨率为 10m，对光纤末端 20m 左右范围施以应力，完全可以获得显著的实验效果。

本文选择幅值和脉宽分别为 600mV、100ns 和 450mV、30ns 两组脉冲信号进行应力传感实验，并对实验结果进行对比分析。用两组脉冲信号调制时传感光纤中时域信息分布如图 5.15 所示。从图中可以看出，600mV-100ns 一组布里渊信号的强度较大，450mV-30ns 一组信号比较微弱，布里渊信号的功率几乎和尾端纯噪声的功率相当。

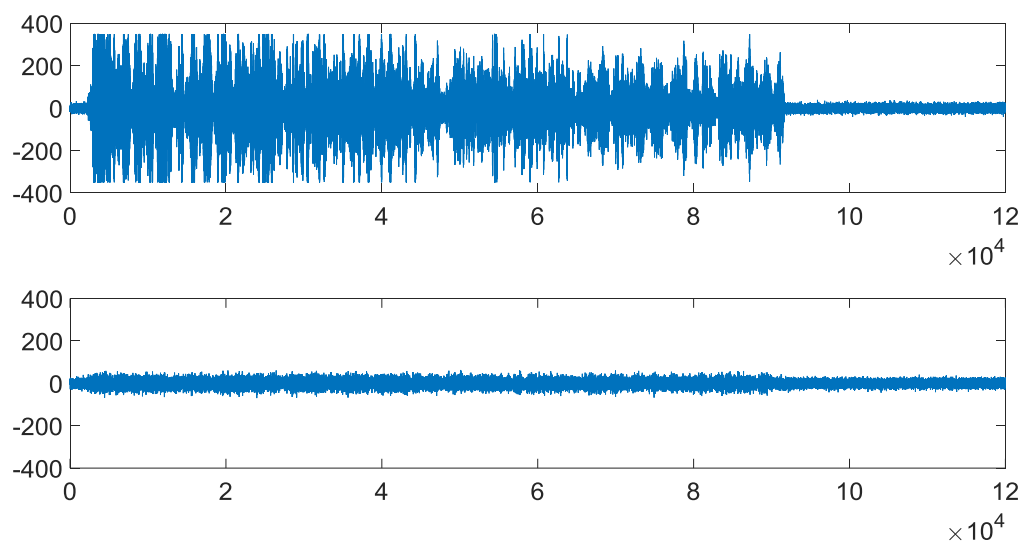


图 5.15 600mV-100ns 和 450mV-30ns 时光纤中时域信息的分布情况

Fig.5.15 Distribution of time domain information in the fiber when the modulation pulse is 600mV-100ns, 450mV-30ns

传感光纤是 2km，为保证两个相邻采样周期采集的信号不重叠，则由 AFG 发出的触发脉冲的频率是 40kHz，采集卡的采样率是 5GSa/s，可算出一个周期的采样点数 0.125M，取 0.12M。图 5.16 的第一幅时域信息图中，横轴表示采样点数，

从第三幅图可以看出，布里渊散射信号在整段光纤中具有理想的功率，布里渊信号的中心频率在 1.255GHz 左右。图 5.17 给出了调制信号为 600mV-100ns 时传感光纤中信号分布的三维效果，从图中可以直观看出有两个波峰，第一个中心频率在 110MHz 左右，是系统上路声光调制器（AOM）的固有频移，第二个波峰是布里渊信号。

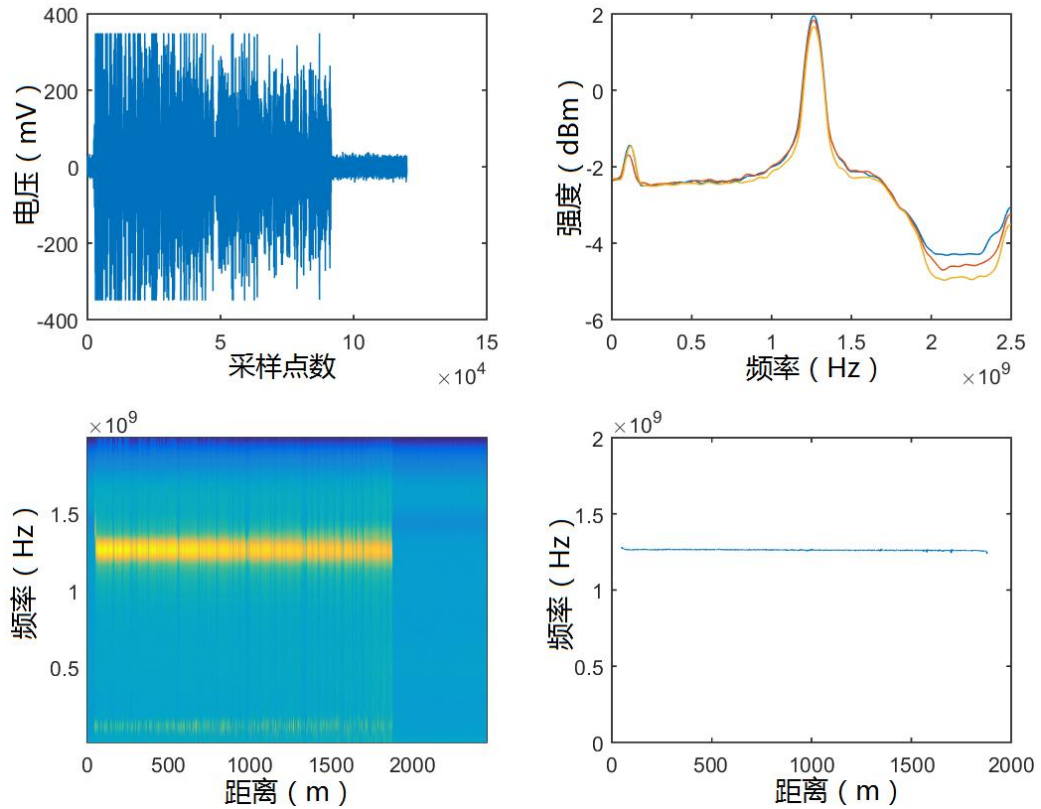


图 5.16 调制脉冲 600mV-100ns，未施加应力时的布里渊信号

Fig.5.16 The Brillouin signal without stress for 600mV-100ns modulation pulse

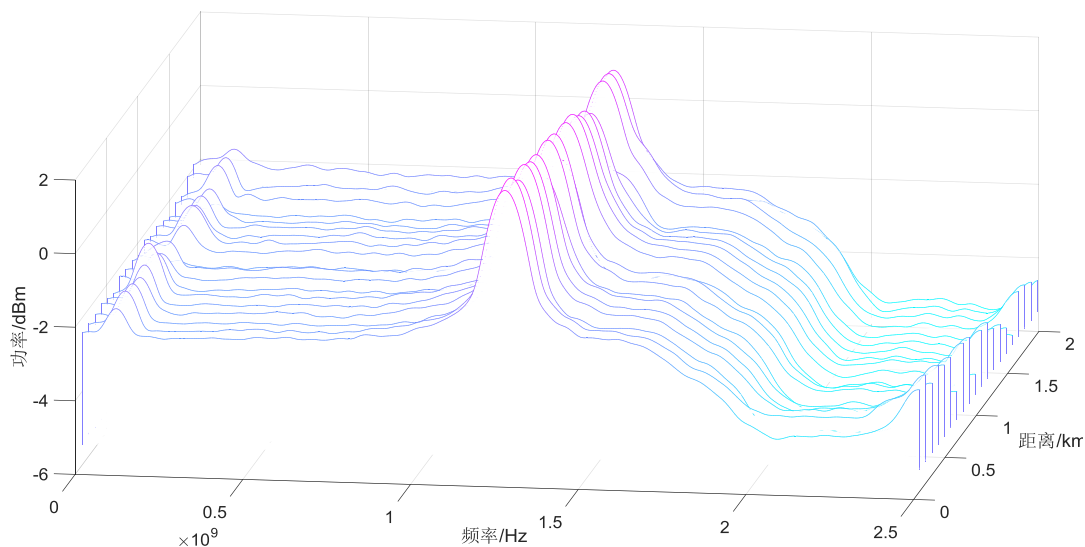


图 5.17 调制脉冲 600mV-100ns，整段光纤上布里渊信号的分布

Fig.5.17 Distribution of Brillouin signal on the whole optical fiber for 600mV-100ns modulation pulse

