

检测 SAR 图像中径向慢速动目标

陈广东 朱兆达 朱岱寅 江伟光
(南京航空航天大学信息科学与技术学院 南京 210016)

摘要: 该文提出了一种从 SAR 图像中检测径向匀速动目标的方法, 将 SAR 图像信号在频域分为正频部分和负频部分, 静止背景的正负频分布对称, 而径向动目标的多普勒质心与静止背景相比有一频移, 信号在正负频域能量分布不对称。将分开的正负频域信号分别回到时域成像, 计算这两幅复图像对应位置的模差绝对值, 可对消除静止背景, 突显出径向动目标。仿真数据表明本算法有效。

关键词: 合成孔径雷达, 移动目标检测, 多普勒质心

中图分类号: TN957.52, TN958 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2005)09-1361-04

Detecting Radial Moving Ground Targets from SAR Image

Chen Guang dong Zhu Zhao-da Zhu Dai-yin Jiang Wei-guang

(Dept. of Electron. Eng., Nanjing Univ. of Aeronaut and Astronaut., Nanjing 210016, China)

Abstract This paper is proposes to detecting radial moving ground targets from SAR image. Radical moving targets have focused image just as fixed ground clutters. The algorithm for detection and parameter estimation of radical targets has three steps. The first step isolates the SAR image frequency spectrum to positive band and negative band, then uses IFFT transform to reform two images. The second step subtracts the two-look image amplitude. It offers an approach of suppressing ground clutters and simultaneously indicating the true location of the slant-range moving target image. Finally the radical ground speed of the moving target is carried out by the estimating its Doppler centroid. This combined method is implemented by using real clutter data combined with simulated moving targets. Typical computer results are presented, which illustrate this technique's availability.

Key words Synthetic Aperture Radar(SAR), Moving target detection, Doppler centroid

1 引言

地面动目标的检测一直是雷达应用的一个重要方面, 尤其在军事侦察中更显示出其重要性, 随着合成孔径雷达(SAR)的广泛运用, 人们希望在普通 SAR 数据中检测地面动目标(SARGMTI)。地面动目标的运动方式多种多样, 造成动目标的回波很复杂。在 SAR 图像中静止背景被准确聚焦, 动目标像大多扩散开, 动目标模糊像叠加在杂波背景上。应用时频分析^[1]、多维匹配搜索^{[2],[3]}或自聚焦方法^[4]可使扩散开的动目标聚焦, 聚焦后的动目标能量增强, 据此可以从静止背景中区分出动目标。径向匀速动目标的情况特殊, 快速径向动目标回波所处频段脱离主杂波区, 检测这样的目标较容易, 慢速径向动目标的时频分布与静止背景相似, 径向速度远小于平台速度时, 具有与静止背景几乎相同的调频斜率。通常的成像算法在使静止目标聚焦的同时, 也使径向匀速动目标近似聚焦, 动目标像基本没有扩散, 上述几种使扩散能

量重新汇聚的检测动目标方法对径向匀速动目标无效。

Kircht 提出了从单通道 SAR 多视图像系列中检测动目标和估计运动速度的方法^[5], 这种方法要获得动目标的位置和幅值, 若动目标像散焦或分裂, 就很难获得动目标的位置和幅值。径向匀速动目标像几乎不存在散焦或分裂的问题, 类似多视处理的方法用于检测径向匀速动目标具有优势。径向匀速动目标的多普勒质心与静止背景不同, 这是它与静止背景的最大区别。本文以单通道 SAR 复图像静止背景频率中心为界, 将 SAR 图像在频域分为两频段, 分别回到时域重新成像, 从这两幅图像对应位置的模差的绝对值中检测动目标, 在此基础上进一步测算动目标的运动速度。

地面动目标的运动很复杂, 单纯的径向匀速动目标很少见, 本文的方法应与其它运动方式的动目标检测方法配套使用, 或用于从动目标聚焦后的复图像中测算动目标径向速度。

2 点目标运动方式与回波

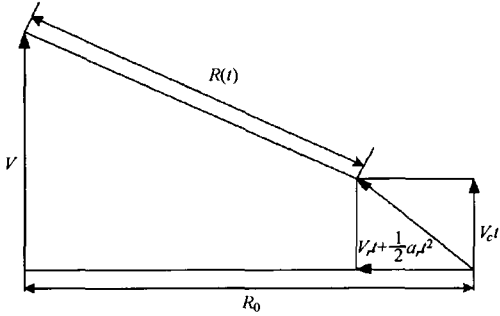


图1 机载雷达与地面运动目标相对距离

正侧视 SAR 雷达载机与地面运动目标的几何位置关系如图1所示,其中 R_0 为零时刻雷达与目标的距离, V 为载机速度,我们将目标的运动分解为相对于飞机的径向分量和切向分量, V_r , a_r 分别为径向速度和加速度, V_c 为切向速度。 t 时刻雷达与运动目标的距离 $R(t)$ 为

