

## 一种新型的 DPSK 解调系统及性能研究

齐跃峰<sup>1,2\*</sup>, 王玉琳<sup>1\*\*</sup>, 朱奕铖<sup>1</sup>, 杨子雄<sup>1</sup>, 李天<sup>1</sup>, 金琢然<sup>1</sup><sup>1</sup>燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004;<sup>2</sup>河北省特种光纤和光纤传感器重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

**摘要** 针对基于传统马赫-曾德尔干涉仪的差分相移键控(DPSK)解调系统对光源相干性的要求高、臂长差和码速失配容忍度低、容易受到振动和温度的影响等问题,提出了一种基于新型马赫-曾德尔干涉结构的 DPSK 解调系统,采用光信号两次经过马赫-曾德尔干涉结构、参考臂和干涉臂之间相对延时 1 bit 干涉的方式实现了 DPSK 信号的解调。通过仿真和实验相结合的方法验证了新型解调系统的原理正确性及其性能。在系统  $Q$  值大于 7 的情况下,新型解调系统臂长差和调制码速率之间的失配因子容忍区间达到了 0.25~1.73,其中  $Q$  值下降小于 3 dB 的区间达到了 0.79~1.09。最后通过 DPSK 调制与解调实验以及温度稳定性验证实验证明了:在采用宽带光源(臂长差大于光源相干长度)的条件下,新型解调系统能够实现 DPSK 信号解调,降低了对光源相干性的要求,并且在 0~70 °C 的环境中系统  $Q$  值在 10 以上,证明了系统具有较好的温度稳定性。

**关键词** 光通信; 新型马赫-曾德尔干涉结构; 差分相移键控调制与解调; 臂长差失配; 温度; 光源线宽

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221574

## 1 引言

分布式光纤传感<sup>[1]</sup>作为一种可进行连续分布、长距离监测<sup>[2-3]</sup>的非接触式检测技术<sup>[4-5]</sup>,在石油管道监控<sup>[6]</sup>、周界入侵、地震<sup>[7]</sup>和洪水检测<sup>[8]</sup>等领域表现出了突出的优势,具有非常广阔的市场应用前景<sup>[9-10]</sup>。分布式光纤传感技术与调制解调技术相结合,使得其探测距离和灵敏度获得极大的提高,通过将马赫-曾德尔干涉仪应用在分布式光纤传感系统中,使得系统探测灵敏度和定位精度得到极大提高,该方法在国内外获得了普遍应用。但是,传统马赫-曾德尔干涉仪要求所采用的光源相干长度大于干涉仪臂长差时才能保证分别经过马赫-曾德尔干涉仪干涉臂和参考臂的两束光发生干涉。因此,当干涉仪的臂长差一定时,光源线宽越窄,干涉信号可见度越高,检测到的信号质量越高<sup>[11-12]</sup>。但是,光源线宽变窄,光源成本呈指数增加,所以如何降低系统对光源线宽的要求是一个亟待解决的问题。对比于传统干涉仪,本文提出的新型马赫-曾德尔干涉结构能够解决对光源线宽的要求高的问题,使宽带光源能够应用在差分相移键控(DPSK)解调系统中,这也是本文一个创新点。

为了让光传输得更远、通信质量更好,需要对光信

号进行调制<sup>[13]</sup>,调制的方式可以是将需要传递的信息加载到光信号进行远距离传输,因此目前诞生了多种调制方式,其中 DPSK 调制方式<sup>[14]</sup>相比于传统调制方式(关关键控<sup>[15]</sup>)具有对光信噪比要求更低的优势,在光纤通信系统中体现了优越的性能,近年来成为了光传输技术的研究热点。Wu 等<sup>[16-17]</sup>研究了基于 DPSK 的新型调制格式,采用铌酸锂强度调制器,设计了一种密集波分复用(DWDM)传输系统,利用该系统产生了非归零码(NRZ)、载波抑制归零码(CSRZ)、NRZ-DPSK、CSRZ-DPSK<sup>[18]</sup>等多种码型<sup>[19]</sup>,并进行了比较。最终 NRZ-DPSK 在色散、偏振模色散(PMD)、非线性等方面的容限具有比较突出的特性,所以 NRZ-DPSK 调制码格式成为 DPSK 调制系统的主流选择。解锐静等<sup>[20-21]</sup>采用 NRZ-DPSK 调制方式搭建了调制系统,实现了 5 Gbit/s 的光信号调制。

DPSK 信号的解调大多数采用马赫-曾德尔干涉仪,而基于传统马赫-曾德尔干涉仪的解调系统的光源要求是窄线宽光源,且容易受到温度的影响。针对这些问题,本文提出了一种基于新型马赫-曾德尔干涉结构的 DPSK 解调系统。与传统干涉仪相比,新型解调结构对臂长差适配的鲁棒性更强,具有更好的温度稳定性,同时降低了对光源相干性的要求,使得宽带光源

收稿日期: 2022-08-08; 修回日期: 2022-09-12; 录用日期: 2022-10-14; 网络首发日期: 2022-10-24

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61735011)、河北省科技研发重点项目(19251703D)、中央引导地方科技发展专项(19941708G)

通信作者: \*yfqi@ysu.edu.cn; \*\*2423530278@qq.com

也可应用于本结构。

另一方面, DPSK 调制属于脉冲编码技术, 其与分布式光纤传感技术相结合, 可应用在定位、振动、温度等状态量感知方面。对于利用马赫-曾德尔强度调制器进行外调制的方式, 增加码片数量能够增大探测距离, 同时压缩码片宽度能够提高分辨率, 这样既能增加探测距离、提高信噪比, 又能提高测量精度, 突破测量距离和测量分辨率相互制约的关系。新型马赫-曾德尔干涉结构为 DPSK 解调技术应用在分布式光纤传感领域提供了一种很好的方案。

## 2 系统结构及工作原理

基于新型马赫-曾德尔干涉结构的 DPSK 调制与解调系统结构如图 1 所示, 系统通过宽谱光源发出光

信号, 经过环形器 1 传输到由两个 3 dB 耦合器搭建的新型马赫-曾德尔干涉结构。由于光源的相干长度远小于臂长差, 所以光信号第一次经过新型马赫-曾德尔干涉结构不发生干涉, 被耦合器根据分光比一分为二。由马赫-曾德尔调制器 (MZM)<sup>[22]</sup> 对光信号进行调制并产生 NRZ-DPSK 信号。DPSK 信号通过环形器 2 第二次经过干涉结构, 光程相等的两路光产生 1 bit 相对延时并在耦合器 1 发生干涉, 从干涉结构的相长端或相消端输出, 并由光电探测器<sup>[23]</sup> 接收, 然后经过减法器进行解调。根据相干解调原理: 如果两路光信号相位相同, 则在干涉相长端输出 1, 相消端输出 0; 如果两路光信号的相位差为  $\pi$ , 则相反。这种方式的一个突出的优点就是不再要求臂长差必须小于光源相干长度, 从而降低了系统对光源线宽的要求。

