

引用格式: SHAO Xiangxin, MA Zixiao, LU Tianqi, et al. Design of Cobweb Fiber Bragg Grating Sensor Network Based on Gated Circulation Unit[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(3):0306004

邵向鑫,马子筱,路天麒,等.基于门控循环单元的蛛网形FBG传感网络设计[J].光子学报,2022,51(3):0306004

# 基于门控循环单元的蛛网形FBG传感网络设计

邵向鑫,马子筱,路天麒,李冬,江虹

(长春工业大学 电气与电子工程学院,长春 130012)

**摘 要:**针对大型结构健康监测对于光纤光栅传感网络的复用容量和维护成本的较高要求,设计了一种蛛网形拓扑结构的传感网络。该结构网络利用波分复用来增加网络的复用容量,并优化了基于门控循环单元的模型来对重叠波长进行解调。设计的新型传感网络具有较高的网络可靠性和网络复用容量,截取蛛网形网络的部分结构进行实验,设计了四种故障情况进行对比,证明了蛛网形网络具有较高的可靠性。通过改进解调模型的网络结构增加模型识别精度,采用训练良好的模型对不同重叠程度光谱解调,在89.9%情况下其均方根小于1 pm,证明改进模型可有效地对重叠光谱进行解调,大大增加了网络的复用容量。设计的新型传感网络可有效地增加网络的可靠性和复用容量。

**关键词:**光纤布拉格光栅;拓扑结构;门控循环单元;波分复用;深度学习;可靠性

中图分类号:TN253

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225103.0306004

## 0 引言

近年来,光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating,FBG)传感器发展迅速。它具有抗电磁干扰、耐腐蚀、体积小、线性传感、易于网络化复用等优点,被广泛应用于各个领域的压力监测和温度监测,尤其是大型结构的健康监测<sup>[1-3]</sup>。由于大型结构健康监测本身的特点,其对光纤光栅传感网络的复用容量和维护成本要求比较高,做到增大复用容量与降低维护成本的有机结合,就会大大促进光纤光栅传感网络的发展。

光纤断裂和传感器损坏是FBG传感网络最常见的故障<sup>[4]</sup>。提高传感器网络可靠性目前有两种常用方法,一种是构建网络时节点使用光开关<sup>[5-7]</sup>,另一种则是使用光耦合器来组成网络<sup>[8-10]</sup>。在大型结构的健康监测中,由于被检测物体体积庞大,这就要求传感网络所覆盖的范围必须非常广,大量的光开关不但造成成本的增加,而且处于远端的光开关控制起来也十分困难。使用光耦合器就可以避免远端控制问题,还可以提供冗余链路增强网络的可靠性和自愈性。在前人研究的基础上提出了一种基于光耦合器的蜂窝形光纤光栅传感网络的拓扑结构<sup>[11]</sup>,可以有效地提高光纤光栅传感网络的可靠性和自愈性。但是这种网络不便于与网络复用技术结合起来用于增加网络的复用容量。

传统的波分复用技术通常用来解决FBG传感器的多路复用问题,但传统波分复用中的每一个FBG传感器都需要各自的独立工作区,且相互之间不允许重叠,这就大大限制了在有限的光源带宽的条件下的FBG传感的复用数量。本着提高FBG传感网络的复用能力,通过将FBG传感器的中心波长重叠并进行解调<sup>[12-13]</sup>,研究人员最终提出了基于函数优化的新型解调办法,使得FBG的复用容量大大提高。

综合考虑光纤光栅传感网络的可靠性与大容量的复用,本文提出了一种基于光耦合器的蛛网形光纤光栅传感网络的拓扑结构,这种拓扑结构可以更好地与复用技术结合起来大大增加网络复用容量。使用改进的门控循环单元(Gated Circulation Unit,GRU)模型对重叠的波形进行FBG中心波长的检测<sup>[14]</sup>。本文设计的新型传感网络使得传感网络的可靠性和大容量复用得到了有机的结合,更有利于运用于大型结构的健康监测

基金项目:吉林省自然科学基金(No.20210101479JC)

第一作者:邵向鑫(1981—),男,讲师,博士,主要研究方向为信号处理。Email: shaoxiangxin@ccut.edu.cn

通讯作者:江虹(1970—),女,教授,博士,主要研究方向为光电子器件、光无源传感器件及弱信号处理等。Email: jianghong@ccut.edu.cn

收稿日期:2021-06-10;录用日期:2021-09-14

<http://www.photon.ac.cn>

测系统中。

## 1 工作原理

设计的传感网络的工作流程如图1,在系统启动时首先由计算机通过查找路由表判断系统是否存在故障,如果没有故障就控制光源发出入射光,光信号通过既定路径到达传感器并返回到光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA)中进行预处理,再由GRU模型进行解调,最终获取物理量。如果系统存在传输故障,则使用Dijkstra算法选择新的传输路径后再进行光信号的传输和处理。