### 5.3.2 布里渊信号中心频率分布

由于没有应力测试仪进行定量的实验，本文仅能对布里渊信号的频移同应变的关系作定性的分析。在调制脉冲为 600mV-100ns 时，对光纤末端 20m 左右的长度施以 5 次大小不同的应力，从大到小分别记作应力 1~应力 5。当传感光纤被施加应力 1 后，布里渊信号的能量以及频率在光纤上的分布情况如图 5.18 所示。对采集到的数据进行拟合处理，得到布里渊信号的中心频率分布，如图 5.19 所示，从图中可以看出未受应力作用的部分，布里渊信号的中心频率约为 1.255GHz 左右，尾端受到应力作用，布里渊信号中心频率偏移至 1.53GHz。图 5.20 显示了整段光纤上布里渊信号分布的三维效果图，同图 5.17 相比，可以看出最后 20m 部分布里渊信号的频率明显发生了偏移。

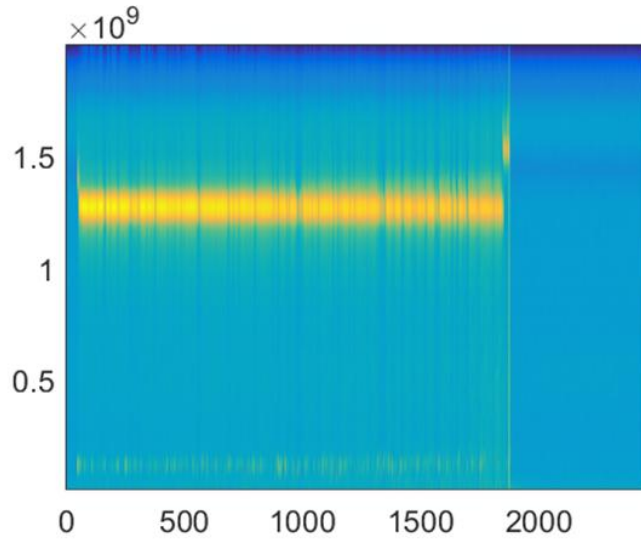


图 5.18 施加应力 1 后，布里渊信号的频移情况

Fig.5.18 The frequency shift of the Brillouin signal after the Stress 1 is applied

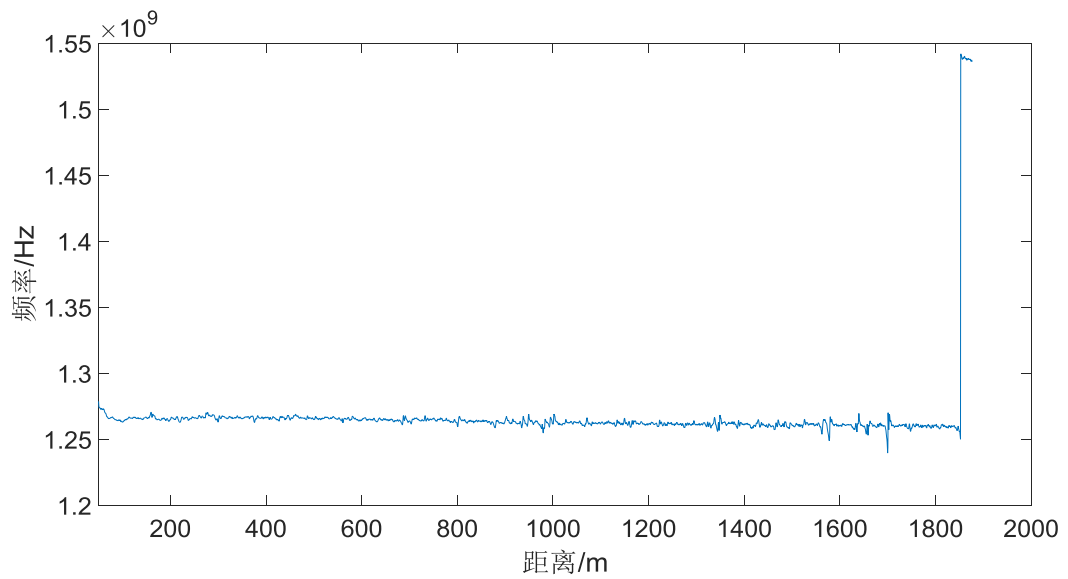


图 5.19 施加应力 1 时，布里渊中心频率的拟合后曲线

Fig.5.19 The fitting curve of Brillouin center frequency for Stress 1

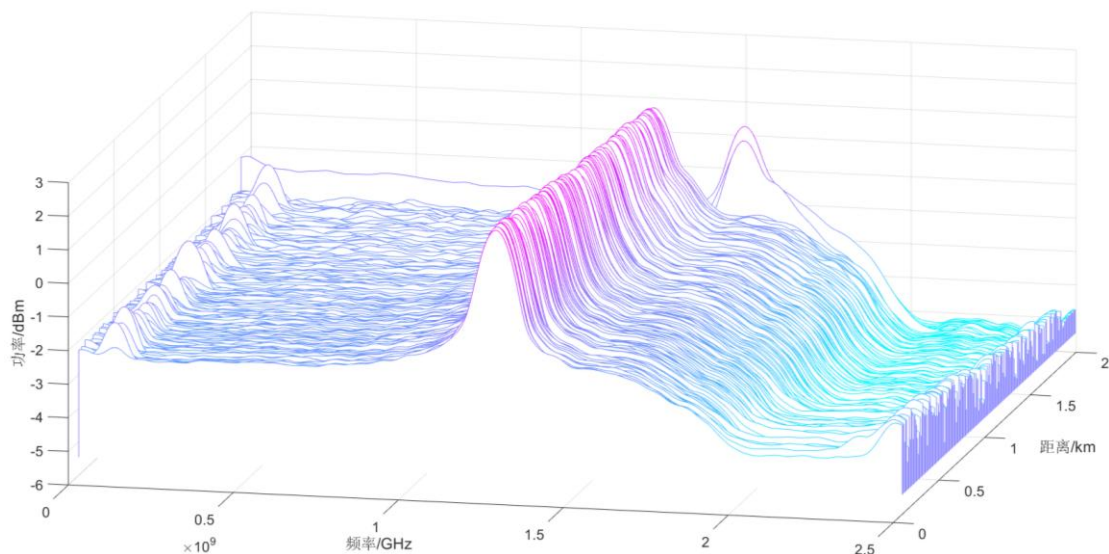


图 5.20 施加应力 1 时，整段光纤上布里渊信号的分布

Fig.5.20 Distribution of Brillouin signal on the whole optical fiber for Stress 1

在调制脉冲 600mV-100ns 的条件下，分别对 2km 传感光纤的尾端加五种不同大小的应力，得到布里渊信号的频偏情况如图 5.21 所示。从图中可以看出，随着施加的应力逐渐增强，布里渊信号的频移也越来越大。

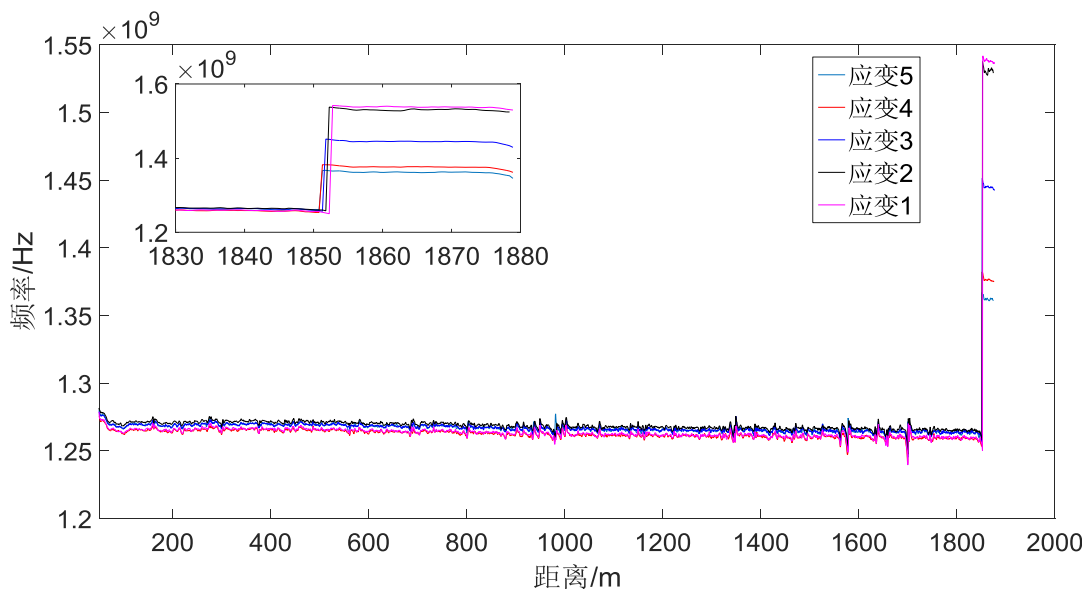


图 5.21 调制脉冲 600mV-100ns，不同应力下布里渊信号的频移情况

Fig.5.21 Frequency shift of Brillouin signals under different stresses for 600mV-100ns modulation pulse

