

综合孔径雷达数据片的光学模拟

金友 周玉斌 蒲泽民

(中国科学院长春光学精密机械研究所)

一、概述

综合孔径雷达 (SAR) 分两大部分: 机载雷达和光学处理器。雷达把地物回波记录在胶片上, 叫做数据片, 数据片经光学处理器处理得到地物图象。我们按照雷达的运算, 导出数据片数学表达式, 然后用光学方法模拟这个运算得到模拟数据片。模拟数据片制作容易, 可用它验证雷达参数的合理性和为光学处理器提供实验数据。数据片可用五个基本参数充分表达^[1], 参数值可以测量, 合格的模拟数据片(参数与数据片相符) 可用来检验光学处理器^[2]。

二、光学模拟原理

设飞机平直匀速 (v) 飞行。由图 1, 平行航向为方位坐标 X , 物点到航线的距离 R 为斜距坐标, 地面一物点坐标为 (X_0, R_0) 。雷达发射脉冲线性调频 (chirp) 信号 $f_i(t)$:

$$f_i(t) = a_0 \exp j \left(\omega t + \frac{S}{2} t^2 \right) \text{rect} \left(\frac{t}{T} \right), \quad (1)$$

式中频率 ω , chirp 调制率 S 和脉冲宽度 T 。一个脉冲波辐照的地域近似为 $ABCD$, 点物反射波的界域应等于 $ABCD$ 。回波信号 $f_R(t)$ 是时间延迟和多普勒频移 $2R_1/c$ 的发射信号,

$$f_R(t) = \rho \exp j \left[\omega \left(t - \frac{2R_1}{c} \right) + \frac{S}{2} \left(t - \frac{2R_1}{c} \right)^2 \right] \times \text{rect} \left(\frac{t - 2R_1/c}{T} \right) \text{rect} \left(\frac{X - X_0}{\beta_x R_0} \right), \quad (2)$$

$R_{\min} \leq R_0 \leq R_{\max}$; $-\infty < X_0 < \infty$, (2) 式中飞机至物点的距离 R_1 , 方位束宽 β_x 。回波与雷达参考波混频后, ωt 变为 $\omega_b t$ (ω_b 是雷达偏置频率)。经近似简化^[3,4] 和时空坐标转

物理

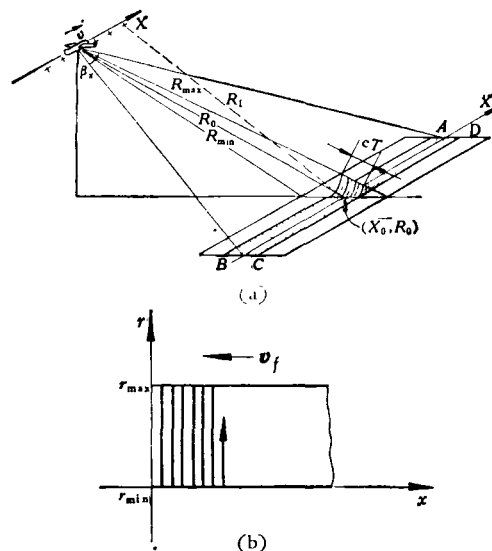


图 1 (a) 机载 SAR 参数; (b) SAR 数据片

换, 取 $\sigma = \exp j (-2kR_0 - \omega_b X_0/v)$, $k = \omega/c$, (2) 式变为

$$g(X, R) = \rho \sigma \exp j \left[\frac{\omega_b}{v} X - \frac{k}{R_0} (X - X_0)^2 + \frac{S}{2} \left(\frac{2R - 2R_0}{c} \right)^2 \right] \times \text{rect} \left(\frac{2R - 2R_0}{Tc} \right) \text{rect} \left(\frac{X - X_0}{\beta_x R_0} \right). \quad (3)$$

$g(X, R)$ 是雷达输给阴极射线管 (CRT) 的信号, 用它控制 CRT 光点的亮度。当一个脉冲波由 R_{\min} 至 R_{\max} 扫过地面时, 光点由荧光屏 r_{\min} 点扫描至 r_{\max} 点, 在记录胶片上记下一条对应的线。随着飞机的飞行, 雷达脉冲不断发射, 胶片连续地 (速度 v_t) 记录, 于是就得到整个数据片。

设 (x, r) 是对应 (X, R) 在数据片上的坐标, $P = v/v_t = X/x$, $q = (R_{\max} - R_{\min}) / (r_{\max} - r_{\min}) = R/r$ 分别为方位和斜距方向的缩放比, 数据片将以 $K = 2\pi/\lambda_1$ 的光波读出,

