

具有空间滤波的圆环扫描速高比计研究

翟林培

摘要：本文对圆环扫描速高比计作了理论分析，提出采用空间滤波减少地物谱对速高比计的影响、提高速高比计精度的方法。所做的动态模拟实验表明方法是有效的。

一、前言

航空摄影时像机和摄影目标之间的相对运动致使目标的像和底片之间也存在相对运动，其速度（即像移速度）为

$$u = \frac{V}{H} F \tag{1}$$

式中 V/H 为像机运动速度与其所处高度之比， F 为像机镜头的焦距。曝光期间存在着像移速度会使拍摄的底片模糊不清，模糊量的大小与像移速度成正比。

像移补偿装置（即速高比计）的作用在于减少像移速度、提高摄影分辨率。图1为速高比计工作原理示意图。地面目标通过物镜 L 和一只可旋转的半反半透镜 T 同时在底片和传感器1上成像。在反射镜 T 静止时，设底片上的像移速度 u 和传感器1上的像移速度相等（当然也可以不等），传感器1输出一个与像移速度 u 成比例的信号，该信号经控制电路2送到电动机3，电动机带动底片移动的同时也带动反射镜 T 转动。反射镜转动时传感器1上的像移速度设为 $u-u'$ ， u' 是由于反射镜 T 转动而引进的像移速度。显然，只要 $u-u'$ 不等于零，传感器1就有输出信号控制电动机的转速直到 $u-u=0$ 为止。若电机拖动胶片的速度也为 u' ，且运动方向与 u 相同，则此时胶片上的像移速也为零。

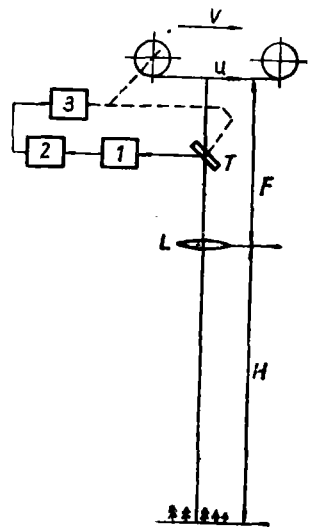


图1

二、圆环扫描速高比计的测速原理

圆环扫描速高比计采用了相关测速原理，这种测速方法在钢铁、造纸、汽车、流体速度测定等方面都获得了应用^{〔1〕〔2〕〔3〕〔4〕〔5〕}。图2、(a)为速高比计中的像移速度传感器的方框图。

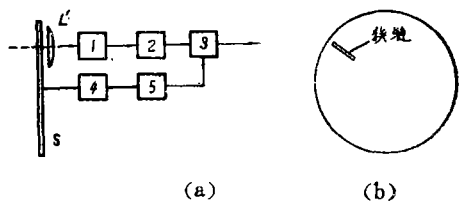


图2

物镜 L 通过反射镜 T 将地面目标成像在扫描盘 S 上 (参看图 1)。 S 的结构如图 2. (b) 所示。电机 4 带动 S 以恒定速度转动。透镜 L' 将通过狭缝的光会聚到光电管 1 上, 光电管的输出信号经过信号处理电路 2 处理之后在相关器 3 中作相关运算, 其输出与像移速度成正比。

为说明简单先从狭缝做往复式扫描的情况入手。如图 3 所示, 设狭缝移动速度为 v , 规定不使用狭缝回扫描期间得到的信号, 图中 S 表示像面, $u(t)$ 表示像移速度。设某次扫描了 XY 两点间的像, 由于存在像移速度, 下一次狭缝扫描到的不再是 XY 之间的像而是 $X'Y'$ 之间的像, XX' 之间的距离

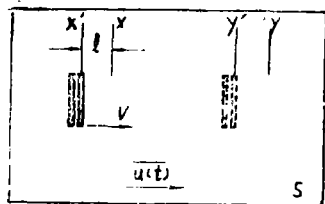


图 3

$$l = \int_0^{T_s} u(t) dt \quad (2)$$

式中 T_s 为狭缝的扫描周期。当 T_s 较小时

$$l \approx u(t) \cdot T_s \quad (3)$$

在相邻两次扫描期间光电管的输出信号 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 分别可表示为

$$f_1(t) = F(t) [1(t) - 1(t - \frac{T_s}{2})]$$

$$f_2(t) = F(t) [1(t - \Delta t) - 1(t - \frac{T_s}{2} - \Delta t)]$$

式中 $F(t)$ 为狭缝扫描整个目标的像时光电倍增管的输出信号。近似地有

$$f_2(t) = f_1(t - \Delta t) \quad (4)$$

式中 $\Delta t = -\frac{l}{v - u(t)}$

由于 $v \gg u(t)$

所以 $\Delta t \approx \frac{l}{v}$ (5)

