

全国大学生物理实验竞赛 研究报告

课题名称：基于射频调制的光纤环干涉仪相移解调双参量传感系
统

选题类别：（创新）命题类—光纤

目录

全国大学生物理实验竞赛.....	1
1 引言.....	3
1.1 题意理解.....	3
1.2 研究背景.....	3
2 目标定位.....	5
3 实验用具.....	6
4 实验原理及设计.....	7
4.1 光纤测温基础理论.....	7
4.2 基于光纤传感器的微波调制原理.....	10
4.3 核心仪器的工作原理.....	12
4.4 基于相移放大的双参量解调原理.....	13
5 实验的实现与操作.....	14
6 实验结果及分析.....	19
7 不确定度计算与误差分析.....	23
7.1 不确定度计算.....	23
7.2 误差分析.....	24
8 总结与展望.....	24
8.1 实验成果.....	24
8.2 竞赛收获.....	25
8.3 未来展望.....	25
9 参考文献.....	26
10 附录.....	27

1 引言

1.1 题意理解

光纤的折射率是其光学性质的一个重要参数，它表征了光在真空中传播速度与在光纤中的传播速度之比。随着温度的升高，材料内部的原子或分子振动加剧，这种微观层面的变化通过增强光的散射和吸收过程，最终导致了材料折射率的改变。对于光纤而言，温度升高会导致光纤折射率增大；反之，温度降低则会使光纤的折射率减小。此外，温度的变化会引起光纤的几何尺寸变化，即热膨胀现象。光纤通常由二氧化硅等材料加以掺杂制成，这些材料在受热时会膨胀，而在受冷时会收缩，当温度发生变化时，光纤的长度会发生微小的变化。由于折射率和光纤长度的变化，光在光纤中的光程也会发生变化，光程的变化直接影响了光信号在光纤中的传输时间和相位，这对于光纤通信和传感系统来说是非常重要的。

光纤温度传感器的研究本质就是解调光在光纤中传播的光程大小或者时延大小。通过测量光在光纤中传播的时间或相位变化，可以反推出光纤的温度变化。光纤温度传感器利用光纤自身作为传感元件，通过测量光信号在光纤中的传输特性来感知温度。光纤温度传感器通常包括光源、光纤、调制器、探测器等部分。光源发出的光信号经过光纤传输到传感区域，在传感区域内光信号与温度相互作用后发生变化（如强度、波长、相位等），然后经过探测器接收并解调，最终得到温度信息。

综上，我们对光纤温度传感器的研究是基于温度对光纤折射率和几何尺寸的影响，通过解调光在光纤中传播的光程大小来实现对温度的测量。

1.2 研究背景

随着科技的不断发展，温度测量在许多领域都扮演着至关重要的角色，如工业控制^[1]、环境监测^[2]、生物医学^[3]等。传统的温度测量方法在某些特定环境下可能受到限制，如电磁干扰^[4]、高温高压^[5]等。因此，开发一种高精度、高稳定性的光纤温度传感器具有重要的实际意义和应用价值^[6]。

传感器正朝着灵敏、精确、适应性强、小巧化和智能化方向快速发展。其中，光纤温度传感器作为一种新型的温度测量技术，具有许多传统温度传感器无法比拟的优点。首先，光纤传感器采用光纤作为传输介质，具有抗电磁干扰、耐腐蚀、

耐高温高压等特点，适用于各种恶劣环境。其次，光纤传感器采用光信号进行传输和测量，具有高精度、高灵敏度、高稳定性等优点^{[7][6]}，能够满足精密测量的需求。此外，光纤传感器还具有体积小、重量轻、易于安装等优点，便于在实际应用中进行集成和部署^{[9][9]}。

近年来，随着光纤技术的不断发展和应用领域的不断拓展，光纤传感器的研究和应用也取得了显著的进展。目前，光纤传感器已经广泛应用于工业控制、环境监测、生物医学等领域，并展现出广阔的应用前景^{[11][12]}。光纤干涉型传感器利用光纤作为敏感元件，通过检测光在光纤中传输时产生的干涉现象来测量各种物理量。它作为光纤传感技术的重要分支，已广泛应用于各种领域^[13]。

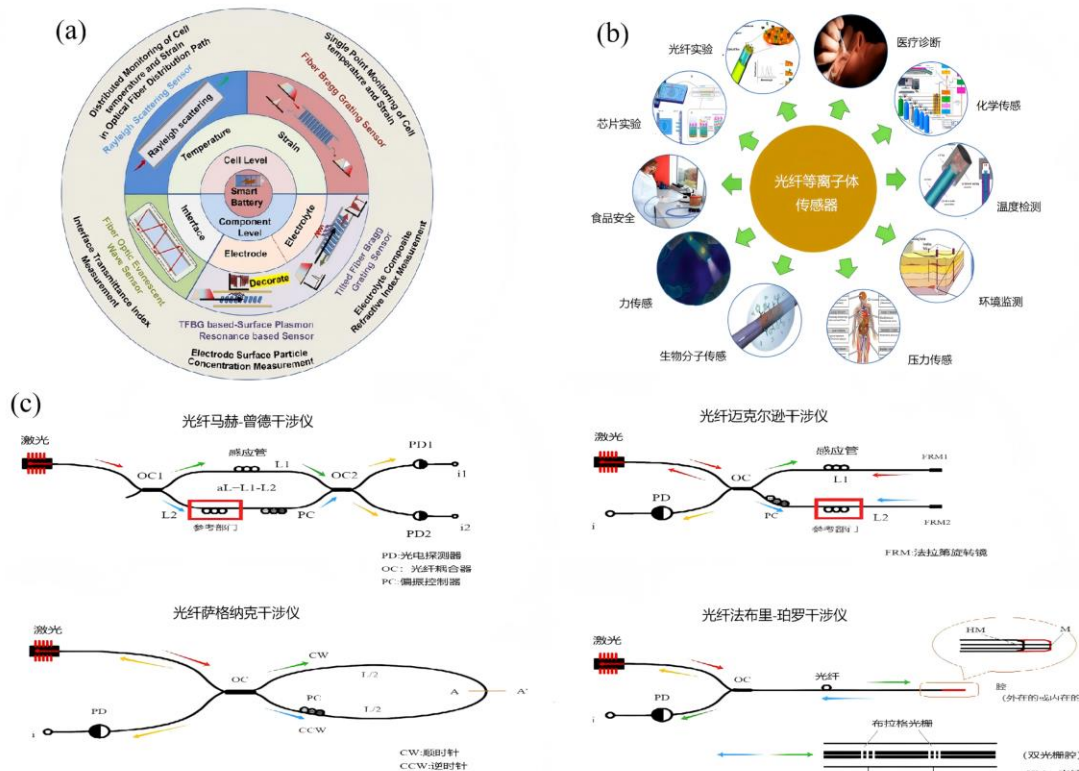


图 1 (a) 光纤传感器在电池领域的温度、应力等多功能测量的应用^[11]；(b) 光纤等离子体传感器在各个领域的应用^[12]；(c) 几种常见光纤干涉型传感器示意图^[13]

光纤环干涉仪（Fiber optic ring interferometer, FORI）是一种可以用于波长选择、能量存储、时延控制和增强光与物质相互作用能力的基本光学元件，同时由于其小尺寸、轻重量和抗电磁干扰等优点，在各种光学应用中都得到了广泛研究^{[14][15]}。然而，传统的光纤干涉型传感器主要依赖光谱追踪法进行解调，这种方

法往往伴随着较长的解调时间、高昂的光谱分析设备成本以及较弱的抗干扰性能，这些限制因素影响了其在实际应用中的广泛性和效果。另外，时域脉冲法也是一种常用的光纤传感器解调方法，但由于 FORI 中的光波衰荡时间较长，这会导致解调时间的进一步增加，从而使得基于时域脉冲解调的 FORI 在实际应用中受到一定的限制。

光载无线通信（Radio over fiber, ROF）技术是通过无线融合光技术的一种通信技术，为了更好地适应光载通信技术而产生的，目前正朝着高宽带、低成本、无电磁干扰的无线体制接入发展，其作为一种融合光纤通信与无线通信优势的新型技术，引起了学术界和产业界的广泛关注^[1]。该技术通过将射频信号调制在光载波上，依托光纤的低损耗特性与高带宽优势，实现了信号的长距离、高效传输。随后，通过光电转换技术，这些信号以无线形式精准送达终端用户，有效解决了传统无线系统面临的“最后一公里”难题^{[17][18]}。基于 ROF 的射频调制方法不仅兼具光纤传感的高灵敏度以及射频信号抗偏振衰退和外界环境干扰的优点。然而，常规的基于幅度解调的方法易受到光源功率波动以及系统中电学链路引入噪声的影响，且解调灵敏度高度依赖于频率分辨率，这不仅不利于快速实时动态解调，还会导致更高的设备成本。

