

# 逆合成孔径雷达 (ISAR) 及其处理技术

李 骏

**摘要:** 本文从多普勒成像原理出发, 讨论了几种典型运动形式的运动误差补偿问题, 给出了完善的光学处理系统, 实验结果证明是可行的, 另外, 我们还提出了实时处理方案。

## 一、概 述

逆合成孔径雷达 (ISAR) 是一种全天候微波成像技术。国际上对 ISAR 的研究始于六十年代, 七、八十年代已用 ISAR 对飞机和船舰成像, 并试图对卫星成像。在我国, 只是最近几年才开展这方面的研究, 长春光机所从1983年就着手研究 ISAR 及其光学处理技术。在我们的研究工作中, 由于没有真实的 ISAR 数据可用, 我们对接近实际空间轨道的三个旋转点目标进行了模拟实验, 达到了 2 m 的方位维分辨率, 对影响分辨率提高的运动误差问题, 我们作了较为深入的研究, 提出了光学补偿方案, 并得出了较好的实验结果。

## 二、距离-多普勒成像原理<sup>[1]</sup>

距离-多普勒系统的基本任务是估价空间目标的相对反射率分布, 并形成二维图像。其原理是雷达重复发射调频脉冲信号, 同时接收、处理由目标返回的信号, 以获得目标上每一散射点的距离和径向速度信息, 从而得到与物体每个散射点相联系的时间延迟和多普勒频移所确定的高分辨率图像。在 ISAR 中, 距离维靠脉冲压缩技术来分辨, 方位维分辨率利用目标与雷达的相对运动来获得。图 1 是雷达与旋转运动目标的几何关系图。

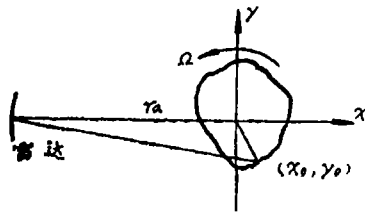


图 1 雷达与目标几何关系图

一般地,  $R^2 \gg x_0^2 + y_0^2$ , 这样  $R$  可近似表示成:

$$R = R_0 + x_0 \sin \Omega t + y_0 \cos \Omega t \quad (1)$$

目标返回信号的多普勒频率为:

$$fd = 2/\lambda \quad dR/dt = 2x_0 \Omega/\lambda \cos \Omega t - 2y_0 \Omega/\lambda \sin \Omega t = 2x_0 \Omega/\lambda \quad (2)$$

注: 本文作者的导师为胡家陞

于是我们有:  $\Delta F d = 2 \Delta x_0 \Omega / \lambda$

所以方位维分辨率  $\Delta x_0 = \lambda / 2 \Omega T = \lambda / 2 \theta$  (3)

设雷达发射的信号是线性调频脉冲:

$$P_n(t) = a(t - nT) \exp\{i2\pi [f_0 t + a/2(t - nT)^2]\} \quad (4)$$

式中  $a(t)$  为脉冲振幅加权,  $a$  为线性调频速率,  $1/T$  为脉冲重复频率,  $f_0$  为载波频率。从目标返回的信号为:

$$S_{nr}(t) = \sigma_r(x_0, y_0) a(t - nT - 2R/c) \exp\{i2\pi [f_0(t - 2R/c) + a/2(t - nT - 2R/c)^2]\}$$

式中  $\sigma_r(x_0, y_0)$  是目标在  $(x_0, y_0)$  处的复反射率密度。

如果我们选用的参考信号为:

$$\exp\{-i2\pi [f_0(t - 2Ra/c) + a/2(t - nT - 2Ra/c)^2]\} \quad (5)$$

使返回信号与参考信号混合, 这样, 经过简单的推导可以得到接收信号的形式为

$$S_n(t) = \iint \sigma_r(x_0, y_0) a(t) \exp\{i2\pi (2/\lambda + 2at/c) [\tilde{x}_0 \sin \Omega t + y_0 \cos \Omega t]\} dx_0 dy_0 \quad (6)$$

式中  $\lambda = c/f_0$ ,  $\tilde{t} = t - nT - 2Ra/c$

距离——多普勒信号通常在直角坐标格式或极坐标格式下记录和处理。用所得到的返回信号调制 CRT 阴极射线管扫描点的强度, 每个返回脉冲被顺序地记录在运动的胶片上, 胶片记录的空间信号为:

$$S_r(x, y) = A_r(y) \iint \sigma_r(x_0, y_0) \exp\{i2\pi (2/\lambda + 2ay/cv_s) [\tilde{x}_0 \sin(\Omega x/v_s) + y_0 \cos(\Omega x/v_s)]\} dx_0 dy_0 \quad (7)$$

式中  $A_r(y)$  是与  $a(\tilde{t})$  有关的振幅加权;  $x = v_s t$ ,  $y = v_s \tilde{t}$  是胶片坐标,  $v_s$  是输片速度,  $v_s$  是 CRT 扫描速度。如果采用小孔径处理信号, 在一些近似下有:

$$S_r(x, y) = A_r(y) \iint \sigma_r(x_0, y_0) \exp\{i(4\pi/\lambda)y_0\} \exp\{i2\pi [(2\Omega/\lambda v_s)x_0 + (2a/cv_s)y_0]\} dx_0 dy_0 \quad (8)$$

可见, 记录信号  $S_r(x, y)$  可近似表示为目标反射率函数的傅氏变换。通过对  $S_r(x, y)$  进行逆傅立叶变换可获得由反射率密度表示的目标图像。

如果我们采取极坐标系  $r = \lambda/2$ ,  $\theta = \pi/2 - \Omega t$  来记录信号, 经过前面类似的处理, 记录的空间信号可表示为:

$$S_r(r, \theta) = A(r) \iint \sigma_r(r_0, \theta_0) \exp\{i(4\pi a/cv_s) r r_0 \cos(\theta - \theta_0)\} dr_0 d\theta_0 \quad (9)$$

