

SAR数据胶片的相干光学模拟

金友、蒲泽民

提要：我们推导了点目标综合孔径雷达(SAR)数据胶片的数学表达式，并用马赫——珍德干涉系统模拟了这个运算。由于在实验中解决了精确测定偏置角的困难，取得了较好的实验结果。对模拟SAR数据胶片测量表明：表征SAR数据胶片的五个基本参数与理论计算基本相符。最后对实验误差做了分析。

一 前 言

SAR数据胶片是SAR的输出，亦是光学处理器的输入。因此，研究SAR数据胶片对弄清SAR和光学处理器两方面的许多问题是有益的。模拟的SAR数据胶片，不仅可以验证雷达参数的合理性，也可为光学处理器提供实验数据。当有了真实SAR数据胶片，模拟的SAR数据胶片也是光学处理器必不可少的检测“元件”^[1]。也就是说，模拟SAR数据胶片是研制光学处理器不可缺少的组成部分。

Wai—Hon Lee^[2]从真实SAR数据胶片上测得了表征SAR数据胶片的五个基本参数。近几年来，许多文献都给出了SAR数据胶片的数学表达式^{[3]、[4]}。这些表达式，虽然对于不同目的的讨论来说是完美的。但从表达式求出这五个参数，则只能求出两个。A. K. Aggarwal^[5]，用相干光学方法模拟了点目标SAR数据胶片，但他也只模拟了两个参数。我们从分析SAR的运算开始，推导出比较完备的点目标SAR数据胶片的数学表达式，并且实验模拟了这个表达式的运算。无论从表达式解析运算，还是从实验模拟的SAR数据胶片上直接测量，都能得到SAR数据胶片的五个基本参数。这就从理论上和实践上较好的解决了用相干光学方法模拟点目标SAR数据胶片的问题，使这一工作趋于完善。

二 SAR数据胶片的数学表达式

设雷达发射为Chirp脉冲信号：

$$f(t) = a_0 \exp(j\omega t - \frac{1}{2}st^2) \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \quad (1)$$

其中： a_0 —振幅， ω —频率， S —chirp线性频率调制率， T —脉冲宽度。

如图1(a)所示，沿航向为方位维坐标 X ，地面一点到 X 线的距离为斜距维坐标 R 。从地面反射回来的雷达信号是时间延迟了 $2R/c$ 的发射信号，有雷达信号返回的地域是雷

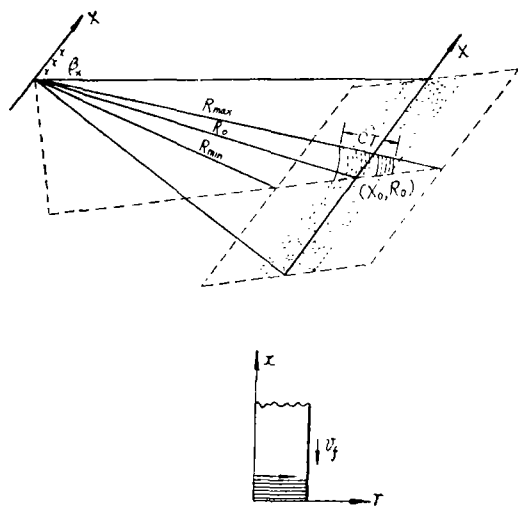


图1 (a)机载SAR的几何参数、(b)SAR数据胶片。

达发射信号“照明”的地域*。于是雷达收

*以矩函数近似代替雷达天线衍射的主瓣图案。

到的返回信号可以用下式表示:

$$g(t) = \rho f \left(t - \frac{2R}{C} \right) \text{rect} \left[\frac{X - X_0}{\beta_x R_0} \right] \quad (2)$$

