

运动目标逆合成孔径雷达成象*

陈学红, 陈宗鹭

(中国科学院电子学研究所, 北京)

摘要 运动目标逆合成孔径雷达成象是根据旋转成象和运动补偿原理, 利用宽带发射信号进行距离分辨, 利用目标相对于雷达视线的旋转产生的多卜勒信息进行方位分辨. 距离对准和运动补偿是逆合成孔径雷达成象的关键技术. 本文概述了逆合成孔径原理, 分析了距离对准和运动补偿问题, 并给出了成象实验结果.

关键词 雷达成象; 逆合成孔径雷达; 高分辨雷达

一、引言

运动目标成象对于国土防空、海岸警戒以及轨道目标(如导弹、卫星)的识别和分类有着十分重要的意义^[1,2]. 逆合成孔径雷达 (ISAR) 成象是运动目标成象技术之一, 它利用宽带信号进行距离压缩获得沿雷达视线 (LOS) 距离上的高分辨率, 利用目标在运动过程中相对于雷达视线的旋转产生的多卜勒信号进行方位分辨. 目标的运动使其回波产生两个多卜勒分量. 一个分量是目标径向速度引起的, 称为径向多卜勒. 另一个分量是目标相对于雷达视线的旋转引起的, 称为旋转多卜勒. 对方位分辨有贡献的是旋转多卜勒, 所以利用多卜勒谱分析作方位分辨前应把对成象无贡献的径向多卜勒分量去掉. 这一过程叫做运动补偿^[3]. 方位分辨是对距离压缩后取自同一距离门的回波用 FFT 作多卜勒谱分析, 因此必须保证目标上等距离线上的回波落在同一距离门内. 这就是距离对准.

本文先讨论旋转目标的成象问题, 然后分析运动目标的逆合成孔径成象原理、距离对准和运动补偿技术, 最后给出在微波暗室运动目标成象实验的结果.

二、旋转目标成象

旋转目标成象是 ISAR 的一种特殊情况, 是研究运动目标成象的基础. 考虑图 1 所示目标在相干雷达照射波束中旋转的情况. 目标的旋转角速度为 ω . 设 $t = 0$ 时目标上的一个散射点 B 的坐标为 (x_0, y_0) , 则当 $t = t$ 时该点到雷达的距离为

$$\begin{aligned} r_B &= [R_0^2 + r_0^2 + 2R_0r_0 \sin(\omega t + \theta_0)]^{\frac{1}{2}} \\ &\approx R_0 + x_0 \sin \omega t + y_0 \cos \omega t \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $r_0 = (x_0^2 + y_0^2)^{\frac{1}{2}}$, R_0 为旋转中心 O 到雷达的距离. 在 $R_0 \gg r_0$ 时近似式总是成立

* 1988年1月21日收到, 1989年7月5日修改定稿.

的。B 点回波的多卜勒频率为

$$f_d = \frac{2}{\lambda} \frac{dr_B}{dt} \quad (2)$$

其中 λ 为雷达工作波长。将(1)式代入后得

$$f_d = \frac{2}{\lambda} \frac{dR_0}{dt} + \frac{2}{\lambda} \omega(x_0 \cos \omega t - y_0 \sin \omega t) \quad (3)$$

如果雷达数据在 $t = 0$ 附近处理, 则(1)式和(3)式可近似为

$$r_B = R_0 + y_0 \quad (4)$$

$$f_d = \frac{2}{\lambda} \frac{dR_0}{dt} + \frac{2}{\lambda} \omega x_0 \quad (5)$$

由(4)式可知, 雷达回波在距离压缩后, 目标上的散射点便可按雷达视线上的距离分辨开来。

由(5)式可知, 如果径向多卜勒分量 $\frac{2}{\lambda} \frac{dR_0}{dt}$ 去掉了, 则从谱分析得到的旋转多卜勒分量 $\frac{2\omega x_0}{\lambda}$ 就

可得出散射点的方位坐标 x_0 。这就是旋转目标的成象过程。显然等距离线平行于 x 轴, 等多卜勒线平行于 y 轴。图 1 还示出了距离分辨单元和多卜勒分辨单元。

通常采用宽带信号(如线性调频脉冲)进行距离压缩。距离分辨率 Δy 与带宽 B 成反比

$$\Delta y = \frac{c}{2B} \quad (6)$$

其中 c 为光速。

方位上一般是用 FFT 完成多卜勒谱分析。相干积分时间为 T 时, 多卜勒谱分辨精度为 Δf_d

$\approx \frac{1}{T}$, 故方位分辨率为

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2\omega} \Delta f_d = \frac{\lambda}{2\omega T} = \frac{\lambda}{2\Delta\theta} \quad (7)$$

