

抑制 SAR 图像中静止杂波背景检测慢速动目标

陈广东 朱兆达 朱岱寅

(南京航空航天大学电子工程系 南京 210016)

摘要: 动目标的二次相位误差是方位向速度和距离向加速度作用的结果, 导致信号的调频率改变。本文提出了一种抑制 SAR 图像中静止杂波背景检测慢速动目标的方法, 它搜索动目标二次相位误差, 汇聚动目标能量, 同时利用包含正负对称二次相位误差的静止背景复图像模处处相等的规律, 对消静止杂波背景, 从而提高了检测动目标的性能。实测数据表明本算法有效。

关键词: 合成孔径雷达, 移动目标检测, 二次相位误差

中图分类号: TN958, TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)08-1229-04

Suppress the Fixed Background Clutter for Detecting Moving Target in a SAR Image

Chen Guang-dong Zhu Zhao-da Zhu Dai-yin

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

Abstract A new and powerful method for detecting moving targets in a synthetic aperture radar(SAR) image is presented. Phase errors induced by many moving targets are largely quadratic, which provides a basis, by way of a change in the Doppler rate, for estimating the combined effects of azimuth constant velocity and radial acceleration. In this paper, the data in the SAR image is corrected by subtracting the quadratic phase error, and inverse changed by adding the same quadratic phase for comparing, both results are transformed to time domain, where the fixed background clutter have same image intensity. The absolute value of subtracting the two signal expected to have superior moving target detection performance. The experiment result prove this method is valid.

Key words Synthetic aperture radar, Moving target detection, Quadratic phase error

1 引言

随着合成孔径雷达的广泛运用, 人们希望在普通 SAR 数据中检测慢动目标。慢速运动目标在时、空、频域上都落入主杂波区。在单通道 SAR 图像中, 背景杂波动态范围很大, 动目标的信号叠加在静止杂波上, 检测动目标多采用大运算量的时频分析^[1]、多维匹配搜索^[2,3]或自动聚焦^[4]等算法。这些算法只汇聚提取动目标的信息, 而没有利用已知的静态背景信息, 在强背景杂波环境下检测效果往往不好^[4]。SAR 图像中的可用信息大部分是关于静止背景的信息, 静止背景的空间分布、反射强度以及时频分布等信息都可从 SAR 图像中获得。如何利用这些信息抑制静止杂波, 突出动目标, 值得关注。在单通道复值 SAR 图像中抑制静止背景检测动目标, 应当兼顾消减静态背景和汇聚动目标反射能量。二次相位误差反映了动目标方位向速度和距离向加速度的大小, 动目标校正了二次相位误差后, 能量大部分被汇聚。本文采用匹配搜索动目标二次相位误差的方法使 SAR 图像中动目标能量汇聚。为了抑制图像杂波背景, 每次搜索中, 对称减去

和加上同一二次相位误差修正值, 在时域得到两个复图像信号, 这两个复图像中静止背景的模处处相同, 而包含动目标的区域, 模的幅度有很大差别, 计算这两个图象信号对应位置模的差, 取绝对值, 可对消静止背景, 敏锐地检测动目标。实例数据表明此方法有类似多通道 GMTI 雷达抑制静止背景的作用, 可改善在强杂波环境下检测动目标的性能。

2 点目标的图像和二次相位误差的关系

正侧视 SAR 接收到的动点目标方位向信号(距离压缩后)近似为一线性调频信号, 表示为

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

其中 A_r 为一常数, 与目标的雷达反射截面积(RCS)有关, $f_{d0} = 2V_r/\lambda$ 为多普勒质心的频率, $k_m = (2/\lambda R_0)[-(V - V_c)^2 + R_0 a_r]$ 为调频斜率, 这里 R_0 为零时刻雷达与目标的距离, V 为载机速度, a_r 为径向加速度, V_c 为切向速度, V_r 为径向速度。静止点目标为 a_r , V_c 和 V_r 都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

