

# 用于综合孔径雷达光学处理系统 降低噪声的一种方法

王 佳 李达成 杜 玲  
(清华大学精密仪器系光学仪器教研组)

## 提 要

本文介绍了在空间频率平面抽样降低图像中噪声的方法。计算和实验结果表明：此方法能降低噪声，而系统的分辨率不受损失。将此方法用于综合孔径雷达光学处理系统，并给出了实验结果。

## 一、引 言

在相干光图像处理系统中，相干噪声是图像质量严重下降的重要原因，其中影响最大的为散斑噪声。为了降低全息重现中出现的相干噪声，F. T. S. Yu 和 E. Y. Wang<sup>[1]</sup>曾提出全息图平面随机空间抽样法。S. C. Som 和 C. J. Budhivaja<sup>[2]</sup>提出次通道全息图连续叠加的方法。L. J. Porcello<sup>[3]</sup>等人提出谱面分割法，这些方法虽然取得了一定的效果，但都以牺牲部分分辨率为代价。T. S. Mekechnie<sup>[4]</sup>在广泛讨论各种降低散斑的方法时提出，在空间频率平面利用扇形孔径抽样器旋转抽样的方法，可以获得较好的效果。本文对这种方法进行了讨论和实验，并将此方法应用于 SAR (Synthetic Aperture Radar——综合孔径雷达) 光学处理系统获得较好的效果。

## 二、实验原理

SAR 数据片的记录和处理过程可以理解为微波全息图的记录和重现过程，与漫射物体的光学全息图一样，具有形成随机分布噪声的条件。因此，噪声的存在是不可避免的，其现象与光学中的散斑噪声非常相似。由于 SAR 数据片记录过程的特殊性，只能采用后期处理的方法来降低噪声。恰好由于 SAR 光学处理系统在空间频率平面处放有空间滤波器，这就使得空间频率平面抽样法有可能实现。

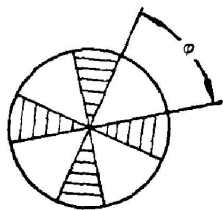


图1 扇形抽样孔径  
Fig. 1 Sector-shaped  
sampling aperture

由于频率分布的对称性，选用了如图1所示的十字对称的扇形孔径对空间频率分量进行抽样。随着抽样器的转动，不同的空间频率分量连续顺次通过处理系统。可以证明<sup>[5]</sup>：在这种时间平均系统中，信号的功率谱只与系统的非相干传递函数有关；噪声的功率谱与空间频率平面上的抽样函数的相关性有关，适当选择抽样函数，可以降低噪声。

空间频率平面抽样法是基于这样的原理: (1) 空间频率平面不同位置的分量所形成的随机分布的噪声是互相独立的。记录过程中, 抽样函数随时间变化, 噪声的分布也随时间变化。各时刻输出平面上噪声的光强分布在记录介质上被积分, 即相干叠加, 使其成为较均匀的背景, 减少噪声对图像的影响。(2) 任一时刻, 在两个扇形方向上(有一定的角度范围), 空间频率的所有高低频分量均能通过, 即在此方向上, 通带宽未缩小, 分辨率不会降低。对各方向频率分量形成的光强被积分, 并记录下来。抽样的过程只损失了部分能量, 对分辨率不会有影响。

### 三、噪声水平的降低

由 T. S. McKechnie 给出的结果及我们的计算, 得到散斑噪声的对比度公式:

$$C_n = \frac{\sigma}{(I_t)} = \begin{cases} \sqrt{(4\varphi/3\pi)} & (0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{4}), \\ \sqrt{(20\varphi/3\pi) - 4 + (\pi/\varphi) - (\pi^2/12\varphi^3)} & (\frac{\pi}{4} < \varphi \leq \frac{\pi}{2}). \end{cases} \quad (1)$$

