

激光随机位相噪声对光纤传感系统的影响

周小群 吴哲夫 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)

提要 详细分析计算了 n 路并行传感器系统的输出功率谱,发现系统的噪声主要由激光器的随机位相噪声所决定。噪声级主要由激光相干时间 T_c 决定。理论计算与实验结果完全一致。

关键词 激光器,噪声,光纤传感器

1 引 言

干涉型光纤传感系统固有地存在许多不匹配的光路,激光器的随机位相波动在经过这些不匹配光路后被转换成随机强度波动,即位相诱导强度噪声^[1]。我们通过计算系统的输出功率谱,发现这个激光随机位相诱导强度及噪声是决定系统噪声级的主要因素,由激光源的相干时间 T_c 值来衡量。这样,如果在系统中使用 T_c 值较小的光源,可降低噪声级。理论计算结果和实验结果完全一致,证明我们的理论假设与计算是合理的。

2 理论计算与讨论

为简化计算,假设系统使用的是单纵模激光源,其输出光场为

$$E_i(t) = \sqrt{P} \cdot \exp\{j[\omega t + \Phi(t)]\} \quad (1)$$

式中 P 是光场强度, ω 是光场中心角频率, $\Phi(t)$ 是光场随机位相。假设光场 $E_i(t)$ 满足条件: 1) 激光源光场的强度波动很小可以忽略, 2) 光场的光谱近似于洛伦兹分布, 3) 光源随机位相服从零平均高斯随机过程,并具有概率密度函数

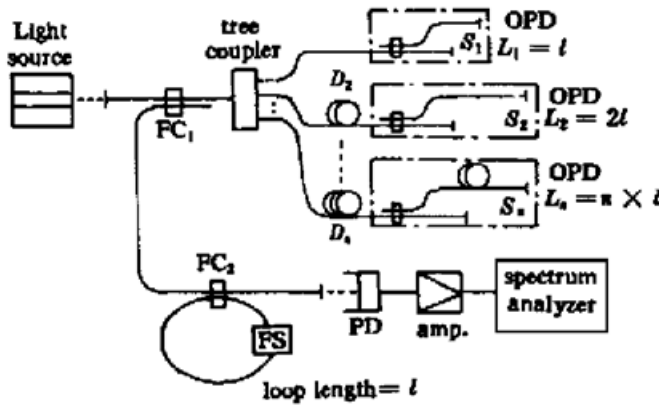
$$p(\Delta\Phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\Delta\Phi}^2}} \exp\left[-\frac{(\Delta\Phi)^2}{2\sigma_{\Delta\Phi}^2}\right] \quad (2)$$

式中, $\Delta\Phi$ 是位相差, $\sigma_{\Delta\Phi}^2$ 是方差。利用以上光场的三个条件及(2)式,可计算光场 $E_i(t)$ 的自相关函数

$$\begin{aligned} \Gamma(t) &= \overline{E_i(t+\tau)E_i^*(t)} = P \exp(j\omega\tau) \overline{\exp\{j[\Phi(t+\tau) - \Phi(t)]\}} = \\ &P \exp(j\omega\tau) \int_{-\infty}^{\infty} \exp[j\Delta\Phi] \cdot p(\Delta\Phi) d(\Delta\Phi) = P \exp(j\omega\tau) \exp(-|\tau|/T_c) \quad (3) \end{aligned}$$

式中 T_c 是光源的相干时间。

现在来计算使用上述光源的 n 路并行传感系统的输出功率谱。传感系统如图 1 所示,它由光源(波长为 $1.3 \mu\text{m}$ 的单模激光器, Hitachi HL-1341AC)、并行的 n 个迈克尔逊干涉仪、带有移频器 ES(AOM: HOYA AF-150, 工作频率为 ω_f) 的光学回路、信号接收部分 PD 和频谱分析

