

逆合成孔径雷达成像中散射点走动的校正¹

卢光跃 保 铮

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

摘 要 距离-多普勒算法是 ISAR 最常用的成像方法, 它将目标上的散射点按其距离和多普勒的二维分布形成目标图像。为了得到较高的多普勒分辨率, 成像的观测期间目标必须有一定的转角, 即存在散射点走动, 在分辨率要求较高的场合则会发生越分辨单元走动 (MTRC), 从而使成像点扩展函数扩散, 分辨率下降。本文研究了散射点走动问题, 并提出了一种简单而有效的校正方法。计算机仿真和转台数据的校正结果表明, 成像质量得到明显改善。

关键词 ISAR 成像, 越分辨单元走动, 越射点走动校正, 横向定标

中图分类号 TN957.7

1 引 言

用距离-多普勒方法进行 ISAR 成像处理, 其横向分辨率为 $\rho_a = \lambda / (2\Delta\theta)$ (其中 λ 为雷达工作波长, $\Delta\theta$ 为总转角), 对于 λ 为 3 ~ 5cm 的雷达, 若要求横向分辨率为零点几米, 则 $\Delta\theta$ 一般应达到 1/20 rad。图 1 所示的是 ISAR 成像几何模型, 目标沿雷达视线方向 (RLOS, 即 u 轴) 分成若干个距离单元, 横向 (与 u 轴垂直) 分成若干个多普勒单元。如果成像目标的横向尺寸为几十米 (即横向有一百多个象素), 则在图像左右两侧的散射点在观测期间有 1 ~ 2m 或更多的距离走动, 这就会穿越几个距离分辨单元, 使该处的纵向距离分辨率下降。同理, 在目标图像的上下两端, 也常会产生穿越多普勒分辨单元的散射点走动, 使该处的多普勒分辨率 (即横向分辨率) 下降。可以想象到, 在目标图像的四个斜角处, 两种分辨率下降的现象兼而有之。总之, 这样的成像会使整幅图像有不同的分辨率, 离成像的等效转轴越远则图像的分辨率就越差。如果雷达采用 10cm 或更长的波长, 由于成像需要更大的转角, 上述现象将更为严重。

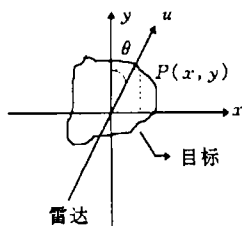


图 1 旋转目标 ISAR 成像几何模型

在集束式 SAR 成像中, 散射点越分辨单元走动 (MTRC) 几乎是不可避免的, 那里一般采用二维联合校正, 如在傅氏域从极坐标格式插值得到直角坐标格式^[1-4], 但这种方法运算量大, 且要精确知道目标相对于 RLOS 的夹角; 这对以非合作目标为对象的 ISAR 是难以预知的。又由于 ISAR 的目标相对较小, 有可能采用较简易的校正方法。

本文研究在均匀转动条件下, ISAR 成像中散射点走动的产生及其校正方法, 可在未知转角的情况下有效地消除散射点走动。通过仿真数据和转台数据的验证, 说明了本文方法的有效性。

¹ 1997-11-26 收到, 1998-09-10 定稿
863 高科技计划及国防科技预研基金资助

2 散射点走动的产生

ISAR 成像是靠距离、多普勒分辨原理获得所需的二维象, 其纵向高的分辨率是依赖于雷达宽带信号来实现的, 而多普勒分辨率 (即横向分辨率) 与相干积累过程目标相对于雷达的总转角有关, 总转角愈大, 横向分辨率愈高。然而, 对 ISAR 成像的研究都是基于散射点模型进行的, 散射点模型假定在相干积累过程中, 散射点的位置、强度和多普勒频率均不发生变化。实际上, 由于目标的转动, 其上的散射点也随之转动, 但只要散射点的走动不超过一个分辨单元, 我们总可以认为近似满足散射点不动的模型; 然而, 对大目标进行高分辨成像时, 就不可避免地引起散射点的走动 (包括距离走动和多普勒走动), 从而不再满足散射点不动模型, 使得最终的成像结果发生模糊。

设目标的尺寸为 $X \times Y$, 图像的横、纵向分辨率分别为 ρ_a, ρ_r , 总观测次数为 M , 相邻两次观测时目标相对于雷达视线的转角为 $\delta\theta$, 在匀速转动时总转角为 $\Delta\theta = M\delta\theta$, 则不产生纵向和横向距离走动的条件分别为 $X\Delta\theta/2 \leq \rho_r$ 和 $Y\Delta\theta/2 \leq \rho_a$, 于是目标尺寸的限制与分辨率的关系为^[1,5]

$$\begin{cases} X \leq 4\rho_a\rho_r/\lambda, \\ Y \leq 4\rho_a^2/\lambda. \end{cases} \quad (1)$$

