

RDM 算法应用于 SAR 动目标检测时参数选择原则¹

何映霞 朱敏慧 王岩飞 张冰尘 何思源

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘要 该文针对雷达系统方位向波束较小的情况下 RDM 的参数选择问题进行了探讨,指出了 RDM 参数选择的决定因素,并将这种原则应用于雷达方位向波束仅为 9° 的 LSAR, 实验证明也可以达到较好的检测效果。

关键词 RDM, 运动目标检测, 参数选择

中图分类号 TN951

1 引言

合成孔径雷达是通过脉冲压缩技术和合成孔径技术得到高分辨力的成像雷达, 它的优异性能引起了广泛的关注, 人们希望能利用它完成对运动目标的检测和成像。动目标对于雷达成像的影响主要有以下几个方面: (1) 由目标距离向速度引起的距离单元位移 (range cell migration); (2) 由距离向加速度或方位向速度造成的方位散焦 (azimuth defocus); (3) 由于距离向速度引起的成像位置偏移 (mapping error)。

RDM(reflectivity displacement method) 最初是由 DLR 实验室发展来用于解决载机平台扰动影响的一种运动补偿技术^[1,2], 在 1990 年由 J.R.Moreira 等首次将该方法用于 SAR 运动目标检测中, 他们采用的是 DLR 实验室的 E-SAR, 由于雷达参数适当, 在对外场实验数据的应用中效果良好。但在大多数情况下, 雷达系统不满足方位向波束大的要求, 该算法是否能获得较好的检测效果, 关键在于其参数的选择。本文就这一问题进行了探讨, 指出了 RDM 参数选择的关键因素。实验证明对于雷达方位向波束不大的情况, 通过选择合适的 RDM 参数也可以得到比较好的结果。

2 RDM 算法的基本原理

RDM 是一种基于雷达回波原始数据的补偿方法, 能对平台惯性系统无法校正的相位误差进行高精度的补偿。这种信号处理方法的优点还在于它的自主性和鲁棒性。

RDM 从雷达原始数据中提取 LOS(line-of-sight) 方向的位置偏差, 从而得到相应的运动信息。算法的出发点是重叠的相邻方位频谱是相似的, 而且频移和目标与雷达的相对运动速度有直接关系^[1,2]。

载机实际航迹偏离直线会导致雷达-目标距离变化和相位历程的改变, 同样回波的相位历程也反映了雷达与目标之间的实际距离历程, 假定载机以 v 做匀速直线运动, 回波的相位历程就反映了目标的实际运动情况。设雷达-目标的实际距离历程为

$$\begin{aligned} R'(t) &\approx R_0 - v_r t + [(v - v_c)^2 - R_0 a_r] t^2 / (2R_0) \\ &= R(t) - \Delta R(t) \end{aligned} \quad (1)$$

式中目标的运动参数为距离向速度 v_r , 距离向加速度 a_r , 方位向速度 v_c , 方位向加速度 a_c , $R(t)$ 为雷达相对静止目标的距离历程:

¹ 1999-12-03 收到, 2000-06-11 定稿

$$R(t) \cong R_0 + (vt)^2 / (2R_0) \quad (2)$$

建立坐标系, 设 X 轴为载机飞行方向在地面的投影, Y 轴垂直指向飞行方向右侧, Z 轴垂直向上。在此坐标系中, $\Delta R(t)$ 可表述为

$$\Delta R(t) = \Delta x(t)(v_a t / R_0) + \Delta y(t) \cos \Theta_D - \Delta z(t) \sin \Theta_D \quad (3)$$

式中 v_a 代表雷达与目标间方位向相对速度, $v_a = v - v_c$, Θ_D 为天线的俯角, 相应的相位偏移为

$$\Delta \varphi_{\text{err}} = -(4\pi/\lambda) \cdot \Delta R(t) \quad (4)$$

由 (4) 式可知, 相邻时间长度为 Δt 的方位谱间频移为

$$\Delta f(t) = -2 \frac{\Delta R(t)}{\lambda} = \left[\frac{2v_a^2}{\lambda R_0} + \frac{2\Delta \ddot{r}_{\text{LOS}}(t)}{\lambda} \right] \Delta t \quad (5)$$

式中 $\Delta \ddot{r}_{\text{LOS}}(t)$ 代表了由距离向速度引起的距离位移, 可由下式得到, $\Delta \ddot{r}_{\text{LOS}}(t) \approx \Delta y(t) \cos \Theta_D - \Delta z(t) \sin \Theta_D$ 。对应的功率谱密度 (power spectrum density, PSD) 可分为两个部分: $0 \leq f \leq 1/T_A$ 部分反映了低频运动误差, 主要导致散焦和几何弯曲, $1/T_A \leq f \leq \infty$ 部分反映高频运动误差, 主要引起旁瓣加大以及积分旁瓣比 ISLR 和峰值旁瓣比 PSLR 的降低, 其中 T_A 为孔径时间。

