

一种合成孔径雷达用的光学处理器*

宋家骏 袁慧坤 王武萍 毛引芳

(中国科学院电子学研究所)

提 要

本文介绍由三个透镜组成的对合成孔径雷达数据进行现场处理的光学处理器。它具有轻便、灵活、容易调整、适应范围大和便于装拆的特点。

一、引 言

光学信息处理技术已成功地用于合成孔径雷达的数据处理。光信息处理可以进行二维的并行处理,它具有速度快、容量大、精度高、设备简单等优点。

合成孔径雷达数据在数学形式上与菲涅尔衍射全息图完全相同。但它又和一般用全息照相得到的全息图有很大的不同。第一个不同点在于合成孔径雷达数据是一个缩小了的全息图,并且在方位向和距离向缩小倍数不一样。第二个不同点在于,雷达数据胶片在方位向是真正的全息图,而距离向是应用线性调频形成的模拟全息图,也可以看成是多个距离门通道的并行记录。因此,合成孔径雷达数据是一种二维不对称的全息图。这种两个坐标方向上的不对称性,使它不能象一般全息图那样简单地重现图象,而必须用一个复杂的二维不对称的光学系统进行处理才能得到图象。

在合成孔径雷达数据的处理中,国外一般采用五透镜斜平面光学处理器^[1]。这种处理器结构复杂,并且需要防震性能好的工作台,不适于带到现场进行光学处理。我们为了能够在现场及时地对合成孔径雷达数据进行光学处理,研制了合成孔径雷达用的三透镜光学处理器。

二、光学处理器的原理

在雷达图象上看到的亮暗,反映的是目标散射的微波信号的强弱分布,而这个强弱分布是与目标对微波的散射率的分布成正比,亦即雷达图象是目标的散射率分布的函数 $\sigma_{(X,R)}$ 的图象。

假定雷达发射信号是一串具有矩形包络的线性调频脉冲,并且天线是均匀辐照,目标离开雷达的距离远大于合成孔径长度,则经过一些近似和略去一些无关的因子之后,雷达

* 1982年7月15日收到。

接收的信号可以表示为:

$$S(t) = \int_{\frac{c}{2}(t-\frac{\tau}{2})}^{\frac{c}{2}(t+\frac{\tau}{2})} \int_{X'-\frac{L_x}{2}}^{X'+\frac{L_x}{2}} \sigma(X, R) \exp[j2\pi f_0 t] \exp\left\{-j\left[\frac{2\pi}{\lambda_0 R}(X' - X^2) - \frac{4\pi\alpha_r}{c^2}(R' - R)^2\right]\right\} dX dR^{[1]*}, \quad (1)$$

式中, τ 为发射脉冲的宽度, f_0 为发射信号的中心频率, λ_0 为发射信号的中心波长, α_r 为发射信号的线性调频率, X 为目标方位坐标, R 为目标的距离坐标, X' 为雷达的方位坐标, R' 为电磁波脉冲中心的距离坐标, L_x 为合成孔径长度, c 为光速.

从式(1)可以看出, 雷达信号是 $\sigma_{(X,R)}$ 与一个二次相位函数的卷积, 同样式(1)也可以看成是 $\sigma_{(X,R)}$ 的非涅尔衍射积分或具有相位加权的傅里叶变换. 从数学上看, 成象处理就是从已知的 $S(t)$ 中解出 $\sigma_{(X,R)}$. 这个运算可以看作是解卷积、互相关、匹配滤波或加权的傅里叶变换中的任何一种. 这几种运算是完全等效的. 光学处理器就是完成这种运算的相干光模拟计算机, 所以又称为光学相关器.

当用相干准直光照射合成孔径雷达数据胶片时, 胶片会使相干光发生衍射, 而 +1 级 (或 -1 级) 衍射光形成两个焦平面: 方位焦平面和距离焦平面, 其焦距分别为:

$$F_a = \pm \frac{\lambda_0 R}{2P^2 \lambda_L}, \quad (2)$$

$$F_r = \pm \frac{c^2}{4\alpha_r q^2 \lambda_L}, \quad (3)$$

式中, λ_L 为处理用的相干光波长, P 为方位向比例尺, q 为距离向比例尺.

由于方位焦平面与 R 有关, 所以方位焦平面是倾斜的. 而光学处理器就要把倾斜的方位焦平面立直, 并与距离焦平面在同一成象面成象, 同时也把方位向的比例尺 P 变成与距离向比例尺 q 相同. 最后在图象平面上得到与地面目标分布形状相同的雷达图象.

三、三透镜光学处理系统原理

三透镜光学处理系统由两个相同的球面透镜和一个柱面透镜组成, 如图 1 所示. 球面透镜 L_1 和 L_2 组成距离望远镜, 透镜 L_3 是圆柱面透镜, 它能在方位向聚焦.