$S_r(r, \theta)$  是  $\sigma_r(r_0, \theta_0)$  典型的两维傅立叶变换。

### 三、模拟实验及其结果

在直角坐标记录格式下, 由 (7) 式可得到  $S_r(x, y)$  的等相位线为:

$$(a + by) = (2n\pi/r_0) \sec[\Omega x/v_s - \arctan(x_0/y_0)] \quad (10)$$

式中  $a = 4\pi/\lambda$ ,  $b = 4\pi a/cv_s$ ,  $r_0^2 = x_0^2 + y_0^2$  (10) 式所表示的是一组余割曲线。

在极坐标格式下, 由 (8) 式  $S_r(r, \theta)$  的等相位线为:

$$(4\pi/cv_s) [x_0 x + y_0 y] = 2n\pi \quad (11)$$

(11) 式所表示的是一组等间隔的直线。

ISAR整个成像过程可以用模拟实验来验证<sup>[2], [3]</sup>。实验中, 我们用 IBM PC 微机 和 DMP-41描绘仪模拟了运动参数接近实际空间轨道的三个旋转点目标, 用光学系统对所制作的数据片进行傅立叶重构和处理, 得到了较好的目标图像。限于篇幅, 实验结果图从略。

#### 四、运动补偿问题的研究

在 ISAR 中, 高的方位分辨率依赖于目标与雷达平台之间的相对旋转运动, 但这些有效的旋转常伴随着不期望的运动, 使  $R\alpha$ ,  $\Omega$ ,  $r_0$  不再是常量。这些量的变化将引入一些附加相位, 它们引起像散、离焦、线性偏离等像差, 使分辨率降低, 必须予以补偿。实际上, ISAR 最初的处理必须进行多种运动补偿, 使补偿成理想的转台成像形式 (即物体绕固定中心作匀加速圆运动)。要对目标的附加运动进行补偿, 首先必须正确估价目标的运动情况, 估价各个参数的变化情况。然而被测目标的运动一般是难以预知的, 要准确、实时地估计目标的运动非常困难, 特别是当目标作非常规运动时, 已不再能看成刚体, 旋转轴的取向和各个运动参量将出现不可预测的变化, 这将严重影响成像效果, 甚至不能成像。

如果目标的运动形式比较简单, 如运动参量  $\Omega$ ,  $r_0$  的变化可用简单的函数表达, 补偿起来就方便得多。实验中, 我们对下面介绍的几种典型的运动形式作了初步探讨, 获得了较为满意的补偿结果。

(1) 散射点的角速度呈线性变化, 即  $\Omega = \Omega_0 + At$  -  $A$  是很小的常数

(2) 旋转角速度有一正弦变化, 即  $\Omega = \Omega_0 (1 + A \sin \omega t)$

(3) 旋转半径具有一线性增量, 即  $r = r_0 (1 + At)$

(4) 散射粒子受到外界干扰, 在其平衡位置附近作简谐振动, 即  $r = r_0 (1 + A \sin \omega t)$

对于更复杂的运动形式, 光学补偿比较麻烦, 我们拟采用全息的方法进行补偿。考虑到实时性与灵活性, 我们也可以采用旋转双反射镜的办法来补偿部份误差。

#### 五、实验结果分析与初步探讨

(1) 目前的讨论中, 大多是从层析和距离-多普勒的角度来描述 ISAR 成像, 它们都是把三维目标简化成二维成像。实际上, ISAR 也可以对三维目标成像, 只是在处理上存在一些困难。

(2) 由我们的实验结果可以看出: 直角坐标记录格式下记录的空间信号  $S_r(x, y)$  的等相位线是一组余割曲线, 只有在较小的处理孔径内, 其调制才可以看作直线衍射光栅, 诸如离焦、像散等像差才能被忽略。如果处理孔径加大, 由于等相位线的弯曲带来了相位差, 限制了由傅立叶变换处理获得的分辨率。在极坐标系统下处理信号就基本不存在这个问题, 由于极坐标记录系统下的等相位线是一组直线, 理论上可获得很高的分辨率。

(3) 为了使图像结构均匀、清晰、最好使两维分辨率相等。而实际目标的运动, 不仅不能保持两维分辨率相等, 而且方位分辨率在运动过程中也可能是变化的。

(4) 在直角坐标系统下记录的数据片, 两维焦距一般是不等的, 因而, 处理时必须对这种比例尺畸变进行校正, 以恢复两维的正确比例。

(5) 在ISAR中,影响距离维分辨率的一个重要因素是发射带宽,影响方位维分辨率的因素有很多,如发射波长,合成孔径的大小,运动误差等。

ISAR可以对空间飞行目标(如飞机,导弹等)高分辨率成像,这对军事侦察、战略防御都非常有用,其分辨率可以与光学成像相媲美,并且是全天候(时)的,从而显示出巨大的优越性。国内外都不惜投入大量的人力、物力来竞相发展ISAR技术,作进一步的研究是很有意义的。

#### 参 考 文 献

- [1] Jack L. Walker, IEEE Trans. Aerosp. Electron Syst., Vol. Aes-16, No. 1 Jan., 1980, p23
- [2] J. S. Hu et. al., SPIE, 388, 1983, p171-175
- [3] J. S. Hu et. al., SPIE, 437, 1983, p191-196

## ISAR and Its Processing Technique

Li Jun

#### Abstract

According to the Range-doppler imaging principle, optical compensation of motion error for several typical motion from has been discussed. The scheme of perfect optical processing system has been given and its effet has been demonstrated experimently. In addition, the scheme of real-time processing has been presented.