于是(3)式变为

$$g_v(x, r) = \rho \epsilon \exp jK(x \sin \theta) \exp jK \times \left[\frac{(x-x_0)^2}{-2f_x(r_0)} + \frac{(r-r_0)^2}{-2f_r} \right] \times \text{rect} \left[\frac{x-x_0}{b_x(r_0)} \right] \text{rect} \left[\frac{r-r_0}{b_r} \right],$$

$$r_{\min} \leq r_0 \leq r_{\max}; \quad -\infty < x_0 < \infty. \quad (4)$$

这就是点目标数据片的数学表达式。多个物点的数据片是单个物点的迭加。由(3)、(4)两式不难求出数据片的五个基本参数为：(1) 高度 $H = r_{\max} - r_{\min}$ ；(2) 方位数据长度 $b_x(r_0) = \beta_x q r_0 / p$ ，斜距数据长度 $b_r = Tc / (2q)$ ；(3) 方位焦距 $f_x(r_0) = q r_0 K / (2k p^2)$ ，斜距焦距 $f_r = -c^2 K / (4S q^2)$ ；(4) 方位谱宽 $U_x = F b_x(r_0) / f_x(r_0)$ ，斜距谱宽 $U_r = F b_r / f_r$ ；(5) 偏置频率 $U_b = F \sin \theta$ ， F 为变换透镜的焦距。当 SAR 的参数 $\omega, \omega_b, T, S, v, v_t, \beta_x, q, R_{\min}$ 和 R_{\max} 给定后，不难算出(4)式中各参数值。

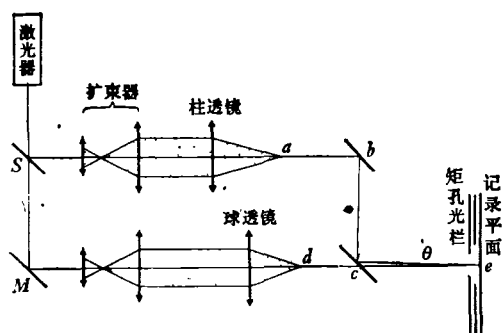


图2 光学模拟原理图

我们用下列系统模拟(4)式的运算^[5]。设记录平面e点的坐标为 (x_0, r_0) ，球透镜聚光于d处，d到e的光程长度为 $f = f_r$ ；柱透镜聚光于a处（焦线垂直于图面），a到e的光程长度为 $F_x(r_0) = [1/f_r - 1/f_x(r_0)]^{-1}$ 。在e点两束光的夹角为 θ ，记录胶片前放一矩孔光栏 $[b_x(r_0) \times b_r]$ ，光栏中心在e点，于是在胶片上记录下来的信息为^[6]

$$\text{rect} \left[\frac{x-x_0}{b_x(r_0)} \right] \text{rect} \left[\frac{r-r_0}{b_r} \right] \times \left| \exp jK \left[\frac{(x-x_0)^2}{2f} + \frac{(r-r_0)^2}{-2f} \right] \right|$$

$$+ \exp jK(x \sin \theta) \cdot \exp jK \left[\frac{(x-x_0)^2}{2F_x(r_0)} \right]^2 = \text{rect} \left[\frac{x-x_0}{b_x(r_0)} \right] \text{rect} \left[\frac{r-r_0}{b_r} \right] \times \left\{ 2 + \exp jK \left[\frac{(x-x_0)^2 + (r-r_0)^2}{+2f} \right] \times \exp jK \left[-x \sin \theta + \frac{(x-x_0)^2}{-2F_x(r_0)} \right] + \exp jK \left[\frac{(x-x_0)^2 + (r-r_0)^2}{-2f} \right] \times \exp jK \left[+x \sin \theta + \frac{(x-x_0)^2}{2F_x(r_0)} \right] \right\},$$

大括号中第三项即为(4)式的运算。

三、实验及结果

图(2)干涉光路中任一组件位置的改变，会导致干涉场条纹的改变，观测条纹可检查组件位置。这里取 S 为负值，(4)式代表一矩孔限定的椭圆条纹，椭圆度由 $F_x(r_0)$ 和 f 确定，夹角 θ 由椭圆中心到e点的距离 $X_b = f_x(r_0) \sin \theta$ 确定。在光栏B上开个等腰梯形孔，高为 H ，在

