

# 合成孔径雷达光学处理器的 功能和成像质量的检测

金 友 蒲泽民 李懋阳 姚秀兰

**摘要:** 合成孔径雷达光学处理器 (OSARP) 与普通成像系统不同, 它处理合成孔径雷达 (SAR) 数据片。因此, 我们不仅要检测 OSARP 的成像质量还要检测它的功能。

本文提供一种检测 OSARP 的方法。OSARP 的功能是通过检测 OSARP 各组件的调整量来求得的, OSARP 的成像质量是用普通检测靶加位移透镜来检测的。我们使用模拟 SAR 数据片来检验 OSARP 处理各种雷达相位历程的能力。最后用真实 SAR 数据片来检验 SAR 和 OSARP 的综合成像质量。

用这种方法我们实地检测 HG-1型 OSARP, 实测结果表明这种检测方法是可行的。

## 一、引 言

空载合成孔径雷达 (SAR) 和地面合成孔径雷达光学处理器 (OSARP) 构成一个完整的微波成像系统, 这是一个分两步完成的非常规成像系统<sup>[1]</sup>。第一步, SAR 发射微波同时收集地面对微波的反射, 并将收集的信号以准全息图的形式记录在胶片上, 称之为数据片; 第二步, OSARP 对数据片进行处理得到图像, 显然该图像是表征微波波段地面反射特性的图像。空载 SAR 和地面 OSARP 是这个成像系统的两个相互独立的部分, 中间通过数据片相衔接。

OSARP 和常规成像系统不同, OSARP 的输入是数据片, 不是普通的物体; 输出是图像片。因此检测 OSARP 的方法与检测常规成像系统的方法也不同, 主要表现在以下三个方面: 第一, 对该系统应做双向检测<sup>[2][3]</sup>: 往前方向, 要检测 OSARP 是否能处理规定范围内的各种数据片, 即 OSARP 的适用范围 (光学性能); 往后方向, 检测 OSARP 处理的图像质量 (成像质量); 第二, 用于检测 OSARP 的靶应该是理想 SAR 数据片或者是它的等效靶; 第三, 考虑到整个系统的物像放大率与许多因素有关, 因此这里定义的图像几何失真与常规成像系统中定义的不同。

本文着重说明 OSARP 各活动部件的调整量和 SAR 数据片特征参数之间的关系, 通过测量 OSARP 各活动部件的调整量求出 OSARP 的光学性能。我们根据要求的 OSARP 适用的范围, 拟定数据片的参数, 用光学或计算机方法制做各种模拟 SAR 数据片, 用来检测 OSARP 处理各种 SAR 相位历程的能力和像质, 同时用普通检测靶 (鉴别率板和几何失真检测模板) 加位移透镜, 作为 SAR 数据片的等效靶来检测 OSARP 的成像质量 (分辨率和几何失真)。

最后处理真实 SAR 数据片, 用以检测图像的动态范围和观测 SAR 和 OSARP 综合成像质量, 这项检测是必须的, 因为只有总的成像质量最后合格才有实用价值, 但它不是充分

的，因为最后图像质量差不一定就是 OSARP 的问题，也可能是 SAR 的问题。

## 二、OSARP 的光学性能

为了能处理各种 SAR 数据片，OSARP 的结构参数要合理，并且要有充分的调整量。OSARP 的结构参数可在它的零部件上检测，整机只检测各部件的调整量，综合两部分测量结果可求得 OSARP 的光学性能。下面分四部分来讨论。

### 1. 数据片的特征参数

为检测 OSARP 处理各种 SAR 数据片的能力，首先要了解数据片。为此我们来观察一个点目标的 SAR 数据片，一个点目标数据片如图 1 所示，类似于费涅耳带板，当用平行相干光照明时会再现出两条分立的焦线。各种 SAR 数据片完全可用以下七个特征参数来表征。偏置角  $\theta$ ，斜距焦距  $f_s$ ，方位焦距  $f_a$ ，数据片孔径长度  $B_x \times B_y$ ，斜距缩比  $q$ ，方位缩比  $p$  和纵横比  $K (q/p)$ 。数据片的特征参数可由 SAR 参数和飞行条件计算出来<sup>[4]</sup>，也可以在 SAR 数据片上直接测量出来<sup>[5]</sup>。

