

斜平面光学处理器的高斯光学

李 品 新

摘要 本文从数据片特性出发,叙述了斜平面光学处理器的原理,并为实现此原理而推导出用于这类光学装置的二组球面望远镜和二组柱面望远镜相叠合及二组球面望远镜和三组柱面望远镜相叠合的高斯光学计算公式。且编成程序,为确定光学系统参数,合理选择每组透镜焦距和间隔,提供了方便。

一、引 言

斜平面光学处理器是处理综合孔径侧视雷达数据片用的光学装置。利用雷达成像作为侦察和测绘的工具,既不受气象条件限制,又可不分昼夜地掇取离飞机一侧数十公里远的地面图象,且由于人为目标如房屋、桥梁、车辆等物对无线电波的反射比地面及植物对无线电波的反射要强烈,因此在雷达图象中能比较明显地观察到许多人为目标。本文从数据片特性出发,叙述了斜平面光学处理器的原理,并为实现此原理而推导出用于这类光学装置的二组球面望远镜和二组柱面望远镜相叠合及二组球面望远镜和三组柱面望远镜相叠合的高斯光学计算公式。且编成程序,为确定光学系统参数合理选择每组透镜焦距和间隔提供了方便。

二、数据胶片特性

图1表示了飞机带一侧视雷达小天线,沿着平行于地面的直线轨道,作等速等高飞行。飞行方向为方位维,与飞行方向正交的方向为距离维。在新型的综合孔径侧视雷达中,航向

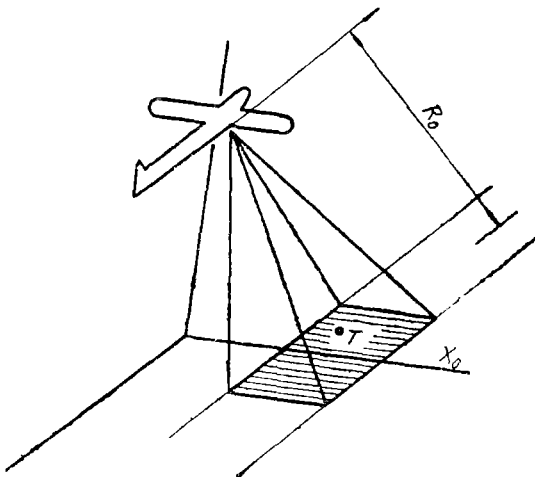


图 1

采用合成孔径波束锐化技术,距离向采用线性调频技术来获得数据片。其特性如下:

(一) 数据片上记录的是目标回波的多普勒频率和相调制。每一点散射体都形成两个正交方向的菲涅耳波带片,多物目标即形成许许多多的同心椭圆组。这些椭圆群的主轴 L_{ns} 和付轴 L_{nc} (单点在数据片上的合成孔径长度) 随记录平面 Y_n 而改变 (如图 2)。

(二) 数据片可以看作菲涅耳波带片,具有光学透镜的聚焦特性,且二个方位的聚焦值不同。

方位维的焦距是:

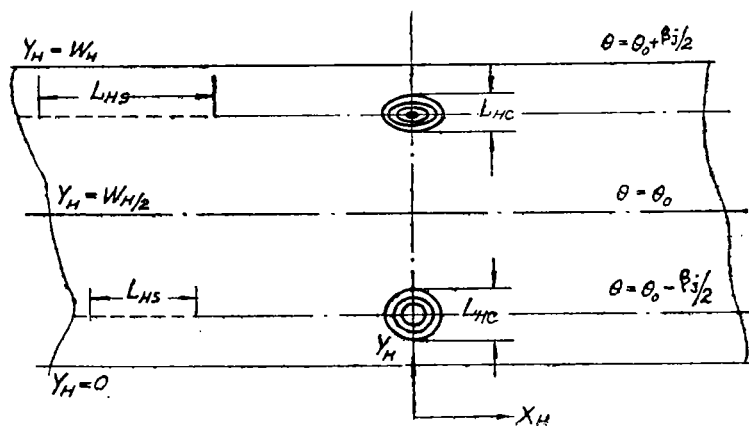


图2 脉冲压缩合成孔径微波全息示意图

$$f_m = \pm \left(-\frac{1}{2p^2} \right) \left(\frac{\lambda_r}{\lambda_L} \right) R_0 \quad (1)$$