圆环扫描时也有类似的分析。图 4 示出了圆环扫描时的情形, 规定仅使用 $\frac{\pi}{4}$ 到 $\frac{3\pi}{4}$ 区间里的信号。由图可见相邻两次狭缝扫描到的区域已不完全重合, 但在狭缝径向长度较长时, 两端不重合部分相对较小, 故仍然近似有

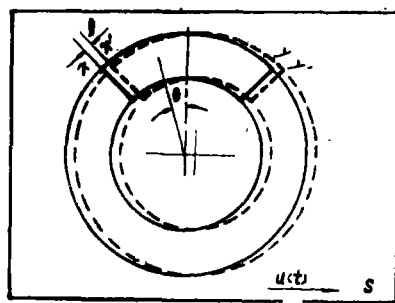


图 4

$$f_2(t) = f_1(t - \Delta t)$$

扫描圆环切向像移速度 $u_r(t)$ 为

$$u_r(t) = u(t) \cdot \cos \theta$$

平均切向速度 $\overline{u_r(t)}$ 为

$$\overline{u_r(t)} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} u(t) \cos \theta d\theta$$

$$= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} u(t) \quad (6)$$

设某一次狭缝扫描了 \widehat{XY} 部分的像, 由于存在像移速度, 下次扫描时狭缝扫描了 $\widehat{X'Y'}$ 部分的像, XX' 之间的距离 l 为

$$l = \overline{u_r(t)} \cdot T_s$$

$$= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} T_s \cdot u(t)$$

$$\Delta t = \frac{l}{v} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{u(t) T_s}{v}$$

式中 v 为狭缝的扫描速度

$$v = \frac{2\pi R}{T_s}$$

所以
$$\Delta t = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} T_s^2 \cdot \frac{u(t)}{2\pi R} \quad (7)$$

利用相关器计算 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 的相关函数 $R(\Delta t)$

$$R(\Delta t) = \frac{4}{T_s} \int_0^{T_s} f_1(t) \cdot f_2(t) \cdot dt$$

$$= \frac{4}{T_s} \int_0^{T_s} f_1(t) \cdot f_1(t - \Delta t)$$

考虑到式 (7), 上式可表示为

$$R(u(t)) = \frac{4}{T_s} \int_0^{T_s} f_1(t) \cdot f_1(t - \frac{\sqrt{2} T_s^2}{R \pi^2} u(t)) dt$$

图 5 曲线 a 示出了 $R(u(t))$ 和 $u(t)$ 之间的对应关系。可见若已知 $u(t)$ 的方向, $R(u(t))$ 和 $u(t)$ 是单值对应的, 即 $R(u(t))$ 的大小可以表示像移速度 $u(t)$ 的大小。容易发现, 无论怎样改变 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 的形式, 它们的相关函数都可以给出像移速度大小的信息, 例如取 $\text{sign}(f_1(t))$ 和 $\text{sign}(f_2(t))$, 此时它们的相关函数 $R^*(u(t))$ 为

$$R^*(\Delta t) = \frac{4}{T_s} \int_0^{T_s} \text{sign}(f_1(t)) \cdot \text{sign}(f_2(t - \frac{\sqrt{2} T_s^2}{R \pi^2} u(t))) dt$$

$R^*(u(t))$ 和 $u(t)$ 之间的关系如图 5 中的曲线 b 所示。在给出像移速度大小的信息这点上, 两曲线无本质区别, 但这样处理之后给相关器的实现带来极大的方便。

设随机函数 $\text{sign}(f(t))$ 服从泊松分布, 则

$$R^*(\Delta t) = h^2 e^{-2\lambda |\Delta t|}$$

式中: h 为符号函数的幅值,

λ 为符号函数单位时间里变号次数的数学期望。

当 Δt 较小时

$$R^*(\Delta t) = R^*(0) - 2\lambda h^2 |\Delta t|$$

注意到式 (7), 并记 $S^*(\Delta t) = R^*(0) - R^*(\Delta t)$

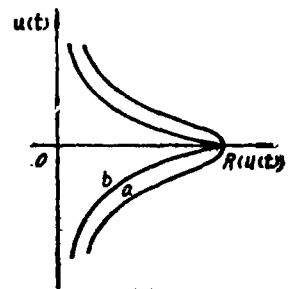


图 5

$$u(t) = \frac{\sqrt{2} \pi^2 R S^*(u(t))}{4 \lambda h^2 \cdot T_s^2} \text{sign}(u(t)) \quad (8)$$