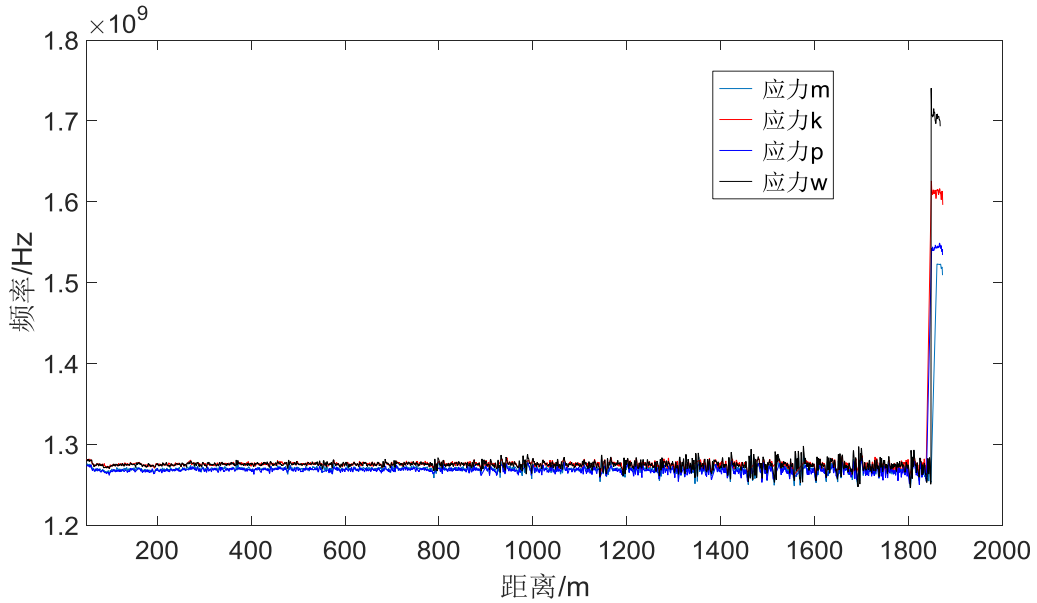


图 5.22 调制脉冲 450mV-30ns，不同应力下布里渊信号的频移情况

Fig.5.22 Frequency shift of Brillouin signals under different stresses for 450mV-30ns modulation pulse

改变调制脉冲为 450mV-30ns，仍然对 2km 传感光纤尾端 20m 的长度施以应力，得到在四种不同大小的应变条件下，布里渊信号的偏移情况，如图 5.22。对比图 5.21 和 5.22，可以看出在传感光纤的后段：1300m~1800m 处，图 5.22 的布里渊信号的中心频率较之图 5.21 发生了较大范围的波动，影响了系统对应变的测量精度，同时系统的空间分辨率也变得粗糙。出现上述现象是因为当调制脉冲为 450mV-30ns 时，调制脉冲的能量较弱，对应的传感光纤中布里渊信号的能量也较弱，特别是随着脉冲光向后传输，能量会进一步衰减。因此在光纤后段，随着信噪比越来越小，通过解调拟合出来的布里渊信号的中心频率的误差会逐渐增大，反映在图 5.22 中就表现为后段部分（1300m~1800m）布里渊信号的中心频率出现约 50MHz 左右的波动。此时系统的测量精度已无法满足工程应用，可见调制脉冲的选择是系统能正常工作的关键。

#### 5.4 $\hat{\sigma} < \hat{\epsilon}$

本文搭建了基于 BOTDR 的分布式传感系统，并实现了对温度和应力变化的测量，通过脉冲调制实验，分析得出有效避免或降低系统产生非线性效应的方法，同时提高信号的信噪比。在信号处理部分，通过优化算法，进一步提高待处理信号的信噪比，实现了在算法层面提高系统的性能参数。但是仍然存在一些值得改进的地方，下面一一提出讨论。

### 5.4.1 b ÔPÂ CCé •:

#### ①布里渊激光器

本文自行搭建的腔长为 20m 的布里渊激光器，其产生的受激布里渊光的中心频率为  $10.6824\text{GHz} \pm 6\text{MHz}$ 。也就是说，该激光器的输出信号的频率并不是一直稳定不变的，中心频率在某一段时间是稳定，在另一时刻可能会发生波动，而波动的范围最大可达  $\pm 6\text{MHz}$ 。另一方面，由于布里渊信号对温度和振动十分敏感，而实验环境又无法保证绝对安静，有时在离布里渊激光器较近范围的讲话都能引起空气的振动从而导致激光器因振动而发生频率漂移。而下路受激布里渊信号频率的不稳定势必会导致拍频信号频率的变化，继而影响整个系统的温度应力测量精度。

#### ②应变的量化测量

本文定量分析了布里渊频移和温度变化的关系，得出了布里渊频率随温度的变化系数为  $0.0012\text{GHz}/^\circ\text{C}$ ，同文献中的数据符合。但是应力变化的定量分析，需要能够检测应力变化的应力测试仪或是应力检测仪之类的仪器，这样可以记录应力变化多少  $\mu\epsilon$ ，引起频率移动多少 Hz。由于没有上述仪器，没有完成对应力变化的定量分析，只做了定性比较。

#### ③温度应变的同时测量

本实验通过检测布里渊频移的变化实现了对温度和应变的分别监测。但是由于布里渊频移同时受温度和应变的影响，因此仅由单一的频率变化无法判断到底是温度还是应变引起的。因此有必要实现对温度和应变的同时测量，对于 BOTDR 系统，可以采用双参量矩阵法。其基本思想是选择布里渊频移和另外一个参量（比如布里渊光强），利用频移与温度和应变的线性关系以及光强同温度和应变的关系，实现同时测量。由于传感光纤中散射光功率不确定度较大，尚无法系统地研究自发布里渊散射光强同温度和应变的关系，该点可作为进一步的研究方向。

#### ④ 系统的动态范围

系统的动态范围就是系统能够监测到的最远距离，动态范围是系统的重要性能参数之一。本文分别对 50km、20 km、10 km 长的传感光纤进行了脉冲调制实验，选取各自距离下最优效果的散射布里渊信号，其各自的频率强度分布情况如图 5.23 所示。三种长度光纤的规格有差异（不是同一种光纤），因此图(a)(b)(c)的布里渊中心频率略微不同。其中第二幅图布里渊信号分成了两段，这是因为本实验中的 20km 长的光纤是由两盘不同规格的 10km 长的光纤焊接而成的，各自的布里渊中心频率有差异，所以造成了第二幅图的分段现象。从图 5.23 可以看出，传感光纤的长度越长，光纤末端散射回来的布里渊信号就越微弱，信噪比得不到保证。为了使采集到信号便于处理，保证实验结果的准确性，本实验选择 10km 长的传感光纤搭建



