

文章编号:1000-582X(2004)06-0017-04

桥梁变形图像监测系统调制传递函数*

夏哲,付红桥,张文,陈伟民,黄尚廉

(重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室,重庆 400030)

摘要:介绍了桥梁变形图像监测系统的工作原理和组成。根据线性系统理论,深入研究了光学系统、图像采集和大气等各个组成部分的调制传递函数,尤其是大气对系统调制传递函数的影响,给出了整个系统的调制传递函数。在一个实际的桥梁变形监测系统基础上,分析了晴、霾、雨、雾等天气情况下系统各部分和总体的调制传递函数。在待测点距离摄像机的距离为1 km时,理论上系统的极限分辨能力为厘米级。

关键词:图像;调制传递函数;桥梁;变形;监测
中图分类号:0438.2

文献标识码:A

变形是反映桥梁等建筑结构发生变化的重要参数,因而变形监测是桥梁等结构健康监测的重要内容之一。目前主要通过GPS(Global Position System)技术、激光挠度仪、连通管、全站仪及图像变形监测等方式实现桥梁变形监测。相比较而言,采用图像监测桥梁健康状况是一种比较好的方法,除了有非接触、精度高、量程大、廉价等优点,而且还能够与计算机连接实现长期实时监测,因而图像变形监测技术具有广阔的应用前景。

但是桥梁变形监测系统工作在野外,复杂变化的大气和背景光对光学成像系统的影响很大。桥梁待测点距离岸上基准点达上百米,甚至数公里,因此大气对系统分辨率的影响不容忽视。另外,桥梁变形测量中要求实现厘米级分辨率,因此仅仅根据几何光学成像理论构建系统,忽略大气传输影响,不能正确指导系统集成。

调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)是分析成像系统性能的最有效手段之一。因此,通过深入研究整个变形监测系统调制传递函数,分析天气对分辨率的影响,能够指导设计性价比较高的系统。

1 桥梁变形图像监测系统的原理及组成

桥梁变形图像监测系统主要由光标靶,大气,光学

镜头,数字摄像机和计算机采集处理部分组成。光标靶固定在桥梁梁体的待测部位,数字摄像机、光学镜头和计算机采集部分则通常固定在桥梁的桥墩或岸边,如图1所示。数字摄像机的光学成像系统,将光标靶成像在数字摄像机的光敏面上,当桥梁在载荷的作用下发生位移 Δy 时,光标靶亦随之从A点移动到B点产生 Δy 的位移,光标靶在摄像机像面上所成像点的位置相应地从A'移动到B'点,产生 $\Delta y'$ 的变化量(如图1所示)。假设光学镜头的放大倍率为 β ,则由几何光学的原理可知,桥梁的挠度变化量 Δy 与光标靶在

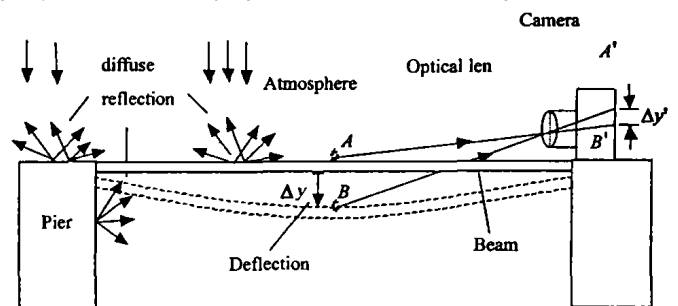


图1 桥梁变形图像监测系统示意图
摄像机像面的像点移动量 $\Delta y'$ 满足式(1):

$$\Delta y = \beta \cdot \Delta y' \quad (1)$$

对于大跨度桥梁而言,待测点与基准点之间的距离可达数公里,大气对成像系统的影响不容忽视。大气对像质的影响一般都通过MTF来描述。因此应该深入

* 收稿日期:2004-03-26

基金项目:国家科技攻关资助项目(2002BA105C)