若取 $\lambda=4\text{cm}$, ρ_a, ρ_r 均为 0.4m , 则 X, Y 均限制为 16m 。实际中型飞机的尺寸均大于此值, 所以发生散射点 MTRC 是不可避免的; 在实际 ISAR 成像中, 由于选取的聚焦点 (即等效转轴) 并不一定位于目标中线上, 致使转轴两侧目标所占的多普勒单元数目不相等, 可以想象, 占多普勒单元数目多的一侧散射点的走动将更为严重。因此, 在对中、大型目标进行高分辨率成像时, 散射点 MTRC、特别是距离走动是经常发生的。下面分别讨论对散射点距离走动和多普勒走动的校正。

3 距离走动的校正

容易证明^[6], 在转角不太大时, 散射点的距离走动大小仅与散射点的横向距离 x 和转角有关, 也就是说, 对位于同一多普勒单元的散射点 (即横向距离相等的散射点) 而言, 它们纵向走动的距离相等; 同时, 散射点的多普勒走动大小仅与散射点的纵向距离 y 和转角有关。因此, 消除与散射点位置有关的散射点走动所需的二维处理可以转化为两个一维处理。下面首先讨论对距离走动的消除。

因为目标横向尺寸为 X , 横向分辨率为 ρ_a , 所以目标边沿的散射点 (即 $x = X/2$) 应位于第 $X/(2\rho_a)$ 多普勒单元内; 为了保证图像在横向上不发生模糊, 必须有 $M \geq X/\rho_a$ 。

用傅氏变换进行多普勒分析时, 其横坐标以归一化频率表示, 即一次转角 $\delta\theta$ 里的相位差, 其范围为 $(-\pi, \pi]$ 。相位差实际是由散射点纵向距离走动形成的, 若相位差为 $\pm\pi$, 则相应的走动为 $\pm\lambda/4$ 。设多普勒单元的序号为 $-M/2 + 1, \dots, 0, \dots, M/2$, 则在一次转角期间第 $M/2$ 个多普勒单元的距离走动为 $\lambda/4$; 于是, 第 j 个多普勒单元的距离走动量为

$$\Delta r_j = \frac{\lambda}{2M} j, \quad (2)$$

相应地, 该单元内的散射点在第 i 次观测时刻的距离走动量为

$$\Delta r_{j,i} = \frac{\lambda}{2M} ij. \quad (3)$$

上式表明, 不同位置散射点的距离走动量可以表示为散射点所在的多普勒单元序号 j 和观测次数 i 的函数; 这也就是说, 在给定一幅图像后, 其某一多普勒单元内的散射点在各次观测时产生的距离走动量为一定值。因此, 我们可以在没有任何先验的转角信息情况下, 根据目标多普勒分布确定出其上散射点所对应的距离走动量, 然后据此进行校正。

在具体算法实现时, 选出要处理的多普勒单元 (在图像域内) 的散射点图像, 通过傅氏反变换, 按不同的距离单元将其变换到时间域内, 得到相应散射点的距离 - 时间二维分布图; 在时间域内利用 (3) 式校正每次回波中因距离走动引起的包络位移, 从而消除该多普勒单元的散射点的距离走动。(实际校正可将各时刻的距离数据变换到傅氏域, 再按 (3) 式作线性相移校正, 然后再通过傅氏反变换得到校正后的距离 - 时间二维分布。) 将上述二维分布的时间域通过傅氏变换变换到多普勒域, 保留该多普勒单元的散射点, 这样就完成了对该单元散射点距离走动的校正。接着依此对其它多普勒单元分别作类似处理, 最后得到距离走动校正后的雷达图像。在实际处理时, 我们可以根据具体情况, 仅对位于两侧的多普勒单元进行处理, 而转轴附近的散射点 MTRC 可以忽略, 无需作校正处理, 这样可以避免额外的计算。

4 多普勒走动的校正

图像经过以上处理后, 消除了因转动引起的距离走动, 但仍存在因转动引起的多普勒走动。

容易证明, 若目标在两次回波间的转角为 $\delta\theta$, 则坐标为 (x, y) 的散射点的子回波的相位差为

$$\Delta\varphi_1 = (4\pi/\lambda)[x\delta\theta - y(\delta\theta)^2/2]. \quad (4)$$

