



# 声光技术的进展

钱振型

(四川压电与声光技术研究所)

1982年1月12日收到

## 一、声光效应和声光器件

当声波在介质中传播时,由于物质的光弹效应,使介质的折射率发生周期性变化,从而也像相位光栅那样使光衍射。当超声波频率较低,声光互作用区较短时,入射光常被衍射成多级衍射光,这就是喇曼-奈斯衍射。如果超声波频率很高,光沿着适当的角度射入介质并通过较多的超声波阵面,则高次衍射光消失,只剩下0级和1级光,这就是布喇格衍射,这时入射光与衍射光的角度应满足布喇格方程即

$$\theta_i = \theta_d = \theta_B$$

$$\theta_B \approx \sin \theta_B = \lambda / 2\Lambda$$

式中  $\theta_B$  为布喇格角,  $\lambda = \lambda_0/n$ , 即光在介质中的波长  $\Lambda$  为声波长。

布喇格衍射的效率  $\eta$  为

$$\eta = I_1/I_0 = \sin^2 \frac{1}{2} \Delta\phi$$

$\Delta\phi$  是声波所引起的光相位总延滞,它与声压成比例

$$\Delta\phi = k l \Delta n$$

式中  $k = 2\pi/\lambda$ , 为光在真空中的传输常数,  $l$  为互作用长度,  $\Delta n$  为声致折射率变化。当  $\Delta\phi = \pi$  时,入射光完全被衍射,在实用上,一般可达  $\eta \approx 96\%$ 。因为布喇格衍射的效率很高,所以可用来制作各种有实用价值的器件<sup>[1-3]</sup>。

在各向异性介质中,在一定条件下,衍射光的偏振面和折射率都与入射光不同,这样的布

应用声学

喇格衍射称为反常布喇格衍射或各向异性衍射。

在反常布喇格衍射中,固定方向的入射光有可能在较宽的超声频率范围内满足动量守恒条件,所以对于同样的声频,反常布喇格衍射的带宽  $\Delta f_a$  要比正常布喇格衍射的带宽  $\Delta f_n$  大得多

$$(\Delta f_a)^2 = 4f_0 \cdot \Delta f_n$$

因为反常布喇格衍射带宽较大,有些晶体如  $\text{TeO}_2$ ,  $\text{PbMoO}_4$  等又有较好的声光特性,所以它们常用作高性能的声光器件<sup>[3-4]</sup>。

声光互作用的研究早在20年代已经开始,但只有在激光出现以后才得到重视和应用。现在声光技术已成为相当活跃的研究领域。几种声光器件都有较好的性能并已应用于激光技术和电子技术的许多方面<sup>[5-7]</sup>。

### 1. 声光偏转器

按照布喇格原理,只要改变超声频率就可以改变光束的偏转角,使光束扫描,其光分辨率,即可分辨光点数为

$$N = \tau \Delta f / a$$

式中  $\tau = D/V$  为声的渡越时间,  $D$  为光孔径,  $V$  是介质中的声速,  $a$  为与光孔形状等有关的常数,矩形光孔的  $a \approx 1$ ,圆形光孔的  $a \approx 1.22$ 。

对于光偏转元件的主要要求是大容量、高速度和高效率。为了使声光偏转器既有高的分辨率又有较快的开门时间,就需要有大的带宽  $\Delta f$ , 为此,要提高器件的工作频率或采用声束

控技术来扩展带宽。例如采用多元换能器阵列,并使相邻换能器所激励的声波间有  $180^\circ$  相位差,则当频率变化时,声波束的方向也适当改变,因而可以在较宽的频率范围内满足布喇格条件。这样控制声束的声光偏转器的带宽为  $\Delta f_D = 2\sqrt{2}f_0$ , 即当中心频率不变时,它有可能使分辨率增加 4.2 倍而不影响其开关时间<sup>[8-9]</sup>。现在用  $\text{TeO}_2$ ,  $\text{PbMoO}_4$  等晶体的声光偏转器,大约可得 2000 个瑞利分辨点,开关时间在  $10\mu\text{s}$  左右,偏转效率约 70%。它与其它光偏转元件如多面转镜、振镜等相比各有其优缺点。声光偏转器的优点是结构简单,没有机械运动。速度快,寿命长,可靠性好而且可以多种模式工作。但是它的分辨率、效率和光斑质量都不如多面转镜<sup>[10]</sup>。

声光偏转器可作模拟光扫描,这时可用线性调频的射频信号去激励压电换能器,使超声频率随时间作线性变化,则偏转光点连续扫描。这种光栅式扫描常用于光记录、显示、传真及光雷达等方面<sup>[11-13]</sup>。