其中 p 是方位维坐标缩尺因子。

λ_r 是雷达信号的波长。

λ_L 是重现过程的波长。

R_0 是散射体到雷达的距离。

距离维的焦距是：

$$f_r = \pm \left(\frac{\pi C^2}{q^2 \lambda_L S} \right) \quad (2)$$

其中 q 是距离维坐标缩尺因子。

S 是线性调频率。

C 是雷达信号的传播速度。

由公式(1)知 f_m 与 R_0 成比例，所以在准直相干光源照射下，所有信号变化过程的焦点的轨迹是两个平面，这两个轨迹平面相对于数据片平面来说是倾斜的。一个平面是波带片信号的负焦距产生的虚像，另外一个平面是信号的正焦距产生的实像。随着飞行条件的改变， f_m 值改变，聚焦平面的倾斜度亦改变。而由公式(2)知 f_r 与 R_0 无关，因此在准直相干光照射下，距离维的正负两个焦点的轨迹平行于数据片。如图3。

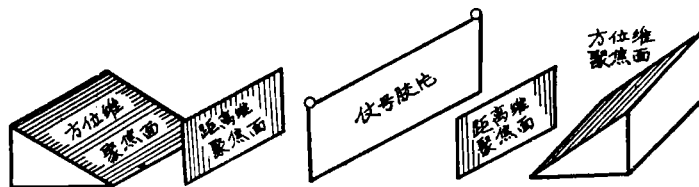


图3 信号胶片和它的实像虚像

(三) 在全息图上二个方向的压缩比不等，在方位向数据片坐标是伸长的，这样方便于处理。

(四) 两个方向的分辨要求应相等。

三、斜平面光学处理器的原理

如前所述，数据胶片在准直相干光源照射下出现二个距离维的聚焦平面和二方位维的聚焦平面，并且方位维的二个聚焦平面是倾斜的。斜平面处理器光学系统就是使其中任一方位维的聚焦平面与任一距离维的聚焦平面相互重合，并减小方位维的倾斜度，使方位轨迹和距离轨迹发生在一起，经过曝光，还原地貌。因此，斜平面光学处理器光学系统是以望远系统的特性为基础的。子午和弧矢二个截面都各自成为倍率不同的望远系统。

(一) 利用了望远镜系统的横向放大倍率对物体位置无关的特性，即不论物点在何处，其放大倍率都是一样的。

(二) 利用了望远系统的纵向放大率是横向放大率的平方特性。

如有一个立方体，通过望远系统成像，当其像的纵向压缩大于其横向压缩时，就可以减小内接斜平面的倾斜度。如前所述，方位维的聚焦平面是倾斜的，恰好利用这一特性使方位维的聚焦平面的倾斜度减小。为此，只须使方位维的望远倍率/距离维的望远倍率 <1 即有可能实现。通常，令方位维的倍率等于数据片纵横压缩比的倒数即 $\frac{1}{K}$ ，而令距离维的倍率等于1，这样，就使方位维聚焦平面的倾斜度减小了 K^2 倍，对于方位维聚焦平面残留的倾斜度，可用把数据胶片倾斜按放的方法来校正。此时，方位维聚焦平面与距离维聚焦平面的倾斜度向同一方向增大，但由于方位维聚焦平面的斜率增加的因子是与 $\frac{1}{K^2}$ 成比例的，而距离维聚焦平面的斜率增大是与数据片同步的，所以，当倾斜数据胶片时距离维聚焦平面的斜率的增大大于方位维聚焦平面的斜率的增加，因此，当数据片倾斜至某一角度时恰好使两个倾斜度不等的聚焦平面成为具有相同斜度且斜度不大的二个聚焦平面（如图4）。欲使此二聚焦平面在距离上叠合，调节二个望远镜之间的间隔 D_0 即可。