实际上, ISAR 图像的横坐标多普勒作归一化表示时, 即采用上式的相位差。可见, 散射点子回波的多普勒主要决定于上式的第一项, 第二项只在 y 值大时才有一定的影响, 不过它与 $\delta\theta$ 成非线性关系。

多普勒走动表现为对不同的观测次数转动同样的 $\delta\theta$ 时的相位差发生的变化。第 l 次观测的相位差为

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_l &= \Delta\varphi_l[(l+1)\delta\theta] - \Delta\varphi[l\delta\theta] \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} \left[x(l+1)\delta\theta - \frac{1}{2}y(\delta\theta)^2(l+1)^2 \right] - \frac{4\pi}{\lambda} \left[xl\delta\theta - \frac{1}{2}y(\delta\theta)^2l^2 \right] \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} \left[x\delta\theta - y(\delta\theta)^2 \left(l + \frac{1}{2} \right) \right]. \end{aligned}$$

上式与 (4) 式之差表示第 l 次观测的多普勒走动量。若将 y 以距离分辨单元 $k\rho_r$ 表示, 则多普勒走动可以写成:

$$\Delta\varphi_{l,k} = \Delta\varphi_l - \Delta\varphi_1 = -(4\pi/\lambda)(\delta\theta)^2\rho_rkl. \quad (5)$$

可见, 多普勒走动与时序 l 成正比。

与距离走动的校正相比较, 情况基本类似, 只是多普勒走动量除与散射点所在的距离单元数 k 及时序 l 有关外, 还与转角 $\delta\theta$ 有关; 因此要消除多普勒走动, 应该首先估计出 $\delta\theta$ 。

在 ISAR 里, 目标为非合作的, 转角不可能准确已知, 但可以通过估计得到。多普勒走动主要发生在图像上下两端, 即 $|y|$ 值较大处, 其结果是使该处的横向像模糊。如果按 (5) 式以粗选的 $\delta\theta$ 进行校正, 若所取的 $\delta\theta$ 与实际转角相同, 则在理想情况下, 散射点的图像应为 $\delta(\cdot)$ 函数, 图像的“锐化度” (即集聚度) 达到最大; 若所取的 $\delta\theta$ 与实际转角不同, 则图像模糊现象不

可能完全去除, 即散射点的图像将沿多普勒方向扩展, 图像的“锐化度”下降。也就是说, 以不同的 $\delta\theta$ 进行校正, 所得横向像的“锐化度”是不一样的, 以“锐化度”最大作为估计准则显然是合适的; 而锐化度则经常用信息熵表示, 熵最小则波形锐化度最大。

设 $g(m)$, $m = 1, \dots, M$ 为 $|y|$ 值较大且横向像较集中单元的回波, 将该单元的数据以粗选的 $\delta\theta_n (n = 1, \dots, N)$ 按 (5) 式作多普勒走动校正, 通过傅氏变换得到相应的横向像为 $G_n(m)$, $m = 1, \dots, M$, 令 $\|G\| = \sum_{m=1}^M |G_n(m)|$, $p_m = |G_n(m)|/\|G\|$, 则该横向像的熵为

$$H_n = - \sum_{i=1}^M p_m \log p_m, \quad (6)$$

其中 H_n 为该距离单元图像的熵; 于是, 用一系列粗选的 $\delta\theta_n$ 值对回波进行补偿, 得到一系列具有不同熵值的横向像, 正确估计的转角 $\delta\hat{\theta}_{\text{est}}$ 应为

$$\delta\hat{\theta}_{\text{est}} = \arg \min_{\delta\theta_n} H_n. \quad (7)$$

将估计的 $\delta\hat{\theta}_{\text{est}}$ 代入 (5) 式, 就可以得到每个距离单元内散射点在每次观测时多普勒走动量。对每个距离单元分别作多普勒走动校正处理, 即可得到高分辨图像。

转角 $\delta\theta$ 的估计也可以从某些距离单元数据的时频分布得到, 这时可选择 $|y|$ 较大而只有一个或几个特强散射点的单元, 计算并画出其 Wigner-Ville 分布 (WVD); 当目标均匀转动而存在多普勒走动时, 散射点的时频分布应为斜直线, 根据直线的斜率并结合 (5) 式, 可以计算出单次转角 $\delta\theta$, 从而可对数据进行校正。(实际上, 对于非合作目标的转动情况不可能准确预知, 但用时频分布可以检验目标转动是否均匀。这时, 可选择 $|y|$ 等于或接近零的距离单元, 计算并画出数据的 WVD, 若目标为均匀转动, 则该处的 WVD 应为一系列水平线。)

