

空-时滤波转换测速原理分析

徐 天 宁

(中国科学院上海技术物理研究所)

摘要——本文从空间滤波及空-时转换的角度对一种无接触汽车速度计的工作原理进行了数学描述,给出了输出信号的频谱表达式,讨论了传感器参数与输出信号带宽的关系以及传感器和路面特性的匹配问题。

一、滤波过程

无接触汽车速度计的核心部件是速度传感器,这种传感器的结构如图1所示。通过光学镜头将路面在两列镶嵌光敏元列阵上成像,当路面象在列阵方向上相对运动时,取两列光敏元列阵的差分输出可得到频率与象运动速度成正比的窄带信号,测量信号频率即得到速度信息。显然,如果把光敏元看作视场光阑,这就是一种典型的空间滤波和空-时转换过程。本文以此为出发点,分析这种速度计的工作原理。

取一列光敏元,并用一个可分解成三个一维函数乘积的二维透过率函数 $f(x, y)$ 表示(见图2):

$$f(x, y) = t(x) \cdot g(x) \cdot h(y) \quad (1)$$

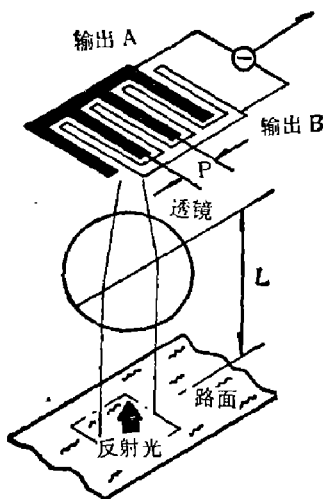


图 1

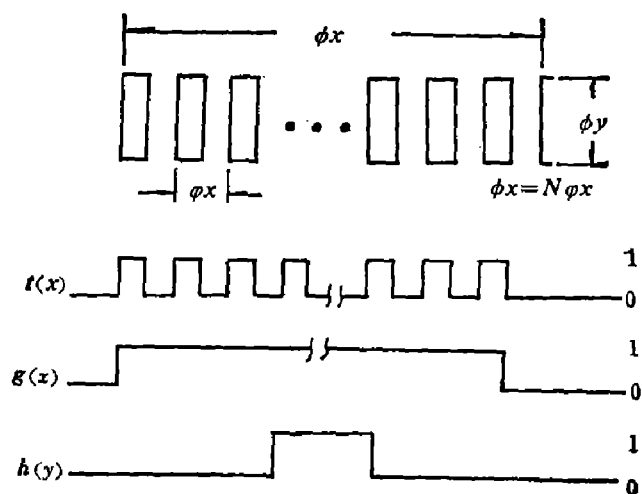


图 2

对式(1)作傅氏变换(注意,除特别说明之处外,本文全部用象空间坐标系);

本文1984年9月8日收到。

$$\begin{aligned} \mathcal{F}[f(x, y)] &= F(f_x, f_y) = T(f_x) * G(f_x) * H(f_y), \\ T(f_x) &= \frac{1}{2} \sum_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin(n\pi/2)}{n\pi/2} \delta(f_x - n f_{x_0}) = \frac{1}{2} \sum_{-\infty}^{\infty} S_a(n\pi/2) \delta(f_x - n f_{x_0}), \\ G(f_x) &= \phi_x \frac{\sin \pi f_x \phi_x}{\pi f_x \phi_x} = \phi_x S_a(\pi \phi_x f_x), \\ H(f_y) &= \phi_y S_a(\pi \phi_y f_y), \\ F(f_x, f_y) &= \frac{\phi_x \phi_y}{2} S_a(\pi \phi_y f_y) \sum_{-\infty}^{+\infty} S_a\left(\frac{n\pi}{2}\right) S_a[\pi \phi_x (f_x - n f_{x_0})]. \end{aligned} \quad (2)$$