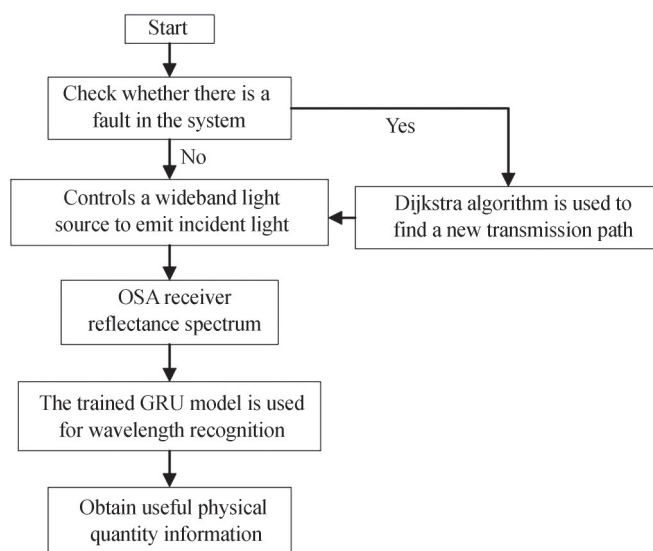


图1 传感系统工作流程

Fig. 1 Workflow of sensing system

### 1.1 网络结构

为了更好地兼顾网络的可靠性以及大容量复用的问题,提出了一种蛛网形拓扑结构,使得网络有更多的冗余链路来增加网络的可靠性。图2展示了蛛网形网络拓扑结构,光纤链路分布着FBG传感器,节点(D)是一个 $1 \times n$ 的光耦合器,中心局端(Center Office, CO)为中央控制单元。CO通过标记不同的D来区分不同的FBG传感器。通过Dijkstra算法,选择最短的传输路径,并将寻径结果保存为路由表。当传感网络的

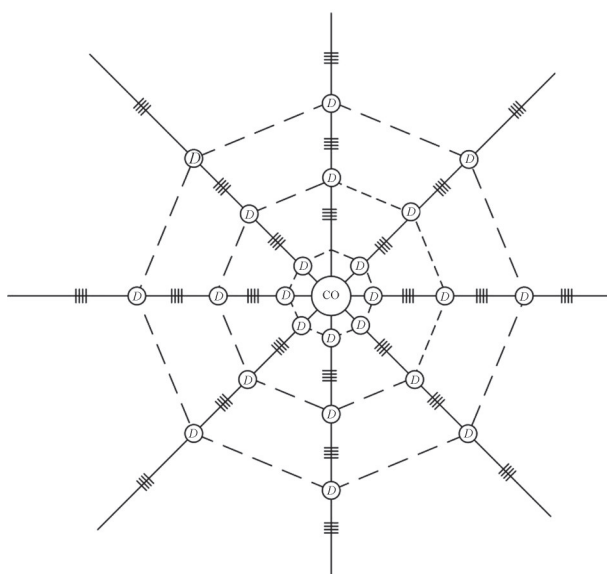


图2 传感网络拓扑结构

Fig.2 Topology of sensor network

光纤链路发生断裂或者传感器损坏,中央控制的单元就可以通过查询路由表定位故障点。

上述传感网络的工作过程为:首先由CO控制光源产生入射光,由光纤链路传输到FBG传感器,然后返回反射光,反射光中包含着物理量变化信息,该反射光经由光纤链路到达CO。最后,CO从反射光谱中提取出变量信息,就完成了对环境参量的实时监测。当传感网络出现故障时,通过为Dijkstra算法添加约束实现光谱在冗余链路中传输,这样传感网络就实现了自愈,进而提高了网络的可靠性。

### 1.2 Dijkstra算法基本原理

在单源最短路径算法领域中,Dijkstra算法是非常具有代表性的。首先,将在路径中的全部定点的集合设为 $V$ ,并将其分为2组。将 $V$ 的第一组命名为 $S$ ,第二组命名为 $U$ 。

Dijkstra算法的一般步骤如下:

- 1)当 $t=0$ 时,起点 $s$ 在 $S$ 中;除 $s$ 外的其他顶点在 $U$ 中。 $U$ 中顶点 $v$ 的距离为 $(s,v)$ 的长度。如果 $s$ 不与 $v$ 距离很近, $v$ 的距离就为 $\infty$ 。
- 2)在 $S$ 中加入 $U$ 中距离最短的顶点,并将该顶点从 $U$ 中移除。
- 3)更新顶点( $U$ 到 $S$ )距离。
- 4)重复2)和3),遍历所有顶点。