声光偏转器可以作随机的数字式扫描,开关时间可达  $\mu\text{s}$  级,这时最好用程序控制的频率合成器来驱动。这种数字式扫描可用于光记录及全息存贮等方面<sup>[14]</sup>。

如果同时用几个不同频率的射频信号来激励声光偏转器,就能同时产生几束衍射光,它们的光点位置和强度都取决于射频信号,这样的

多频随机存取方法可用来发生字符,从而使扫描速率增加数倍。这种多频工作方式现已用于计算机输出的快速打印等<sup>[13-15]</sup>。

声光偏转器与多面转镜相比,一个主要的缺点是分辨率低。它的可分辨光点数远远不如后者。但如在声光偏转器的后焦面上放一个声行波透镜,则可使其分辨率显著增加。声行波透镜也是一种声光器件,它利用声行波所引起的一维折射率变化——柱面透镜效应,使发射的衍射光束再次聚焦,则  $\delta = G\delta_s$ , 式中  $\delta$  及  $\delta_s$  分别为聚焦前后的束径,  $G$  为声行波透镜的增益,它最大可达 40。

声行波透镜的焦距为

$$F = \frac{\Lambda}{4} \sqrt{n_0 / \Delta n}$$

式中  $\Delta n$  为声行波所引起的折射率变化,它的上限受介质破裂强度限制,大约可达  $5 \times 10^{-3}$ , 这时可使光束聚焦为  $\phi 3\mu\text{m}$ 。如器件带宽为 500MHz, 则  $N = 80000$  点/行(行长 24cm)。实际上,现用声光偏转器-声行波透镜串联而成的高精度扫描器分辨率可达 5000 点/行,扫描速率大于  $3 \times 10^4$  行/s。这样的串联结构要求声光偏转器发出的扫描光点精确跟踪声行波透镜中的超声波,所以偏转器必须有极高的线性度,而声行波透镜的驱动电功率高达 300W 以上<sup>[16]</sup>。

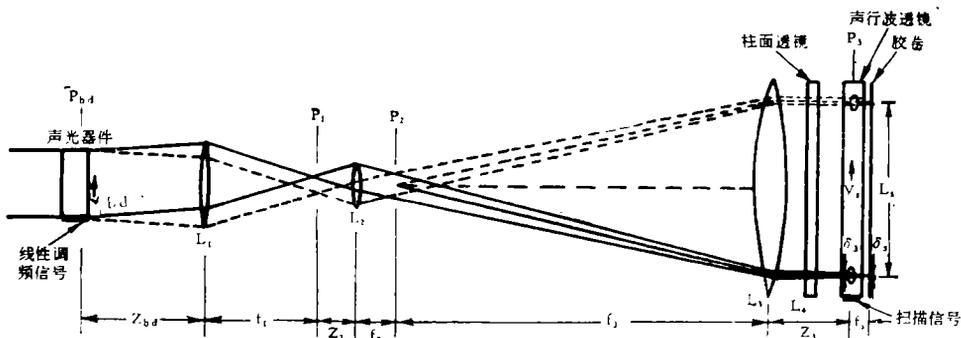


图 1 声行波透镜

## 2. 声光调制器

声光调制器的结构与偏转器相似,但工作状态迥然不同。设计调制器时要求聚焦光束的

发散角  $\Delta\phi$  与声波发散角  $\Delta\theta$  相近,即  $a = \Delta\phi / \Delta\theta \approx 1$ 。通常认为取  $a = 1.5$  时调制器有最好的性能<sup>[17-18]</sup>,对于脉冲调制器,这时的上升时间

$t_r$  为

$$t_r = 0.85\tau$$

式中  $\tau = d_0/V$ ,  $d_0$  为光束腰直径,  $V$  为声速.

对于正弦波调制器, 这时的 3 分贝调制带宽  $f_m$  为

$$f_m = 0.65\tau$$

声光调制器的调制带宽一般不超过 35 MHz, 远不如电光调制器高. 但是它的消光比较高, 光损耗小, 成本低, 易于对准, 而且可以多信道工作, 所以现在已广泛应用于传真、照相排版及高速记录等<sup>[19-20]</sup>, 并且可用于红外区<sup>[21]</sup>.

声光器件也可作为损耗元件而用于激光腔内调制如  $Q$  开关, 锁模及腔倒空等. 这类器件通常都用光学质量好、耐高温、无光伤的石英作介质, 放在光谱振腔内, 介质中的声波使光衍射, 从而使激光腔处于高损耗状态. 只要切断驱动电源, 光就不再衍射, 激光腔就处于低损耗状态. 这种声光  $Q$  开关速度虽不太快, 但损耗小, 光脉冲的一致性较好, 它可以迅速恢复连续波工作, 也可将激光脉冲调制成多种输出波形, 如方波、锯齿波等<sup>[22]</sup>. 声光  $Q$  开关也可用线性调频的超声脉冲来实现, 因为线性调频脉冲能像菲涅尔波带片那样, 使人射光聚焦, 所以开关速度较快, 可以获得 20 ns 左右的巨脉冲<sup>[23]</sup>.