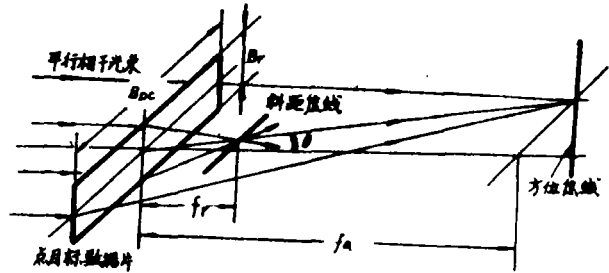


图 1 点目标 SAR 数据片的特征参数

### 2. OSARP 的主要部件

一般 OSARP 可分六大部分<sup>[6]</sup>，如图 2 所示。

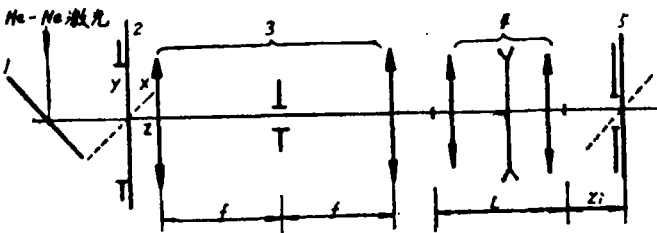


图 2 OSARP 的主要部件

(1) 偏置反射镜，可绕  $x$  轴和  $y$  轴转动；(2) 数据片输片机，可沿  $z$  轴移动和绕  $x$  轴转动；(3) 斜距望远镜，由两个固定球透镜 ( $f = 750 \text{ mm}$ ) 构成；(4) 方位变倍望远镜，由三个柱透镜  $L_1 (f_1 = 350 \text{ mm})$ 、 $L_2 (f_2 = -50 \text{ mm})$  和  $L_3 (f_3 = 100 \text{ mm})$  构成，每个可沿  $z$  轴移动，也可以整体沿  $z$  轴移动；(5) 图像片输片机，可绕  $x$  轴转动；

(6) 在数据片平面、图像片平面和斜距望远镜共焦平面 (频谱平面) 各放一个可变孔径的光栏。

### 3. OSARP 各部件调整量与数据片特征参数间的关系

(1) 偏置反射镜绕  $y$  轴的转角应等于 SAR 数据片的方位偏置角  $\theta$ ，偏置反射镜转角范围即为可处理的 SAR 数据片方位偏置角的范围。

(2) 数据片输片机移动量对应于斜距焦距  $f_s$  的范围。数据片输片机  $f_s = 0$  的位置是这样标定的，图像片输片机是固定的，移动数据片输片机使数据片与图像片距离为  $4f_s$ ，此时数据片上的水平线条在图像片上成像清晰，于是数据片输片机的位置指针所指的位置为  $f_s = 0$ ，

由此位置数据片输片机逆光方向的移动量为正斜距焦距的范围，顺光方向的移动量为负斜距焦距的范围。

(3) 方位望远镜的变倍范围直接联系于 SAR 数据片的纵横比  $K$ 。在处理数据片时应把 OSARP 方位望远镜的倍率调整使等于数据片纵横比  $K$  的倒数。方位望远镜变倍范围受三个柱透镜相对位置和方位望远镜总长度的限制，倍率 ( $1/K$ ) 和三个柱透镜焦点间距  $d_1, d_2$  之间有如下关系：

$$d_1 = -f_1 f_2 / (K f_3) \quad (1)$$

$$d_2 = -K f_2 f_3 / f_1 \quad (2)$$

方位望远镜的总长度  $L$  为：

$$L = f_1 + d_1 + 2f_2 + d_2 + f_3 \quad (3)$$

由公式 (1), (2) 和 (3) 可以看出，变倍范围越大要求的方位望远镜的调整量也越大，在各组件互不相碰和其总长度不超过球透镜到图像片之间距离的条件下，测量出  $d_1$  和  $d_2$  可以计算出方位望远镜的倍率范围，它们的倒数就是 SAR 数据片的纵横比的范围。