### 1.3 传感解调原理

图3展示了传感网络的部分系统框图。宽带光源产生的入射光传输到FBG传感网络,它经过了光环形器和一个 $1\times 8$ 的光开关,每一条光纤链路路上的FBG的反射光经过该条光纤链路反向传输至光环形器,反射光经由光环形器进入光谱分析仪(OSA)进行采样,由采样设备(OSA)采集的光谱数据传输输入电脑端(PC)进行中心波长的检测。传统的波分复用(Wavelength Division Multiplex, WDM)中的FBG传感器的工作区域相互独立,不允许重叠,这造成每一个FBG传感器占用一定的波长范围,在有限的光源带宽下复用容量受到严重限制。本文所设计的新型复用模型允许任意两个FBG光谱重叠,这将大大增加FBG传感网络复用容量。

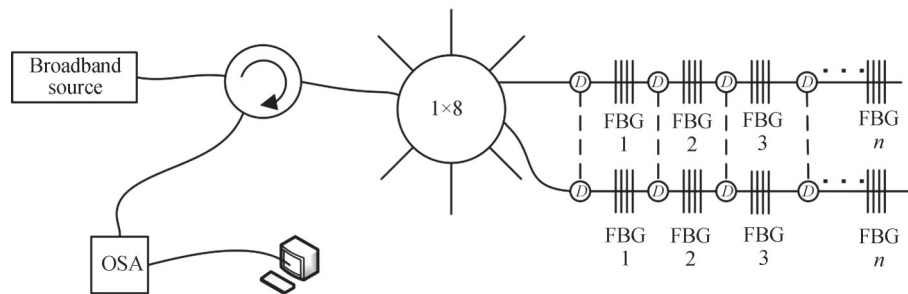


图3 传感网络系统框图  
Fig. 3 Block diagram of sensor network system

新型FBG传感网络允许FBG光谱重叠,大大提高了传感网络的复用能力。图4显示了FBG的光谱重

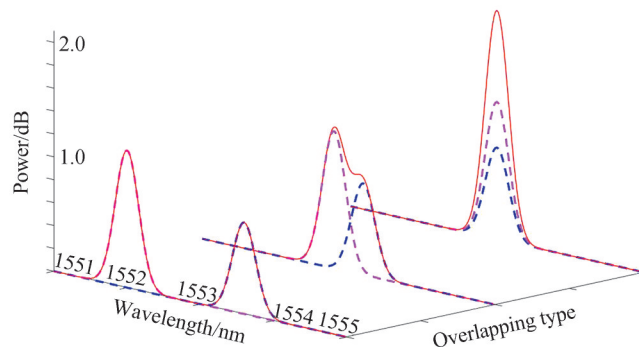


图4 FBG反射光谱重叠类型  
Fig.4 Overlapping types of FBG reflection spectra

叠的三种情况,即不重叠、部分重叠和完全重叠。通过常规解调方法就可以得到不重叠时FBG的反射光谱;当光谱部分或完全重叠时,两个或三个反射光谱之间相互影响造成串扰,常规峰值检测方法难以处理,因此重叠光谱的解调成为增加FBG传感网络复用容量的难题。本文将光谱的波长检测问题转换为非线性回归问题,利用GRU算法建立回归模型实现对FBG重叠光谱的波长检测。

首先令FBG传感网络的重叠光谱解调转换为非线性回归问题,其中 $r(\lambda, \lambda_{Bi})$ 是单个FBG传感器的反射谱函数,假设每个FBG反射谱为高斯分布,表示为

$$r(\lambda, \lambda_{Bi}) = \exp\left[-4\ln 2\left(\frac{\lambda - \lambda_{Bi}}{\Delta\lambda_{Bi}}\right)^2\right] \quad (1)$$

式中, $\lambda_{Bi}$ 为第*i*个FBG传感器的中心波长, $\Delta\lambda_{Bi}$ 是半峰全宽, $n$ 为传感网络的传感器个数。

假设FBG传感器网络包含*n*个FBG传感器,则网络的反射光谱 $R(\lambda)$ 是每一个FBG反射谱的总和,表示为

$$R(\lambda) = \sum_{i=1}^n r(\lambda, \lambda_{Bi}) = f(\lambda, \lambda_{Bi}) \quad (2)$$

由于所设计的新型模型允许光谱重叠,那么由FBG组成的传感网络就可以分为*n*个独立的工作区间,两个或三个FBG传感器的反射光谱存在于一个区间内,设第*j*个工作区间的实测光谱为 $r_j(\lambda)$ ,那么总反射光谱 $R(\lambda)$ 表示为

$$R(\lambda) = \sum_{j=1}^n r_j(\lambda) = \sum_{j=1}^n f(\lambda, \lambda_{B1}, \lambda_{B2}, \lambda_{B3}, \lambda_{B4}) \quad (3)$$