如所周知, 锁模就是使各个激光振荡模之间保持一定的相位关系, 以改善激光的相干性.

多模激光器各纵模的频率差为

$$\Delta\nu = c/2L$$

式中  $c$  为光速,  $L$  为光谱振腔长度. 如在腔内放一声光元件, 用  $c/4L$  频率激励其换能器, 使产生一声驻波, 这驻波将以  $c/2L$  的频率生长和消亡. 它就像一个光阀, 而光束只能在它开的时候通过. 这样就迫使各个纵模耦合而成为有规则的脉冲序列. 脉冲持续时间是可以调节的, 其下限主要决定于激光基质的增益和线宽<sup>[24-25]</sup>.

腔倒空激光器用光谱振腔贮能, 然后用倒空器将大部分光能抽出, 这种技术要求光谱振腔的损耗极小, 所以声光技术比较适用, 因为声光器件的插入损耗极小 (用石英时单通插损约为 0.2%), 而且速度较快, 其开关时间可小于光的单次往复周期.

图 2 是高速全息记录用的锁模、腔倒空氩离子激光器<sup>[26]</sup>. 其中有两个声光器件, 一个声光锁模调制器, 只是在选波长稜镜上加一个压电换能器, 用它可获得脉冲仅 0.2~0.3 ns 的脉冲序列. 声光倒空器的驱动信号与激光模间隔频率保持一定的相干性, 激光腔内的光束每往返一次都要通过倒空器二次并被衍射, 因为这两次的衍射光相干而且相长干涉, 从而使激光输出  $\eta = 4\eta_1(1 - \eta_1)$  ( $\eta_1$  为单次衍射效率).

这种锁模-腔倒空激光器的腔内单通损耗

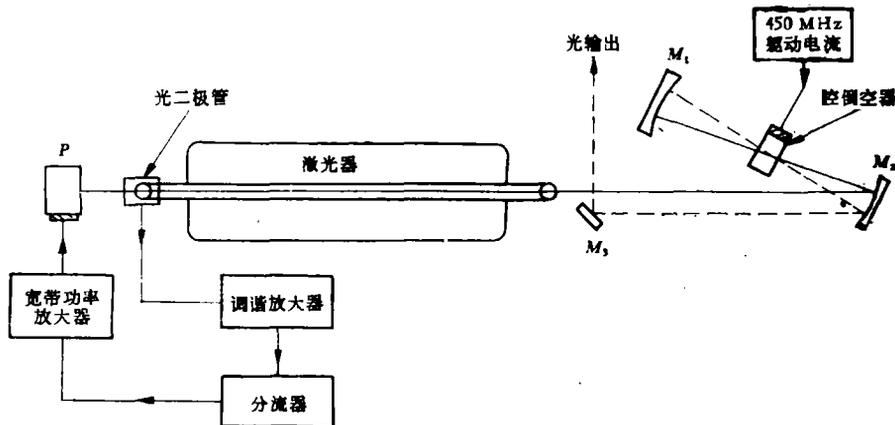


图 2 声光锁模、腔倒空的氩离子激光器

- $M_1$ ——反射率  $\approx 100\%$ , 半径 = 10cm;  $M_2$ ——反射率  $\approx 100\%$ , 半径 = 20cm;
- $M_3$ ——反射率  $\approx 100\%$ , 平面; P——选波长-锁模调制器.
- 循环光路, ——反射光路.

约 1%，它可以形成 2ns 光脉冲并以 1MHz 的重复频率倒空，足以满足 GHz 高速全息光记录器的要求。

### 3. 声光可调滤光器

声光衍射的作用类似于透射式光栅，改变超声频率就相当于改变光栅常数，因而可从白光中分离出任意波长的单色光。声光效应的这种快速分光能力，可用于制作电调谐的色散元件——声光可调滤光器<sup>[4,27]</sup>。

各向同性介质中的正常布喇格衍射，常因其入射角变化而使衍射效率迅速下降，所以孔径角极小。但在各向异性介质中，声光互作用发生于寻常光及异常光之间，所以可利用异常光的双折射角度变化来补偿其动量失配，特别是非同线结构不仅有较大的孔径角，而且毋需采用偏振片。

