

# 合成孔径雷达光学处理器的光学系统

胡家陞 董玉芝

**摘要：**本文论述了合成孔径雷达光学处理器的基本原理及特点，着重描述了光学处理器的光学系统。同时给出了该系统的设计方法和一些要考虑的问题。

## 一、绪 言

我们知道，光学系统的角分辨率为  $\beta_s = \lambda/D$ ，其中  $\lambda$  为所使用的光波长， $D$  为光学系统的口径。对于雷达系统，它的角分辨率表达式跟光学系统一样，即  $\beta_r = \lambda_r/D_r$ ，式中  $\lambda_r$  为所使用的雷达波长， $D_r$  是雷达天线的有效长度。通常，微波雷达所使用的波长为几个厘米，它比光波长要长 5—6 个数量级，因此在相同的口径下，雷达的角分辨率要远远低于光学系统的分辨率。要想使二者的分辨率相当，就需要几公里长的天线，在目前的工艺水平条件下，这实际上是不可想象的。

然而，可以使用由许多小天线组成的天线阵列，如图 1 所示。被阵列中的每个小天线接

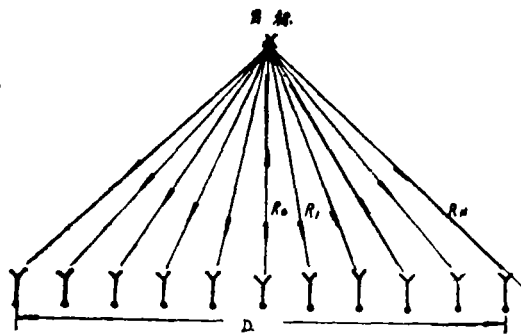


图 1 由一些小天线构成的天线阵列

收到的返回信号进行相干迭加记录。每个小天线所引起的固定相位延迟可以消除。这种相干记录的结果，就可以获得窄的波束。这种由小的天线构成的天线阵列就起到一个大天线的作。这就是合成孔径的基本概念。同样，这个概念也可以应用于时间分布的天线阵列。也就是说，并不需要每个小天线同时存在于其本身应处的位置。仅需一个小天线就可以了，它顺序地出现在该阵列的每一个位置。为了满足这一要求，可把带有小天线的雷达系统安装在运动的飞机或空间载体上。当飞机按预定的航线飞行时，在一定的时间间隔内，小天线依次出现在每一位置处，同时它发射编码脉冲信号和接收由地面返回的信号，经由相干叠加记录和预处理之后，被输送到阴极射线管（CRT）中，使其控制 CRT 扫描点的强度和位置，用照相机把 CRT 荧光屏上的运动图样记录在按一定速比运动的胶片上，这就得到了雷达数据片。这

种雷达数据片实际上是一种准全息图, 因为记录方式是全息式的, 即用参考信号和返回信号进行相干叠加记录的<sup>[1][2]</sup>。

这种雷达系统的合成孔径长度刚好等于天线每次发射的微波所照射的地面在运动方向的长度, 也就是说,  $L = \beta R$ 。可以导出, 合成孔径雷达的方位线分辨率为  $\Delta x = D_r/2$ , 式中  $D_r$  为机载天线的长度<sup>[3]</sup>。由此我们知道, 方位线分辨率与斜距  $R$  无关。

当雷达数据片用相干准直的激光束照射时, 会出现两组焦平面。一组是虚、实两个方位焦平面, 另一组是两个虚、实距离焦平面。在通常情况下, 它们是相互分离的。方位焦距  $f_a$  和距离焦距  $f_r$  分别为:

$$f_a = \pm \lambda_r R / 2p\lambda_i$$

$$f_r = \pm \frac{c^2}{4q^2\lambda_r\gamma} \quad (1)$$

式中  $p, q$  分别为方位比例因子和斜距比例因子,  $\lambda_r$  为所使用的雷达波长,  $\lambda_i$  为光波长,  $R$  为斜距,  $\gamma$  为线性调频速率 (我们假定发射的是线性调频编码信号)。

我们用简明的数学推导来说明合成孔径雷达的成像过程。假定一个机载天线发射的信号为:

$$f(t) = a(t) \exp j 2\pi \left( f_c t + \frac{\gamma}{2} t^2 \right) \quad (2)$$