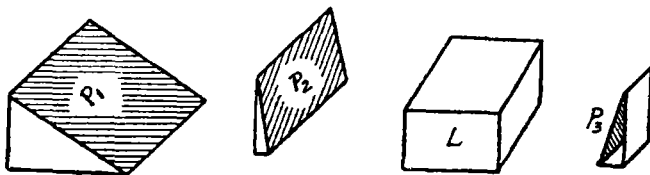


图4

为达上述目的，必须采用球面望远镜与柱面望远镜的重叠，或柱面望远镜与柱面望远镜的叠合。为使斜平面处理器能处理由各种雷达参数所获得的数据胶片，则需把方位维光学系统的光学性质作成变倍系统。

四、斜平面处理器的高斯光学

为使光学系统在子午和弧矢二个方向都成为望远系统，在距离维采用了一倍球面镜望远系统，在方位维是一倍球面镜望远系统和若干倍的柱面镜望远系统的重叠，因此，首先要使透镜组排列组合成望远系统。

1. 二组透镜组成望远镜的条件是第一组透镜的后焦点与第二组透镜的前焦点重合, 即 $d = 0$
此时:

$$M_n = -\frac{f_2}{f_1}$$

$$M_x = \left(-\frac{f_2}{f_1}\right)^2$$

$$Z_i = \left(-\frac{f_2}{f_1}\right)^2 Z_o$$

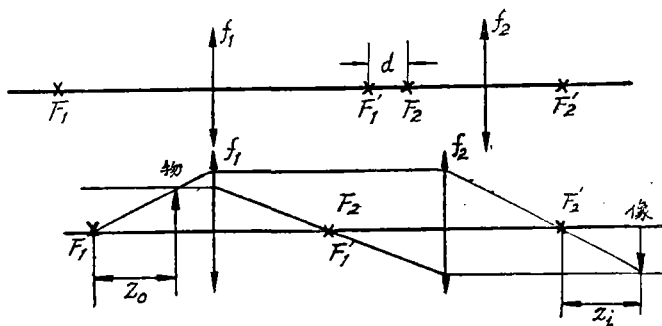


图 5

2. 三组透镜组合排列成望远镜系统的条件是 f_1 透镜组的后焦点到 f_2 透镜组的前焦点之间的距离 d_1 与 f_2 透镜组的后焦点到 f_3 透镜组的前焦点之间的距离 d_2 的乘积要等于第二组透镜组焦距的平方。即 $f_2^2 = d_1 d_2$ 。

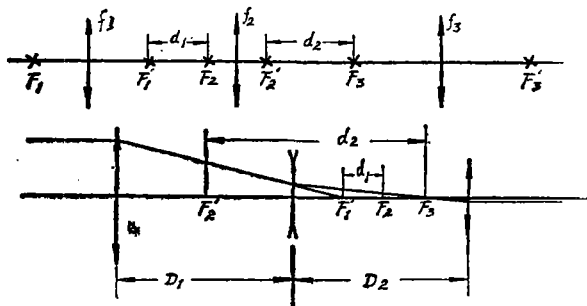


图 6

此时:

$$M_n = -\left(\frac{f_2 f_3}{d_2 f_1}\right)$$

$$M_x = \left(-\frac{f_2 f_3}{d_2 f_1}\right)^2$$

物像关系

$$Z_i = \frac{f_3^2}{d_2} + \left(\frac{f_2 f_3}{d_2 f_1}\right)^2 Z_o$$

当连续改变 d_1, d_2 可以获得变焦系统。

3. 二组球面望远镜和二组柱面望远镜的叠合。

距离维和方位维互相垂直, 由于这二维所形成的波带片焦距不等, 所以光学系统的任务就是使二个物面成像在一个像面上。

(1) 距离维: 通常距离维取为由二组球面镜组成的一倍望远镜系统。

则有

$$f = f_1 = f_2$$

$$Z_{ir} = f + f_r + kf,$$

$$Z'_{ir} = f + f_r + kf + c_1,$$

$$l'_{ir} = Z'_{ir} + f = 2f + f_r + kf + c_1$$

其中 k 是比例因子。

l_{ir} 是像点至 f_2 球面镜主面的距离。

c_1 是把柱面镜看作平板, 光线通过平板后延伸的距离。

f 在数据片左为负值, 在右为正值。 k 为负值, 其余符号意义如图示。

(2) 方位维:

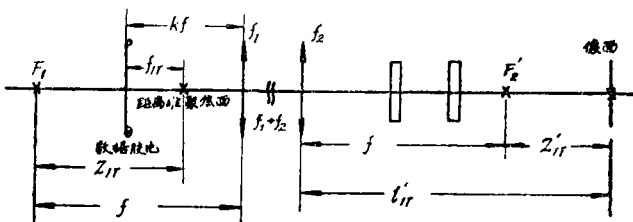


图 7

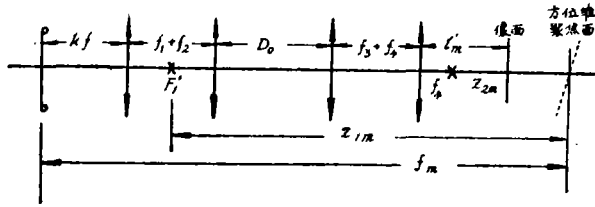


图 8

数据胶片在方位维的聚焦平面不仅通过一倍球面望远系统，还通过柱面镜望远系统，使与距离维聚焦平面通过一倍望远镜系统以后的像面重合。并使由柱透镜构成的望远系统的放大率等于数据胶片纵横比 K 的倒数，这样方位维的聚焦像面的倾斜度可减小

K^2 倍。下面推导当给定系统各组透镜焦距值后距离维和方位维聚焦像面重合时 k 和 D_0 之间的关系式，以便任意选择 k 值后即可确定 D_0 值，从而完全确定斜平面处理器的高斯光学。

$$Z_{1m} = f + f_m + kf,$$

$$Z'_{1m} = f + f_m + kf,$$

$$\text{令 } \frac{f_4}{f_3} = \frac{1}{K},$$

$$f_3 = Kf_4,$$

$$\begin{aligned} Z_{2m} &= Z'_{1m} - (D_0 - f_3) + f \\ &= 2f + f_m + kf - D_0 + f_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z'_{2m} &= \left(-\frac{1}{K}\right)^2 Z_{2m} \\ &= \frac{1}{K^2} (2f + f_m + kf - D_0 + f_3), \end{aligned}$$

$$l'_{2m} = \frac{1}{K^2} (2f + f_m + kf - D_0 + f_3) + f_4.$$

$$\text{又 } l'_{2m} = l'_{1r} - (D_0 + f_3 + f_4 + C_0).$$

$$\begin{aligned} \therefore \frac{1}{K^2} (2f + f_m + kf - D_0 + f_3) + f_4 \\ = 2f + f_m + kf + C_1 - D_0 - f_3 - f_4 - C_0 \end{aligned}$$

整理后得：

$$k = \frac{f_m}{f(K^2 - 1)} - \frac{f_r K^2}{f(K^2 - 1)} + \frac{Kf_4(1 + K)^2}{f(K^2 - 1)} + \frac{D_0}{f} + \frac{(C_0 - C_1)K^2}{f(K^2 - 1)} - 2.$$

式中 K 是柱面望远镜倍率。

D_0 是二组望远镜之间距离。

C_0 是各组柱面镜物方主面与像方主面间隔之和。

l'_{2m} 是像面到柱面镜 f_4 之距离。

4. 二组球面镜组成望远镜与三组柱面镜组成的望远镜的叠合。推导方法与 3 同，为减小系统像面弯曲，在三组柱面镜中采用了一组负透镜。并为计算方便起见把推导出来的结果排成程序。