系统平台，后续可以通过对系统的硬件设备和处理算法进行优化，来提升系统的动态范围。

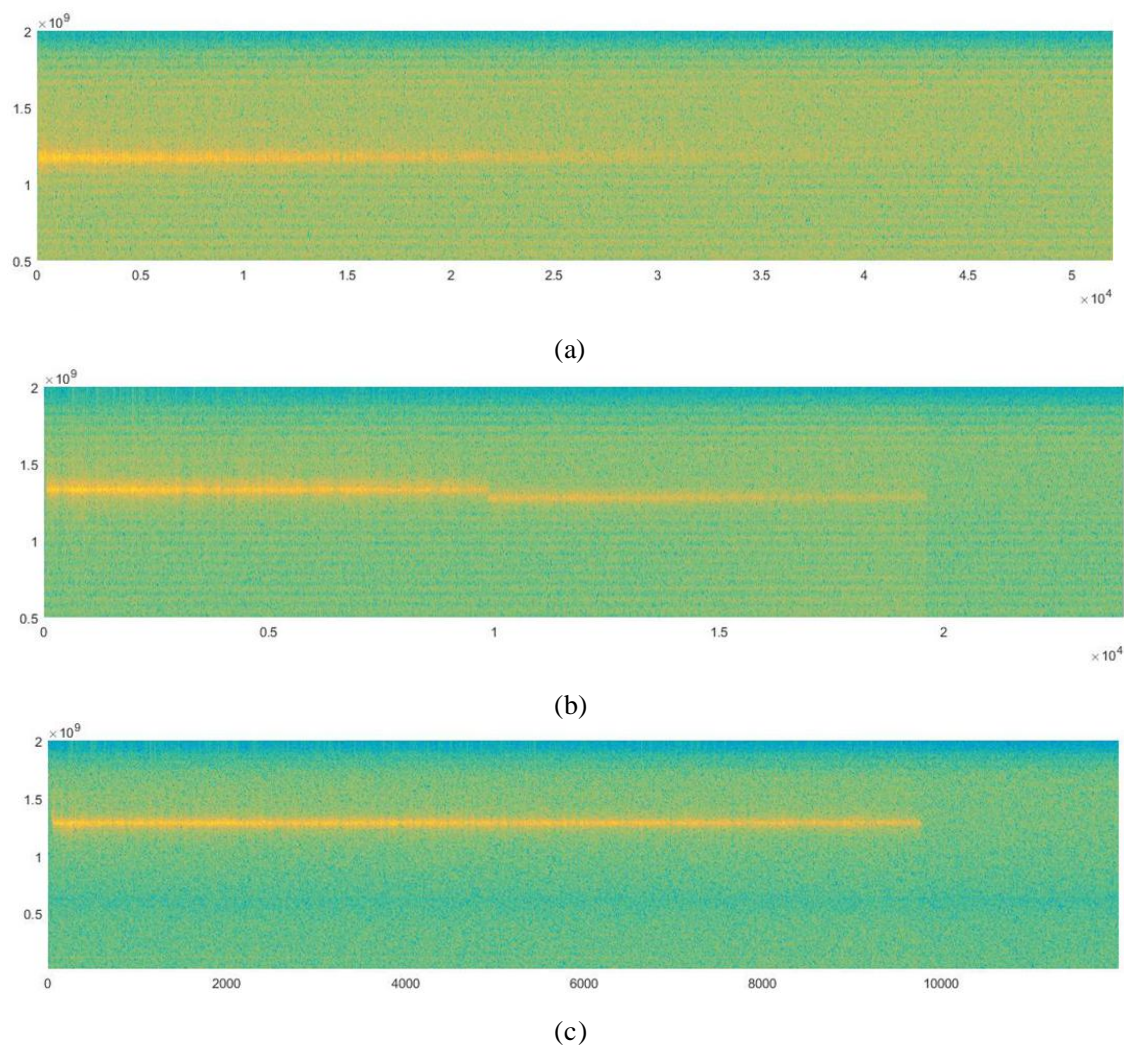


图 5.23 不同长度的光纤中散射布里渊信号的频率强度分布情况 (a)传感光纤 50km，调制脉冲 370mv-400ns (b)传感光纤 20km，调制脉冲 420mv-500ns (c)传感光纤 10km，调制脉冲 380mv-300ns

Fig.5.23 Frequency and power distribution of Brillouin scattering signals in optical fibers with different lengths (a) Sensing optical fiber is 50km and modulation pulse is 370mv-400ns (b)Sensing optical fiber is 20km and modulation pulse is 420mv-500ns (c) Sensing optical fiber is 10km and modulation pulse is 380mv-300ns

#### 5.4.2 温度传感实验

在温度传感实验中，系统的动态范围是 10km。在调制脉冲是 300ns-380mV 的条件下，对光纤尾部 150m 放置恒温水浴中加热至 95℃时，温度变化的位置从上

升沿的 10% 到 90% 对应的光纤长度约为 37m，如图 5.24 所示。在第三章已经详细介绍过，决定系统空间分辨的主要参数之一是调制脉冲的宽度，本文中温度传感实验采用的脉冲宽度为 300ns，根据式  $s = (v\tau)/2$ ，理论上系统的空间分辨率应为 30m。但是由于本实验采用的函数发生器在产生脉冲波形时最小上升沿为 5ns，并且 AOM 驱动器产生的射频信号也存在一定的上升沿时间，因此导致 300ns 的光脉冲形状并非是标准的矩形，而是边缘变缓呈高斯形，导致空间分辨率比理论值大。同时光电探测器和采集卡也有一定的响应速度，导致实测的空间分辨率比理论值略大。

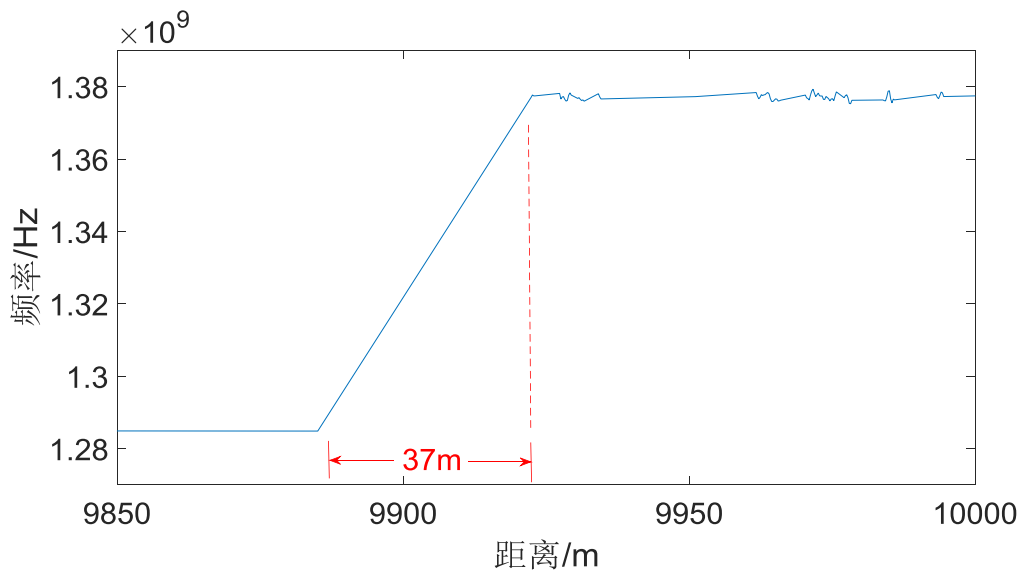


图 5.24 调制脉冲 380mV-300ns 时，系统的空间分辨率

Fig.5.24 System's spatial resolution when modulation pulse is 380mv-300ns

想要提升系统的空间分辨率，首先可以减小调制脉冲的脉宽，但是如果过度减小脉冲宽度，会导致脉冲信号的功率过小，进而影响布里渊信号在光纤中的传输距离，从光纤后段散射回来的布里渊信号的信噪比过小，给信号处理造成极大的困难，同时也影响系统的温度应力测量精度。

通过对后期信号处理过程中算法的优化，在同等的调制脉冲宽度下，大大提高了系统的空间分辨率，达到了优良的效果。首先对采集到的时域信号进行短时傅立叶变换时，采用高斯窗函数对一整段时域信息进行截取进行短时傅立叶变换。选用高斯窗是因为高斯窗相对于矩形窗，锯齿窗等其它窗函数，其信号的时频转换效果最佳。

在选择了高斯窗对时域信号进行截取后，高斯窗的长度决定了每次进行短时傅立叶变换的点数，高斯窗的长度越长，每次截取下来作短时傅立叶变换的点就越

多，也就是说每次傅立叶变换反映的传感光纤上信息的空间范围就越大；每次反映的传感光纤上信息的空间范围越大，每次参与拟合的点数也越多，相当于提升了数据本身的自我纠错能力，通过拟合得出的频率分辨率也就越高，布里渊信号也越准确。当高斯窗的长度分别设为 5ns 和 15ns 时，通过数据处理得出的传感光纤中布里渊信号的频谱如图 5.25 所示。布里渊信号的能量频率分布如图 5.26 所示。从图 5.25 和 5.26 中可以非常直观地看出，当高斯窗的长度增加之后，频率分辨率明显增强，信号处理效果得到明显优化。