(4) 方位望远镜整体移动量与方位焦距  $f_s$  的范围有关。设  $Z_i$  为  $L_s$  后焦面到图像片的距离，则方位焦距  $f_s$  为：

$$f_s = (K^2 - 1) Z_i - L - f_1 - f_3 + \frac{K f_1 f_3}{f_2} + f_2 \quad (4)$$

拟定一  $K$  值，前后整体的移动方位望远镜，测量移动量  $\Delta Z_i$  即可求出该  $K$  值的 ( $f_s - f_s$ ) 范围。

(5) 两输片机绕  $x$  轴的转角范围直接联系于斜距缩比  $q$  的范围。因为斜距望远镜放大率为 1，所以数据片和图像片的倾角相等，设倾角为  $\alpha$ ：

$$\alpha = \frac{K^2}{K^2 - 1} \tan^{-1} \left( \frac{1}{2q} \cdot \frac{\lambda_r}{\lambda_i} \right) \quad (5)$$

其中  $\lambda_r$  (32mm) 为雷达波长， $\lambda_i$  ( $0.6328 \times 10^{-3}$ mm) 为激光波长。测得最大倾角  $\alpha_{max}$ ，由 (5) 式可以求出最小斜距缩比  $q_{min}$ 。

(6) 三个主要光栏口径。图像片光栏口径  $I_s \times I_r$ ，数据片光栏口径  $O_s \times O_r$ ，与数据片孔径长度  $B_s \times B_r$  应满足下式：

$$O_s \geq I_s K + B_s \quad (6)$$

$$O_r \geq I_r + B_r \quad (7)$$

否则，SAR 数据片的孔径受到切割，使像点的弥散斑变大，像质变坏。

频谱平面口径  $T_s \times T_r$  和物方分辨率的关系应满足：

$$T_s \geq \frac{B_s}{f_s} \cdot f = \frac{u_s}{\lambda_L} f \lambda_L \quad (8)$$

$$T_r \geq \frac{B_r}{f_r} \cdot f = \frac{u_r}{\lambda_L} f \lambda_L \quad (9)$$

其中， $u_s/\lambda_L$  和  $u_r/\lambda_L$  分别为方位和斜距物方分辨率。当测得三个可变光栏的最大口径，根据上面的关系式可以计算出能处理的数据片最大孔径和可达到的分辨率。

#### 4. 测量结果

根据 OSARP 各活动部件的调整量与数据片特征参数间的关系，测量及计算结果如下：

表 1

OSARP各活动部件调整量				数据片特征参数范围	
偏置反射镜绕y轴的转角 $0^\circ \sim 5^\circ$				方位偏置角 $\theta$ $0^\circ \sim 5^\circ$	
数据片输片机移动量 200 mm				斜距焦距 $f_s$ $-20\text{mm} \sim +180\text{mm}$	
两输片机绕x轴的转角 $\pm 22^\circ$				斜距缩比 $q$ $\geq 6.5 \times 10^4$	
柱透镜相对位置和总长度			$d_1, \text{mm}$	$d_2, \text{mm}$	$L, \text{mm}$
			43.75	57.14	450.89
			14.58	171.43	536.01
			8.75	285.71	644.46
			5.83	428.57	784.40
方位望远镜整体移动量 $Z_i$			$K$	$Z_i, \text{mm}$	
			4	24.73 ~ 360.3	
			12	24.7 ~ 275.2	
			20	24.7 ~ 166.7	
			30	24.7 ~ 26.8	
			方位焦距 $(f_{0s} - f_r)$ $(f_s - f_r)M$		
			0 ~ 1.7		
			0 ~ 30.0		
			0 ~ 51.4		
			0 ~ 18.6		

三个主要光栏最大口径及所能处理的数据片最大孔径和可达到的最高分辨率见表 2:

表 2

数据片光栏口径	$O_s \times O_r \leq 100 \times 78 \text{mm}^2$	频谱面光栏口径	$T_s \times T_r \leq 20 \times 35 \text{mm}^2$
图像片光栏口径	$I_s \times I_r \leq 4 \times 70 \text{mm}^2$	能处理的数据片孔径	$B_s \times B_r \leq 98 \times 60 \text{mm}^2$
可达到的物方分辨率	$\rho_s \times \rho_r \leq 40 \times 70 \text{l p/mm}$		

以上测量结果是系统可达到的性能, 但在这个范围内系统的成像质量不一定都好, 因此还要进行像质检测。

### 三、OSARP处理SAR 相位历程的能力

整机制成之后系统的设计像差和制造误差是固定的, 它对系统连续调整产生的影响也是连续的。因此, 只须根据设计指标对系统做抽样检测。我们选几种典型的 SAR 参数, 用光学方法或电子计算机方法做出一套模拟 SAR 数据片<sup>[4]</sup>, 这种模拟 SAR 数据片是排除空载 SAR 误差的理想的的数据片<sup>[5]</sup>。把模拟 SAR 数据片复制在Kadac 3493胶片上, 称之为试验胶片 I。下表只给出其中一种模拟 SAR 数据片的参数:

表 3

方位偏置角 $\theta = 30'$	斜距焦距 $f_s = 50 \text{mm}$
平均方位焦距 $f_s = 296.1 \text{mm} (2427 \sim 3495)$	数据片孔径长度 $B_s \times B_r = 40 \times 1.5 \text{mm}^2$
斜距缩比 $q = 1.5 \times 10^5$	方位缩比 $p = 1.25 \times 10^4$
纵横比 $k = 12$	

对于不同参数的数据片应把 OSARP 调整成与其参数对应的状态。例如, 对上面给的那种 SAR 数据片参数, OSARP 应调整成下表给出的状态:

表 4

方位望远镜倍率 $A_B = 1/12$	偏置反射镜转角 $\theta = 30'$
数据片输片机移到 $f_r = 50\text{mm}$	柱透镜焦点间距 $d_1 = 14.58\text{mm}$
	$d_2 = 171.43\text{mm}$
方位望远镜整体位置 $Z_i = 86.62\text{mm}$	两个输片机倾角 $\alpha = 9^\circ 38'$
图像片光栏口径 $I_x \times I_r = 0.2 \times 60\text{mm}^2$	谱面光栏口径 $T_x \times T_r = 4 \times 35\text{mm}^2$
数据片光栏口径 $O_x \times O_r = 100 \times 70\text{mm}^2$	

OSARP调整好以后,把试验胶片 I 放到 OSARP 上处理,在图像片处用 RAR 3414 胶片记录图像。处理的结果应该是预定目标的图像。我们所给的是地面相距 4m 远的三个点目标,它们分别位于通道的远、中、近斜距处,用光学方法模拟的数据片如图 3 (a) 所示。图 3 (b) 为处理后的图像(三个亮点,每点含三个点目标),图 3 (c) 为图 3 (b) 上中间那个小亮点放大 100 倍(黑白反转的)图像。由图可以看出,OSARP 具有处理这种 SAR 相位

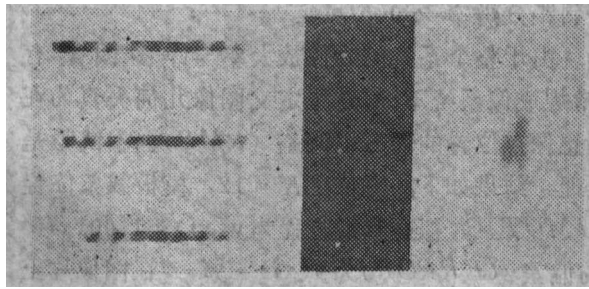


图 3 (a) (b) (c)

历程的能力,即能从这种 SAR 数据片中处理出预定目标的图像。还能看出,它能把相距 4m 远的地面点目标分辨开。按上述方法把各种参数的模拟 SAR 数据片依次放到 OSARP 上处理,观察处理结果则可估计出 OSARP 处理各种 SAR 相位历程的能力和成像质量。

图 3 (a) 三个点目标的模拟 SAR 数据片,分别位于通道的远、中、近斜距处;(b) 数据片处理的结果,每个亮点中含有三个点目标的图像;(c) 图 (b) 中一个小亮点放大 100 倍的图像(黑白反转)。

片,分别位于通道的远、中、近斜距处;

#### 四、OSARP 的分辨率和几何失真

因为当模拟 SAR 数据片绕 Z 轴转动一个小的角度  $\Delta\varphi$ , 图像片上的像旋转角度近似为  $K^2\Delta\varphi$ , 像的质量也显著变坏,因此要制做复杂图案的模拟 SAR 数据片来检测 OSARP 的分辨率和几何失真,不仅要花费很多的时间而且也不经济,因为要求有较高精度的模拟装置。因此,我们采用 SAR 数据片的等效靶——普通检测靶加位移透镜——来检测。