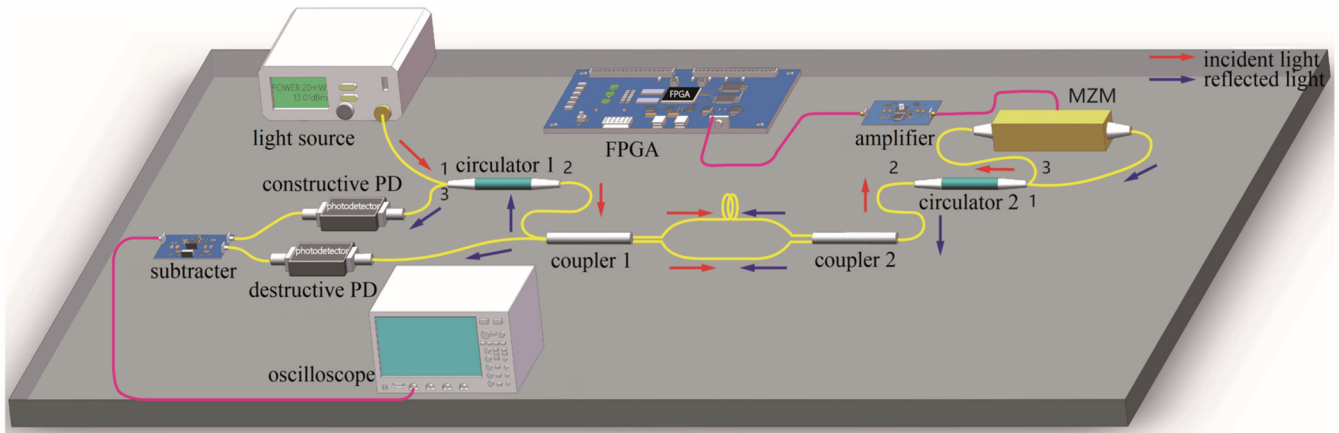


图 1 DPSK 调制与解调系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of DPSK modulation and demodulation system

为了更加准确地研究系统原理, 对光信号的传输过程进行详细的推导, 将从光源发出的光信号作为一次入射光, 其光场表达式为

$$E_{in} = E_0 \exp[j(\omega_c t - k_0 n_{eff} l)], \quad (1)$$

式中:  $E_0$  表示光信号幅值;  $k_0$  表示光在真空中的传播常数;  $n_{eff}$  表示光纤有效折射率;  $l$  表示光经过的路程;  $j$  为虚数单位;  $\omega_c$  为角频率;  $t$  为时间。耦合器的传输矩阵为

$$M_i = \begin{bmatrix} \sqrt{\rho_i} & j\sqrt{1-\rho_i} \\ j\sqrt{1-\rho_i} & \sqrt{\rho_i} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中:  $\rho_i$  表示耦合器的分光比, 下标  $i$  表示耦合器的序号, 本文中用到两个耦合器,  $i$  的取值分别为 1 和 2。光经过新型马赫-曾德尔干涉结构后, 由于干涉臂和参考臂之间存在臂长差, 所以光信号产生相位变化。新型马赫-曾德尔干涉结构的传输矩阵为

$$M_{MZI} = \begin{bmatrix} \exp(-jk_0 n_{eff} l_1) & 0 \\ 0 & \exp(-jk_0 n_{eff} l_2) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中:  $l_1$ 、 $l_2$  分别为干涉结构的干涉臂和参考臂臂长。

光信号第一次经过干涉结构的传输过程为

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = M_2 M_{MZI} M_1 \begin{bmatrix} E_{in} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中:  $E_3$ 、 $E_4$  分别表示从耦合器 2 的端口 3 和端口 4 输出的光信号;  $M_1$ 、 $M_2$  分别为耦合器 1 和耦合器 2 的琼斯矩阵。由于从耦合器端口 3 输出的光信号分别经过干涉结构的干涉臂和参考臂, 所以将这两路光信号分别定义为  $E_{31}$ 、 $E_{32}$ , 其中  $E_{31}$  表示经过较长干涉臂的光信号,  $E_{32}$  表示经过较短参考臂的光信号。

二次反射光传输过程与一次入射光传输过程类似, 反射光在耦合器 1 处发生干涉, 如果两路光信号的相位相同, 则在耦合器 1 端口 1 和端口 2 输出的光信号  $E_{1out}$ 、 $E_{2out}$  满足

$$\begin{bmatrix} E_{1out} \\ E_{2out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} E_0 \exp\{j[\omega_c t - k_0 n_{eff} (l_1 + l_2)]\} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

如果两路光信号的相位相差  $\pi$ , 则在耦合器 1 端口 1 和端口 2 输出的光信号  $E_{1out}$ 、 $E_{2out}$  满足

$$\begin{bmatrix} E_{1out} \\ E_{2out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{2} jE_0 \exp\{j[\omega_c t - k_0 n_{eff}(l_1 + l_2)]\} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

综上所述,如果两路信号相位相同,则相长端的输出功率最高,相消端的输出功率最低。如果两路信号的相位差为 $\pi$ ,则输出情况相反。

### 3 系统仿真与结果分析

#### 3.1 调制与解调仿真

为了验证基于新型马赫-曾德尔干涉结构的 DPSK 调制与解调系统原理的正确性,对图 1 所示的系统进行了仿真。采用的仿真结构图如图 2 所示。

由序列发生器产生伪随机序列(m 序列<sup>[24]</sup>),然后进行差分编码,采用脉冲发生器产生非归零码的脉冲信号,由 MZM 对光信号进行调制,产生 DPSK 信号并将其输入至待测光纤。在待测光纤中传播的 DPSK 信号经过光纤尾端的反射镜,二次进入新型马赫-曾德尔干涉结构,进行解调。在新型马赫-曾德尔干涉结构的相长端和相消端的位置分别设置一个光电探测器,进行光电转换,然后将电信号输入减法器,由相消端减去相长端得到与 m 序列相同的解调序列,利用