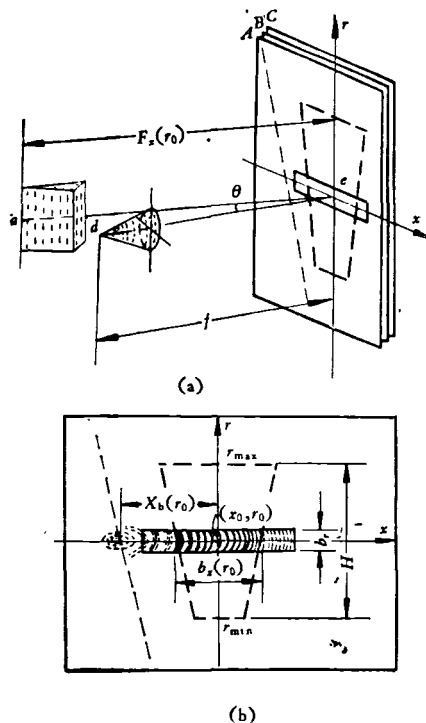


图3 各组件位置和干涉场条纹情况
(a) 立体图；(b) 光栏A、B的平面图和干涉条纹

r_0 处腰宽为 $b_x(r_0)$ 。在光栏 A 上开个长条孔,宽为 b_r 。光栏孔中心放在 e 处,如图(3)所示。图中各量均可测量,有些量随 r_0 变化,因此在照不同物点的模拟数据片时,某些组件要相应移动。例如,对 r_0 相同 x_0 不同的点,要把记录片 C 沿 x 方向移动;对 x_0 相同 r_0 不同的点,要把 B, C 一块沿 r 方向移动,并且要把柱透镜沿轴相应移动,这时椭圆中心和矩孔光栏会自动给出对应值,这样就可依次照不同物点的模拟数据片。

为测量参数,照了三个点的模拟数据片[图4(b)],它的局部放大照片见图4(c)。在片上可直接测得参数 $H, b_x(r_0)$ 和 b_r 。用平行光照

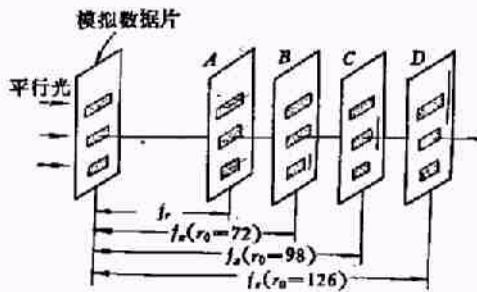


图4(a) 测量模拟数据片焦距图

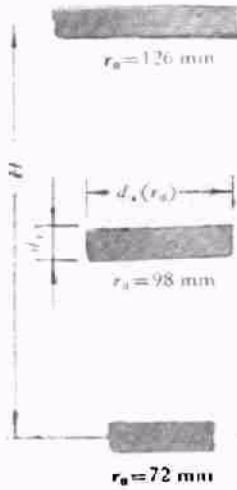


图4(b) $x_0=0, r_0$ 不等的三个物点模拟数据片



图4(c) (b)的局部放大照片

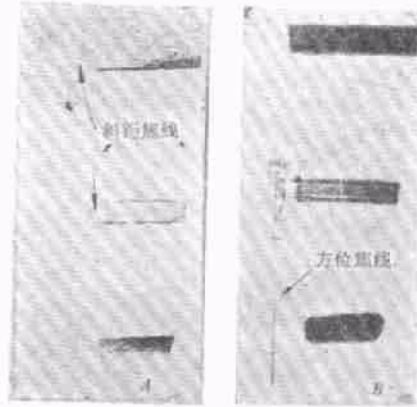


图4(d) 在图(a) A, B, D处照的焦线照片

模拟数据片,在片后用显微镜可测得焦距[图4(a)],焦线照片见图4(d)。对模拟数据片傅

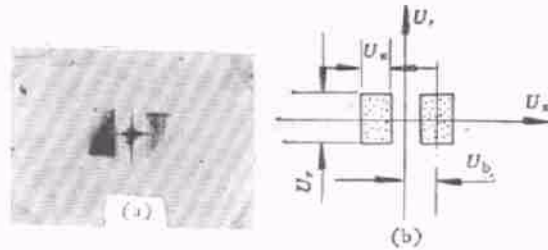


图5 模拟数据片的频谱照片

氏变换,在谱面可测得 U_x, U_r 和 U_b ,谱面照片见图(5)。为检验光学处理器制作了:(1)文字和数字“SAR#1979#8#9”的模拟数据片[图6(a)],处理结果见图6(b);(2)九个点(呈 $\begin{matrix} \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{matrix}$ 字形)三种间距的模拟数据片[图7(a)],处理结果的放大照片见图7(b),中间一组界于可分辨与不可分辨之间。

