

一种新型光纤补偿网络及其优化设计*

钟先信 刘桂雄 宋立 姜学煤

(重庆大学, 重庆 630044)

摘要 本文介绍一种新颖的三节点式光纤强度调制传感器全光纤补偿网络的原理和建模。研究表明,这种网络可补偿光源波动、传输损耗变化、光电器件特性漂移等影响。我们又进一步研究了由于网络节点特性变化所引入的误差对检测精度影响,讨论了在一定检测精度要求下,这种光纤补偿网络的优化设计。

1 引言

强度调制光纤传感器技术较成熟,结构简单,成本低廉,适用性广,已被应用于几何量、机械量、化学量等方面的测量。根据有关报道,强度调制光纤传感器在光纤传感器中约占30%。但是,由于光源的波动,光源与光纤耦合特性的变化、光纤传输中的损耗和光纤连接损耗等的变化、光电器件的特性漂移和放大器放大倍率的改变等因素的影响,改变了传感器的特性,大大地降低了传感器的精度,几乎使得强度调制传感器的所有优点都变得没有实际意义。因此,研究光纤强度补偿技术,提高抗干扰能力和检测精度具有重要的意义。

对于强度调制光纤传感器补偿技术和研究,国内外十分活跃。在补偿网络技术方面,英国斯特科莱大学的 B. Culshaw 教授提出了补偿网络方案^[1],有四个节点,结构不理想,难以提高精度。我校研制了四端光纤补偿网络^[2],只有两个节点,在一定的约束条件下,能提高抗干扰能力和提高精度。但是,值得注意的是,一个被人们忽视却又十分重要的问题,就是人们对网络的研究一般都认定网络的结构参数是不变的,没有进行网络的结构参数的优化工作。实际上,由于温度、压力、扰动等因素的影响,网络的参数要发生漂移,这是在网络设计中必须考虑的。本文针对现有研究的不足,提出了一种具有三个节点的全光纤式补偿网络。该网络实现容易,结构简单。同时,考虑到网络特性参数的变化,通过计算机研究了网络参数的变化及选择对检测精度的影响,为光纤传感器最优化设计提供了理论依据。

2 三节点式光纤补偿网络的工作原理

全光纤三节点式光纤补偿网络的原理如图1所示。

图1中 x_1 、 x_2 、 x_3 分别表示光纤 Y 分路器、X 型耦合器和 Y 型耦合器; T_1 和 T_2 表示光源; L_m 为被测强度调制信号区; R_1 和 R_2 为接收器。

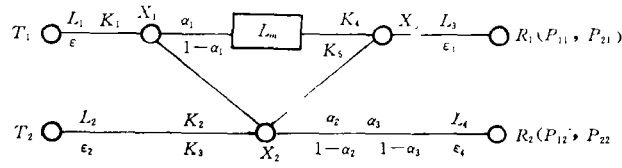


图1 全光纤三节点式强度补偿网络

假定光源 T_1 工作时,通过网络后,接收器 R_1 输出的信号为 P_{11} (设放大倍数为 A_1),接收器 R_2 输出的信号 P_{12} (设放大倍数为 A_2)。则根据光路的计算,可求得输出的信号为 P_{11} 和 P_{12} 分别为

$$P_{11} = I_1 \cdot \epsilon_1 \cdot K_1 \cdot \epsilon_3 \cdot H_1 A_1 [\alpha_1 \cdot L_m \cdot K_4 + (1 - \alpha_1) K_2 \cdot \alpha_2 \cdot K_5] \quad (1)$$

$$P_{12} = I_1 \cdot \epsilon_1 \cdot K_1 (1 - \alpha_1) K_2 (1 - \alpha_2) \epsilon_4 \cdot H_2 \cdot A_2 \quad (2)$$

式中: I_1, I_2 —光源 T_1, T_2 的光强;

$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$ —分别表示光纤 L_1, L_2, L_3, L_4 的传输损耗系数;

K_1 —节点 x_1 的分光损耗系数;

K_2, K_3 —分别表示光纤 $\overline{X_2 X_3}$ 和 L_2 的传输光在节点 x_2 的分光损耗系数;

K_4, K_5 —分别表示光纤 $\overline{X_1 X_3}$ 和 $\overline{X_2 X_3}$ 的传输光在节点 x_3 的耦合损耗系数;

α_1 —节点 x_1 的分光系数;