地物图象过程可近似为弱平稳过程，其功率谱为 $W(f_x, f_y)$ 。对于一定的公路路面， $W(f_x, f_y)$ 是确定的，并可由实际测量得到。经光敏元滤波后的光功率谱为：

$$I(f_x, f_y) = W(f_x, f_y) |F(f_x, f_y)|^2. \quad (3)$$

因为地物象沿 x 方向作一维运动，所以我们感兴趣的是 f_x 方向上的谱分布：

$$\begin{aligned} I(f_x) &= \int_{-\infty}^{+\infty} W(f_x, f_y) |F(f_x, f_y)|^2 df_y = \frac{\phi_x^2 \phi_y^2}{4} \int_{-\infty}^{+\infty} S_a^2(\pi f_y \phi_y) W(f_x, f_y) df_y \\ &\quad \times \sum_{-\infty}^{\infty} S_a^2\left(\frac{n\pi}{2}\right) S_a^2[\pi \phi_x (f_x - n f_{x_0})] \\ &= \frac{\phi_x^2 \phi_y^2}{4} W^*(f_x) \sum_{-\infty}^{\infty} S_a^2\left(\frac{n\pi}{2}\right) S_a^2[\pi \phi_x (f_x - n f_{x_0})], \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $W^*(f_x) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_a^2(\pi \phi_y f_y) W(f_x, f_y) df_y$ 。这里，为了便于分析，略去了 $|F(f_x, f_y)|^2$ 中的交叉项。由 S_a 函数的性质可知，对于一般的多元列阵(十元以上)，交叉项的影响是很小的。 $W^*(f_x)$ 既可以从 $W(f_x, f_y)$ 计算，也可以直接测得。显然，这是一个典型的滤波过程，图 3 是这一过程的近似描述。

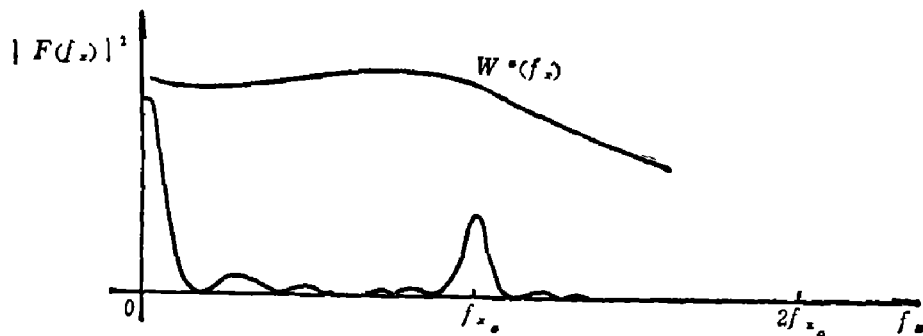


图 3

实际传感器输出的是时间信号。设地物象面运动速度为 u_x ，利用空-时转换关系 $f_x = \frac{f}{u_x}$ (f 为时间频率) 和傅氏变换性质，可直接得到时间信号的谱分布为：

$$S_v(f) = \frac{R \phi_x^2 \phi_y^2}{4 u_x} W^*\left(\frac{f}{u_x}\right) \sum_{-\infty}^{+\infty} S_a^2\left(\frac{n\pi}{2}\right) S_a^2\left[\pi \phi_x \left(\frac{f}{u_x} - n f_{x_0}\right)\right], \quad (5)$$

式中 R 为系统响应率，单位为 V/W 。

这样，就把滤波过程从空间坐标系转换成时间坐标系，并和地物运动速度建立了联系。将图 3 的横坐标换成时间频率 f ，就可得到时间滤波过程简图，参见图 4。和图 3 不同的是 u_x 的变化将引起 $W^*(f)$ 和 $|F(f)|^2$ 在 f 方向上的伸缩，这种伸缩起到尺度变化因子的作用。

