

卡尔曼滤波在分布式拉曼光纤温度传感系统去噪中的应用

刘 涛^{1,2}, 张文平³, 陈慧芳^{1,2}, 冯桂兰¹, 刘月明¹

(1. 中国计量学院 光电分院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027; 3. 杭州欧忆光电科技有限公司, 浙江 杭州 310018)

摘 要: 提出一种基于卡尔曼滤波的统计学方法, 对光纤温度传感系统的状态进行实时估计并去除系统的噪声, 提高光纤传感系统的准确度。光纤温度传感系统属于线性动态系统, 被测温度是服从高斯-马尔科夫随机过程的离散时间状态变量, 状态噪声是加性高斯白噪声。基于贝叶斯最大后验概率推论(MAP)和最小均方误差(MMSE)准则, 新的测量值通过量测更新方程修正后验状态估计值。这种迭代的算法最终可以得到状态的最优估计值。该模型和算法应用在分布式拉曼光纤温度传感系统(DOFS)FGC-LR 中, 对其性能进行研究。用局部方差和信噪比评估该算法去噪的能力。常温点处温度的局部方差减小了 83.56%, 高温点处减小了 84.09%。两探测点处的温度信噪比分别提高了 18.45%和 16.80%。算法在提高光纤传感系统的准确度, 实现实时测量上取得了很好的效果。

关键词: 高斯-马尔科夫随机过程; 卡尔曼滤波; Raman 光纤温度传感; 贝叶斯最大后验概率; 去噪
中图分类号: TP212.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)05-1643-05

Reduction of system noise in distributed optical fiber Raman temperature sensor by Kalman filter

Liu Tao^{1,2}, Zhang Wenping³, Chen Huifang^{1,2}, Feng Guilan¹, Liu Yueming¹

(1. College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;
2. State Key Laboratory of MOI, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
3. Hangzhou OE Tech. Co., LTD., Hangzhou 310018, China)

Abstract: An estimation algorithm based on Kalman filter was developed to remove noise of the fiber temperature sensing system and to estimate the state in real time. The fiber temperature sensing system was the linear and dynamical system. Temperature was the time-discrete state variable which was modeled by Gauss-Markov random process with the additive and white Gaussian state noise. Based on Bayesian-MAP inference and MMSE criterion, the posterior state can be estimated by update equations with new measure. Given the initial parameters, the optimal estimator of temperature was achieved by such iterative process. FGC-LR, the distributed optical fiber Raman temperature sensing system, was the experimental setup with 2 km sensing fiber. The interval between adjacent sample points was 1 m. Local variance and SNR were used to evaluate the algorithm's performance in noise removal and estimation. The local variance is reduced by 83.56% at low temperature point and 84.09% at high temperature point. SNR at the normal temperature point (at 1 000 °m) and the heated points (at 1 850 °m) are increased

收稿日期: 2013-09-10; 修订日期: 2013-10-14

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY12F05007); 浙江省科技厅公益项目(2011C23037)

作者简介: 刘涛(1974-), 女, 副教授, 博士, 从事数字图像处理, 小目标探测与跟踪, 光纤传感方面的研究。

Email: opticmcu@cjlu.edu.cn

18.45% and 16.80% respectively. These mean that the algorithm works well in noise removal of fiber sensing signal both at room-temperature and at heated points.

Key words: Gauss-Markov random process; Kalman filter; distributed optical fiber Raman temperature sensor; Bayes-MAP; denoise

0 引言

掺杂光纤光栅作为光纤传感器,灵敏度高,广泛应用在对温度和应力的安全监控领域。分布式拉曼温度传感器(DOFS)是基于光纤拉曼散射的温度传感器,具有抗电磁干扰,防水耐腐蚀等优点,光纤既是传感器同时又是传输介质,可以构建从几公里到上百公里的分布式监测系统。

拉曼背向散射光的反斯托克斯和斯托克斯光通量之比表示为温度的函数,如公式(1)所示。

$$R(T) = \left(\frac{\lambda_a}{\lambda_s} \right)^4 \exp \left[- \left(\frac{hc\tilde{\nu}}{Kt} \right) \right] \quad (1)$$

