第 14 卷 第 5 期
1992 年 9 月

电子科学学刊
JOURNAL OF ELECTRONICS

Vol. 14, No. 5
Sept., 1992

以散射质心为基准的 ISAR 成象的运动补偿

毛引芳　吴一戎　张永军　陈宗鸷
（中国科学院电子学研究所，北京 100080）

摘要　本文提出和研究了以散射功率质心为基准的逆合成孔径雷达（ISAR）成象的运动补偿方法——参考质心法．分析了参考质心法与相关法的内在联系和区别；讨论了噪声对补偿的影响，提出了用回波数据拟合曲线来光滑质心距离轨迹和相位轨迹的方法．最后通过对 ISAR 外场数据和微波暗室数据成象的运动补偿验证了上述理论和方法，得到了满意的效果．

关键词　雷达成象；逆合成孔径雷达；运动补偿

1. 引言

对于图 1 所示的运动目标，它相对于雷达视线的运动可以概括地分解为两种分量：目标相对于雷达视线的转动分量和目标沿雷达视线方向的平动分量．只有前一种分量对雷达成象有用，后一种分量对雷达成象无用，必须在成象之前把它去掉．去除后就成为一种较为简单的目标作定点旋转运动的成象了．所以现在的问题就归结为如何在目标上寻找一个稳定参考点，以此为基准来补偿目标作平移运动的影响．

尽管在雷达短暂工作时间内以相对孤立的强散射点为基准作运动补偿的效果不错[1]，但由于它在目标运动过程中有时会因遮挡、闪烁和干扰而丢失[2]，这对于实际运动补

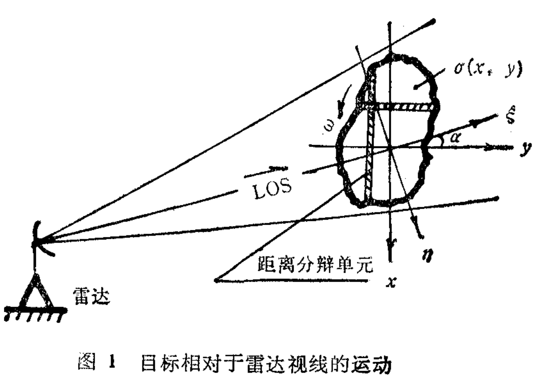

图 1　目标相对于雷达视线的运动

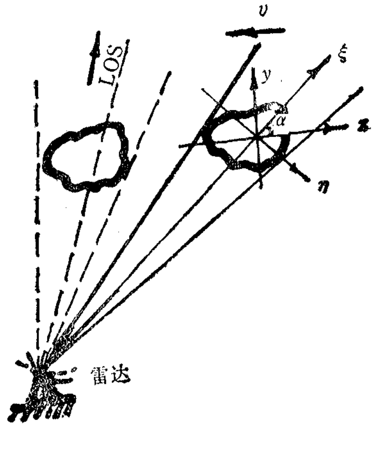

图 2　目标和雷达的几何关系

1991.08.22 收到，1992.03.23 定稿．

偿应用来说无疑是一个很大的缺陷。

本文提出和研究的参考质心法可以克服上述缺点，得到一个稳定参考点，在没有强散射点存在时也能作运动补偿。本方法的质心距是用回波功率加权求距离均值得到的，而不是用幅值加权求得的。这样做有助于降低噪声对参考质心的影响，改善运动补偿效果。

2. 散射功率中心

在物理学中，对于一般薄形物体设其面密度函数为 $\rho(x,y)$，则其质心 $G(X,Y)$ 为

$$X = (1/M)\left[\iint x\rho(x,y)dxdy\right] \tag{1}$$

$$Y = (1/M)\left[\iint y\rho(x,y)dxdy\right] \tag{2}$$

式中 $M = \iint \rho(x,y)dxdy$。显然，当物体绕质心作转动时，质心的座标位置不变。

对于图 2 所示的导体目标和雷达的几何关系，其散射功率中心可以表示为

$$X_c = (1/A)\left[\iint x\sigma(x,y)dxdy\right] \tag{3}$$

$$Y_c = (1/A)\left[\iint y\sigma(x,y)dxdy\right] \tag{4}$$

式中 $A = \iint \sigma(x,y)dxdy$，$\sigma(x,y)$ 为目标的散射功率密度函数。在物理光学近似、小合成孔径角和环境噪声恒定条件下，可以认为这些在雷达波束照射下的目标散射点是固定的，其散射强度为常数[3]。因而，此质心的座标位置也不会因目标在 x-y 平面内绕它作旋转运动而改变。当目标作任意运动时，只要补偿掉平移距离项，也就成了绕质心作旋转运动。由此可以得到一个对逆合成孔径雷达（ISAR）成象作运动补偿的稳定参考点。