式中  $a(t)$  为发射信号的幅值,  $f_c$  为发射信号的中心频率, 由地面目标返回的信号为

$$g_r(t) = \sigma_r \left( t - \frac{2R}{c} \right) \exp j \left[ 2\pi f_c \left( t - \frac{2R}{c} \right) + \pi \gamma \left( t - \frac{2R}{c} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$= \overline{a} \left( t - \frac{2R}{c} \right) \exp j \left[ 2\pi f_c t - \frac{4\pi R_c}{\lambda_r} - 2\pi (x - x_0)^2 / (\lambda_r R_c) + \left( t - \frac{2R}{c} \right)^2 \right] \quad (4)$$

方程 (4) 中的符号在图 2 中予以说明。在上方程中, 采用了如下的近似表达

$$R = R_c + \frac{(x - x_0)^2}{2R_c}$$

在方程 (4) 中,  $4\pi R_c / \lambda_r$  是常数相位项, 可以把它归入  $\overline{a} \left( t - \frac{2R}{c} \right)$  中。这样一来, 方程 (4) 变为:

$$g_r(t) = \overline{a} \left( t - \frac{2R}{c} \right) \exp j 2\pi f_c t \cdot \exp -j 2\pi \frac{(x - x_0)^2}{\lambda_r R_c}$$

$$\exp j 2\pi \left( t - \frac{2R}{c} \right)^2 \quad (5)$$

当把信号记录到胶片上时, 要相应地做如下的坐标变换。

$$f_c \rightarrow f_1, \quad x \rightarrow x_1, \quad R \rightarrow r_1$$

$$p = \frac{x}{x_1}, \quad q = \frac{(R_{max} - R_{min})}{r_1} \quad (6)$$

其中 $f_1$ ,  $x_1$ ,  $r_1$ , 等均为胶片上的相应坐标。把方程(6)代入方程(5)中, 我们可以得到

$$g_r(t) = \bar{a} \left( t - \frac{2R}{c} \right) \exp j 2\pi f_1 \cdot t \cdot \exp -j 2\pi p^2 \frac{(x-x_0)^2}{\lambda_1 R} \cdot \exp j 4\pi \gamma q^2 r_1^2 / c^2 \quad (7)$$

我们知道, 光学透镜引起的相位变换为<sup>[4]</sup>

$$\exp(jk\Delta \cdot n) \cdot \exp\left(-j\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda_1 \cdot f}\right) \quad (8)$$

式中 $\Delta$ 为透镜中心厚度,  $n$ 为玻璃材料折射率,  $K = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $f$ 为透镜的焦距。

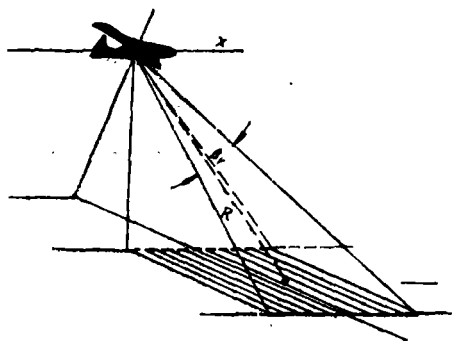


图2 时间分布天线阵列的几何关系

比较方程(7)和(8), 我们可以看到, 雷达数据片具有聚焦特性, 且很容易计算出它们的焦距长度。方位维的焦距为

$$\pi / \lambda_1 \cdot f_0 = 2\pi p^2 / \lambda_1 \cdot R$$

$$f_0 = \pm \frac{1}{2p^2} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_1} \cdot R \quad (9)$$

斜距维的焦距为

$$\frac{\pi}{\lambda_1 \cdot f_r} = 4\pi \gamma q^2 / c^2$$

$$f_r = \frac{c^2}{4q^2 \gamma \cdot \lambda_1} \quad (10)$$

## 二、光学处理器的基本要求

我们知道, 机载或星载的合成孔径雷达所记录的数据片是一种准全息图, 也就是说, 它是地面上多个散射点目标所形成的菲涅尔带板的综合效果。如果数据片被准直相干光束照明, 就会形成两对分离的焦平面。由方程(9)和(10)可以看出 $f_0$ 和 $f_r$ 不会相等, 而且方位焦距长度正比于斜距 $R$ 。它所形成的实焦面和虚焦面是倾斜的, 如图3所示。这样一来, 用于处理合成孔径雷达数据片的光学处理器至少必须满足下述三个条件<sup>[5]</sup>, 即

(1) 把倾斜的方位焦平面直立起来;