图 1 n 个并行光纤传感系统Fig. 1 n -multiplexed fiber-optic sensor system

仪组成。该系统在设计时,要求每个传感器 S_k 的光程差 $L_k = k \times l$, 并且光学回路 l 选择的长度远远大于光源的相干长度 L_c , 使得每个传感器自身不能形成干涉信号, 必须经光学回路匹配后才能产生各自不同频率的干涉信号。为了避免传感器之间的相互干涉形成干扰噪声, 每个传感器前都增加了延迟光路 D_n 。经系统中各传感器后到达光电探测器上的总光场为

$$E_0(t) = \sum_{N=1}^n \sum_{k=0}^{\infty} e_k \exp[jk\omega(t - T)] E_{NS}(t - kT) + \sum_{N=1}^n \sum_{m=0}^{\infty} e_m \exp[jm\omega(t - T)] E_{NL}(t - mT) \quad (4)$$

式中, $E_{NS}(t) = \frac{1}{4n} E_i(t - T_{Nd})$; $E_{NL}(t) = \frac{1}{4n} E_i(t - T_{Nd}) \exp\{j[-\omega NT + \Delta\Phi + \mathcal{Q}(t)]\}$; $\Delta\Phi = \Phi(t - NT) - \Phi(t)$; $e_0 = (1 - \gamma)^{1/2} (1 - \kappa)^{1/2}$; $e_k = -\epsilon T^{k-1}$; $\epsilon = \kappa(1 - \gamma)(1 - \alpha)^{1/2}$; $\eta = (1 - \kappa)^{1/2} (1 - \gamma)^{1/2} (1 - \alpha)^{1/2}$ 。

在上述公式中, N 是指 n 个传感器系统中第 N 个传感器, k 和 m 是光束在带有移频器的光学回路中所转的圈数, T 和 α 分别是在光学回路中的延迟时间和损失, κ 和 γ 分别是光纤耦合器的耦合系数和过剩损失系数, $\mathcal{Q}(t)$ 是传感器 S_N 感知的位相。 T_{Nd} 是每个传感器前延迟光路的延迟时间。

在探测器上产生的光电流正比于入射光场 $|E_0(t)|^2$, 可定义为

$$I(t) = |E_0(t)|^2 = I_0 + I_S(t) + I_N(t) \quad (5)$$

一般情况下, 光电流总可分为 I_0 直流分量, $I_S(t)$ 信号分量和 $I_N(t)$ 噪声分量^[2]。由于频谱分析仪只显示输出功率谱的交流成份, 所以在此只计算随时间变化的信号分量 $I_S(t)$ 和噪声分量 $I_N(t)$ 。在系统设计中取带有移频器的回路延迟时间 $T \gg T_c$, 这样通过系统不平衡光路的光束, 在进行时间平均相关运算时出现的含有 $\exp(-T/T_c)$ 的指数衰减项全部近似为零。为求得系统的输出功率谱, 可先计算系统输出光电流的时间平均自相关函数

$$\begin{aligned} \langle \dot{K}(\tau) \rangle &= \overline{I(t - \tau) I^*(t)} - \overline{I(t - \tau)} \overline{I^*(t)} = \\ &= \overline{I_S(t - \tau) I_S^*(t)} + \overline{I_N(t - \tau) I_N^*(t)} = \langle \dot{K}_S(\tau) \rangle + \langle \dot{K}_N(\tau) \rangle \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{式中 } \langle \dot{K}_S(\tau) \rangle = \left[\frac{\sqrt{P}}{4n} \right]^4 \left[A \epsilon^2 \sum_{k=1}^n \eta^{2k-2} \times \langle \cos[k\omega(t - \tau) + \mathcal{Q}(t - \tau)] \cos[k\omega(t) + \mathcal{Q}(t)] \rangle \right]$$

$$\begin{aligned} \langle \dot{K}_N(\tau) \rangle &= \left[\frac{\sqrt{P}}{4n} \right]^4 2n(2n - 1) \left[e_0^2 + \frac{\epsilon^2}{1 - \eta^2} \right]^2 \exp(-|\tau|/T_c) + \\ &= \left[\frac{\sqrt{P}}{4n} \right]^4 2(2n^2 - 1) A \epsilon^2 \sum_{k=1}^n \eta^{2k-2} \exp(-|\tau|/T_c) \exp(jk\omega\tau) + \\ &= \left[\frac{\sqrt{P}}{4n} \right]^4 4n^2 A \epsilon^2 \sum_{k=n+1}^{\infty} \eta^{2k-2} \exp(-|\tau|/T_c) \exp(jk\omega\tau) \\ A &= \left[\frac{\epsilon\eta}{1 - \eta^2} - e_0 \right]^2 \end{aligned}$$