3. 参考质心法与相关法的内在联系和区别

由于目标运动的任意性，则在雷达视线方向的目标上某一散射点到雷达的距离 ξ 是时间的随机函数。在物理光学近似和小孔径转角等条件下，我们可以认为这是一个平稳随机过程。令雷达至目标的质心距为 ξ_c，则这一均值为

$$\xi_c = \int \xi p(\xi)d\xi \tag{5}$$

式中 $p(\xi)$ 是 t 时刻随机过程 $\{\xi(t)\}$ 发生的概率密度函数。如果在一较短的合成孔径时间 ΔT 内影响 $\sigma(x,y)$ 的主要因素是 ξ，并忽略一些其它的因素，则可以把(5)式推广为以下形式：

$$\xi_c = \int \xi\sigma(x,y)d\xi \Big/ \int \sigma(x,y)d\xi \tag{6}$$

由于每个脉冲重复周期 T_r 内视角变化很小，相邻脉冲回波的幅值近似相等，即 $m_{t_1}(\xi + \Delta\xi) \approx m_{t_2}(\xi)$。因此波形 $m_{t_1}(\xi)$ 与 $m_{t_2}(\xi)$ 之间相关，其相关函数为

$$R(s) = \int m_{t_1}(\xi)m_{t_2}(\xi - s)d\xi \Big/ \left[\int m_{t_1}^2(\xi)d\xi \int m_{t_2}^2(\xi)d\xi\right]^{1/2} \tag{7}$$

根据 Schwartz 不等式可知，在 $s = \Delta\xi$ 处，$R(s)$ 有最大值，从而可以确定一回波相对于另一回波的复包络位置的偏离值，以此实现相关距离对准。当 $S = \Delta\xi$ 时，$m_{t_1}(\xi) \approx$

$m_{t_2}(\xi-\Delta\xi)$，$m_{t_1}(\xi)m_{t_2}(\xi-\Delta\xi)=m_{t_1}^2(\xi)=m_{t_2}^2(\xi)=\sigma(\xi)$ 时，(7)式有最大相关值1,即 $R(s)=\int\sigma(\xi)d\xi\Big/\int\sigma(\xi)d\xi$. 对分子部分的被积函数用 ξ 加权，则得 $\xi_c=\int\xi\sigma(\xi)d\xi\Big/\int\sigma(\xi)d\xi$，此即为上述散射质心的表达式(6)式.

由上述分析和讨论可知,相关法只是在统计平均的意义上说才与参考质心法一样,否则从理论上说相关法的对准精度不如参考质心法. 因为后者求质心位置是通过功率加权求得的平均值,而前者只是从一脉冲与另一脉冲的各距离门幅值乘积（功率)大小比较中得出的移动距离值.

4. 噪声影响和降低措施

参考质心法的运动补偿分两步进行：质心距离对准和相位补偿. 为消除噪声影响,需对质心距离轨迹和相位轨迹进行光滑.

(1) *质心距离轨迹的光滑*　设雷达观测的脉冲数 $j=1\sim N$, 每一脉冲的距离分辨单元 $i=1\sim M$,则第 j 个脉冲的距离向(Y 向)质心为

$$\xi_c(j)=\sum_{i=1}^{M}\sigma_i(y_i)y_i\Big/\sum_{i=1}^{M}\sigma_i(y_i) \tag{8}$$

$$\sigma_i(y_i)=\int\sigma(x,y)dx \tag{9}$$

由雷达检测得到的值为

$$\sigma_{i1}(y_i)=\sigma_i(y_i)+\Delta\sigma_i(y_i) \tag{10}$$

式中 $\Delta\sigma_i(y_i)$ 是误差项,它的主要来源有两方面：(a) 雷达回波中包含的系统噪声和环境噪声；(b) 由目标上散射点闪烁造成的误差. 因此，从雷达回波数据求得的一次质心 $\xi_{c1}(j)$ 与理论质心 $\xi_c(j)$ 之间存在偏差,它也由两部分组成：(a) 固定偏差 ξ_{ca}；(b) 抖动偏差 $\xi_{CD}(j)$. 于是一次质心可表示为

$$\xi_{c1}(j)=\xi_c(j)+\xi_{ca}+\xi_{CD}(j) \tag{11}$$

这里引入两点先验知识：(a) 当雷达视线转角较小(如1°～2°)时,目标的运动轨迹近似为直线(当转角较大时可分成几个直线段)；(b) 转角较小时,质心不会产生突变,它的轨迹也应近似为直线. 于是我们用一次质心通过最小二乘法可以拟合出二次质心轨迹. 设

$$\xi_{c2}(j)=aj+b \tag{12}$$

采用欧氏范数,

$$\|\delta\|^2=\sum_{j=1}^{N}[\xi_{c1}(j)-\xi_{c2}(j)]^2=\sum_{j=1}^{N}[\xi_{c1}(j)-(aj+b)]^2 \tag{13}$$

由求多元函数极值的必要条件,可以求得使 $\|\delta\|^2$ 达到最小值的 a,b. 由此可求得二次质心轨迹.