式中: λ_a 、 λ_s 分别为拉曼背向散射光的反斯托克斯波长和斯托克斯波长; $\tilde{\nu}$ 为泵浦波长; h 为普朗克常数, c 为光速; k 为玻耳兹曼常数; T 为发生散射处的纤芯的绝对温度。

一个典型的光纤传感系统包括激光器,光纤传感器,耦合器和解调器。DOFS空间分辨率精度,信噪比等性能受到各种类型的噪声的影响,如散粒噪声,热波动,光源噪声和电路参数变化等^[1]。公式(1)表明,通过探测拉曼背向散射的反斯托克斯和斯托克斯光通量,可以得到光纤上指定位置的绝对温度。对周期性的信号做时间上的同步平均可以降低随机误差,提高信噪比(SNR),但系统经过叠加之后使系统误差增加,测量精度也随之下降。随着光纤传感系统的发展,信号提取和去噪技术得到发展和应用。去除光纤传感系统中的噪声算法,大多是基于同步平均的算法,这种算法的优点是计算简单,便于应用。另外还可采用中值滤波,低通滤波和傅里叶变换等方法消除噪声,但它们都滤除了信号细节中有用的部分,不利于信号的实时跟踪和测量。

Morlet小波变换同时在时域和频域对信号进行分析。何建平等人提出一种基于小波变换的方法去除布里渊分布式光纤传感器的测量信号的噪声。结果表明:该方法减小了最大相关误差,小波去噪方法

对去除布里渊传感系统噪声有效^[2]。候思祖等提出了一种累加平均的算法以及一种小波变换信号处理的方法对拉曼散射信号进行处理,提高拉曼光纤传感系统的性能^[3]。Yo-Han Cho用小波变换和高斯线性拟合去除FBG温度传感信号的噪声,测量准确度提高了0.3~0.5℃^[4]。Jun He等用一个参考FBG测量环境噪声,从每个传感通道得到的测量信号中减去该环境噪声^[5]。这种补偿方法要求传感器和参考FBG保持严格一致。

文中提出一种基于卡尔曼滤波器的统计学上的去噪模型,估计光纤传感系统噪声水平,并提出相应的去噪算法。并分析了分布式光纤拉曼温度传感系统的噪声来源及其特性和表现,对噪声进行了建模。最后用实验和结果验证了算法的性能。

1 原理

1.1 DOFS噪声来源

光电系统中的噪声主要有三个来源:包括光放大器在内的基本光噪声,光源噪声以及探测器和电子噪声^[6]。由于拉曼背向散射信号产生于光和介质间的非线性相互作用,带有很大的噪声,信号本身极其微弱。分布式光纤拉曼温度传感系统中的噪声来自于激光器,传输损耗和解调系统。光强的漂移和相位波动使得激光器的输出不稳定,近年来光纤传感系统中的激光器噪声抑制技术得到了很好的发展,使得激光器光强波动对光纤传感器的影响几乎可以忽略。信号在光纤中的传输损耗降低了信噪比。同时,光纤放大器中的放大自发辐射(ASE)也对DOFS的输出随机噪声产生影响。光纤传感系统的性能受制于由光电探测器APD中的热致噪声^[7]。另外,散粒噪声则是由光电探测器中的光子数和光生电荷的波动所引起的。热噪声和散粒噪声都是具有宽频谱的加性噪声。通过计算可以得到解调器的输出噪声的概率分布函数^[1,8],输出噪声是加性高斯白噪声,服从正态分布。DOFS输出信号序列的模型可以用以下线性关系描述:

$$s(k)=f(k)+\varepsilon \cdot e(k), k=0,1,2, \cdots, n-1 \quad (2)$$

式中: $s(k)$ 为 k 时刻带有噪声的解调器输出; $f(k)$ 为理想的真实信号,随着 DOFS 探测到的温度而变化; $e(k)$ 为高斯白噪声^[2]。

