



500MHz 相位声学 显微镜的研究

吴小鸣 陈戈林 张克潜

(清华大学无线电电子学系)

1985年7月29日收到

本文描述了 500MHz 相位声学显微镜的研制工作。介绍了鉴相器的工作原理和设计方法。该机采用双接收机混频产生参考信号,用机械扫描传感信号抵消样品信号中的干扰。实验结果证明方案是可行的。作者还指出该鉴相器得到样品频率像的可能性。

一、引言

声学显微镜是七十年代出现的一种新型显微镜^[1]。当入射声波是等幅单频连续波时,从样品反射或透射的声波是调幅调相波。调制系数取决于样品声学性质。人们可用幅度解调得到样品的幅度像,也可通过相位解调得到样品的声学相位像。过去多采用前一方案^[2],仅有少数学者作过相位检测工作^[3-4]。实际上,后者有着下述突出优点,值得予以重视。

1. 可观察幅度像反差小、相位像反差大的样品; 2. 具有较高的纵向分辨率和信噪比; 3. 和幅度像配合,可得到样品全部声学信息。

此外,这种相位测试系统不仅可用于声学显微镜,也适用于一般的相位测试装置。

二、透射式相位声学显微镜的设计

1. 相位声学显微镜(简称 SAM)成像原理

透射式 SAM 成像原理如图 1 所示。显示器的亮度函数 u_d 可表示为^[5]

$$u_d(x_d/M, y_d/M) = \iint_{-\infty}^{\infty} h(x_s - x, y_s - y) t_0(x, y) \times dx dy \quad (1)$$

式中 h 是声成像系统的点扩散函数^[6], t_0 是样品的透射系数。通过幅度解调,得到样品的幅

度像 u_A 。

$$u_A(x_d/M, y_d/M) = |u_d(x_d/M, y_d/M)| \quad (2)$$

通过相位解调,可得相位像 u_F 。

$$u_F(x_d/M, y_d/M) = \text{Arg}[u_d(x_d/M, y_d/M)] \quad (3)$$

理想的点扩散函数 $h(x, y) = \delta(x, y)$, 则

$$u_A(x_d/M, y_d/M) = |t_0(x, y)|$$

$$u_F(x_d/M, y_d/M) = \text{Arg}[t_0(x, y)].$$

由上可知, SAM 接收声透镜输出电平中包含了样品的幅度和相位两种信息。幅度 SAM 仅利用了幅度信息。本文的目的是建立一套相位测试系统,检测相位信息,获得样品的相位图像。

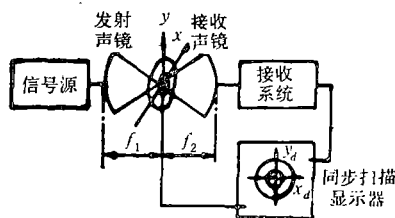


图 1 透射式 SAM 成像原理图

2. 相位 SAM 电路设计要点

相位 SAM 的主要特点是利用信号中相位信息获得图像。其余部分和幅度 SAM 相同,此处不再重复^[6]。下面仅叙述相位测试部件设计要点。

(1) 用鉴相器测量相位;(2) 消除接收声透镜输出信号幅度变化的影响,得到样品的

“纯”相位像；(3) 消除信号源频率不稳定的影响；(4) 提高输出信号的信噪比。

3. 信号源和参考信号源

为消除信号源频率漂移的影响，信号源和参考信号源设置如图 2。信号源 I 输出信号经定向耦合器到发射声透镜，声波经样品到接收声透镜，输出信号经放大器 I 和接收机 I 放大。将接收机 I 输出的中频 (30MHz) 样品信号送入鉴相器。再由信号发生器 I、II 及接收机 II 得到另一路 30MHz 参考信号。由于样品信号和参考信号由同样两个信号源混频产生，因此频率完全相同，消除了信号源不稳定的影响。可以利用稳定度较低的设备得到精度较高的结果。