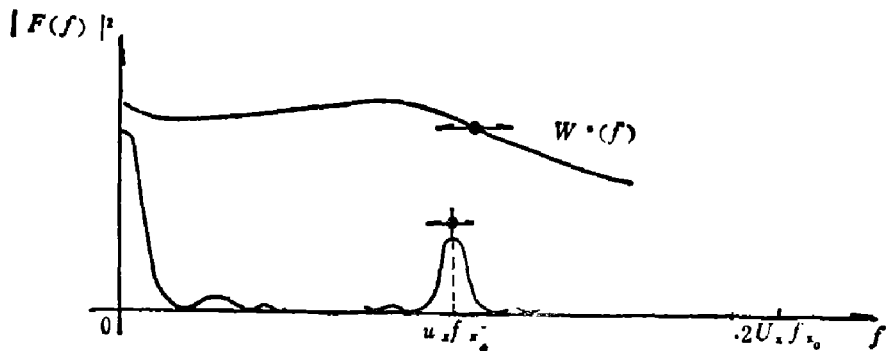


图 4

从式 (5) 可以看出, $|F(f)|^2$ 有两个主要的窗口, 一个在零频附近, 另一个在 $u_x f_{x_0}$ 处。当 n 为偶数时, $|F(f)|^2$ 等于零。 $3u_x f_{x_0}$ 以及更高阶的奇次谐波通带的影响也可以忽略。

以上我们讨论了单列光敏元的输出信号, 双列光敏元镶嵌差分输出可看作单列光敏元作 $\frac{1}{2} \phi_x$ 平移后的输出相减。根据傅氏变换的性质可以直接写出结果:

$$S'_v(f) = (1 - e^{-j\pi \frac{f}{f_{x_0} u_x}}) \cdot S_v(f) = 2 \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{f}{f_{x_0} u_x}\right) \cdot S_v(f) \cdot e^{-j\frac{\pi}{2} \frac{f}{f_{x_0} u_x} - j\frac{\pi}{2}} \quad (6)$$

式 (6) 说明, 镶嵌差分输出作用等于加了一个正弦跟踪滤波器, 其第一半波峰值在 $f_{x_0} u_x$ 处, 图 5 是它的幅频特性图。从图中可看出直流分量已被滤掉, 这种滤波方法在地物象速度 u_x 较小时有突出的优点, 因为这时信号频率很低, 其它方法很难滤掉直流分量而不损失信号。另外, 信号幅度增加了一倍。

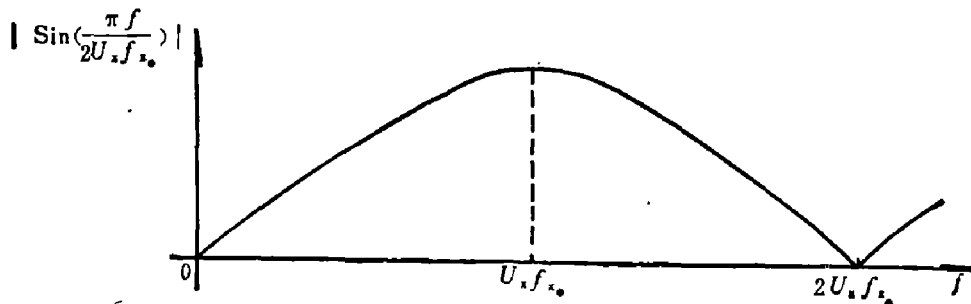


图 5

二、信号带宽

前面是对整个滤波过程的分析, 从结果可看出输出信号是一个除去了零频分量的、具有一定带宽的随机信号。我们所关心的是这个信号的可测性, 因而必须估算它的带宽。这里用 $S_a^2 \left[\pi \phi_x \left(\frac{f}{u_x} - f_{x_0} \right) \right]$ 函数的峰值点到第一零点的宽度近似表达基频信号带宽, 则有

$$B_s = \frac{u_x}{\phi_x} = \frac{u_x}{N \phi_x} = \frac{u_x f_{x_0}}{N} \quad (7)$$

信号基频

$$f_0 = u_x f_{x_0},$$

相对带宽

$$\left. \begin{aligned} \frac{B_s}{f_0} &= \frac{1}{N} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