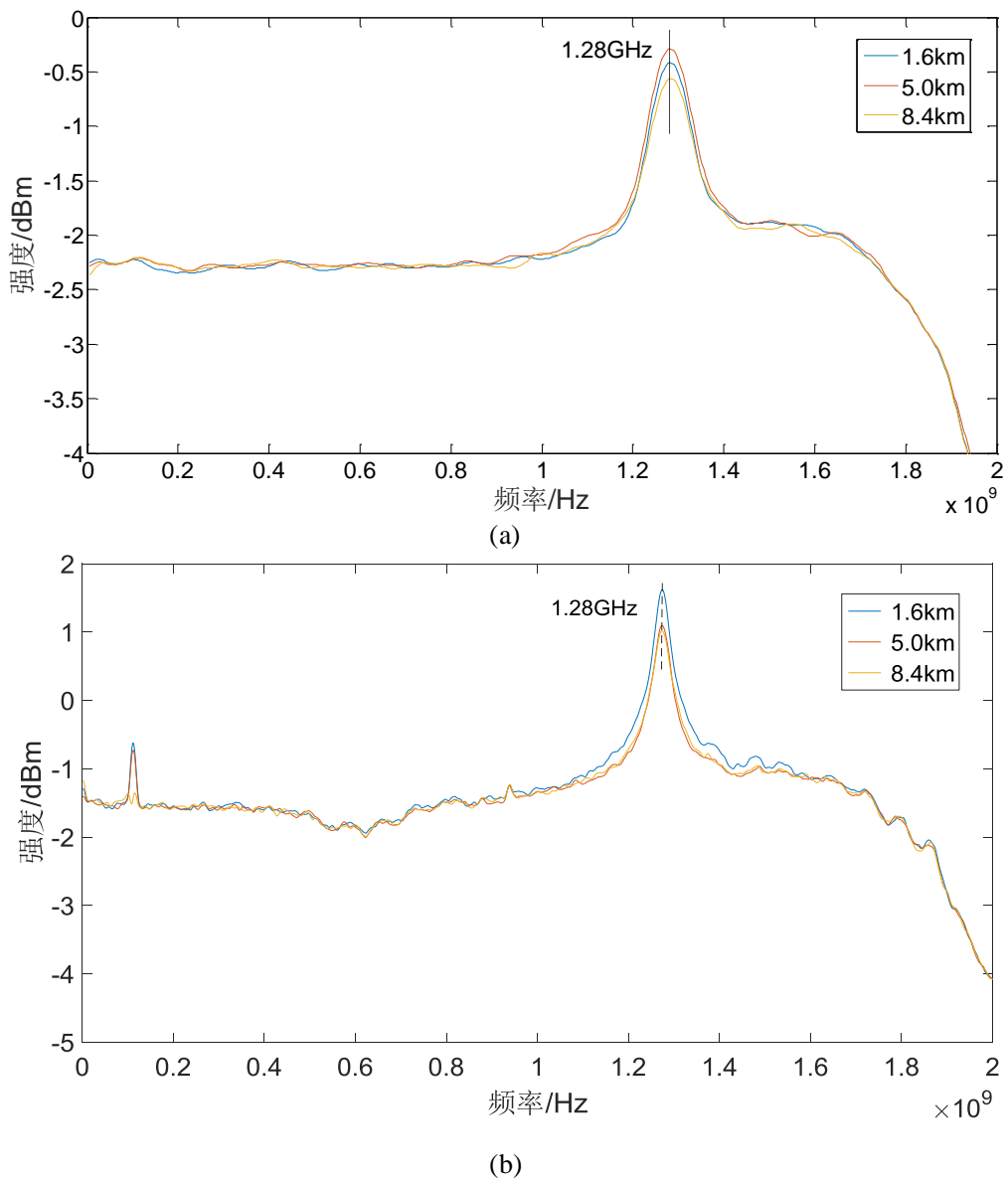


图 5.25 (a)高斯窗的长度为 5ns 时，光纤中布里渊信号的频谱 (b)高斯窗的长度为 15ns 时，光纤中布里渊信号的频谱

Fig.5.24 Frequency spectrum of Brillouin signals in the optical fiber when (a) the length of the Gauss window is 30ns (b) the length of the Gauss window is 150ns

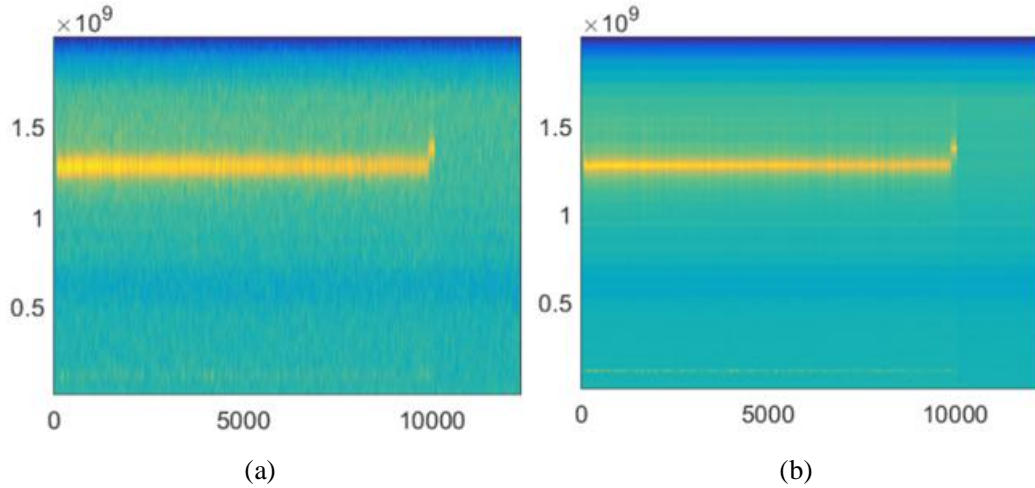
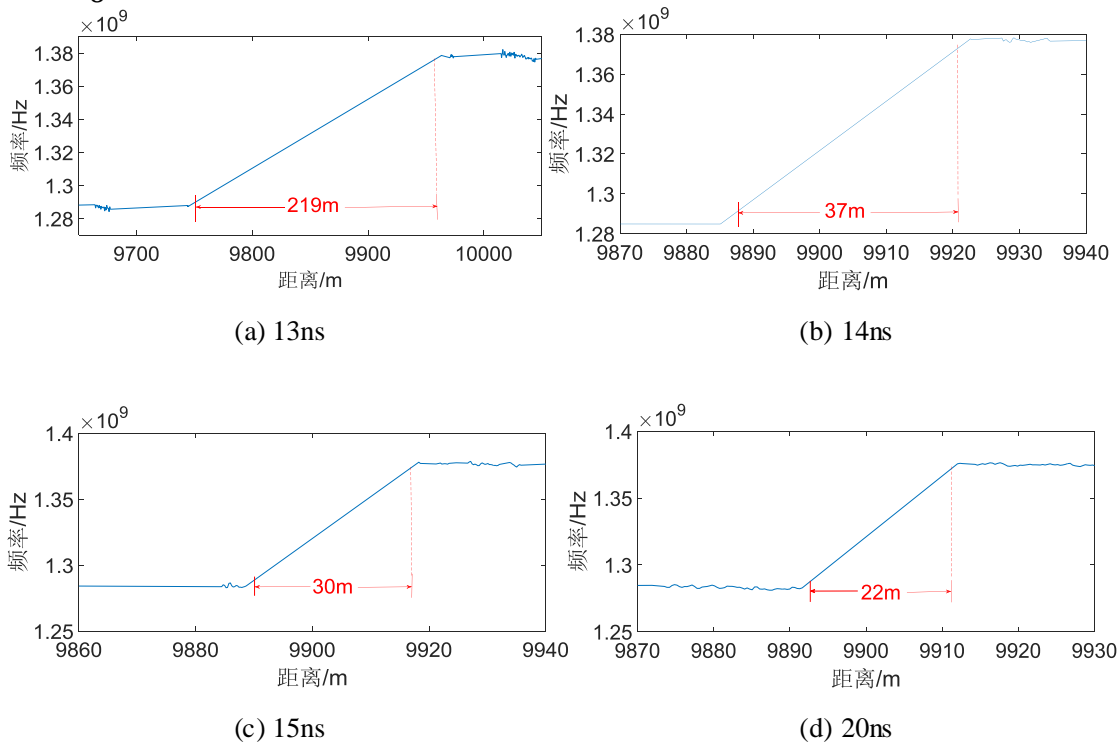