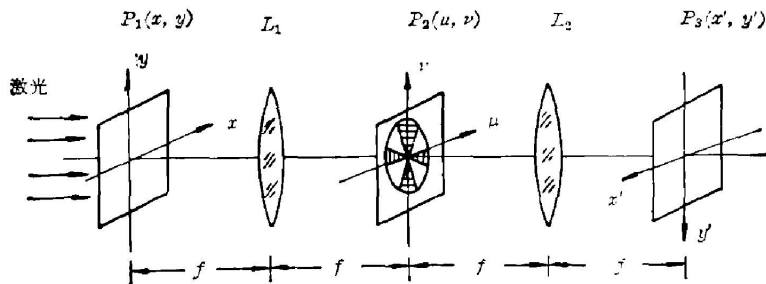


图2 原理实验装置图

Fig. 2 Arrangement of the principle experiment

我们以图2所示的实验装置进行了几项实验。

放于输入平面  $P_0(x, y)$  的毛玻璃被平行激光束照明, 产生噪声输入信号;  $F_1, F_2$  分别为傅里叶变换透镜; 抽样器放在空间频率平面  $P_2(\mu, \nu)$  上; 在输出平面  $P_3(x', y')$  上放置能移动的小孔, 小孔后面放置光电倍增管和前置放大器将检测信号放大。采取  $n$  个不同  $\varphi$  值的抽样器, 分别测出在输出平面上各点的时间平均光源。计算出其对比度, 并与由(1)式得到的理论值进行比较, 画出如图3所示的曲线。图3中的“\*”表示测量值。从图3可知, 散斑对比度随扇形角  $\varphi$  值的增加而增加。

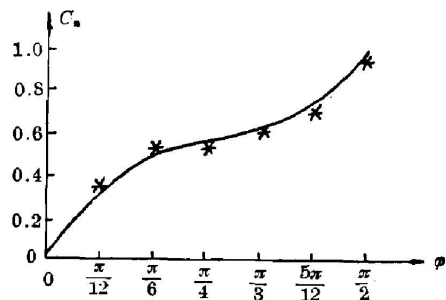


图3 散斑对比度的理论曲线与测量值  
Fig. 3 Theoretical curve of the speckle contrast and measured values

### 四、时间平均点扩散函数

图 4 和图 5 分别为 SAR 光学处理系统和原理实验系统示意图。输入信号  $t(x, y)$  是图像信号  $s(x, y)$  和噪声  $n(x, y)$  的乘积,  $t(x, y)$  经  $L_1$  进行傅里叶变换, 在空间频率平面进行空间滤波和抽样后, 再经  $L_2$  进行傅里叶反变换及其它光学处理, 将其光强记录于底片上。数据片和记录片分别以一定的速度在各自的矩形光阑前运动, 因此记录下来的实际上是光强对时间积分的结果。输出平面上时间平均光强为:

$$I(x, y) = \langle |t(x, y) \otimes h(x, y; t)|^2 \rangle. \tag{2}$$

若输入平面为点物, 称这时输出平面上的光强分布为时间平均点扩散函数:

$$h^*(x, y) = \langle |h(x, y; t)|^2 \rangle, \tag{3}$$

它描述了系统对点物所起的作用。进一步的考察可以深入了解这个时间变化系统的传输特性。

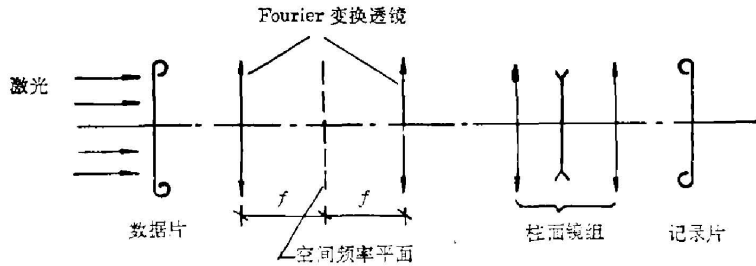


图 4 SAR 光学处理系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of SAR optical processing system

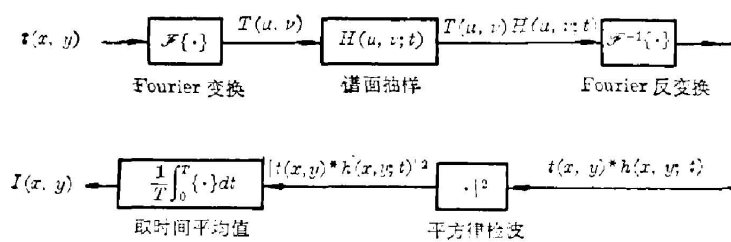


图 5 原理实验系统方框图

Fig. 5 Block diagram of principle experimental system

首先, 对时间平均点扩散函数进行一些计算。由于输入平面是点源, 空间频率平面的分量是均匀分布, 只需从抽样函数出发进行计算。先选定所用的抽样函数  $H(\mu, \nu)$  (直角坐标系) 或  $H(\varphi, \rho)$  (极坐标系), 将这个二维数据送入计算机进行二维傅里叶变换运算, 得到输出平面上的复振幅分布  $h(x, y)$ , 所感兴趣的是光强, 取为  $|h(x, y)|^2$ 。这时的结果只是瞬时输出平面上的光强分布, 考虑到记录片上是时间积分的结果, 对  $|h(x, y)|^2$  取积分, 得到时间平均点扩散函数  $h^*(x, y)$  (见图 6)。