滤波器滤除噪声,并在示波器上显示,实现 DPSK 调制与解调。

仿真结果如图 3 所示,图 3 (a)是由 0、1 码组成的 m 序列,m 序列是比较常用的一种伪随机序列。伪随机序列由于具有较好的相关性和抗干扰能力,被广泛应用在调制系统中,m 序列具有均衡性、游程分布性、移位相加性等优良性质。按照产生 NRZ-DPSK 信号的步骤,需先对 m 序列进行差分编码<sup>[25]</sup>:

$$b_k = d_k \oplus b_{k-1}, \quad (7)$$

式中: $d_k$ 表示当前 m 序列的码片; $b_{k-1}$ 表示前一位差分序列码片; $k$ 为码片序号, $k=1,2,3,\dots$ 。经过差分编码得到如图 3(b)所示的差分序列。差分序列经过信号生成器输入到 MZM 作为驱动信号。光信号经 MZM 调制后产生 NRZ-DPSK 信号,如图 3(c)所示。反射光经光纤传输到新型马赫-曾德尔干涉结构发生干涉,从相长端或相消端输出。相消端和相长端输出的波形分别如图 3(d)、(e)所示,相长端和相消端波形是互补的。将相长端和相消端的信号进行差分运算则得到与 m 序列相同的解调序列,如图 3(f)所示。由图可知,解调序列与 m 序列相同,证明系统能够对光信号进行 DPSK 调制和解调。

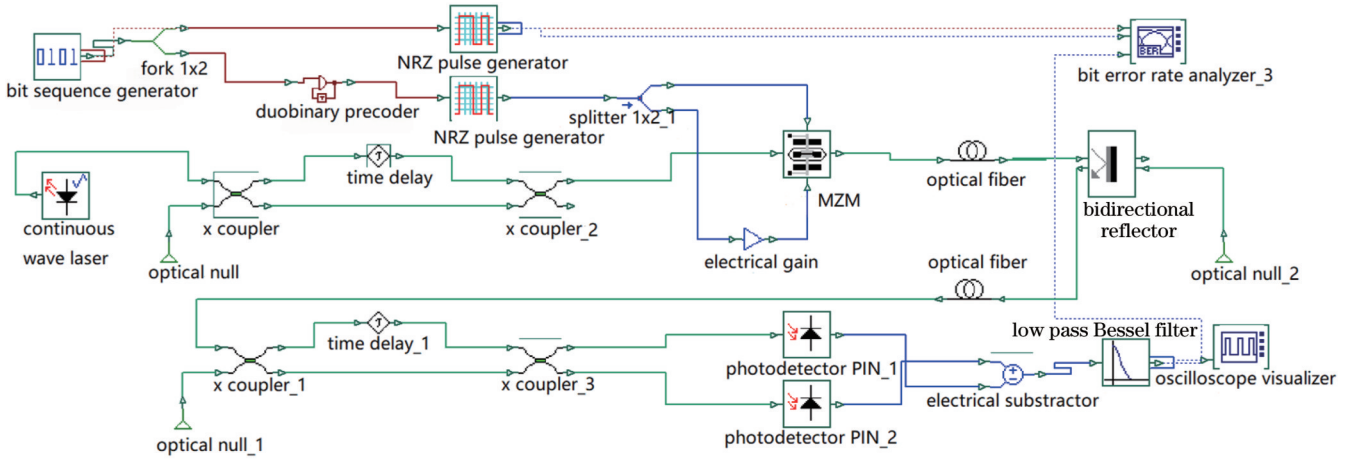


图 2 DPSK 调制与解调系统仿真结构图

Fig. 2 Simulation structure diagram of DPSK modulation and demodulation system

#### 3.2 臂长差失配和温度对系统的影响

为了研究基于新型马赫-曾德尔干涉结构的解调系统的传输性能,对系统进行了臂长差与调制码速失配以及温度<sup>[26]</sup>等方面的仿真,仿真采用如图 2 所示的原理图。在臂长差和调制码速率失配方面,通过在臂长差和码速之间设置不同的失配程度验证系统解调效果,通过误码率分析仪获得解调信号的 Q 值,采用系统 Q 值和误码率  $R_{ERR}$  之间的转换关系来计算系统误码率,以此来衡量系统的传输性能,并与基于传统干涉仪的解调系统作了对比。

干涉臂与参考臂之间存在臂长差,光信号经过臂长差的时间是否等于传输 1 bit 码元的时间是决定

DPSK 解调效果的关键因素。为了保证臂长差产生 1 bit 的相对稳定延时,臂长差长度的确定主要采用理论运算与实际测量相结合的方式,首先通过理论运算确定臂长差,然后裁剪相应长度的光纤,采用两个等长的  $2 \times 2$  耦合器制作马赫-曾德尔干涉结构,最后通过发送一个光脉冲,测量脉冲分别经过马赫-曾德尔干涉结构的参考臂和干涉臂到达示波器的时间差,验证是否等于 1 bit 延时,然后对臂长差进行优化,且有

$$R_{ERR} = \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q\sqrt{2\pi}}. \quad (8)$$

