

计算机模拟综合孔径雷达(SAR)数据片

李懋阳

摘要: 本文详细地介绍了计算机模拟SAR数据片的数学模型、程序的设计和实验结果。实验结果证明:用计算机模拟SAR数据具有计算精度高;点距精确;不受参数限制,模拟灵活;方法简便等特点,是用数据模拟片检验光学相关器不可缺少的实验手段。

一、引言

随着空间技术的飞速发展,遥感技术得到了广泛地应用。因此,以综合孔径雷达技术为中心的文献资料大量出现。但是,很少涉及到计算机模拟SAR数据片。

本文详细介绍计算机模拟SAR数据片的数学模型、程序的设计和实验结果。虽然仅仅是初步的,但是它表明用计算机模拟SAR数据片是确实可行的途径。实验结果证明:它具有计算精度高,点距精确;不受参数限制,模拟灵活;方法简便易行等特点,克服了光学模拟受各种参数限制和调整精度(模拟的光学系统)的限制,是用数据片检验光学相关器不可缺少的实验手段。

二、SAR数据片基本公式推导

机载侧视雷达是利用脉冲调制信号及飞机与目标的相对运动,使回波产生时间延迟和多普勒频移,将与参考波构成的干涉图形记录在胶片上。因此是一种全息记录。对于一个点目标而言,记录在胶片上的是一系列明暗相间的干涉条纹;对于多个点目标来讲,它是所有这些点目标干涉条纹的叠加,进而构成景物的干涉图形。

具体的雷达辐射信号为:

$$f(t) = a(t) \operatorname{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp j(\omega t + \phi(t)) \quad (1)$$

其中 $a(t) \operatorname{rect}\left(\frac{t}{T}\right)$ 是脉冲的加权振幅, $\phi(t)$ 是为获得目标斜距分辨率的调制相位。从方位维坐标 X_0 处散射体返回的信号为:

$$g(t) = \rho a\left(t - \frac{2R_0}{C}\right) \exp j\left[\omega\left(t - \frac{2R_0}{C}\right) + \phi\left(t - \frac{2R_0}{C}\right)\right] \operatorname{rect}\left[\frac{t - \frac{2R_0}{C}}{T}\right] \operatorname{rect}\left[\frac{X - X_0}{\beta_z R_0}\right] \quad (2)$$

它恰好是 $f(t)$ 的 $\frac{2R_0}{C}$ 时间延迟和多普勒频移的变型。其中 C 为光速, T 是脉冲宽度, X_0 、

R_0 是地面散射体的坐标, R_0 为飞机瞬时位置到目标的距离, ρ 是散射体的反射系数, β_0 是方位维束宽。在 β_0 较小的情况下, R 可近似表示为:

$$R = R_0 + \frac{1}{2k_0} (X - X_0)^2 \quad (3)$$

利用线性频率调制

$$\phi(t) = \frac{\alpha_r t^2}{2} \quad (4)$$

这里 α_r 是线性频率调制率, 将(3)式和(4)式代入(2)式, 并经简单的近似和简化, (2)式变为:

$$\begin{aligned} g(X, R) &= \rho \exp j \left\{ \omega \left[t - \frac{2}{C} \left(R_0 + \frac{1}{2R_0} (X - X_0)^2 \right) \right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{\alpha_r}{2} \left(\frac{2R}{C} - \frac{2R_0}{C} \right)^2 \right\} \text{rect} \left[\frac{2R - 2R_0}{CT} \right] \text{rect} \left[\frac{X - X_0}{\beta_0 R_0} \right] \\ &= \rho \exp j \left[\omega \left(\frac{X - X_0}{V} \right) - 2 \frac{R_0 \omega}{C} - \frac{2\omega}{2CR_0} (X - X_0)^2 \right. \\ &\quad \left. + \frac{4\alpha_r}{2C^2} (R - R_0)^2 \right] \text{rect} \left[\frac{R - R_0}{CT/2} \right] \text{rect} \left[\frac{X - X_0}{\beta_0 R_0} \right] \end{aligned} \quad (5')$$

回波信号与参考波混频后记录在胶片上的信息为:

$$\begin{aligned} g(x, r) &= \rho e \exp j K \left[x \frac{\omega_s \lambda_L}{2\pi v_f} - \frac{(x - x_0)^2}{2qr_0 \lambda_r / 2\rho^2 \lambda_L} + \frac{(r - r_0)^2}{2C^2 / 4\alpha_r \lambda_L q^2} \right] \\ &\quad \text{rect} \left[\frac{x - x_0}{\beta_0 q r_0 / \rho} \right] \text{rect} \left[\frac{r - r_0}{TC/2q} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