至此, 在消除散射点多普勒走动的同时, 得到了目标在整个相干积累过程中的总转角, 从而在得到清晰的目标图像后, 也可对目标进行横向定标。因为已经估计到 $\delta\theta$, M 次观测的总转角为 $\Delta\theta = M\delta\theta$, 则目标上第 k 个多普勒单元相对于等效转轴的横向距离为

$$R_c = \frac{\lambda}{2M\delta\theta} k. \quad (8)$$

这样就同时完成 ISAR 图像的横向定标。

5 计算结果

为了验证上述方法消除散射点走动的有效性, 我们分别对仿真数据以及微波暗室数据进行了处理。

首先我们进行计算机仿真, 假定的目标是由多组散射点组成, 雷达发射信号的带宽为 400MHz, 中心频率为 5520MHz, 总的距离单元数为 128, 总的观测次数为 256 次, 目标相对于雷达视线的总转角为 7° , 目标纵向和横向的最大距离分别为 30m 及 48m, 利用传统的 R-D 法所得到的图像如图 2(a), 从图中可以看到, 边沿处的散射点因其位置不同有明显的距离走动和 / 或多普勒走动, 从而使每组的两个散射点在距离方向或多普勒方向或两个方向同时模糊在一起, 整幅图像分辨率下降; 图 2(b) 是对每个多普勒单元分别作距离走动校正处理的结果, 消除了距离走动所引起的目标边沿模糊, 同时使原来距离方向无法分辨的散射点清晰地分辨开来。从图 2(b) 可以看到, 该方法能够有效地消除距离走动; 但是图 2(b) 上散射点的多普勒走动依然存在, y 值较大的散射点仍然模糊; 在此基础上, 利用最小熵准则估计参量 $\delta\hat{\theta}_{\text{est}} (=7^\circ)$ 后, 对每个距离单元进行多普勒走动校正处理, 结果如图 2(c) 所示, 消除了散射点在转动过程中产生的多普勒

