

# 同时距离对准和相位补偿

余志舜 朱兆达

(南京航空航天大学4系, 南京, 210016)

SIMULTANEOUS RANGE REALIGNMENT AND PHASE COMPENSATION

She Zhishun, Zhu Zhaoda

(Dept. of 4th, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016)

**摘要** 在 ISAR 距离对准频域法的基础上, 提出了一种新的 ISAR 运动补偿法。它将距离对准和相位补偿同时进行, 因而能够简化运动补偿环节, 减少运动补偿计算量。从理论上证明了所采用的相位补偿法与多普勒中心跟踪法是等效的。最后利用 ISAR 外场实测数据和微波暗室数据进行了验证, 并且考察了所述方法的噪声性能。

**关键词** 运动补偿, 相位补偿, 距离对准

**中图分类号** V243.12, TN957.151, TN957.152

**Abstract** A new motion compensation approach of ISAR is developed based on the frequency domain method of range realignment which is able to perform range realignment and phase compensation simultaneously. Consequently, the proposed approach can reduce the complexity and computational load of motion compensation of ISAR. It is proved that the scheme of phase compensation is virtually equivalent to the track2Doppler2centroid method. The proposed approach is used to process the live data of ISAR and the real data of microwave anechoic chamber. The results show that the proposed approach is correct and effective.

**Key words** motion2compensation, phase2compensation, range dignment

逆合成孔径雷达 (ISAR) 是一种成像雷达。它能够重建非合作雷达目标散射率的空间分布, 是实现雷达目标识别的有效途径, 因而受到了国内外雷达界的高度重视。

雷达目标相对于雷达的运动, 可以分解为雷达目标绕自身参考点的转动和其参考点相对于雷达的轨道运动。其中只有雷达目标绕其参考点的转动对成像有用, 目标参考点的轨道运动必须在成像处理之前补偿干净, 否则将影响目标像的重建。因此运动补偿是实现 ISAR 成像的关键。ISAR 运动补偿一般分两步进行: 第一步是距离对准; 第二步是相位补偿。实现距离对准可采用散射点基准法、频域法和空域法<sup>[1]</sup>。完成相位补偿的方法有散射点基准法、多普勒中心跟踪法<sup>[2]</sup>和轨道拟合法<sup>[3]</sup>。上述方法的共同缺陷在于将距离对准和相位补偿独立分开进行。

## 1 同时距离对准和相位补偿

首先分析一下距离对准的频域法<sup>[1]</sup>。假设  $f_{t_1}(r)$  和  $f_{t_2}(r)$  为相邻脉冲复回波信号;  $r$  为距离变量。相邻回波信号  $f_{t_1}(r)$  和  $f_{t_2}(r)$  存在两方面的差异: ① 距离偏移; ② 由于目标中心运动和目标视角变化引起的相位变化。其中目标中心运动引起的相位因子与  $r$  无关, 用

1993年12月30日收到, 1994年4月14日收到修改稿

国家863计划和航空科学基金资助课题

$\exp\{jU(t_1, t_2)\}$  表示。如果方位向采样率 (即 PRF) 很高或者目标距离雷达较远, 那么在相邻回波信号间隔内视角变化引起的相位变化可忽略, 因而有关系式

$$f_{t_1}(r) = \exp\{jU(t_1, t_2)\} f_{t_2}(r - \Delta r) \quad (1)$$

其中  $\Delta r$  为距离对准所要确定的偏移量。将式(1)对  $r$  做傅氏变换得

$$F_{t_1}(f) = \exp\{jU(t_1, t_2)\} F_{t_2}(f) \exp\{-j2\pi f \Delta r\} \quad (2)$$

设  $U_1(f)$  和  $U_2(f)$  分别为  $F_{t_1}(f)$  和  $F_{t_2}(f)$  的相位部分, 则有

$$\angle U_{1,t_2}(f) = U_1(f) - U_2(f) = \exp\{jU(t_1, t_2)\} \exp\{-j2\pi f \Delta r\} \quad (3)$$

式(3)对  $r$  进行傅氏反变换有

$$\begin{aligned} F^{-1}\{\angle U_{1,t_2}(f)\} &= F^{-1}\{\exp[jU(t_1, t_2)] \exp[-j2\pi f \Delta r]\} \\ &= \exp\{jU(t_1, t_2)\} \Delta(r - \Delta r) \end{aligned} \quad (4)$$