$$R(t) = \sqrt{\left[R_0 - (V_r t + a_r t^2 / 2)\right]^2 + [(V - V_c)t]^2}$$

其中 $|t| < T/2$, T 为合成孔径时间。将此式展开为时间的幂级数,并忽略二次幂以上项:

$$R(t) = R_0 - V_r t + [(V - V_c)^2 - R_0 a_r] t^2 / (2R_0)$$

若已完成对回波信号的距离向压缩,为了简化表达式,隐藏了距离向信号的描述,则接收到的动目标方位向回波信号为 $S_m(t) = A_T g(t) \exp(j\psi_T) \exp(-j4\pi R(t)/\lambda)$,其中 A_T 为一常数,与目标的雷达反射截面积(RCS)有关; ψ_T 为目标反射回波的起始相位, $g(t)$ 为雷达天线方向图, t 为慢时间。若忽略天线加权和初始相位,代入 $R(t)$,动点目标方位向信号近似为一线性调频信号,可表达为

$$S_m(t) = A_T \exp(j2\pi f_{d0} t) \exp(j\pi k_m t^2) \quad (1)$$

其中 $f_{d0} = 2V_r/\lambda$ 为多普勒质心, $k_m = [2/(\lambda R_0)][-(V - V_c)^2 + R_0 a_r]$ 为调频斜率。静止点目标为 a_r , V_c 和 V_r 均为零时动目标的特例。忽略了信号的相位常数项和 SAR 预滤波的影响(以下同),式(1)的频域表示为

$$S_m(f) = \sqrt{\frac{1}{|k_m|}} \text{rect}\left(\frac{f - f_{d0}}{B_m}\right) A_T \exp\left(\frac{j2\pi f_{d0} f}{k_m}\right) \exp\left(\frac{-j\pi f^2}{k_m}\right)$$

这里 $B_m = |k_m|T$,静止点目标为动点目标特例,有

$$S_s(f) = \sqrt{\frac{1}{|k_s|}} \text{rect}\left(\frac{f}{B_s}\right) A_T \exp\left(\frac{-j\pi f^2}{k_s}\right)$$

其中 $k_s = -2V^2/(\lambda R_0)$, $B_s = |k_s|T$ 。

纯径向匀速运动目标的 a_r 、 V_c 为零,调频斜率与静止目标一致。在合成孔径积累时间内运动目标与雷达的最大距变化为 $\Delta R = \left|R\left(\frac{T}{2}\right) - R\left(-\frac{T}{2}\right)\right| = |V_r T|$,如果 ΔR 大于一个距离分

辨单元 ρ_r ,则动目标的图像在距离向会出现模糊现象,为避免这种情况,必须满足 $|V_r T| \leq \rho_r$ 。可采用降低距离分辨率的方式达到此目的。成像时,校正了静止目标的二次相位误差,这时纯径向匀速运动目标也消除了二次相位误差

$$S'_m(f) = \sqrt{\frac{1}{|k_s|}} \text{rect}\left(\frac{f - f_{d0}}{B_s}\right) A_T \exp\left(\frac{j2\pi f_{d0} f}{k_s}\right) \quad (2)$$

回到时域得复图像为

$$\sqrt{|k_s|} A_T T \exp\left(j2\pi\left(\frac{f_{d0}}{k_s} + t\right) f_{d0}\right) \text{sinc}\left(\pi\left(\frac{f_{d0}}{k_s} + t\right) |k_s| T\right) \quad (3)$$

3 正负频域的静止杂波背景图像和动目标图像

将式(2)的信号在频域分为正频率部分和负频部分,分别回到时域成像,当慢速动目标 $f_{d0} \geq B_s/2$ 时;只有正频图像,当 $f_{d0} \leq -B_s/2$ 时,只有负频图像;当 $|f_{d0}| \leq B_s/2$ 时 f 的取值范围分为 $(f_{d0} - B_s/2, 0)$ 和 $(0, f_{d0} + B_s/2)$,得正频域复图像

$$\frac{A_T}{2\pi} \left(f_{d0} + \frac{B_s}{2}\right) \sqrt{\frac{1}{k_s}} \exp\left[j\pi\left(\frac{f_{d0}}{k_s} + t\right)\left(f_{d0} + \frac{B_s}{2}\right)\right] \cdot \text{sinc}\left(\pi\left(\frac{f_{d0}}{k_s} + t\right)\left(f_{d0} + \frac{B_s}{2}\right)\right) \beta \quad (4)$$