图 5.26 布里渊信号(a)高斯窗长 5ns (b)高斯窗长 15ns

Fig.5.26 Brillouin signals when (a) the length of the Gauss window is 5ns (b) the length of the Gauss window is 15ns

在布里渊温度传感实验中，当调制脉冲取 380mV-300ns 时，对 10km 传感光纤末端升温至 95℃。理论上系统的空间分辨率为 30m，在信号处理的过程中，通过改变高斯窗函数的长度  $t_1$ ，得到不同脉冲时间  $t_2$  下系统的空间分辨率（程序中设定  $t_1 = 1/6 t_2$ ），如图 5.27 所示。



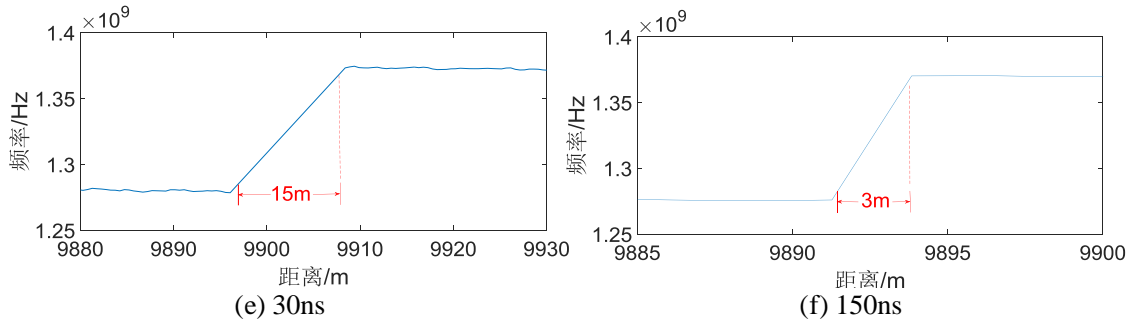


图 5.27 (a)~(f) 不同脉冲时间下系统的空间分辨率

Fig.5.27 (a)~(f) Spatial resolution of the system for different pulses

从图 5.27 中可以看出，当脉冲时间过短时，也就是高斯窗函数的长度过短，导致每次在时域上截取的信号点数越少，进而每次进行布里渊谱线拟合时采用的点也就越少，这就大大影响空间上的拟合精度和频率分辨率。从图(a)中可以看出，当  $t_1$  为 13ns 时，系统的空间分辨率恶化至 219m，同时拟合出的布里渊信号的中心频率也在一个较大的范围波动，无法确定信号的中心频率。此时系统无法满足工程上的应用。随着设定的脉冲时间的增加，每次参与短时傅立叶变换的点数增加，可以看出系统的空间分辨率大幅提升，同时拟合出的布里渊光谱的中心频率也更加准确。当脉冲时间设为 150ns 时，系统的空间分辨率可达 3m，比理论值 30m 提高了 10 倍，而且进一步增大脉冲时间，系统的空间分辨率进一步提高。

在图 5.27(a)中，当脉冲时间设为 13ns 时，信号的时频转换和拟合程序已不能正确工作，因此不做讨论。在(b)~(f)中，程序正常工作，可以看出系统的空间分辨率和脉冲时间是一种线性的反比例关系，当脉冲时间变为原来的 X 倍时，空间分辨率变为原来的 1/X。

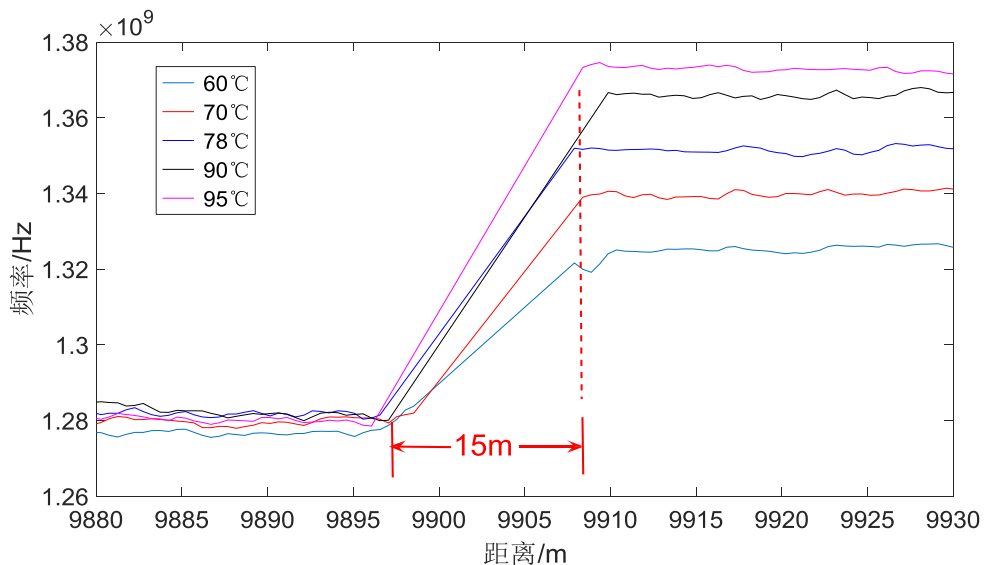


图 5.28 温度传感实验选择脉冲时间为 30ns 进行数据处理，此时空间分辨率为 15m  
Fig.5.28 15m spatial resolution for 30ns pulse in the data processing of temperature sensing experiment

本文选择脉冲时间为 30ns 进行温度应力传感实验的数据处理, 在此参数下温度传感实验(传感光纤 10km)系统的空间分辨率为 15m, 如图 5.28, 比理论值(调制脉冲为 380mV-300ns, 理论空间分辨率为 30m)提升了两倍。应力传感实验(传感光纤 2km)的空间分辨率为 2m, 比理论值(调制脉冲为 600mV-100ns, 理论空间分辨率为 10m)提升了 5 倍。如果选择脉冲时间为 150ns 或是更高, 虽然系统的空间分辨率等参数会得到进一步优化, 但是需要处理的数据非常庞大。本实验数据处理采用的计算机内存达 16G, 脉冲时间设为 150ns 时仅处理一次数据需要运行一小时左右, 而实验中需要处理多次数据, 工作量太大。实际情况下如果需要更高的空间分辨率可采用更高性能的计算机实现。

## 5.5 E5

本章节进行了调制脉冲实验, 实现了基于 10km 传感光纤的温度传感实验和 2km 光纤的应力传感实验, 并通过编程算法对采集到的数据进行处理, 得出温度和应变同布里渊频率的关系。

①对于 10km 长的传感光纤, 在进行温度传感实验之前, 先通过改变调制脉冲的参数得到不同频率和幅值的脉冲光。使传感光纤中散射回来的信号既有良好的信噪比, 又不能使信号功率过大而产生非线性效应。经过试验选择 380mV-300ns 的调制脉冲, 对 10km 光纤末端的 150m 进行升温实验, 分别记录升温至 60℃、70℃、78℃、90℃、95℃的布里渊频移, 得出温度同布里渊频移的定量关系。

②采用 2km 长的光纤进行应力传感实验, 同样先通过调制脉冲实验选择合适的调制脉冲参数, 然后基于 600mV-100ns 的调制脉冲, 对 2km 光纤的末端 20m 进行应变实验, 分别记录五种不同程度应力下布里渊信号的频移, 定性分析应力同布里渊频移的关系。

③编写程序对采集到的时域信息进行处理。首先选取 500 组数据进行累加平均去噪, 提高信号的信噪比。选择高斯窗函数分段多次截取采集到的时域上的信息, 进行短时傅立叶变换, 将得到的频域上的信息点进行拟合, 得出传感光纤各处的布里渊频率。实验发现通过增大高斯窗函数的长度, 可以大大提高系统的空间分辨率。

④分析了本实验的不足之处, 提出了优化系统性能的方案, 为下一步实现 20km、50km 动态范围内对温度和应变同时进行高精度检测打下基础。

## 6 q5 ' < Q

### 6.1 q5

分布式光纤传感技术近年来发展迅速，广泛应用于温度、应变、电磁场、位移、振动等各种外界场参量的监测。分布式传感系统的性能参数：空间分辨率，动态范围，测量精度等也得到了不断的优化。鉴于分布式光纤传感技术的诸多优点，现已广泛应用于桥梁、隧道、公路、电力电网、油气运输管道等各种大型基础设施的健康监测中。对于基于后向散射技术的分布式光纤传感系统而言，BOTDR技术对单一分布参数的测量具有很好的空间分辨率和测量精度，同时系统的结构也较为简单。本文的主要内容有：