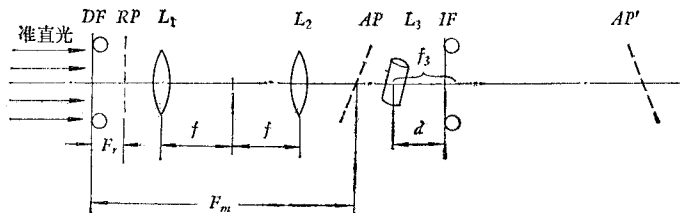


图 1 三透镜光学系统几何关系

Fig. 1 Geometry of three lens optical system

* 根据文献[1]推导得出.

我们考虑利用雷达数据胶片的 +1 级衍射光成像, 也就是利用距离和方位焦平面的实象成像的情况。

图 1 中 DF 为雷达数据胶片, RP 为距离焦平面, AP 为方位焦平面, IF 为成像平面, RP 的象与 IF 相重合. AP 的象为 AP' , 柱面透镜 L_3 将 AP' 重新成像到 IF 面上. 因此, 对 L_3 来说, 物距为 $(d + F_m - F_r)$, 象距为 d . 这时是以 L_3 为原点计算物象距的. 根据透镜成像公式有:

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{d + F_m - F_r} = \frac{1}{f_3}. \quad (4)$$

从式(4)可以得出:

$$d^2 + d(F_m - F_r) - f_3(F_m - F_r) = 0, \quad (5)$$

$$d = \frac{1}{2} \sqrt{(F_m - F_r)^2 + 4(F_m - F_r)f_3} - \frac{F_m - F_r}{2}. \quad (6)$$

对于方位焦平面上的一般情况:

$$d = \frac{1}{2} \sqrt{(F_a - F_r)^2 + 4(F_a - F_r)f_3} - \frac{F_a - F_r}{2}. \quad (7)$$

求出对应于 F_a 的最大值的 d_{\max} 和对应于 F_a 的最小值的 d_{\min} , 可算出柱面透镜 L_3 需要倾斜的角度:

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{d_{\max} - d_{\min}}{\Delta r} \right), \quad (8)$$

Δr 为距离向成像的宽度.

同样, 可以求出用 -1 级衍射光成像时的关系式:

$$d^* = \frac{F_m - F_r}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(F_m - F_r)^2 - 4(F_m - F_r)f_3}. \quad (9)$$

成像面中心部分的横向放大率为

$$M = \frac{d}{d + F_m - F_r}, \quad (10)$$

$$M^* = \frac{d^*}{F_m - F_r - d^*}. \quad (11)$$

普遍情况下, $F_a - F_r \gg f_3$, 即在方位焦距很长时, 式(7), (9), (10)和(11)可以近似地简写为:

$$d \approx f_3 - \frac{f_3^2}{F_a - F_r}, \quad (12)$$

$$d^* \approx f_3 + \frac{f_3^2}{F_a - F_r}, \quad (13)$$

$$M \approx \frac{f_3}{F_m - F_r + f_3}, \quad (14)$$

$$M^* \approx \frac{f_3}{F_m - F_r - f_3}. \quad (15)$$

在实际成像时, L_3 要根据聚焦情况进行调整, 所以精确计算没有多大必要. 用上面四个

近似公式进行估算也就可以了。

雷达数据胶片与 L_1 的距离并不严格要求等于 f (除了进行精确的频谱分析以外) 一般为了成象处理方便, 可尽量使数据胶片靠近 L_1 。这样就增大了图象胶片与 L_2 之间的距离, 从而给 L_3 提供了更大的变化范围, 使之更能适应雷达参数的变化, 并且提高了它的成象质量。为了保证成象, 对柱面透镜 L_3 的焦距和孔径有一定的要求。柱面透镜的长度应大于距离向的成象宽度, 其宽度则应大于或者接近等于 L_2/P , 但稍窄一些仍可使用。 f_3 的选择从三个方面考虑: (1) 由于要满足 $d < f \pm F_r$, 则 $f_3 < f$; (2) 从放大率方面考虑, 要尽量使图象上的纵横比得到纠正, 让 $M \approx \frac{1}{K}$, 这里 $K = q/P$ (雷达数据胶片的纵横比)。从式(14)和(15)可以得到:

$$f_3 = \frac{F_m - F_r}{K - 1}, \quad (16)$$

$$f_3^* = \frac{F_m - F_r}{K + 1}. \quad (17)$$

(3) 为了减小非线性误差, f_3 的数值不能太大, 而是越小越好。由于 K 通常大于 1, 所以在选择 f_3 时, 它可以小于计算值。因为从式(7)可以看到, d 与 F_a 是非线性关系。同时, 雷达数据胶片的距离坐标 r 与 F_a 是线性关系。所以, d 与 r 也是非线性的关系。使柱面透镜倾斜后 d 与 r 就是线性关系。但是, 倾斜的柱面透镜不可能对所有的 F_a 同时精确成象, 这就造成了方位成象的非线性误差。

从式(12)和(13)可见, $d-F_a$ 是双曲线关系。 F_a 的相对变化范围越大, 或 $f_3/F_a - F_r$ 值越大, 则非线性误差越大。因此, 从减小非线性误差来看, f_3 的值小一些是有利的。