仿真结果如图 4 所示,图中  $Q_{new,max}$  代表新型 DPSK 解调系统的最大 Q 值,  $Q_{trad,max}$  代表传统解调系

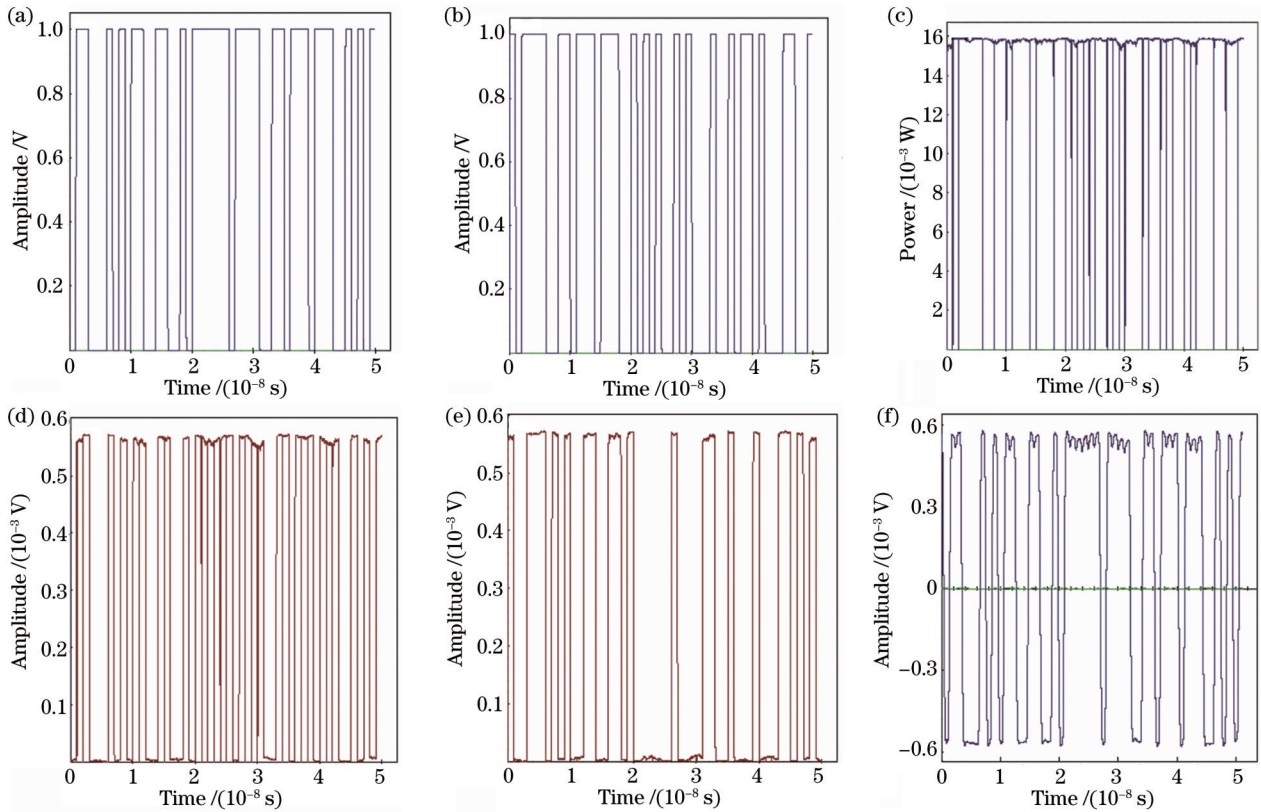


图 3 DPSK 调制解调系统的解调结果。(a) m 序列; (b) 差分编码; (c) DPSK 调制; (d) 相消端输出信号; (e) 相长端输出信号; (f) 解调结果

Fig. 3 Demodulation results of DPSK modulation and demodulation system. (a) m sequence; (b) differential encoding; (c) DPSK modulation; (d) signal of destructive interference port; (e) signal of constructive interference port; (f) demodulation result

统的最大 Q 值。在相同失配程度下,新型 DPSK 解调系统的 Q 值高于传统系统的 Q 值,新型 DPSK 解调系统的误码率最低可以达到  $2.38 \times 10^{-154}$ , 满足通信系统误码率小于  $10^{-12}$  ( $Q=7$ ) 的要求。在满足系统 Q 值大于 7 的情况下,新型解调系统失配因子容忍区间达到了 0.25~1.73, 其中 Q 值下降小于 3 dB 的区间达到了 0.79~1.09。传统解调系统的失配因子容忍区间为 0.5~1.65, 而 Q 值下降小于 3 dB 的区间为 0.94~1.09。仿真结果表明,新型 DPSK 解调系统的臂长差更大、码速失配容忍度更高,而且系统误码率更低。

基于传统的马赫-曾德尔干涉仪的解调系统容易受到温度的影响,温度能够改变光纤长度和折射率,根据式(9),光信号相位受到折射率和长度变化量的共同影响,导致光信号的相位发生改变<sup>[27]</sup>,进而影响 DPSK 调制与解调,所以研究温度对系统的影响是很有必要的。为了测试系统的温度稳定性,把 20 °C 作为标准温度,通过在 -20~120 °C 范围内改变系统的温度,计算各个温度下系统的 Q 值,衡量系统在温度方面的性能。

$$\delta_\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (\delta_n L + n\Delta L), \quad (9)$$

式中:  $\delta_\varphi$  表示由温度变化引起的相位变化;  $\lambda$  表示光波长;  $\delta_n$  表示光纤折射率变化;  $L$  表示受温度影响的光纤长度;  $n$  表示光纤的有效折射率;  $\Delta L$  表示温度变化

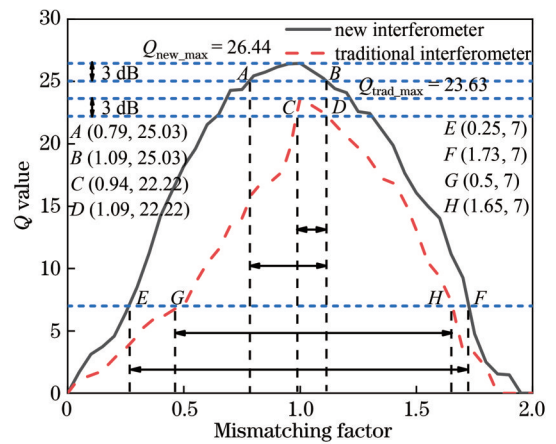


图 4 臂长差和码速失配对系统 Q 值的影响

Fig. 4 Influence of mismatching of arm length difference and code rate on Q value of system

引起的光纤长度改变。

由图 5 可知: 温度对新型解调系统的影响不明显,而对传统系统的影响比较明显。图 5 中在 Q 值大于 7 的情况下,传统系统的正常工作的温度区间为 -9.82~43.66 °C, 其中系统 Q 值下降 3 dB 以内的温度区间为 10.11~21.39 °C。随着温度的改变,系统 Q 值下降速度比较快。由此可见,传统系统正常工作的

温度范围比较窄,新型系统在这方面具有突出的优势。

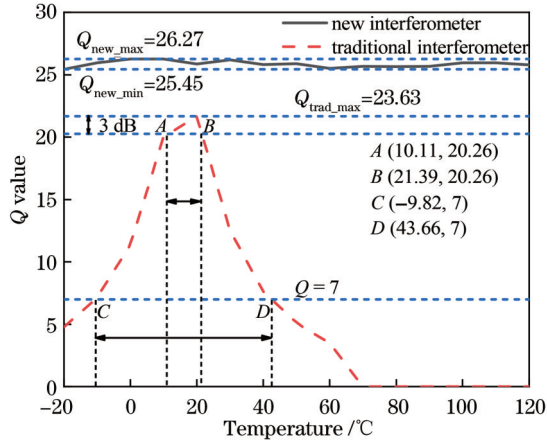


图 5 温度对系统 Q 值的影响  
Fig. 5 Influence of temperature on Q value of system

### 3.3 系统工作的光源线宽范围仿真

基于新型马赫-曾德尔干涉结构的 DPSK 解调系统降低了对光源线宽的要求,根据光源相干长度和线宽的关系式:

$$\Delta x = \frac{c}{\Delta \nu}, \quad (10)$$

式中: $\Delta x$ 为光源的相干长度; $\Delta \nu$ 为光源线宽; $c$ 为光的传播速度。根据式(10),相干长度越长,光源线宽越窄。

新型解调系统采用光信号两次经过马赫-曾德尔干涉结构的方式,其中两路光分别都经过一次参考臂和干涉臂,保证了两路光信号的光程相等,两路光信号能够在耦合器 1 处发生干涉,进行 DPSK 解调,不需要臂长差小于光源相干长度。为了研究光源线宽对新型马赫-曾德尔干涉结构的影响,将其与传统干涉仪作对比,系统光源分别采用窄线宽光源和宽线宽光源,计算系统在采用不同线宽的光源时的 Q 值,得到传统干涉仪和新型马赫-曾德尔干涉结构能够实现 DPSK 解调的光源线宽范围。

图 6~8 分别为在系统 Q 值大于 7 的情况下,基于传统干涉仪的解调系统和基于新型干涉结构的解调系统的 Q 值随着光源线宽的变化规律。图 6 和图 7 表示的是在传统马赫-曾德尔干涉仪和新型马赫-曾德尔干涉结构的臂长差都设置为 0.21 m 的情况下,臂长差小于光源相干长度时窄线宽光源对系统 Q 值的影响。由图 6 可知,传统解调系统要求光源线宽在 0~60.5 MHz(光源线宽为 60.5 MHz 对应的相干长度为 4.96 m,臂长差小于相干长度)。图 7 为新型马赫-曾德尔干涉结构臂长差为 0.21 m 时系统对光源线宽的要求,为 0~48 MHz(光源线宽为 48 MHz 对应的相干长度为 6.25 m)。由图 6 和图 7 可知,基于传统解调系统与新型解调系统的 Q 值都呈现出随着光源线宽的增加下降速度比较快的规律。图 8 为当新型马赫-曾德

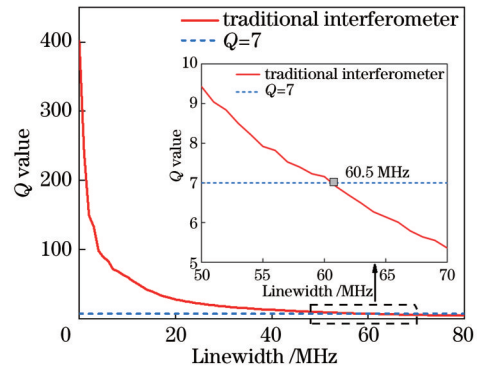


图 6 窄线宽光源对传统干涉仪 Q 值的影响  
Fig. 6 Influence of narrow linewidth light source on Q value of traditional interference structure

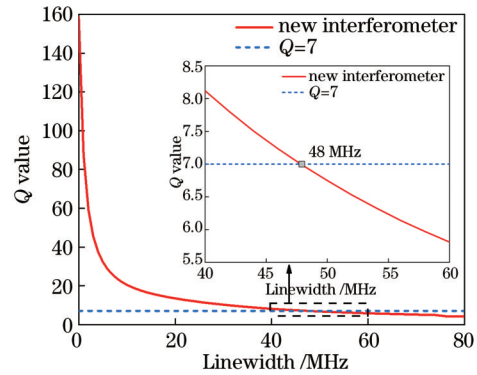


图 7 窄线宽光源对新型马赫-曾德尔干涉结构 Q 值的影响  
Fig. 7 Influence of narrow linewidth light source on novel Mach-Zehnder interference structure

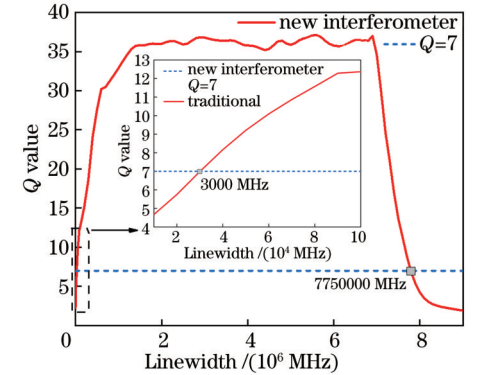


图 8 宽线宽光源对新型干涉结构的影响  
Fig. 8 Influence of wide linewidth light source on Q value of novel interference structure

尔干涉结构的臂长差为 0.21 m 时,采用宽谱光源获得的 Q 值变化曲线,表示了臂长差大于光源相干长度的情况。在光源线宽为 3000 MHz(光源线宽为 3000 MHz 对应的相干长度为 0.1 m)~7750000 MHz(光源线宽为 7750000 MHz 对应的相干长度为  $3.7683 \times 10^{-5}$  m)的范围内,系统 Q 值达到 7 以上,即误码率  $R_{ERR} < 10^{-12}$ ,满足通信系统的通信指标,而且 Q 值曲线比较平坦。由此可得,新型解调系统在臂长

差大于或者小于光源相干长度的情况下都能正常工作,即窄线宽光源和宽线宽光源都能使用,降低了系统对光源线宽的要求。综上所述,相较于传统干涉仪只能用窄线宽光源,新型解调系统可使用宽线宽光源。

## 4 实验与结果分析

### 4.1 DPSK 调制与解调实验

为了验证系统的可行性,搭建了如图 1 所示的基于新型马赫-曾德尔干涉结构的 DPSK 调制与解调系统,采用中心波长为 1550 nm、线宽为 33 nm 的宽谱光源,采用 Xilinx 公司的 ARTIX-7 系列的现场可编程逻辑门阵列(FPGA)开发板当作 m 序列发生器,并采用 MZM 对光信号进行 DPSK 调制,该器件的最高调制速率为 12.5 Gbit/s,半波电压  $\leq 5$  V,响应速度快,工作波长为 1525~1565 nm。

系统通过 FPGA 产生 m 序列并且通过对 m 序列进行差分获得差分序列,由运放对差分序列进行放大,然后传输到 MZM 的 RF 输入端。MZM 能够对光信号进行调制,产生 NRZ-DPSK 信号,即完成了对光信号的调制。DPSK 信号再次传输到新型马赫-曾德尔干涉结构,根据前文叙述的 DPSK 解调原理,光信号在耦合器 1 处发生干涉,在相长端、相消端输出,输出的波形由光电探测器接收,最终由示波器对解调信号进行运算和显示。