式中, $f(\lambda, \lambda_{B1}, \lambda_{B2}, \lambda_{B3})$ 为第*j*个FBG实测光谱的函数。即只要得到 $R(\lambda)$ 就可以得到 $r_j(\lambda)$ ,再经过计算就可以得到 $\lambda_{B1}, \lambda_{B2}, \lambda_{B3}, \lambda_{B4}$ ,计算表达式为

$$(\lambda_{B1}, \lambda_{B2}, \lambda_{B3}, \lambda_{B4})_j = f^{-1}[r_j(\lambda)] \quad (4)$$

根据式(4)可知,可以将重叠光谱的解调问题转化为求反射光谱的反函数问题,但是此类函数用数值方法难以处理,故本文采用机器学习算法GRU来训练反函数模型。采用由反射光谱的理论模型产生的训练数据集来对模型进行训练,最后利用训练好的模型可以对实测FBG重叠反射光谱的中心波长进行检测。

#### 1.4 GRU基本原理

在神经网络发展的过程中,几乎所有关于长短期记忆网络(Long Short-term Memory, LSTM)的文献中对于LSTM的结构都会做出一些变动,也称为LSTM的变体。其中变动较大的是门控循环单元,也就是较为流行的GRU。GRU在前者基础上进行了优化,只含有两个门控结构。在超参数全部调优的情况下,二者性能相当,但是GRU结构更为简单,训练样本较少易实现。

GRU单元的内部结构如图5,一个门控循环单元(GRU)包括重置门 $r_t$ 和更新门 $z_t$ 。更新门的作用就是决定当前时刻的输出状态 $h_t$ 包含新信息和历史信息的比例,重置门就是决定上一时刻输出状态 $h_{t-1}$ 保留在当前候选状态 $\tilde{h}_t$ 中的多少,GRU的计算表达式为

$$r_t = \sigma(W_r x_t + U_r h_{t-1} + b_r) \quad (5)$$

$$z_t = \sigma(W_z x_t + U_z h_{t-1} + b_z) \quad (6)$$

$$\tilde{h}_t = \tanh[W_c x_t + U_c(r_t * h_{t-1}) + b_c] \quad (7)$$

$$h_t = z_t * h_{t-1} + (1 - z_t) * \tilde{h}_t \quad (8)$$

式中,\*表示卷积, $x_t$ 是*t*时刻的输入, $h_t$ 和 $h_{t-1}$ 是*t*时刻和*t-1*时刻的单元的输出状态, $W_r, W_c, W_z$ 分别是输

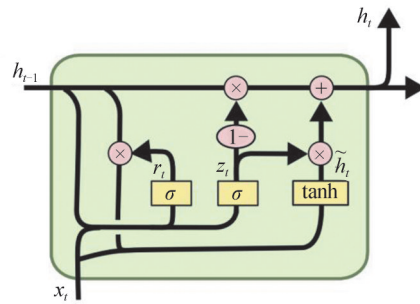


图5 GRU的单元结构  
Fig.5 Unit structure of the GRU

入状态  $x_i$  和重置门  $r_i$ , 候选状态  $\tilde{h}_i$ , 更新门  $z_i$  之间的权重矩阵,  $U_r, U_c, U_z$  是上一时刻状态与重置门  $r_i$ , 候选状态  $\tilde{h}_i$ , 更新门  $z_i$  之间的权重矩阵。

$\sigma$  和  $\tanh$  分别是 Sigmoid 函数和双曲正切函数, 其表达式为

$$\sigma = \frac{1}{1 + e^{-t}} \quad (9)$$

$$\tanh(t) = \frac{1 - e^{-2t}}{1 + e^{-2t}} \quad (10)$$

## 2 仿真验证结果

功率为 100 mW、半峰全宽(FWHM)为 50 nm 的宽带光源作为实验中的光源部分, 光通过光环形器进入网络, 到达传感器产生反射谱通过链路反向传输至光环形器, 再进入 OSA 对 1 550~1 555 nm 范围采样, 分辨率设为 10 pm, 采样点数为 300 个。光环形器(Circular)的作用是分离正反向传输光, 网络中的所有的光耦合器输出端为 3 端口。实验所采用的 FBG 传感器的中心波长分别是 1 552.475 nm、1 552.925 nm、1 553.315 nm、1 553.765 nm, 传感器分层排列, 同一圈上传感器的中心波长一致。使用中心波长的测量均方根误差(RMSE)评价检测性能。

### 2.1 蛛网形传感网络可靠性分析

为验证传感网络的可靠性, 实验取网络的一部分进行讨论, 拓扑结构如图 6。由于传感网络的故障主要是光纤的断裂, 故本文以讨论光纤断裂为主。主要列举了一些故障情况分析网络的自愈性, 当网络中的光纤链路发生断裂时, 网络 CO 可以通过识别  $D$  来定位故障位置, 并且通过 Dijkstra 算法可以自动寻找新的最短传输路径, 则传感信号仍然可以通过其他冗余链路进行传播, 实现网络的自愈。