和负频域复图像

$$\frac{A_T}{2\pi} \left(-f_{d0} + \frac{B_s}{2}\right) \sqrt{\frac{1}{k_s}} \exp\left[j\pi\left(\frac{f_{d0}}{k_s} + t\right)\left(f_{d0} - \frac{B_s}{2}\right)\right] \cdot \text{sinc}\left(\pi\left(\frac{f_{d0}}{k_s} + t\right)\left(f_{d0} - \frac{B_s}{2}\right)\right) \quad (5)$$

由式(4),式(5)可见,纯径向匀速运动目标在两幅图像中的成像位置相同,亮度不同。作为特例的静止目标正频域复图像为

$$\frac{A_T B_s}{4\pi} \sqrt{\frac{1}{k_s}} \exp\left(j\pi t \frac{B_s}{2}\right) \text{sinc}\left(\pi t \frac{B_s}{2}\right) \quad (6)$$

静止目标负频域复图像为

$$\frac{A_T B_s}{4\pi} \sqrt{\frac{1}{k_s}} \exp\left(-j\pi t \frac{B_s}{2}\right) \text{sinc}\left(\pi t \frac{B_s}{2}\right) \quad (7)$$

由式(6),式(7)可见,静止目标在两幅图像中的成像位置相同,亮度相同。

4 以正负频域图像模差的绝对值检测径向动目标

慢速动目标聚焦在 $t = -\frac{f_{d0}}{k_m}$ 处,由式(4),(5)得动点目标

信号正负频域图像信号模差的绝对值为

$$\frac{A_T}{\pi} |f_{d0}| \sqrt{\frac{1}{|k_s|}} \quad (8)$$

由式(6),式(7)得静止点目标信号正负频域图像信号模差的绝对值为零。

不考虑 SAR 图像噪声, 若以正负频域图像信号模差的绝对值检测动目标, 纯静止杂波的能量被完全对消, 以 0 为门限检测动目标, 此时根据式(8), 理论上动目标的检测概率为 100%, 虚警率为 0。实际 SAR 图像中包含噪声, 背景噪声不能以次方法对消, 但在 SAR 图像中杂波的能量总是大于噪声的能量, 理想情况下的理论分析有实际意义。考虑噪声后, 动目标检测门限就应选大于 0 的值, 这时动目标检测概率达不到 100%。

动目标为多点的刚体时, 如大型车辆, 动目标各点运动规律差异小, 检测方法与单点相似。

5 算径向动目标运动速度

检测到动目标后, 获得了目标像的位置信息, 可进一步测算径向动目标的速度。由 $f_{d0} = 2V_r / \lambda$ 知, 动目标的多普勒质心与径向动目标的速度对应。最简单的求动目标多普勒质心的方法为用矩形窗取出动目标复图像, 变换到频域后, 找出多普勒质心。因动目标像一般很小, 这样得到的多普勒质心精度很低。

为了精确估计多普勒质心, 将包含动目标的 SAR 图像回到信号历史域, 以 \hat{f}_{d0} 表示动目标多普勒质心估计值, 其初始值设为 0, 将横向频域以 \hat{f}_{d0} 为分界点分成两段, 动目标的两段横向频率为 $(f_{d0} - B_s/2, \hat{f}_{d0})$ 和 $(\hat{f}_{d0}, f_{d0} + B_s/2)$, 以这两段频率信号各自成像, 计算两幅图像中的动目标像的能量 E_1 和 E_2 , 这里的能量定义为动目标图像中全部像素单元的亮度之和。如果 \hat{f}_{d0} 取值正确, 则应有 $E_1 - E_2 = 0$ 。一般情况下, 由于 \hat{f}_{d0} 存在偏差, 此式不成立, 可计算能量差 $\Delta E = E_1 - E_2$, 根据 ΔE 的符号正负, 改变 \hat{f}_{d0} , 然后再计算 ΔE , 使 ΔE 变小。重复上述步骤, 直到 ΔE 非常接近零, 这样就得到很准确的估计值 \hat{f}_{d0} 。为了加速迭代过程, 可根据天线方向图 $W(f)$ 和 ΔE 来确定每次的修正量, 如下式所示:

$$\hat{f}_{d0}^n = \hat{f}_{d0}^{n-1} + \frac{\Delta E_{n-1}}{W(0) + W(\hat{f}_{d0}^{n-1})}$$

式中 \hat{f}_{d0}^n 和 \hat{f}_{d0}^{n-1} 为第 n 和 $n-1$ 次迭代时多普勒质心的估计值, ΔE_{n-1} 为 $n-1$ 次迭代时的能量差。由于动目标像中包含静止背景, 这种测算多普勒质心的方法仍然存在静止背景引起的误差。