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

这里 $B = k_m T$ 。

静止点目标为动点目标的特例, 有

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

其中 $k_s = -2V^2/(\lambda R_0)$ 。

成像时, 校正了静止目标的二次相位误差, 这时动目标仍存在二次相位误差:

$$S'_m(f) = \sqrt{\frac{1}{|k_m|}} \text{rect}\left(\frac{f-f_{d0}}{B}\right) A_T \exp\left(\frac{j2\pi f_{d0}f}{k_m}\right) \cdot \exp\left[\frac{(k_m-k_s)j\pi f^2}{k_m k_s}\right]$$

为增强动目标检测信号, 需使动目标聚焦, 假设搜索校正动目标的二次相位误差, 即在频域乘 chirp 信号, 设此 chirp 信号为 $\exp(-j\pi f^2/k_e)$, k_e 是待搜索的参数, 这时:

$$S''_m(f) = \sqrt{\frac{1}{|k_m|}} \text{rect}\left(\frac{f-f_{d0}}{B}\right) A_T \exp\left(\frac{j2\pi f_{d0}f}{k_m}\right) \cdot \exp\left[\frac{(k_m-k_s)j\pi f^2}{k_m k_s} - \frac{j\pi f^2}{k_e}\right] \quad (2)$$

根据相位驻定原理, 得时域响应:

$$S''_m(t) = \sqrt{\frac{k_s k_e}{k_m k_s + k_s k_e - k_m k_e}} \cdot A_T \exp\left[\frac{j\pi k_m k_s k_e}{k_m k_s + k_s k_e - k_m k_e} \left(t + \frac{f_{d0}}{k_m}\right)^2\right] + \text{sgn}\left[\frac{k_m k_s k_e}{k_m k_s + k_s k_e - k_m k_e} \left(\frac{f_{d0}^2}{k_m^2} - t^2\right)\right] \frac{\pi}{4} \quad (3)$$

根据时域频域锁定原理知式(3)中 t 的取值范围:

$$\left|t + \frac{k_e - k_s}{k_s k_e} f_{d0}\right| \leq \left|\frac{k_m T}{2} \left(\frac{1}{k_e} + \frac{1}{k_m} - \frac{1}{k_s}\right)\right| \quad (4)$$

$S''_m(t)$ 的模反映了点目标像的亮度, t 的取值范围是点目标模糊像的长度, t 的取值中心代表像的方位位置。作为特例的静止点:

$$S''_s(t) = \sqrt{\frac{k_e}{k_s}} A_T \exp[j\pi k_e t^2] - \text{sgn}(k_e) \frac{\pi}{4} \quad (5)$$

其中

$$|t| \leq \left|\frac{k_s T}{2k_e}\right| \quad (6)$$

将式(5), 式(6)中 t 换为 $t - y_i/V$ 就得到方位向位置为 y_i

的静止点目标方位向信号经搜索二次相位后的时域响应:

$$S''_{si}(t) = \sqrt{\frac{k_e}{k_s}} A_T \exp\left[j\pi k_e \left(t - \frac{y_i}{V}\right)^2\right] - \text{sgn}(k_e) \frac{\pi}{4} \quad (7)$$

其中

$$\left|t - \frac{y_i}{V}\right| \leq \left|\frac{k_s T}{2k_e}\right| \quad (8)$$

3 对称搜索二次相位后静止杂波背景图像和动目标图像

SAR 图像中静止点目标方位向信号在频域分别乘 chirp 信号 $\exp(-j\pi f^2/k_e)$ 和 chirp 信号 $\exp(j\pi f^2/k_e)$ 后, 回到时域得到两个复图像信号(对称搜索二次相位), 根据式(7)和式(8)知这两个信号中同一静止点目标的模糊图像位置相同, 对应各点亮度相同。

由式(7), 多个静止点目标信号经对称搜索二次相位后得时域响应:

$$\sqrt{\frac{k_e}{k_s}} \sum_i \left\{ A_{Ti} \exp\left[j\pi k_e \left(t - \frac{y_i}{V}\right)^2\right] - \text{sgn}(k_e) \frac{\pi}{4} \right\} \quad (9)$$