图6为速高比计中的相关器的原理图，相关器的输出m表示 $\text{sign}(f_1(t))$ 和 $\text{sign}(f_2(t))$ 极性相反部分的大小。其值和 $S^*(\Delta t)$ 有关。注意到符号函数的相关函数 $R^*(\Delta t)$ 可表示为

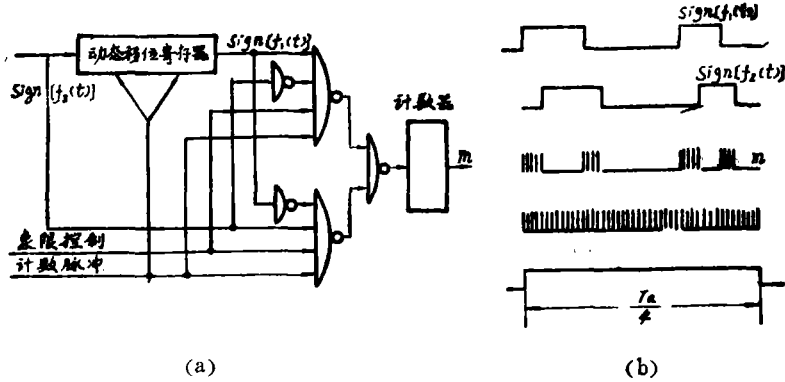


图6

$$\begin{aligned} R^*(\Delta t) &= \frac{1}{T} \int_0^T \text{sign}(f_1(t)) \cdot \text{sign}(f_1(t - \Delta t)) dt \\ &= \frac{1}{T} (a - b) h^2 \end{aligned}$$

式中a为 $\text{sign}(f_1(t)) \cdot \text{sign}(f_1(t - \Delta t)) > 0$ 部分的大小，b为 $\text{sign}(f_1(t)) \cdot \text{sign}(f_1(t - \Delta t)) < 0$ 部分的大小。

$$\begin{aligned} R^*(0) &= \frac{1}{T} (a + b) h^2 \\ b &= \frac{R^*(0) - R^*(\Delta t)}{\frac{1}{T} \cdot 2 \cdot h^2} \\ &= \frac{T S^*(\Delta t)}{2 h^2} \end{aligned}$$

考虑到 $T = \frac{T_s}{4}$

$$b = \frac{T_s}{W} m \quad W \text{ 为常数}$$

得到

$$m = \frac{\lambda W T_s^2}{2 \sqrt{2} \pi^2 R} u(t) \quad (9)$$

式(9)即为速高比计中像移速度传感的输入输出关系表示式。

遗憾的是实际当中由于我们计算相关函数时所用的采样周期并不是无穷长的，因此每次运算时采样周期里信号的变号次数是不固定的，是随景物变化随机变化的，但相关器的输出却直接和采样周期里变号次数有关，这就势必产生对应于同一像移速度相关器输出不为定值的

现象。此外，由此相关器的工作原理可知，相关器的输出对信号的相位是十分敏感的，这要求输入信号必须具有良好的信噪比，否则，即使像移速度等于零，相关器也会有较大的输出，并且是随机波动的。相关器输出的波动是其自身工作原理产生的，是限制速高比计精度提高的根本原因。

通过对空间滤波的分析容易发现引进空间滤波可以大大地改善输入信号的信噪比，明显减小像移速度传感器的零位输出，同时也会减少目标的变化对相关器输出的影响。

三、多狭缝的空间滤波作用

文献^[6]对多狭缝的空间滤波作用已作了详细的分析。将图2所示的扫描盘由单狭缝改为多狭缝就构成了一个具有空间滤波作用的扫描盘。如图7所示，设其强度透射系数为

$$h(\theta, r) = h_1(\theta)h_2(r)$$

式中

$$h_1(\theta) = \begin{cases} 1 & (n^2 - 1)\alpha \leq \theta \leq (n^2 + 1)\alpha \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

$$h_2(r) = \begin{cases} 1 & a \leq r \leq b \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