图 3 是非同线结构的 TeO<sub>2</sub> 声光可调滤光

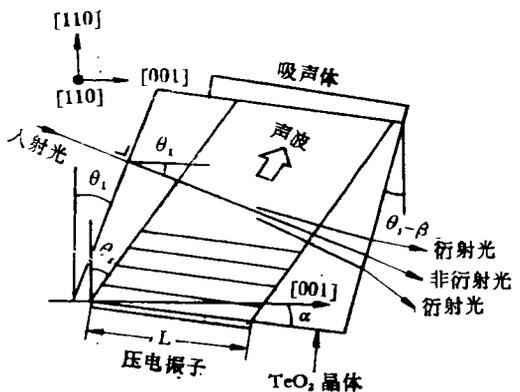


图 3 TeO<sub>2</sub> 非同线声光可调滤光器

器，×切 LiNbO<sub>3</sub> 换能器焊接在 TeO<sub>2</sub> 的与光轴成 9.7° 的面上。入射光的极角约 20°，只要改变超声频率，即可改变衍射光的波长，两者间的关系如下式

$$f \cdot \lambda = \Delta n V(\alpha) \sin^2 \theta_i / \sin(\theta_i - \alpha)$$

式中  $\theta_i$  是入射光与晶体 [110] 轴间的夹角， $\alpha$  是声波波阵面法线与 [110] 轴的夹角， $\Delta n$  为 [110] 轴向的自然双折射率。例如当  $\theta_i = 18.6^\circ$ ， $\alpha = 1.6^\circ$  则用 45—97MHz 超声波可使 700—400nm 间的光作选择性衍射。

这种可调滤光器的光谱分辨率等于声频与

渡越时间之积，即  $R = f\tau$ ，它可高达数 Å，因而有可能用来代替稜镜或光栅而作为分光元件。因为它是电调谐的固体器件，所以可实现  $\mu\text{s}$  级的高速分光。例如当光束径为  $\phi 1\text{mm}$ ， $\tau \approx 6\mu\text{s}$  时可在大约 500  $\mu\text{s}$  内扫遍整个可见光区，而且寿命长，可靠性好。

近年来声光可调滤波器的功能已从可见光区扩展到红外和紫外区。用 TeO<sub>2</sub> 制的器件也能在 0.24—0.4  $\mu\text{m}$  紫外区和 2.5—5.5  $\mu\text{m}$  红外区调谐，而用 Tl<sub>3</sub>AsSe<sub>3</sub> 的器件则可在 9.3—10.8  $\mu\text{m}$  间调谐。现在这类器件已用于染料激光器的调谐和氩离子及二氧化碳激光器的选波长，并正试图用作红外望远镜的可调滤光和红外相干检测等<sup>[28—29]</sup>。

## 二、声光扫描技术

激光扫描技术是光记录、传真、打印、显示等许多重要应用的基础。现在常用的激光扫描元件有多面转镜、振镜和声光偏转器三种。它们的功能可比较如下

表 1 三种激光扫描器件的功能比较

功能比较	振镜	多面转镜	声光偏转器
可分辨光点数	1000—10000	1000—10000	10—2000
扫描速度	1—20ms		0.5—30 $\mu\text{s}$
能否随机存取	能	不能	能
光损耗	10%	10%	30—50%
扫描角	<15°	>30°	—1°
价格	低	高	中

如表所示，声光偏转器的容量远不如多面转镜，损耗也较大。但因它是能以多种模式快速扫描的固体元件，有其独特的优点，所以已广泛用于许多方面。下面只介绍几种值得重视的应用：

激光显示具有高亮度、高分辨率等优点。大屏幕显示——激光电视，因操作复杂，维修困难，功耗大等原因，暂时还难于实用。但小屏幕激光显示则是完全可行的。

图 4 的机载激光平视显示系统用氩-氟光源<sup>[9]</sup>，它用声光调制器调制，并用 4 个 TeO<sub>2</sub> 声

光偏转器作二维扫描。这种偏转器的工作频率为 80MHz，带宽 22MHz。它所用的相控阵换能器，用不同延时的射频信号来驱动，以实现相移和控束。两个串联的偏转器可得 500 点，两级偏转总效率在 40% 以上，偏转角 4°/轴，它可以 50 帧/s 或 40 $\mu$ s/行的速率扫描 100 × 100 mm<sup>2</sup> 毛玻璃屏幕，用各种符号或 5 × 7 字符来表示飞机的飞行参数等。在飞行条件下机械扫描元件容易发生畸变，而且寿命短，可靠性差，所以声光偏转器比较适用。它的亮度高于阴极射线管。