其中: ρ —点目标反射因子, β_x —方位维束宽, X_0, R_0 是地面物点的方位维和斜距维座标, $R_{\min} \leq R_0 \leq R_{\max} - \infty < X_0 < \infty$ 。把(1)代入(2)得:

$$g(t) = \rho \varepsilon \exp j \left[W \left(t - \frac{2R}{C} \right) + \frac{S}{2} \left(t - \frac{2R}{C} \right)^2 \right] \cdot \text{rect} \left[\left(t - \frac{2R}{C} \right) / T \right] \text{rect} \left[(X - X_0) / \beta_x R_0 \right]$$

取窄带近似^[6]:

$$\text{rect} \left[\left(t - \frac{2R}{C} \right) / T \right] \approx \text{rect} \left[\left(t - \frac{2R_0}{C} \right) / T \right]$$

在角 β_x 较小情况下有:

$$R \approx R_0 + \frac{1}{2R_0} (X - X_0)^2$$

令: $\omega = 2\pi c / \lambda_r = kc$, $t = 2R/c$

代入上式得:

$$g(t) = \rho \varepsilon \exp j \left[\omega_0 X - \frac{k}{R_0} (X - X_0)^2 + \frac{S}{2} \left(\frac{2R - 2R_0}{C} \right)^2 \right] \cdot \text{rect} \left[\frac{2R - 2R_0}{TC} \right] \text{rect} \left[\frac{X - X_0}{\beta_x R_0} \right] \quad (3)$$

其中: $\varepsilon = \exp j(2kR_0)$, $\omega_0 = \omega/v$, v —飞机速度。点物回波与雷达参考波混频、放大后,用于控制CRT的光点亮度。随着雷达脉冲扫过地面,在CRT荧光屏上光点由下向上移动,对准荧光屏的相机,在胶片上记录下来一条线。随着飞机向前飞行,在另一位置雷达又发射出第二个脉冲,此时胶片也移动了一个位置,在胶片上又记录下来一条线。重复上述过程,就得到整个SAR数据胶片。如图1(b)所示。

与雷达发射频率 ω 相对应的,在胶片上记录下来的视频信号频率为 ω_b 。因为 $\omega t = \omega \frac{X}{v}$,设记录胶片传输速度为 v_f ,对应有

$\omega_x = \omega_b \frac{X}{v_f}$,所以 $\omega_x = \omega_b / v_f$ 。于是,

在胶片上记录下来的信息为:

$$g(x, r) = \rho \varepsilon \exp j \left[\omega_x x - \frac{k}{R_0} (px - px_0)^2 + \frac{S}{2} \left(\frac{2qr - 2qr_0}{C} \right)^2 \right] \cdot \text{rect} \left[\frac{2qr - 2qr_0}{TC} \right] \text{rect} \left[\frac{px - px_0}{\beta_x gr_0} \right] \quad (4)$$

其中: p, f 分别为方位维和斜距维缩放比, x_0, r_0 是对应 X_0, R_0 在SAR数据胶片上物点的座标。同样的,对应有: $\gamma_{\min} \leq \gamma_0 \leq \gamma_{\max}$, $-\infty < x_0 < \infty$ 。为把(4)式变换成便于光学处理的形式,取:

$$\sin \theta = \lambda_L \omega_b / 2\pi \gamma_f \quad (5)$$

$$f_x(\gamma_0) = \lambda_r \gamma_0 q / 2\lambda_L f^2 \quad (6)$$

$$f_r = C^2 / 4\alpha_r q^2 \lambda_L \quad (7)$$

$$b_x(\gamma_0) = \beta_x \gamma_0 q / p \quad (8)$$

$$b_r = TC / 2q \quad (9)$$

代入(4)式得:

$$g(x, r) = \rho \varepsilon \exp jk(x \sin \theta) \cdot \exp jK \left[\frac{(x - x_0)^2}{-2f_x(\gamma_0)} \right] \text{rect} \left[\frac{x - x_0}{b_x(\gamma_0)} \right] \cdot \exp jK \left[\frac{(\gamma - \gamma_0)^2}{2f_r} \right] \text{rect} \left[\frac{\gamma - \gamma_0}{b_r} \right] - \infty < x_0 < \infty, \gamma_{\min} \leq \gamma_0 \leq \gamma_{\max} \quad (10)$$