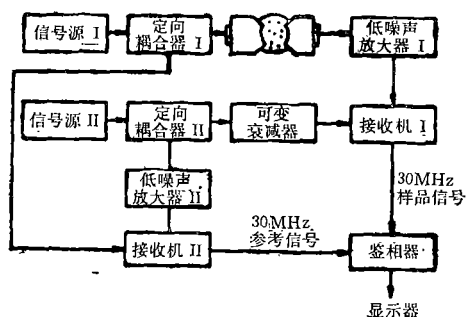


图 2 相位 SAM 电路原理图

4. 鉴相器的设计

鉴相器是系统的核心，必须精心设计。工作原理如图 3。相位 SAM 中，经过样品的信号是个调幅调相信号。为消除幅度调制对相位测试的影响，把 30MHz 样品信号和参考信号再次混频，得到 $\omega_s/2\pi = 2\text{MHz}$ 的样品信号和参考信号。再进行放大限幅，得到矩形脉冲位置调制信号 (PPM) 和一系列位置固定的脉冲。把 PPM 信号和参考脉冲送入脉冲上升沿 R-S 触发器，得到脉冲宽度调制信号 (PDM)。PDM 信号的脉冲宽度和样品信号的相位变化 $\varphi(t)$ 成正比。PDM 信号通过低通滤波器便得到样品的相位信息。

PPM 信号脉冲宽度 $\tau = \pi/\omega_s$ ，幅度为 $\pm A_0$ 。脉冲时间位置 $t_k = k \frac{2\pi}{\omega_s} + \frac{\varphi(t)}{\omega_s}$ ， k 为整

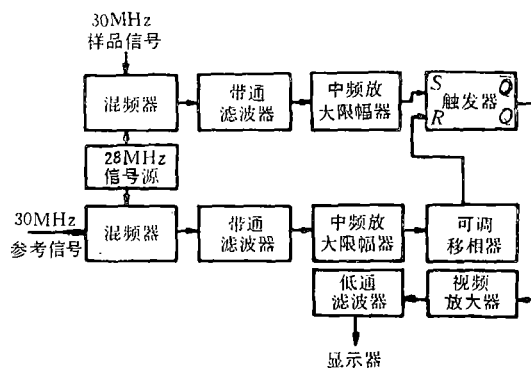


图 3 鉴相器电路原理图

数， $\varphi(t)$ 是样品信号的相位调制。上信号可表示为^[7]

$$S_{\text{PPM}}(t) = \frac{A_0}{\omega_s} \frac{d\varphi(t)}{dt} \left\{ 1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \times \cos[k\omega_s t - k\varphi(t)] \right\} \quad (4)$$

PDM 信号的脉冲宽度 $\tau = \frac{\pi}{\omega_s} + \frac{\varphi(t)}{\omega_s}$ ，幅度为 $\pm A_0$ ，PDM 信号可表示为

$$S_{\text{PDM}}(t) = \frac{A_0 \varphi(t)}{\pi} + \frac{2A_0}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \times \left[\sin k\omega_s \left(t + \frac{\varphi(t) + \pi}{4\omega_s} \right) - \sin k\omega_s \left(t - \frac{\varphi(t) + \pi}{4\omega_s} \right) \right] \quad (5)$$

PDM 信号中包括了样品相位信号成份 $A_0 \varphi(t)/\pi$ ，及以 $k\omega_s$ 为中心频率的高频分量。由于 ω_s 大大高于样品相位信号 $\varphi(t)$ 的频率上限 ω_m ，只要把 PDM 信号通过低通滤波器，就可得到样品相位信号 $A_0 \varphi(t)/\pi$ 。再用可调移相器调整参考信号相位，使相位信号 $\varphi(t) = 0$ 时鉴相器输出为零。

鉴相器中滤波器对信号保真、提高信噪比十分重要，必须正确设计。下面介绍设计依据。

当 SAM 在行扫描时， γ 为常数，(1) 式简化为

$$u_d(x_d/M) = h(x_s) * t_0(x) \quad (6)$$

傅里叶变换后化为 $F[u_d(x_d/M)] = F[h(x_s)] \cdot F[t_0(x)]$ 。若声透镜的传递函数 $H(\omega_x) = F[h(x_s)]$ 的空间频率带宽为 B ，则 $F[u_d(x_d/M)]$