①理论部分首先介绍了光纤中自发布里渊散射和受激布里渊散射的产生机理，根据自发布里渊信号中心频率和功率的表达式，分析了自发布里渊散射光中心频率和光强同外界温度和应变的定量关系。针对基于 BOTDR 分布式传感系统的实现方式，着重介绍了直接探测法和相干拍频探测法，并比较了两者各自的优点和不足。分布式传感系统的主要性能参数有：信噪比、动态范围、空间分辨率、温度应变测量精度等，本文一一作了详细阐述并分析了影响各性能参数的因素，为搭建并优化实验系统做准备。

②实验搭建了基于 BOTDR 的分布式系统，系统采用相干拍频探测的方式。种子激光从光源发出分成两路，上路经声光调制器（AOM）调制成脉冲光进入传感光纤，产生自发布里渊散射。下路进入布里渊激光器产生受激布里渊光，与上路自发布里渊光经光电探测器拍频后进入高速数据采集卡进行采集处理。分析和搭建了系统中的主要器件。设计了 20m 和 100m 两种不同腔长的布里渊激光器，通过试验对两个激光器的受激布里渊散射的阈值、受激布里渊光的带宽、自由频谱宽、激光器输出纵模的线宽以及激光器的频率稳定性进行了分析和比较。最终选择了 20m 腔长的激光器。设计了掺铒光纤放大器，通过试验测试了该 EDFA 的放大效果，光经过放大后基本不会对原光的线宽进行展宽，符合实验要求。进行了 AOM 脉冲调制实验，分析得出：调制脉冲功率过低，系统的信噪比微弱；调制脉冲功率过高，上路信号产生非线性效应。

③采用 10km 长的传感光纤，首先进行脉冲调制实验，选择合适的脉宽和幅值，使系统的动态范围、空间分辨率以及测量精度都得以兼顾。采用 380mV-300ns 的调制脉冲，进行温度传感实验。测得不同温度下布里渊信号的频移情况，得出布里渊频移与温度的定量关系。对于应力传感实验，经试验选择 600mV-100ns 的调制脉冲，对 2km 传感光纤末端 20m 施以不同程度的应力，得出布里渊频移与应变

的定性关系。对采集到的时域信息进行处理。通过累加平均去噪的方式提高信号的信噪比。选择高斯窗函数分段多次截取采集到的时域上的信息，进行短时傅立叶变换，将得到的频域上的信息点进行拟合，得出传感光纤各处的布里渊频率。实验发现通过增大高斯窗函数的长度，可以大大提高系统的空间分辨率。

综上所述，本文搭建了基于 BOTDR 的分布式传感系统，进行了脉冲调制实验，通过温度和应力传感实验得出了布里渊频移同温度和应变的关系，实现了系统对外界温度场和应力场变化的监测，通过后期算法处理大大提高了系统的空间分辨率。

## 6.2 系统优化

①优化系统中下路布里渊激光器的频率稳定性，以提高系统对温度应力的测量精度。

②购置能够检测应力变化的应力测试仪之类的仪器，对应力的变化定量记录，实现对布里渊频移和应力关系的定量分析。

③采用双参量矩阵法，其基本思想是选择布里渊频移和另外一个参量（比如布里渊光强），利用频移与温度和应变的线性关系以及光强同温度和应变的关系，实现系统对温度和应变的同时测量。

④通过对系统的硬件设备和处理算法进行优化，提升采集到的信号的信噪比，从而提升系统的动态范围。



## 8\* BX

三年时光，弹指一挥，转眼间到了要和自己的研究生生涯说再见的时候，虽然心中有万般不舍，但更多是对这段时光的感激。感谢我的导师刘敏教授，感谢刘老师在学术科研上对我的严格要求和悉心指点，让我从生疏一步步走向熟练，逐步具备了科学的实验方法和严谨的学术态度；感谢刘老师在处世为人上对我的言传身教，让我在思想上更加的成熟，在分析处理问题方面更加合理周全；感谢刘老师在平日生活里对我无微不至的关怀，让我这个身处异乡的学子时时刻刻感受到家的温暖。回望三年点滴，我向刘老师表达最衷心的感谢；展望未来，我为刘老师送上最诚挚的祝福！

在此还要特别感谢朱涛老师，邓明老师，黄维老师在我研究生期间对我的指导和帮助。感谢实验室的博士研究生黄仕宏，硕士研究生周进、范宇、陈堂平、李阳、梁海来、赵昺玥、杨虚、侯静云，以及和我一个课题组一起并肩作战、攻坚克难的张敬栋博士和朱敏硕士。三年时光的朝夕相处，我们有太多的美好回忆，祝你们前程似锦，一切都好。最后，感谢我的家人和朋友对我一贯的鼓励和支持。

衷心感谢在百忙之余评阅论文和参加答辩的各位专家和教授！



## ø69 1/2)d

- [1] H. Ohno, H. Naruse, M. Kihara, A. Shimada, Industrial Applications of the BOTDR Optical Fiber Strain Sensor[J]. *Optical Fiber Technology*, 2001, 7(1): 45-64.
- [2] 程效伟. 光纤布里渊温度和应变分布同时测量系统研究, 硕士学位论文, 华北电力大学, 2007.
- [3] Z. Amira, B. Mohamed, E. Tahar, Monitoring of temperature in distributed optical sensor: Raman and Brillouin spectrum[J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, 127(8): 4162-4166.
- [4] M. C. Farries, M. E. Fermann, S. B. Poole, et al. Distributed temperature sensor using holmium-doped optical fiber[C]. In *Proceedings of OFC, Reno, NV, USA, 19 January 1987*.
- [5] A. H. Reshak, M.M. Shahimin, S.A.Z. Murad, S. Azizan, Simulation of Brillouin and Rayleigh scattering in distributed fibre optic for temperature and strain sensing application[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 190: 191-196.
- [6] A. H. Hartog, A distributed temperature sensor based on liquid-core optical fiber[J]. *IEEE J. Lightwave Technology*, 1983, 1(3): 498-500.
- [7] A. H. Hartog, A. P. Leach, M. P. Gold, Distributed temperature sensing in solid-core fiber. *Electronics Letters*, 1985, 21(23): 1061-1062.
- [8] M. K. Barnoski, M. D. Rourke, S. M. Jensen, et al. Optical time domain reflectometer[J]. *Applied optics*, 1977, 16(9): 2375-2379.
- [9] H. F. Taylor and C. E. Lee. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing: U.S. Patent 5,194,847[P]. 1993-3-16.
- [10] Y. Q. Li, J. Wang, Z. Yang. A method for improving BOTDR system performance[C]. *Photonics and Optoelectronics (SOPO), 2012 Symposium, Shanghai, China, 21-23 May 2012*.
- [11] A. Motil, A. Bergman, M. Tur, State of the art of Brillouin fiber-optic distributed sensing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 78: 81-103.
- [12] 黄民双, 黄军芬. 光纤移频分布式布里渊光纤传感技术[J]. *光子学报*, 2011, 40(9): 1429-1432.
- [13] Y. Q. Hao, Q. Ye, Z. Q. Pan, et al. Effects of modulated pulse format on spontaneous Brillouin scattering spectrum and BOTDR sensing system[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 46: 37-41.
- [14] T. Zhu, X. Xiao, Q. He, et al. Modulated pulses based distributed vibration sensing with high frequency response and spatial resolution[J]. *Optics Express*, 2013, 21(3): 2953-2963.