α_2, α_3 —分别表示光纤 $\overline{X_1 X_2}$ 和 L_2 的传输光在节点 x_2 的分光系数;

H_1, H_2 —分别表示接收器 R_1 和 R_2 的响应函数;

A_1, A_2 —分别表示接收器 R_1 和 R_2 的放大倍数。

同理,当光源 T_2 工作时,接收器 R_1 和 R_2 输出信号 P_{21} 和 P_{22} 分别为

$$P_{21} = I_2 \cdot \epsilon_2 \cdot K_3 \cdot \alpha_3 \cdot K_5 \cdot \epsilon_3 \cdot H_1 \cdot A_1 \quad (3)$$

$$P_{22} = I_2 \cdot \epsilon_2 \cdot K_3 (1 - \alpha_3) \epsilon_4 \cdot H_2 \cdot A_2 \quad (4)$$

令

$$E = \frac{P_{11} \cdot P_{22}}{P_{12} \cdot P_{21}} \quad (5)$$

将(1)~(4)式中 $P_{11} \cdot P_{12} \cdot P_{21}$ 和 P_{22} 值代入(5)式,则

$$E = \frac{[\alpha_1 \cdot L_m \cdot K_4 + (1 - \alpha_1) K_2 \cdot \alpha_2 \cdot K_5] (1 - \alpha_3)}{(1 - \alpha_1) K_2 (1 - \alpha_2) \alpha_3 \cdot K_5} = \frac{\alpha_1 (1 - \alpha_3) K_4 \cdot L_m}{(1 - \alpha_1) (1 - \alpha_2) \alpha_3 \cdot K_2 \cdot K_5} + \frac{\alpha_2 (1 - \alpha_3)}{(1 - \alpha_2) \alpha_3} = A \cdot L_m + B \quad (6)$$

上式中 $A = \frac{\alpha_1 (1 - \alpha_3) K_4}{(1 - \alpha_1) (1 - \alpha_2) \alpha_3 K_2 K_5}, B = \frac{\alpha_2 (1 - \alpha_3)}{(1 - \alpha_2) \alpha_3}$

A 和 B 为与网络有关的常数。对检测信号进行处理可求得 $P_{11}, P_{12}, P_{21}, P_{22}$ 等分量,由式(5)可求得 E 值,进而通过式(6)可求得被测信号 L_m 。

从式(6)可知,被测量 L_m 仅与网络内部参数有关,而与光源波动、传输损耗变化、光电器件漂移、放大倍数变化等因素无关,故达到了补偿的目的。

3 网络参数的变化及选择对测量精度的影响

3.1 节点分光比的漂移及分光比 α_1, α_2 和 α_3 的确度

在理想的情况下,网络的参数是不变化的,能达到上述补偿的目的,然而由于各种原因,例如压力、振动、温度变化等环境因素的影响,会改变光纤耦合器的分光比。在一般情况下,变化率 s 在 1.5% 范围内,此时假定节点损耗系数不变,令 $K_2=K_4=K_5=0.5$ 。调制信号强度 $L_m=0.5$,用 $\alpha_i/(1-\alpha_i)$, ($i=1,2,3$) 表示分光比,则

$$s = \frac{\Delta[\alpha_i/(1-\alpha_i)]}{\alpha_i/(1-\alpha_i)} = \frac{\Delta\alpha_i/(1-\alpha_i)^2}{\alpha_i/(1-\alpha_i)^2} = \frac{\Delta\alpha_i}{\alpha_i(1-\alpha_i)}$$

因此, $\Delta\alpha_i = s \cdot \alpha_i(1-\alpha_i)$, $i=1,2,3$ 。

若变化后的分光比用 $\alpha'_1, \alpha'_2, \alpha'_3$ 表示时,则

$$\alpha'_1 = \alpha_1 + \Delta\alpha_1 = \alpha_1[1 + s(1 - \alpha_1)] \quad (7)$$

$$\alpha'_2 = \alpha_2 + \Delta\alpha_2 = \alpha_2[1 + s(1 - \alpha_2)] \quad (8)$$

$$\alpha'_3 = \alpha_3 + \Delta\alpha_3 = \alpha_3[1 + s(1 - \alpha_3)] \quad (9)$$