作者简介:夏哲(1978-),男,河南项城人,重庆大学硕士研究生,从事光电信息技术研究。

研究系统的 MTF,从而找到对图像系统分辨率影响的因素,最终为实际系统中修正这些影响因素提供依据。

2 系统调制传递函数

光学调制传递函数是较好评价光学系统成像的特征函数,反应了系统对物空间各种频率含量成分的复现本领,被广泛用来描述光学成像系统的性能。

整个桥梁变形图像监测系统可以近似看作由大气、光学镜头、数字摄像机等线性单元级联而成的一个线性空间不变的低通滤波器。则整个系统的调制传递函数等于各个部分调制传递函数的乘积,则系统调制传递函数为^[1]

$$MTF_s = MTF_a \times MTF_o \times MTF_c \quad (2)$$

其中 MTF_a 、 MTF_o 、 MTF_c 分别为大气、光学系统和摄像机的调制传递函数。各部分的调制传递函数通常小于1,故它们的乘积总是小于最小的调制传递函数。即,整体的分辨率将比系统中最薄弱环节的分辨率还要低。因此,必须研究系统各个部分的调制传递函数,分析对成像分辨率的影响,综合分析系统调制传递函数。

2.1 大气的调制传递函数

大气对成像质量的影响很大,降低了成像系统的分辨率。尤其在恶劣环境中远距离的变形监测,更是无法忽略大气的影响。大气对成像的影响主要来源于大气湍流和气溶胶。光在湍流大气中传输时会出现大气闪烁、源像抖动、闪烁孔径平滑、后向散射反射效应和大气湍流相位间歇性等现象^[2]。而霾、雾和雨滴等气溶胶对大气成像的影响主要是吸收和散射^[3]。大气调制传递函数 MTF_a 可认为是大气湍流调制传递函数 MTF_T 和气溶胶调制传递函数 MTF_A 的乘积。参考文献[4]中提出通过标准大气参数:拍摄时间、日出、日落、温度、风速、相对湿度、太阳辐射等来估算大气湍流调制传递函数的方法。

$$MTF_T = \exp\{-57.3v^{5/3}C_n^2\lambda^{-1/3}R[1-\mu(\frac{\lambda v}{D})]\} \quad (3)$$

式中, MTF_T 是短曝光的传递函数, C_n^2 是大气折射率结构常数, λ 为波长, D 光学系统的通光口径, v 为空间角频率, R 为光程。近场时 $\mu=1$,远场时 $\mu=0.5$ 。大气的不均匀性是处于经常变更的动态变化之中,因此传播光波的波前畸变也是随时间不断涨落的。为了“冻结”大气引入的畸变,同时又不引入任何时间平均因子,必须在 $0.01 \sim 0.001$ s 甚至更短时间内对光束进行曝光成像。参考文献[5]中给出了通过相对湿

度、风速、太阳照度等参数估算气溶胶粒子尺度分布的经验公式,进而可以通过散射理论计算气溶胶的散射系数和吸收系数,最终可以求出气溶胶的调制传递函数。

$$MTF_A(v) = \begin{cases} \exp[-S_a(\frac{v}{v_c})^2] \cdot \exp[\exp[-S_dR(1-\frac{v}{v_c})^2] - \exp[-S_dR]](-A_dR) & v < v_c \\ \exp[-S_dR] \cdot \exp[1 - \exp(-S_dR)](-A_dR) & v > v_c \end{cases} \quad (4)$$

式中 A_d 是吸收系数, S_d 是散射系数, R 是路径长度, v 是空间频率, v_c 是截止角空间频率,等于 λ/a , a 是粒子半径, λ 为非相干光波长。但是气溶胶的散射系数很复杂,一般通过能见度距离 R_m 计算可见波段的大气介质的散射系数,即 $S_d = 3.912/R_m$ 。

2.2 光学镜头的调制传递函数

根据衍射效应限制的光学系统非相干成像的调制传递函数^[1],如式(5)。

$$MTF_o = \begin{cases} \frac{\pi}{\pi-2} \left\{ \cos^{-1}\left(\frac{f}{f_c}\right) - \sin\left[\cos^{-1}\left(\frac{f}{f_c}\right)\right] \right\} & f \leq f_c \\ 0 & f > f_c \end{cases} \quad (5)$$

其中 $f_c = D/\lambda l$, D 为通光口径, λ 为非相干光波长, l 为像距。桥梁变形监测中,由于待测点和基准点距离较远,达上百米,甚至数公里,要达到很高的分辨率,需采用长焦镜头。