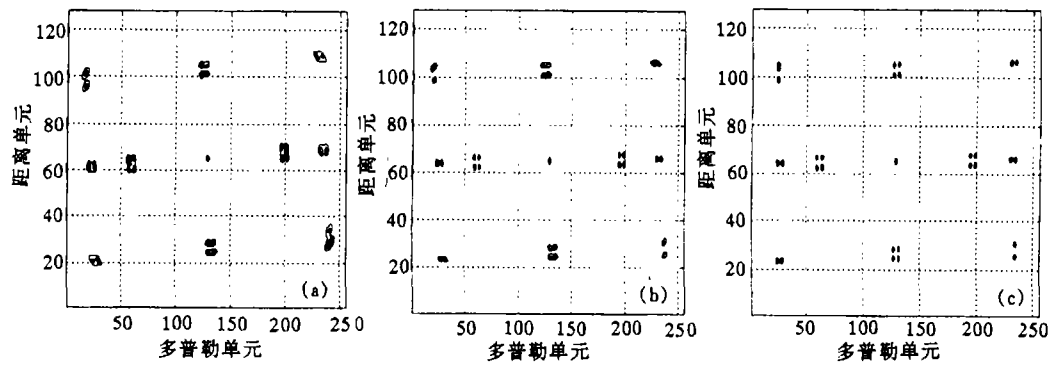


图2 对仿真数据处理结果
(a) R-D 方法处理结果 (b) 消除距离走动后的结果 (c) 最终成像结果

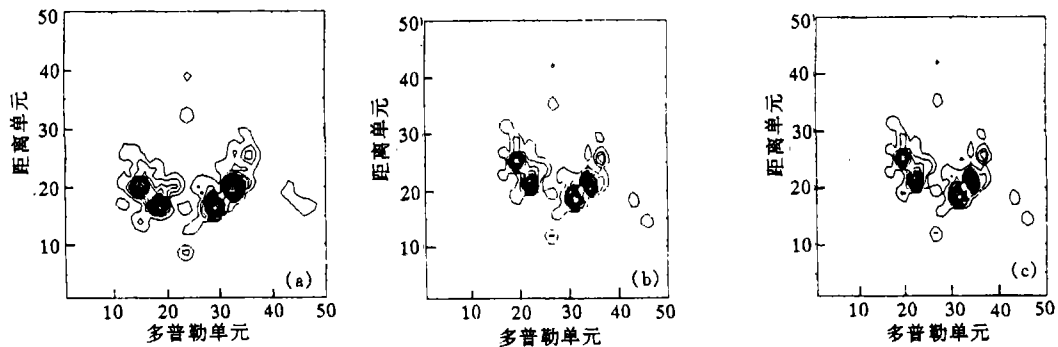


图3 转台数据处理结果
(a) R-D 方法处理结果 (b) 本文方法处理结果 (c) 极坐标插值结果

走动, 所有的散射点清晰可辨。从图 2(c) 上可以读出散射点大约占 210 个多普勒单元, 因此根据 (8) 式, 目标的横向总尺寸约为 47m。

选用的微波暗室目标为 B52 飞机模型, 模型机长 \times 翼展 = 69(cm) \times 81(cm), 雷达发射信号的带宽为 6.719GHz, 目标由 -10° 转到 $+10^\circ$, 转动间隔为 0.1° 。据计算, 雷达纵向和横向分辨率分别为 2.23(cm) 和 2.94(cm), 在利用全部回波进行 R-D 法成像时, 目标边沿产生的距离走动大约有五、六个之多。图 3(a) 是直接利用 R-D 法成像的结果, 目标两翼边沿的散射点因距离走动而发生模糊; 图 3(b) 是利用本文方法处理后的结果, 目标两翼边沿的散射点清晰可辨。为了与常规的极坐标插值方法进行比较, 图 3(c) 是在精确已知目标转角变化情况下, 利用极坐标插值后进行 FFT 处理的结果, 对图 3(b) 和图 3(c) 进行比较, 两幅图像基本相同, 即在转角不太大时, 本文的方法和极坐标插值方法一样, 有效地消除了由于转动引起的散射点走动。理论分析结果表明, 与 R-D 法对比, 利用本文方法使目标有效成像范围增大^[7]。

6 结束语

本文研究了目标相对雷达均匀转动情况下的散射点走动及其校正方法, 针对散射点走动的特点, 通过对每个多普勒单元分别处理, 在没有任何转角先验信息的基础上, 有效地消除转动引起的散射点距离走动; 在此基础上, 利用最小熵准则估计出转角, 从而可消除因转动引起的

多普勒走动, 最终得到高分辨的图像。本文通过对仿真数据和微波暗室数据的处理, 验证了该方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] Dale A A, Adam K, Jack L W, Harrison M J, Enrico C P. Developments in radar imaging. IEEE Trans. on AES, 1984, AES-20(4): 363-400.
- [2] Kong K K, Edwards J A. Polar format blurring in ISAR imaging. Electron. Lett. 1995, 31(17): 1502-1503.
- [3] Walter G C, RON S G, *et al.* Spotlight SAR Signal Processing Algorithms, Boston-London: Artech House, 1995, Chapter 3,4.
- [4] Wehner D R. High Resolution Radar, Second Edition, Boston-London: Artech House, 1995, Chapter 7.
- [5] Walker J L. Range-Doppler imaging of rotating objects. IEEE Trans. on AES, 1980, AES-16(1): 23-52.
- [6] Brown W M, Fredricks R J. Range-Doppler imaging with motion through resolution cells, IEEE Trans. on AES. 1969, AES-5(1): 98-102.
- [7] 卢光跃, 保铮. ISAR 成像中 MTRC 校正算法性能分析. 西安电子科技大学学报, 已录用 (待刊).

COMPENSATION OF SCATTERERS' MIGRATION IN ISAR IMAGING

Lu Guangyue Bao Zheng

(*Key Lab. for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071*)

Abstract Range-Doppler method is the most common method in ISAR imaging. To obtain radar image of a target, certain angle of the target with respect to Radar Light Of Sight (RLOS) during the coherent integration interval is required. In some case, there will exist scatterers' migration. Actually, scatterers' Migration Through Resolution Cell (MTRC) occurs inevitably in higher resolution radar image, which will result in the point-spread function broadening and image resolution decreasing. The scatterers' migration is discussed in the paper and a simple and efficient method is proposed to compensate MTRC. Compensation results of the simulated data and the real data collected in a microwave anechoic chamber show that the resolution of the final radar image is improved.

Key words ISAR imaging, Migration Through Resolution Cell (MTRC), Scatterers' migration compensation, Cross-range scaling

卢光跃: 男, 1971 年生, 博士生, 专业: 信号与信息处理, 研究方向: 逆合成孔径雷达 (ISAR) 成像方法研究及井周电阻率成像方法研究。

保 铮: 男, 1927 年生, 教授, 中科院院士, 博士生导师, 主要研究领域为信号处理和雷达系统。