式中 $\Delta\theta = \omega T$ 为相干处理时间 T 内目标旋转过的角度。

三、运动目标成象

现在我们来分析图 2 所示的运动目标成象。设目标速度为 V , 自旋角速度为 ω_1 。目标坐标 (x, y, z) 的原点 0 到雷达的距离仍记为 R_0 , 并用 R_0 表示矢量 $A0$, 雷达视线 $A0$ 上的单位矢量记为 u_{R_0} , 则显然 $u_{R_0} = \frac{R_0}{R_0}$ 。

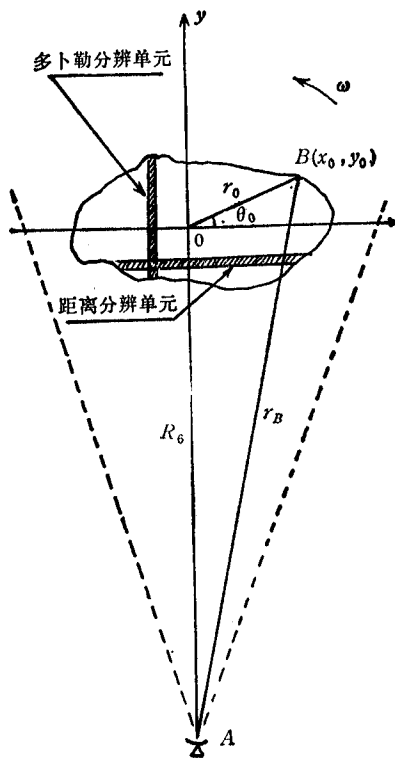


图 1 旋转目标成象

通常待成像目标的尺寸远小于它与雷达之间的距离 R_0 , 故目标上位置矢量为 \mathbf{r} 的点 B 到雷达的距离可近似为

$$r_B = R_0 + \mathbf{r} \cdot \mathbf{u}_{R_0} \quad (8)$$

因此 B 点回波的多卜勒频率为

$$\begin{aligned} f_d &= \frac{2}{\lambda} \frac{dr_B}{dt} \\ &= \frac{2}{\lambda} \frac{dR_0}{dt} + \frac{2}{\lambda} \frac{d\mathbf{r}}{dt} \cdot \mathbf{u}_{R_0} \\ &\quad + \frac{2}{\lambda} \mathbf{r} \cdot \frac{d\mathbf{u}_{R_0}}{dt} \end{aligned} \quad (9)$$

由于 \mathbf{r} 是刚体目标上的一个矢量, 所以它的切线速度 $\boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{r}$ 是 B 点唯一的速度分量, 故有

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{r} \quad (10)$$

注意到 $\mathbf{u}_R = \frac{\mathbf{R}_0}{R_0}$, $\frac{d\mathbf{R}_0}{dt} = \mathbf{V}$ 及矢量恒

等式 $(\mathbf{A} \times \mathbf{B}) \times \mathbf{C} = (\mathbf{C} \cdot \mathbf{A})\mathbf{B} - (\mathbf{C} \cdot \mathbf{B})\mathbf{A}$ 可得

$$\mathbf{r} \cdot \frac{d\mathbf{u}_{R_0}}{dt} = -\left(\frac{\mathbf{R}_0 \times \mathbf{V}}{R_0^2} \times \mathbf{r}\right) \cdot \mathbf{u}_{R_0} \triangleq -(\boldsymbol{\omega}_2 \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{u}_{R_0} \quad (11)$$

其中 $\boldsymbol{\omega}_2 = \frac{\mathbf{R}_0 \times \mathbf{V}}{R_0^2} = \frac{\mathbf{u}_{R_0} \times \mathbf{V}}{R_0}$ 正好是雷达视线跟踪运动目标时的旋转角速度。

将(10)、(11)式代入(9)式得目标上位置矢量为 \mathbf{r} 的点 B 处回波的多卜勒频率为

$$f_d = \frac{2}{\lambda} \frac{dR_0}{dt} + \frac{2}{\lambda} [(-\boldsymbol{\omega}_2 + \boldsymbol{\omega}_1) \times \mathbf{r}] \cdot \mathbf{u}_{R_0} \triangleq f_{d_1} + f_{d_2} \quad (12)$$

这就是运动目标上任意一点回波的多卜勒信号, 它由两部分构成。第一部分 $f_{d_1} = 2 \frac{dR_0}{dt} / \lambda$ 是目标径向速度引起的径向多卜勒, 第二部分 $f_{d_2} = 2 [(-\boldsymbol{\omega}_2 + \boldsymbol{\omega}_1) \times \mathbf{r}] \cdot \mathbf{u}_{R_0} / \lambda$