M)) 的带宽小于 B 。当 SAM 行扫描速度为 U_F ，得

$$u_d(x_s)|_{x_s=U_F \cdot t} = u_d(U_F \cdot t)$$

$$F[u_d(U_F t)] = \frac{1}{U_F} F[u_d(x_s)]|_{\omega_x=\omega_t/U_F} \quad (7)$$

上式中 ω_x 是空域圆频率； ω_t ——时域圆频率； U_F ——SAM 行扫描速度。上式说明 u_d 的空域和时域频率特性相似。两频率间的关系为

$$\omega_t = U_F \omega_x \quad (8)$$

根据上式，可由信号空域频带宽度估算其时域频带宽度。由于 $\omega_x \leq 2\pi B$ ，则 $\omega_t \leq 2\pi U_F B$ ，故 $f_m \leq U_F B$ 。若 SAM 行扫描频率为 f_F ，扫描幅值为 A ，则可得

$$f_m \leq B A f_F \quad (9)$$

如一个玻璃金属球面换能器型声透镜 $B = 0.766/\lambda$ 。当 $f = 500\text{MHz}$ ， $\lambda = 3\mu\text{m}$ ， $A = 100\mu\text{m}$ ， $f_F = 300\text{Hz}$ 时，则 $f_m \leq 7.7\text{kHz}$ 。鉴相器的低通滤波器的通带为 $0-7.7\text{kHz}$ ，带通滤波器中心频率为 $\omega_s/2\pi = 2\text{MHz}$ ，带宽为 $2f_m = 15.4\text{kHz}$ 。

由 (4) 式知，PPM 信号和样品信息 $d\varphi/dt$ 有关。我们可直接利用 PPM 信号得到样品的声学相位变化(或频率)像。

5. SAM 中声透镜轴向振动的影响和消除

在 SAM 中，声透镜间或样品与声透镜间的距离常有微小变化 Δ 。这会影响所得样品信号的幅度和相位。 Δ 通常为微米量级，对频率较低的 SAM 影响很小。但对高频 SAM，特别是相位 SAM，影响较大。即使 $\Delta < \lambda$ ，其影响也十分严重。若不消除，难以得到高质量的图像。而一般防震方法难以奏效。如 500MHz SAM， $\lambda = 3\mu\text{m}$ 。若要使 Δ 造成的干扰小于 1° ，则要求 $\Delta < 80\text{\AA}$ 。这是无法实现的。国外学者提出用微分相位对比法解决这个问题^[8]。在高频 SAM 中，这种方案难于实现。我们建议采用下述方法解决这个问题。

