

# 合成孔径雷达光学处理器

张宪英 胡家陞 于前洋 曹任法

**摘要:** 本文介绍了我们在六五期间研制的 HG-1 型合成孔径雷达光学处理器的工作原理和主要组成部分, 对其中几项关键技术做了简要的说明。

## 一、前言

合成孔径雷达是一种高分辨率微波成像系统。雷达装在飞机或其它飞行载体上, 得到的信号记录在胶片上, 此数据片需经光学处理转换成图像。

早在1951年, Goodyear 公司的 Carl Wiley 就已提出波束锐化的概念。他提出, 目标通过雷达波束时回波的多普勒频移可用来提高雷达的分辨能力。

1953年7月, Illinois 大学对他们自己的 X 波段相干雷达的数据进行分析, 验证了波束锐化的概念。同年在 Wolvevine 计划中首次提出研制合成孔径雷达。1957年, Michigan 大学研制的 AN/UPD-1 型合成孔径雷达首次获得成功, 采用锥透镜光学处理器得到了图像。

自此之后, ERIM (Michigan环境研究所) Goodyear 公司、JPL (喷气推进实验室) 等相继研制成功多种机载和星载合成孔径雷达, 广泛地用于军事和民用目的。这些雷达中所采用的几乎全都是光学处理器。锥透镜式处理器和倾斜柱面镜式处理器, 因其像面上放大率不等, 已逐渐被淘汰。目前广泛使用的是 Goodyear 公司 UC-3 型通用处理器和 ES-83 型专用处理器。

长春光机所自1978年起开始研制合成孔径雷达光学处理器, 先后研制成锥透镜式光学处理器、四透镜式斜平面光学处理器。1983年正式列为国家“六五”攻关课题, 于1987年4月通过院级鉴定, 达到了八十年代国际同类产品先进水平。这是一种五透镜式斜平面处理器。

## 二、合成孔径雷达数据片的形成原理

如图1所示, 装在飞机上的雷达持续地向地面发射线性调频脉冲信号。地面目标返回的

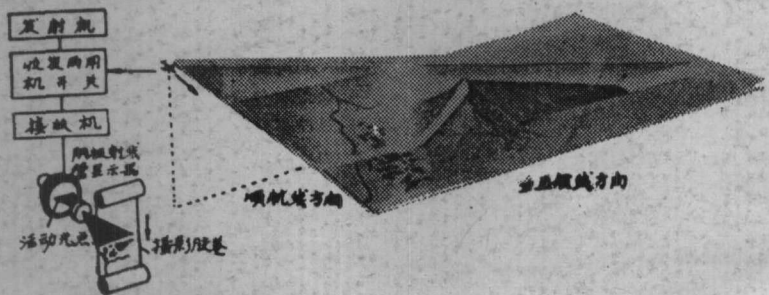


图1 合成孔径雷达数据片形成原理图

信号借助CRT记录到胶片上。

雷达发射的信号是时间的函数，可以表示为：

$$S(t) = A(t) \cos 2\pi [f_0 t + \phi(t)] \quad (1)$$

其中：

$A(t)$ —幅度调制函数

$\phi(t)$ —频率（相位）调制函数

$f_0$ —雷达的中心频率

对合成孔径雷达来说：

$$A(t) = \sum_n \text{rect} \left[ \frac{t - nT}{\tau} \right] \quad (2)$$

$$0 \leq t - nT \leq \tau \quad (A(t) = 1)$$

$$t - nT > \tau \quad (A(t) = 0)$$

$$\phi(t) = \frac{1}{2} \alpha t^2 \quad (3)$$

因此，(1)式可完整地表达为：

$$S(t) = \sum_n \text{rect} \left[ \frac{t - nT}{\tau} \right] \cos [2\pi f_0 t + \pi \alpha t^2] \quad (4)$$