因此，本实验意在通过设计并验证一种新型的光纤温度传感系统，进一步提高其测量精度和稳定性，为实际应用提供更好的技术支持。

2 目标定位

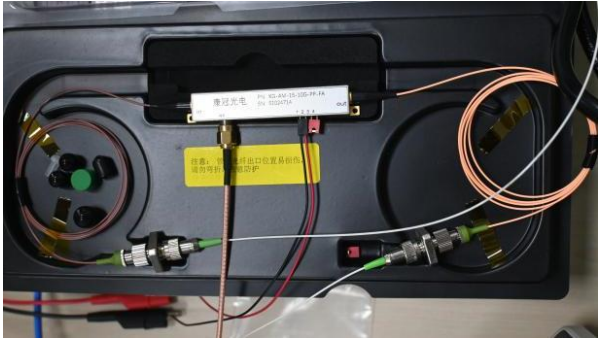
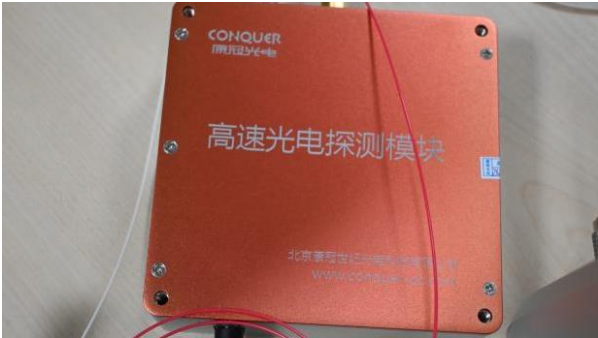
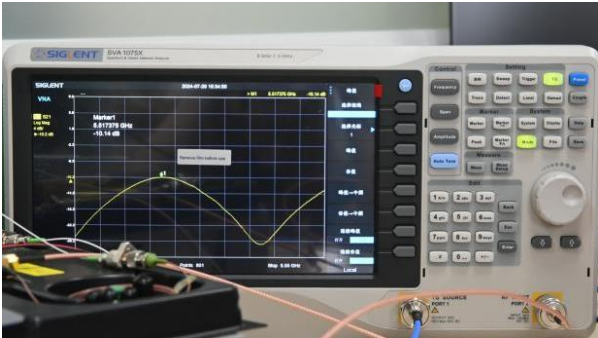
本实验的主要目标是通过设计并搭建基于射频调制的光纤环干涉仪双参量传感系统，验证其在不同温度下的测量精度和稳定性。具体目标包括：

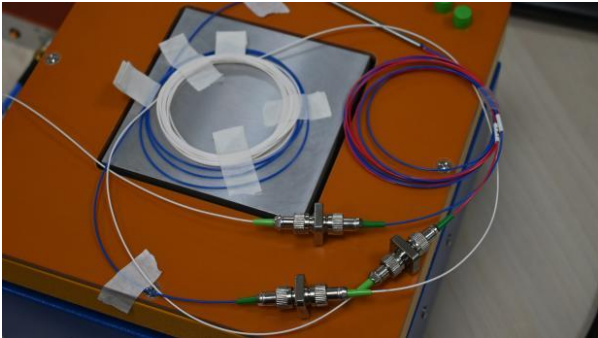
- (1) 设计种基于 FORI 的射频调制传感系统；
- (2) 搭建实验系统，包括光纤放大器、光纤耦合器、光纤环、矢量网络分析仪等关键设备；
- (3) 通过调节光纤环的长度和射频信号的频率，把微波信号调制在光波上生成光载微波，进而利用光载微波在光纤环中循环往复传播放大射频信号的相位变化，从而基于相移放大技术在纵向和横向两个维度上根据相移变化来同时测量光纤中的损耗和温度；
- (4) 为光纤环干涉仪传感器提供新的解调方法，实现温度、损耗的高灵敏度

无串扰解调，有助于在复杂环境下对多种参量进行复用传感；

(5) 分析实验结果，评估光纤温度传感器的性能，并提出改进方案。

3 实验用具

实验器材	简称	图片
光纤放大器	EDFA	
电光调制器	EOM	
光电探测器	PD	
矢量网络分析仪	VNA	

实验器材	简称	图片
加热台	-	
光纤环干涉仪	FORI	

4 实验原理及设计

4.1 光纤测温基础理论

本研究的创新点在于将射频调制技术应用于 FORI 双参量传感技术中，可为传统传感技术带来新的视角及突破点，有望能提升传感性能，拓宽 FORI 传感技术的应用范围。光纤是光导纤维的简称，由纤芯、包层、涂覆层和护套组成，其结构如图 2 所示。光纤的核心部分是纤芯和包层，纤芯由高度透明的材料制成，是光波的主要传输通道；包层的折射率略小于纤芯，使光的传输性能相对稳定。纤芯粗细、纤芯材料和包层材料的折射率，对光纤的特性起决定性影响。

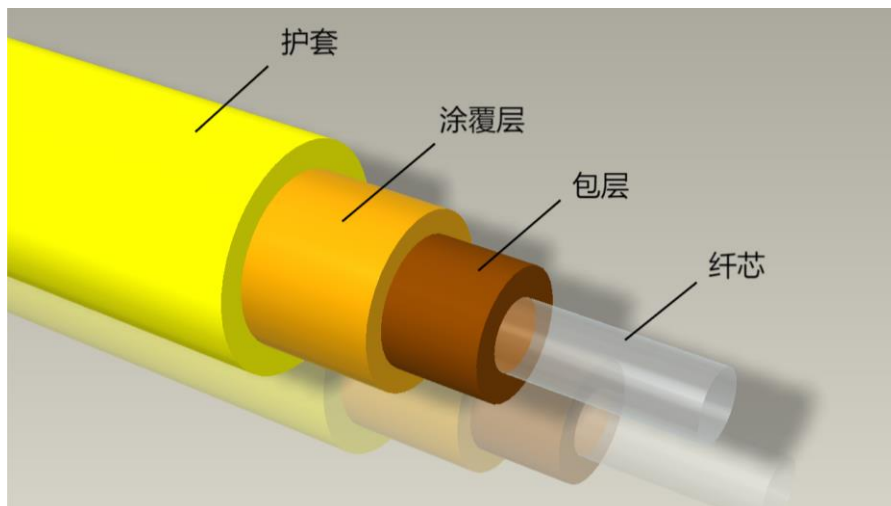


图 2 光纤结构示意图

光纤传输的原理基于光波的全反射效应。当光波从光密介质进入光疏介质时，由于折射率差异导致光波被全反射，沿着光纤的轴线一直传播。而在光纤的两端，使用光源和接收器，将电信号转换成光信号并传输到另一端，再将光信号转换回电信号，完成信息的传输。光信号在光纤中传播时，会受到光纤材料特性的影响。当温度发生变化时会导致光纤材料特性的微小变化，进而影响到光的传输特性。使得光束发生干涉。接着为了了解温度变化对干涉图样造成的漂移影响，需要理解干涉的定义及产生干涉的原因。干涉是指两列或多列波在空间相遇时相互叠加，在某些区域始终加强，在另一些区域则始终削弱，形成稳定的强弱分布的现象。其次了解干涉图样对光程差的反映，进而通过监测干涉图样的漂移情况，即根据漂移的程度和方向来推断光程差的变化。当光程差发生变化时，会导致两束相干光之间的相位差发生改变。根据干涉原理，相位差的变化会使干涉图样中的亮条纹和暗条纹的位置发生移动，从而出现干涉图样的漂移现象。假设本实验中两束光载微波的光程差为 $\Delta L = nL$ ，光的波长为 λ ，它们的相位差为 $\Delta\phi$ 。则可用如下公式展示：

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \times \Delta L \quad (1)$$

可以知道当光程差增加时，相位差也会增加，原来的亮条纹位置可能会变成暗条纹位置，暗条纹位置可能会变成亮条纹位置，从而使干涉图样向某个方向漂移。反之，当光程差减小时，干涉图样会向相反的方向漂移。然后通过设计出合