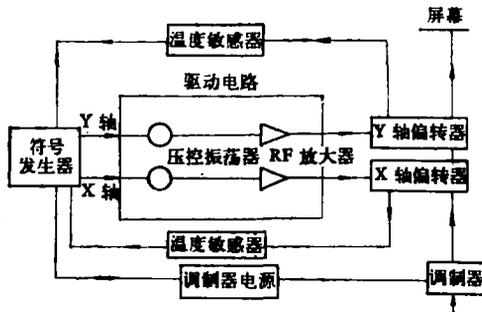


图4 机载激光平视显示系统框图

在微电子技术方面，电子束曝光和 X 射线曝光很受重视。其实激光束曝光也不容忽视。早在 1976 年瑞典 Micronic 公司已制成用计算机控制的激光曝光机 (Laserscan)，它采用氦-镭激光器和声光器件。光束沿 x 方向扫描 10 次/s，基片架则沿 y 方向移动。当时已制出线宽为 0.5 $\mu$ m 的 LS1 掩膜。分辨率虽尚不如电子束，但要比一般光刻法高 3 倍，而且比较快，可在一小时内制成一个 50 × 50mm<sup>2</sup> 的掩膜。

1978 年张慎四等提出的聚焦激光曝光系统 (FLLS) 用 5—240 $\mu$ W 的氦离子激光对光刻胶曝光。这系统用声光调制器调制激光强度，以便改变曝光线宽，例如曝光功率为 240 $\mu$ W 时，线宽为 12 $\mu$ m，而 7 $\mu$ W 时则为 4 $\mu$ m<sup>[30]</sup>。

与电子束曝光相比，激光曝光技术有一定的优点。首先是装置比较简单，因为毋需真空系统，二是激光光源品种多，不同的波长和功率可适应多种需要，三是这种装置可能具有多功能，它不但可用于曝光还可作为光探针来检查集成电路<sup>[31]</sup>。

应用声学

实时信息记录有广泛的用途，激光记录无论在速率和误差率方面都优于磁记录。它利用声光技术将电信号变成声光器件中的瞬态声图形，使激光短脉冲衍射而成像于记录介质上<sup>[32]</sup>。

现在已制成带宽达 1GHz 的声光记录系统。其声光元件有 1000 个可分辨点和 1 $\mu$ s 光孔。氦离子光源用声光锁模、腔倒空可以 1MHz 频率发生 300ps 的短脉冲序列。这系统的信噪比为 25dB，动态范围主要取决于记录介质<sup>[33]</sup>。

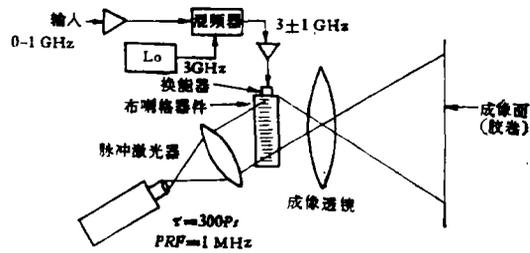


图5 带宽 1GHz 的声光记录系统

### 三、声光全息技术

激光的出现使全息术获得了很大的发展，因为全息本身有成像能力而且傅立叶全息又有很高的分辨率，所以它很适用于记录及存贮等。全息存贮容量大，可以高速随机存取，误差率极低，对读出位置的精度要求也较低。现在已制成了存取时间为  $\mu$ s 级的 10<sup>3</sup> 比特大容量光全息存贮系统，它可用作计算器的外存或长期的档案式存贮<sup>[33]</sup>。

在光全息记录存贮系统中，组页器(数据组合器)是关键元件。它使信息流变成空间调制的信号光束，以便与参比光束干涉而形成全息图。大容量全息存贮对组页器的要求很严格。多年来对各种组页器如 LiNbO<sub>3</sub> 及 PLZT 透明陶瓷等，虽已研究得很多，但迄今还没有完全适用的。从 1974 年起开始用多信道声光调制器作为组页器，发现它有较强的灵活性，可以满足高数据速率的要求。

在图 6 的全息数字记录-重现系统中，高速的数据流为分频器分成 34 个并联的低速数据流。用它们分别调制作为组页器的多信道声光

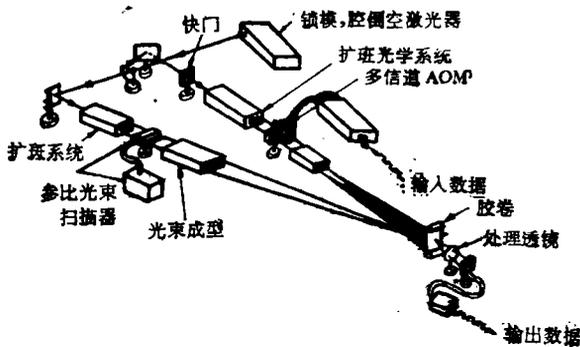


图6 1.0GHz 比特/秒的全息数字记录-重现系统

调制器的驱动载频。这调制器有 34 个信道，氦离子激光器发出的 2ns 短脉冲序列，通过它而被衍射和调制。衍射光束通过变换透镜成为一系列数据组的傅立叶全息图。在读出时可将已显影的胶卷放在原来位置上，用声光偏转器使参比光束逐点照明各个全息图。重现的信号光波通过处理透镜进行反变换后，就可在光探测阵列上形成数据组的像<sup>[34-36]</sup>。