根据相邻回波的方位谱, 求出其频移, 对频移进行高通和低通滤波, 可以分开 (5) 式中的前项 Δf_l 和后项 Δf_h , 然后分别求出目标的方位向速度和距离向加速度^[2]

$$v_c = v - \sqrt{-\Delta f_l \lambda R(t) / \Delta t} \quad (6)$$

$$a_r = \Delta f_h \lambda / (2\Delta t) \quad (7)$$

根据多普勒调频率图, 得到目标的距离向移动量 ΔR_r 和方位向移动点数 Δn_c , 从而求出距离向速度

$$v_r = \Delta R_r / (\Delta n_c \Delta t) \quad (8)$$

3 RDM 参数选择原则

运动残留误差由地面反射率损失和方位谱频率量化误差构成。当观察地形为陆地, 且为非各向同性的, 前者可近似为零, 而量化误差可认为是一个均匀分布的随机过程, 其概率密度函数为

$$p(\epsilon) = 1/q \quad (9)$$

式中 $q = 1/\Delta t$, 因而其均方差^[3]可写为

$$\sigma_\epsilon = (E(\epsilon^2) - E^2(\epsilon))^{1/2} = q/\sqrt{12} = 1/(\sqrt{12}\Delta t) \quad (10)$$

为减少方位谱的相干斑, 通常对同一方位时间的 N_s 个连续距离门作平均求出方位谱, 所以频移估计的均方差^[2]为

$$\sigma_{\epsilon} = \sqrt{\frac{1}{12\Delta t^2} \left[1 + \frac{3(1+\Gamma^2)^2 \text{Pr} f \Delta t}{4\Gamma^4 N_s^2} \right]} \quad (11)$$

方位向速度估计的均方差^[2]与低通滤波器的截止频率 f_v 有关,

$$\sigma_{v_c} = \frac{\lambda R_0}{4\bar{v}_c \Delta t^{3/2}} \sqrt{\frac{f_v}{6} \left[1 + \frac{3(1+\Gamma^2)^2 \text{Pr} f \Delta t}{4\Gamma^4 N_s^2} \right]} \quad (12)$$

式中, \bar{v}_c 为方位向平均速度, Γ 为地面反射函数的均方差与均值的比例, 对于陆地而言近似为 1. 对于距离向速度, 其均方差和量化噪声一样, 为^[2]

$$\sigma_{v_r} = \frac{v_{r \min}}{\sqrt{12}} = \frac{1}{\sqrt{12}} \frac{N_s \Delta r}{T_A} \frac{v - v_c}{v} \quad (13)$$

式中 Δr 为距离向单元大小. 由 (12) 和 (13) 式可以看出, RDM 算法的效果直接取决于两个关键参数 Δt 和 N_s 的选取.

将低通滤波器的截止频率取为频移函数的带宽, 则由 (11) 式和 (12) 式得到

$$\Delta t = \lambda R \sigma_{\epsilon} / (4\bar{v}_c \sigma_{v_c}) \quad (14)$$

$$\Delta t > \sqrt{\lambda R / (13.85\bar{v}_c \sigma_{v_c})} \quad (15)$$

(14) 式说明 Δt 与频移均方差成正比, 而与方位向速度均方差成反比, 而 (15) 式表明, 对于相同的载机速度, 合成孔径时间越大, 可选取的时间间隔最小值也越大.

相应的 N_s 为

$$N_s = \frac{\lambda \cdot R(1+\Gamma^2)}{2\Gamma^2} \sqrt{\frac{3\text{Pr} f \Delta t}{192\bar{v}_c^2 \sigma_{v_c}^2 \Delta t^4 - \lambda^2 R^2}} \quad (16)$$

可以看出, 对于相同的雷达参数, Δt 越小, N_s 越大. 由 (11) 和 (12) 式可知, 对于相同的时间间隔和系统参数, N_s 越大, 方位向速度估计精度和频移估计精度越高, 但若太大, 则由 (13) 式知, 距离向的定位精度和距离向速度的估计精度差, 由此所导致的动目标方位向定位精度也会比较差, 但是如果平均距离门数太小, 则不仅方位向速度估计和频移估计精度会下降, 而且由动目标导致的距离向弯曲在计算多普勒调频率图时不能忽略, 所以, N_s 的值必须折中考虑.

