

ISAR 中运动补偿问题的研究

李 骏 赵宝庆 邹振书 胡家陞

(中国科学院长春光学精密机械研究所)

提 要

运动补偿是提高 ISAR 分辨率的关键技术。本文从距离-多普勒成像原理出发,对几种典型运动误差的补偿问题作了有益的探讨,并给出了相应的光学补偿方案和实验室处理系统,获得了较好的实验结果。同时,讨论了一般运动误差的补偿方案及实时处理的可行性。

关键词: 逆合成孔径雷达 (ISAR) 运动补偿图像处理。

一、距离-多普勒成像原理

距离-多普勒系统的基本任务是估价空间旋转目标的相对反射率分布,并形成二维图像。其原理是:雷达发射重复脉冲信号,同时接收处理由目标返回的信号,从而得到由与物体上每个点相联系的时间延迟和多普勒频移所确定的图像^[1]。

如图 1, Ω 为目标点的旋转角速度, (x_0, y_0) 为目标点的初始位置。通常 $R_0^2 \gg x_0^2 + y_0^2$, 从而 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移为:

$$\begin{aligned} f_d &= \frac{2}{\lambda} \frac{dR}{dt} \\ &= \frac{2x_0}{\lambda} \Omega \cos \Omega t - \frac{2y_0}{\lambda} \Omega \sin \Omega t \\ &\doteq 2x_0 \Omega / \lambda_0 \end{aligned} \quad (2)$$

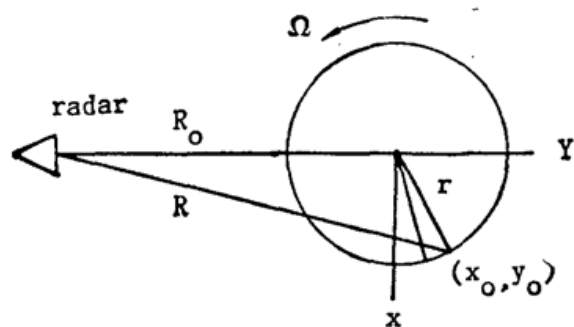


Fig. 1 Radar-object geometry

方位维分辨率:

$$\Delta x = \lambda / 2\Omega T \doteq \lambda / 2\theta, \quad (3)$$

式中, $\theta = \Omega T$ 为合成角孔径。

设雷达发射的信号是线性调频脉冲:

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

其中 $a(t)$ 为脉冲振幅加权, γ 为线性调频速率, $1/T$ 为脉冲重复频率, f_c 为载波中心频率。经过简单的推导可得到雷达接收的返回信号为:

$$\begin{aligned} S_n(t) &= \iint \sigma_r(x_0, y_0) a(\tilde{t}) \exp [i2\pi (2/\lambda + 2\gamma\tilde{t}/c) \\ &\quad \times (x_0 \sin \Omega t + y_0 \cos \Omega t)] dx_0 dy_0 \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $\sigma_r(x_0, y_0)$ 是目标在 (x_0, y_0) 处的复反射率密度, 积分在整个目标范围内进行。 $\lambda = c/f_0$, $\tilde{t} = t - nT - 2R_0/c$ 。

对距离-多普勒信号的处理通常可在直角坐标或极坐标格式下进行。这里以直角坐标记录格式为例, 用所得到的雷达信号调制阴极射线管扫描点的亮度, 通过成像系统把每个雷达脉冲并排地记录在以一定速度运动的胶片上。这样, 胶片记录的空间信号为:

$$S_r(x_p, y_p) = A_r(y_p) \iint \sigma_r(x_0, y_0) \exp \left\{ i2\pi \left(\frac{2}{\lambda} + 2\gamma y_p/cv_s \right) \right. \\ \left. \times [x_0 \sin(\Omega x_p/v_f) + y_0 \cos(\Omega x_p/v_f)] \right\} dx_0 dy_0 \quad (6)$$

式中 $A_r(y_p)$ 是与 $a(\tilde{t})$ 有关的振幅加权; $x_p = v_f t$, $y_p = v_s \tilde{t}$ 是胶片坐标; v_f 是输片运动速度, v_s 是 ORT 的扫描速度。如果采用小孔径处理, 在一些近似下有:

$$S_r(x_p, y_p) \approx A_r(y_p) \iint \sigma_r(x_0, y_0) \exp [i(4\pi/\lambda)y_0] \\ \times \exp \{ i2\pi [(2\Omega/\lambda v_f)x_p x_0 + (2\gamma/cv_s)y_p y_0] \} dx_0 dy_0, \quad (7)$$