其中 $K = 2\pi / \lambda_L$, $\alpha_r = S / 2\pi$ 。(10)式就是我们要求的点目标SAR数据胶片数学表达式。

三 SAR数据胶片的基本参数

根据Wai—HonLee的证明^[2],一个真实SAR数据胶片,完全可用下面五个参数表征:

(1) 方位维焦距 $f_x(\gamma_0)$;

(2) 斜距维焦距 f_r ;

(3) 空间带宽;

方位维带宽 $W_x = b_x(\gamma_0) / \lambda_L f_x(\gamma_0)$

(11)

$$\text{斜距维带宽 } W_r = b_r / \lambda_L f_r \quad (12)$$

(4) 空间带宽积:

$$\text{方位维带宽积 } N_x = W_r \cdot b_x(\gamma) \quad (13)$$

$$\text{斜距维带宽积 } N_r = W_r \cdot b_r \quad (14)$$

(5) SAR数据胶片的高度H:

$$H = \gamma_{\max} - \gamma_{\min} \quad (15)$$

为了便于测量, (3)、(4)两个参数可以用频谱宽度 U_x, U_r 和数据长度 $b_x(\gamma_0), b_r$ 来表示。设变换透镜的焦距为F, 则SAR数据胶片的频谱宽度为:

$$U_x = \lambda_L F W_x = F b_x(\gamma_0) / f_x(\gamma_0) \quad (16)$$

$$U_r = F b_r / f_r \quad (17)$$

可以看出, 这些参数均可由(10)式求出。所以我们说, (10)式是点目标SAR数据胶片的较完备的表达式, 因为它包含足以表征真实SAR数据胶片的五个基本参数。

四 SAR数据胶片的光学模拟

我们用马赫—珍德干涉系统模拟(10)式的运算。为了把运算和光学模拟对应起来, 我们把(10)式变成下式:

$$g(x, r) = \rho \varepsilon \exp jK(x \sin \theta) \text{rect} \left[\frac{x - x_0}{b_x(\gamma_0)} \right] \text{rect} \left[\frac{r - r_0}{b_r} \right] \cdot \exp jK \left[\frac{(x - x_0)^2 + (r - r_0)^2}{-2f} \right] \exp jK \left[\frac{(x - x_0)^2}{2F_x(r_0)} \right], -\infty < x_0 < \infty, r_{\min} \leq r_0 \leq r_{\max} \quad (18)$$

其中: $1/F_x(r_0) = -\frac{1}{f_x(r_0)} + \frac{1}{f_r}, f = f_r$

对应(10)式的实验草图如图(2)所示。

激光束被分束器分光成两束, 分别扩束后投向球、柱透镜。球透镜聚光于一点d处(作为物点), d到记录平面e处的光程为f, 在记录平面产生 $\exp iK \left[\frac{(x - x_0)^2 + (r - r_0)^2}{2f} \right]$

形的球面波; 柱透镜在方位维聚光成一条直线(垂直于图面)于a处, a到记录平面e的光程为 $abce = F_x(r_0)$, 在记录平面 (x_0, r_0) 处两束光的夹角为 θ , 于是在记录平面上产