2.3 摄像机的调制传递函数

CCD 传感器是由像素矩阵与相应转移部分组成的。固态的像素尽管已做得很小,并且其间隔也很微小,但是,这仍然是识别微小图像或再现图像细节细微部分的主要障碍。图像传感器的 MTF_c 由3部分组成:1)由光敏元尺寸引起的光积分 MTF_i ;2)由于转移效率引起的 MTF_e ;3)相邻光敏元之间的光学串扰引起的 MTF_d 。其计算表达式可通过解析式求得^[6]。一般 CCD 摄像机说明书只给出光敏元大小、光敏元间距和转移效率等参数,CCD 的硅衬底扩散距离和势阱深度很难知道,认为 $MTF_d = 1$ 。则摄像机的调制传递函数为

$$MTF_c = MTF_i \times MTF_e \quad (6)$$

3 不同天气条件下系统调制传递函数计算及分析

由 MC 3M-5CA 长焦镜头和 Silicon Imaging 1280F 摄像机构成的桥梁变形监测系统,其主要参数:光圈 $F=8$,焦距 $f=500$ mm,CCD 芯片的分辨率为 1280×1024 ,像元大小为 $6.7 \times 6.7 \mu\text{m}$,转移效率为 94%。

假设待测点距离摄像机的距离为 1 km,桥梁主要发生垂直位移,水平位移可以忽略不计。

公式(3)、(4)中, v 是空间角频率,公式(5)、(6)中 f 是像平面上空间线频率,但是物空间线频率更能直观反应系统的分辨能力,因此需要统一单位,将空间角频率和像方空间线频率都转化为物方空间线频率。根据作者所在地区的气象资料,选择了晴、霾、雨和雾等天气条件下的标准大气参数(如表 1),计算了系统各部分的调制传递函数和系统调制传递函数,如图 2 所示。

表 1 不同天气状况下的标准大气参数

天气状况	时间	日升时刻	日落时刻	温度 / $^{\circ}\text{C}$	相对湿度/%	风速 / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	能见 度/km	辐射 / $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$	粒子半 径/ μm
晴	03-07-31 8:00	5:13	18:47	29.5	78	2.0	12.0	1.03	10^{-3}
霾	03-07-01 8:00	6:36	17:25	14.1	61	1.0	2.5	0.14	10^{-2}
小雨	02-12-07 14:00	6:43	17:01	9.5	91	2.0	6.5	0.08	8
雾天	03-01-13 8:00	6:50	17:11	9.4	98	1.0	0.5	0.14	4

从图 2(a)中得出镜头的截止频率为 0.22 cycle/mm;从图 2(b)知,CCD 摄像机的 MTF 主要由空间采样决定。从图 2(c)知,霾、雨和雾天的大气传递函数比晴天恶化了很多。从图 2(d),可以看出:晴天的系统 MTF 曲线基本上和不考虑空气时的系统 MTF 曲线一致,而霾、雨和雾等天气条件下的系统 MTF 曲线就很糟糕。

综上所述,恶劣天气对桥梁变形图像监测系统分辨率的影响很大。在不考虑大气影响时系统的截止频率为 0.075 cycle/mm,即其极限分辨能力为 13.3 mm,但是恶劣天气造成系统 MTF 曲线明显下降,图像变模糊,从而影响最终的分辨能力。

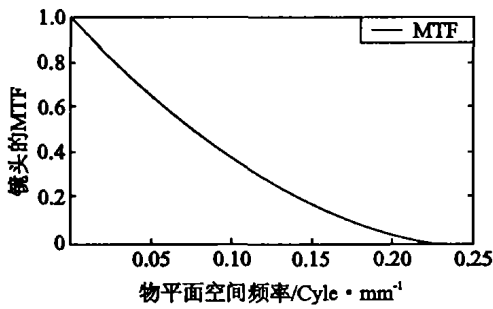
目前,如何提高大气成像分辨率成为国内外研究的热点。Dan Sadot 等提出通过实时测量标准大气参数,得到大气的传递函数,通过逆滤波,使图像恢复,取得了明显的效果。通过以上的数据计算分析,本系统也可以通过逆滤波实现清晰图像的处理,提高系统的分辨能力。