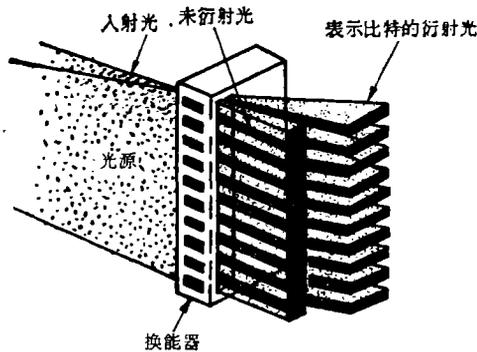


图7 128 信道的 TeO<sub>2</sub> 声光组页器

#### 四、声光信号处理

声光系统的二维状态和平行处理能力，对信号处理有很重要的意义。在光信号处理中，可利用声光效应——布喇格或喇曼-奈斯衍射来将输入的电子数据变成相应的光模拟，即透射率的空间调制状态。声光器件结构简单，并有较大的信息容量，所以在信号处理方面很受重视<sup>[37]</sup>。下面简单介绍使用声体波器件的声光信号处理技术的概况。

#### 1. 声光频谱分析

射频频谱分析要求有大的带宽，高的分辨率和灵敏度等。声光频谱分析的特点在于能实时无扫描地进行宽带频谱分析。它可以平行处理许多同时出现的信号。相当于一个多通道滤波器，其通道数可达 1000 并可通过光学加权来抑制旁瓣<sup>[38]</sup>。

当多个射频信号同时到达声光元件的换能器时，它们所激励的超声波使平行光分别衍射，衍射光点通过傅立叶变换透镜再投射到频率面上。光点在变换面上的位置与信号频率的关系近似于

$$x' \simeq (\lambda F / V_s) f$$

式中  $F$  为傅立叶变换透镜焦距，所以光点的位置坐标即为频率变量的模拟。但频率线性度受声光作用的非线性及探测器等限制。

声光布喇格元件的一级衍射效率为  $\eta = I_1 / I_0$ ，当  $\eta \ll 1$  时

$$\eta = I_1 / I_0 = \left( \frac{V}{2} \right)^2 \propto |V(t)|^2 \propto S(f, t)$$

所以小信号的衍射光强近似地正比于输入电信号的加功率谱  $S(f, t)$ 。

声光频谱分析的加权函数主要由激光束的光强分布、光孔径和声光介质的声衰减决定；而分析仪的分辨率和旁瓣则取决于加权函数。高斯分布的光束，有利于抑制旁瓣，但分辨率较差。

声光频谱分析仪的有效 BT 积或可分辨点数  $N = \Delta f \cdot \tau$ ，主要受光孔径和声光介质的声衰减限制。通常 BT 积约为 500—1000。用 LiNbO<sub>3</sub> 或 GaP 作声光介质的频谱分析仪，带宽可在 500MHz 以上，频率分辨率约 1MHz。用 TeO<sub>2</sub> 慢切变波的声光器件的分辨率可达 0.01—0.02MHz，但其带宽不过数十 MHz，器件的动态范围则可达 50dB<sup>[39]</sup>。

声光频谱分析可用来分析射频信号的各种参数，如频谱幅度、功率谱以及到达时间等。在雷达、电子对抗及射电天文学等方面都很有用。美国 Culgoove 天文台从 1973 年起就采用了中心频率 150MHz、带宽 100MHz， $N = 1000$  的

声光频谱分析仪, 用 1.8mW 氩-氟激光记录频谱, 信道数达 1000 个, 分辨率约 100kHz, 动态范围在 30dB 以上。据认为这种频谱分析仪的灵敏度约比一般的扫描式接收机高 30 倍<sup>[40]</sup>。在我国, 声光频谱分析技术也颇受重视, 并正在推广应用中。

## 2. 声光信号相关器

相关技术可以提高雷达、通讯等系统的探测灵敏度和分辨率等, 所以在信号处理方面极为有用。相关输出信号的相关峰宽约为系统带宽的倒数 ( $\Delta t = 1/B$ ), 相关增益则等于系统的时间-带宽积 ( $SNR_c = SNR \cdot BT$ )。现在用声表面波和半导体耦合的声-电相关器已在试用中。声光相关技术也正在迅速发展。相关器除了应有较大的  $BT$  积外还须有较大的距离