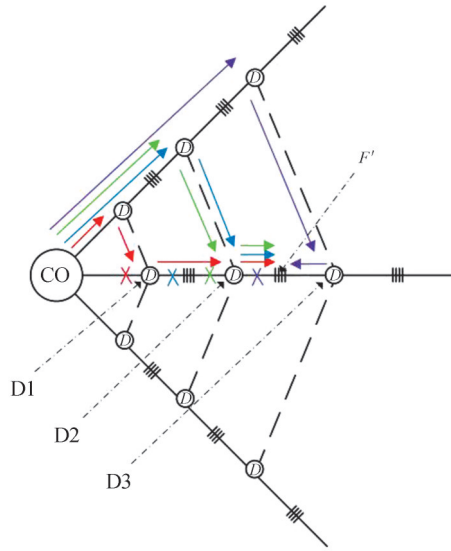


图 6 蛛网形网络故障自愈示意图  
Fig.6 Schematic diagram of cobweb network fault self-healing

如图 6, 把目标传感器定义为  $F'$ , 将它附近几个光耦合器分别设为  $D1$ 、 $D2$ 、 $D3$ , 然后通过控制光耦合器  $D1$ 、 $D2$ 、 $D3$  导通与断开来模拟光纤链路的断裂。具体实验步骤如下:

故障 1 (红色表示): 断开  $D1$  的输入端,  $CO$  可以接受到目标传感器  $F'$  的反射光谱。

故障 2 (蓝色表示): 断开  $D1$  的输入以及输出, 此时的  $CO$  仍然可以接收到  $F'$  的反射光谱。

故障 3 (绿色表示): 断开  $D1$  的输入输出以及  $D2$  的输入,  $CO$  可以接收到  $F'$  反射光谱。

故障 4 (紫色表示): 断开  $D1$  和  $D2$  的输入输出, 此时虽然有通路可以使入射光传输到  $F'$ , 但是经过的上一传感器与目标传感器  $F'$  的工作波长一样, 导致  $CO$  并不能接收到  $F'$  的反射光谱, 在这种故障情况下传感网络并不能完成自愈, 需要人工解决故障。

综上所述,本文所提出的蛛网形传感网络具有一定的网络自愈能力,提高了传感网络的可靠性,对大型结构的健康监测工程具有借鉴意义。实验结果总结如表1。

表1 蛛网形网络可靠性实验结果  
Table 1 Experimental results of cobweb network reliability

Case	D1, D2, and D3 operations	Can CO receive the reflection spectrum of F prime	Schematic color
Fault1	Disconnect: D1 input	Yes	Red
Fault2	Disconnect: D1 input and output	Yes	Blue
Fault3	Disconnect: D1 input/output, D2 input	Yes	Green
Fault4	Disconnect: D1 input/output, D2 input/output	No	Purple

## 2.2 GRU模型对重叠光谱的解调分析

为了进一步验证GRU模型对多个FBG传感网络重叠光谱检测的有效性,进行四个FBG传感网络的检测实验。采用四个FBG串联组成传感网络,其工作带宽为1 550~1 555 nm。实验通过施加应力改变FBG1的中心波长,而FBG2、FBG3和FBG4的波长固定在原来位置从而实现光谱的重叠,实验采集10 000个样本数据对GRU模型进行训练,并从中抽取2 000个样本来当作本次实验的测试样本。为了从重叠光谱中区分出每个FBG的中心波长,使用衰减器让FBG1到FBG4的峰值反射率依次降低。模型采用三层GRU结构通过Keras框架实现,其中Keras的底层库采用TensorFlow<sup>[15-17]</sup>。具体模型架构见表2。

表2 本文算法模型总结  
Table 2 This paper summarizes the algorithm model

Layer (type)	Output shape	Param #
gru (GRU)	(None, 50, 500)	783 000
gru_1 (GRU)	(None, 50, 500)	1 503 000
gru_2 (GRU)	(None, 200)	421 200
dropout (Dropout)	(None, 200)	0
dense (Dense)	(None, 50)	10 050
dense_1 (Dense)	(None, 4)	204
Total params: 2,717,454		
Trainable params: 2,717,454		
Non-trainable params: 0		

将1 550~1 555 nm范围的光谱数据(1 000个点)输入到模型中,输出为FBG1、FBG2、FBG3和FBG4的中心波长值。GRU批次大小设为64,最初学习率是0.01,最终学习率0.000 1,衰减率为0.5,采用8 000个样本进行训练,2 000个测试样本,最大迭代次数设为1 000。训练过程如图7,经过1 000次迭代之后训练与测试误差保持在0.5 pm左右。