(2) *质心相位轨迹的光滑*　如果直接以质心处的相位为基准进行相位调整，其成象结果不一定理想，其原因主要是噪声影响.

质心距离对准是按距离门进行的,这样其对准精度只能达到小于半个距离分辨单元. 但其剩余误差是一种恒定误差,因此利用相位差质心为基准进行相位补偿是比较合适的. 相位差质心可以表示为

$$\varphi_0(y_i)=\sum_{i=1}^{M}\Delta\varphi_i(y_i)\sigma_i(y_i)\Big/\sum_{i=1}^{M}\sigma_i(y_i) \tag{14}$$

式中

$$\Delta\varphi_i(y_i)=\varphi_i(y_i)-\varphi_i(y_{i-1})$$

相位差质心也同样存在抖动问题，为此我们采用与距离质心同样的拟合法来拟合相位差质心轨迹。

5. 实验结果和结论

首先，我们用美国 Steinberg 教授提供的外场数据检验了参考质心法。其雷达参数和数据格式如下：工作于X波段，波长为 3.123cm，带宽为 150MHz，脉宽为 7ns，脉冲重复周期为 2.5ms。由 I，Q 正交支路解调，用 5ns 间隔采样后被量化为 8 位数字信号。目标是 Boeing727 飞机，离地面雷达 2.7km 处以速度 147m/s 飞行。在大约 6°的方位角内采集的脉冲数是 512 个。

图 3　以二次质心为基准作运动补偿的成象结果

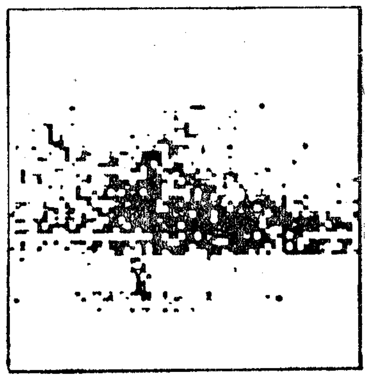

图 4　以一次质心为基准作运动补偿的成象结果

图 3 中示出了对上述外场数据以二次质心为基准进行运动补偿的成象结果，获得了良好图象。其补偿效果与 Steinberg 用相对孤立点法补偿的成象结果相当[1]。图 4 为以一次质心为基准作运动补偿的成象结果，获得的图象很差。

此外，我们还用微波暗室中三目标(铝柱)作偏心转弯运动的数据[4] 检验了参考质心法。由于暗室数据的噪声明显小于外场数据，所以这时用一次质心作运动补偿也获得了如图 5 所示的较好图象。这与图 4 的情况截然不同。

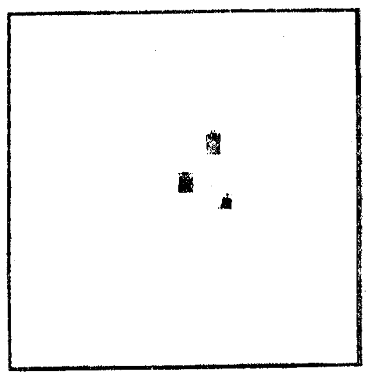

图 5　微波暗室数据以一次质心为基准作运动补偿的成象结果

结论　利用参考质心法对 ISAR 成象进行运动补偿是可行的。它弥补了孤立点法中参考点易起伏和易丢失的不足。相关法只是在统计平均意义上才与参考质心法等同，否则其对准精度不如后者。噪声对参考质心的影响较大。将回波数据通过最小二乘法拟合质心曲线来

降低噪声影响的方法是有效的。

参 考 文 献

[1] B.D. Steinberg, *Proc. IEEE*, **76**(1988)12, 1578—1592.
[2] C.C.Chen, H.C. Andrews, *IEEE Trans. on AES*, **AES-16**(1980)1, 2—14.
[3] D.R. Wehner, High Resolution Radar, Artech House, (1987), Chapter 7.
[4] 陈学红，陈宗骘，运动目标逆合成孔径雷达成象，电子科学学刊，**11**(1989)6，584—589.

THE MOTION COMPENSATION FOR ISAR IMAGING USING SCATTERING CENTROID

Mao Yinfang Wu Yirong Zhang Yongjun Chen Zongzhi

(*Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing* 100080)

Abstract The motion compensation for ISAR imaging using scattering centroid (called reference centroid method) is proposed and studied. The internal relations and differences between correlation method and the new method are analyzed. The noise effect on the motion compensation is discussed. To solve the problem, a new method which uses echo goodness-of-fit curve to smooth the centroid range trace and phase trace is proposed. The reference centroid method is used to process the simulative and real ISAR data of moving target, and the satisfying motion compensation results are obtained. The results show that the method is correct and effective.

Key words Radar imaging; ISAR; Motion compensation