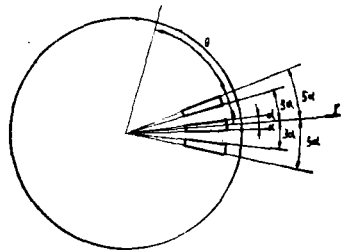


图7

设 $I'(\mu)$ 为狭缝输出信号中 θ 方向分量的功率谱

$$I'(\mu) = |H_1(\mu)|^2 F(\mu, L) \tag{10}$$

$$F(\mu, L) = \int_{-\infty}^{\infty} O(\mu, \nu) |H_2(\nu)|^2 d\nu$$

称 $F(\mu, L)$ 为等效地物谱，它和狭缝的长度有关。式中 μ 和 ν 分别为 θ 方向和 r 方向上的空间频率， $O(\mu, \nu)$ 为像的强度分布 $o(\theta, r)$ 的功率谱， $H_1(\mu)$ 和 $H_2(\nu)$ 分别为 $h_1(\theta)$ 和 $h_2(r)$ 的傅里叶变换， L 为狭缝的长度。

当狭缝数 $N = 1, 2, 3, \dots$ 时

$$\left| H_1^1(\omega) \right|^2 = \left| \frac{2a \sin \alpha \omega}{2\omega} \right|^2$$

$$\left| H_1^3(\omega) \right|^2 = (2 \cos 4\alpha\omega + 1)^2 \left| H_1^1(\omega) \right|^2$$

$$\left| H_1^5(\omega) \right|^2 = (2 \cos 8\alpha\omega + 2 \cos 4\alpha\omega + 1)^2 \left| H_1^1(\omega) \right|^2$$

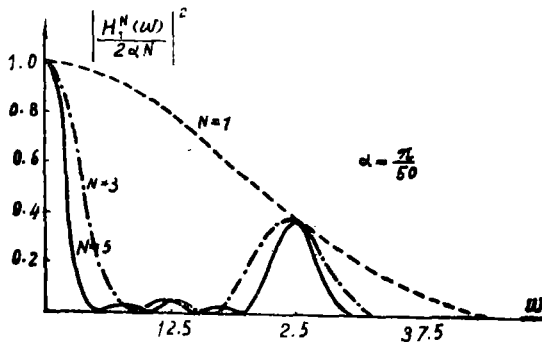


图8

式中, $\omega = 2\pi\mu$, 上角标表示狭缝数。图 8 示出了 $\left| \frac{H_1^N(\omega)}{2\alpha N} \right|^2$ (当 $N=1, 3, 5$ 时) 和 ω 的关系。由图可见, 当 $N>1$ 时, 空间滤波器越来越明显地显示出具有选择某固定频率的特性。这些频率为

$$\omega_k = K \cdot \frac{\pi}{2\alpha}, \quad K=0, 1, 2, \dots$$

下面我们仅考虑 $K=1$ 时情况。

$$\omega_1 = \frac{\pi}{2\alpha}$$

由于 $\omega_1 = 2\pi\mu_1, b = 4\alpha$

故
$$\mu_1 = \frac{1}{b} \quad (11)$$

上式表明狭缝空间滤波频率刚好等于狭缝自身的空间频率。

在 ω_1 处有

$$|H_1^N(\omega_1)|^2 = N^2 |H_1^1(\omega_1)|^2 \quad (12)$$

将光电管的输出信号再通过一个选频滤波器, 其中心频率 f_0 应为

$$f_0 = \frac{2\pi R}{T_0 b} \quad (13)$$

这样便得到了一个与空间滤波频率对应的时间频率信号。经过两次滤波原来反映地面景物变化的随机信号, 被一个近乎是随机相位的正弦信号所代替, 因而起到了稳定采样周期里信号变号次数的作用。单狭缝扫描时采用选频滤波器滤波尽管也可以得到一个近乎正弦的信号, 但此时信号的信噪比较采用具有 N 条狭缝时的信噪比几乎要低 N 倍 (参看式 12)。故可以说采用空间滤波器是通过光学的方法提高了信号的信噪比, 因而可明显减少像移速度传感器的零位输出波动。

四、模拟实验与结论

为验证理论分析的正确性做了动态模拟实验。实验中采用 1:3000 比例尺的航空摄影胶片上的像作为地面目标, 扫描盘的狭缝数等于 5, 扫描周期 0.1 秒, 由一个五阶伯特沃斯低通滤波器与一个四阶伯特沃斯高通滤波器构成带通滤波器, 其中心频率为 250Hz。