在图 2 所示装置的输入平面放置直径为  $10\sim 20\mu\text{m}$  的小孔作为点物；空间频率平面放置几种  $\varphi$  角不同的抽样器；在输出平面上记录时间平均点扩散函数的强度分布。如图 7 所示，实验得到的结果与理论计算曲线一致，证明计算是正确的。

上述的计算与实验结果表明：在第一个零点以内，各抽样函数的时间平均点扩散函数与圆孔的点扩散函数曲线相符，故可得到与瑞利准则同样的结论。因此分辨率不受采用旋转扇形孔径的影响；随着抽样函数  $\varphi$  值的减少，能量分布逐渐变化，傍瓣的强度变大，锐变的中心亮斑为逐渐变亮的衍射环所围绕，因而使图像信号的对比度下降；适当选择  $\varphi$  值，可以使亮环的强度相对于中心亮斑的强度小到可以允许的程度，使图像的对比度较少受到影响。

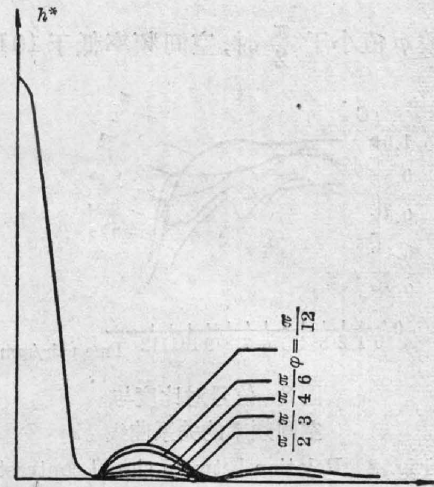


图 6 时间平均点扩散函数曲线

Fig. 6 Time-averaged point spread function

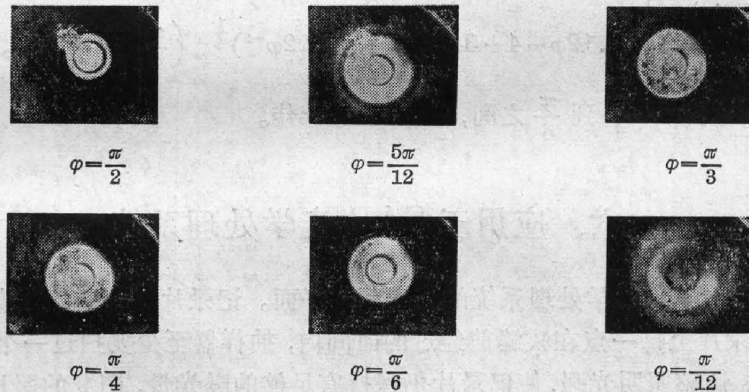


图 7 输出平面上时间平均点扩散函数的光强分布

Fig. 7 Intensity distribution of time-averaged point spread function in the output plane

## 五、对矩形波输入信号的测量

这种抽样方法对分辨率和对比度的影响是否如上所述，需要进一步实验。实际的 SAR 光学处理系统能通过的最高空间频率为  $11\text{ line pair/mm}$ 。在图 2 所示的系统的输入平面，输入几种小于最高频率的空间矩形波信号，在输出平面测量其相应的时间平均光强值  $I_{\text{max}}$ 、 $I_{\text{min}}$ 。于是对比度

$$C_s = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}} \quad (4)$$

由大量的测量数据进行计算，画出如图 8 所示曲线。

实验结果表明：抽样器为圆孔时（即  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ ），测量曲线与圆孔衍射理论值一致；抽样函

数  $\varphi$  值小于  $\frac{\pi}{2}$  时, 空间频率低于 10 line pair/mm 时, 曲线平缓, 各种频率分量能均匀通过,

