

干涉型长距离分布式光纤传感系统

周小群 陈抗生

(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

饭山宏一

(日本金泽大学工学部, 日本金泽)

摘 要 提出并验证了一种新型的以迈克耳逊干涉仪为基础的调频连续波(Frequency modulated continuous-wave)干涉型长距离分布式光纤传感系统。该系统在干涉仪的参考回路中巧妙地引入了一个带有移频器的光学回路, 使系统连续测量范围增加到 4 倍, 达 48 m。

关键词 光纤, 传感器, 调频连续波干涉仪, 频率多重化。

光纤传感器可用于通讯、工程、物理参数测量等领域, 根据不同的需要, 它也由单点检测发展成为多点和分布式检测^[1, 2]。本文作者设计了一种新型的、以迈克耳逊干涉仪为基础、采用调频连续波技术调制光源频率的长距离分布式光纤传感系统。该系统在迈克耳逊干涉仪的参考回路中引入了一个带有移频器的光学回路, 将系统的测量范围提高到 4 倍, 达 48 m。该系统既有调频连续波干涉仪高精度测量的优点, 又有长距离连续测量的特点, 不仅能安全地进行高精度、长距离连续监测; 还能为大型构件如桥梁、大坝等进行长距离、连续应力分布的监测。因此, 具有多方面的应用前景和重大的经济效益。

1 系统构成及原理

调频连续波干涉型长距离分布式光纤传感系统的实验装置如图 1 所示, 主要由调频连续波光源、迈克耳逊反射干涉仪和信号接收部分组成。为改善光源频率调制的线性响应特性, 提高了分辨率, 使用了频率补偿器。为延长可测量距离, 在干涉仪的参考光路中引入一个带有移频器的光学回路, 回路长度为 l 。该移频器是一个声光调制器, 其工作频率 $f = 85 \text{ MHz}$ 。一根长度为 L 的单模光纤作为信号光路, 既用来感应信号又用来传输信号。

在系统的设计中, 光学回路的长度 l 必须略小于光源的相干长度 L_c 。否则在频谱分析仪上会出现一个信

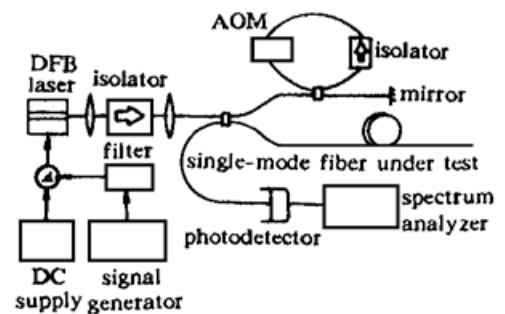


Fig. 1 The setup of distributed optical fiber sensing system

号不可检测区域。由于参考光路中引入了一个带有移频器的光学回路，参考光束被加长到光学回路长度的整数倍 Nl ，并具有整数倍移频器的工作频率 Nf 。因此，来自不同回路长度整数倍区域内的被检测信号可在相应的整数倍移频器工作频率的区域内观测到，从而测量范围被加长。被检测信号频率由下式计算^[3]：

$$f_b = n(2L - Nl)f_m\Delta F/c + Nf, \quad (N = 0, 1, \dots, \infty) \tag{1}$$

(1) 式中， n 为光纤的折射率， N 为参考光束在光学回路中的旋转圈数， f_m 为调制波的频率， ΔF 为被调制激光器输出光频率变化范围， c 为光速。根据相干性，系统的光程差 $(2L - Nl)$ ，最大只能等于光源的相干长度 L_c ，即：

$$2L - Nl = L_c \approx l \tag{2}$$

则最大可测量长度为：

$$L = (N + 1)l/2 \tag{3}$$

$N = 0$ 时，即参考光束没有通过光学回路时，只能在 0 频区域检测到来自 $L = 0 \sim l/2$ 范围内的信号；当参考光束在光学回路中旋转了一圈时，即 $N = 1$ ，在移频器工作频率 f 区域内可观测到来自 $L = l/2 \sim l$ 范围内的信号。一般地，在 Nf 频率区域内观测到来自 $L = Nl/2 \sim (1 + N)l/2$ 范围内的信号。由(3) 式可知，最大可测量长度取决于参考光束在光学回路中的旋转圈数 N ，而 N 的大小取决于光束在光学回路中的能量损失。

2 实验结果与讨论

利用图 1 所示的实验装置，测量了不同长度光纤末端的菲涅耳反射信号。图 2 表示 0 频区域的来自 $L = 0 \sim l/2$ 范围内的信号功率谱。随着测量距离的增加，相干度降低，光能量损失增加，干涉信号强度越来越小。由于光程差 $2L$ 最大等于光源相干长度 $L_c = 30 \text{ m}$ ，所以只能观测到 15 m 以内的信号。这个结果表示，如果不在参考光路中引入带有移频器的光学回路，系统的测量范围只有光源相干长度的一半。