可见, 记录信号 $S_r(x_p, y_p)$ 可近似表示为目标反射率函数的傅里叶变换。通过对 $S_r(x_p, y_p)$ 进行逆傅里叶变换就可获得由反射率密度函数表示的目标图像。

二、运动补偿问题的研究

在 ISAR 成像中, 为了产生高的方位维分辨率, 需要目标相对雷达作旋转运动。在这种情况下, 要实现合成孔径成像, 所要满足的基本条件是: 在相干积分时间内, 旋转中心到雷达平台的距离 R_0 是定值; 目标散射点的旋转半径 r_0 是定值; 其旋转角速度 Ω 是常数 (即典型的转台运动形式)^[2]。而实际中, 它们往往都是变化的, 是时间 t 的函数。这些量的变化将引入一些附加相位, 如像散、离焦、线性偏离等, 使分辨率降低, 应该予以补偿。一般地, ISAR 的运动补偿可以分为两种类型: 一类是旋转中心变化的补偿问题。补偿的方法有很多种, 例如 (1) 以特殊散射点作基准的方法; (2) 跟踪目标的几何中心迹线。这种类型的问题大多是用数字处理的方法, 把 R_0 变化的信息反馈到参考信号中, 修改参考信号, 以消除附加相位。另一类是散射点本身运动参数变化的补偿问题。实验中, 我们对下面介绍的几种典型的运动形式作了探讨, 并获得了较好的光学补偿结果。

1. 散射点角速度呈线性变化, 即 $\Omega = \Omega_0 + \Delta t$, Δ 是很小的常数

由 (7) 式知, 这种运动形式下的附加相位是:

$$\phi_0 = (4\pi\Delta/\lambda v_f^2) x_0 x_p^2 \quad (8)$$

ϕ_0 在光学上表现为离焦, 可以采取沿光轴移动柱面镜 L_1 的方法补偿。另一方面, 由于 ϕ_0 是柱面变换因子的形式, 也可以附加焦距为 $f_0 = \lambda_r v_f^2 / 4\Delta \lambda_0 x_0$ 的柱面镜补偿。其中 λ_r 为载波波长, λ_0 为光学处理时使用的激光波长。具体的光学处理器如图 2 所示。

2. 旋转角速度呈现正弦变化的形式, 即

$$\Omega = \Omega_0 (1 + A \sin \omega t),$$

这种运动状态下的附加相位是^[3]:

$$\phi_0 = 4\pi A \Omega_0 x_p \sin \omega x_p / v_f \omega$$

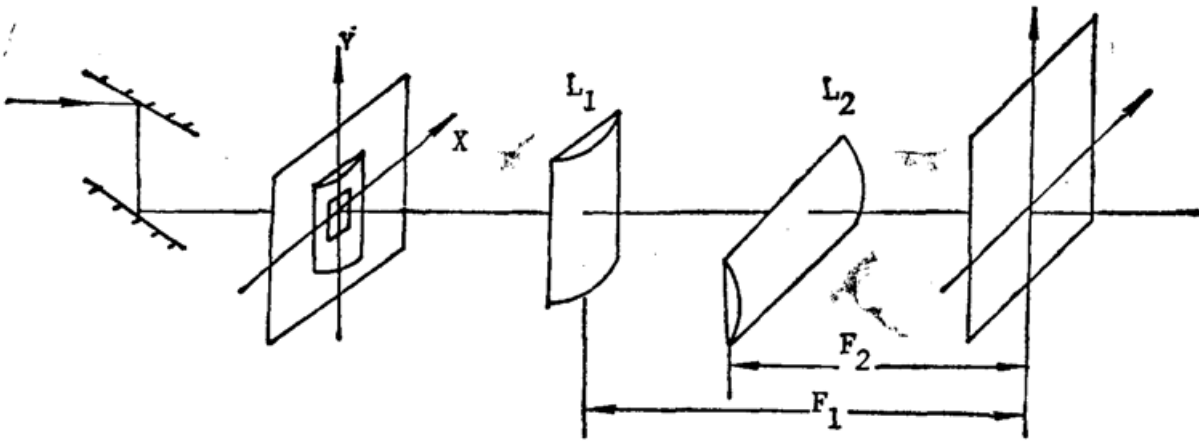


Fig. 2 ISAR optical processor considering motion compensation

假定这种正弦变化是缓慢的, 这样, 如果在 $x_p = y_p = 0$ 附近的小孔径上处理信号, ϕ_e 可近似表达为:

$$\phi_e = (4\pi A\omega\Omega_0/\lambda v_f^2) x_0 x_p^2 \quad (9)$$

ϕ_e 在光学上表现为离焦, 可采用沿光轴移动 L_1 或附加焦距为 $f_e = \lambda_r v_f^2 / 4A\Omega_0 \omega \lambda_e x_0$ 的柱面镜补偿。