和

$$\sqrt{\frac{k_e}{k_s}} \sum_i \left\{ A_{Ti} \exp\left[-j\pi k_e \left(t - \frac{y_i}{V}\right)^2\right] + \text{sgn}(k_e) \frac{\pi}{4} \right\} \quad (10)$$

此处 i 为 t 时刻存在信号叠加的点目标标识。可见对于 t , 式(9), 式(10)的模处处相等。这说明, 对称搜索二次相位所得两个图像信号中, 方位向存在多个静止点目标叠加时, 多点目标模糊图像仍然处处亮度相等。

将 $k_e = \infty$ 代入式(3)和式(4)得初始图像中, 动点目标

亮度幅值为 $\sqrt{\frac{k_s}{k_s - k_m}} A_T$; 方位向分布 $\left|t + \frac{1}{k_s} f_{d0}\right| \leq$

$$\left|\frac{k_m T}{2} \left(\frac{1}{k_m} - \frac{1}{k_s}\right)\right|。$$

由式(2)知 $k_e = k_m k_s / (k_m - k_s)$ 时, 动点目标二次相位被消除, 动点目标被聚焦, 亮度最大。复图像为

$$\sqrt{|k_m|} A_T \exp(j2\pi \left(\frac{f_{d0}}{k_m} + t\right) f_{d0}) \text{sinc}\left(\pi \left(\frac{f_{d0}}{k_m} + t\right) |k_m| T\right) \quad (11)$$

动目标像聚焦在 $t = -(f_{d0}/k_m)$ 处, 图像幅值为 $\sqrt{|k_m|} A_T T$, 相位为 0(此时不满足大时宽带宽条件, 式(3)不能描述目标被聚焦时的状况)。反聚焦向的对称搜索二次相位中 $k_e = (-k_m k_s)/(k_m - k_s)$, 代入式(3)和式(4)得模糊图像亮度为

$\sqrt{\frac{k_s}{2(k_s - k_m)}} A_T$, 是原图像的 $\sqrt{\frac{1}{2}}$; 模糊图像分布为 $\left| t + \frac{2k_m - k_s}{k_m k_s} f_{d0} \right| \leq \left| k_m T \left(\frac{1}{k_m} - \frac{1}{k_s} \right) \right|$, 模糊图像长度为原图像的两倍, 当满足 $|f_{d0}| \leq \frac{|k_m| T}{2}$ 约束时, 模糊图像覆盖 $t = -\frac{f_{d0}}{k_m}$ 方位置, 由式(3)知在此点信号相位为 0。

存在距离向速度时, f_{d0} 不为零, 由式(4)知动目标图像位置在搜索二次相位后有移位, 在对称搜索二次相位生成的两幅图像中, 动目标像位置分别为 $t = \frac{(-k_e + k_s) f_{d0}}{k_e k_s}$ 和 $t = -\frac{(k_e + k_s) f_{d0}}{k_e k_s}$, 移位距离 $\left| \frac{2f_{d0}}{k_e} \right|$ 。

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, 可同时聚焦。图像变化规律与单点相似。

4 以对称搜索二次相位所得图像信号模差的绝对值检测动目标

在动目标聚焦处, 将式(9)和式(10)的多点杂波重新表达为 $n_R + jn_I$ 和 $n_R - jn_I$ 。若式(7)中 A_T 满足瑞利分布, t 时的相位近似为均匀分布, 则 n_R 、 n_I 为均值为 0 的正态分布随机变量。

动目标聚焦时, $t = -(f_{d0}/k_m)$, 由式(11)得动点目标信号加静止背景杂波的时域模为 $\left| \sqrt{|k_m|} A_T T + n_R + jn_I \right|$; 当满足 $|f_{d0}| \leq (|k_m| T)/2$ 约束, 反聚焦向对称搜索二次相位所得图像同样位置的动目标加静止背景杂波的模为

$$\left| \sqrt{\frac{k_s}{2(k_s - k_m)}} A_T + n_R - jn_I \right|。两者之差为$$

$$\sqrt{(\sqrt{|k_m|} A_T T + n_R)^2 + n_I^2} - \sqrt{\left(\sqrt{\frac{k_s}{2(k_s - k_m)}} A_T + n_R \right)^2 + n_I^2} \quad (12)$$