此信号为线性调频脉冲，其指数表达式为：

$$\begin{aligned} S(t) &= A(t) \exp j (2\pi f_0 t + \pi \alpha t^2) \\ &= \sum_n \text{rect} \left[ \frac{t - nT}{\tau} \right] \exp j (2\pi f_0 t) \exp j \pi \alpha t^2 \end{aligned} \quad (5)$$

其中：

$\tau$ —脉冲宽度

$T$ —脉冲重复频率

$n$ —脉冲数

$\alpha$ —线性调频速率

当 $\alpha < 0$ 时，合成孔径雷达的信号波形如图2。

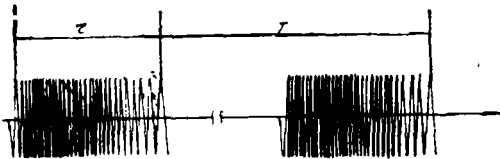


图2 线性调频脉冲

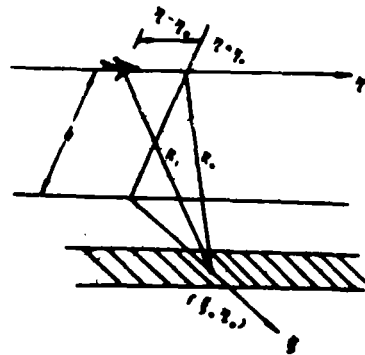


图3 雷达波束中的点目标

如图3所示，假定在雷达波束内有一点目标，其坐标为 $(\xi, \eta_0)$ 。

由这个点目标返回的信号为：

$$S(t) = A'(t)S(t - 2R_1/c) \quad (6)$$

其中:

$A'(t)$ —回波信号的幅度, 与目标距离、微波的大气传输特性及目标散射特性有关。

$c$ —电磁波传播速度。在空气中  $c = 2.99774 \times 10^8 \text{m/s}$

$R = R(t)$ —到目标的瞬间距离

$$R = R(t) = \sqrt{(\eta - \eta_0)^2 + R_0^2} = \sqrt{(vt - \eta_0)^2 + R_0^2} \quad (7)$$

其中:

$v$ —飞行速度

因为  $R_0 \gg |vt - \eta_0|$ , 所以 (7) 式展开为:

$$R_1 = R_0 + \frac{(vt - \eta_0)^2}{2R_0} \quad (8)$$

由 (5) 和 (8), 可把 (6) 式写作:

$$\begin{aligned} S'(t) &= A'(t) \exp \left\{ j \left[ 2\pi f_0 \left( t - \frac{2R_1}{c} \right) \right] \right\} \\ &\cdot \exp \left\{ j \left[ \pi \alpha \left( t - \frac{2R_1}{c} \right)^2 \right] \right\} \\ &= A'(t) \exp \{ j (2\pi f_0 t) \} \\ &\cdot \exp \{ j [-4\pi f_0 R_0 / c] \} \\ &\cdot \exp \left\{ j \left[ -\frac{2\pi f_0 (vt - \eta_0)^2}{R_0 c} \right] \right\} \\ &\cdot \exp \left\{ j \left[ \pi \alpha \left( t - \frac{2R_0}{c} - \frac{(vt - \eta_0)^2}{R_0 c} \right)^2 \right] \right\} \quad (9) \end{aligned}$$

由于  $R_0 \gg |vt - \eta_0|$ , 因而上式中最后一项中的  $(vt - \eta_0)^2 / R_0 c$  可略去。而  $\exp \{ j [-4\pi f_0 R_0 / c] \}$  为常数相位项。可以并入  $A'(t)$ 。

$$f_0 = \frac{c}{\lambda_r} \quad (10)$$

其中:

$\lambda_r$ —雷达波长

则 (9) 式可写作:

$$\begin{aligned} S'(t) &= A'(t) \exp [j (2\pi f_0 t)] \\ &\cdot \exp \left\{ j \left[ -\frac{2\pi (vt - \eta_0)^2}{\lambda_r R_0} \right] \right\} \cdot \exp \left\{ j \left[ \pi \alpha \left( t - \frac{2R_0}{c} \right) \right] \right\} \quad (11) \end{aligned}$$