实际上，声透镜轴向振动是外界干扰和扫描装置造成的。可用性能良好的防震底座消除外界扰动。机械扫描装置的影响，可用下述电

路消除。鉴相器输出电压中有机械扫描干扰。我们从扫描位置传感器输出电压中取出一部分，去抵消上述干扰。

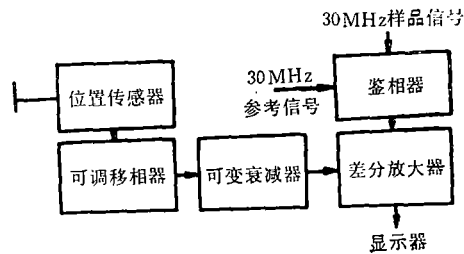


图4 补偿声透镜轴向振动影响电路图

三、实验结果

制作出整套装置，仔细调整鉴相器到设计状态后，作了一系列实验。

1. 声透镜间声场轴向分布曲线测量。

在 SAM 的两个声透镜间不放样品。将二

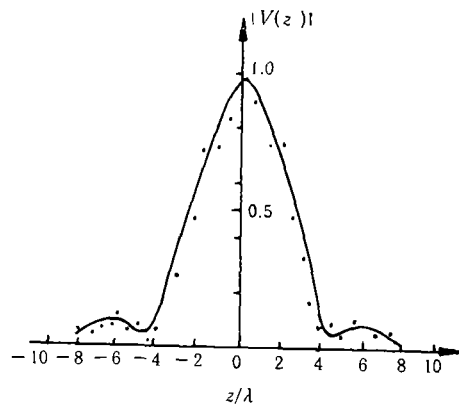


图5 声场幅值分布曲线

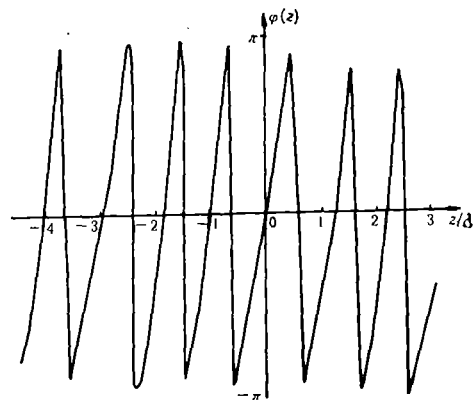


图6 声场相位分布曲线

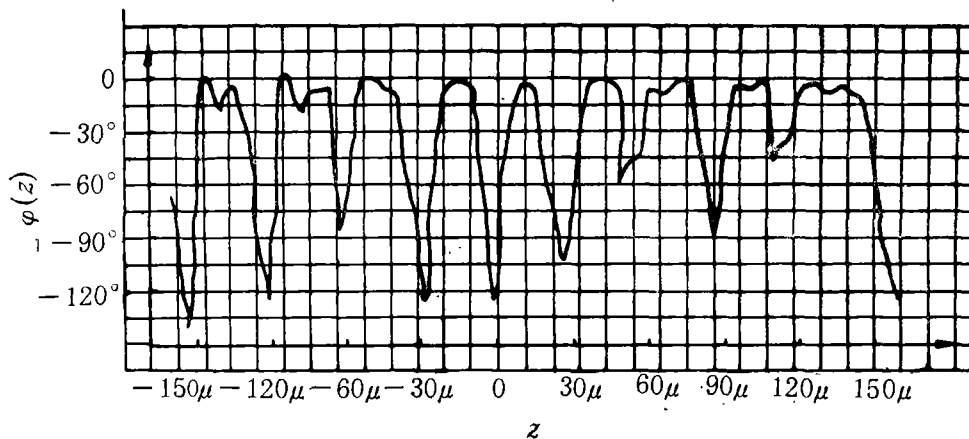


图7 网格一维扫描时相位信号

声透镜调至同轴共焦后,将一声透镜沿轴向移动,测出输出电压与两声透镜焦平面间距离 z 的关系^[9]。我们测出了声场幅值分布曲线,见图5;也测出了相位分布曲线,见图6。

由图可知,声场幅值变化比较缓慢,相位分布变化较快,空间周期约为水中声波波长。当声透镜间距离变化 6λ 时,声场幅值变化一倍,而相位变化高达 2160° 。这说明相位SAM的轴向分辨率比幅度SAM高得多。

2. 相位SAM的成像特性

我们用相位SAM观察了一些样品。例如观察了一个860目网格。用 $x-y$ 记录仪记下一维扫描时样品相位信号,如图7所示。也得到网格的二维图像,如图8。

关于相位SAM的应用及与幅度SAM成像特性的详细比较,将在另外文章中专门叙述。

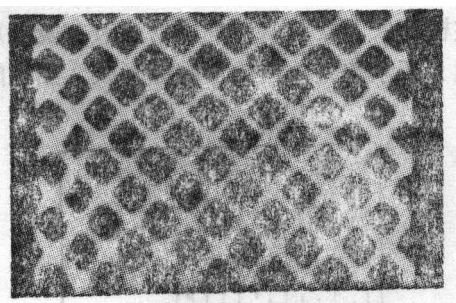


图8 网格二维图像

四、结 论

我们研制了一套相位SAM系统。采用的

办法是把接收声透镜输出调幅调相信号放大限幅,变成PPM信号,再通过上升沿R-S触发器变成PDM信号,在滤波后可得样品的相位信号及相位图像。为减小信号源不稳定的影响,用双接收机形成参考信号。为消除声透镜轴向振动的影响,用扫描传感信号去抵消样品信号中的干扰分量。

实验证明方案是可行的,也表明相位SAM具有较高的纵向分辨率。它可以灵敏地检测“位相物体”的相移分布,也可检测微小的高度变化。

作者在工作中得到李德杰、罗淑云、胡思正等同志的大力帮助,在此谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] Lemons, R. A., C. F. Quate, *Appl. Phys. Lett.*, **24**-3 (1974), 163.
- [2] 中鉢憲賢,日本音響学会誌, **39**-9 (昭和58年), 75.
- [3] Atalar, A., C. F. Quate and H. K. Wickramasinghe, *Appl. phys. Lett.*, **31**-12 (1977), 791.
- [4] Bennett, S. D., E. A. Ash, *IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics* **28**-2 (1981), 59.
- [5] Wickramasinghe, H. K., *J. Appl. Phys.*, **50**-2 (1979), 664.
- [6] 陈戈林等,应用科学学报, **2**-4 (1984), 310.
- [7] 张树京,通信系统原理,中国铁道出版社,1981, 206.
- [8] Smith, I. R., H. K. Wickramasinghe, *Electronics Lett.*, **18**-2 (1982), 92.
- [9] 李德杰等,应用科学学报, **2**-4 (1984), 322.