6 实测数据

图 2(a)为某型正侧视 SAR 图像中沿方位向取出的一行复图像数据的模, 图中箭头指示处是仿真的径向速度为 3m/s 的慢速动目标与真实背景叠加后信号的模。图 2(a)中的动目标混杂在静止背景之中。图 2(b)和图 2(c)分别为图 2(a)中信号正负频部分所得时域图像信号的模。

静止背景正负频域的分布对称, 而径向动目标信号的正

负频域不对称。由图 2(b)和图 2(c)可见, 静止背景复图像的模近似, 径向动目标出现位置复图像的模则有明显的不同。图 2(a)中的径向动目标信号主要集中在正频部分, 而静止背景信号近似平均分配在正负频域。所以图 2(b)中的径向动目标信号与在图 2(a)中时相比变化很小, 而图 2(b)中静止背景的模明显下降, 这时的径向动目标信号已高出静止背景; 图 2(c)中几乎没有径向动目标信号, 静止背景的模与图 2(b)中的相似。图 2(d)为图 2(b)和图 2(c)差的绝对值, 图 2(d)中静止背景被进一步大幅消减, 而径向动目标的信号模消减量很小, 动目标被明显突现。

经过计算机循环估算动目标径向速度为 3.14m/s。

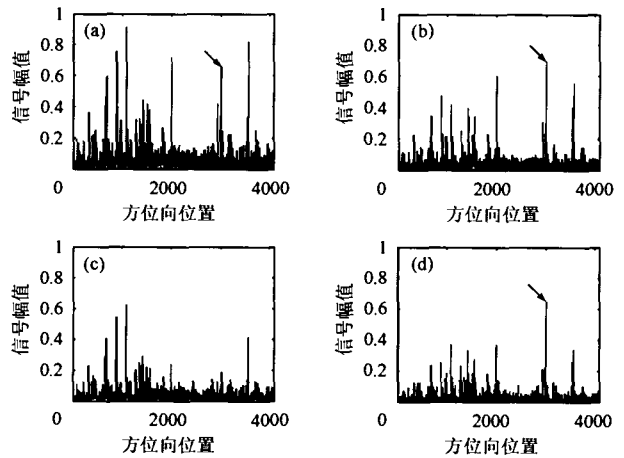


图 2 检测径向匀速动目标波形分析

- (a) 叠加了径向匀速动目标的一行方位向 SAR 复图像的模
- (b) 为(a)中信号正频部分的时域复图像模
- (c) 为(a)中信号负频部分的时域复图像模
- (d) 为(b)和(c)差的绝对值

7 结束语

径向慢速动目标运动方式特殊, 目前对单通道 SAR 中此类动目标的检测研究很少, 但径向慢速动目标的检测与其它动目标的检测研究一样具有重要意义, 尤其在军事侦察中, 此类目标不容忽视。本文的方法在提取动目标信息的同时, 对静止背景实施抑制, 既利用了动目标信息, 又利用了静止背景的信息, 充分体现了单通道 SAR 图像中径向慢速动目标与静止背景信号的不同之处, 半仿真数据计算结果表明, 此检测方法效果良好。当径向速度不满足远小于平台速度的条件时, SAR 图像中的纯径向慢速动目标像也会出现散焦现象, 这时可采用降低方位向分辨率的方法使得纯径向慢速动目标像处于聚焦状态, 仍然可使用本文的检测方法检测此类动目标。

由于 SAR 天线方向图加权的影响, 地面植被的晃动, 地面存在许多反射率随入射角变化的物体, SAR 系统的误差等因素使得不能对消的噪声能量不容忽视, 降低了抑制杂波

检测径向慢速动目标的性能。

参 考 文 献

- [1] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998, 9: 84 – 107.
- [2] Perry R P, Dipietro R C, Fante R L. SAR imaging of moving targets[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(1): 188 – 199
- [3] José M B D, Paulo C M. Multiple moving target detection and trajectory estimation using a single SAR sensor[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, V2003, 39(2): 604 – 624.
- [4] Fienup J R. Detecting moving targets in SAR imagery by focusing[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, V 2001, 37(3): 794 – 808.
- [5] Kirscht M. Detection, velocity estimation and imaging of moving targets with single-channel SAR[J]. *Proceeding of the EUSAR'98, Germany*, 1998: 587 – 590.
- 陈广东: 男, 1968年生, 助研, 研究方向为雷达成像和信号处理.
朱兆达: 男, 1939年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号检测与处理.
朱岱寅: 男, 1974年生, 副研究员, 研究方向为雷达成像和信号处理.
江伟光: 男, 1953年生, 研究员, 研究方向为无人机遥控遥测一站多机.