该模型经过充分训练后,无需再训练即可检测光谱波长数据。该模型用于测试2 000个测试样本,测试结果中89.9%的测试RMSE小于1 pm。表3和图8是测试样本中五种比较典型的重叠案例的测试结果,可见GRU模型的测试误差保持在0.5 pm左右,该模型对重叠的波形解调有着较高的精确性。

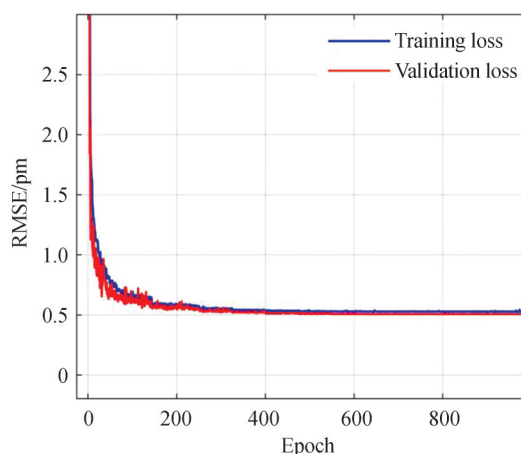


图7 GRU算法的训练过程  
Fig.7 GRU algorithm training process

表3 对不同重叠情况的光谱解调结果  
Table 3 Spectral demodulation results for different overlap condition

Case	Predicted				True				RMSE/ pm
	$\lambda_{B1}/\text{nm}$	$\lambda_{B2}/\text{nm}$	$\lambda_{B3}/\text{nm}$	$\lambda_{B4}/\text{nm}$	$\lambda_{B1}/\text{nm}$	$\lambda_{B2}/\text{nm}$	$\lambda_{B3}/\text{nm}$	$\lambda_{B4}/\text{nm}$	
a	1 552.748 901	1 552.924 842	1 553.314 941	1 553.705 13	1 552.75	1 552.925	1 553.315	1 553.705	0.559 8
b	1 553.001 034	1 552.924 836	1 553.314 951	1 553.705 125	1 553	1 552.925	1 553.315	1 553.705	0.527 8
c	1 553.251 226	1 552.924 849	1 553.314 963	1 553.705 12	1 553.25	1 552.925	1 553.315	1 553.705	0.620 8
d	1 553.500 811	1 552.924 857	1 553.314 982	1 553.705 113	1 553.5	1 552.925	1 553.315	1 553.705	0.415 9
e	1 553.748 899	1 552.924 862	1 553.314 983	1 553.705 098	1 553.75	1 552.925	1 553.315	1 553.705	0.557 0