此信号在接收机中差频放大后, 用来调制 CRT 的电子束, 记录到胶片上, 实现时间信号到空间信号的转换。

假定在胶片记录过程中输片速度为  $v_f$ , 胶片的记录宽度为  $B$ , 则有:

$$p = \frac{v}{v_f} = \frac{\eta}{x_0} \quad (12)$$

$$q = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{B} = \frac{R_0 - R_{\min}}{\gamma_0} \quad (13)$$

其中:

$\eta$ —飞机的航向坐标

$x$ —胶片上的方位维坐标

$p$ —数据片的方位比例因子 (航向)

$q$ —数据片的斜距比例因子 (斜向)

$R_{\max}, R_{\min}$ —雷达波束角范围内的最大和最小斜距

$\gamma_0$ —斜距为  $R_0$  的点目标在胶片上对应的记录位置。

把 (12)、(13) 式代入 (11):

$$S'(t) = A'(t) \exp\{ j (2\pi f_0 t) \} \\ \cdot \exp\left\{ j \left[ -\frac{2\pi p^2 (x - \eta_0/p)^2}{\lambda_r R_0} \right] \right\} \\ \cdot \exp\left\{ j \left[ \pi a \left( t - \frac{2q\gamma_0}{c} - \frac{2R_{\min}}{c} \right)^2 \right] \right\}$$

式中  $2R_{\min}/c$  是返回信号对发射信号的时间延迟。在此时间内 CRT 的电子束是截止的，在胶片的坐标中可去掉，把上式整理后可得:

$$S'(t) = A'(t) \exp\{ j (2\pi f_0 t) \} \\ \cdot \exp\left\{ j \left[ -\frac{2\pi p^2}{\lambda_r R_0} (x - x_0)^2 \right] \right\} \\ \cdot \exp\left\{ j \left[ \frac{4\pi a q^2}{c^2} (\gamma - \gamma_0)^2 \right] \right\} \quad (14)$$

其中:

$$x_0 = \eta_0/p$$

$$\gamma = ct/2q$$

可见，坐标为  $(\xi, \eta_0)$  的点目标记录在胶片上后，形成了一个两维焦距不等的夫累涅尔带板，此带板在波长为  $\lambda_i$  的相干光照射下，能够形成两条方向不同的相互分离的焦线，方位维和斜距维的焦距分别为:

$$F_0 = \pm \frac{1}{2p^2} \cdot \frac{\lambda_r}{\lambda_i} \cdot R_0 \quad (15)$$