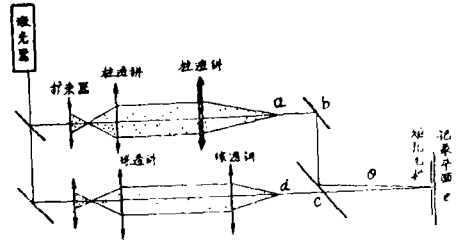


图2 实验草图

生 $\exp jK \left[\frac{(x - x_0)^2}{2F_x(r_0)} \right] \exp jK(x \sin \theta)$ 形的倾斜柱面波。矩孔光阑的中心位于 (x_0, r_0) 处, 大小为 $b_x(r_0) \times b_r$ 。对于不同的 x_0, r_0 点, 分别用水平和垂直移动记录胶片给出。注意: 对于不同的 r_0 值, 含 r_0 的变量也应做相应的改变。由于我们运用平方律记录介质, 当处理适当时, 则在胶片上记录下来的信息为:

$$\begin{aligned} & \left| \exp jK \left[\frac{(x - x_0)^2 + (r - r_0)^2}{2f} \right] \right. \\ & \left. + \exp jK \left[\frac{(x - x_0)^2}{2F_x(r_0)} \right] \exp jK(x \sin \theta) \right|^2 \\ & = \left\{ 2 + \exp jK \left[\frac{(x - x_0)^2 + (r - r_0)^2}{+2f} \right] \right. \\ & \quad \exp jK \left[\frac{(x - x_0)^2}{-2F_x(r_0)} \right] \exp jK \\ & \quad \left. (-x \sin \theta) + \exp jK \left[\frac{(x - x_0)^2 + (r - r_0)^2}{-2f} \right] \right\} \exp jK \\ & \quad \left. \left[\frac{(x - x_0)^2}{2F_x(r_0)^2} \right] \exp jK(x \sin \theta) \right\} \\ & \cdot \text{rect} \left[\frac{x - x_0}{b_x(r_0)} \right] \text{rect} \left[\frac{r - r_0}{b_r} \right] \quad (19) \end{aligned}$$

式中第三项即为(18)式的运算。

下面考虑实验中具体调整问题。我们知道, 干涉仪光路中任一组件位置的改变, 均会引起干涉场中条纹的改变。我们可利用这一现象来判断各组件的位置正确与否, 并通过调整使各组件处于正确位置。具体调整就不加详述了, 只把调整好的干涉场条纹情况描绘一下。当各组件调整正确时, 最后干涉场的条纹可由(10)式求得:

$$g(x, r) = \rho \varepsilon \exp jK [f_x(r_0) \sin^2 \theta / 2 + x \sin \theta] \cdot \exp jK \left\{ \frac{[(x-x_0) - f_x \sin \theta]^2}{-2f_x(r_0)} + \frac{(r-r_0)^2}{+2f_r} \right\} \cdot \text{rect} \left[\frac{x-x_0}{b_x(r_0)} \right] \text{rect} \left[\frac{r-r_0}{b_r} \right] \quad (20)$$

第一指数项为常相位移，可不加考虑。有意义的是第二指数项，为便于观察可把它写成：

$$\exp jK \left\{ \frac{[(x-x_0) - f_x(r_0) \sin \theta]^2}{-2f_x(r_0)} + \frac{(r-r_0)^2}{+2f_r} \right\} \exp jK(x \cdot 0) \text{rect} \left[\frac{x-x_0}{b_x(r_0)} \right] \text{rect} \left[\frac{r-r_0}{b_r} \right]$$