根据频谱分析仪显示的是光电流自相关函数时间平均值的傅里叶变换原理, 可定义功率输出谱为

$$S(\omega) = f[\langle \dot{K}_s(\tau) \rangle] + 2B[\langle \dot{K}_N(t) \rangle] = \left[\frac{\sqrt{P}}{4n} \right]^4 \left\{ A \epsilon^2 \sum_{k=1}^n \eta^{2k-2} \cdot f[\langle \cos[k\omega(t-\tau) + \mathcal{Q}(t-\tau)] \cos[k\omega(t) + \mathcal{Q}(t)] \rangle] + 4n(2n-1) \left[e_0^2 + \frac{\epsilon^2}{1-\eta^2} \right]^2 \frac{BT_c}{1+\omega^2 T_c^2} + 4(2n^2-1) A \epsilon^2 \sum_{k=1}^n \eta^{2k-2} \frac{BT_c}{1+(\omega-k\omega)^2 T_c^2} + 8n^2 A \epsilon^2 \sum_{k=n+1}^{\infty} \eta^{2k-2} \frac{BT_c}{1+(\omega-k\omega)^2 T_c^2} \right\} \quad (7)$$

式中 f 是傅里叶变换符号, B 是 1Ω 负载电阻频谱分析仪的带宽。假设传感器感应的位相 $\mathcal{Q}(t)$ 是按谐振动方式变化且振幅 \mathcal{Q} 非常小, 则(7) 式中傅里叶变换项可证明近似为如下的 δ 函数

$$f[\langle \cos[k\omega(t-\tau) + \mathcal{Q}(t-\tau)] \cos[k\omega(t) + \mathcal{Q}(t)] \rangle] \approx \delta(\omega - k\omega) + \left[\frac{\mathcal{Q}}{2} \right]^2 \delta(\omega - k\omega \mp \omega_s) \quad (8)$$

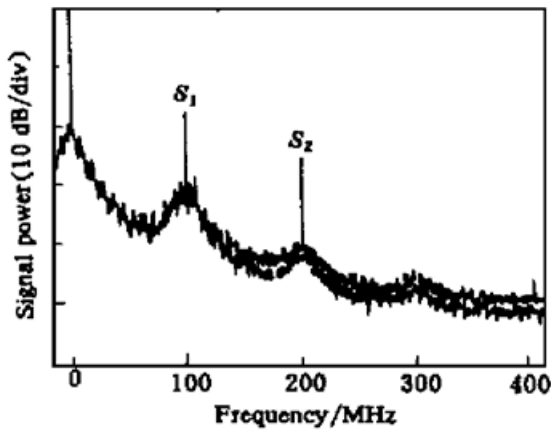
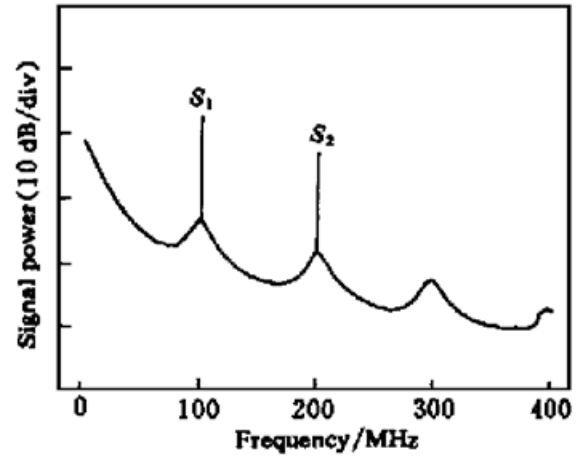
式中第一项表示载频, 第二项表示位于载频两侧的信号峰, 峰的位置由感应位相的谐振频率 ω_s 所决定。峰的高度由谐振振幅 \mathcal{Q} 决定, 即可通过测量输出功率谱中信号峰的位置和高度, 计算出感应谐振动位相的振幅 \mathcal{Q} 和位相 ω_s 。(7) 式中, 除第一项信号外, 其余均为噪声项, 它的构成为一系列极大值位于移频器工作频率整数倍 $k\omega$ ($k = 1, \dots, \infty$) 处的山峦状噪声基底。 δ 函数信号则坐落在这一系列噪声基底曲线上。