方位向速度估计的均方差应满足

$$\sigma_{v_c} \gg D^2 \bar{v}_c / (13.85\lambda R) \quad (17)$$

频移估计均方差应满足

$$\sigma_{\epsilon} > \sqrt{1.15\bar{v}_c \sigma_{v_c} / (\lambda R)} \quad (18)$$

频移估计均方差、方位向速度估计均方差以及距离向速度估计均方差是相互制约的. 由此确定 RDM 参数的选择原则:

(1) 考虑到 N_s 影响的因素较多, 不仅直接决定了距离向定位精度和距离向速度估计均方差, 还决定了动目标方位向定位的好坏, 所以必须保证 N_s 不能太大. 同时又要保证由最小距离向速度 $v_{r \min}$ 导致的距离迁移在计算多普勒调频率时可以忽略, 应满足 $N_s \geq v_{r \min} T_A / \Delta r$.

(2) 对于相同的其它参数, N_s 越大, 方位向速度估计均方差越小, 但 N_s 又与距离向速度估计精度成正比, N_s 越大, 距离向速度估计均方差越大. 所以, 方位向速度和距离向速度不可能同时获得最好的估计, 必须进行折中. 利用最小可检测方位向速度与方位向速度估计均方差的关系, 初步确定方位向速度估计均方差.

(3) 在确定了方位向速度估计均方差后, 可以根据 (18) 式确定频移均方差的最小值.

(4) 通过 (14) 式由初步选定的方位向速度估计均方差和频移均方差确定 Δt . 为满足相邻雷达回波数据的相关性, 数据段长度不能太大, 时间间隔 Δt 应远小于合成孔径时间, 同时 Δt 的最小值与合成孔径时间是成正比的. Δt 的选取应满足 $\sqrt{\lambda \cdot R / (13.85 \bar{v}_c \sigma_{v_c})} < \Delta t \ll T_A$. 根据这一原则适当调整估计指标要求.

(5) 在相同的雷达参数下, Δt 与 N_s 是成反比的. 它们之间的关系由 (16) 式确定. 由前面选定的时间间隔再确定 N_s , 计算相应的方位向定位偏差, 决定是否需要再进行参数调整.

4 对 LSAR 原始数据的实验结果

J. R. Moreira 等人将这种算法用于德国 DLR 实验室的 E-SAR 数据, 取得了很好的效果. E-SAR 雷达系统的方位向波束比较大, 方位角达 17° . 目前我国自行研制的 LSAR 雷达系统的方位向波束较小, 只有 9° , 其参数选择问题更加突出.

首先初步确定 N_s 值. 假定感兴趣的目标距离向速度最小值为 5.5m/s , 选取最小可检测距离向速度为 5.5m/s , 由原则 (1) 可以得到 $N_s > 22$. 假定感兴趣的方位向速度的最小值为 12m/s , 则方位向速度估计均方差为 8m/s , 由 (18) 式可得 $\sigma_e > 0.78\text{Hz}$, 选取频率估计均方差为 1.0Hz , 由原则 (4) 得到, $0.37\text{s} < \Delta t \ll 10.11\text{s}$, 由 (14) 式得到 Δt 为 0.47s , 再由 (16) 式求得 $N_s = 30$, 相应的距离向速度估计均方差为 2.14m/s , 最小可估计距离向速度为 7.4m/s . 由这种距离向速度估计均方差导致的方位向定位偏差为 135m . 因此需对算法参数进行微调. 最终选定时间间隔为 0.506s , 平均距离门为 24 . 为了达到一定的频率分辨率, 选取方位向频谱长度为 4096 , 为了使虚警率小于 15% , 多普勒调频率门限选取为 3.2Hz/s . 这样, 相应的方位向速度估计均方差为 8.2m/s , 距离向速度估计均方差为 1.7m/s , 频偏均方差为 1.092Hz , 最大可检测方位向速度为 1253m/s (目标与飞机同向) 和 937m/s (目标与飞机反向), 最小可检测方位向速度为 12.3m/s , 最大可检测距离向速度为 119m/s , 最小可检测距离向速度为 6m/s (无方位向速度的情况), 方位向定位精度为 80m , 距离向定位精度为 60m .