它是一矩孔限制的椭圆干涉条纹*。椭圆中心在 $(x_0 + f_x(r_0) \sin \theta, r_0)$ 处。令：

$$x_b(r_0, \theta) = f_x(r_0) \sin \theta \quad (21)$$

代表椭圆干涉条纹中心到 (x_0, r_0) 点处的距离。最后干涉场的情况可用下图表示。当给出具体数值后，图中各量均可直接测量。矩

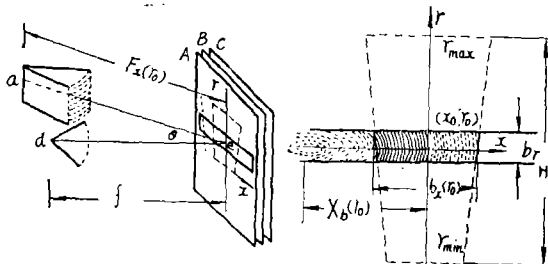


图3 记录平面光栏和干涉场条纹。(a) 立体图，(b) A、B、C的平面图。

孔光栏和椭圆偏心，在调整过程中（若调整正确）会自动实现。在光栏B上开个等腰梯形孔，高度为H，对称轴为 $x = x_0$ 的垂线，在处两腰宽度为 $b_x(r_0)$ 。在光栏A上开个长条孔，条宽为 b_r ，对称轴为 $r = r_0$ 的水平线。椭圆干涉条纹的中心离矩孔中心 (x_0, r_0) 的距离为 $x_b(r_0, \theta)$ 。对于 r_0 不变， x_0 不同的点，仅需沿x方向移动记录胶片C；对于 r_0 不变， x_0 不同的点，需要把B、C同时沿r方向移动，

A不动，则条孔会自动截出 $b_x(r_0)$ 值，与此同时沿轴移动柱透镜，使保持 $F_x(r_0)$ 值，于是椭圆中心会自动沿图中虚线移动，得出对应的 $x_b(r_0, \theta)$ 值。这样我们就可得到不同的 x_0, r_0 点的SAR数据胶片。

五 实验结果

为了实验模拟SAR数据胶片，我们给出些具体数值。设 $\lambda_L = 0.6328 \times 10^{-3} \text{mm}$ ， $\lambda_r = 32 \text{mm}$ ， $P = 12.5 \times 10^3$ ， $q = 1.5 \times 10^5$ ， $\sin \theta = 0.79 \times 10^{-2}$ ， $\beta_x = 16 \times 10^{-3}$ 弧度， $T = 4 \times 10^{-6} \text{S}$ ， $\alpha_r = -5 \times 10^{12} \text{hz/s}^2$ 。代入公式(6)——(a)、(18)、(21)，所求数值列成下表：

表1 与 r_0 有关的变量数值表 (单位: mm)

r_0	$f_x(r_0)$	$F_x(r_0)$	$X_b(r_0)$	$b_x(r_0)$	备注
70	1966	388.3	13.40	13.40	$f = f_r = 316.06$
80	1941	377.5	15.32	15.32	$b_r = 4$
90	2184	369.5	17.25	17.25	$r_{min} = 68$
100	2426	363.4	19.18	19.18	$r_{max} = 128$
110	2669	358.5	21.10	21.10	
120	2911	354.5	23.00	23.00	

(10)式变成：

$$g(x, r) = \rho \varepsilon \exp jK (0.79 \times 10^{-2} x) \cdot \exp jK \left[\frac{(r-r_0)^2}{-2 \times 316.06} \right] \text{rect} \left[\frac{r-r_0}{4} \right] \cdot \exp jK \left[\frac{(x-x_0)^2}{-2 \times 24.27 r_0} \right] \text{rect} \left[\frac{x-x_0}{0.192 r_0} \right] \quad (22)$$

我们取三个物点，在SAR数据胶片上对应座标为 $x_0 = 0$ ， $r_0 = 70 \text{mm}$ 、 80mm 、 90mm ，由表1查得： $f = 316.06 \text{mm}$ ， $F_x(r_0)$ 分别为 388.3mm 、 377.5mm 、 369.5mm ；光栏矩孔尺寸 $b_r = 4 \text{mm}$ ， $b_x(r_0)$ 分别为 13.4mm 、 15.3mm 、 17.3mm ；椭圆干涉条纹中心距光栏中心 (x_0, r_0) 的距离为 $x_b(r_0)$ ，分别为