OSARP 是针对 SAR 数据片设计的,也就是说用于检测 OSARP 的靶不是普通的物体,而是二维分开的物体。为此,我们在斜距望远镜频谱面放一个在方位维有光焦度的负柱透镜——位移透镜  $f_s$ 。由于位移透镜放在斜距望远镜的频谱面,它对系统的像差贡献很小(可以忽略不计),并且不改变系统的放大率,也不改变斜距像的位置,它的作用只是使方位像位移,移动距离为  $s_s$ <sup>[1]</sup>:

$$s_s = -f^2/f_s \quad (10)$$

这样,普通的物体经过带位移透镜的斜距望远镜所成的像,等同于二维分开的物体 ( $f_r = 0$ ,  $f_s = s_s$  的 SAR 数据片) 经过不带位移透镜的斜距望远镜所成的像,于是对其后的方位望远镜来说,两者效果是相同的。用这种办法,即用普通检测靶加位移透镜可以检测 OSARP 的分辨率和几何失真。如果只检测斜距维的分辨率和几何失真,也可以不用位移透镜。这里我们使用的普通检测靶是各种间距的三条线鉴别率板和 16 条线等间距线条构成的几何失真检测

模板, 把它复制在Kadak 3493胶片上, 称之为试验胶片II。虽然普通检测靶加位移透镜在某些性能上类似于SAR数据片, 但它与SAR数据片是有区别的, 最明显的是它们的谱是完全不同的<sup>[4]</sup>。因此我们认为后者还不能完全代替前者。

我们把OSARP的倍率分别调整为1/4, 1/12, 1/20和1/30, 四次处理试验胶片II。下面(表5)只给出K=12时OSARP的调整状态:

表 5

偏置反射镜转角 $\theta = 0^\circ$	数据片输片机位置 $f_r = 0$
各柱透镜焦点间距(mm) $d_1 = 14.58, d_2 = 171.43$	方位望远镜整体位置 $zi = 86.3\text{mm}$
两输片机倾角 $\alpha = 0^\circ$	图像片光栏口径 $I_x \times I_r = 0.2 \times 60\text{mm}^2$
谱面光栏口径 $T_x \times T_r = 4 \times 35\text{mm}^2$	数据片光栏口径 $O_x \times O_r = 100 \times 60\text{mm}^2$
位移透镜焦距 $f_s = -190.38\text{mm}$	

用RAR 3414作记录胶片, 在处理好的图像片上用显微镜测量最小可分辨间距求出系统的分辨率。测量结果为: 方位分辨率 = 50lp/mm, 斜距分辨率 = 50lp/mm。

下面让我们来说明图像的几何失真的检测。由于整个系统的物像放大率与许多因素有关, 并且不是一个常数(非位移不变), 因此与常规成像系统不同, 这里定义图像几何失真为在图像片上规定画幅内实际像点对拟合直线上理想像点位置的均方根偏差(RMS)。本试验是在万能工具显微镜上测量的, 数据用计算机处理, 结果如下, 方位维K=12, 模板线条位置xi(A.MASTER), 模板像线条位置yi(AZIMUTH), 拟合直线方程为 $y(xi) = 1.001xi + 7.3 \times 10^{-4}$ , 实际像点对拟合直线上理想像点的偏差(ERROR)为 $y(xi) - yi$ , 在图像片上方位维4.6mm范围内方位维均方根偏差  $RMS = 1.77 \times 10^{-3}\text{mm}$ , 类似, 在图像片上斜距维3.4mm范围内斜距维均方根偏差  $RMS = 1.59 \times 10^{-3}\text{mm}$ 。具体数据见表6和表7。

表 6 方位维均方根偏差

K = 12 方位维拟合直线方程		
$T. 29208542629 E-4 + 1.00105164548 X = 0$		
A.MASTER	AZIMUTH	ERROR
.3333	.3334	-.000979721981
.6664	.6667	-.001130025091
.9997	1.0024	.00091946147
1.3329	1.3369	.0018690532
1.6663	1.6733	.0045184346
1.9991	2.0004	-.00153155302
2.3322	2.3338	-.00158185613
2.6658	2.6673	-.00153215924
2.9985	3.0022	-.00018256751
3.3316	3.3348	-.00103287062
3.6649	3.6677	-.00178338406
3.9981	4.0025	-.00053379233
4.3314	4.3375	.00081569423
4.6646	4.6724	.00216528595