四、三透镜光学处理器实践概说

我们研制的光学处理系统采用的是前述的三透镜光学处理系统。它只用了少量精度不十分高的透镜就获得了较好的图象, 并且有较大的适应范围。它的调整、使用都十分方便, 并且便于装拆。同时, 对工作条件没有特殊要求, 不需要特殊的防震, 恒温等设施, 此外成本也较低。适于在合成孔径雷达飞行试验的野外现场使用。

这种光学处理器的组成有: (1) 氩-氖激光器: 波长 6328 \AA , 功率 15 mW ; (2) 扩束-准直系统: 把激光束扩展为 $\phi 120 \text{ mm}$ 的平行光, 用光阑限制照射数据胶片的孔径; (3) 距离望远镜系统: 由一对焦距为 540 mm , 孔径为 120 mm 的球面透镜组成; (4) 空间滤波器: 置于频谱面的矩形孔径光阑; (5) 方位聚焦透镜: 是焦距为 322 mm , 孔径为 $60 \times 60 \text{ mm}$ 的柱面透镜; (6) 雷达数据胶片传动机: 片速在 $5-300 \text{ mm/s}$ 连续可调, 速度误差不大于 $\pm 1\%$; (7) 图象胶片传动机: 片速在 $0.6-6 \text{ mm/s}$ 连续可调, 速度误差不大于 $\pm 1\%$; (8) 成象隙缝: 可在 $0.05-2 \text{ mm}$ 范围内调整; (9) 伺服控制电路: 控制数据和图象胶片传动机的速度, 同步误差不大于 1% ; (10) 光具座: 由宽 200 mm , 长 4.5 m (分两段) 的槽钢做成。

从用我们研制的光学处理器所处理的雷达图象(见图 2)上看到: 除图象边缘部分以

外,在 80% 范围内分辨力不低于 15 对线/mm, 在比例尺为 1:150000 的图象上, 相当于雷达空间分辨力 $\leq 10\text{m}$.

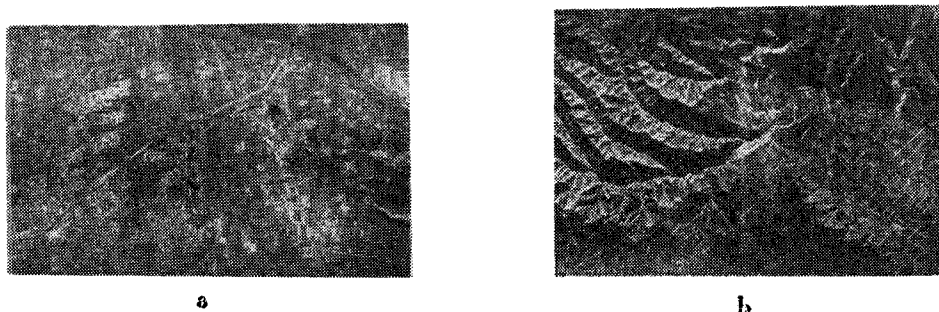


图 2 合成孔径雷达图象

(a) 西安市郊 (b) 冯家山水库以南

Fig. 2 Synthetic aperture radar images

(a) Suburb of Xian (b) On the south of Fengjiashan reservoir

五、三透镜光学处理器的使用情况

我们研制的光学处理器已在合成孔径雷达的飞行试验中得到了成功的应用。在 1979 年我国合成孔径雷达原理样机的飞行试验中, 用光学处理器处理出我国第一张合成孔径雷达图象。图象上可以看到山脉、河流、桥梁、机场等大目标。在 1980 年的合成孔径雷达性能样机的飞行试验中, 用它在试验野外现场及时对雷达数据胶片进行成象处理, 获得了全部雷达图象。图象较清晰, 方位分辨力达到 15m 左右。可以看清山脉河流、城镇、工厂、铁路、公路和田间小路, 也能分辨不同种类的农作物。具有一定的使用价值。

用光学处理器对雷达飞行数据胶片及时地进行频谱分析, 来研究雷达的工作状态和存在的问题。对保证雷达飞行试验的顺利进行起了重要作用。

从光学处理器的使用来看, 它的设计合理, 结构简单, 使用方便, 工作可靠, 是一套经济实用的光学处理器。用它处理的雷达图象质量可与圆锥透镜处理器相当^[2]。其结构却比圆锥透镜处理器简单, 适应性也比圆锥透镜处理器好, 特别是避免了圆锥透镜的加工困难。在精度方面它还不及斜平面光学处理器^[3], 但在简易灵活、通用性方面则可与斜平面处理器相比。

参 考 文 献

- [1] A. Kozma, E. N. Leith and N. G. Massey, *Appl. Opt.* **11**(1972), 1766.
- [2] E. N. Leith and A. L. Ingalls, *Appl. Opt.* **7**(1968), 539.
- [3] D. C. Robinson, et al., AD-732870, (1971).

AN OPTICAL PROCESSOR FOR SYNTHETIC APERTURE RADAR

Song Jiajun, Yuan Huikun, Wang Wuping, Mao Yinfang

(Institute of Electronics, Academia Sinica)

In the paper, a 3-lens optical processor is described. Its features are quick and easy adjustment, wide adaptability, easy assembly and disassembly. It is a good optical processor for processing the synthetic aperture radar signal in the field.