当分光比发生变化时, E 值将改变,假定理想值为 E_0 , 则

$$E_0 = E(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, I_{m0})$$

测量值用 E_1 表示, 则

$$E_1 = E(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, L_{m1})$$

计算求得

$$L_{m1} = \frac{E_1 - B}{A} \text{ 和 } L_{m0} = \frac{E_0 - B}{A}$$

$$\therefore \Delta L_m / L_m = \frac{L_{m1} - L_{m0}}{L_{m0}} = \frac{E_1 - E_0}{E_0 - B}$$

$$\begin{aligned} \text{再由式(6)求得 } \Delta L_m / L_m = & \frac{(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)(1-\alpha'_3)(2 \cdot L_a \cdot \alpha_1 + \alpha_2 - \alpha'_1 \cdot \alpha_2)}{2L_a \cdot \alpha_1(1-\alpha'_1)(1-\alpha'_2)(1-\alpha_3)} + \\ & \frac{(1-\alpha'_1)(1-\alpha'_2)(1-\alpha'_3)(2 \cdot L_a \cdot \alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_1 \alpha_2)}{2L_a \cdot \alpha_1(1-\alpha'_1)(1-\alpha'_2)(1-\alpha_3)} \end{aligned} \quad (10)$$

从实际情况考虑, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 应满足

$$0.2 \leq \alpha_i \leq 0.8, \quad i = 1, 2, 3 \quad (11)$$

当检测信号范围变化不大时, $\epsilon_3 \approx \epsilon_4, H_1 A_1 \approx H_2 A_2$ 的情况下, 取

$$0.4 \leq P_{11}/P_{21} \leq 1.2 \quad (12)$$

$$0.4 \leq P_{12}/P_{22} \leq 1.2 \quad (13)$$

这样, 我们可以建立数学模型

$$\begin{cases} \text{目标函数: } |\Delta L_m / L_m| \min \\ \text{约束条件: } s, t \\ 0.2 \leq \alpha_i \leq 0.8, \quad i = 1, 2, 3 \\ 0.4 \leq P_{11}/P_{21} \leq 1.2 \\ 0.4 \leq P_{12}/P_{22} \leq 1.2 \end{cases} \quad (14)$$

通过计算机求得,当 $\alpha_1=0.8, \alpha_2=0.2, \alpha_3=0.8$ 时为最佳。在分光比变化为 $\pm 1.5\%$ 时,

$$|\Delta L_m/L_m|_{\min} = 2.1\%$$

3.2 强度调制信号 L_m 变化的情况

令 $K_2=K_4=K_5=0.7$, 取 $\alpha_1=0.8, \alpha_2=0.2$ 和 $\alpha_3=0.8$, 考虑各分光比变化均为 $\pm 1.5\%$ 时, 计算结果表明 $|\Delta L_m/L_m|_{\min}$ 随 L_m 的增大而增大, 当 L_m 达到 100% (即未调制时), $|\Delta L_m/L_m|_{\min}=0.04$. 计算数据如表 1 所示, 变化规律用图 2 表示。

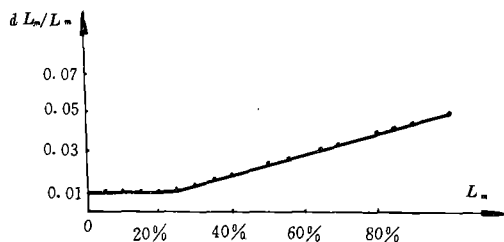


图 2

从表 1 和图 2 可知, 例如当 $L_m=0.15$ 时, $|\Delta L_m/L_m|_{\min}=1.0\%$; 当 $L_m=0.5$ 时, $|\Delta L_m/L_m|_{\min}=2.1\%$; 当 $L_m=0.75$ 时, $|\Delta L_m/L_m|_{\min}=3.0\%$ 。这说明在这种情况下, 考虑到网络节点分光比的漂移, 这种漂移是有限的, 为了满足设计的使用要求应进行优化参数设计。