从(6) 式和(7) 式分析可知, 这些噪声峰来自不平衡光路引入的激光源随机位相差的时间平均值。因此, 噪声峰的形状取激光源的谱线形状, 峰高由相干时间 T_c 决定, 即系统的噪声来自激光源随机位相噪声。采用低相干光源即较短的相干时间 T_c , 可降低噪声峰值, 平缓噪声曲线, 从而降低噪声级, 提高信噪比, 信噪比的增加既可提高系统感度(即最小可检测位相), 又可增加系统中并行的传感器个数 n 。但是, 相干时间 T_c 太短, 使得系统光路很难精确地调整匹配, 所以我们也不能任意地减少 T_c 。在系统设计时, 根据所需的系统感度和所带的传感器个数, 可以从(7) 式推算出系统应使用光源的最小相干时间 T_c 。反之, 也可由光源的相干时间推导出系统的感度和所能带有的传感器个数。

图 2 是在带有两个传感器的系统中, 在系统参数为 $T_c = 16 \text{ ns}$, $\gamma = 0.2$, $\kappa = 0.5$, $\alpha = 0.5$, $B = 100 \text{ kHz}$, $P = 1 \text{ mW}$ 时的实验结果, 而图 3 给出了同样参数下的理论计算结果, 两者符合得很好, 证明我们的理论假设是合理的, 计算是正确的。以上述理论计算为依据, 可进行系统优化设计, 选择最佳系统参数, 如 T_c , α , γ , κ , n , 使系统具有最大的感度, 并带有最多的传感器。

3 结 论

采用求自相关函数的方法, 详细计算了带有移频器光学回路的 n 个并行传感器系统的输出功率谱。在计算中, 假设系统使用单纵模激光器, 它的位相随机变化, 强度涨落可忽略不计, 同时利用了系统的设计条件 $L_k = k \times l$ 和光学回路长度 l 远大于相干长度 L_c 。计算结果表明系统噪声主要来自激光随机位相噪声, 使用低相干光源就可降低这个噪声级。同时, 合理选择系统参数, 就可使系统达到最大信噪比和感度。理论计算符合实验结果, 证明了这个结论。

图 2 $n = 2$ 时的实验结果Fig. 2 Experimental result when $n = 2$ 图 3 $n = 2$ 时的理论计算结果Fig. 3 Calculated result from Eq. (7) when $n = 2$

参 考 文 献

- 1 Wentworth R. H.. Theoretical noise performance of coherence-multiplexed interferometric sensors. *J. Lightwave Technol.*, 1989, 7(6) : 941~ 956
- 2 Xiao-qun Zhou, Koichi Ikyama, Ken-ichi Hayashi. Effect of laser phase-induced intensity noise on multiplexed fiber-optic sensor system using optical loop with frequency shifter. *IEICE Transactions of Electronics*, 1996 (3) : 437~ 445

Effect of Laser Random Phase Noise on the Fiber-optic Sensor System

Zhou Xiaoqun Wu Zhefu Chen Kangsheng

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

K. Iiyama

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

Abstract The output power spectrum of a sensor system with n -sensors arranged in parallel has been analyzed theoretically and calculated in detail. The calculated result shows that the noise of the sensors system mainly came from laser random phase noise and the noise level was mainly decided by the coherence time of the laser diode. The theoretical calculation agrees with our observation very well.

Key words laser, noise, fiber-optic sensor system