1.2 Bayes-MAP 框架

根据贝叶斯定理,未知参数的条件概率分布为:

$$p(x|y)=\frac{p(y|x)p(x)}{p(y)} \quad (3)$$

式中: $p(x)$ 和 $p(x|y)$ 分别为未知量的先验分布和后验分布; $p(x|y)$ 为似然函数。测量数据通过似然函数对先验信息修正,得到随机变量的后验概率分布^[9]。基于最大后验概率(MAP)和最小均方误差(MMSE)准则,卡尔曼滤波器估计出高斯-马尔科夫随机过程中的未知量。

1.3 卡尔曼滤波器

假设 DOFS 时变系统近似为准静态系统,其状态转移过程是一个马尔科夫过程,用高斯-马尔科夫随机过程建模。可以用以下线性迭代方程描述这个时间离散的状态转移随机过程:

$$X_k=\phi_k X_{k-1}+V_k \quad (4)$$

式中: X_k 为被估计的状态向量; V_k 为过程噪声,服从正态分布,即 $p(v) \sim N(0, Q)$; $\phi_k=[\alpha_k]$ 为一维状态转移矩阵,表示从 $k-1$ 到 k 时刻状态变量尺度变化。假设量测过程也为线性的,用以下方程表示:

$$Y_k=H_k X_k+W_k \quad (5)$$

式中: Y_k 为量测向量; W_k 为量测过程的加性高斯白噪声,服从正态分布, $p(w) \sim N(0, R)$;量测矩阵 H_k 表明状态估计值和观测值之间的关系。根据贝叶斯最大后验概率(MAP)推论和最小均方误差(MMSE)准则,用 5 个时间更新和量测更新方程迭代地得到最大后验概率分布和状态的估计值^[10-11]。

$$\hat{X}_k=\phi_k \hat{X}_{k-1} \quad (6)$$

$$p_k^-=\phi_{k-1} p_{k-1}^- \phi_{k-1}^T+Q \quad (7)$$

$$K_k=p_k^- H^T (H p_k^- H^T+R)^{-1} \quad (8)$$

$$\hat{X}_k=\hat{X}_k^-+K_k (Y_k-H \hat{X}_k^-) \quad (9)$$

$$p_k=(I-K_k H) p_k^- \quad (10)$$

1.4 参数初始化

将卡尔曼滤波器应用在 DOFS 系统的输出温度信号上,估计光纤上某被测点的温度真实值。该温度是用高斯-马尔科夫过程建模。给定系统参数初始值后,由以上 5 个迭代方程实现卡尔曼滤波。状态的初始值 \hat{X}_0 指定为 \bar{X}_0 ,即初始时刻的状态均值。由于迭代过程对误差协方差初始值没有严格的要求,只需 $P_0 \neq 0$ 即可,故设 $P_0=1$ 。过程噪声协方差 Q 和测量噪声协方差 R 可以测量得到,也可预先设定,文中设 $Q=1 \times 10^{-2}$, $R=1 \times 10^{-1}$ 。

2 实验和结果

2.1 实验装置

文中采用杭州欧忆公司的 FGC-LR 光纤温度传感仪作为实验装置。该温度传感仪由脉冲激光器、传感光纤、波分复用器(WDM)、定标光纤和解调器 5 部分组成。传感光纤长 2 km,实验中的温度升高点定位于 1850 m 处。采样点间隔为 1 m,每 4 s 对监控区域内的斯托克斯和反斯托克斯信号进行采样。见图 1。

由于传感信号受到严重的噪声影响,其信噪比极低,无法被去噪算法恢复。在去噪算法之前,先要对信号进行预处理提高信号的信噪。预处理的过程是将采集到的信号进行 30 000 次累加平均。卡尔曼滤波器在时间序列上对信号进行平滑和修正,需要对同一个点的量测信号进行连续的采集。实验中,选择光纤上的 3 个点来验证算法的效果,两个点是位