图 3 表示在 85 MHz 频率区域内的来自 $L = l/2 \sim l$ 范围内的信号功率谱。有一个很强的反射峰出现在 $L = 17 \text{ m}$ 处，这是因为此时参考光束在光学回路中旋转了一圈，系统的光程差就远小于光源的相干长度 ($2L - l = 2 \times 17 - 30 = 4 \text{ m}$)，造成强干涉。根据(3) 式，在 85 MHz 频域能观测到的最大距离等于 30 m。图 4 和图 5 分别表示 170 MHz 和 255 MHz 频率区域内的来自 $L = l \sim 3l/2$ 和 $L = 3l/2 \sim 2l$ 范围内的信号功率谱。没有观测到大于 48m 范围

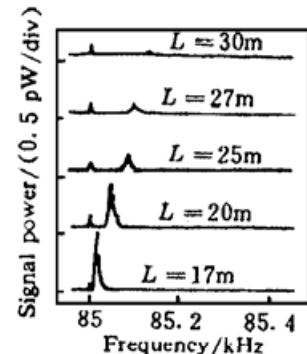
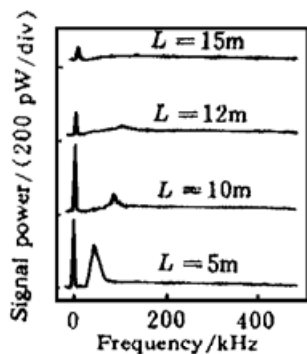


Fig. 2 The signal power spectra around 0 Hz for $L = 0 \sim l/2$

Fig. 3 The signal power spectra around 85 MHz for $L = l/2 \sim l$

的信号, 是因为光学回路中的移频器能量损失太大(达 8 dB)。所以, 参考光束在光学回路中转了 3 圈后, 光能量损失过大, 光信号难以观测到了。图 2~ 图 5 的实验结果清楚地表明, 使用了带有移频器的光学回路后, 系统的测量范围从 15 m 提高到 48 m。如果在光学回路中使用低能量损失的移频器或增加光纤放大器, 系统测量范围无疑能被进一步提高。

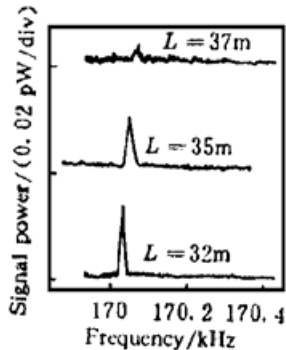


Fig. 4 The signal power spectra around 170 MHz for $L = l \sim 3l/2$

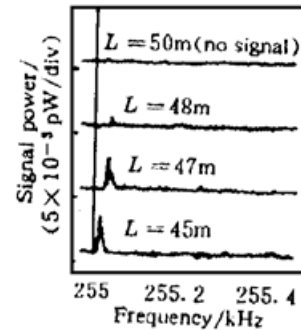


Fig. 5 The signal power spectra around 255 MHz for $L = 3l/2 \sim 2l$

结 论 作者提出并实验验证了一种干涉型长距离分布式光纤传感系统。其特点是在参考光路中引入一个带有移频器的光学回路, 使参考光束不仅被移频而且光路被延长。从而能在不同频率区域内观测来自不同测量范围的信号, 使系统的整个测量范围被加长。实验证明系统的测量范围从 15 m 增加到 48 m。若使用低能量损失的移频器, 测量范围可进一步提高。

参 考 文 献

- [1] J. L. Brooks, R. H. Wentworth, R. C. Youngquist *et al.*, Coherence multiplexing of fiber-optic interferometric sensors. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **LT-3**(5) : 1062~ 1072
- [2] X. Zhou, K. Iiyama, K. Hayashi, Detection scheme of coherence-multiplexed sensor signals using an optical loop with a frequency shifter: sensitivity enhancement. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6** (6) : 767~ 769
- [3] X. Zhou, K. Iiyama, K. Hayashi, Extended-range FMCW reflectometry using an optical loop with a frequency shifter. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(2) : 248~ 250

A Distributed Interference Fiber-Optic Sensor System for Long Distance Measurement

Zhou Xiaoqun Chen Kangsheng

(Department of Information & Electronics Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310008)

K. Iiyama

(Department of Electrical and Computer Engineering, Kanazawa University, Japan)

(Received 18 January 1997; revised 17 April 1997)

Abstract A novel distributed interference fiber-optic sensor system for long distance measurement is proposed based on Machelson interferometer using a modulated laser (Frequency modulated continuous-wave). By incorporating an optical loop with a frequency shifter in the reference optical path of Machelson interferometer, the measurement range of the sensor system has been increased 4 times and reached 48 meters.

Key words fiber, sensor, FMCW interferometer, frequency multiplexing.