$$F_r = \pm \frac{c^2}{4aq^2\lambda_i} \quad (16)$$

当  $a$  为负值时，带板是椭圆式的，当  $a$  为正值时，带板是双曲线式的。通常， $a$  均采用负值，如图 4 所示。

对于雷达波束复盖的任意点目标来说， $R_0 \rightarrow R$ ，方位焦距可以由 (15) 式改写成，

$$F_0 = \frac{1}{2p^2} \cdot \frac{\lambda_r}{\lambda_i} R \quad (17)$$

地面上的景物可以看做是多个点目标迭加而成的。因而，数据片可以看做是多个带板的

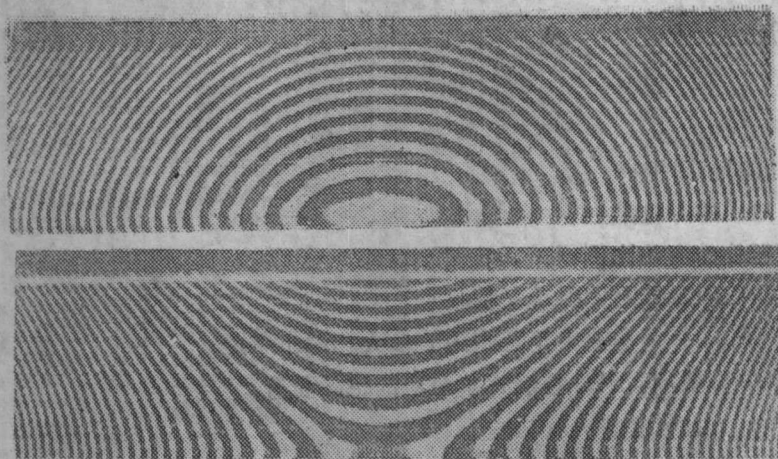


图4 椭圆式和双曲线式带板

迭加，所以通常把数据片看做是两维焦距不等的微波准全息图。

点目标在胶片上的记录长度和宽度分别为数据片上的合成孔径长度和脉冲弥散宽度  $b$ 。

$$l = \frac{L_s}{p} = \frac{\beta_R}{p} \quad (18)$$

$$b = \frac{c\tau}{q} \quad (19)$$

其中：

$L_s$ —雷达合成孔径长度

$\beta$ —雷达的方位波束角

可见，斜距不同的点目标在胶片上的记录长度是不同的，而记录宽度是不变的。

数据片作为准全息图，在相干光的照射下，就能够再现出一组实像（+1级）和一组虚像（-1级）。从式（16）和（17）可以看出，再现的图像两维不一致，斜距焦面是竖直的，方位焦面随  $R$  变化，是倾斜的，两者相距很远，根据雷达的参数，有时可能相距几米甚至十几米，两维图像比例尺相差  $K$  倍。

光学处理器的任务，就是要把一组再现的像做为系统的物，把两维分离的图像拉到一起，把两维相差一定角度的图像重合起来，把比例尺纠正成一致。

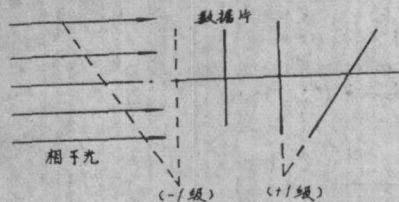


图5 相干光照射下的数据片

### 三、HG-1型光学处理器的工作原理和主要组成部分

HG-1型光学处理器采用五透镜斜平面式处理系统，其主要组成部分如图6所示。

图6中所列各部分均置于气浮平台上，电控和数据处理电路绝大部分都在控制柜中。图7所示为HG-1型光学处理器整机照片

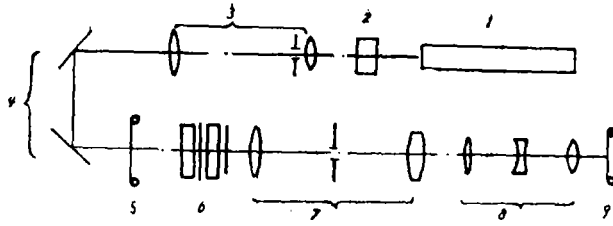


图 6 HG-1 光学处理器的原理图

图中① He-Ne激光器 ②调光装置(滤光片+声光器件) ③光束扩展器 ④反射镜  
⑤数据片输片机 ⑥棱镜放大器 ⑦斜距望远镜 ⑧方位望远镜 ⑨图像片输片机



图 7 HG-1型光学处理器整机照片

### 1. 光学处理器的主光路

主光路由两组球面镜组成一个无光焦度系统，三组柱面镜组成一个变倍望远系统。斜距维是一倍望远系统，柱面镜只起平板玻璃作用。方位维是一倍球面系统与 $1/K$ 倍柱面系统的迭加。(1) 比例因子的纠正

