

# 制作光学模拟 SAR 数据片的一种新方法

蒲泽民 金友

**摘要:** 本文说明实现合成孔径侧视雷达(SAR)数据胶片,其方位维焦距的长度不受限制的一种光学模拟系统。本系统具有较大的灵活性和适用性,模拟精度易于保证。该系统可以在较小的实验室中操作,实验结果已完全证明了这个系统的实际可行性。

为了检验合成孔径侧视雷达光学处理器的质量和性能,需要一种不受飞机飞行条件和雷达本身质量、性能条件限制的模拟SAR数据胶片。这种模拟SAR数据胶片可以用光学方法<sup>[1,2]</sup>和计算机方法<sup>[3]</sup>来产生。本文将要报告的是一种新的光学模拟方法。

在一些文献中给出了SAR点散射体波场的数学表达式以及光学模拟的原理。<sup>[1,2]</sup>一个记录在胶片上的理想SAR点散射体的波场,其数学表达式为:

$$g(x, y) = \rho \operatorname{rect} \left[ \frac{x - \bar{x}/p}{b_s(r)} \right] \operatorname{rect} \left[ \frac{r - \bar{r}/q}{b_r} \right] \exp jk f_s \lambda j_L x \cdot \exp jk \frac{(x - \bar{x}/p)^2}{-2f_s(r)} \cdot \exp jk \frac{(r - \bar{r}/q)^2}{2f_r} \quad (1)$$

$$\text{其中: } f_s(r) = \bar{\lambda}_r r / 2\lambda_L p^2 \quad (a)$$

$$f_r = c^2 / 4\alpha \lambda_L q^2 \quad (2b)$$

$x, r$  —— 胶片的方位维和斜距维坐标

$p, q$  —— 方位维和斜距维的比例因子

$\bar{x}, \bar{r}$  —— 地面实际坐标

$c$  —— 光速

$\alpha$  —— 线性频率调制速率

$\lambda$  —— 雷达辐射的微波波长。

$\lambda_L$  —— 处理器中照明光波的波长

$b_s(r)$  —— 方位维孔径长度

$b_r$  —— 斜距维孔径长度

$\rho$  —— 一个与雷达系统,地面散射体反射率等有关的因子。

$f_s$  —— 与记录器上的电学信号视频载波频率有关的空间频率。

由方程式(1)可知,在胶片上记录下来的点目标数据的位相轮廓是由 $\alpha$ 的符号所决定的椭圆或双曲线。所以,通过产生满足上述要求的椭圆或双曲线的波场,就能实现这种数据胶片的模拟。它实际上是准全息图。

我们用图1所示的光学系统来模拟数据胶片。在马赫——珍德干涉仪中的一条光路中采用柱透镜 $L_1$ 和球透镜 $L_2$ 的组合光学系统来产生所要求的波场。而在另一光路中采用平面光波来提供方程(1)中所规定的参考偏置光波,然后全息记录这个波场。

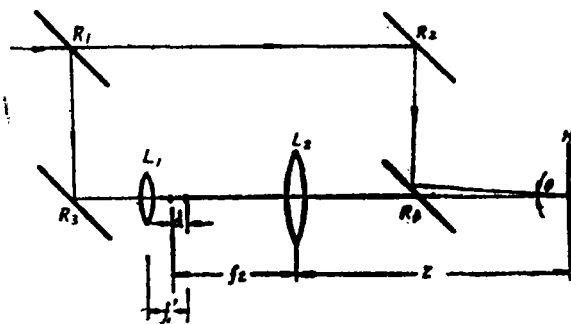


图1 模拟SAR总目标数据胶片光路图。

- $r_1, r_4$ : 半反半透镜,
- $r_2, r_3$ : 反射镜,
- $H$ : 全息记录面      $l_L$ : 柱透镜
- $L_2$ : 球透镜          $\theta$ : 偏置角