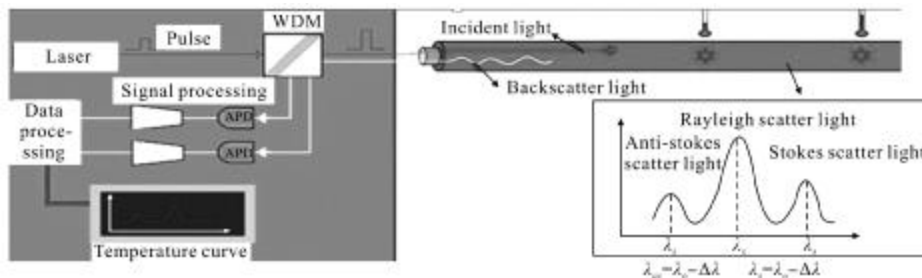


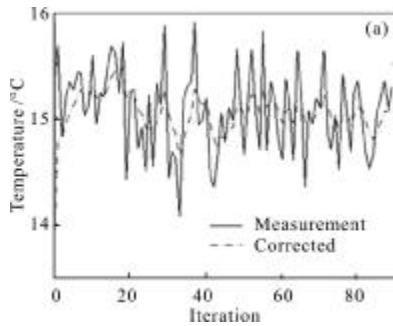
图 1 动态 DOFS 温度传感系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of the dynamical DOFS temperature sensing system

于 1 000 m 和 1 500 m 处的常温点, 一个点是位于 1 850 m 处的被加热的高温点。

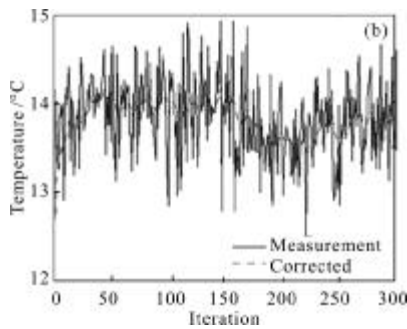
2.2 实验结果

图 2 给出了 1 000 m 和 1 500 m 处的温度测量数据和去噪数据。1 000 m 处的实验数据是在室温为 15.0 °C 时连续采样 90 次得到的, 该点是光纤上的常温点, 去噪后的方差远小于测量数据的方差, 且时间序列上的温度值得到了平滑。1 500 m 处的实验数据是在室温为 13.8 °C 时连续采样 300 次得到的。实验结果表明, 文中算法对常温点信号的去噪有很好的效果。



(a) 环境温度 15.0 °C 时在 1 000 m 处连续采样 90 次的测量数据和修正后的数据

(a) Measurement and corrected temperature data at 1 000 m with 90 samples at 15.0 °C



(b) 环境温度 13.8 °C 时在 1 500 m 处连续采样 300 次的测量数据和修正后的数据

(b) Measurement and corrected temperature data at 1 500 m with 300 samples at 13.8 °C

图 2 常温点处的测量和修正后的数据

Fig.2 Measurement and corrected temperature data at normal spot

1 850 m 处是光纤上的温度异常点, 该处光纤在测试之前被加热到 55.5 °C, 随后关掉加热装置, 使传感器自然降温。从图 3 可以看到, 文中算法在有效平滑信号的同时, 很好地跟踪了温度的变化。

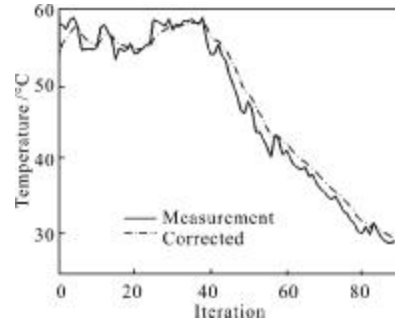


图 3 1 850 m 加热点处的测量和修正后的数据

Fig.3 Measurement and corrected temperature data at heated spot

利用卡尔曼滤波器对拉曼光纤温度传感器的真实数据进行估计, 算法在经过 10 次以内的迭代之后开始收敛。图 4 表明后验估计误差协方差在经过 10 次迭代之后即收敛于 0.03 以下并趋于稳定, 说明随着测量数据的增加, 迭代次数的增多, 将进一步地降低。