适的波导结构使之产生合适稳定的光程差并加以监测。本次实验中传感器光程差的产生是通过光纤环来实现的，如图 3 所示为基于 FORI 的射频调制传感系统示意图，光通过光纤耦合器进入光纤环，当一束光进入后，其中 90% 的光束不会进入环中，只有 10% 的光束会进入。而这 10% 的光束在环内每传播一圈，再次到达耦合器位置时，光束便会从耦合器中输出其现存量的 10%。在这之中，环腔中的光束第一次从耦合器输出的这 10%，与剩下的 90% 再次传播了一圈之后输出的 10% 的光束，它们之间就相差了一圈的光程差。

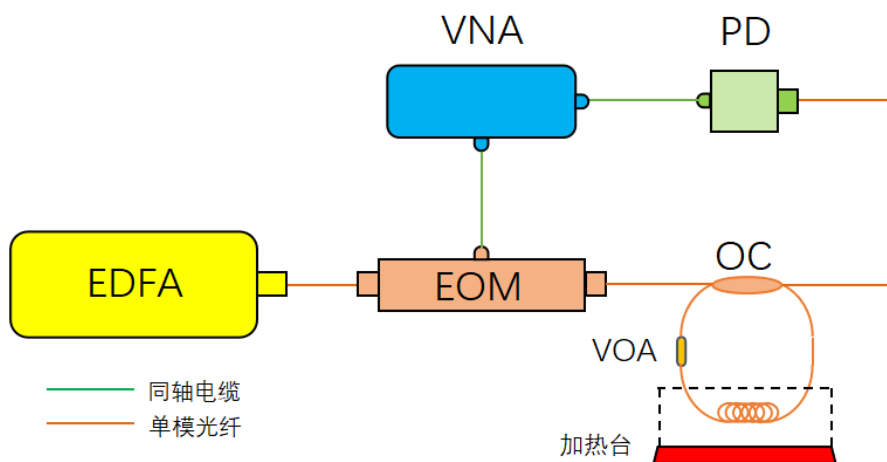


图 3 基于 FORI 的射频调制传感系统

最后分析光程差的变化就能反馈温度的变化，实现对温度的精准测量。当实验过程中的温度产生变化时，物质的分子结构和热运动状态会发生改变，从而影响到介质的折射率和光在介质中的传播速度。对于光纤环来说，当温度升高时，其中分子的热运动加剧，使折射率增大。反之，当温度降低时，折射率会减小。由于光程差等于光纤环一圈的长度乘以折射率，当折射率发生变化时，光程差也会随之改变。公式如下：

$$f = \frac{mc}{nL} \quad (2)$$

式中 f 为频率， m 为表示极次的一个常数， c 表示光速， n 表示光纤的有效折射率， L 代表实际物理长度。实验中，当温度升高导致折射率增大时，光程差会增大；当温度降低导致折射率减小时，光程差会减小。所以，温度变化时折射率改变，导致光程差变化，从而使干涉图样发生漂移，通过监视图样漂移情况即可判断温度的变化。

4.2 基于光纤传感器的微波调制原理

同时，我们还讨论了在实际应用中如何避免非目标物理量对测量的干扰，为了在实际应用中对可能产生的误差进行补偿，以减少对测量结果的影响。实际研究中还对微波的干涉加以利用，通过将经过适当的预处理后满足输入要求的微波信号引入到电光调制器中，再由电光调制器利用材料的电光效应，实现对由高精度、稳定性的激光器所产生出的单一频率、连续稳定的光波的电光调制。其中材料的电光效应是指某些材料在受到外加电场作用后，其光学介电性能（如折射率、吸收系数等）随外加电场变化的特性。

此时，调制器内部的电场会发生变化，同时其折射率也发生变化，进而使得通过调制器的光波的强度产生相应的变化。而这就使得微波信号的信息被编码到光载波的相应参数上，实现了电信号与光信号之间的传输与转换。而光载波强度可在 t 时刻由以下形式表达：

$$I_{input} = A \cos(wt) \quad (3)$$

其中， A 代表输入光强度的振幅，而 w 则为调制信号的角频率。在微波调制过程中，通过精细调整调制参数，使微波功率处于较高水平，确保了微波信号在传输过程中能保持足够的强度，让其信噪比和分辨率得到提高。信噪比的提高减少了因信号衰减而导致的测量误差，从而直接提高了测量结果的可靠性。而信号分辨率的提高，则保证了其对目标物体特征地精确捕捉和测量。并且光载微波的传播速度等于光波的传播速度，也使得微波测量系统在实时测量中具有较快的响应速度和较高的测量效率。

本实验中，为了简化接收端的解调过程以及提高系统的兼容性，我们选择进行强度调制，即当微波信号的幅度增大时，光载波的强度也会相应增强；反之，当微波信号的幅度减小时，光载波的强度也会减弱，这就使得解调出的电信号具有直观、易于检测的优点。

这时，当光纤受到温度变化的影响时，其折射率会发生变化，导致光波承载着的微波信号之间产生相位差。所以，光波在光纤环中每完成一圈的传输，都会经历相位和强度的变化并反馈到微波信号上。而光波在光纤环中传输 N 圈后，其光强可以表达为以下形式：

$$I_N = A(1 - K)^2 T^N K^{2N} \cos(wt + \varphi_1 - N\Delta\varphi_0) \quad (4)$$

在此公式中, T 代表光纤环的透过率, 环的损耗可以通过 $-10\lg(T)$ 来计算。
 $\Delta\varphi_0$ 是光波沿光纤环谐振器传输一圈所产生的相位差, 它可进一步表示为:

$$\Delta\varphi_0 = nwL/c = 2\pi nLf / c \quad (5)$$

这里的相位差 $\Delta\varphi_0$ 描述了光波在光纤环中每传输一圈时相位的累积变化。

波长为 1550 nm 的光其对应频率光的频率约为 193 THz, 而其所承载的微波的频率为 100 MHz, 那么在 T 与 M 之间便相差了 10 的 6 次方, 让测量过程中温度的变化范围不会超出其本身一个周期的量程, 使得我们实际的测量温度处在频率变化的动态范围之内。此外, 光载微波的稳定性较高, 能够降低调制过程中来自噪声、尘埃、湿度、应力等因素的干扰, 并且在光波测量灵敏的基础上提升了它的抗干扰能力。在经过光纤环之后, 其输出端光强 I_{out} 可化简为以下公式:

$$I_{out} = \frac{(1-K)^2 A}{1 - 2D\cos\Delta\varphi_0 + D^2} \cdot [\cos(wt + \varphi_1)(1 - D\cos\Delta\varphi_0) + \sin(wt + \varphi_1)D\sin\Delta\varphi_0] \quad (6)$$

在常规光学解调中通常采用光谱仪来探测基于光纤中光波干涉所产生的亮暗条纹的漂移, 而光谱仪的分辨率与成本、解调速度是相悖的。但在本次实验中, 我们使用矢量网络分析仪对光载微波进行兆赫兹变化量的观测, 相比于传统的光学干涉, 使用光载微波干涉则具有更好的抗干扰能力、抗偏振衰退能力和更大的动态范围, 同时基于频率响应分析可以得到较高的灵敏度和响应速度。

接下来, 为了简化计算的流程及方便后续的讨论, 我们可以将穿过光纤环谐振器 (FRR) 的总相位差 φ 近似表达为以下形式:

$$\varphi \approx \varphi_1 - \frac{D\sin\Delta\varphi_0}{1 - D\cos\Delta\varphi_0} \quad (7)$$

其中, 当 $\Delta\varphi_0$ 表示为 $\frac{nwL}{c}$ 时, 上式可进一步具体化为:

$$= \varphi_1 - \frac{D\sin\left(\frac{nwL}{c}\right)}{1 - D\cos\left(\frac{nwL}{c}\right)} \quad (8)$$

该公式揭示了相位差 φ 与几个关键参数之间的依赖关系: 光纤环的相移 $\Delta\varphi_0$ 、系统的透过率 T (相关于 D , D 表示反射/耦合系数), 以及自耦合比 K (间接影响于 D)。值得注意的是, 随着光纤环内损耗的增加, 透过率 T 会相应减小, 从而导致相位差 φ 发生变化。通过精细调控光纤环的长度 L 和调制频率 w , 使得 $\Delta\varphi_0$ 恰好等于 $k\pi$ (k 为整数, 包括 0, 1, 2...), 此时相位差 φ 将稳定保持在 φ_1 , 这一状态