这是一随机变量。当 $|f_{d0}| > (|k_m| T)/2$ 时, 在 $t = -(f_{d0})/(k_m)$ 处, 反聚焦向对称搜索二次相位所得图像在此位置没有动目标能量, 只有杂波的能量, 式(12)变为

$$\sqrt{(\sqrt{|k_m|} A_T T + n_R)^2 + n_I^2} - \sqrt{n_R^2 + n_I^2} \quad (13)$$

杂波中的多点刚体动目标对称搜索二次相位所得图像信号模差与单点类似。

不考虑 SAR 图像噪声, 若以对称搜索二次相位所得信号时域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(12)和式(13), 理

论上动目标的检测概率为 100%, 虚警率为 0。实际 SAR 图像中包含不能以此方法对消能量的噪声, 动目标检测门限就应选大于 0 的值, 检测概率达不到 100%。在 SAR 图像中杂波的能量总是大于噪声的能量, 尤其在强杂波背景中, 理想情况下的理论分析与实际情况近似。抑制杂波检测动目标的方法在强杂波环境中能充分体现出优势。

5 算法实现

将在频域乘 chirp 信号, 再进行 IFFT 回到时域的计算, 合并为二次相位变换, 可提高计算效率。文献[5]介绍了这种变幻的快速算法, 即快速离散二次相位变换法(Fast Discrete Quadratic Phase Transform)。

以对称搜索二次相位所得图像信号模差的绝对值检测动目标算法总结:

- (1) 确定动目标检测门限;
- (2) 将 SAR 复图像沿方位向, 进行 FFT, 变到频域;
- (3) 地面运动目标的速度一般不超过 50m/s, 而雷达平台速度通常大于 100m/s, 不考虑动目标的加速度, 可估计出需

搜索的 $1/|k_e|$ 的最大值为 $\max\left(\frac{1}{|k_e|}\right) = \frac{\lambda R_0}{2} \left(\frac{1}{(v-50)^2} -$

$\frac{1}{v^2} \right)$ 。在 $0 - \max\left(\frac{1}{|k_e|}\right)$ 取值范围内(只取正值, 负值由对称搜索完成), 等间隔依次取一值;

(4) 用 FDQPT 计算对称搜索二次相位所得图像对应位置模差的绝对值;

(5) 判断(4)的结果是否大于门限, 否则回到 3, 搜索下一 k_e 值, 直到搜索全部 k_e 值。若发现目标, 则指示动目标图象, 记录动目标的 k_e 参数。

6 仿真实验和实例

图 1 是仿真 SAR 图象方位向数据的处理结果, 图 1(a) 左边是一聚焦良好的静止目标图象, 右边是一包含二次相位误差的动点目标模糊图象; 图 1(b)中校正了动目标的二次相位, 此时动点聚焦良好, 静止点目标图象却扩散开来; 图 1(c)是与图 1(b)对称的反聚焦向修正二次相位后的图象, 此时静止点背景的图象与图 1(b)中静止点图象相比, 位置相同, 亮度处处相等, 而动目标图象则均匀扩散在静止点模糊图象的双倍长度范围内; 图 1(d)为图 1(b)和图 1(c)差的绝对值, 可见静止点已完全被抑制, 动目标信号只有极小的下降。

再看真实 SAR 图象处理的结果, 图 2 是某型 SAR 图象, SAR 主要参数如下: 发射脉冲时宽 $10 \mu s$, 频带宽 180MHz, PRF600Hz。图 2 水平向为方位向, 有 4096 个像素点。图 2 中左箭头指示处是一反射很强的动目标。沿方位向取出包含