我们要在下面说明, 在图1的全息记录平面上, 光振幅分布完全与方程(1)所要求的一致。

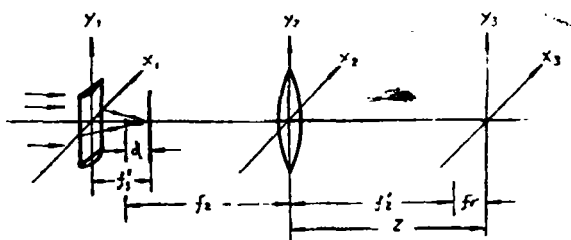


图2 柱透镜和球透镜组合的光学系统

如图2所示, 在全息记录平面 $x_3, y_3$ 面上的光振幅分布 $U(x_3, y_3)$ 可在菲涅耳衍射条件下推导出来<sup>[4]</sup>。入射在柱透镜上的平面波经过柱透镜之后, 在它的后焦平面上会聚成为一条焦线。该焦线相对于球透镜而言, 成为一发散的柱面波。此柱面波经球透镜后在 $x_2, y_2$ 平面上的光场分布我们可以写为:

$$U(x_2, y_2) = C_0 \exp jk \frac{x_2^2}{2(f_2 - d)} \cdot \exp -jk \frac{x_2^2 + y_2^2}{2f_2} \quad (3)$$

$C_0$ 为常数。于是, 在全息记录平面 $(x_3, y_3)$ 上的光振幅分布 $U(x_3, y_3)$ 就可以容易的得出:

$$\begin{aligned} U(x_3, y_3) &= \frac{\exp jkz}{j\lambda z} \iint_{-\infty}^{\infty} U(x_2, y_2) \exp \left\{ \frac{jk}{2z} [(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2] \right\} dx_2 dy_2 \\ &= \frac{c_1}{j\lambda z} \iint_{-\infty}^{\infty} \exp \frac{jk}{2} \left[ \left( \frac{1}{f_2 - d} + \frac{1}{z} - \frac{1}{f_2} \right) x_2^2 - \frac{2x_2 x_3}{z} \right] dx_2 \\ &\quad \cdot \exp -\frac{jk}{2z} (x_3^2 + y_3^2) \cdot \exp \frac{jk}{2} \left[ \left( \frac{1}{z} - \frac{1}{f_2} \right) y_2^2 - \frac{2y_2 y_3}{z} \right] dy_2 \end{aligned} \quad (4)$$

其中积分号内的因子 $\frac{1}{f_2 - d} + \frac{1}{z} - \frac{1}{f_2}$  (5) 可以根据透镜公式:  $\frac{1}{l} + \frac{1}{l'} = \frac{1}{f}$  (6) 予以简

化,  $l$  为物距,  $l'$  为像距。参考 (6) 式, 可使 (5) 式中的两项为:  $\frac{1}{f_2-d} - \frac{1}{f_2} = -\frac{1}{l'}$ ,

(7) 由于  $f_2-d < f_2$ , 故  $e'$  本身亦为负值。因此 (5) 式成为  $\frac{1}{z} - \frac{1}{(-l')} = \frac{l'+z}{l'z}$  (8) ※

把 (8) 式代入 (4) 式可得运算结果为:

$$U(x_3, y_3) = c_2 \exp\left[-\frac{j k z}{2} \left(\frac{1}{z+l'}\right)\right] x_3^2 \cdot \exp\left[\frac{j k z}{2} \left(\frac{1}{z-f_2}\right)\right] y_3^2 \quad (9)$$

(4) 式中的  $c_1$  与本式中的  $c_2$  为常数。

与 (1) 式中的位相因子比较:

$$z+l' = f_x(r) \quad (10a)$$

$$z-f_2 = f_r \quad (10b)$$

可见, 这样产生的波场, 与 (1) 式的数学表达式完全一致。通过选择  $l'$  可以实现任何数值的  $f_x(r)$ 。于是可以认为, 平面波经柱透镜后会聚的焦点经球透镜  $x$  维光焦度所成的虚像就

作为方位焦距  $f_x(r)$  而记录, 而由于球透镜  $y$  维光焦度的作用, 在其后焦平面上形成的另一焦线就做为斜距焦距  $f_r$  而记录, 如图 3 所示:

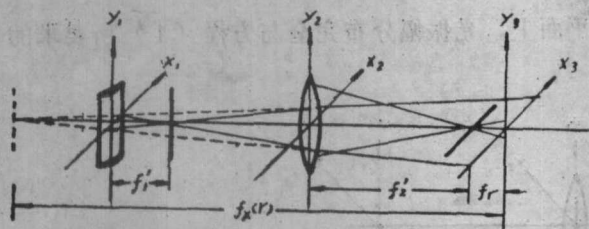


图 3 柱透镜与球透镜  $x$  维光焦度组合形成  $f_x(r)$ , 球透镜  $y$  维光焦度形成  $f_r$

利用这种光学模拟系统, 我们通过选择  $d$  (即选择  $l'$ ) 来得到各种  $f_x(r)$  值的 SAR 点散射体的模拟数据胶片。与文献<sup>[1],[2]</sup>发表的光学系统相比, 在文献<sup>[1]</sup>中

介绍的那种光学模拟系统, 由于其自身的结构, 在模拟方位维焦距较大而间隔又较近的点扩散体数据片时, 因为其调节距离太短, 在实验操作上有很大困难。而且在数据片距离维已事先压缩的情况下 (方程 (1) 中  $f_r$  等于零), 就无法进行模拟, 因而限制了它的使用范围。文献<sup>[2]</sup>中介绍的装置又显得松散, 在模拟长方位维焦距的点扩散体数据片时, 又需要大的实验室。所以本文介绍的这种模拟装置显示了较大的优越性。

图 4 至图 7 是我们利用这种光学系统模拟的三个点散射体的数据胶片, 再现的方位维和距离维焦线, 及其数据片频谱。多个点的模拟数据片可以由全息图面的调整及  $d$  的选择来进行。在文献<sup>[1]</sup>中已有详细说明。

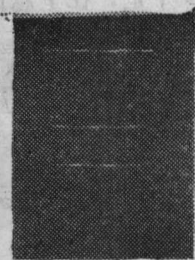
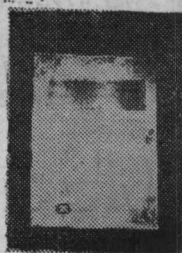
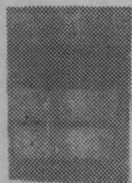


图 4: 在不同距离上的三个点目标的模拟数据胶片。

(a)

(b)

图 5 再现三个点目标的斜距维焦线

a) 没有经过滤波的焦线照片。 b) 滤波后的焦线照片

※ (8) 式中的  $l'$  由于加入了负号而成为绝对值。以下同。

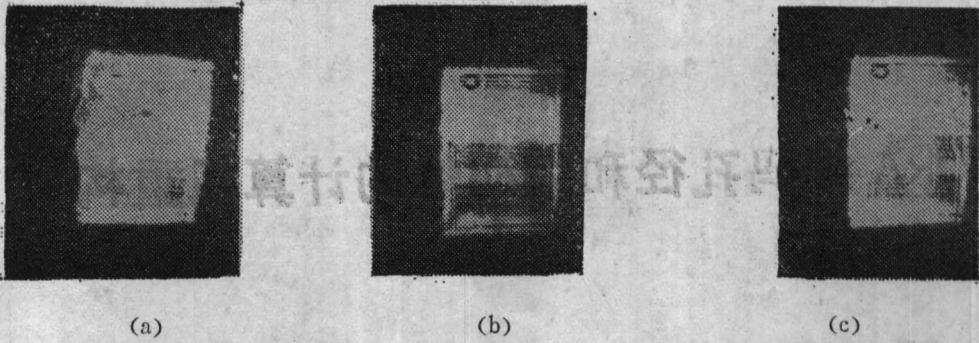


图6 分别与三个点目标相对应的再现方位维焦线

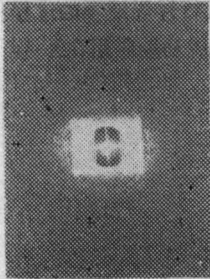


图7 没有滤波的数据片频谱 (两个对称的、与参数大小有关的长方形)

参考文献

- [1] 金友, 周玉斌, 蒲泽民, 物理, 1981年, 第10卷, 第7期。
- [2] A. K. Aggarwal, et.al.; App. Opt., 1978, 4
- [3] 李懋阳; 光学机械, 1986, 1.

A New Method of Optical Simulating SAR Data Films

Pu Zemin Jin You

Abstract

This paper describes an optical system simulating data films of Synthetic Aperture Radar. It can obtain an arbitrary length of azimuth focus. The system has considerable flexibility and adaptability as well as good simulation precision. This system can be operated in a smaller laboratory. The feasibility of this system has been proved out in practice.