下，光纤环内的损耗变化以及耦合器的分光比变化均不会对 φ 产生影响。另一方面，若将 $\Delta\varphi_0$ 调整至 $(k + 1/2)\pi$ ，则相位差 φ 与透过率 T 之间将呈现出线性关系，这种特性不仅简化了系统分析，还巧妙地提升了系统的灵敏度，实现了性能上的优化。

4.3 核心仪器的工作原理

为了更好的理解之后的实际测量，我们还需要了解搭建实验平台所需各器件的基本原理。在这里，我们所选择的光源是掺铒光纤放大器（Erbium-Doped Optical Fiber Amplifier, EDFA），它的光纤芯中掺入了铒离子，通过泵浦光源提供能量，使铒离子处于激发态，当输入了一定波长的信号光时，激发态的铒离子便会在信号光的作用下发生受激辐射，从而实现对信号光的放大。其可作为实际测量时补偿光信号于传输过程中损耗的重要部件之一，能够显著增强光信号的强度，减少信号在放大过程中引入的额外噪声。它用于输出 C 波段的宽谱光，波长的范围在 1530 到 1565 nm 之间，横跨了 35 nm，此时，光纤在该波段中表现出最低的损耗，允许同时放大多个波长的光信号，还可降低光信号在实验过程中光学抖动对射频信号造成的失真等影响。我们所使用的信号源是矢量网络分析（Vector Network Analyzer, VNA），它适用于在较宽的频率范围内进行测量，能够产生合适的扫频射频信号，并对接受信号的幅度和相位进行处理和分析，从而得到高精度和高分辨率的测量数据。本实验用到的光纤耦合（Optical Coupler, OC）基于光的传播和耦合特性，可将输入的光信号按照一定的比例分配到多个输出端口，具有高方向性和低插入损耗的特点。而光纤环干涉仪（Fiber optic ring interferometer, FORI），是一种高精度、非接触式测量仪器，使被分为多束的光在光纤环内传输后，能在经过不同的光程后再次汇聚。承担电光转换功能的器件是光电探测器（Photoelectric Detector, PD），它则是基于光电效应，当光照射到探测器的敏感材料上时，光子的能量被吸收，从而产生电子-空穴对。这些载流子在外电路的作用下形成电流或电压，实现了光到电的转换。采用加热台对 FORI 施加温度变化，基于热光效应，光纤的折射率会随着温度的变化而变化。其中这一现象可以通过以下公式表示：

$$n = n_0 + \alpha T \quad (9)$$

式中 n 是实际折射率， n_0 是初始折射率， α 是热光系数， T 是温度变化量。

光纤环中还嵌入了可调谐光衰减器（Variable Optical Attenuator, VOA），VOA 能够精确地控制光信号的功率，为各通道波长提供稳定的衰减量，使光波在光纤环中的传播损耗得到有效控制，进而影响本实验中调制的射频信号的功率和相位。

4.4 基于相移放大的双参量解调原理

在掌握了实际搭建平台的各器件原理后，我们需要实现对关键参量的独立解调。我们通过建立数学模型并以此分析干涉的各项影响指标及其数值，从而在结构化调查中得出改变调制频率可调控 FORI 对温度和损耗的灵敏度^[19]。其中光纤环中的损耗会引发其光学长度、延迟时间和折射率上的变化，导致光波的相位发生改变。例如在本实验的光纤耦合器中，由损耗引起的输出相位差相对于无耗时，其偏离值显著增加。并且它的损耗特性会随着时间的推移而加剧，导致光纤环的透过峰宽度变大，从而降低其相干性。为了深入探讨光纤环相移如何影响透过率的灵敏度，我们通过相位放大因子 G 来量化透过率变化时相位差的变化速率，具体表达式为：

$$G = \frac{d\varphi}{dT} = - \frac{K^2 \sin \Delta\varphi_0}{(1 - TK^2 \cos \Delta\varphi_0)^2} \quad (10)$$

相位放大因子 G 可以直观地反映相位差随透过率变动的快慢程度。该因子的数值受到多个因素的共同作用，包括光纤环的初始损耗状态、环的物理长度，以及射频信号的工作点选择。通过精心调整调制频率，可以在传感器上观察到一系列具有特定性质的工作点。例如，当 $G=0$ 时，系统处于不敏感点，此时透过率的变化不会引起相位差的显著改变；而在线性工作点， G 保持为非零常数，相位差与透过率之间呈现线性关系，便于数据处理和分析；此外，还存在非线性工作区，其中 G 作为变量变化，允许系统在不同工作条件下展现出更为复杂的响应特性。

接着，在对不同频率信号下的相位漂移进行研究后，可以发现 FORI 的相位谱在频率响应中呈现周期性曲线。所以当光纤环的光程发生变动时，其直接后果是对相位谱的周期性产生显著影响。

为了深入探究不敏感点的工作频率与光纤环长度之间的内在联系，我们采用调节温度的方法来改变光纤环的实际长度。根据理论，第 k 个不敏感点的调制频率由公式 $f = kc/2nL$ 确定，这意味着当 $\Delta\varphi_0$ 等于 $k\pi$ 时，相位差将保持恒定，不受透过率变化的影响。而考虑到温度等环境因素对光纤环有效折射率 n 和长度 L 的乘积 nL 的潜在影响，我们通过对调制频率进行微分分析，得出了不敏感点频率

偏移 Δf 与原始频率 f 之间的相对关系，具体表达为：

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{\Delta(nL)}{nL} \quad (11)$$

在此表达式中， $\Delta(nL)$ 代表由温度变化引起的光纤环光程的微小变动。由于温度对光纤环光程的影响相对细微，我们可以合理地将这种影响近似为线性关系，即 $\Delta(nL)$ 与温度的变化量呈正比。进一步观察上述公式，我们可以发现，通过提高调制频率 f ，可以有效地增强基于频移的温度灵敏度。这意味着，在设计基于光纤环的传感器时，适当选择较高的调制频率可以显著提升系统对温度变化的响应能力，进而让温度更容易影响频谱仪的谱线漂移。又由于频谱仪里高频率信号的波长较短，使得即使是小幅度的物理变化也会显著影响其相位。但当调制频率在兆赫兹频率范围内，温度对相位谱的影响可以忽略不计，因此可以认为相位谱对温度不敏感。然而，此时损耗对相位谱的影响在相移大小上有较大体现，其灵敏度只在一个周期内随调制频率的变化而变化。因此，通过对载波信号频率加以控制，我们便可实现对损耗与温度这两种参量的独立解调。

5 实验的实现与操作

在实验原理部分曾提及到本实验的自变量为温度，由此，实验设计的要求是对温度实现精准测量。为实现此目标，我们用心策划了实验装置的配置，将光纤环中从传感区域盘成大小合适的线圈紧密贴合在加热台表明，从而确保了加热过程的精确性与稳定性。在导师的悉心指导下，我们进行了广泛的市场调研与设备选型，最终采购了内核为圆形的方状加热台。方状外壳便于实验操作与固定，而内置的圆形加热核心则刚好契合了实验需求，实现了形式与功能的和谐统一。为了深入探究温度变化如何具体作用于实验结果，我们需要对实验设计和操作步骤进行周密部署，这将帮助我们更好地完成本次实验。

接下来，为了制定合适的操作流程，我们成员基于实验原理图经过了以下讨论并设计出思维导图。此过程不仅是为了明确每一步骤的逻辑关联，也是为了通过系统化思维提升实验的精确性与效率。起先，我们借助传统工具——纸张与笔，来绘制实验装置的核心组件示意图，然后标注矢量分析仪与加热台的位置，这两大设备是实验框架的基础。

紧接着，我们着手搭建实验的起始与终止状态，即明确实验开始前的准备条

件与预期达成的目标结果。在此基础上，我们梳理了加热条件下，实验流程中各个元素之间的相互作用与信息传递路径。具体来说，我们设计了一条从温度信息出发，经由光电探测器捕捉并转换为电信号，再输送至矢量分析仪进行高精度分析的完整链路。矢量网络分析仪则通过电光调制器将射频信号加载在光波上，产生的光载微波传输到光纤环中，随后被探测器接收并输入到矢量网络分析仪进行分析。通过上述一系列设计工作，我们最终绘制出了一幅逻辑清晰、结构完整的思维导图。该图不仅直观地展示了实验流程的全貌，还揭示了各个环节之间的内在联系与相互依赖关系。思维导图如下：