上式中利用了 $t = \frac{2R}{C}$, $t = \frac{(X - X_0)}{v}$, $P = V/V_f = \frac{X}{x}$, $q = R/R_0$, 回波信号与参考波混频后 ω_s 变为 $\omega_s x/V_f$, 其中 R 是斜距, ω_s 是记录在胶片上的视频信号频率, V_f 是记录胶片传输速度, x, r 是与地面坐标 X, R 对应的数据片上的坐标, P, q 分别是方位维和斜距维缩放比, λ_r, λ_L 分别是雷达和光的波长, 并且令 $K = 2\pi/\lambda_L$, $e = \exp j[-2R_0\omega/C - \omega x_0/v]$,

令:

$\sin\theta = \lambda_L \omega_s / 2\pi V_f$	偏置角
$f_x(r_0) = qr_0 \lambda_r / 2P^2 \lambda_L$	方位维焦距
$f_r = C^2 / 4\alpha_r q^2 \lambda_L$	斜距维焦距
$b_x(r_0) = \beta_0 r_0 q / \rho$	方位维片长
$b_r = TC/2q$	斜距维片宽

并将其代入(5)式便得到:

$$\begin{aligned} g'(x, r) &= \rho e \exp j K \left[x \sin\theta - \frac{(x - x_0)^2}{2f_x(r_0)} + \frac{(r - r_0)^2}{2f_r} \right] \\ &\quad \text{rect} \left[\frac{x - x_0}{b_x(r_0)} \right] \text{rect} \left[\frac{r - r_0}{b_r} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

上式便是数据片记录的点目标信息。

为了计算上的方便，对（6）式再进行并不复杂的数学变形，使之成为：

$$\begin{aligned}
 g'(x, r) &= \rho \varepsilon \exp j K \left[\frac{-2x \sin \theta f_z(r_0) + (x - x_0)^2}{-2f_z(r_0)} + \frac{(r - r_0)^2}{2f_r} \right] \cdot \\
 &\quad \text{rect} \left[\frac{x - x_0}{b_z(r_0)} \right] \text{rect} \left[\frac{r - r_0}{b_r} \right] \\
 &= \rho \varepsilon \exp j K \left[\frac{\sin \theta [2x_0 + f_z(r_0) \sin \theta]}{2} + \frac{[x - x_0 - f_z(r_0) \sin \theta]^2}{-2f_z(r_0)} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{(r - r_0)^2}{2f_r} \right] \text{rect} \left[\frac{x - x_0}{b_z(r_0)} \right] \text{rect} \left[\frac{r - r_0}{b_r} \right] \quad (7)
 \end{aligned}$$

不难看出上式的第一项当 x_0, r_0 确定后为一常数，它实际代表的是相移，并不表现在干涉图上，故可以省略。

当第二项和第三项的符号相同时，记录在胶片上的图形为椭圆图形；当第二项和第三项的符号不同时，记录下来的图形为双曲线图形。原则上讲，对于椭圆图形或双曲线图形均能处理，这里采用的是椭圆图形。

方程式（7）是一个点目标的数学模型，对于 N 个点目标来说，它正如前边所讲过的那样，它是所有 N 个点的叠加，亦即：

$$\begin{aligned}
 G(x, r) &= \sum_{i=1}^N g'_i(x, r) \\
 &= \sum_{i=1}^N M_i \exp j K \left[\frac{[x - x_i - f_z(r_i) \sin \theta]^2}{2f_z(r_i)} + \frac{(r - r_i)^2}{2f_r} \right] \\
 &\quad \text{rect} \left[\frac{x - x_i}{b_z(r_i)} \right] \text{rect} \left[\frac{r - r_i}{b_r} \right] \quad (8)
 \end{aligned}$$

其中 N 为点目标数， $M_i = \rho_i \varepsilon_i$ ， ρ_i 和 ε_i 分别是第 i 个点目标的反射系数和加权振幅， x_i, r_i 是第 i 个点目标在数据片上的对应坐标， $f_z(r_i)$ 和 $b_z(r_i)$ 分别是第 i 个点目标的方位维焦距和方位维数据片长度。各个量在干涉场上的对应关系如图 1 所示。（8）式便是多个点目标的数学模型。