- [15] X. F. Zhang, W. J. Hao, Q. Zhang, et al. Development of Optical Fiber Strain Monitoring System Based on BOTDR[C]. Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), Chengdu, China, 16-19 Aug. 2011.
- [16] 张硕. 外差检测布里渊分布型光纤温度和应变传感及信号处理技术研究, 硕士学位论文, 华北电力大学, 2009.
- [17] Y. Sakairi, S. Matsuura, S. Adachi, Y. Koyamada, Prototype double-pulse BOTDR for measuring distributed strain with 20-cm spatial resolution[C]. SICE Annual Conference 2008, Japan, 20-22 August 2008.
- [18] 黄春林. 相干 BOTDR 温度和应变传感系统关键技术研究, 硕士学位论文, 华北电力大学, 2010.
- [19] E. Brinkmeyer. Analysis of the backscattering method for single-mode optical fibers[J]. Journal of the Optical Society of America, 1980, 70(8): 1010-1012.
- [20] S. Heckmann, E. Brinkmeyer and J. Strecket. Long-range backscattering experiments in single-mode fibers[J]. Optics Letters, 1981, 6(12): 634-635.
- [21] 余丽萍. 布里渊散射分布式光纤传感器的理论分析和相关技术研究, 硕士学位论文, 电子科技大学, 2006.
- [22] Y. Q. Hao, Y. L. Cao, Q. Ye, et al. On-line temperature monitoring in power transmission lines based on Brillouin optical time domain reflectometry[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2015, 126(19): 2180-2183.
- [23] T. Blachowicz, M. Grimsditch, Scattering: Inelastic Scattering Technique – Brillouin[J]. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, 2016.
- [24] Y. Q. Hao, Q. Ye, Z. Q. Pan, et al. Analysis of spontaneous Brillouin scattering spectrum for different modulated pulse shape[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(16): 2417-2420.
- [25] H. P. Gong, P. C. Yang, H. Wuliji, et al. Gain characteristic of spontaneous Brillouin scattering in 50 km single-mode fiber with a Raman pump[J]. 2015, 126(20): 2731-2734.
- [26] 周会娟. 基于受激布里渊散射的分布式光纤传感系统及其应用研究, 博士学位论文, 国防科学技术大学, 2012.
- [27] D. Zhang, H. Z. Xu, B. Shi, Brillouin power spectrum analysis for partially uniformly strained optical fiber[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(9): 976-981.
- [28] 何俊. 分布式光纤传感系统关键技术研究, 博士学位论文, 哈尔滨工业大学, 2010.
- [29] Y. C. Xiao, X. Wang, Y. D. Zhang, et al. Bandwidth reconfigurable microwave photonic filter based on stimulated Brillouin scattering[J]. Optical Fiber Technology, 2015, 21, 187-192.
- [30] K. Koizumi, Y. Kanda, A. Fujii, H. Murai, High-speed distributed strain measurement using

- Brillouin optical time-domain reflectometry based-on self-delayed heterodyne detection[C]. 2015 European Conference on Optical Communication (ECOC), Valencia, Spain, Sept. 27-Oct. 1 2015.
- [31] Y. Ding, B. Shi, D. Zhang, Data processing in BOTDR distributed strain measurement based on pattern recognition[J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2010, 121(24): 2234-2239.
- [32] 孙士杰. 基于布里渊散射的分布式光纤温度传感器的关键技术研究, 硕士学位论文, 北京交通大学, 2014.
- [33] Y. Z. Zhang, Z. Y. Xu, R. Wang, H. Zhou, Simultaneous Strain and Temperature Measurement Using a Brillouin Scattering Based Superstructure Fiber Grating Filter[C]. ICEMI '07. 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, Xi'an, China, Aug. 16 -July 18 2007.
- [34] 张丽娟. 基于布里渊散射的双参量分布式光纤传感系统研究, 硕士学位论文, 南京邮电大学, 2013.
- [35] 李达. BOTDR 分布式光纤传感信号处理关键技术研究, 硕士学位论文, 燕山大学, 2013.
- [36] 李程宾. 相干 BOTDR 温度和应变传感系统信号处理技术研究, 硕士学位论文, 华北电力大学, 2010.
- [37] Y. Q. Hao, Q. Ye, Z. Q. Pan, et al. Design of Wide-Band Frequency Shift Technology by Using Compact Brillouin Fiber Laser for Brillouin Optical Time Domain Reflectometry Sensing System[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(5): 1686-1692.
- [38] 徐涛. 外差检测 BOTDR 系统中微波下变频技术研究, 硕士学位论文, 华北电力大学, 2009.
- [39] 李勇涛. 外差检测 BOTDR 温度和应变传感技术研究, 硕士学位论文, 华北电力大学, 2010.
- [40] Y. G. Lu, Y. G. Yao, X. D. Zhao, Influence of non-perfect extinction ratio of electro-optic modulator on signal-to-noise ratio of BOTDR[J]. *Optics Communications*, 2013, 297(15): 48-54.
- [41] C. L. Li, Y. G. Lu, X. P. Zhang, F. Wang, SNR enhancement in Brillouin optical time domain reflectometry using multi-wavelength coherent detection[J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(18): 1139-1141.
- [42] F. Wang, W. W. Zhan, X. P. Zhang, Y. G. Lu, Improvement of Spatial Resolution for BOTDR by Iterative Subdivision Method[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(23): 3663-3667.
- [43] Y. Koyamada, Y. Sakairi, N. Takeuchi, S. Adachi, Novel Technique to Improve Spatial Resolution in Brillouin Optical Time-Domain Reflectometry[J]. *IEEE Photonics Technology*

- Letters, 2007, 19(23): 1910-1912.
- [44] Q. F. Shang, J. Liu, Y. Q. Li, Influence of Temperature Gradient on Measurement Accuracy of BOTDR System[C]. ISA 2009 International Workshop on Intelligent Systems and Applications, Wuhan, China, 23-24 May 2009.
- [45] H. Kwon, S. Kim, S. Yeom, Analysis of nonlinear fitting methods for distributed measurement of temperature and strain over 36 km optical fiber based on spontaneous Brillouin backscattering[J]. Optics Communications, 2013, 294: 59-63.
- [46] L. F. Qian, D. Q. Fen, H. Xie, J. Q. Sun, A novel tunable multi-wavelength Brillouin fiber laser with switchable frequency spacing[J]. Optics Communications, 2015, 340: 74-79.
- [47] G.K.W. Gan, K.S. Yeo, F.R. Mahamd Adikan, Y.G. Shee, Four-wave-mixing-assisted Brillouin fiber laser with double-Brillouin-frequency spacing[J]. Optical Fiber Technology, 2015, 21: 198-201.
- [48] Cesar A. López-Mercado, Vasily V. Spirin, Sergey I. Kablukov, et al. Accuracy of single-cut adjustment technique for double resonant Brillouin fiber lasers[J]. Optical Fiber Technology, 2014, 20(3): 194-198.
- [49] D. Mallek, A. Kellou, H. Leblond, F. Sanchez, Instabilities in high power fiber lasers induced by stimulated Brillouin scattering[J]. Optics Communications, 2013, 308: 130-135.
- [50] 王高猛. 宽带可调谐的瓦级单纵模及多波长布里渊光纤激光器的研究, 硕士学位论文, 上海交通大学, 2013.
- [51] 唐健冠. 基于布里渊散射的多波长光纤激光器及分布式光纤传感研究, 博士学位论文, 华中科技大学, 2011.
- [52] 刘毅. 硅基微环谐振腔光信号处理与布里渊光纤激光器的理论和实验研究, 博士学位论文, 天津大学, 2013.
- [53] 王如刚, 周六英, 张旭萍. 高稳定性布里渊环形激光器的研制与性能研究[J]. 光电子 激光, 2013, 24(10): 1885-1887.
- [54] 刘毅, 于晋龙, 王文睿, 潘洪刚, 杨恩泽. 基于反馈光纤环的窄线宽单纵模布里渊光纤激光器[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1014003-1-1014003-5.
- [55] 张萍萍, 杨远洪, 陈淑英. 布里渊光纤环形激光器技术发展[J]. 红外与激光工程, 2008, 37: 59-63.
- [56] 詹黎, 顾照昶, 邢亮, 钱楷, 沈启舜, 夏宇兴. 光纤布里渊激光器和放大器的研究进展及其应用[J]. 中国激光, 2010, 37(4): 902-909.
- [57] X. H. Feng, L. H. Cheng, J. Li, Z. H. Li, B. O. Guan. Tunable microwave generation based on a Brillouin fiber ring laser and reflected pump[J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43(7): 1355-1357.

- [58] R. Parvizi, H. Arof, N.M. Ali, H. Ahmad, S.W. Harun, 0.16 nm spaced multi-wavelength Brillouin fiber laser in a figure-of-eight configuration[J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, 43(4): 866-869.
- [59] 贾颖. 掺铒光纤放大器的优化设计及实验研究, 硕士学位论文, 安徽理工大学, 2015.
- [60] R. G. Wang, L. Y. Zhou, X. P. Zhang, Performance of Brillouin optical time domain reflectometry with erbium doped fiber amplifier[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, 125(17): 4864-4867.