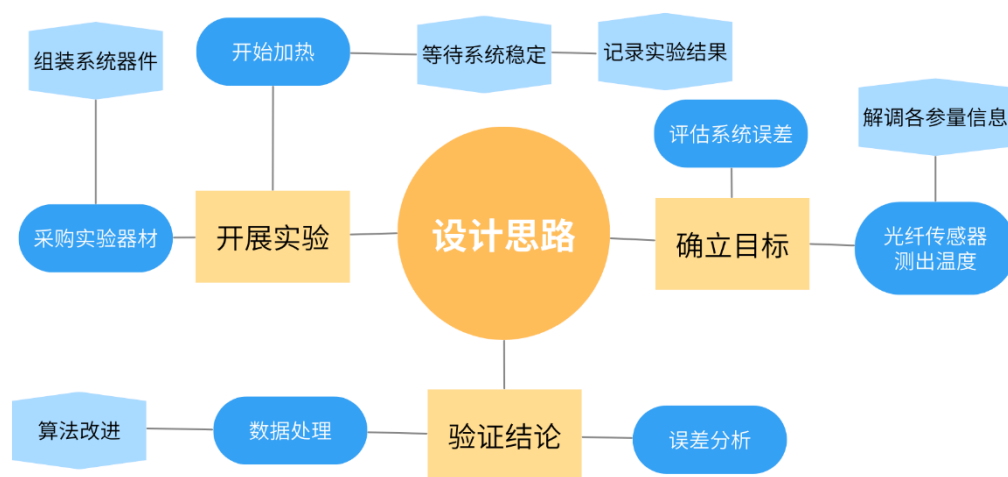


图 3 设计思路

在正式启动实验流程之前，我们执行了关键的第一步：对光纤与电缆端面的清洁度进行谨慎检查。我们采用专业工具与标准流程，逐一审视各端面，确保它们的光洁，无划痕、裂纹或污点。这样的严格要求意在达到最大限度地减少因物理缺陷导致的信号衰减或失真。之后，我们着手组装了长达 16 米的光纤环。我们严格按照设计图纸，使用精度工具，将光纤拼接成环，确保每一部分都符合规范。接下来，我们将光纤环、减衰器、耦合器以及光电探测器等关键组件依次串联起来。这一过程中我们特别注意了光纤接口的对接质量，保障矢量分析仪的高效传输路径。此外，为了构建从矢量分析仪到加热台的逆向控制链路，我们同样采用了高标准电缆连接方案。我们将矢量分析仪与电光调制器通过电缆紧密连接，随后，在光源、电光调制器与光纤环之间精心铺设光纤，确保光载微波信号能够顺利生成、调制并注入光纤环中。至此，我们完成了从加热台到矢量分析仪，以及从矢量分析仪到加热台的双向搭建工作。整个系统结构清晰、逻辑严谨，可为

后续的实验操作与数据分析提供强有力的支撑。

接着在实验的第二步中，我们采取了相应的措施来确保光纤的稳固安装与光束传输的精确控制。首先，我们运用光纤夹子和塑料导轨系统，对光纤进行精确固定。它可保障光纤在后续实验过程中的位置稳定性，且减少因光纤振动或位移可能引起的信号干扰。之后，我们采取了激光检测的办法，使激光依次通过耦合器、探测器、减衰器等关键设备的接口。通过此检测手段来对光束在光学链路中的传输状态进行实时的监测。再将预设的光束特性与实际传输结果进行比对，我们验证了光束在链路中的传输是否符合预期，包括其强度、波长、相位等关键参数是否保持稳定。与此同时，我们还对实验系统中的电学设备进行了检查与调试。我们依次打开了矢量分析仪、光源等关键设备，通过谨慎观察其内部电信号的显示情况，评估了设备的运行状态。为了确保数据的准确，我们还特别关注了电信号的完整性，检查了是否存在信号衰减、噪声干扰等问题。此外，我们还采取措施，清除了实验环境周围的潜在干扰源，如电磁辐射、机械振动等，以进一步提高实验系统的抗干扰能力。在完成上述检查后，我们将所有电学设备牢固地固定于地面，并进行了防松处理。这可防止设备在实验过程中因振动或外力作用而发生位移或松动，从而确保实验系统的稳定性和安全性。同时，我们还特别关注了设备的散热问题，确保其在长时间运行过程中能够保持良好的散热性能，避免因过热而引发的故障或损坏。最后，在完成所有准备工作后，我们依次关闭了相应的设备。这样的实验流程不但可以节省能源和延长设备寿命，还可以确保系统的安全和设备的正常工作。我们深知实验系统的稳定运行对于实验结果的准确性和可靠性具有至关重要的影响，因此我们在每一步操作中都秉持着严谨、细致的态度，力求做到万无一失。

在实验的深入阶段，我们执行了第三步操作，精确调控光源与电光调制器的参数，并通过矢量网络分析仪进行详细的信号分析。一开始，我们启动了光源系统，并耐心等待其完成初始化与预热过程，以确保光源输出达到稳定状态。然后，我们将光源的输出功率精确调整至 20 mW，此类设定为后续的光电转换与信号调制提供了稳定且适宜的光强条件。紧接着，我们将电光调制器的偏置电压设置为 6 V，这样的电压值经过预先的校准与优化，能够确保调制器在最佳工作点运行，从而实现对光信号的有效调制。完成上述设置后，我们启动了矢量网络分析

仪（VNA），在 VNA 的操作界面上，我们将测量模式设定为 S21，即传输增益模式，这一模式能够直接反映信号通过链路后的幅度变化。同时，我们设定了扫频点数为 4001 点，以确保在广泛的频率范围内进行精细的频谱扫描，捕捉到信号特性的细微变化。此外，我们还特别将衰减设置为 0 dB，以保证信号在传输过程中不受额外衰减的影响，真实反映链路性能。在端口配置上，我们把 VNA 的端口 1 配置为输出端口，并设定其输出的微波信号功率为 0 dBm，这便提供了一个标准化的信号源，便于后续的信号处理与分析。接下来，我们针对实验的具体需求，调节了 VNA 的频率范围至 0~500 MHz，这片区间覆盖了众多通信与传感应用的典型频段，有助于我们全面评估光学链路在该频段内的性能表现。最后，为了深入探究信号在传输过程中的相位特性，我们将 VNA 的测量模式切换到了相位谱模式。相位谱能够直观地展示信号在不同频率下的相位变化，为我们揭示光学链路中的相位延迟、色散等效应提供了重要依据。

在实验的第四步，我们开展了频率响应测试，继而评估系统于不同频率下的性能表现。起初，我们记录了多组在 0~500 MHz 频率范围内，光学链路传输信号的幅度值和相位值。随后，我们将记录的数据整理成频率、幅度和相位的记录表，并进行了细致的统计处理。通过计算各频率点数据的平均值，我们可有效降低随机误差对结果的影响。接下来，我们将统计汇总后的数据输入到预先构建的数学模型中。该模型基于系统传输理论，能够综合考虑信号在传输过程中的各种衰减、延迟和相位偏移等因素，从而准确模拟出系统的频率响应特性。在对模型计算与分析后，我们便可绘制出本实验的频率响应曲线，直观地展示系统在不同频率下的幅度增益和相位变化。最后，我们对频率响应曲线进行了深入的分析。通过识别曲线中的关键特征点，如增益下降 3 dB 时对应的频率（即系统带宽）、相位突变的频率点（可能表示谐振或反谐振现象），我们定量地确定了系统的带宽、谐振频率等关键参数。同时，我们还分析了系统在整个频段内的增益变化趋势和相位特性，这些分析结果为我们深入理解系统的传输机制、优化系统性能提供了重要的参考依据。

在实验的第五步，我们聚焦于系统调试与优化，这样便可通过精细的调整来提高系统的性能。我们首先要做的是将所有频率响应测量的结果，包括幅度和相位变化曲线，进行系统的整理与呈现。之后，我们在导师的悉心指导下，深入探

讨论了频率响应曲线的内涵，还特别关注了那些可能指示系统性能不佳的频率范围。通过细致分析，我们识别出了增益不足、相位偏移过大或谐振频率偏离预期等具体问题。针对这些问题，我们制定了针对性的调试策略，并选取减衰器作为优化对象进行初步尝试。接着在调试过程中，我们同样遵循着严谨的操作步骤。首先，根据测量结果逐步微调减衰器的设置参数，每次调整都力求精准且适度。调整完成后，我们立即重新测量相位响应曲线，并详细记录调整后的设置参数值及对应的响应值。这可以保证实验补偿的即时反馈，也可为评估调整效果提供依据。为了使实验结果可复现，我们多次重复了上述调整与测量过程。每次调整都基于前一次的测量结果，继而达到改善系统性能的目的。在不断迭代与优化后，我们逐渐观察到相位响应曲线变得更加线性和平滑，这说明系统性能得到了显著提升。然后，在完成了所有必要的调试与优化后，我们优化后的参数数值进行记录，这些数值将作为后续对照解调实验的基础参数。