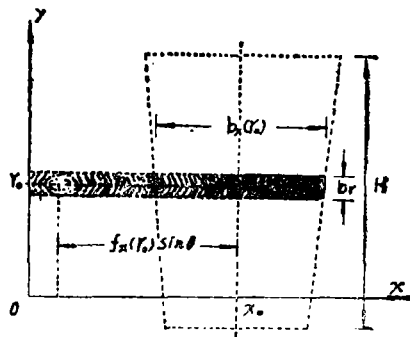


图 1 干涉场示意图

三、程序的设计及框图

这里所介绍的程序设计思想完全是针对计算机描绘仪的，因此，没有把振幅信息的变化考虑在内，只是把干涉图形的相位用描绘仪画出来，是二元干涉图形。这样对于一个点目标（8）式便可改写成：

$$g''(x, r) = \frac{\{x - [x_0 + \sin \theta f_z(r_0)]\}^2}{2f_z(r_0)} + \frac{(r - r_0)^2}{2f_r} \quad (9)$$

其中:

$$\begin{aligned} f_z(r_0)\sin\theta + x_0 - b_z(r_0)/2 \leq x \leq f_z(r_0)\sin\theta + x_0 + b_z(r_0)/2 \\ r_0 - b_r/2 \leq r \leq r_0 + b_r/2 \end{aligned} \quad (9')$$

根据干涉理论我们知道, 若

$$g''(x, r) = n\lambda_L \quad (10)$$

成立, 则在 x, r 处出现最亮干涉条纹, 其中 n 为整数, λ_L 为激光波长。这样我们根据椭圆方程考虑 (9) 式和 (10) 式便有:

$$g''(x, r)/n\lambda_L = \frac{[x - x_0 - f_z(r_0)\sin\theta]^2}{2n\lambda_L f_z(r_0)} + \frac{(r - r_0)^2}{2n\lambda_L f_r} = 1 \quad (11)$$

这里的 x, r 变化范围仍同 (9') 式, 根据 x, r 的变化范围连续地选择出 n (亦即连续地改变

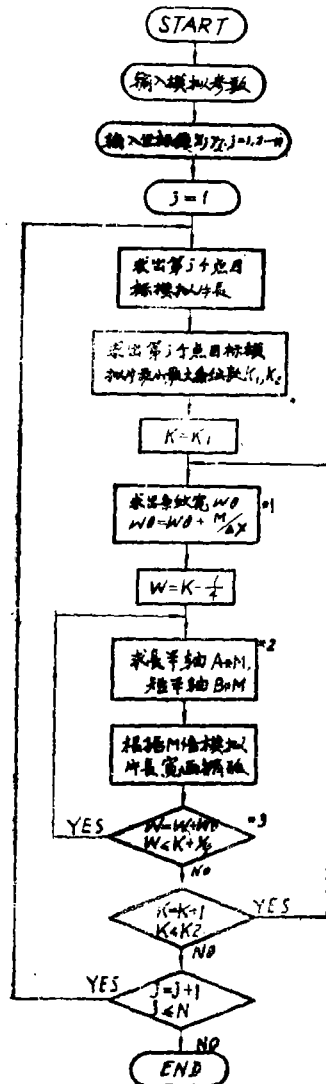
(11) 式的长半轴和短半轴), 则实际上是一族同心椭圆。根据描绘仪幅宽, 适当地选择出放大倍数 M , 并根据数据片的长 $b_z(r_0)$ 和宽 b_r , 在描绘仪上画出与相应的各个 n 值对应的椭圆圆弧, 是一张一个点目标的数据片。当然, 在实际模拟时要根据条纹的宽度决定 m 的变化范围, 从而画出一条完整的干涉条纹。其中 m 是为描绘出一条完整的干涉条纹而设置的量, 其变化范围为:

$$n - \frac{1}{4} \leq m \leq n + \frac{1}{4} \quad (12)$$

根据上述思想我们设计了框图 1 (图 2), 它的模拟方法与光学方法模拟极其相似, 光学方法模拟多个点目标数据片是采用各个点目标的干涉图形先后曝光在同一张干板上, 而框图 1 是把各个点目标的干涉图形描绘在同一张模拟图形上。所不同之处在于光学方法模拟包含了振幅和相位信息, 而框图 1 只是相位信息, 振幅信息的变化在模拟图形上没有反映出来。