两边取模值得

$$|F^{-1}\{\angle U_{1,t_2}(f)\}| = \Delta(r - \Delta r) \quad (5)$$

根据上述推导, 距离偏移  $\Delta r$  可以如下估计: 首先求得相邻回波信号的傅氏变换, 并保留相位部分, 然后求出其相位差, 最后求相位差的傅氏反变换, 并取模值。由模值的峰值位置可以估计出  $\Delta r$ , 从而完成距离对准。

在完成距离对准后, 通常需要采用相位补偿法来确定相邻脉冲间目标中心运动引入的相位因子。在深入研究的基础上, 发现距离对准频域法中已经含有该相位因子, 因而不需要采用其它相位补偿法来计算目标中心运动引入的相位因子。频域法中的相位因子  $\exp\{jU(t_1, t_2)\}$  可用来估计目标中心运动引入的相位因子, 可以证明它与多普勒中心跟踪法计算出的相位因子相等。因此依次叠加相邻回波间的相位因子, 可求得各次回波中目标中心的相位因子, 即

$$\exp\{jU_2\} = \exp\{j[U_1 + U(t_1, t_2)]\} = \exp\{jU_1\} \exp\{jU(t_1, t_2)\} \quad (6)$$

其中当  $t_1 = 0$  时, 令  $U_1 = 0$ 。利用  $\exp\{jU_2\}$  对各距离门的回波相位进行校正, 就能够完成相位补偿。

由式(4)可以发现, 相位因子  $\exp\{jU(t_1, t_2)\}$  可以根据相邻回波信号相位差傅氏反变换模值峰值处的相位来估计。因此求取相位补偿所需的相位因子  $\exp\{jU(t_1, t_2)\}$  完全可以与频域法距离对准同时进行, 而且不需要复杂运算, 因而简便可行, 并减少了运动补偿的环节。

下面证明上述方法确定的相邻脉冲间目标中心运动引入的相位因子  $\exp\{jU(t_1, t_2)\}$  与多普勒中心跟踪法所确定的目标中心运动的相位因子是相等的。多普勒中心跟踪法是在距离对准完成之后, 将相邻回波信号各距离门相位差进行加权平均, 并作为相邻回波的多普勒中心相位差。为了避免相位解模糊, 按下式求相位函数<sup>[4]</sup>

$$\exp\{j\mathcal{U}_{t_1, t_2}\} = \frac{\int_{Q_1} f_{t_1}(r) f_{t_2}^*(r - \mathcal{R}r) dr}{\left| \int_{Q_1} f_{t_1}(r) f_{t_2}^*(r - \mathcal{R}r) dr \right|} \quad (7)$$

将式 (1) 代入式 (7) 可得

$$\exp\{j\mathcal{U}_{t_1, t_2}\} =$$

$$\frac{\int_{Q_1} \exp\{j\mathcal{U}(t_1, t_2)\} f_{t_2}(r - \mathcal{R}r) f_{t_2}^*(r - \mathcal{R}r) dr}{\left| \int_{Q_1} \exp\{j\mathcal{U}(t_1, t_2)\} f_{t_2}(r - \mathcal{R}r) f_{t_2}^*(r - \mathcal{R}r) dr \right|} =$$

$$\frac{\exp\{j\mathcal{U}(t_1, t_2)\} \int_{Q_1} |f_{t_2}(r - \mathcal{R}r)|^2 dr}{\left| \exp\{j\mathcal{U}(t_1, t_2)\} \int_{Q_1} |f_{t_2}(r - \mathcal{R}r)|^2 dr \right|} =$$

$$\exp\{j\mathcal{U}(t_1, t_2)\} \quad (8)$$

式 (8) 表明, 采用的相位补偿法与多普勒中心跟踪法在采用频域法进行距离对准的情况下是完全等效的, 因而它与多普勒中心跟踪法一样, 都是跟踪整体目标, 而不是目标的某个散射点。因此对于简单目标和复杂目标均可适用。

## 2 实验结果

首先处理三铝柱目标的微波暗室数据。三铝柱的尺寸如图 1 所示, 目标做偏心转弯运动, 目标拐弯运动半径为 1m, 雷达距拐弯运动中心的距离为 10m。雷达发射线性调频信号, 带宽为 3176GHz, 中心频率 10GHz, 脉冲数为 64, 角度间隔为 0.34°。利用上述的运动补偿方法同时进行距离对准和相位补偿, 成像结果见图 2。