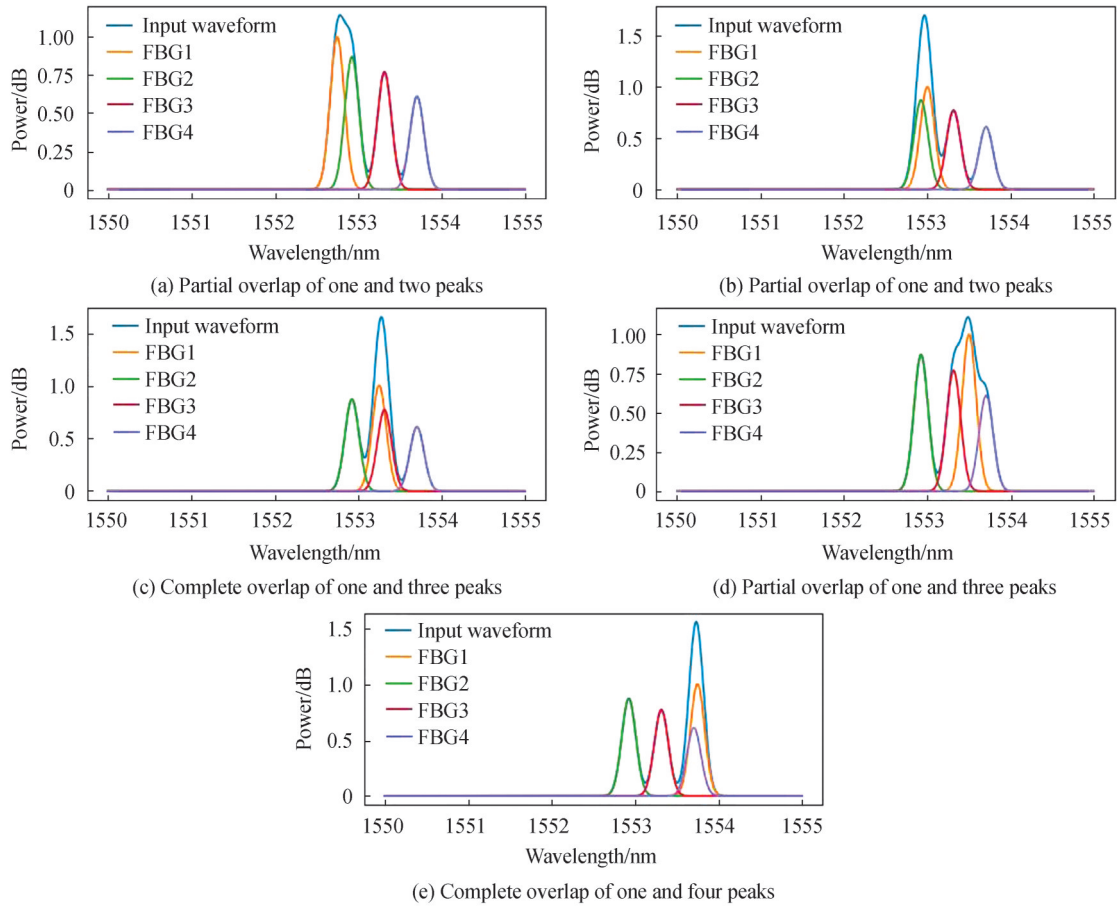


图8 五种重叠情况下训练模型测试结果

Fig.8 Test results of the training model under five overlapping conditions

图9展示了GRU模型实测不同应变值下四个FBG的波长值,不难看出在各种程度重叠的情况下GRU模型都能够检测到每个FBG传感器的波长。在对FBG1传感器均匀施加压力的情况下,FBG1传感器的波长检测结果呈现线性变化,其余传感器波长基本保持不变,可以证明GRU模型可以在不同的情况下实现对四个传感器波长的准确识别。故经过优化网络结构的GRU模型可以完成对光谱不同程度重叠情况下的FBG中心波长的检测并有效增加识别精度。

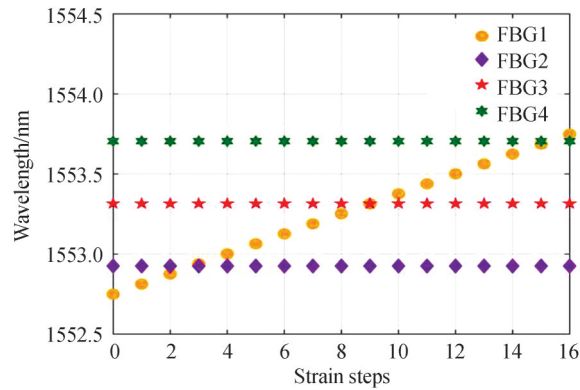


图9 GRU模型实测不同应变值下四个FBG的波长值

Fig. 9 Wavelength values of four FBG under different measured strain values in the GRU model

### 3 结论

本文提出了一种基于GRU的新型FBG传感网络,通过蛛网形的拓扑结构和允许光谱重叠的波长检测技术,将提高网络的可靠性及增加网络复用容量这两者整合了起来。蛛网性的拓扑结构为传感网络提供了大量冗余链路,可以提高网络的可靠性,利用门控循环单元对光谱的序列特征进行训练学习得到解调模型,实现对重叠波长的解调。实验证明,蛛网形拓扑结构具有一定的网络自愈性,在大多数情况下可实现传感网络的自愈,有效增加了传感网络的可靠性;并且利用GRU算法构建的解调模型可以实现对重叠光谱的高精度解调,大大增加了网络的复用容量和精确性。本文设计的传感网络对大型结构健康监测系统的设计具有借鉴意义。