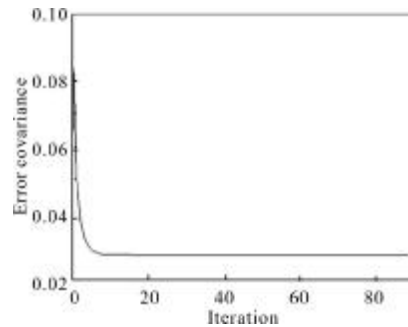


图 4 经过 10 次以上迭代误差协方差收敛到 0.03 以下

Fig.4 Error covariance converges to 0.03 after 10 iterations

表 1 和表 2 分别列出了去噪前后信号的均值、方差和信噪比的变化。1 000 m 处的温度方差减小了 83.56%, 1 500 m 处方差减少了 78.57%, 1 850 m 处高温时间段的温度方差减小了 84.09%。信噪比均提高了约 6 dB。

表1 用局部方差评价算法

Tab.1 Evaluation of denoised and original signal by variance

Measuring spot	Mean value		Variance	
	Measured	Estimated	Measured	Estimated
1 000 m(normal)	15.045	15.051	0.155	0.026
1 500 m(normal)	13.81	13.80	0.21	0.045
1 850 m(heated)	55.489	55.438	2.598	0.781

表 2 去噪前后信号的信噪比比较
Tab.2 Comparison of the results
with raw data by SNR

Measuring spot	SNR/dB	
	Measured	Denosied
1 000 m(normal)	31.60	37.43
1 500 m(normal)	29.63	36.27
1 850 m(heated)	30.95	36.15

3 结 论

DOFS 温度传感系统的输出信号中的噪声属于高斯白噪声。文中用高斯-马尔科夫模型对系统输出信号进行建模,利用科尔曼实验表明,基于卡尔曼滤波器的去噪算法可以很好地去除对 DOFS 系统的输出噪声,信号的信噪比在常温点和加热点处分别提高了 18.45%和 16.80%,大大提高了系统的测量准确度。

参考文献:

- [1] Todd M D. An exact probability density function for intensity -based output noise propagating through a fiber optic sensor demodulation process [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(22): 3476-3482.
- [2] He Jianping, Zhou Zhi, Wu Yuanhua, et al. Application of wavelet denoising method in brillouin optical sensing technique [J]. *Opto -Electronic Engineering*, 2009, 36(4): 75-80. (in Chinese)
何建平, 周智, 吴源华, 等. 小波滤噪在布里渊光纤传感技术中的应用[J]. *光电工程*, 2009, 36(4): 75-80.
- [3] Hou Sizu, Jian Yanhong, Li Cheng. Wavelet de-noising applied in Raman single -mode fiber sensor [J]. *Computer Simulation*, 2010, 27(3): 366-370. (in Chinese)
侯思祖, 简燕红, 李程. 小波去噪在拉曼单模光纤传感系统中的应用[J]. *计算机仿真*, 2010, 27(3): 366-370.
- [4] Cho Y, Song M. Noise reduction of FBG sensor signal by using a wavelet transform [C]//*Optical Sensors 2011*. Kyriacos Kalli Prague, Czech Republic: April 18, 2011.
- [5] He J. Elimination of environmental noise in interferometric wavelength shift demodulation for dynamic fiber Bragg grating sensor array [J]. *Optics Communications*, 2009, 282: 2836-2840.
- [6] Kirkendall C K, Dandridge A. Overview of high performance fibre -optic sensing [J]. *Journal Of Physics D: Applied Physics*, 2004, 37: 197-216.
- [7] Gagliardi G. Probing the ultimate limit of fiber -optic strain sensing [J]. *Science*, 2010, 330: 1081-1084.
- [8] Todd M D. On the probability structure of output noise from a digital phase demodulation system subject to biased intensity -based input noise [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(14): 2291-2300.
- [9] Yang Xiaojun. A study of hybrid estimation theory & applications based on particle filtering [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)
杨小军. 基于粒子滤波的混合估计理论与应用 [D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [10] Greg Welch, Gray Bishop. An Introduction to the Kalman Filter [EB/OL]. [http:// www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf](http://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf), 2007-07-24/2011-10-10.
- [11] Kalman R E. A new approach to linear filtering and prediction problems [J]. *Transaction of the ASME -Journal of Basic Engineering*, 1960, 82(seris D): 35-45.