输入数据是：

K_0 变化倍率起始值。

ΔK 每隔 ΔK 计算一倍率。

K 倍率终止值。

f 球面镜组焦距。

f_3, f_4, f_5 柱面镜组焦距。

f_m 数据片方位维焦距。

f_r 数据片距离维焦距。

C_1 经平板后延伸的长度。

C_0 柱透镜主面间隔之和。

k 比例因子。

计算公式组是：

$$d_2 = -f_4 f_5 K / f_3,$$

$$d_1 = f_3^2 / d_2,$$

$$D_1 = f_3 + d_1 + f_4,$$

$$D_2 = f_4 + d_2 + f_5,$$

$$D_0 = f(k+2) - \frac{f_5 K^2 (f_5 + 2d_2)}{d_2 (K^2 - 1)} - \frac{f_m}{K^2 - 1} + \frac{f_r K^2}{K^2 - 1} \\ - \frac{f_3 (K^2 + 1)}{K^2 - 1} - \frac{K^2 (d_1 + d_2 + 2f_4 + C_0 - C_1)}{K^2 - 1}.$$

$$l'_{2m} = \frac{f_5^2}{d_2} + \frac{1}{K^2} (f_m + 2f + kf + f_3 - D_0) + f_5.$$

$$l'_{1r} = f_r + 2f + kf + C_1.$$

$$l'_{2m} = l'_{1r} - D_0 - D_1 - D_2 - C_0.$$

输出打印的是：

$K, d_1, d_2, D_0, D_1, D_2, l'_{2m}, l'_{1r}.$

若算出 D_0 为负值即终止计算。

式中 d_1 是柱透镜 f_3 的后焦点到 f_4 的前焦点的距离。

d_2 是 f_4 的后焦点到 f_5 的前焦点之间的距离。

D_1 是 f_3 的后主面到 f_4 的前主面之间的距离

D_2 是 f_4 的后主面到 f_5 的前主面之间的距离。

D_0 是球面镜 f_2 的后主面到柱面镜 f_3 的前主面之间的距离。

运用上列程序可以很方便地进行计算，改变各组焦距值，可以求得不同的高斯解，比较各组解以选择满足使用要求的较为合适的解。下面我们列出三表均为运用上列程序计算而求得解：

表1 令 $K = 3 \sim 25$ $f_r = 0$

$$f_m = 4250 \text{ 毫米} \quad k = -0.2$$

$$f = f_1 = f_2 = 750 \text{ 毫米}$$

$$f_3 = 250 \text{ 毫米} \quad f_4 = -40 \text{ 毫米}$$

$$f_5 = 75 \text{ 毫米}$$

$$C_1 = 38.987 \text{ 毫米} \quad C_0 = 43.0216 \text{ 毫米}.$$

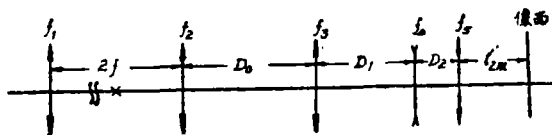


图9

表 1

K	d_1	d_2	D_0	D_1	D_2	L'_M	L'_R
3	44.4444	36	156.68	251.41	71	863.84	1388.99
4	33.3333	48	492.61	243.33	83	527.02	1388.99
5	26.6667	60	637.03	236.67	95	377.27	1388.99
10	13.3333	120	795.21	223.33	155	172.42	1388.99
15	8.8889	180	783.31	218.89	215	128.77	1388.99
20	6.6667	240	743.09	216.67	275	112.46	1388.99
25	5.3333	300	693.63	215.33	335	102.0	1388.99

表 2 令 $f_r = 125$ 毫米, $k = -0.36666$

其他计算输入值与表 1 同。

表 2

K	d_1	d_2	D_0	D_1	D_2	L'_M	L'_R
3	44.4444	36	172.30	254.44	71	848.22	1388.99
4	33.3333	48	500.94	243.33	83	518.69	1388.99
5	26.6667	60	642.24	236.67	95	95	1388.99
10	13.3333	120	796.47	223.33	155	171.16	1388.99
15	8.8889	180	783.87	218.89	215	128.21	1388.99
20	6.6667	240	743.41	216.67	275	110.89	1388.99
25	5.3333	300	693.83	215.33	335	101.80	1388.99