3. 旋转半径具有一线性增量的情形, 即

$$r = r_0(1 + At),$$

这种运动状态下的附加相位是:

$$\phi_{e1} = (2Ar/cv_s v_f) y_0 y_p x_p, \quad (10)$$

$$\phi_{e2} = (2A\Omega/\lambda v_f^2) x_0 x_p^2, \quad (11)$$

$$\phi_{e3} = (2A/\lambda v_f) y_0 x_p. \quad (12)$$

ϕ_{e1} 表现为像散, 可采用旋转柱面镜 L_2 的方法补偿。 ϕ_{e2} 表现为离焦, 可以采用沿光轴移动 L_1 或附加一个焦距为 $f_e = \lambda_r v_f^2 / \lambda_e 4A\Omega x_0$ 的柱面镜补偿。 ϕ_{e3} 表现为线性偏离, 可以采用旋转双平面镜或附加光楔的方法补偿。

4. 散射粒子在平衡位置附近作简谐振动的情形, 即 $r = r_0(1 + A \sin \omega t)$

同样假定这种正弦变化是缓慢的, 这样如果在 $x_p = y_p = 0$ 附近的小孔径上处理信号, ϕ_e 就可近似表示为:

$$\phi_{e1} = (2\gamma A\omega/c\sigma_s v_f) y_0 x_p y_p, \quad (13)$$

$$\phi_{e2} = (2\Omega A\omega/\lambda v_f^2) x_0 x_p^2, \quad (14)$$

$$\phi_{e3} = (2A\omega/\lambda v_f) y_0 x_p. \quad (15)$$

ϕ_{e1} 表现为像散, 可以采用旋转柱面镜 L_2 的方法补偿。 ϕ_{e2} 表现为离焦, 可以采用沿光轴移动 L_1 或附加一焦距为 $f_e = \lambda_r v_f^2 / \lambda_e 4\Omega A\omega x_0$ 的柱面镜补偿。 ϕ_{e3} 表现为线性偏离, 可以采用旋转双平面镜或附加光楔的方法补偿。

对于一般运动形式的补偿问题, 由于光学元件本身的限制, 补偿起来就比较困难, 为此提出了全息补偿方法。

我们知道, ISAR 不是记录物光波本身, 而是记录物波的空间频谱(远距离衍射场), 或者说是记录它的傅里叶变换。因而, 得到的数据片实际上就是目标的傅里叶变换全息图。这样, 如果在返回信号中存在相位误差, 就可以通过制作全息补偿片的方法来补偿。具体方

法有两种:

(1) 设 ϕ 是没有运动误差时的相位项, ϕ_e 是由于附加运动引起的相位变化, 则原数据片的等相位线为:

$$\phi + \phi_e = n \cdot 2\pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

我们制作一个全息补偿片

$$-\phi_e = n \cdot 2\pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

两者叠加处理的结果, 消除了附加相位 ϕ_e 。实验中, 应用这种方法对“斜距走步”像差进行了补偿, 结果如图 3 所示。

(2) 全息补偿的另一种方法是制作一个全息补偿片:

$$\phi - \phi_e = n \cdot 2\pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

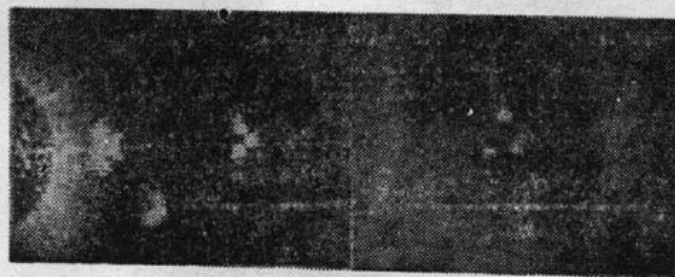
使之与原数据片叠加处理, 结果也消除了附加相位 ϕ_e , 只是得到的图像在空间上有一个缩放因子。在光学上, 通过简单的变换就可恢复原图像。实验中, 用这种方法对运动形式为 $r = r_0(1 + A \sin \omega t)$ 进行了补偿, 结果如图 4 所示。



(a) (b)

Fig. 3 Holographic compensation result with "range walk"