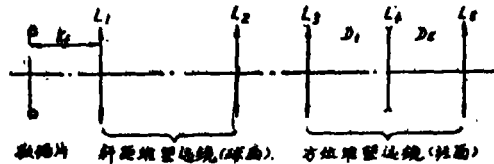


图 8 光学处理器的主光路

方位维的总放大倍率为 $1/K$ ，它能够把方位图像进行压缩，使得它的比例尺与斜距维的图像一致。

不同的雷达， $K$ 值是不同的，只要在满足望远镜条件下选用不同的 $D_1$ 和 $D_2$ ，就可以使柱面望远镜的放大倍率 $M = 1/K$ 。

$$\left. \begin{aligned} D_1 &= f_3 + d_1 + f_4 \\ D_2 &= f_4 + d_2 + f_5 \\ \text{其中: } d_1 &= f_4^2/d_2 \\ d_2 &= f_4 f_5 K/f_3 \end{aligned} \right\} (20)$$

我们设计的结果, 系统能够满足  $K = 6 \sim 30$ , 球面通光口径  $\phi 185\text{mm}$ , 相对孔径  $1:10.5$ , 柱面最大通光孔径  $100 \times 180\text{mm}$ , 并且对面形有严格的要求, 加工装调中要求三组十二片柱面镜的母线相互平行, 误差不超过  $5''$ 。为此专门研制了柱面镜加工机床, 在结构设计和装调中也采取了相应的措施。

### (2) 像的重合

这里我们首先考虑的是把光轴上的两个点重合到一起。为此, 我们可以计算出数据片的方位像和斜距像经主光路再次成像的位置到第五组透镜主面的距离, 然后令这两个距离相等, 就可以得到下面的公式:

$$\begin{aligned} D_0 &= f(k+2) + \frac{F_v k^2}{k^2-1} - \frac{F_o}{k^2-1} - \frac{f_3(k^2+1)}{k^2-1} \\ &\quad - \frac{2f_4 k^2}{k^2-1} - \frac{f_5 k^2 (f_5 + 2d_2)}{d_2 (k^2-1)} \\ &\quad - \frac{k^2 (d_1 + d_2 + c_0 - c_1)}{k^2-1} \end{aligned} \quad (21)$$

其中:

$D_0$ — $L_2$ 与 $L_5$ 的顶点间距离

$f = f_1 = f_2$  球面镜焦距

$k$ —系数, 负值。

$c_0$ —柱面镜的玻璃厚度

$c_1$ —平板玻璃对像的延迟量。

因此, 在 $F_v$ 、 $F_o$ 、 $K$ 已经确定的条件下, 只要适当地调整 $D_0$ 和 $K$ , 就可以实现像的重合。

在设计中, 我们选择 $F_v = 0$ 的数据片平面与图像片平面作为主光路的共轭距 (当脉冲压缩在雷达接收机中进行时,  $F_v = 0$ )。这样, 在 $F_o$ 和 $K$ 值确定的条件下, 只要按计算结果调整 $D_0$ 即可实现像的重合。

当 $F_v \neq 0$ 时, 还要向前移动数据片, 移动的距离为 $F_v$ , 实际上就是使数据片的斜距像平面与图像片平面保持共轭关系。

在结构设计中, 除了 $L_4$ 、 $L_5$ 能够独立调整外 (适应不同 $K$ 值),  $L_3$ 、 $L_4$ 、 $L_5$ 还可以整体移动, 以达到调整 $D_0$ 的目的。装载数据片的输片机也可以整体移动, 以适应不同的 $F_v$ 。后两种运动都是电动实现的。操作员坐在图像片输片机后面, 通过检焦显微镜观察两维像的重合情况, 通过调焦控制盒改变 $D_0$ 和 $K$ , 直到精确重合为止。调焦灵敏度达到 $0.03\text{mm}$ , 在系统的焦深范围以内。

### (3) 方位像倾角的校正

望远镜的成像特性是横向放大率与物体的位置无关, 纵向放大率是横向放大率的平方。根据这一特性, 如果把一个边长为 $a$ 的正方体放到我们的系统中, 经系统成像之后, 斜