* 假设 $f_x(r_0)$ 与 f_r 异号。

13.4mm、15.3mm、17.3mm。调整无误后，分别记录下来三个点的 SAR 数据胶片，如图4(a)所示，图4(b)为(a)的部分放大图形。

下面测量 SAR 数据胶片的基本参数。用平行相干光垂直照射模拟 SAR 数据胶片，量得焦距如下：

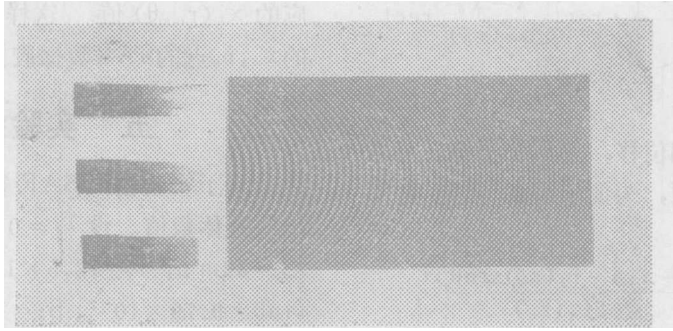


图4 (a)对应 $x_0 = 0, r_0 = 70\text{mm}, 80\text{mm}, 90\text{mm}$ ，三个物点的SAR数据胶片。(b)图(a)的部分放大照片。

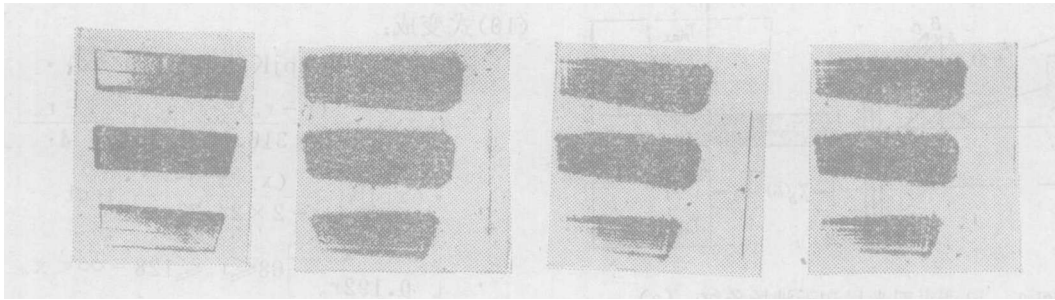
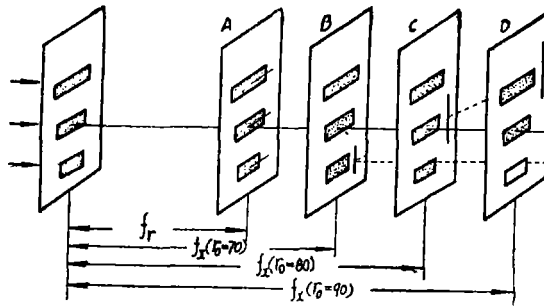


图5 照片A是在上图A处记录下来的SAR数据胶片衍射光。与SAR数据形状类似的背景为另级衍射光，三条细的横线为斜距维焦线。B、C、D处记录下来的照片分别为B、C、D，同样的三块黑背景为另级衍射光，右边的垂线为方位维焦线。

$$f_r = 316\text{mm},$$

$$f_x(r_0) = 1705\text{mm}, 1970\text{mm}, 2260\text{mm},$$

在各焦面处放一胶片，记录下来的情况如图(5)所示。SAR数据胶片的斜距维焦线是位于同一平面上，即位于距SAR数据胶片316mm，平行于SAR数据胶片的A平面内。而方位维焦线，随 r_0 不同其离SAR数据胶

片的距离也不同。由照片B可见， $r = 70\text{mm}$ 的SAR数据胶片方位维聚焦成一锐利的细线，而 $r = 80\text{mm}$ 的焦线变得粗而模糊， $r = 90\text{mm}$ 的焦线扩展得几乎看不见了。C和D的情况与B类似。这里应该说明的是，照片A的斜距维焦线位于另级衍射光左边，而照片B、C、D的方位维焦线位于另级衍射光的右