Table. 1 $S=0.015, K_2=K_4=K_5=0.7$

N	L_m	A_1	A_2	A_3	dL_m/L_m	P_{11}/P_{21}	P_{12}/P_{22}
1	0.00	0.45	0.40	0.50	0.010	0.31	0.46
2	0.05	0.50	0.40	0.50	0.010	0.33	0.42
3	0.10	0.55	0.40	0.60	0.011	0.30	0.47
4	0.15	0.65	0.40	0.65	0.010	0.30	0.42
5	0.20	0.70	0.40	0.70	0.011	0.32	0.42
6	0.25	0.75	0.40	0.75	0.012	0.34	0.42
7	0.30	0.75	0.40	0.75	0.014	0.39	0.42
8	0.35	0.75	0.40	0.75	0.016	0.44	0.42
9	0.40	0.75	0.40	0.75	0.018	0.49	0.42
10	0.45	0.75	0.40	0.75	0.19	0.54	0.42
11	0.50	0.75	0.40	0.75	0.21	0.59	0.42
12	0.55	0.75	0.40	0.75	0.23	0.64	0.42
13	0.60	0.75	0.40	0.75	0.25	0.69	0.42
14	0.65	0.75	0.40	0.75	0.27	0.74	0.42
15	0.70	0.75	0.40	0.75	0.29	0.79	0.42
16	0.75	0.75	0.40	0.75	0.30	0.84	0.42
17	0.80	0.75	0.40	0.75	0.32	0.89	0.42
18	0.85	0.75	0.40	0.75	0.34	0.94	0.42
19	0.90	0.75	0.40	0.75	0.36	0.99	0.42
20	0.95	0.70	0.40	0.75	0.38	1.00	0.50

3.3 节点损耗系数变化的情况

令 L_m 为定值, $K_2=K_4=K_5$ 改变时, 各节点分光比变化为 $\pm 1.5\%$, 通过计算机计算结果

如表 2 和图 3 所示,计算结果表明, $|\Delta L_m/L_m|_{\min}$ 基本不变。

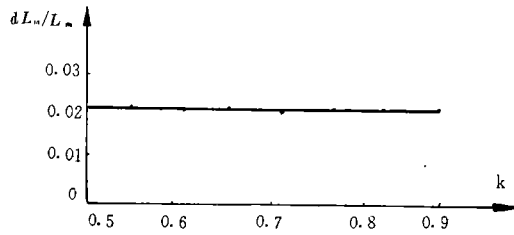


图 3

Table. 2 $S=0.015, L_m=0.50, K_2=K_4=K_5=K$

N	K	A_1	A_2	A_3	dL_m/L_m	P_{11}/P_{21}	P_{12}/P_{22}
1	0.50	0.65	0.40	0.75	0.022	0.53	0.42
2	0.55	0.65	0.40	0.75	0.022	0.54	0.46
3	0.60	0.70	0.40	0.75	0.021	0.56	0.43
4	0.65	0.70	0.40	0.75	0.022	0.57	0.47
5	0.70	0.75	0.40	0.75	0.021	0.59	0.42
6	0.75	0.75	0.40	0.75	0.021	0.60	0.45
7	0.80	0.75	0.40	0.75	0.022	0.61	0.48
8	0.85	0.75	0.40	0.75	0.022	0.61	0.51

4 结 束 语

研究表明三节点式光纤补偿网络抗干扰能力强,能提高检测精度,是一种先进的补偿网络。本文还深入研究了这种网络的实际应用由于分光比发生漂移对系统精度的影响,求出了网络的最佳参数,同时考虑网络在最佳参数条件下,强制调制信号, L_m 变化及节点损耗系数变化对系统测量精度的影响,为进一步研制和应用强度调制光纤传感器奠定了理论基础。

参 考 文 献

- [1] B. Culshaw "A stable remote intensity based Optical fiber sensor" J. Phys. E. Sci. Instrum 18, 502—504, 1985
- [2] Zhong Xianxin, Li Jianshu "Optical fiber sensor for dust concentration measurement" Proceeding of SPIE Vol. 838 285—287 1987
- [3] G. Beheim "Loss—compensation technique for fiber—optic sensors and its application to displacement measurements" Applied optics/Vol/26. No. 3/1 Feb. 1987
- [4] Willion B. Spilman "Method and Apparatuo for compensating fiber optic lead and connector losses in a fiber optic sensor by using a broadband optical source and multiple wave retardation" U. S. Patent. No. 4, 712. 004

A Novel All—fiber Compensation Network and Its Optimum Design

Zhong Xianxin, Liu Guixiong, Song Li and Jiang Xuemei

(Changqing University, Chongqing 630044)

Abstract

This paper describes a novel all fiber compensation network for an intensity modulated optic fiber with three—access and its mathematical model. It can be seen from the study that the compensation network can resist the fluctuation of optical source, the variation of fiber transmission losses, and the drift of opto—electrical receiver and amplifier. We have also discussed the influence of the variation of the characteristic parameter on the measurement error and shown a design of the network.