(2) 使直立后的方位焦平面同斜距焦平面重合起来,

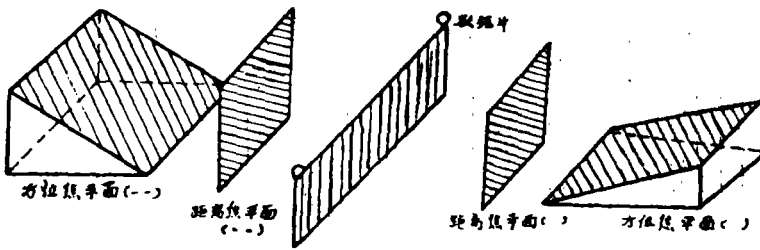


图3 雷达数据片的聚焦特性

(3) 能够校正记录数据的纵横比。也就是说, 在处理器中, 斜距维的放大率等于1, 而方位维的放大率为 $1/K$ ,  $k = q/p$ 为纵横比。

处理器还应该满足的条件是, 它能处理具有不同参数的雷达数据片。

目前, 光学上主要有两种处理雷达数据片的方法, 第一种处理器由圆锥透镜、圆柱透镜和球面透镜组成。圆锥透镜把方位焦面的像成在无穷远处, 而圆柱透镜把斜距焦面成在无穷远处。最后, 球面透镜把二维无穷远的焦平面成在球面透镜的后焦面上, 如图4所示。该系统成像质量不高, 不能实时跟踪, 畸变较大, 目前已很少采用。

第二种光学处理器称之为斜平面光学处理器, 主要由两组望远镜系统组成。这在下面详细讨论。

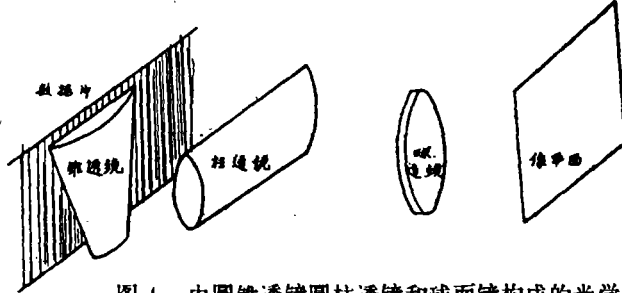


图4 由圆锥透镜圆柱透镜和球面镜构成的光学处理器

### 三、五透镜斜平面光学处理器

这种处理器是目前广泛采用的方法<sup>[6]</sup>。它主要由两组望远镜系统组成, 具有相同焦距的两个球面镜构成一倍望远镜。具有不同焦距长度的柱面透镜构成一个变形方位望远镜。这两大部分构成一个五透镜斜平面处理器, 使得该系统能处理具有不同参数的雷达数据片。对于图5所示的五透镜处理器, 可以导出下面的方程组。

$$q_r = (2 + k) f_1 + f_r + C_0 \tag{11}$$

$$d_2 = (-K f_4 f_5) / f_3 \tag{12}$$

$$d_1 = f_4^2 / d_2 \tag{13}$$

$$K = f_3 d_2 / (f_4 f_5) \tag{14}$$

$$q_s = f_5^2 / d_2 + (f_1 + k f_1 + f_s + d_0) K^2 + f_s \tag{15}$$

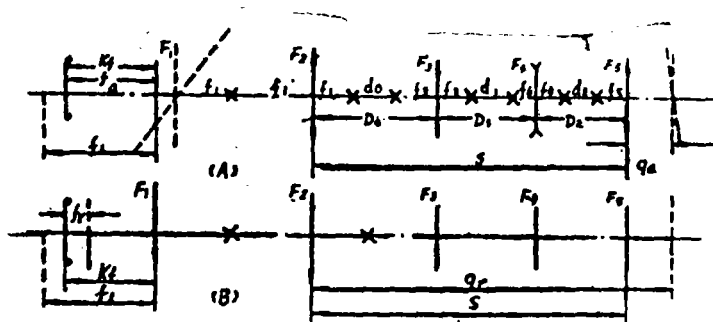


图5 五透镜斜平面光学处理器

(A)方位维 (B)斜距维

$$D_1 = f_3 + d_1 + f_4 \tag{16}$$

$$D_2 = f_4 + d_2 + f_5 \tag{17}$$

$$D_0 = (2+k) f_1 + [K^2 (f_r + C_0 - D_1 - D_2)] / (K^2 - 1) - [K^2 f_5 (f_5 + d_2)] / d (K^2 - 1) - (f_5 + f_3) / (K^2 - 1) \tag{18}$$

$$S = D_0 + D_1 + D_2 \tag{19}$$

$$k = K^2 f_5^2 / [f_1 d_2 (K^2 - 1)] + (f_1 + f_5 - d_0) / [f_1 (K^2 - 1)] + K^2 (f_5 - 2f_1 - f_r - C_0 + S) / [f_1 (K^2 - 1)] \tag{20}$$