第六步启动加热台，测试从室温开始，以每次 10°C 的增量或减量逐步调整温度，确保温度变化的精确控制与记录。在每个温度点达到稳定状态后，我们利用高精度频谱分析仪捕捉并记录系统的关键性能参数，包括中心频率的稳定性、带宽的细微变化，以及相移谱的整体形状与细节特征。然后，对采集的数据按照温度点进行归纳整理，搭建温度-相移谱特性的对应关系表。

第七步，对照解调。刚开始，我们对相移谱变化情况进行观察，通过对比分析不同温度点下的数据，明确了相移谱随温度变化的规律。接着，我们计算了每个温度点相对于室温的偏移量，并据此绘制了偏移量与温度变化的曲线图。之后我们与导师围绕相移谱漂移的机制展开了深入交流，并基于理论分析与实验数据，选取了最合适的解调算法。该算法高效、准确地从复杂的数据中提取出温度变化的关键参数。为了进一步提高数据的信噪比与准确性，我们对采集到的相移谱漂移数据进行了严格的预处理，包括滤波、去噪、拟合等步骤。这些预处理措施有效降低了噪声干扰，提升了数据的可靠性，为后续解调工作打下了坚实基础。最后，我们应用选定的解调算法对预处理后的数据进行了成功解调，提取出了温度变化的关键参数，并以图表形式直观呈现。结合当前科技发展的新时势，我们深入分析了实验结果的应用前景。我们认为，该研究成果在温度补偿机制设计、高精度温度测量、以及基于温度敏感材料的传感器开发等领域具有广泛的应用潜力。

与此同时，我们也指出了未来研究的方向，包括进一步探索温度与相移谱特性之间的深层次关系、优化解调算法以提高数据处理效率与精度等。

在本研究第八阶段，我们开始验证解调算法的准确性与有效性，并深入剖析温度变化对系统性能的影响。我们优先将解调结果与原始数据进行对比，通过统计方法与误差分析技术，来量化解调算法的精度与可靠性。基于解调结果，我们分析了温度变化导致的信号衰减量、测量误差等关键性能指标的变化趋势，明确了温度作为外部干扰因素对系统稳定性与准确性的具体作用机制。这些分析不仅加深了我们对系统温度敏感性的理解，也为后续的优化设计提供了科学依据。随后，我们共同探讨了解调结果中温度变化与系统性能之间的深层关系，结合实验数据与理论分析，提出了针对性的系统设计优化策略与解调算法改进方案。综上，再将降低温度-系统性能影响的线性图作为最终成果。

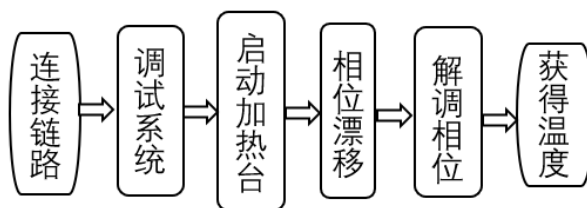


图 4 实验过程流程图

因此，可将实验过程部分用以上结构流程图表示。从光纤传感器的构思出发，通过光纤线路的连接和对系统的调试，奠基了实验的基础，接着在加热台实现温度的逐步调节，并利用频谱分析仪捕捉系统在不同温度下的响应特。随后，运用先进的解调算法对采集到的相移谱数据进行处理，提取出关键的温度参数。最后，对解调结果进行综合分析，并据此提取出精确的温度数据。这一流程图简洁而系统地呈现了从自变量（非量化温度）到输出量（量化温度）的完整研究路径。此时，再将本实验所依托的光纤测温技术置于现有测温技术的对比框架下，其显著优势不言而喻。相比于液体测温计，它完全避免了水银泄露的风险，且容易和互联网相结合，适配时下流行的智能家居等新兴应用，加之人们对精度、稳定的追求，使得对光纤测温的研究需求日益增加。

6 实验结果及分析

在实验设置中，FORI 的光纤环总长度大约为 16 米，其中 12 米的光纤被卷

成线圈状放置在加热平台上,用以进行温度监测。在温度监测光纤与耦合器之间,我们引入了一个可调节的光衰减器。如图 5 所展示的,通过矢量网络分析仪(VNA)获得的 FORI 在 0 至 500 MHz 频率范围内的响应特性,我们可以观察到在幅度谱(图 5 (a))中出现了类似余弦波的周期性干涉模式,其周期大约为 12.5 MHz,这与 16.35 米的光纤环长相对应,两者之间的微小差异可能是由于耦合器的耦合区域长度以及可调光衰减器(VOA)对光程的影响所致。由于系统对不同频率的响应并不均匀,加之 VNA 的短路校准响应存在不平坦性,这导致了幅度谱呈现出不规则的包络形状,这为基于幅度谱的传感信号解调带来了一定的误差和挑战。图 5 (b)展示了 FORI 的相位响应,其值不受外部功率相关噪声的影响,因此,我们选择该相位谱作为参考谱,将后续实验中获得的相位谱与之进行比较,通过计算相位差来实现传感信号的解调。

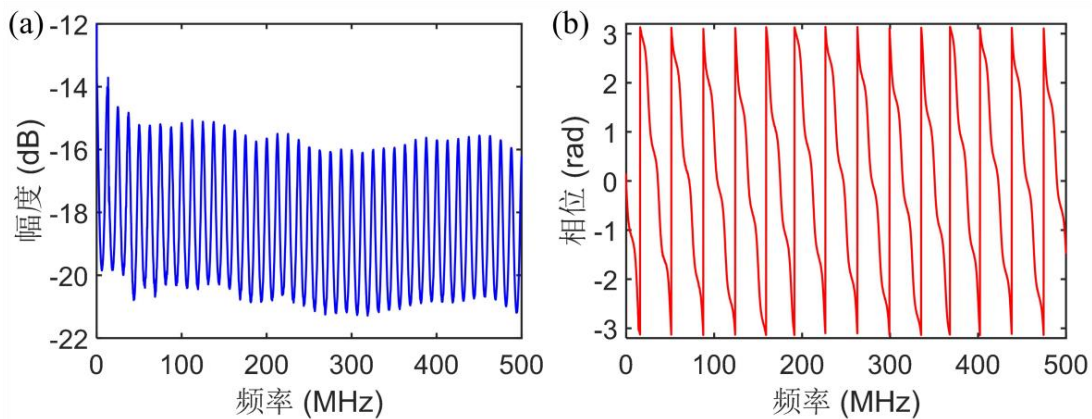


图 5 频率响应的 (a) 幅度谱和 (b) 相位谱

我们首先对 FORI 在较低调制频率范围内(0 至 50 MHz)的相位变化进行了测试,考虑了不同的损耗和温度条件。通过加热台来调节传感光纤线圈的温度,同时利用可调谐光衰减器(VOA)来控制光纤环的透射损耗。图 6 中的(a)、(b)、(c)分别展示了在 10 °C、30 °C和 50 °C时,损耗分别为 1 dB、4 dB 和 8 dB 的相位变化图谱。观察结果表明,随着损耗的增加,相位变化也随之增大。此外,损耗引起的相位变化对调制频率的反应呈现周期性波动,这表明通过调整调制频率可以优化损耗传感的灵敏度。与此相对,相位变化图谱在不同温度下几乎没有变化,这验证了在低调制频率条件下, FORI 对温度变化不敏感的特性。