表 3 令 $f_m = 6000$ 毫米, $f_r = 250$ 毫米, $k = -0.533333$

其余输入值同表 1。

表 3

K	d_1	d_2	D_0	D_1	D_2	L'_M	L'_R
3	44.4444	36	负值	254.44	71	/	/
4	33.3333	48	392.61	243.33	83	627.02	1388.99
5	26.6667	60	574.53	236.67	95	439.77	1388.99
10	13.3333	120	780.06	223.33	155	187.57	1388.99
15	8.8889	180	776.61	218.89	215	135.47	1388.99
20	6.6667	240	739.33	216.67	275	114.96	1388.99
25	5.3333	300	691.23	215.33	335	104.40	1388.99

从图(10)及上列表格可以看到,为满足飞行时不同的 K 值,须把柱面镜系统进行变焦,于是柱面镜 f_4, f_5 均须各自移动,也就是改变 D_1 及 D_2 。又由于飞行条件改变后, f_r 及 f_m 也改变了,这就意味着对于光学系统来说,二个方位的聚焦平面是变化的。此时为保证系统共轭距不变,且便于调整,当 f_r 改变时,可移动数据胶片位置,即令 k 值改变,而使距离维形成的聚焦平面离光学系统的距离 l_{r1} 不变如图11所示。这样就保持了 l_r 不变。可是方向维聚焦平面离光学系统的距离 l_m 改变了,为了使数据片移动后的两个聚焦面的像面能重合,则必须改变 D_0 ,亦即整体移动柱面望远镜,这和 f_m 改变后须移动 D_0 的作用同样。在运动过程中各透镜组之间的间隔必须使透镜互不相碰,如遇负值,必须变更某组焦距值重新求解,直到满足 f_r, f_m 及 K 值的变化范围为止。利用上列程序可迅速而方便地确定系统各组焦距及间隔。

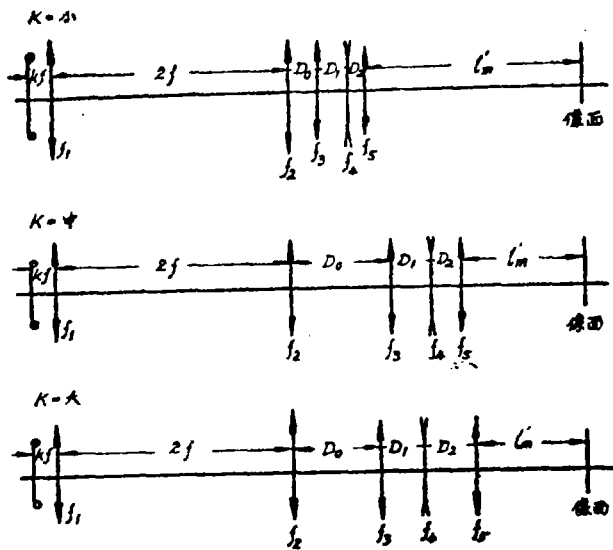


图10

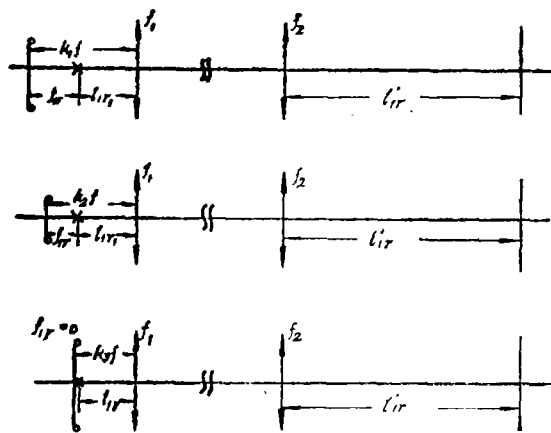


图11

上列程序由蒋筑英同志编制,在此感谢。

参 考 文 献

- [1] 沈光铭, 电子学通讯, 1978, 总46~47期, 21.
- [2] A. Kozma, etd. Appl. Opt., 11, No.8, 1972, 1766.