式中  $C_0$  是因柱面镜的玻璃厚度引起的斜距维像面移动，公式组中其它符号如图5所示。由上面的方程组可以看到， $f_r$  和  $f_5$  是雷达数据片的参数，是已知的。只要预先选择  $f_1 = f_3$ ， $f_3$ ， $f_4$ ， $f_5$ ， $K$ ，就可以求出设计处理器所必需的参数。要想获得最佳的一组参数，就要进行多次反复试验。

#### 四、光学处理器设计的若干考虑

合成孔径雷达系统的成像过程是十分复杂的。目前有多种方法解释其成像过程。如多通道相关、全息术、反射式层析术等。我们认为全息术方法解释得比较清楚，也易于理解。按照全息术观点，光学处理器的作用是从雷达数据片重构出地面图像。在设计处理器的过程中，必须考虑下面的一些问题。

##### (1) 数据片的相对孔径。

数据片的相对孔径为  $L/f_r$ ，式中  $L$  是数据片上的合成孔径长度。<sup>[1]</sup>在设计光学处理器的时候，处理器在方位维的相对孔径应等于或大于数据片的相对孔径，以便收集到数据片上的尽可能多的信息。图6说明了数据片在方位维的相对孔径。

##### (2) 方位维和斜距维相对孔径的匹配。

实际上，该光学处理器是一种二维独立地成像系统。但方位维中的数值孔径应该与斜距维的数值孔径相匹配，即二者尽可能相等，以便在二维中获得相同的分辨率，如图7所示。

##### (3) 光阑位置考虑

在光学设计中，光阑位置通常是校正像差的参数之一。适当的光阑位置会降低甚至校正轴外像差。然而，在该处理器中，光阑必须放在1倍球面望远镜的公共焦面上。其理由在于，当数据片被准直相干光束照明时，在第一个球面透镜的后焦面处会形成数据片的频谱。

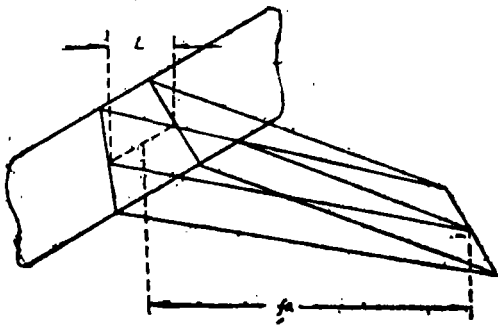


图6 数据片的相对孔径

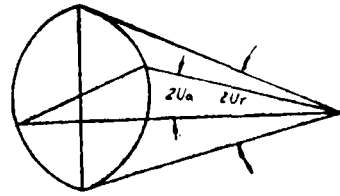


图7 方位维和斜距维中数值孔径的匹配

为了消除杂光和非成像光束，零级谱和负一级谱常常被滤掉。因此光阑被固定在球面望远镜的公共焦面处，图8说明了这种情况。

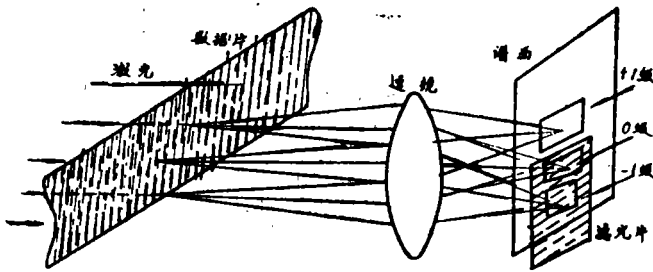


图8 光学处理器的光阑位置

(4) 成像光束的限制。

我们很容易求出合成孔径长度，它等于  $L = \lambda R / (D \cdot P)$ 。很显然， $L$  随  $R$  而变化。因此，成像光束的剖面为一梯形，如图9所示。但在出瞳处却刚好为一矩形，为了在不同的斜距下保持相同的数值孔径，并消除杂光，有时还为了便于改变相对孔径大小，在此位置处安放一个矩形光阑是很有必要的。光阑到最后一组柱透镜的距离是不变的，即使在倍率变化时也是如此，这对我们是很有好处的。