窗, 即到达信号能与参比信号相关所允许的时差。

采用声体波的声光相关器有空间积分 (SIC) 和时间积分 (TIC) 两种结构。在空间积分相关器中, 待相关信号进入声光器件成为空间调制的光模拟并与参比信号相乘, 而在探测器面上形成相关信号。所用的参比信号可以是一个具有一定透明状态的掩膜或是从相对方向进入声光器件的信号。用时间反转的声信号作参比信号的优点, 是便于相关任意信号而毋需制作掩膜, 并可用外差法来检测输出信号。但在这种情况下, 输出信号与参比信号必须同时出现在声光器件的光孔中, 所以短码有可能局部相关, 而当两个信号进入器件的时差大于器件的距离窗时, 则相关就完全不能进行<sup>[41]</sup>。

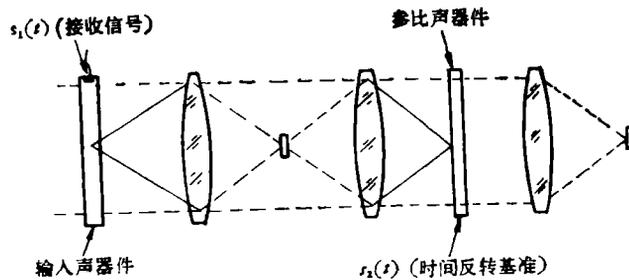


图8 空间积分声光相关器

也可将信号同时从两端送入同一声光器件, 这样就可用很简单的装置来获得时间反转信号。1973年已有人用这样的声光相关器实现了 127 位伪噪声码的自相关, 其带宽为 15 MHz, 时间窗  $20\mu s$ , 动态范围 40dB, 旁瓣电平  $-30dB$ <sup>[26]</sup>。对于线性调频脉冲, 因其频率斜率能像菲涅尔波带片那样使入射光聚焦, 所以可不用参比信号, 而根据信号到达焦面的时间来求得其到达时间和相关<sup>[42]</sup>。

在空间积分相关器中, 相关积分是通过声光器件的光孔在空间实现的, 其相关增益受器件的  $BT$  积限制, 通常在 1000 以内。距离分辨率与器件的  $BT$  积成反比, 可达数米, 频率分辨率与声速越时间成反比, 而其多普勒分辨率也较差。为了改善时间-带宽积和多普勒分辨率, 需要用长延时器件<sup>[43]</sup>。

应用声学

在时间积分相关器中, 可将信号  $S_1(t)$  送入声光调制器以调节光源强度。而将参比信号  $S_2(t)$  加到声光偏转器, 后者所激励的超声波为调制光所照明并成像于输出面, 则输出面上的光强为

$I_2(x, t) = [V_1 + S_1(t)] \cdot [V_2 + S_2(x + Vt)]$   
探测器阵列所读出的积分强度则为

$$I_2(x) = V_1 V_2 T + \int_0^T S_1(t) S_2(x + Vt) dt$$

式中的  $T$  为探测器阵列的时间常数。

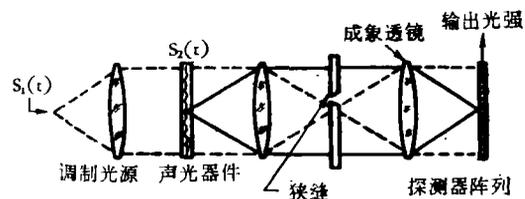


图9 时间积分声光相关器

时间积分相关器的一个优点是毋需时间反转的参比信号, 它的带宽虽为声光器件的带宽所限制, 但因它是时间积分的, 所以时间窗和 BT 积可不受限制。事实上, 这种系统的有限 BT 积取决于探测器阵列的动态范围 ( $BT_{eff} = R^2$ ,  $R$  为探测器动态范围)。目前 CCD 的动态范围约  $10^3-10^4$ , 所以这种装置的相关增益可达  $10^6-10^8$ 。

近年来, 声光信号处理技术发展很快, 除了上面的频谱分析和相关以外, 它还可实现卷积、存贮相关、多普勒分析、动目标显示以及线性调频-Z 变换等功能, 是一种很有前途的实时大带宽信号处理技术, 值得我们重视。