图 9 示出了光电管的输出信号 (a), 带通滤波器的输出信号 (b) 以及送到相关器的信号 (c)。

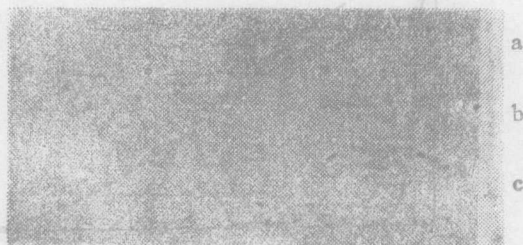


图 9 8 图

图10 (a) 示出了相关器的输出特性，图中虚线是按式 9 计算的结果。像移速度为零时相关器的输出信号示于图10 (b) 上，其均值等于零，均方差为 0.27^2 。

控制系统方框图如图11所示。由于相关器输出信号的波动干扰和系统的稳态误差有关，为此在前向通道中引入一积分器，因而系统的误差主要为干扰引起的随机误差。

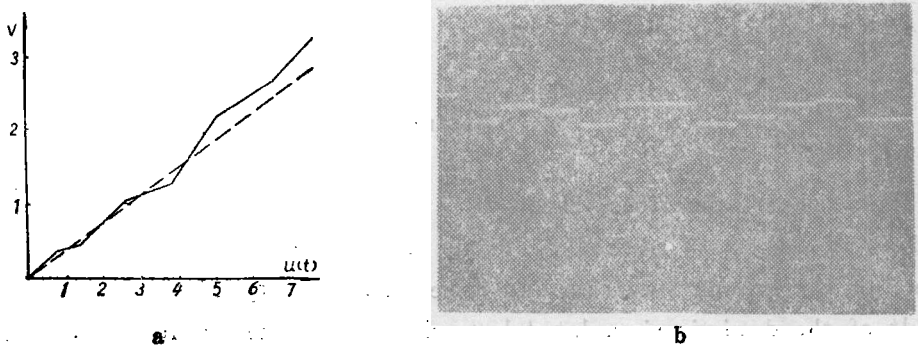


图10

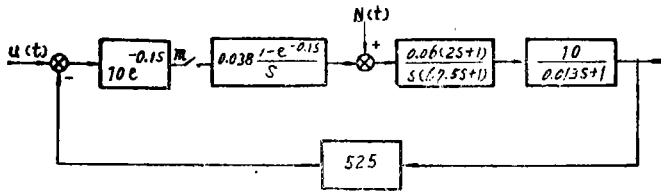


图11

实验结果见表 1。

引入空间滤波提高了输入信号的信噪比，减少了相位抖动的影响，减小了地面景物变化对传感器输出的影响，提高了速高比计的精度，方法是有效的。

表 1

像移速度 mm/s	跟踪精度
87.5	1%
116	0.9%
15	5%

参 考 文 献

- [1] M. H. Fiend, G.F. Bryant, J. Dowising, A new method of strip-speed measurement using random-waveform correlation, Trans. Soc. Instr. Technology, 1961, 13, 111—119.
- [2] 井戸川徹, 相関を用いる自動車の速度測定, 計測自動制御学会論文集, 1975, 11, No. 4.
- [3] 柏木潤, 片岡健一, 相関を用いる速度計測, 計測と制御, 1963, 1, 41—48.
- [4] W. Matthes, W. Redold, E. De. Caoman, Measurement of the velocity of gas bubble in water by a correlation method, Rev. Sci. Instr., 1970, 41, 843—845.
- [5] С.Ф. Козубовский, Автоматические корреляционные измерители скорости, Киев, 1963.
- [6] 内藤正, 狼嘉彰, 小林彬, 空間フィルタによる速度計測, 計測と制御, 1968, 7, No. 11, 761—772.
- [7] 赵周伦, 鍾太升, 侯方源, 圆环扫描速高比计研究, 光学机械, 1985, 6, 39—47.

The Research of the Circular Scanning V/H Device of Using Spatial Filtering

Zai Linpei

Abstract

This paper describes theoretic anylisis to the circular scaninig V/H device and suggests a method of using spatial filtering which decreases the effect of the grpund spectrum and raise: the accuraty of the V/H device. The result of the dynimic simu lated lests shows that the method coa be useful.