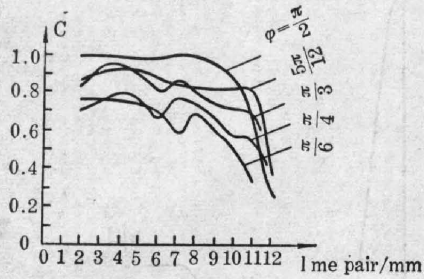


图8 信号对比度与空间频率的关系曲线

Fig. 8 Relation between signal contrast and spatial frequency

高于 10 line pair/mm 时, 曲线迅速下降, 系统传输的截止频率并不随  $\varphi$  值的减小而变化, 抽样函数并未缩小系统的传输带宽; 随着  $\varphi$  值减小, 输出信号的对比度曲线均匀下降。这些特点均与上述的计算结果及实验一致。

考虑到抽样函数的选择既要降低噪声, 又要尽量使信号的信息损失减少, 故定义品质函数  $Q(\varphi)$ :

$$Q(\varphi) = \log C_s(\varphi) + \frac{k}{\log C_n(\varphi)}, \quad (5)$$

使  $Q(\varphi)$  取得最大值的  $\varphi$  值被认为最佳。

在我们的实验系统中得到  $C_s(\varphi)$ ,  $C_n(\varphi)$  分别为:

$$C_s(\varphi) = 0.402\varphi + 0.354 \quad \left(0 < \varphi \leq \frac{\pi}{2}\right),$$

$$C_n(\varphi) = \begin{cases} 0.651\varphi^{\frac{1}{2}} & \left(0 < \varphi \leq \frac{\pi}{4}\right), \\ (2.12\varphi - 4 + 3.14\varphi^{-1} - 0.822\varphi^{-2})^{\frac{1}{2}} & \left(\frac{\pi}{4} < \varphi < \frac{\pi}{2}\right). \end{cases} \quad (6)$$

此时, 取  $k=0.1$ , 则  $\varphi$  取  $\frac{\pi}{4}$  到  $\frac{\pi}{3}$  之间,  $Q(\varphi)$  取值较佳。

## 六、应用于 SAR 光学处理系统

将抽样器装于 SAR 光学处理系统的空间频率平面。记录片以一定的速度运动, 调整抽样器转速, 使记录片上每一点在狭缝前经过的时间内, 抽样器至少要扫过一个周期, 并使其转动均速、平稳。调整照明光强, 使记录片仍保持有足够的曝光量。图 9 的照片是用  $\varphi=60^\circ$  的抽样器得到的。在未处理的图像图 9(a) 中, 噪声很严重, 目标不明显, 容易误判。经处理后的照片图 9(b) 中, 噪声被平均, 成为较为均匀的背景, 目标突出, 易于辨认, 分辨率下降很少。



(a)



(b)

图9 SAR 光学处理系统得到的结果

Fig. 9 Result from SAR optical processing system

## 七、结 束 语

利用时间平均扇形孔径抽样法可以在不降低分辨率的情况下减少散斑噪声。我们的实验及理论计算都证实了这一点,并在 SAR 光学处理中取得了效果。这种方法也可推广到其它散斑噪声较大的图像处理系统中。

本文所述的实验工作,得到中国科学院电子研究所袁慧坤同志的大力支持,特表谢意。

### 参 考 文 献

- [1] F. T. S. Yu, E. Y. Wang; *Appl. Opt.*, **12**, No. 7 (Jul), 1656 (1973).
- [2] S. C. Som, C. J. Budhiraja; *Appl. Opt.*, **14**, No. 7 (Jul), 1702 (1975).
- [3] L. J. Porcello, N. G. Massey *et al.*; *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**, No. 11 (Nov), 1305.
- [4] J. C. Dainty; «*Laser Speckle and Related Phenomena*», T. S. McKechnie; «*Speckle Reduction*», 123, (Springer-Verlag, 1975).
- [5] T. S. McKechnie; *Opt. Commun.*, 1975, **13**, No. 1 (Sep), 29.

## A method of suppressing noise for SAR optical processing system

WANG JIA LI DACHENG AND DU LING

(The Group of Teaching and Research on Optical Instruments, the Department of Precision Instruments, Qinhua University)

(Received 17 May 1982, revised 17 December 1982)

### Abstract

In this paper, a method of reducing noise in the image by sampling in the spatial frequency plane is discussed. The results of calculations and experiments show that the method can suppress noise without sacrificing the resolution of the system. The method is used in the SAR optical processing system and the experimental results are given.