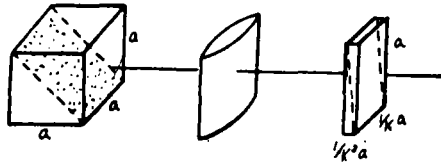


图 9

距维的边长仍为  $a$ ，方位维的边长变成  $a/k$ ，而光轴方向的边长变为  $a/k^2$ ，可见正方体对边连成的斜面角度将急剧减小，但仍不能完全直立起来。也就是说，方位维与斜距维的像面仍然没有重合起来。为此，我们有意地把数据片倾斜一个  $\theta$  角，斜距像平面的倾角也增大了一个  $\theta$  值，而方位像平面的倾角只增大了一个很小的量  $\theta/k^2$ 。当  $\theta$  角逐渐增大时，总能找到一个  $\theta$  值，使方位像平面刚好追上斜距像平面，实现两个像面的完全重合。这时有：

$$\theta = \theta' = \frac{k^2}{k_2 - 1} \text{tg}^{-1} \frac{\lambda_r}{2q\lambda_i} \quad (22)$$

至此，光学处理器已经满足了把合成孔径雷达数据片转换成图像的全部要求。

当雷达参数改变时， $k$ 、 $F_0$ 、 $F$ ，都将变动。

$k$ 、 $F_0$ 、 $F$ ，改变时，需变动  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $k_f$ 、 $D_0$ 。

只有  $F$  变动时，需改变  $k_f$ 、 $D_0$ 。

只有  $F_0$  变动时，需改变  $D_0$ 。

可以看出，这样的系统可以处理多种参数的数据片。

## 2. 输片系统

数据片和图像片输片系统的动态精度决定了光学处理器的动态分辨率。工作中，要求两个数片机以极其准确的速比 ( $k$ 值) 同步运动，把还原后的图像和图像片之间的相对运动(跟踪误差)限制到尽可能小的范围内。为此，除了对输片机的机械结构有极高的精度要求外，对控制系统也提出了非常苛刻的要求。本机采用了光栅锁相复合控制系统。以一套输片机为例，方框图如下：

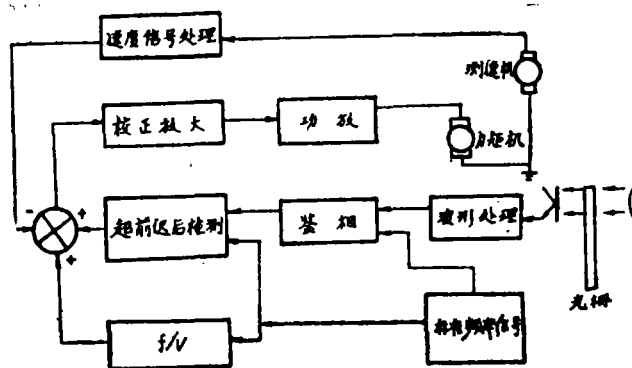


图10 输片系统方框图

力矩机、测速机和光栅是同轴安放的，该轴经过精密加工，幌动量在0.001mm以下。轴

上包裹橡胶，以增大其与胶片间的摩擦力。橡胶面也经过精密磨削，跳动量在 0.001mm 以下。

速度粗调是靠速度反馈完成的。由频率基准送出的方波信号，经  $f/v$  变换变成与频率成正比的直流电压信号，作为标准送给比较器。测速机测得的速度信号作为速度反馈信号也送给比较器，与标准信号进行比较。其差值经校正放大后推动力矩机，完成速度环路的闭合。

速度精调是靠锁相环完成的。基准信号作为相位标准信号送入鉴相器。光栅上得到的信号作为相位反馈信号也送入鉴相器。两者比较后的相位差经电路处理后送入比较器，再经校正放大后推动力矩机，校正转速，完成锁相环的闭合。