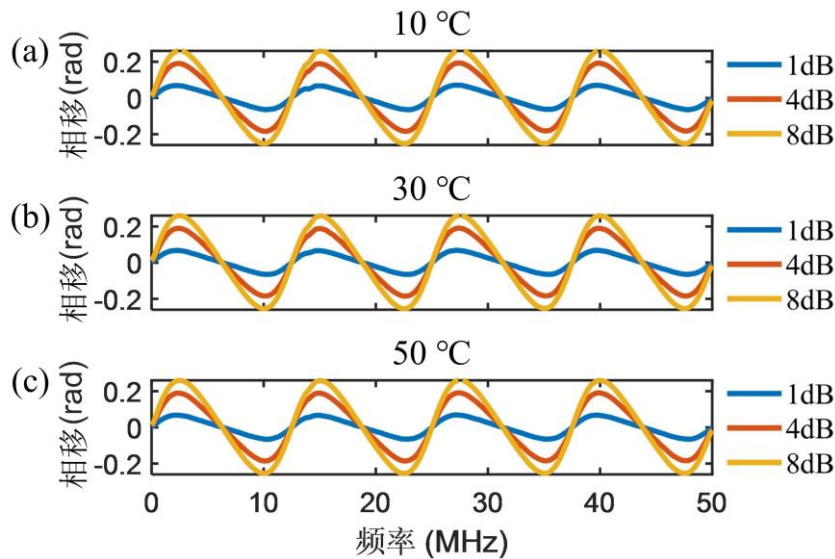


图 6 在 (a) 10°C、(b) 30°C、(c) 50°C 下 FORI 的相移谱

根据实验数据，我们提取了在不同调制频率下，随着温度升高而变化的相移，并在图 7 中以曲线形式展示。为了更直观地展示结果，我们将损耗转换为透射率进行表示。这些结果表明，通过选择适当的调制频率，可以调节透射率传感的灵敏度，从而满足不同应用场景的需求。例如，在调制频率为 9.375 MHz 时，透射率的灵敏度达到 0.282 弧度，并且灵敏度几乎不受温度变化的影响，这验证了通过独立解调损耗来实现传感的可行性。此外，在这个调制频率下，相移与透射率之间呈现出线性关系，表明该频率点为系统的线性工作区域，这种线性特性有利于信号的解调和实际应用。

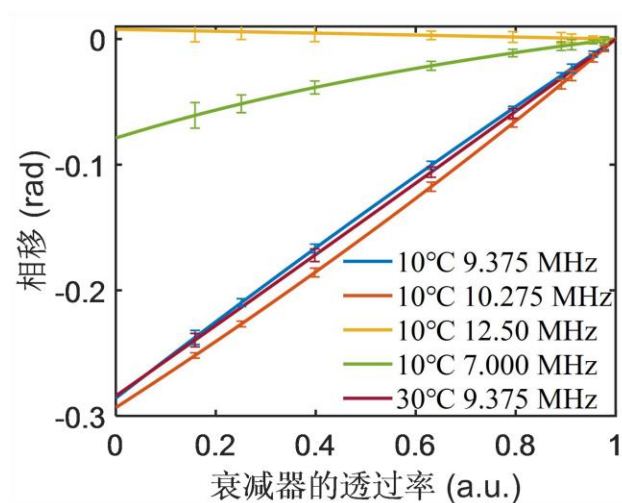


图 7 不同温度和频率下透过率与相移的关系

另一方面，当调制频率为 10.275 MHz 时，FORI 显示出更高的损耗灵敏度，

但此时相移与透射率之间的关系变为非线性，这表明该频率点是系统的最大灵敏度点，显示了 FORI 在损耗传感方面灵活可调的特性。最后，当调制频率为 12.5 MHz 时，相移几乎不随透射率的变化而变化，这表明该频率点为系统的不灵敏区域。

在调制频率较高的情况下，由于温度变化引起的频率偏移在频率域中的累积效应，温度传感的灵敏度会随着频率的增加而提高。为了从相移谱中提取温度变化信息，我们选择相移谱中的零相移点作为关键参考点。这个参考点的频率位置仅与温度相关，因此通过追踪这个频率点，我们可以解调出相应的温度数据。理论上，这个零相移点与之前提到的不灵敏点是一致的。然而，在实际实验中，由于电学链路引入的相位噪声以及 FORI 受到的非均匀温度变化的影响，不灵敏点可能会发生一些漂移。为了简化数据处理和解调过程，我们采用零相移点的频率值作为不灵敏点的数值替代。

实验结果表明，在超过 4 GHz 的高调制频率范围内，不同温度下的相移谱如图 8（a）所示。图中用空心圆圈标出了零相移点的位置。进一步提取这些零相移频率，并绘制它们与温度的关系，如图 8（b）所示。结果显示出良好的线性关系，表明温度传感的灵敏度为-17.47 kHz/°C。

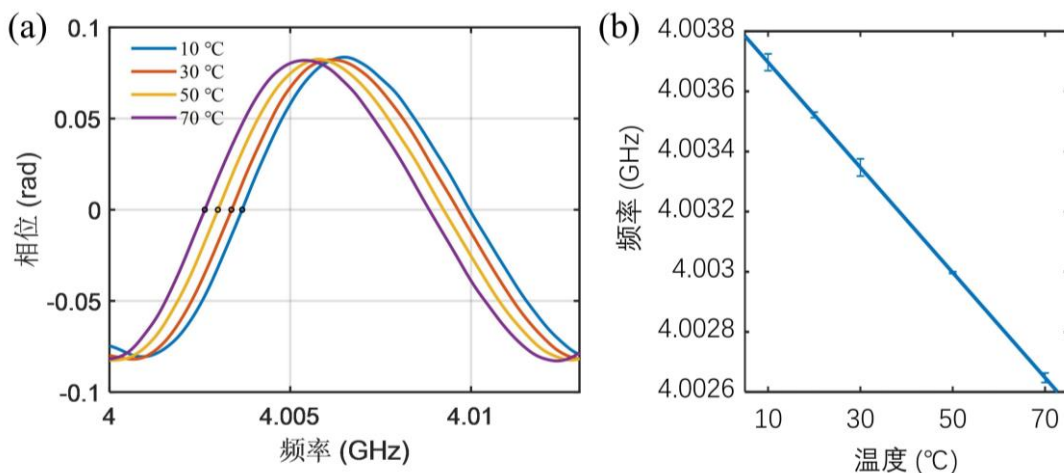


图 8 （a）不同温度下的相移谱漂移；（b）零相移频率与温度的关系

7 不确定度计算与误差分析

7.1 不确定度计算

温度/℃ 频率/GHz	1	2	3	4	5
10	4.00367	4.00367	4.00368	4.00367	4.00367
20	4.00353	4.00353	4.00353	4.00353	4.00353
30	4.00338	4.00337	4.00337	4.00337	4.00337
50	4.003	4.003	4.003	4.003	4.003
70	4.00264	4.00263	4.00265	4.00263	4.00263

表 1 不同温度下频率的测量值

拟合曲线表达式为：

$$y = -17.483 \times 10^{-6}x + 4.0038714 \quad (12)$$

对于光纤折射率而言，通常视其为一不变常数。然而事实上，光纤折射率 n 不仅是波长 λ 的函数，而且还随环境温度 T 及所处应变状态 ϵ 而变化。因而，光纤折射率可一般地用一个状态函数 $n(\lambda, T, \epsilon)$ 来描述。若把零应力状态某一固定波长和恒定温度下的折射率记为 $n(\lambda, T_0)$ 。^[20]由于折射率变化通常很小，因而一般地可在该值附近展开为：

$$n(\lambda, T, \epsilon) = n(\lambda, T_0)[1 + C_T(T - T_0) + C_\epsilon\epsilon] \quad (13)$$

其中 $C_T = 0.811 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ ，在本实验中不考虑应力，即 $\epsilon = 0$ 。

a. 直接测量频率的 A 类不确定度

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum(v - \bar{v})^2}{5(4-1)}} \approx 0.041 \text{ MHz} \quad (14)$$

B 类不确定度

$$u_B = \frac{0.001}{\sqrt{3}} \approx 0.0006 \text{ MHz} \quad (15)$$

直接测量结果的合成不确定度

$$u = \Delta_{\bar{v}} = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0.041^2 + 0.0006^2} \approx 0.04 \text{ MHz} \quad (16)$$

$$v = \bar{v} \pm \Delta_{\bar{v}} = (4003.6 \pm 0.04) \text{ MHz} \quad (17)$$

b. 间接测量温度变化灵敏度 t 的不确定度

$$u = \Delta_t = \sqrt{\left(\frac{\partial n}{\partial v}\right)^2} u_v^2 \approx 0.09 \text{ kHz/}^\circ\text{C} \quad (18)$$

$$t = (-17.47 \pm 0.09) \text{ kHz/}^\circ\text{C} \quad (19)$$

7.2 误差分析

通过分析，数据的误差存在三个来源。

一是光纤环的均匀性。光纤环的均匀性对干涉信号的稳定性和相位差测量有重要影响。实验中光纤环无法做到完全均匀可能会导致相位误差。

二是解调的算法的精度。解调算法的精度直接影响相位解调的准确性，实验用到的解调算法的不够完善可能导致相位误差。

三是系统的稳定性。实验中的重要测量参量是温度，温度变化时间较长，对系统稳定性的要求较高，系统的不稳定性会导致测量结果有所波动。

8 总结与展望

8.1 实验成果

我们通过深入研究光纤测温基础理论，结合射频调制技术和相移放大的双参量调解原理，成功设计并搭建了一种基于射频调制的 FORI 双参量传感系统。通过精细调节光纤环的尺寸与射频信号的频率，我们实现了对光载微波的有效调制和解调。