我们还用电子计算机模拟了(4)式的运算,

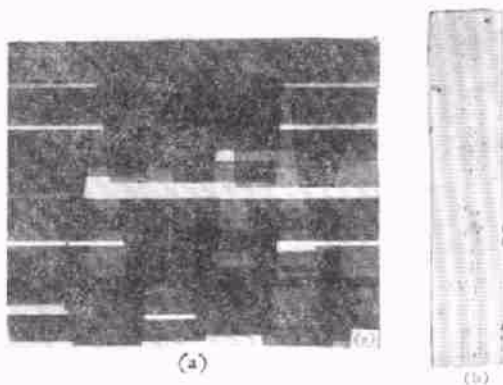


图6 (a)“SAR#1979#8#9”的模拟数据片;
(b)处理结果照片

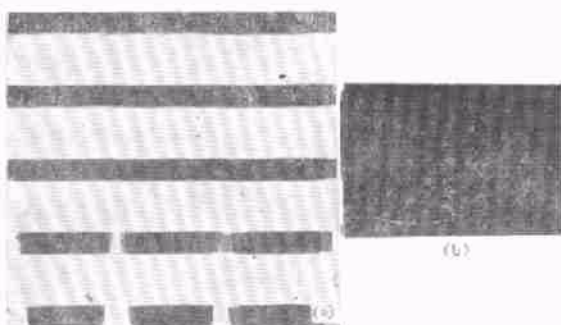


图7 (a)九个点(呈3x3字形)三种间距的模拟数据片;
(b)处理结果部分放大照片

计算机绘制的放大模拟数据片见图8(a),照相微缩的模拟数据片见图8(b)。两种方法精度近似相等。由于篇幅所限,这里不加详述。

经参数测量和光学处理器处理表明,我们制作的模拟数据片参数与理论值相符,可用于检验光学处理器。

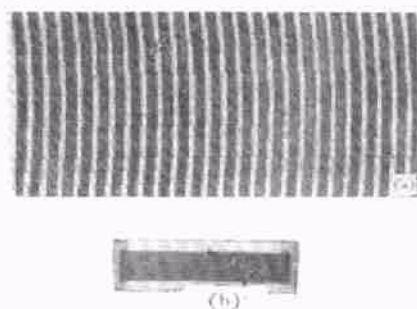


图8 (a)计算机放大绘制的部分模拟数据片;
(b)经照相微缩制成的模拟数据片

此项工作得到顾去吾、严国荣、高清峰和逯小靖等同志的支持,在此致以谢意。

参 考 文 献

- [1] Wai-Hon Lee et al., *Appl. Opt.*, 13 (1974), 925.
- [2] Roy H. Ogburn, *Base Plane Correlator*, AD-759512.
- [3] E. N. Leith, *Proc. IEEE*, 59 (1971), 1305.
- [4] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, McGraw-Hill, (1968).
- [5] A. K. Aggarwal et al., *Appl. Opt.*, 17 (1978), 937.
- [6] 中国科学院物理研究所《全息学原理》翻译组, *全息学原理*, 科学出版社, (1972).

螺旋结构的低感螺线管

张 遵 逵

(中国科学院物理研究所)

在等离子体和其他物理实验中,常用低电感的螺线管产生磁场。角收缩(θ -pinch)装置中用单匝线圈,高电压无极脉冲放电管的初级线圈也只有几匝。角收缩实验大都采用截面为 Ω 形的导体。多匝线圈往往就直接用一根导体绕几匝。这些简单的结构有些缺点,首先是对称性低,如单匝线圈沿圆周方向有一馈电剖口,有些实验中发现等离子体总是向朝剖口方向漂移。从馈电方向考虑, θ 线圈只能从圆柱的

一侧馈电,传输线必须用平行平板。而绕几匝的线圈,端点在两头,与传输线馈接不方便。简单的接法总是增大了附加电感,或者是降低了磁场的对称性。再有,当螺线管尺寸确定以后,电感量只能取一定的值,无法变化。

在一个等离子体实验装置中,我们碰到设计低感螺线管的任务。设计的要求是(1)不允许从侧向馈电;(2)环形装置要求轴对称性高;(3)由于线圈本身电感小,要求附加电感与传输