由于采用了复合控制，所以系统具有调速范围宽、精度高、响应快、抗干扰性能强等特点。

经检测，胶片运动中的抖动量在  $3.2\mu\text{m}$  以下，输片速度均匀，完全满足使用要求。

两套输片机采用两套频率基准信号，两套频率基准信号采用同一晶振，可以分别任意变频，因而能够实现任何速比。

目前所得到的结果是令人满意的，动态分辨率已达到  $60\text{ lp/mm}$ ，这在一般的调速系统中是难以实现的。

### 3. 斜距畸变校正

雷达数据片斜距方向的比例尺是以斜距计算的，然后得到的图像是以地距计算的，这种斜距与地距之间的差别叫斜距畸变，是雷达原理决定的。

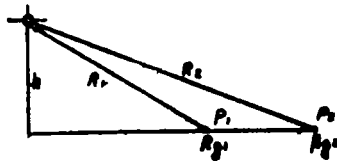


图11 雷达图像的斜距畸变

由图可见，地面上的两个点目标  $p_1$  和  $p_2$ ，在数据片上的距离为：

$$D_s = \frac{R_2 - R_1}{q} = \frac{\Delta R}{q}$$

在图像中，这两点所代表的实际地面上的距离为：

$$D_{s'} = \frac{R_{g2} - R_{g1}}{q} = \frac{\Delta R_g}{q}$$

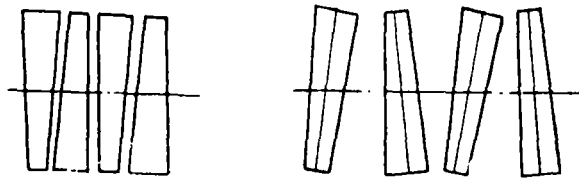
比值  $D_{s'}/D_s$  就是  $p_1$  和  $p_2$  点从斜距到地距需校正的斜距放大率  $M_s$ 。

$$M_s = \frac{\sqrt{R_2^2 - h^2} - \sqrt{R_1^2 - h^2}}{R_2 - R_1} \quad (23)$$

这样求得的是平均放大率。要完全校正，放大率应该是连续变化的，而且  $R$  越小，畸变越大。我们采用四棱镜式无光焦度系统进行这种一维校正。通常是求出每个通道的平均畸变放大率，逐个通道进行校正，而畸变最大的通道是不校正的。

所用的四棱镜校正系统如图12所示。

四块棱镜用同一机构实现同样转角，转向两两相同。每一转角对应一个放大率，两者之



放大倍率  $M_R = 1$       放大倍率  $M_R > 1$

图12 四棱镜畸变校正器

间的关系式为:

$$M_R = \frac{\cos I'_1 \cos I'_2 \cos I'_3 \cos I'_4 \cos I'_5 \cos I'_6 \cos I'_7 \cos I'_8}{\cos I_1 \cos I_2 \cos I_3 \cos I_4 \cos I_5 \cos I_6 \cos I_7 \cos I_8}$$

其中:

$$I = \delta + A$$

$\delta$ —棱镜角

$A$ —棱镜转角

#### 4. 稳光系统

HG-1型光学处理器采用He-Ne激光器作为相干光源。目前,He-Ne商品激光器的输出功率稳定性较差,长时间工作时,输出功率起伏有时高达10%,这种起伏造成图像的灰度失真,而灰度失真在遥感图像中是应该尽可能避免的。为此,我们在本机中采用了一套AOM稳光系统,使照射到数据片上的光强稳定性保持在 $\pm 2\%$ (8小时)以内。