边,这是因为方位维焦距很长,在记录时用了一次反射镜折转光线的原故,并非是用了另一个衍射级。

用焦距 $F = 500\text{mm}$ 的变换透镜,对SAR数据胶片进行付氏变换,谱面的照片如图6所示。为了便于比较,把理论计算的谱示于图6(b)。

对图6(a)的谱宽实际测量得:

$$U_x = 4.0\text{mm},$$

$$U_b = 4.0\text{mm}, U_r = 6.5\text{mm}。$$

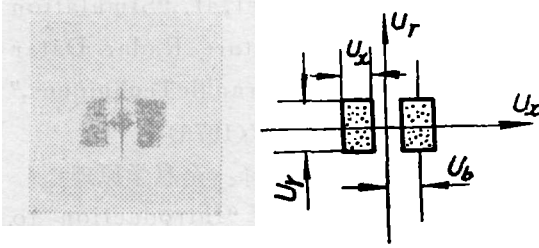


图6 (a)SAR数据胶片的频谱照片,变换透镜的焦距 $F = 500\text{mm}$; (b)理论计算的频谱。

在SAR数据胶片上直接测量 $b_x(r_0)$ 和 b_r ,分别为:

$$b_r = 4\text{mm}$$

$$b_x(r_0) = 15\text{mm}, 16\text{mm}, 17\text{mm}。$$

于是由频谱宽度 U 和记录数据长度 b ,就可计算出空间带宽 W 和带宽积 N 来。

我们的数据胶片高度应为 $H = 128 - 68 = 60(\text{mm})$,本实验仅做了三个点的数据胶片,没能把SAR数据胶片的全高度布满。

六 误差分析

实验总是会有误差的,问题是找出误差的原因,把误差限制在允许的范围内。

1. 谱的误差:

由谱宽度公式(16)、(17):

$$U_x = F \cdot b_x(r_0) / f_x(r_0)$$

实验中 F 可以量得较精确,故认为主要误差来自 $b_x(r_0)$ 和 $f_x(r_0)$ 。微分上式得:

$$dU_x = F \cdot \left[\frac{f_x(r_0) \delta b_x(r_0) - b_x(r_0) \delta f_x(r_0)}{f_x^2(r_0)} \right]$$

$$= F \cdot \left[\delta b_x(r_0) / f_x(r_0) - \frac{b_x(r_0)}{f_x^2(r_0)} \delta f_x(r_0) \right]$$

由于 $\frac{1}{f_x(r_0)} \gg \frac{b_x(r_0)}{f_x^2(r_0)}$,故方括号中的第二项可以忽略不计,上式变为:

$$dU_x = F \cdot \delta b_x(r_0) / f_x(r_0) \quad (23)$$

同理: $dU_r = F \cdot \delta b_r / f_r$ (24)

因为 $X_b = f_x(r_0) \sin \theta$,故 $U_b = F \cdot \sin \theta = F \cdot$

$\frac{x_b(r_0)}{f_x(r_0)}$, 所以:

$$dU_b = F \cdot \delta X_b(r_0) / f_x(r_0) \quad (25)$$

由上分析可见,谱的误差主要是由SAR数据胶片前放的矩孔光栏尺寸、光栏中心误差造成的。下面给些数据值,看其数量关系。设 $dU = 0.1\text{mm}$, 则:

$$\delta b_x(r_0) = \delta X_b(r_0) = f_x(r_0) dU / F$$

代入具体数值, $\delta b_x(r_0)$ 的最小值为:

$$\begin{aligned} \delta b_x(r_0)_{\min} &= f_x(r_0 = 68) dU / F \\ &= 1650 \times 0.1 / 500 \approx 0.32(\text{mm}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta b_r &= dU \cdot f_r / F = 316.06 \times 0.1 / 500 \\ &= 0.06(\text{mm}) \end{aligned}$$

(2) 焦距误差:

焦距误差主要来源于 f 和 $F_x(r_0)$ 的误差。现求 Δf 、 $\Delta F_x(r_0)$ 与焦距误差的关系。

由(18)式:

$\Delta f_r = \Delta f$; $\Delta f_x(r_0)$ 可由下式求得:

$$\frac{df_x(r_0)}{[f_x(r_0)]^2} = \frac{df}{f^2} - \frac{dF_x(r_0)}{[F_x(r_0)]^2} \quad (26)$$

当 $r_0 = 128\text{mm}$ 时,

$$df_x(r_0 = 128) \approx 85df - 67dF_x(r_0) \quad (27)$$

(3) SAR数据胶片的焦深

SAR数据胶片的 F 数为:

$$F_{\text{数}} = F / U \quad (28)$$

焦深 ΔZ 为:

$$\Delta Z = \pm \lambda_L (F_{\text{数}})^2 / 2 = \pm \lambda_L \left(\frac{F}{U} \right)^2 / 2$$

所以 $\Delta Z_r = \pm 0.6328 \times 10^{-3} \left(\frac{500}{6.9} \right)^2 / 2$

$$= \pm 1.7(\text{mm})$$

$$\Delta Z_x = \pm 0.6328 \times 10^{-3} \left(\frac{500}{4} \right)^2 / 2$$

$$= \pm 5(\text{mm})$$

我们由焦深限定焦距误差，并由此求对装置的精度要求。因为：

$$|df_r| = |\Delta Z_r| = 3.4\text{mm}$$

所以： $df = df_r = 3.4\text{mm}$

因为： $|df_r(r_0 = 120)| = |\Delta Z_r| = 10\text{mm}$

又设： $|df| = |dF_r(r_0 = 120)|$ ，且异号，则：

$$|df| = |dF_r(r_0 = 120)| = 10/(85 + 67) \approx 0.06(\text{mm})$$

综上所述，我们的装置精度在 0.05mm 范围内，就可以保证我们所提出的精度要求。

本文是由实验报告整理出来的，实验报告经严国荣、高清峰和逯小靖等同志看过，提出过不少宝贵意见，在此致以谢意。

参 考 文 献

1. Roy H. Ogburn, "Base Plane Cor-

relator", AD-759512.

2. Wai-Hon Lee, et al., "Matched Filter Optical Processor," Appl. Opt. 13, 925(1974)

3. E. N. Leith, "Quasi-Holographic Techniques in the Microwave Region," IEEE. 59, 1305(1971)

4. F. M. Dickey, "Coherent Optical Simulation of Radar Imagery", Opt. Engr. 15, 467(1976).

5. A. K. Aggarwall, et al., "Simulation of Synthetic Aperture Radar Data Film Using Holographic Techniques," Appl. Opt., 17, 987(1978)

6. 中国科学院物理所译：《全息学原理》。

7. J. W. Goodman, "Introduction to Fourier Optical."

参 考 文 献

[1] 蒋亚丝 王世焯 滤光玻璃的研究试制, 光学材料报告文集 1960年, 国防工业出版社

[2] A. Φ约飞 近代物理学中的半导体 P 300~301(1955)

[3] N. M. Бужинский ОМП (2) 25, 1966

[4] CRC Handbook of Chemistry and Physics 1974—75 55th edition D 61 等页

[5] Metals Reference Book Smithells 上接第7页

3rd edition Vol 2 London 1962

[6] "Фотоэлектрические и Оптические Явления В Полупроводниках" ИЗВ АН СС СР(1959)

[7] В. В. Варгин ОМП(5)19(1941)

[8] W. A. Weyl "Colored Glasses" Sheffield 1955

[9] 新型无机材料1977上海硅酸盐研究所

[10] Б. Т. Коломие и Т. Ф. Электрические Свойства Халькогеннидных Стекол, Стеклообразное Состояние АН СССР 465, 1960.