#### 参考文献

- [1] OU Yiwen, ZHOU Ciming, QIAN Li, et al. Large WDM FBG sensor network based on frequency-shifted interferometry [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(6): 535-538.
- [2] XIAO Hai, ZHANG Yanan, SHEN Lincheng, et al. Research on curvature serialization in the curve reconstruction algorithm based on fiber Bragg gratings[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 17(5): 993-999.  
肖海,章亚男,沈林勇,等.光纤光栅曲线重建算法中的曲率连续化研究[J].仪器仪表学报, 2016, 17(5): 993-999.
- [3] FAN Lijimg, LI Yongqian, YAO Guozhen. Progress of optical fiber grating laser sensor and its research [J]. Optical Communication Technique, 2017, 41(1): 37-40.  
范利净,李永倩,姚国珍.光纤光栅激光传感器与其研究进展[J].光通信技术, 2017, 41(1): 37-40.
- [4] ZHANG Hongxia, WANG Shu, GONG Yuhan, et al. A quantitative robustness evaluation model for optical fiber sensor networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(8): 1240-1246.
- [5] PENG P C, WANG J B, HUANG K Y. Reliable fiber sensor system with star-ring-bus architecture[J]. Sensors, 2010, 10(5): 4194-4205.
- [6] KUO S T, PENG P C, SUN J W, et al. A delta-star-based multipoint fiber Bragg grating sensor network[J]. Sensors Journal, 2011, 11(4): 875-881.
- [7] WU C Y, FENG K M, PENG P C, et al. Three-dimensional mesh-based multipoint sensing system with self-healing functionality[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(8): 565-567.
- [8] VALLEJO M F, PEREZ-HERRERA R A, ELOSUA C, et al. Resilient amplified double-ring optical networks to multiplex optical fiber sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(10): 1301-1306.
- [9] JIA Dagong, ZHANG Yulong, CHEN Zhitong, et al. A self-healing passive fiber bragg grating sensor network[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015(33): 2062-2067.
- [10] YEH C H, CHOW C W, WU P C, et al. A simple fiber Bragg grating-based sensor network architecture with self-protecting and monitoring functions[J]. Sensors, 2011, 11(2): 1375-1382.
- [11] WANG Zefan, YIN Aihan, GUO Xin, et al. Reliability study of cellular optical fiber grating sensing network[J]. Optical Communication Technique, 2018, 42(6): 18-20.  
汪泽帆,殷爱菡,郭鑫,等.蜂窝形光纤光栅传感网络的可靠性研究[J].光通信技术, 2018, 42(6): 18-20.
- [12] RODRIGUEZ C L, ANGELES Q M, MENEZO P, et al. Study of fiber bragg grating spectral overlapping for laser structures[J]. Photonics Technology Letters IEEE, 2014, 26(11): 1108-1111.
- [13] HU Y, MO W, DONG K, et al. Using maximum spectrum of continuous wavelet transform for demodulation of an



- overlapped spectrum in a fiber Bragg grating sensor network[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(17):4670.
- [14] CHEN Jing, LIN Yating, ZHOU Qingxu, et al. Longth demodulation of overlapping spectra of fiber Bragg Grating Sensing networks based on peak matching distributed estimation algorithm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(4): 0406002.
- 陈静,林雅婷,周清旭,等. 基于峰值匹配分布式估计算法的光纤布拉格光栅传感网络重叠光谱的波长解调[J]. *光子学报*, 2019, 48(4):0406002.
- [15] MANIE Y C, PENG P C, SHIU R K, et al. Enhancement of the multiplexing capacity and measurement accuracy of FBG sensor system using IWDM technique and deep learning algorithm [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(6): 1589-1603.
- [16] DEHNAW A M, MANIE Y C, CHEN Y Y, et al. Design reliable bus structure distributed fiber bragg grating sensor network using gated recurrent unit network[J]. *Sensors*, 2020, 20(24): 7355.
- [17] MANIC Y C, LI J W, PENG P C, et al. Using a machine learning algorithm integrated with data de-noising techniques to optimize the multipoint sensor network[J]. *Sensors*, 2020, 20(4):1070.

## Design of Cobweb Fiber Bragg Grating Sensor Network Based on Gated Circulation Unit

SHAO Xiangxin, MA Zixiao, LU Tianqi, LI Dong, JIANG Hong

(*School of Electrical and Electronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China*)

**Abstract:** A cobweb topology sensor network was designed to meet the high requirements of large structure health monitoring on the reuse capacity and maintenance cost of fiber Bragg grating sensor network. In this structured network, Wavelength Division Multiplex (WDM) is used to increase the multiplexing capacity of the network, and the model based on gated cyclic unit is optimized to demodulate overlapping wavelengths. The new sensor network designed has high network reliability and network reuse capacity. Part of the structure of cobweb network is selected for experiment, and four kinds of fault conditions are designed for comparison. Through the four kinds of fault conditions, the signal can be effectively transmitted, which proves that the cobweb network has high reliability. In this paper, the four cases are summarized and summarized in the form of a table. The table shows that in these four cases, the network can still be used normally and has a high reliability. By improving the network structure of the demodulation model, the recognition accuracy of the model is increased, and the well-trained model is used to demodulate the spectra with different overlapping degrees. In 89.9% cases, the root mean square of the model is less than 1 PM, which proves that the improved model can effectively demodulate the overlapping spectra, and greatly increases the network reuse capacity. The experimental results of demodulation are presented in the form of tables and pictures. It can be seen that the central wavelength of each sensor can be well identified and the physical variables can be obtained under the condition of different degrees of spectral overlap. The new sensor network can increase the reliability and reuse capacity effectively.

**Key words:** Fiber Bragg grating; Topological structure; Gated circulation unit; Wavelength division multiplex; Deep learning; Reliability

**OCIS Codes:** 060.3735; 060.4256; 060.4258; 280.4788; 070.1060