对于一般运动形式 (特别是引起多普勒频移产生附加变化的情形) 的补偿问题, 也可以采取旋转双反射镜的方法。设没有运动误差时的多普勒频移为 f_d , 由于附加运动误差的存在, 使多普勒频移从 f_d 变为 $f_d + \Delta f_d$, 频谱位置发生了变化, 通过旋转双反射镜系统可将变化的量修正过来, 再配上合适的电子伺服系统可基本上实现实时补偿。图 5 就是实现这种设想的实验装置图。



(a) (b)

Fig. 4 Holographic compensating result with $r = r_0(1 + A \sin \omega t)$

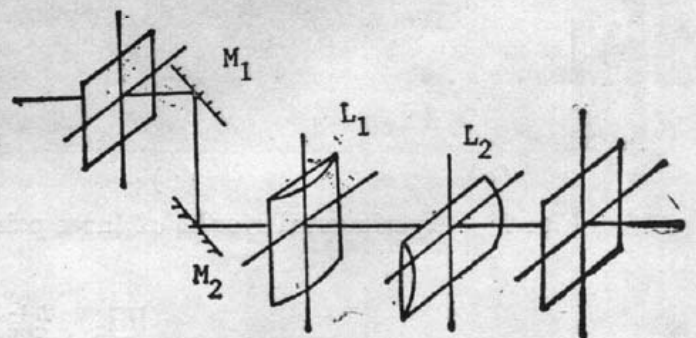


Fig. 5 Compensating system with rotating double-mirror

(a) non-compensated image; (b) compensated image

另外, 根据两维信号的可分离特性, 可用光电方法实现实时补偿^[4]。用这种方法处理合成孔径雷达(SAR)数据, 取得了满意的实验结果。基于 ISAR 和 SAR 在原理上的一致性, 我们在 Psaltis 等人提出的 SAR 数据实时处理装置的基础上, 提出了 ISAR 数据实时补偿方案, 在理论上是可行的。具体的处理系统如图 6 所示。

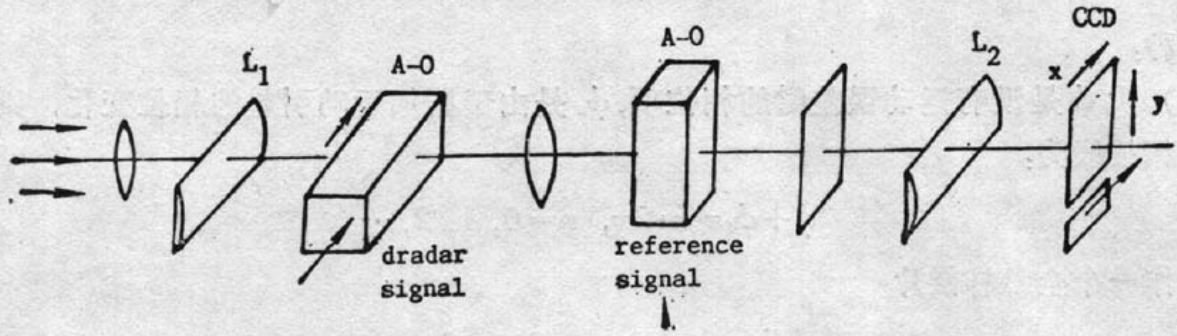


Fig. 6 Opto-electronic real-time processing system for ISAR

三、实验结果

ISAR 的整个成像及补偿过程可用模拟实验来验证^[5~7]。在实验中,用 IBP-PO 微机 和 DMP-41 描绘仪模拟了接近实际空间轨道的三个旋转点目标,用光学系统进行重构和处 理,得到了较好的目标图像。四种情况下的实验结果如图 7 的 (a)~(h) 所示。其中 (a)、 (b) 为 $\Omega = \Omega_0 + \Delta t$ 时的未被补偿和补偿后的图像; (c)、(d) 为 $\Omega = \Omega_0(1 + A \sin \omega t)$ 时的未 被补偿和补偿后的图像; (e)、(f) 为 $r = r_0(1 + \Delta t)$ 时的未被补偿和补偿后的图像; (g)、(h) 为 $r = r_0(1 + A \sin \omega t)$ 时的未被补偿和补偿后的图像。