图 9 从上到下分别是由 FPGA 产生的 m 序列、最终的解调波形、马赫-曾德尔干涉结构相消端输出的波形以及相长端输出的波形。上述波形主要是由 1 bit 时长的高电平和低电平组成,用高电平、低电平分别表示 1 码和 0 码。根据 DPSK 的解调原理,相长端和相消端输出波形是互补的,相消端波形与 m 序列波形相

同,由相消端波形减去相长端波形即可得到双极性的解调波形。由图 9 可知,解调波形与 m 序列是一一对应的,且解调结果与 m 序列一致,新型解调系统能够对调制信号进行解调,证明了系统的可行性。

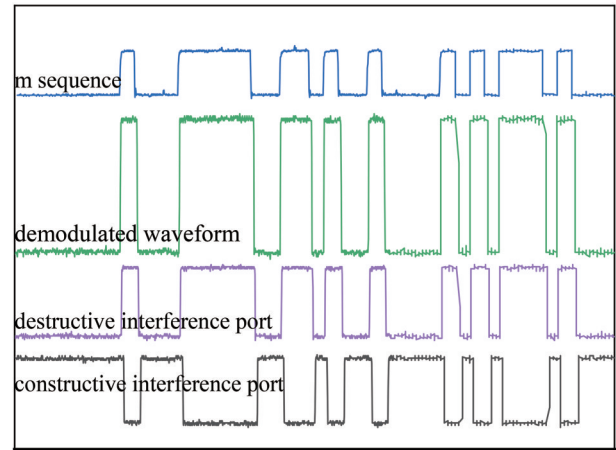


图 9 m 序列和解调结果

Fig. 9 m sequence and demodulation results

### 4.2 温度对新型马赫-曾德尔干涉结构的影响

本文通过实验验证了温度对系统的影响<sup>[27]</sup>,由于器件的工作温度范围为 0~70 °C,因此以 10 °C 为步进单位,在 0~70 °C 之间改变环境温度。在不同温度下,利用 m 序列对光信号进行 DPSK 调制,采用新型马赫-曾德尔干涉结构进行解调,计算系统的 Q 值和误码率,实验结果如表 1 和图 10 所示。

$$Q = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{\sigma_1 + \sigma_0}, \quad (11)$$

式中: $\mu_1$ 、 $\mu_0$  分别表示解调信号中代表 1 码和 0 码的电平均值; $\sigma_1$ 、 $\sigma_0$  分别表示解调信号中代表 1 码和 0 码的标准差。

表 1 不同温度下系统 Q 值和误码率

Table 1 Q value and bit error rate of system at different temperatures

Temperature /°C	0	10	20	30	40	50	60	70
Q value	12.51	13.24	12.29	12.83	12.01	12.92	12.67	10.84
Error rate	$3.27 \times 10^{-36}$	$2.71 \times 10^{-40}$	$5.01 \times 10^{-35}$	$5.76 \times 10^{-38}$	$1.59 \times 10^{-33}$	$1.70 \times 10^{-38}$	$4.52 \times 10^{-37}$	$1.13 \times 10^{-27}$

由表 1 和图 10 可知,在环境温度为 0~70 °C 时,系统的 Q 值都能保证在 10 以上,误码率不大于  $1.13 \times 10^{-27}$ ,满足系统合格的指标要求,证明新型马赫-曾德尔干涉结构是可行的,在温度方面表现出比较好的性能。

新型解调系统采用外调制方式和脉冲编码技术,受器件性能的限制,实验没有采用特别高的速率。新型解调系统与文献[16-21]中系统相比,原理上是相通的。相比于基于传统干涉仪的解调系统,新型解调系统采用的新型马赫-曾德尔干涉结构可以使用臂长差大于光源相干长度的光源,而传统马赫-曾德尔干

涉仪只能使用臂长差小于光源相干长度的光源。新型解调系统增大了臂长差、提高了码速失配容忍度,其中传统马赫-曾德尔干涉仪的失配容忍度为 10%,新型马赫-曾德尔干涉结构的失配容忍度可以达到 20%,其对温度的敏感性更低。仿真结果表明,新型解调系统在温度为 -20~120 °C 的条件下都能满足系统 Q 值在 7 以上,而传统解调系统在温度范围为 10.11~21.39 °C 时才能满足上述要求。实验结果表明,在环境温度为 0~70 °C 时,系统的 Q 值都能保证在 10 以上,误码率不大于  $1.13 \times 10^{-27}$ ,满足通信系统的指标。

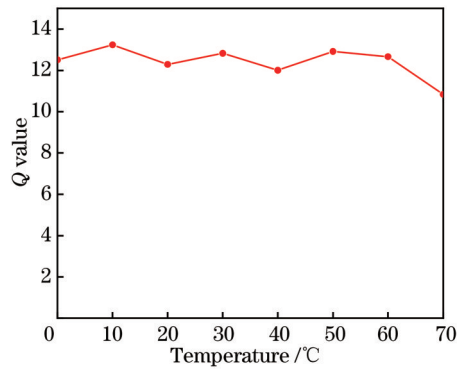


图 10 温度对系统 Q 值的影响

Fig. 10 Influence of temperature on Q value of system

## 5 结 论

提出了一种基于新型马赫-曾德尔干涉结构的 DPSK 解调系统,介绍了系统的结构与工作原理,并对光信号在系统中的传输过程进行了理论推导。通过仿真和实验验证了系统原理的正确性,仿真结果显示系统的误码率最低达到了  $2.38 \times 10^{-154}$ ,实验结果表明系统 Q 值在 10 以上,满足通信系统误码率小于  $10^{-12}$  ( $Q=7$ ) 的指标,证明了系统原理的正确性。

通过仿真研究了系统在码速和臂长差失配、温度、光源线宽等方面的性能,并与基于传统干涉仪的解调系统进行了对比。仿真结果表明新型解调系统比传统系统具有更大的失配容忍区间,提高了失配容忍度。在温度方面,新型解调系统相比于传统系统具有突出优势,新型解调系统能够在  $-20 \sim 120$  °C 范围内正常工作,且系统误码率小于  $3.54 \times 10^{-143}$ ,而且新型解调系统在使用宽线宽光源和窄线宽光源的条件下都能实现 DPSK 解调,降低了系统对光源线宽的要求。最后通过实验验证了系统的解调效果和温度对系统性能的影响,实验结果显示系统能够对 m 序列进行调制和解调,且解调结果与 m 序列相同。在  $0 \sim 70$  °C 的条件下,系统的 Q 值都能达到 10 以上,满足通信系统的指标要求。实验采用的光源是宽谱光源,光源相干长度小于臂长差,这验证了新型系统能够使用宽线宽光源,降低系统对光源线宽的要求。希望所提出的基于新型马赫-曾德尔干涉结构的 DPSK 解调系统能够为 DPSK 解调提供一种参考方案,在分布式光纤光传输方面拥有比较广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

[1] 苑立波,童维军,江山,等.我国光纤传感技术发展路线图[J].光学学报,2022,42(1):0100001.  
Yuan L B, Tong W J, Jiang S, et al. Road map of fiber optic sensor technology in China[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(1): 0100001.