实验过程中，我们利用光波在光纤环中循环往复传播放大射频信号的相位变化，从而成功地达成基于相移放大技术在纵向和横向这两个独立维度上对损耗和温度的双参量无串扰同时高精度测量。测量结果表明，对透射率的灵敏度达到了 -0.282 rad ，而温度变化的灵敏度则达到了 $-17.47 \text{ kHz/}^\circ\text{C}$ 。

在对基于射频调制的 FORI 双参量传感系统进行性能验证的过程中，我们发现该系统在对温度和损耗的测量方面均表现出良好的线性度和稳定性，且测量精度达到了我们的预期目标。

本次实验不仅为 FORI 传感器的解调提供了新的方法，也实现了对温度和损耗双参量的高灵敏度无串扰解调。相关技术有助于将来被利用在复杂环境下对多种参量进行复用传感。

8.2 竞赛收获

在推进实验的过程中，我们也面临了一连串的难题和挑战。其中相位谱的失真在实验的中后期较为显著，其相位信息与预期波形出现了些许偏差，导致温度测量的准确性受到了影响。对此，我们小组立刻进行了检测与讨论，首先便是对光纤链路的细致检查，我们注意到失真主要发生在光纤的某些特定段落，由此推测这些段落可能受到了外部环境因素的干扰，如温度梯度或机械应力。为了解决这一问题，我们再次谨慎地对光纤进行了校准，并重新优化了测量系统的配置。此外，我们还引入了信号处理算法，以补偿由环境因素引起的相位失真。经过无数次的尝试和反复试验后，我们逐步克服了失真的缺陷，还意外发现了新的现象。这些发现极大地扩展了我们的认知边界，并为我们未来的探索开辟了创新的研究路径。

在整个备赛过程中，我们团队成员之间紧密合作，深入学习光纤传感技术、射频调制技术以及信号处理等相关知识，共同解决了许多难题和挑战。竞赛中的实验操作让我们将理论知识与实际应用相结合，提高了我们的实践能力和解决问题的能力。为优化实验系统的性能，我们不断地尝试新的思路和方法，创新思维也在其中得以锻炼。在与团队成员的协作和交流讨论中，增强了我们的团队凝聚力，这种团队协作的精神不仅提升了我们的工作效率，也让我们深刻领悟到实验的探索之旅本身比最终成果更富有价值，成员间的相互支持超越了个人成就的重要性。

8.3 未来展望

随着研究的深入，我们注意到尽管实施了多项改进措施，可相位谱失真的问题仍未得到彻底根决。为此，我们正在积极研究和开发一系列创新的补偿方法和校准手段，希望在今后也能靠我们自己的创新实现对这一技术难题的全面攻克。

本次实验中所提出的新型调解方法，可对温度、损耗双参量进行高灵敏度无串扰解调，可以探索该技术在工业监测、航空航天、医疗诊断等领域的应用潜力，有助于在复杂环境下对多种参量进行复用传感。基于射频调制的光纤环干涉仪双参量传感系统具有广阔的应用前景和研究价值。我们将继续深入探索该领域的技术难题和应用潜力，为推动光纤传感技术的发展贡献自己的力量。

9 参考文献

- [1] 戢雅典, 范典, 王宇琦, 等. 光加热光纤光栅阵列液位测量方法研究[J]. 传感技术学报, 2024, 37(6):959-966.
- [2] 谭启龙, 张夏, 康虎, 等. 基于空气孔微结构光纤的表面等离子体共振折射率传感器[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(5):165-170.
- [3] 贾磊, 葛益娴, 芮菲, 等. 温度自补偿的级联式光纤表面等离子体共振折射率传感器[J]. 光学学报, 2023, 43(13):36-43.
- [4] 常海龙, 张丕状. 强电磁干扰环境下高精度温度测量[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(11):129-131.
- [5] 张步强, 许振宇, 刘建国, 等. 基于波长调制技术的高温高压流场温度测量方法[J]. 物理学报, 2019, 68(23):80-87.
- [6] 林金梅, 潘锋, 李茂东, 等. 光纤传感器研究[J]. 自动化仪表, 2020, 41(1):37-41.
- [7] 侯俊芳, 裴丽, 李卓轩, 刘超. 光纤传感技术的研究进展及应用. 光电技术应用, 2012, 27(01): 49-53.
- [8] C. Pendão and I. Silva. Optical fiber sensors and sensing networks: overview of the main principles and applications. *Sensors*, 2022, 22(19): 7554.
- [9] M. B. Ayun, A. Schwarzbaum, S. Rosenberg, M. Pinchas, and S. Sternklar. Photonic radio frequency phase-shift amplification by radio frequency interferometry. *Opt. Lett.*, 2015, 40: 4863-4866.
- [10] S. Li, Z. Wang, N. Wu, A. Yu, and L. Xia. Generating Loss Dependent Bifid Dips of Optical Carrier Based Microwave With Self-Feedback Anti-Symmetric Coupled Fiber Ring Resonator. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(24): 7835-7842.
- [11] Y. Li, L. Wang, Y. Song, et al. Functional Optical Fiber Sensors Detecting Imperceptible Physical/Chemical Changes for Smart Batteries. *Nano-Micro Lett.* 16, 154 (2024).
- [12] M.S.A. Gandhi, S. Chu, K. Senthilnathan, P.R. Babu, K. Nakkeeran, Q. Li, Recent Advances in Plasmonic Sensor-Based Fiber Optic Probes for Biological

- Applications. Appl. Sci. 2019, 9, 949.
- [13]C. Perezcampos Mayoral, J. Gutiérrez Gutiérrez, J.L. Cano Pérez, M. Vargas Treviño, I.B. Gallegos Velasco, P.A. Hernández Cruz, R. Torres Rosas, L. Tepech Carrillo, J. Arnaud Ríos, E.L. Apreza, et al. Fiber Optic Sensors for Vital Signs Monitoring. A Review of Its Practicality in the Health Field. Biosensors 2021, 11, 58.
- [14]G. Xu, A. U. Nielsen, B. Garbin, L. Hill, G.-L. Oppo, J. Fatome, S. G. Murdoch, S. Coen, and M. Erkintalo. Spontaneous symmetry breaking of dissipative optical solitons in a two-component kerr resonator. Nat. Commun., 2021, 12(1): 4023.
- [15]Y. Wan, J. Wen, C. Jiang, K. Zou, F. Tang, F. Pang, and T. Wang. Over 100 mW stable low-noise single-frequency ring-cavity fiber laser based on a saturable absorber of Bi/Er/Yb co-doped silica fiber. Journal of Lightwave Technology, 2021, 40(3): 805-812.
- [16]C. Liu, J. Wang, L. Cheng, M. Zhu and G. -K. Chang. Key Microwave-Photonics Technologies for Next-Generation Cloud-Based Radio Access Networks. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(20): 3452-3460.
- [17]S.E. Alavi, M.R.K. Soltanian, I.S. Amiri, M. Khalily, A.S.M. Supa'At, and H. Ahmad. Towards 5G: A photonic based millimeter wave signal generation for applying in 5G access fronthaul. Scientific reports, 2016, 6(1): 19891.
- [18]D.N. Nguyen, J. Bohata, J. Spacil, D. Dousek, M. Komanec, S. Zvanovec, Z. Ghassemlooy, and B. Ortega. M-QAM transmission over hybrid microwave photonic links at the K-band. Optics express, 2019, 27(23): 33745-33756.
- [19]M. B. Ayun, S. Rosenberg, D. Gotliv, S. Sternklar. Fundamental Limits of Photonic RF Phase-Shift Amplification by RF Interferometry. Journal of Lightwave Technology, 2017, PP(99): 1
- [20]苑立波.温度和应变对光纤折射率的影响[J].光学学报,1997,(12):114-118.

10 附录

A	文献查找、实验实现、素材拍摄、PPT 制作、报告撰写、台词撰写
---	---------------------------------

第十届全国大学生物理实验竞赛（创新）命题赛——光纤
基于射频调制的光纤环干涉仪相移解调双参量传感系统

B	文献查找、实验实现、数据处理、视频构思、报告撰写、视频剪辑
---	-------------------------------

表 2 分工表