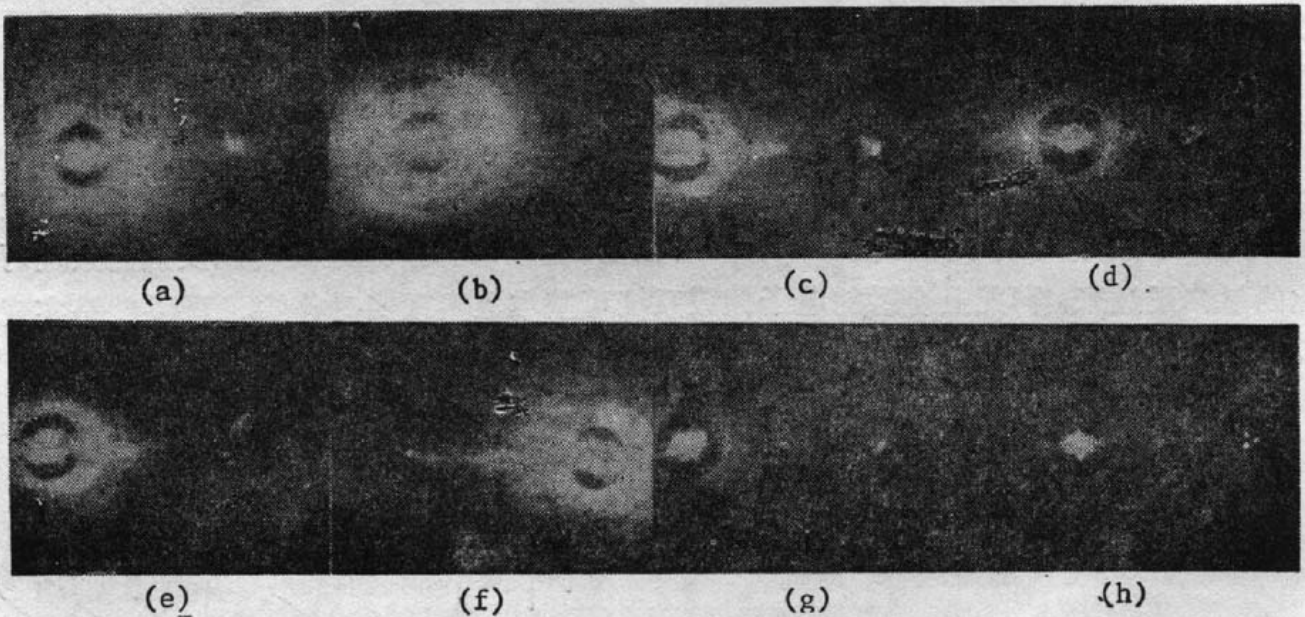


Fig. 7 Experimental results of three point-targets before and after compensation

四、结 论

1. 由于实际目标的运动形式与距离-多普勒原理的要求有偏离,使运动补偿成为 ISAR 技术中的关键环节。原理上,只要是能测量出的误差,都可以利用光学的、光电混合的 或数字的方法进行补偿。然而在实际中,对运动误差的准确估计是比较困难的,这就使得 ISAR 的运动补偿有相当的难度。

2. 光学处理成本低,功耗小,可进行并行运算,使用方便。对一些特定运动形式的补 偿,可以获得较为满意的结果。但对于一般运动形式的误差补偿,用光学方法就存在一些困 难。

3. 近几年来,数字处理技术发展很快,显示出了巨大的应用潜力。特别是近期在光源、空间光调制器(SLM)和探测器件等方面的飞速发展,为 ISAR 数据的光电实时处理开辟了切实可行的途径。

参加本项工作的还有于前洋、侯澍等。

参 考 文 献

- [1] Jack. L. Walker; *IEEE Trans. Aerosp. Electron syst.* AES-16, No. 1 (Jan), 1980.
- [2] 胡家陞等;私人通信。
- [3] 李骏;私人通信。
- [4] Demetri Psaltis; "Acousto-optic SAR Processors", *Optical signal processing*, p. 191.
- [5] Hu Jia-Sheng *et al.*; "Optical Processing of Coherent Doppler Tomograms", *Proc. SPIE* Vol. 388 (1983).
- [6] Hu Jia-Sheng; "Computer-Generated Holograms for Simulating Experiments of Coherent Doppler Tomography", *Proc. SPIE*, Vol. 437 (1983).
- [7] 《光学机械》,1975 年第一期“光学信息处理专集”。

Discussion on motion compensation in ISAR

LI JUN, ZHAO BAOQING, ZOU ZHENSHU, AND HU JIASHENG
(Changchun Institute of Optical and Fine Mechanics Academia Sinica)

(Received 8 November 1989; revised 11 May 1990)

Abstract

Motion compensation is a key technique for improving ISAR resolution. Based on Range-Doppler imaging principle, optical compensation techniques for several typical motion errors are discussed. Some optical compensation methods and processing systems are given. The experimental results are demonstrated. Several compensation methods for general motion error and opto-electronic processing techniques are presented.

Key words: ISAR motion compensation image processing.