[2] 李钊,秦增光,刘兆军,等.基于全变分辅助的相敏光时域反射技术[J].光学学报,2021,41(17):1706001.  
Li Z, Qin Z G, Liu Z J, et al. Phase-sensitive optical time

domain reflectometry assisted by total variation techniques[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(17): 1706001.

- [3] 宋牟平,庄守望,王轶轩.相位敏感光时域反射计的高频振动检测[J].中国激光,2020,47(5):0506001.  
Song M P, Zhuang S W, Wang Y X. High-frequency vibration detection of phase-sensitive optical time-domain reflectometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0506001.
- [4] 司召鹏,卜泽华,毛邦宁,等.基于相位解调的相位敏感光时域反射计研究[J].激光与光电子学进展,2022,59(11):1100007.  
Si Z P, Bu Z H, Mao B N, et al. Review of research on phase sensitive optical time-domain reflectometer based on phase demodulation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(11): 1100007.
- [5] Zhou X, Wang F, Liu Z, et al. Hybrid B-OTDR/ $\Phi$ -OTDR for multi-parameter measurement from a single end of fiber[J]. Optics Express, 2022, 30(16): 29117-29127.
- [6] 邱秀分,张峰,孙志伟,等.基于分布式光纤传感技术的管道破坏联合检测方法[J].油气储运,2021,40(8):888-894.  
Qiu X F, Zhang F, Sun Z W, et al. A combined detection method for oil and gas pipeline damage based on distributed optical fiber sensing technology[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(8): 888-894.
- [7] 董新桐,李月,刘飞,等.基于卷积神经网络的井中分布式光纤传感器地震数据随机噪声压制新技术[J].地球物理学报,2021,64(7):2554-2565.  
Dong X T, Li Y, Liu F, et al. New suppression technology for the random noise in the DAS seismic data based on convolutional neural network[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(7): 2554-2565.
- [8] 豆朋达,温宗周,马亚龙,等.分布式光纤传感器大坝安全监控系统研究[J].单片机与嵌入式系统应用,2017,17(7):47-52.  
Dou P D, Wen Z Z, Ma Y L, et al. Dam safety monitoring system based on distributed optical fiber sensor[J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2017, 17(7): 47-52.
- [9] 张旭苹,丁哲文,洪瑞,等.相位敏感光时域反射分布式光纤传感技术[J].光学学报,2021,41(1):0106004.  
Zhang X P, Ding Z W, Hong R, et al. Phase sensitive optical time-domain reflective distributed optical fiber sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106004.
- [10] 陈浩,徐阳,钱森,等.分布式光纤超声传感器用于检测电缆接头放电故障[J].光学学报,2021,41(3):0306001.  
Chen H, Xu Y, Qian S, et al. Distributed fiber-optic ultrasonic sensor applied in detection of discharging fault of power cable joint[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(3): 0306001.
- [11] 程鹏申.分布式光纤传感器信号处理关键技术研究[D].北京:华北电力大学,2018:12.  
Cheng P S. Research on key technologies of distributed optical fiber sensor signal processing[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018: 12.
- [12] 宋志强,祁海峰,王晨,等.窄线宽光纤激光器及其在光纤传感中的应用[J].光学学报,2015,35(s2):s214005.  
Song Z Q, Qi H F, Wang C, et al. Narrow line-width fiber laser and application in sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s2): s214005.
- [13] 魏怡,王凯辉,张宇,等.实现 125.52 Gbit/s PDM-QPSK 信号在光载无线系统中的实时传输[J].光学学报,2022,42(15):1506003.  
Wei Y, Wang K H, Zhang Y, et al. Real-time transmission of 125.52 Gbit/s PDM-QPSK signal in radio over-fiber system[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(15): 1506003.
- [14] 郝斌,顾晓仪.光差分相移键控调制格式原理[J].现代有线传输,2005(4):70-73.  
Hao B, Gu W Y. Principle of optical DPSK modulation format[J]. Modern Transmission, 2005(4): 70-73.
- [15] 杨雄伟,赵峰.基于开关键控调制的光载太赫兹正交相移键控信号产生[J].光学学报,2022,42(8):0806002.