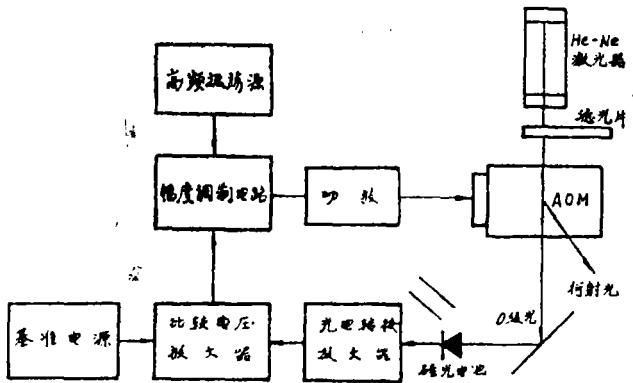


图13 AOM稳光系统方框图

上图所示系统中,滤光片用来分档减光,使达到AOM(声光调制器)的光强为激光器输出光强的5%、20%、60%、100%。使用哪一档,根据走片速度和成像狭缝的大小选定。光束经AOM发生衍射,采用0级光照明数据片。用硅光电池对0级光采样,放大与参考电压比较。得到的差值信号用来改变幅度调制器的偏压,控制AOM的输入功率,从而改变1级和0级光的分配比。当AOM的输入光强发生扰动时,系统自动增减1级光的比率,维持0级光不变,达到自动稳光的目的。

### 5. CCD记录显示系统

为了快速检查数据片的成像率、找出感兴趣的图像，并且对大范围内的目标进行概略判读，在HG-1型光学处理器中采用了CCD图像记录显示系统。在主光路中靠一个可移动的反射镜实现胶片记录和CCD记录的切换。系统方框图如下：

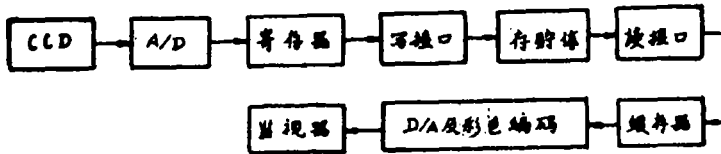


图14 CCD记录显示系统方框图

CCD是一个2048像元的线阵电荷耦合器件，沿着斜距方向放置。当光学处理器形成的图像移过CCD时，CCD以 $4\mu s$ 的周期对图像采样。采样信号经A/D变换后送入 $512 \times 512 \times 4bit$ 的动态存储体中，然后再逐行从存储体中读出，经D/A变换和彩色编码送入监视器。在监视器上可以看到连续滚动的假彩色图像。

## 四、结 语

从上面的介绍，我们可以总结出HG-1型光学处理器的几个特点。它采用了五透镜式斜平面系统，可在较大范围内变换 $k$ 值；光学系统相对孔径 $1:10.5$ ，经严格的像差校正和精密加工装调，有较高的分辨率；输片机有较大的调节范围，能够安放 $9.5''$ 、 $5''$ 和 $70mm$ 的数据片，既可处理在雷达接受机中进行脉冲压缩的数据片，也可处理光学脉冲压缩的数据片；输片系统采用光栅锁相复合调速系统，有较大的调节范围，可在各种 $k$ 值下保证精确的跟踪；处理器输出的图像既可用胶片记录，也可用CCD记录，进行数字存贮、假彩色显示，快速、直观、而且便于对图做进一步的数字处理；对入射光强和光分布进行实时监测，并且用AOM稳光，降低了图像的灰度失真；入射光强、走片速度和成像狭缝可按要求调整，保证系统有足够大的动态范围；装备有四棱镜校正系统，可进行地距—斜距的一维几何校正；方位和斜距电动调焦，操作方便；主要工作部件安放在气浮平台上，抗震性能好。

这些特点，使得HG-1型光学处理器能够用来处理国内外各种单通道或多通道的合成孔径雷达信号。

### 参 考 文 献

- [1] 李品新, 光学机械, 1983. No. 1
- [2] Jensen et, al, 科学, 1978 No.4
- [3] E. Leith et, al., Trans, vol. AES-4 No.6
- [4] A. Kozma et, al., A. O., 11 No 8
- [5] D. Psaltis et, al., Opt. Eng., 21 No.5

## Optical Processor for SAR

Zhang Xianying Hu Jiasheng Yu Qianyang Cao Renfa

### Abstract

In this paper the operation principle of the optical processor for SAR and its essential components are described. This optical processor is developed by Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics. The advanced techniques used for the processor are discussed briefly.