(5) 准直光束口径的选择。

我们知道，激光器发出的光强是高斯分布的，经过扩束器扩展后，其准直光束的光强仍然是高斯分布的。为了使照射在数据片上的有效孔径上的光强均匀，要使扩束后的准直光束口径大于数据片的口径。在我们的处理器中，扩束后的光束口径比有效口径要大四分之一左右。实践证明，这样做是合理的。

(6) 斜距畸变的校正。

由于雷达发射的信号波对地面来说是倾斜的，因此在斜距维会引起固有的畸变。这种畸

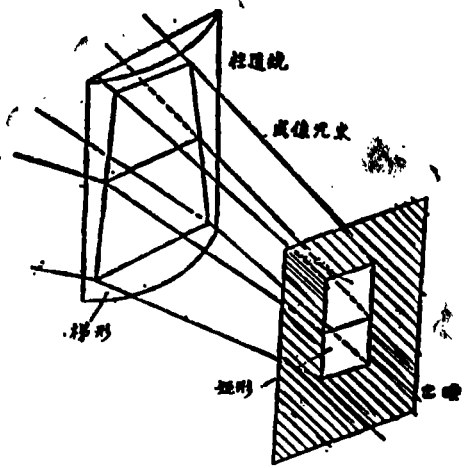


图9 成像光束的剖面图

变很大，必须予以校正。我们设计了由4个折射棱镜组成的斜距畸变校正系统。关于斜距畸变的校正，我们有专文论述，<sup>[8]</sup>这里就不赘述了。

综上所述，合成孔径雷达光学处理器是十分复杂的光学系统。必须认真仔细予以考虑，否则会出现原理及概念上的错误。

基于以上的设计思想和考虑，我们研制成功了斜平面五透镜式光学处理器。它主要由He-Ne激光光源、光束扩展器、反射镜系统、斜距畸变校正系统、1倍球面望远镜、变倍柱面望远镜等部份组成，如图10所示。该处理器经过检测和实际使用，在1:10万比例尺下，地面分辨率可达1.7米，图象清晰，可达几百个灰度等级。处理后的四通道图象片，镶嵌得相当好。这充分表明，我们在设计中考虑的一些问题和提出的某些新思想是完全正确的。

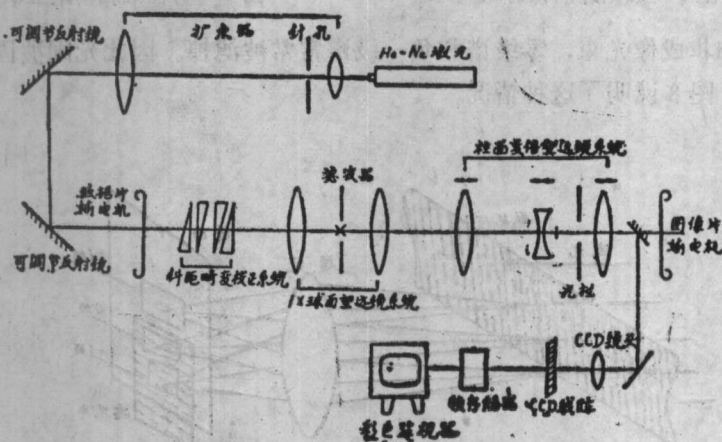


图10 斜平面光学处理器结构示意图

参 考 文 献

[1] E. N. leith and A. L. Ingalls, Applied Optics, 7, No. 3 539 (March, 1968)

[2] E. N. leith, Proceedings of IEEE, 59, No. 9, 1305 (1971)

[3] L. J. Cutrona, et. al, IRE Transaction on Military Electronics 127 (1961)

[4] G.W. 顾德门, 傅立叶光学导论, 科学出版社 (中译本), 1978

[5] Hu Jia-sheng, ICO-13 Conference Digest 602 (1984)

[6] A. kozma et al, Applied optics, 11, No 8 1766(1972)

[7] Wai-Hon. Lee et al, Applied Optics, 13, No. 4 925 (1974)

[8] 胡家陞, 曹任法, 张宪英, "合成孔径雷达图像斜距畸变的校正", 光学机械, 1986年第3期 pp 1~6

## Optical System of Processor for SAR

Hu Jiasheng Dong Yuzhi

### Abstract

The basic principle and some characters of optical processor for synthetic aperture radar (SAR) are dealt with in this paper. The emphasis in the paper is put on optical system of the processor. Design methods of the optical system are given and some noteworthy problems in the design are also considered in the paper.