若不考虑振幅信息, 只考虑相位信息, 对于多个点目标的数据模拟片我们同样放大 M 倍, 并根据描绘仪步距, 尽可能地把模拟图形细分成若干个象元 (亦即象元), 并对其每一点 (象元) 考虑这 N 个点目标中是否有某一点目标使得

$$\begin{aligned} \frac{[x - x_i - f_z(r_i)\sin\theta]^2}{2f_z(r_i)} + \frac{(r - r_i)^2}{2f_r} \\ = n\lambda \end{aligned} \quad (13)$$



- *1. ΔX : 描绘仪步距
- *2. M : 放大倍数
- *3. W : 为画出完整的第 K 条条纹而设的循环变量

图 2

成立，若成立，则落笔表示此点（象元）为亮点，若不成立，则抬笔表示此点（象元）为暗点。其中 x 、 r 对于每一点目标的变化范围为：

$$f_z(r_i) \sin \theta + x_i - b_z(r_i)/2 \leq x \leq f_z(r_i) \sin \theta + x_i + b_z(r_i)/2$$

$$r_i - b_r/2 \leq r \leq r_i + b_r/2 \quad (14)$$

实际模拟时 m 仍然按(12)式取值，并按此将模拟的所有点均加以考虑，并用描绘仪描绘出来，便是放大了 M 倍的数据模拟片。再经精缩 M 倍，便是一完整的数据片，这就是框图2（图3）的设计思想。

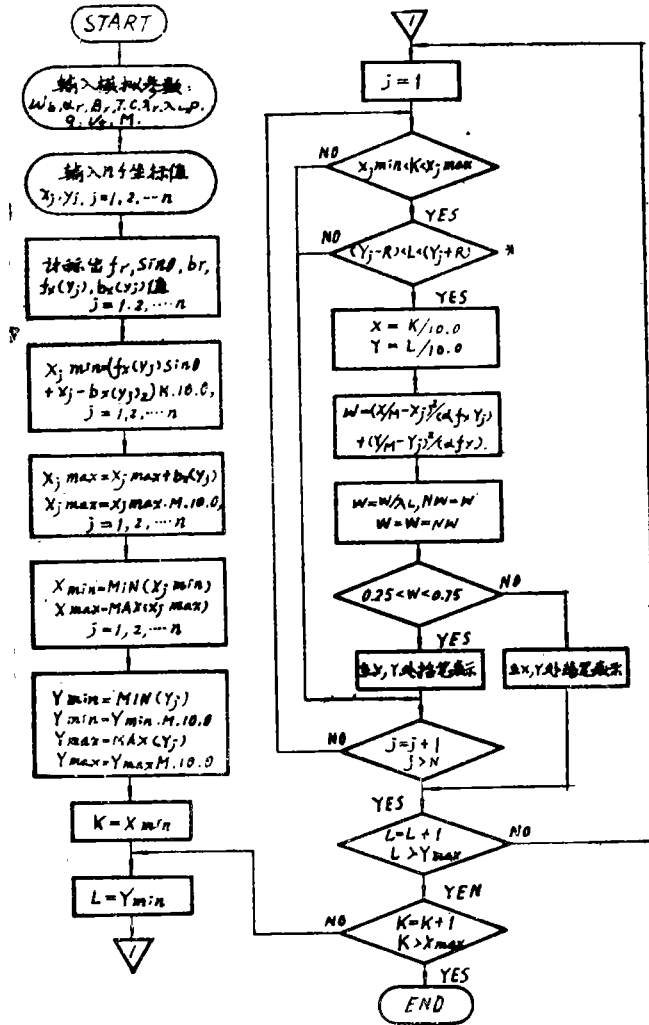


图3 框图2

四、实验结果及两个框图的比较

根据两个框图设计的程序均已在M—160 H计算机上投入使用，描绘仪幅宽270mm，步距为0.1mm，数据模拟片在描绘仪上放大 $M = 50$ 倍。先后模拟了数据片缩放比 $K = q/p = 15$ ， $K = 12$ 不同点距的数据片。