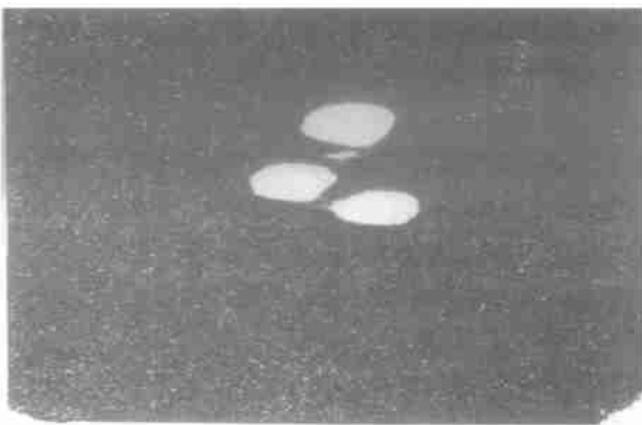


图 1 三铝柱位置

其次利用美国滨洲大学 Steinberg 教授提供的外场真实数据检验

图 2 三铝柱成像

所述的运动补偿法, 雷达参数为: 工作波长 31123cm, 雷达发射窄脉冲信号, 脉冲宽度为 7ns, 脉冲重复周期 215ms, 脉冲数 512, 信号采样间隔 5ns, 采样信号被量化为 8 位数字信号, 由 I, Q 双通道记录。目标为 Boeing-727 飞机, 飞行速度 147m/s, 飞机到雷达的距离 217km, 雷达观测角度 6°, 飞机航路如图 3 所示。图 4 给出了 ISAR 运动补偿和成像结果。其运动补偿效果与 Steinberg 教授用散射点基准法补偿的结果相当<sup>[5]</sup>。

上面所用外场数据的信噪比很高, 为了研究所述运动补偿方法的信噪比特性, 在外场数据中人为地加入白高斯噪声。当信噪比 SNR = 10dB 时, ISAR 运动补偿和成像的结果见图 5。

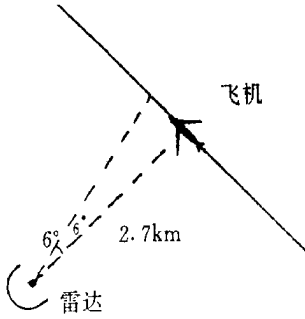


图3 飞机航迹



图4 Boeing-727运动补偿成像结果

### 3 结论

在深入研究了 ISAR 距离对准频域法的基础上,提出了一种 ISAR 运动补偿新方法,它能够同时进行距离对准和相位补偿,减少了运动补偿环节,而且证明了所采用的相位补偿法与多普勒中心跟踪法完全等效。因此所述的 ISAR 运动补偿方法是跟踪整体,而不是目标的某个孤立散射点,它对于简单目标和复杂目标均可适用。外场实测数据和微波暗室数据的运动补偿和成像结果,也充分说明了这一点。

致谢:感谢美国滨洲大学 steinberg 教授和中科院电子所分别提供了外场数据和微波暗室数据。

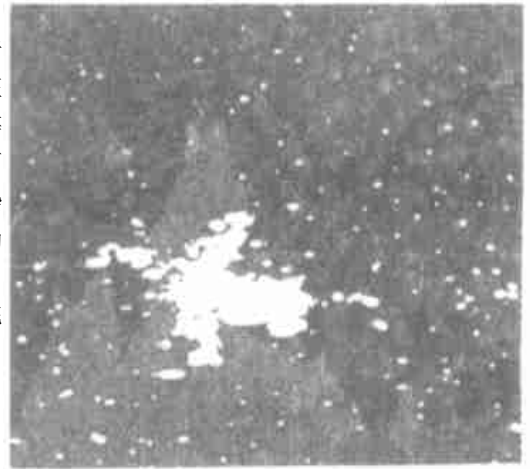


图5 SNR=10dB 处理结果

### 参考文献

- 1 Chen C C, et al. Target- motion- induced radar imaging. IEEE Trans. on AES, 1980; 16 (1): 2- 14
- 2 Prickett M J, et al. Principles of inverse synthetic aperture radar ( ISAR) imaging. In: IEEE EASCON Record, 1980: 340- 345
- 3 Eerland K K. Application of inverse synthetic aperture radar on aircraft. In: proc of the international conferene on radar paris, 1984: 618- 623
- 4 朱兆达等. 逆合成孔径雷达信号处理技术. 信息获取与处理, 1991
- 5 Steinberg B D. Microwave imaging of aircraft. Proc of IEEE, 1988; 76 (12): 1578~ 1592