- Yang X W, Zhao F. Generation of terahertz quadrature phase shift keying signals over fiber with on-off-keying modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(8): 0806002.
- [16] Wu X X, Xu K, Lu G S, et al. Investigation of chirped return-to-zero differential phase-shift keying (DPSK) modulation format and its performance comparison with return-to-zero DPSK in 40×40-Gbit/s dense wavelength-division multiplexing transmission systems[J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(7): 075004.
- [17] 武晓霞. 基于 DPSK 的新型调制格式在高速光纤传输系统中的应用[D]. 北京: 北京邮电大学, 2006: 2-3.
- Wu X X. The application of DPSK-based novel modulation formats in high-speed optical transmission systems[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2006: 2-3.
- [18] 马榕, 高铎瑞, 魏森涛, 等. 基于啁啾管理激光器的直接调制 RZ-DPSK 信号产生技术研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(13): 1306001.
- Ma R, Gao D R, Wei S T, et al. Direct modulation RZ-DPSK signal generation technology based on chirp-managed lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(13): 1306001.
- [19] 赵贺, 张鹏, 杨志群, 等. 多调制格式兼容的空间激光高速通信调制仿真与实验研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(7): 0706004.
- Zhao H, Zhang P, Yang Z Q, et al. Simulation and experimental research of multi-modulation format compatible space laser high-speed communication modulation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(7): 0706004.
- [20] 解锐静, 李洪祚, 张慧颖. 基于 LabVIEW 的 PSK 调制信号的识别[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 39(1): 134-138.
- Xie R J, Li H Z, Zhang H Y. Automatic modulation recognition of PSK signal[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 39(1): 134-138.
- [21] 解锐静. 基于 DPSK 的光调制系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2016: 5-12.
- Xie R J. The design of DPSK optical modulation system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016: 5-12.
- [22] 刘子溪, 曾成, 夏金松. 高线性度电光调制器研究进展[J]. *中国激光*, 2022, 49(12): 1206001.
- Liu Z X, Zeng C, Xia J S. Research progress on high-linearity electro-optical modulators[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(12): 1206001.
- [23] 廖卓冬, 李珂, 刘浩冉, 等. 用于 100 Gb/s 光通信系统的 p 区倒置型 APD 的研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(13): 1306002.
- Liao Z D, Li K, Liu H R, et al. Avalanche photodiode with p-down structure for 100 Gb/s optical communication system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(13): 1306002.
- [24] 曾凌川, 白燕, 卢晓春, 等. 一种基于调制 m 序列的直接序列扩频信号调制方法[J]. *电子与信息学报*, 2021, 43(8): 2156-2164.
- Zeng L C, Bai Y, Lu X C, et al. A signal modulation method of direct sequence spread spectrum based on modulated m-sequence [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43 (8): 2156-2164.
- [25] 伍伟鑫, 韩京宇, 朱曼. 基于差分编码的 RDF 分组压缩[J]. *计算机工程*, 2020, 46(11): 117-123.
- Wu W X, Han J Y, Zhu M. RDF grouping compression based on delta encoding[J]. *Computer Engineering*, 2020, 46(11): 117-123.
- [26] 曹晔, 赵晨, 童峥嵘. 可双参量同时测量的干涉型全光纤传感器[J]. *光子学报*, 2015, 44(10): 1006002.
- Cao Y, Zhao C, Tong Z R. All-fiber interferometric sensors for simultaneous measurement of dual parameters[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(10): 1006002.
- [27] 范维文, 万洪丹, 陈彧芳, 等. 基于二模-单模微纳光纤 Sagnac 环的高灵敏度光纤温度传感器[J]. *光学学报*, 2022, 42(16): 1606001.
- Fan W W, Wan H D, Chen Y F, et al. Highly sensitive fiber optic temperature sensor based on two-mode single-mode microfiber Sagnac loop[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(16): 1606001.

## Novel DPSK Demodulation System and Its Performance

Qi Yuefeng<sup>1,\*</sup>, Wang Yulin<sup>1,\*\*</sup>, Zhu Yicheng<sup>1</sup>, Yang Zixiong<sup>1</sup>, Li Tian<sup>1</sup>, Jin Zhuoran<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Qinhuangdao 066004, Hebei, China

### Abstract

**Objective** In the field of fiber-optic communication, further optical transmission and better communication quality presuppose the modulation of the optical signal, that is, to load the information to be transmitted into the optical signal by modulation for long-distance transmission. Therefore, a variety of modulation methods have been developed, such as differential phase-shift keying (DPSK) and on-off keying (OOK). With lower requirements on the optical signal-to-noise ratio, DPSK modulation shows superb performance in fiber-optic communication systems and has also become a research hotspot for fiber-optic communication technologies in recent years. DPSK signals are generally demodulated by a Mach-Zehnder interferometer. However, demodulation systems based on the traditional Mach-Zehnder interferometer are strict with the light source, modulation code rate, and arm length difference. Such a system requires a narrow-linewidth light source and is easily affected by temperature. To solve the above problems, this paper proposes a DPSK demodulation system based on a novel Mach-Zehnder interference structure. Compared with the traditional demodulation system, the novel demodulation system has higher robustness to arm length difference mismatch, better temperature stability, and lower requirements on the coherence properties of the light source, enabling wide-linewidth light sources to be applicable to DPSK demodulation systems as well.



**Methods** This paper adopts the research method of combining simulation with experiment. Specifically, the transmission process of an optical signal in the system is derived mathematically, and the demodulation principle of the novel Mach-Zehnder interference structure is thereby described in detail. Then, a demodulation system based on the novel Mach-Zehnder interference structure is built in simulation software to verify whether the simulation results are consistent with the theoretical derivation results and prove the correctness of the system principle. Furthermore, the  $Q$  value of the system is calculated, and the novel demodulation system is compared with the demodulation system based on the traditional interferometer in terms of the light source, arm length difference mismatch, and temperature. The simulation results show that the novel demodulation system provides better performance. Finally, the feasibility of the proposed system is verified by building an experimental system to determine whether the system can achieve DPSK modulation and demodulation, and the temperature stability of the system is tested.

**Results and Discussions** The novel demodulation system shows excellent performance in temperature, and its temperature stability is better than that of the traditional demodulation system (Fig. 5). In terms of arm length difference mismatch and the code rate, the mismatch ratio the novel demodulation system allows is higher than 20%, while that of the traditional demodulation system is required to be within 10%. This result proves that the novel demodulation system is more robust (Fig. 4). The novel demodulation system can use a wide-linewidth light source (Fig. 8), while the traditional counterpart can only use a narrow-linewidth light source. This contrast represents a significant advantage of the novel demodulation system. It is also the main purpose of the novel demodulation system proposed in this paper and is used to reduce the system's requirements on the coherence properties of the light source. The experimental results show that the system can achieve DPSK demodulation of optical signals with a wide-linewidth light source (Fig. 9). Moreover, the  $Q$  value of the proposed system is above 10 (Table 1) when the ambient temperature is within 0–70 °C, indicating that the system is feasible.

**Conclusions** This paper proposes a DPSK demodulation system based on a novel Mach-Zehnder interference structure and presents a mathematical model of optical signal transmission in the system. To prove the correctness of the system principle and the mathematical model, the paper combines simulation with experiments. The simulation results show that the bit error rate of the system is smaller than  $2.38 \times 10^{-154}$  and thus meets the requirement that the bit error rate of a communication system should be smaller than  $10^{-12}$ . In addition, the DPSK modulation and demodulation experiment proves that the proposed system is feasible, and the experimental results show that the system successfully modulates and demodulates the  $m$  sequence. The temperature experiment proves that the  $Q$  value of the system is above 10 when the ambient temperature is within 0–70 °C, indicating reliable temperature stability of the system. Finally, the light source used in the experiment is a wide-linewidth light source, and its coherence length is smaller than the arm length difference, which proves that the novel demodulation system can reduce the system's requirement on light source linewidth. In summary, the novel demodulation system has higher mismatch robustness, better temperature stability, and lower requirements on the coherence properties of the light source.

**Key words** optical communications; novel Mach-Zehnder interference structure; differential phase-shift keying modulation and demodulation; arm length difference mismatch; temperature; light source linewidth