图 1 为未经运动补偿的 SAR 图像, 图 2 为经运动补偿的 SAR 图像, 图 3 为由 RDM 得到的多普勒调频率图, 图 4 为经检测后得到的运动目标区域示意图. 计算中为简化, 假定飞机沿直线飞行, 且运动目标的加速度为零. 图 1,2 中几个典型的运动目标的运动参数利用 (6) 式和 (8) 式算得:

- 目标 1 方位向速度: 20m/s , 距离向速度: 10.13m/s ;
- 目标 2 方位向速度: 39m/s , 距离向速度: 12.02m/s ;
- 目标 3 方位向速度: 63m/s , 距离向速度: 10.64m/s ;
- 目标 4 方位向速度: 20m/s , 距离向速度: 21.27m/s ;
- 目标 5 方位向速度: 29m/s , 距离向速度: 22.00m/s .

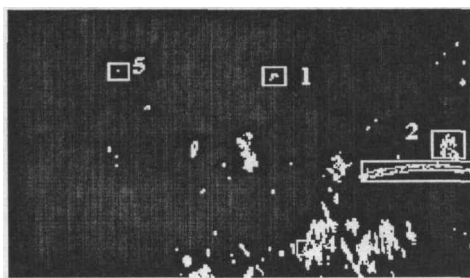


图 1 未经补偿的 SAR 图像

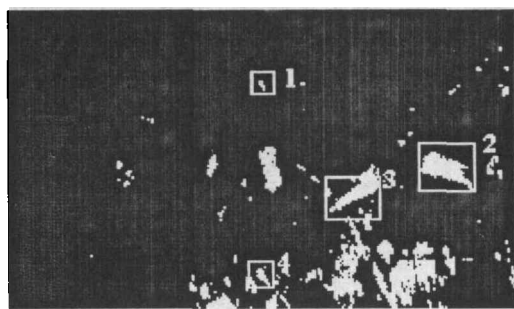


图 2 经过运动补偿的 SAR 图像

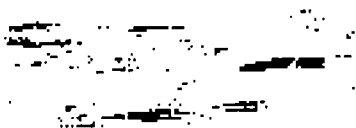


图 3 由 RDM 得到的多普勒调频率图

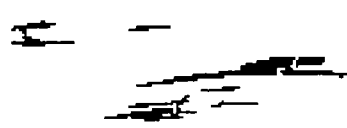


图 4 经检测后得到的动目标区域示意图

可以看出, 目标经过补偿后, 聚焦和距离向弯曲都得到很大的改善, 而且目标已基本回到正确的道路上, 而目标 5 由于其最终成像位置位于图像范围外, 所以在图 2 中该目标消失了。

5 结 论

RDM 是一种性能良好的运动目标检测与成像算法, 它在雷达系统具有较大的方位向波束时能得到好的检测效果。而在很多情况下, 雷达系统不能满足此要求, 比如我国自行研制的 LSAR 和 XSAR 的方位向波束仅有 9° 和 1.5° , 此时应用 RDM 检测的质量就完全取决于算法参数的选择。因此必须有一种选择 RDM 参数的原则, 通过选择合适的计算参数, 得到可以接受的检测和定位效果。

本文通过分析, 提出了算法参数选择所应遵循的原则, 并在此原则下, 针对 LSAR 原始数据提出了一组参数, 通过计算机实验, 验证了尽管 LSAR 雷达系统方位波束较小, 但通过选择合适的计算参数, 也可以得到较好的效果。

参 考 文 献

- [1] J. R. Moreira, A new method of aircraft motion error extraction from radar raw data for real time motion compensation, IEEE Trans. on GRS, 1990, 28(4), 620-626.
- [2] J. R. Moreira, Wolfgang Keydel, A new MTI-SAR approach using the reflectivity displacement method, IEEE Trans. on GRS, 1995, 33(5), 1238-1244.

- [3] 张冰尘, 合成孔径雷达实用化运动目标检测和成像技术的研究, [硕士论文], 北京, 中科院电子所, 1999.

THE PARAMETER CHOICE OF RDM IN MTI-SAR

He Yingxia Zhu Minhui Wang Yanfei Zhang Bingchen He Siyuan

(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract In this paper, the question of the parameter choice of RDM (reflectivity displacement method) for the radar system that has a narrow azimuth antenna beam is discussed and the important factors that determine the choice of the parameters are proposed. Experiments using raw data of L SAR that has an azimuth beam of only 9° show that good detection result can be achieved when applied these principles for parameter choice.

Key words Reflectivity displacement method, Moving target detection, Parameter choice

何映霞: 女, 1971 年生, 博士生, 研究方向为数字信号处理, 微波成像雷达.

朱敏慧: 女, 1943 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为雷达信号与信息处理, 遥感图像处理.

王岩飞: 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波成像雷达, 数字信号处理.

张冰尘: 男, 1973 年生, 助研, 研究方向为数字信号处理, 微波成像雷达.