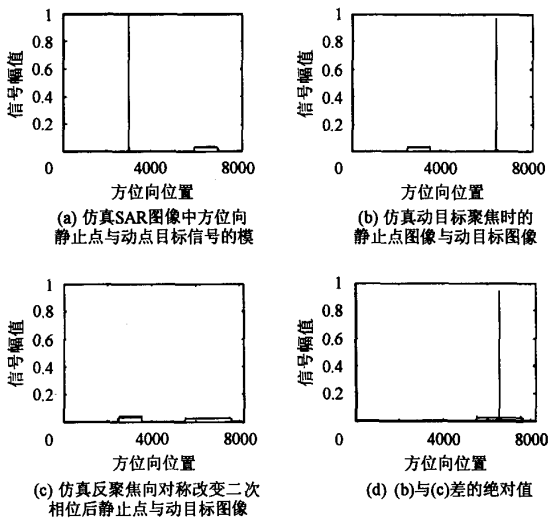


图1 仿真数据分析



图2 某型正侧视 SAR 图像(水平向为方位向, 左箭头指示处有一动目标, 右箭头指示处有一静止亮线)

此动目标的一行数据。图 3(a)是这行图像信号的归一化(以下同)模的波形, 从中看不出动目标。对此复图象信号搜索二次相位误差, 在动目标被聚焦时, 信号模的波形如图 3(b), 动目标信号高出最大杂波 0.42。图 3(c)为与图 3(a)对称的搜索二次相位所得信号的模。从图 3(b)和图 3(c)可见, 没有动目标的静止背景信号模在图 3(b)和图 3(c)中波形相似, 而出现动目标的地方, 图 3(b)和图 3(c)波形完全不同。图 3(d)为图 3(b)和图 3(c)之差的绝对值, 此时动目标信号高出最大噪声 0.51。这说明对消的结果使背景失去较多的能量, 而信号包含动目标的部分失去的能量较少, 动目标的可检测性得到增强。

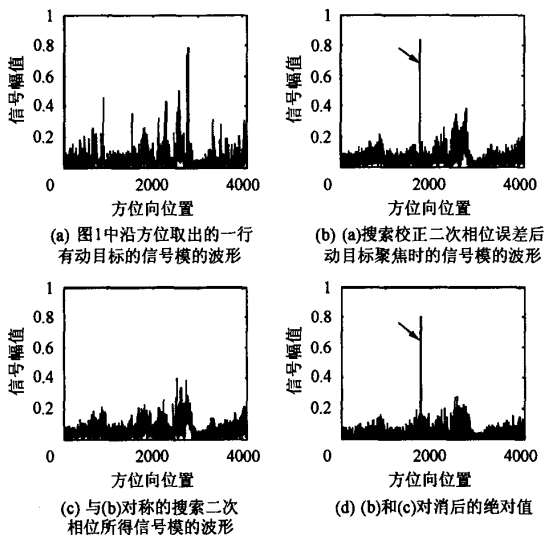


图3 实测 SAR 数据分析

图 2 右箭头指示处是一沿方位向的静止建筑物的亮线, 在图 3(b)和图 3(c)中, 此背景杂波能量表现最强, 在图 3(d)中受到的消减幅度最大。

7 结论

从仿真和实测数据结果可见, 以对称搜索二次相位所得图像信号模差的绝对值检测动目标与只聚焦动目标的检测方法相比, 杂波背景受到抑制, 动目标的可检测性得到增强。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 系统的误差和计算量化误差等因素使得不能对消的噪声能量不容忽视, 降低了抑制杂波法检测动目标的性能。

遇到强静止背景干扰时, 此检测方法优势明显。例如遇沿方位向的亮线状静止物体时, 通常只汇聚动目标能量的检测法不易区分此类目标, 见文献[4]。而本文的算法对此假目标有一定抑制作用。

由算法实现方式可见, 此方法与单纯搜索校正二次相位误差汇聚动目标能量的检测方法计算量相当。

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: 84 - 107.
- [2] R P Perry, R C Di Pietro, R L Fante. 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*, 2003, 39(2): 604 - 624.
- [4] Fienup J R. Detecting moving targets in SAR imagery by focusing[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(3): 794 - 808.
- [5] Ikram M Z, Abed-Meraim K, Hua Y. Fast discrete quadratic phase transform for estimating the parameters of chirp signals[A]. *IEEE Conference Record of the Thirtieth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 1997, Vol.1: 798 - 802.

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, 副教授, 研究方向为雷达成像和信号处理。