是目标相对于雷达视线的合成旋转矢量 $(-\boldsymbol{\omega}_2 + \boldsymbol{\omega}_1)$ 引起的旋转多卜勒。显然 f_{d_2} 与散射点的位置矢量 \mathbf{r} 无关, 因此对成像没有直接贡献。当径向多卜勒分量 f_{d_1} 补偿掉后, 回波中只剩下旋转多卜勒分量, 等效地目标好象在以角速度 $(-\boldsymbol{\omega}_2 + \boldsymbol{\omega}_1)$ 作定点旋转, 因此可利用前面分析过的旋转目标成像的方法进行处理。通过运动补偿去掉径向多卜勒 f_{d_1} 后, 运动目标 ISAR 成像转化为旋转成像。所以运动目标的逆合成孔径雷达成像, 实质上是运动补偿后的旋转成像。

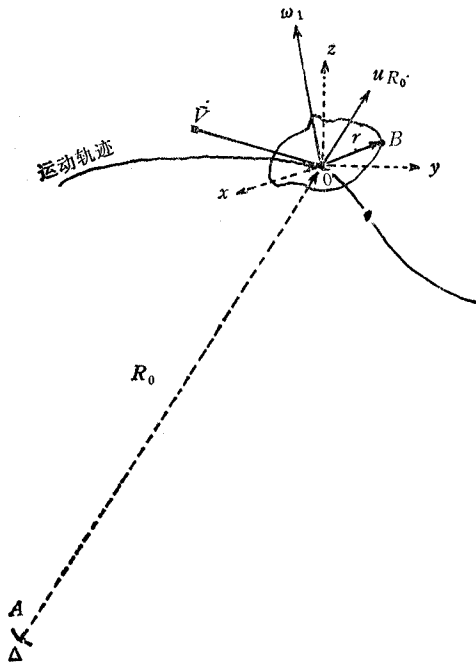


图2 运动目标成像几何关系 [(x, y, z) 是固定在目标上的坐标系]

四、距离对准与运动补偿

上述分析指出, ISAR 成象是利用旋转多卜勒信息进行方位分辨,因此在方位分辨前必须进行距离对准和运动补偿。距离对准是要把来自目标上等距离线上的回波对准于同一个距离门,这样才能保证取自同一距离门的信号具有相干特性。运动补偿则是要从回波中去掉径向多卜勒 f_d 的影响,只留下对方位分辨有贡献的旋转多卜勒分量。

距离对准通常是采用跟踪滤波器(比如卡尔曼滤波器)锁定目标相对隔离的某一强反射点(如飞机的翼尖或机头),并把该点回波始终对准在同一距离门内。回波的闪烁、目标的机动都可能导致对不准的情况,这时必须进行修正式重新对准。在发射脉冲重复周期内目标的姿态变化一般很小,因此脉压回波的幅度波形近似不变,可利用波形之间的相关性进行再对准。

运动补偿是方位分辨的关键。由(5)式可知当 $\frac{dR_0}{dt} = V_0$ 为常值时,直接对距离对准后取自同一距离门的回波作 FFT 运算便可完成方位分辨。

$$x_0 = \frac{\lambda}{2\omega} \left(f_d - \frac{2V_0}{\lambda} \right) \quad (13)$$

但在实际情况下 $\frac{dR_0}{dt} = V_0(t)$ 是随时间变化的,所以径向多卜勒也是随时间变化的,这时必须去掉径向多卜勒分量 $\frac{2}{\lambda} \frac{dR_0}{dt}$ 后才能使 FFT 得到的旋转多卜勒分量 f_{d_1} 与散射点的方位坐标 x_0 对应起来。

$$x_0 = \frac{\lambda}{2\omega} f_{d_1} \quad (14)$$

运动补偿的方法之一,是把距离对准时锁定的强回波点作为目标的参考点,在各距离门对应的相位中减去参考点回波的相位,这样就隔离掉了目标径向距离的变化产生的径向多卜勒。用 FFT 完成方位分辨后,目标参考点将出现在图象方位向的中心。这种补偿方法叫做参考点补偿。它是把目标上某一相对隔离的散射点对应的相位作为运动补偿的参考相位。为了解决这种方法容易受回波闪烁、遮挡等现象干扰的问题,有人提出了平均相位补偿法^[6],从回波中合成出一个代表目标径向运动的参考相位。

五、运动目标成象实验

我们在北京航空学院的微波暗室里进行了运动目标成象的初步实验,取得了比较好的结果。图 3 为实验系统示意图,旋转平台上固定一导轨,待成象目标置于可在导轨上移动的小车上。这样目标可以作直线运动和拐弯运动。这里给出两组实验结果。

第一组: 匀速拐弯成象。目标如图 4 所示三个铝柱,拐弯半径约为 1m,目标拐弯时的角速度为每个脉冲周期转 0.34° ,相干积累时间内雷达共发射 64 个载频为 10GHz、带