### 参 考 文 献

- [1] H. V. Hance, J. K. Parks, *JASA*, **38-1** (1965), 14—23.  
 [2] N. Lichida, *Proc. IEEE*, **61-8** (1963), 1073—92.  
 [3] A. Korper et al, *Proc. IEEE*, **54-10** (1966), 1429—1437.  
 [4] I. C. Chang, *IEEE Trans.*, **SU-23**, 1(1976), 2—22.  
 [5] D. A. Pinnow, *IEEE Jouyr.*, **QE-6** (1970), 223—238.  
 [6] N. Lichida, *Jour. Appl. Phys.*, **40** (1969), 4692—4695.  
 [7] A. Korpel, *Proc. IEEE*, **37-2** (1969), 160—170.  
 [8] G. A. Coquin, *IEEE trans.*, **SU-17**, 1 (1970), 34—40.  
 [9] H. Aronson, AD-776653/8GA (1974).  
 [10] L. Beiser, *Laser Application*, vol. II, 1974, 53—159.  
 [11] 福本晃夫, 电通学会论文志, **58-C,4** (1975), 209—216.  
 [12] C. Slezak, *Electro-Opt./Laser Intern. 1976 Conf. Proc.*, 92—93.  
 [13] D. L. Hecht, *Proc. EOSD Conf. 1973*, 112—115.  
 [14] N. Lichida, *Opt.-Electron (Lett.)*, **2** (1970), 43—45.  
 [15] G. Hrbek, *Proc. EOSD Conf. 1971*, 271—275.  
 [16] R. H. Johnson, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **90** (1976), 40—48.  
 [17] D. Mayden, *IEEE Jour.*, **QE-6**, 1 (1970), 15—24.  
 [18] D. E. Flinchbaugh, *ASW & AOD*, Edit. by Kallard, 1971, 139—149.  
 [19] V. Ohta et al, *Proc. Electro-Opt./Laser*, 1978, 381.  
 [20] C. J. Palermo et al, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **53** (1974), 21—22.  
 [21] A. M. Дуакунов, *Лисбма ЖТФ*, **3-12** (1977), 564—568.  
 [22] M. Dewit, *USP* 3936769.  
 [23] J. L. Jernigen, *USP* 4105953.  
 [24] P. W. Smith, *Proc. IEEE*, **38-9** (1970), 1342—1355.  
 [25] M. A. Pollack, *Appl. Phys. Lett.*, **5** (1964), 4—5.  
 [26] R. M. Montgomery, *Proc. EOSD Conf. 1973*, 90—101.  
 [27] T. Yano et al, *National Tech. Report*, **22-5** (1976), 651—656.  
 [28] J. D. Feichtner, *Appl. Phys. Lett.*, **34-1** (1979), 1—3.  
 [29] R. S. Hughes, *USP* 4028636.  
 [30] S. C. Chong et al, *Appl. Opt.*, **17-7** (1978), 1069.  
 [31] 电子材料, **4** (1980), 国内开发情报栏。  
 [32] W. S. Oakley, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **90**(1976), 158—163.  
 [33] D. Casasent, *Opt. Data Proc.*, chapt 8, 1978, 241—258.  
 [34] H. N. Roberts et al, *Appl. Opt.*, **13-4** (1974), 841—847.  
 [35] T. Kaneko, *Trans. Instru.-Electro- & Commun. Eng. Japan*, **E-62**, 4 (1979), 285—286.  
 [36] N. J. Berg et al, *Electro-Opt./Laser Intern. 1976 Conf. proc.*, 400—407.  
 [37] W. E. Kock, *Eng. Appl. of Laser & Holograph*, chapt 4, 1975, 337—341.  
 [38] D. L. Hecht, *Opt. Eng.*, **16-5** (1977), 461—466.  
 [39] T. R. Bader, *Appl. Opt.*, **18-10** (1979), 1668—1672.  
 [40] R. A. Sprague, *Opt. Eng.*, **16-5** (1977), 467—474.  
 [41] T. W. Cole, *Proc. IEEE*, **61-9** (1975), 1321—1323.  
 [42] R. A. Sprague, *Appl. Opt.*, **15-1** (1976), 89.  
 [43] N. J. Berg et al, *Proc. Tech. Program. Electro-Opt./Laser 1978 Conf.*, 488—498.

(上接第 38 页)

同。说明出厂检验与实际使用二者考核方法之间有差距, 尚待进一步探讨。

### 参 考 文 献

- [1] ASA Z 24, 22-1957.  
 [2] ANSI S 3. 19-1974.  
 [3] 章句才等, 中国科学, **2**(1980), 118—126.  
 [4] J. W. Schmidt et al. 99th meeting of ASA, 1980.  
 [5] E. H. Berger, *JASA Supl.* **70** (1981).  
 [6] E. H. Berger, *E. A. R Logl*, 1979.  
 [7] L. H. Royster, 98th meeting of ASA, 1979.  
 [8] L. H. Royster, *American Industrial Hygiene Association Journal*, **41-3** (1980), 161—169.