从图4和图5可直观的看到点距为0.04mm的数据模拟片和在光学相关器上处理的结果

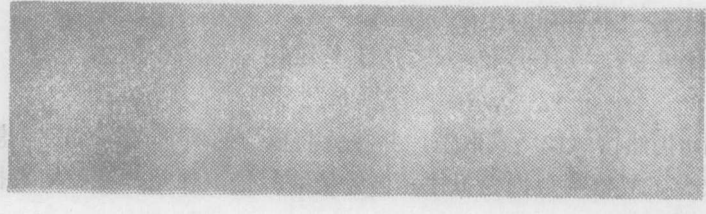


图4 计算机模拟SAR数据片, $K=15$, 两点间距为0.04mm目标点数 $N=3$



图5 再现图象(图4在光学相关器上处理的再现结果)

果, 从图5再现的目标图象可以看出, 方位维两个点目标能被分开, 而斜距维的两个点目标图象已变为一个大点, 没有被分开, 可见方位维分辨率高于斜距维分辨率。图6是点距为0.06mm的三个点目标的数据模拟片, 图7是图6在光学相关器上重现的结果, 从图7可以看出方位维两点及斜距维两点均能区分开来。由此可见, 方位分辨率为0.04mm, 斜距维分辨率为0.06mm。

比较根据两个框图设计的程序, 框图1程

序适合模拟三个点目标以下的数据模拟片, 因此程序的模拟时间是目标点数的倍数关系,

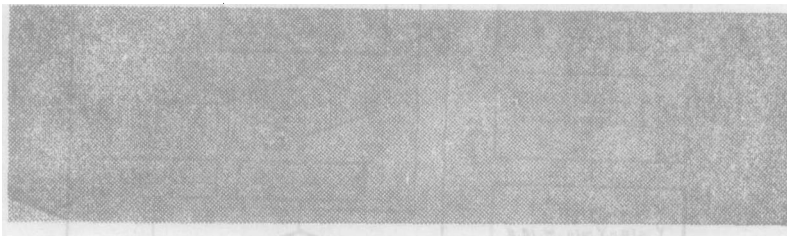


图6 计算机模拟 $N=3$ (三个点目标) 数据片, $K=15$, 两点间距为0.06mm

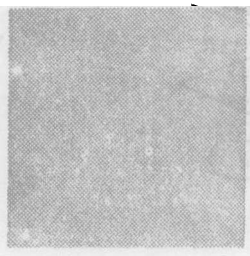


图7 再现图象 (图6经光学相关器处理的再现结果)

是随着点数 N 的增加而增加, 而框图2程序的模拟时间是随放大倍数的增加而增加, 它不依点数 N 变化。两个程序模拟三个点目标数据片的时间均在八小时左右, 可见多于三个点目标的模拟需用框图2的程序。

实验仅仅是初步的, 还有很不完善的地方。但以其初步的实验结果可见, 计算机模拟SAR数据片有以下特点:

1. 计算精度高, 点距精确。
2. 模拟灵活, 不受各种参数限制。
3. 实验周期短, 不象光学模拟那样需加工必须的光学器件。
4. 方法简便易行。

此工作曾得到金友、朱云青、董玉芝等同志的支持和帮助, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] A.K. Aggarwal et al., Simulation of SAR Data Film Using Holographic Techniques, Appl. Opt., 1978, 17, 987.
- [2] L.J. Cutrona et al., On the Application of Coherent Optical Processing Techniques to Synthetic-Aperture Radar, Proc. IEEE., 1966, 54, No. 8, 1026.
- [3] E.N. Leith, Optical Processing Techniques for Simulations Pulse Compression and Beam Sharpening, IEEE., 1968, Vol. AES-4, No. 6, 879.
- [4] A. Kozma et al., Tilted-Plane Optical Processor, Appl. Opt., 1972, 11, No. 3, 1766.
- [5] W.H. Lee, Milton O. Greer, Matched Filter Optical Processor, Appl. Opt., 1974, 13, No. 4, 925.
- [6] 金友, 蒲泽民, SAR数据片的相干光学模拟, 光学机械, 1979年, 第二期, 8.
- [7] J.W. 顾德门著, 詹达三等人译, 傅里叶光学导论, 科学出版社, 1979年.

Computer simulation for the Data Film of Synthetic Aperture Radar (SAR)

Li Mao yang

Abstract

The paper presents a mathematics model, program design and experiments of computer simulation for the data film of SAR. The results show that the method discussed here has many advantages such as high accuracy of calculation, accurate distance between subject points, no limitation by parameters, flexibility and simplicity. It is an indispensable experiment mean for testing optical processor to use data simulation film.