$RMS = 1.77495741717E-3$

表 7 斜距维均方根偏差

斜距维拟合直线方程		
$-3.7971118891E-4 + .999052206136X = 0$		
<i>R.MASTER</i>	<i>RANGE</i>	<i>ERROR</i>
.2504	.2487	-.001082961227
.5008	.5046	.004654366356
.7503	.7484	-.000809159075
1.0007	.9981	-.001271831491
1.2502	1.2479	-.00073535692
1.5002	1.4964	-.00199840846
1.7504	1.7481	-.00026127043
2.0012	1.9986	-.00032356373
2.2497	2.2491	.00191196305
2.5002	2.4973	-.00015061459
2.7500	2.7464	-.00061385568
3.0006	2.9968	-.00057633854
3.2496	3.2464	.00025966213
3.5004	3.4977	.00099736883
$RMS = 1.58711346736E-3$		

## 五、SAR和OSARP 的综合成像质量

我们采用进口SAR给出的数据片为试验片Ⅲ，把它放在OSARP上处理，处理方法与处理试验胶片Ⅰ相似。按SAR数据片的参数把OSARP调整好，处理后图像片冲洗成 $\nu = 0.8 \sim 1.2$ 。结果如图(4)所示：(a)为SAR数据片，(b)为OSARP处理后的图像。在图像片上测得最大密度为 $D_{max} = 2.05$ ，最小密度为 $D_{min} = 0.62$ ，所用显微密度计的最小可分辨密度值为 $\Delta D = 0.01$ ，于是图像的灰度等级为：

$$N = (D_{max} - D_{min}) / \Delta D \quad (11)$$

$$= (2.05 - 0.62) / 0.01 = 143 \text{ (级)}$$

由图4(b)可以看出，OSARP能处理这种SAR给出的数据片，并且表明这种进口SAR和我们所研制的OSARP配合可以得到满意的图像。

本工作得到OSARP研制组同事们的支持和帮助，许多工作是和刘伯翔等同志一道完成的，在此表示感谢。

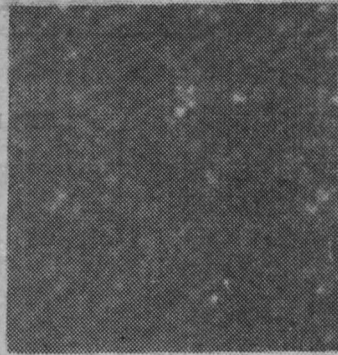
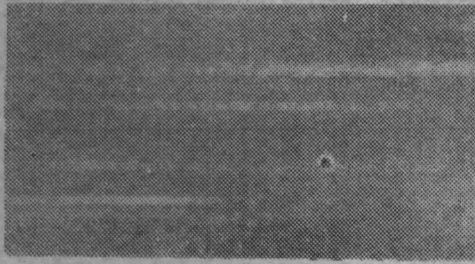


图4 (a) 真实SAR数据片; (b) 长春光机所研制的OSARP处理的SAR图像。

### 六、参 考 文 献

[1] N.E.Leith; P. IEEE, 1971, 59, No.9(Sep), 1305~1318.  
 [2] D.C. Robinson et.al.; AD-732870, 1971.  
 [3] R.H.Oeburn; AD-759512, 1973.  
 [4] 金 友, 周玉斌, 蒲泽民; 《物理》, 1981, 10, No.7 (Jul) , 433~436.  
 [5] Wai-Hon Lee et.al.; Appl.Opt., 1974, 13, No.4 (Apr) , 925~930.  
 [6] A.Kozma et al.; Appl.Opt., 1972, 11, No.8 (Aus) , 1766~1777.  
 [7] E.B.Felstead; AD-A071358, 1979.  
 [8] 金 友; “模拟SAR数据片的波差测量和胶片波差容限”, 《光学学报》待发表。

## Inspection of Function and Imaging Quality of an Optical Synthetic Aperture Radar Processor

Jin You Pu Zemin Li Maoyang Yao Xiulan

### Abstract

An Optical Synthetic Aperture Radar Processor(OSARP) is different from the conventional imaging system. It works after Synthetic Aperture Radar (SAR) and processes image from SAR data film. Thus we inspect not only the imaging quality of the OSARP, but also the function of it.

In this paper we provide a method of inspection of an OSARP. The function of the OSARP is obtained through testing the adjustable quantities of each assembly of the OSARP. The imaging quality of the OSARP is inspected with the general testing targets and a shift lens. We use simulated SAR data films to demonstrate the capability of

the OSARP to handle radar phase histories. Finally the true SAR data film is processed to show the comprehensive imaging quality of the SAR and the OSARP.

We inspect the OSARP made in Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica with this method. The experimental results show that the method is practical.