4 结 论

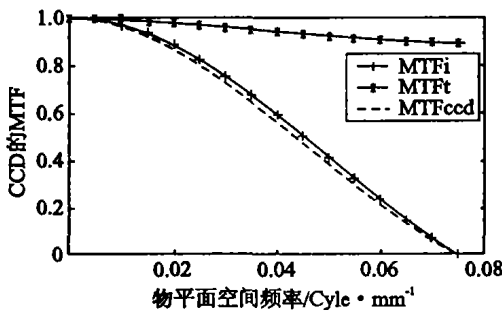
笔者介绍了桥梁变形图像监测系统的工作原理和组成。根据线性系统理论,深入研究了系统各个组成部分的调制传递函数,尤其是大气对系统的影响,给出了整个系统的调制传递函数。在一个实际桥梁监测系统的基础上,分析了晴、霾、雨、雾等天气情况下系统各部分和总体调制传递函数,得出如下结论:1)测量距离较近时,晴天的系统调制传递函数可以忽略大气的影 响;2)霾、雨和雾天等天气条件下大气对系统的调制传递函数影响很大;3)待测点距离摄像机的距离为 1 km 时,系统极限分辨能力为厘米级。

参考文献:

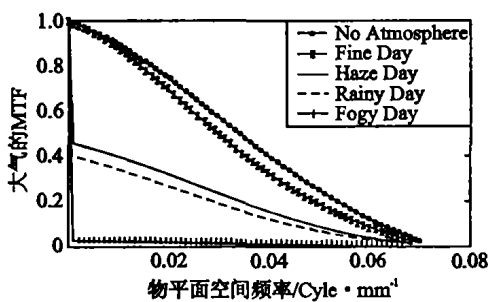
[1] KENNETH R CASTLEMANZ. 数字图像处理[M]. 北京:电子工业出版社,2002.
 [2] 张逸新. 随机介质中光的传播与成像[M]. 北京:国防工业出版社,2002. 200-347.
 [3] 麦卡特尼. 大气光学[M]. 北京:科学出版社,1988.
 [4] DAN SADOT, SHAMRIZ S, SASSON I. Prediction of over-



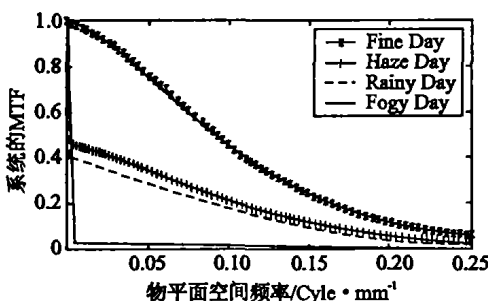
(a) 镜头的 MTF



(b) CCD 摄像机的 MTF



(c) 不同天气条件下大气的 MTF



(d) 不同天气条件下系统的 MTF

图 2 系统各部分调制传递函数与系统传递函数

all atmospheric modulation transfer function with standard weather parameters; comparison with measurements with two imaging systems [J]. OPTICAL ENGINEERING, 1995, 34(11):3 239.

[5] DROR I, KOPEIKA N S. Statistical models for the desert

aerosol size distributions and comparison to MODTRAN models[J]. SPIE, 1995, 34(11):61-71.

[6] 刘迎春, 叶湘滨. 现代新型传感器原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.

Modulation Transfer Function of Image Monitoring System for Bridge's Deformation

XIA Zhe, FU Hong-qiao, ZHANG Wen, CHEN Wei-min, HUANG Shang-lian
(Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems Under the State Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The principles of image monitoring system for bridge's deformation is proposed. Based on linear system theory, the whole system comprises linear shift-invariant system composed of atmosphere, optical sub-system and camera. The modulation transfer function of each component is analyzed, especially for the atmosphere. For a special system, modulation transfer functions on different weather condition such as sunny, cloudy, rainy and foggy weather are analyzed.

Key words: image; modulation transfer function; bridge; deformation; monitoring

(编辑 张小强)

(上接第 12 页)

Analysis of S^{2-} in Leaching SrS Process in Manufacture Technique of High Purity $SrCO_3$

LIU Xiang-guo, XIE Wei-dong, PENG Xiao-dong, LIU Jiang
(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: A new preparation method ("Single-stage Process") for high purity $SrCO_3$ is investigated, which mainly includes four critical processes: reduction, leaching, purification and precipitation. The affecting factors about S^{2-} behaviors and strontium recovery in leaching SrS process are analyzed theoretically and practically. It is concluded that with the increase of temperature or decrease of pH value in leaching process, strontium recovery increases, but SrS decomposes and hydrogen sulphide (H_2S) gases discharge. Besides, optimal temperature of leaching SrS process is between 80-85 °C.

Key words: strontium sulphide; leaching process; behavior analysis

(编辑 成孝义)