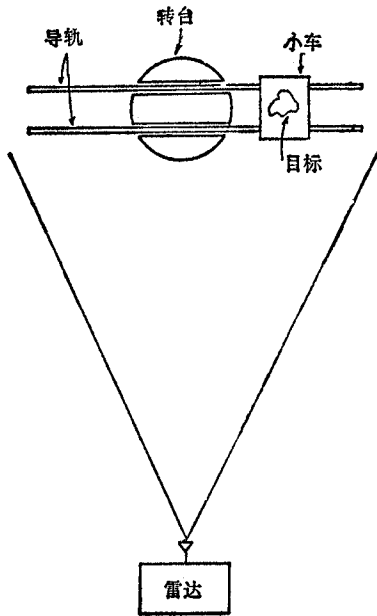


图3 暗室成像实验

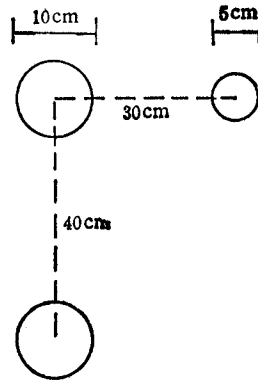
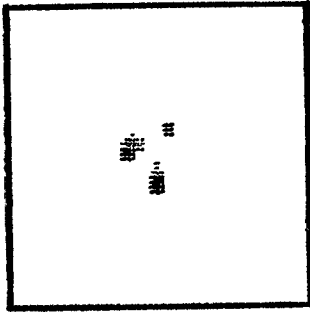
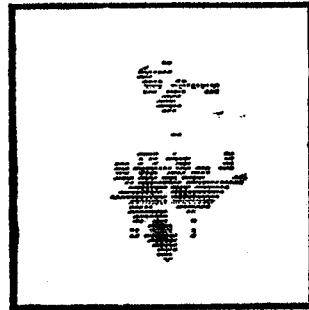


图4 待成像目标

图5 拐弯时得到的 ISAR 图象
(2.56m × 2.56m)图6 运8模型直线运动时的 ISAR 图象
(2.56m × 2.56m)

宽为 3.75GHz 的线性调频脉冲。图 5 是得到的 ISAR 图象。运动补偿采用的是参考点补偿方法。

第二组：直线运动成像。待成像目标是缩小的运 8 飞机模型，翼展 143cm，机长 137cm。目标沿导轨移动速度为每个脉冲周期移动 3cm，相干积累时间内雷达共发射 64 个载频为 10GHz、带宽为 3.75GHz 的线性调频脉冲。运动补偿仍采用参考点补偿。得到的 ISAR 图象见图 6，机身、机翼和机尾的基本轮廓都出来了，只是发动机不太清晰。

六、结 束 语

本文阐述了运动目标的逆合成孔径雷达成像原理及其关键技术——距离对准和运动补偿，并给出了微波暗室里进行的运动目标成像实验结果。

作者衷心感谢我所杨汝良同志,北京航空学院何国瑜、苗俊刚、王振荣、薛明华同志的通力协助。

参 考 文 献

- [1] Giovanni Corsin, et al, Classification of radar targets: an overview, Proc. 1984 Int. Symp. on Noise and Clutter Rejection in Radars and Imaging Sensors, 1984.
- [2] G. Dike, R. Wallenberg, Inverse SAR and its application to aircraft classification, IEEE Int. Radar Conf., 1980.
- [3] C. C. Chen, H. C. Andrews, *IEEE Trans. on AES*, **AES-16**(1980) 1, 2—4.
- [4] K. K. Eerland, Inverse synthetic aperture radar: preliminary results, Physics Lab. TNO Report, No. PHL 1882-32, The Netherland, 1982.
- [5] A. L. Gorin, *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **310**(1981), 166—174
- [6] 陈学红,运动目标高分辨率成像,博士学位第一年度报告,中国科学院电子学研究所,1987.
- [7] 张直中,合成孔径,逆合成孔径和成像雷达,现代雷达编辑部(讲座),1986.
- [8] M. J. Prickett, C. C. Chen, Principles of inverse SAR imaging, Conf. Proc. of EASCON'80, 1980, pp. 340—345.
- [9] J. L. Walker, *IEEE Trans. on AES*, **AES 16**(1980)1, 23—52.
- [10] 何国瑜等, BH2051 型 RCS 测试系统,北京航空学院研究生报告,1987.

INVERSE SYNTHETIC APERTURE RADAR IMAGING OF MOVING TARGETS

Chen Xuehong Chen Zongzhi

(*Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing*)

Abstract Imaging of moving targets by inverse synthetic aperture radar (ISAR) is based on range-Doppler processing and motion compensation. High resolution along the range is provided by broad bandwidth of the transmitted signal, while across the range (azimuth) provided by an aperture induced by the motion of the target. Range alignment and motion compensation are the key techniques of ISAR. ISAR principles are summarized and experimental results are given.

Key words Radar imaging; Inverse synthetic aperture radar; High resolution radar