这表明输出信号的相对带宽是不变的, 等于单边光敏元总数的倒数。 N 越大, 信号相对带

宽越窄,当 N 足够大(如 20 以上)时,则输出信号非常近似一窄带白噪声,实验和产品手册给出的信号波形证实了这一分析,典型信号波形如图 6 所示。

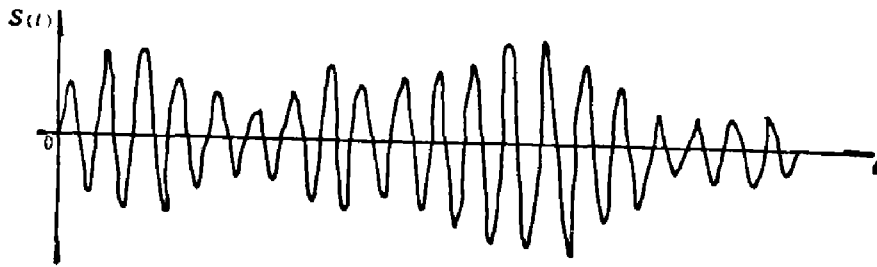


图 6

三、地物和光敏元列阵匹配

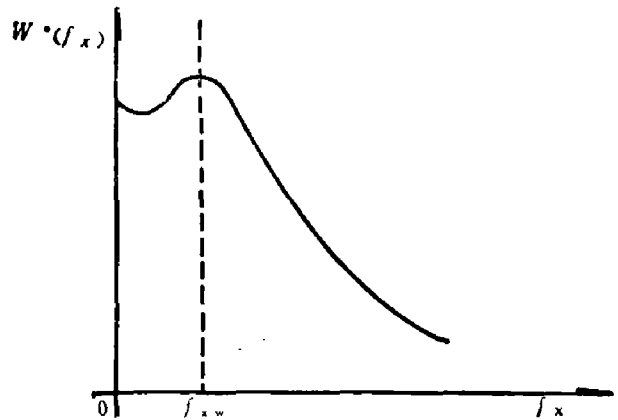
由于滤波是对地物谱进行的,因而空间滤波器的窗口频率应根据地物谱特性而定。一般选择地物谱最丰富处的频率作为窗口频率(或称工作频率),如图 7 中的 f_{xw} 。从前面的推导可知,空间滤波器第一窗口频率为 f_{x0} 。所谓地物和光敏元匹配,就是要求

$$f_{x0} = f_{xw} \quad (9)$$

用 f_{xw}^* 代表物空间坐标系中的工作频率, M 表示光学镜头的放大率,则有

$$f_{xw} = \frac{f_{xw}^*}{M} \quad (10)$$

图 7



将式 (10) 代入式 (9), 得

$$f_{x0} = \frac{f_{xw}^*}{M} \quad (11)$$

也可写成

$$\varphi_x = \frac{M}{f_{xw}^*} \quad (12)$$

式 (12) 是匹配数学表达式,实际上,匹配总是根据路面情况、光学系统和光敏元尺寸等诸因素综合考虑的。

设象距为 125 mm、物距为 500 mm、光敏面有效长度为 40 mm、光敏元对数 $N=20$, 则有

$$M = \frac{125}{500} = 0.25, \quad \varphi_x = 2 \text{ mm},$$

工作频率
$$f_{xw}^* = \frac{M}{\varphi_x} = 125/\text{m}。$$

当地面速度 u_x^* 在 0.5~250 km/h 范围内变化时,由 $f_0 = u_x^* f_{xw}^*$ 的关系可知转换后的时间频率 f_0 的变化范围是 17.4~8675 Hz。测得 f_0 , 再除以 f_{xw}^* , 就得到实际地面速度。

四、结 论

空-时滤波转换方法是一种把物体运动速度转换为便于测量的频率信号的简单、有效的方法。精心设计的系统可以达到很高的精度。

THE ANALYSIS OF THE PRINCIPLE OF A KIND OF SPEEDOMETER USING SPATIAL TIME FREQUENCY CONVERTER AND FILTER

XU TIANNING

(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

A mathematical description of the operational principle of a kind of untouched vehicle speedometer is derived from the viewpoint of spatial filtering and spatial-time conversion. The spectrum expression of the output signal is given and the relations between the parameters of sensors and the spectrum width of the output signal are discussed. The match between the sensor and road surface is discussed also.