

动目标合成孔径雷达成像中的多普勒斜率匹配滤波

王琦 王岩飞

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要 该文提出一种多普勒斜率匹配滤波方法,用于解决 SAR 对运动目标成像中目标回波调频率变化引起的方位散焦问题。该方法通过 CFAR 预检测和迭代运算解决了多普勒斜率估计精度与多普勒斜率滤波器组运算量间的矛盾,有利于实时处理动目标成像和辨识。通过对运动目标回波特点和真实运动目标的成像分析证明了这一方法的可行性。

关键词 合成孔径雷达, 运动目标, 多普勒斜率估计

中图分类号: TN958, TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)09-1586-04

Moving Target Focusing by Doppler Slope Filters

Wang Qi Wang Yan-fei

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

(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract This paper presents a new SAR Doppler slope filters method for detecting the cross range velocity of moving target. This method builds the Doppler slope filter group recursively and reduces the amount of operations. By analysis on the detection precision and range of target speed, the advantage and the limit of this method are indicated. The detection results from real data demonstrate the accuracy of the conclusion.

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

1 引言

合成孔径雷达(SAR)将合成孔径技术、脉冲压缩技术和数字信号处理结合运用,得到距离及方位向两个方向上的高分辨率地面图像,即通过发射宽带调频信号和脉冲压缩技术获得距离向的高分辨率、通过较短的天线尺寸和载机的规则运动以及信号处理方法获得方位向的高分辨率^[1]。由于SAR具有全天候,高分辨率成像等特点,在许多领域中获得广泛应用。

在许多使用合成孔径雷达的成像应用中,特别是在实时监测和跟踪时,人们并不满足于得到地面静止目标场景,而希望能够检测运动的目标,并尽可能产生聚焦的图像,生成静止、运动目标成像叠加图。SAR成像利用了雷达与地面场景之间的相对运动,由于运动目标的运动方式并不固定,运动目标的图像在常规SAR成像中可能模糊,或者不能相对于固定的地面背景定位,给辨识带来很大困难^[2]。解决运动目标成像面临的这些问题是目前合成孔径雷达研究的重点之一。

本文在分析机载 SAR 运动目标回波信号特点的基础上,引入一种调频率匹配滤波方法,用以解决由于目标回波调频率变化引起的方位散焦问题。通过 CFAR 预先检测出可能目标区域以及采用逐次逼近的迭代运算构造多普勒斜率滤波

器,大大降低了运算量,同时提高了多普勒斜率的识别精度,有利于实时处理的动目标成像和辨识。

2 运动目标成像特点

图 1 表示运动目标与雷达的几何关系。目标的运动被分解为距离向分量和方位向分量。

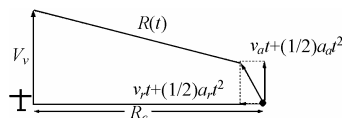


图 1 运动目标与雷达几何关系

Fig.1 Relationship of moving target and radar

由图 1 有

$$R^2(t) = \left(v_v t - v_a t - \frac{1}{2} a_a t^2 \right)^2 + \left(R_c - v_v t - \frac{1}{2} a_a t^2 \right)^2 \quad (1)$$

设 $\varepsilon_{r'} = v_r / v_v$, $\varepsilon_{r''} = a_r R_c / v_v^2$, $\varepsilon_{a'} = v_a / v_v$ 。回波信号可以表示为

$$S_r(x) = g(x) \exp(-2jk\varepsilon_{r'}x) \exp\left(-jk\frac{x^2}{R_c} \left((1-\varepsilon_{a'})^2 - \varepsilon_{r''} \right)\right) \quad (2)$$

其中 x 为目标方位向位置, k 为发射线性调频信号斜率, $g(x)$ 为天线方向图加权。运动目标的多普勒中心频率和调频斜率为^[2]

$$f_c = 2v_r / \lambda \quad (3)$$

$$K_f = 2(v_v - v_a)^2 / (\lambda R_c) \quad (4)$$

目标距离向和方位向的速度及加速度都会对成像造成

影响。距离向速度会引起距离单元位移。在合成孔径时间 T_s 这段时间里, 目标距离向位移导致记录的距离单元数据条带产生距离向迁移。距离向速度分量的另一个影响是中心频率偏移导致目标图像在方位向的偏移。位移的大小与目标的运动速度 ε_r 相关。

$$x = v_r(-\varepsilon_r R_c / v_r) = -\varepsilon_r R_c \quad (5)$$

方位向的速度和距离向加速度则对回波信号的调频斜率造成影响, 从式(2)可见回波信号线性调频项系数变为 $(1 - \varepsilon_a)^2 - \varepsilon_r$, 使用原来调频斜率进行相关滤波会造成方位向聚焦模糊^[3]。

3 多普勒斜率滤波方法

运动目标的运动参数可以分解为距离向运动速度 v_r 、加速度 a_r 以及方位向运动速度 v_a 和加速度 a_a 。其中距离向运动速度造成的影响可以采用频域滤波方法及距离迁移校正方法消除。而运动目标回波方位向多普勒调频斜率 K_f 受方位向速度和距离向加速度的影响偏离静止目标方位向多普勒调频斜率 K_{f0} 。在成像过程中需要相应调整匹配滤波器参数, 使参考函数同运动目标的调频斜率相一致, 最终成像才可得到完全聚焦^[3-5]。

确定正确的匹配滤波器参数有两种方法, 一种首先辨识目标并对其运动参数进行确定, 根据目标的运动参数确定滤波器参数, 这一方式包括时频分析方法及RDM法^[6]。另一种方式则事先定义一组匹配滤波器, 每个滤波器参数对应一个多普勒调频斜率 K_f 。利用这一组滤波器对运动目标回波信号分别成像, 根据各个滤波器输出结果比较可以判定正确聚焦结果, 并按照对应滤波器参数求出运动目标的运动参数。

图 2 中为理想线性调频信号在采用不同调频斜率的匹配滤波器滤波输出后的最大输出变化图, 在匹配滤波器调频斜率与原有信号相同时输出最大。如果将包含运动目标的回波信号通过多个不同调频斜率匹配滤波器进行处理, 比较各个滤波器输出即可得到正确的线性调频信号调频率估计。多普勒斜率滤波器组方法具有原理和处理步骤比较简单的优点, 但是如要获得较高精度的 K_f 估计值, 滤波器之间的参数差 ΔK_f 必须较低。设目标可能的调频斜率在 $K_{f \min}$ 和 $K_{f \max}$ 之间, 则需要的滤波器数目:

$$N_f = (K_{f \max} - K_{f \min}) / \Delta K_f \quad (6)$$

高精度多普勒斜率估计需要大量增加滤波器数量, 运算

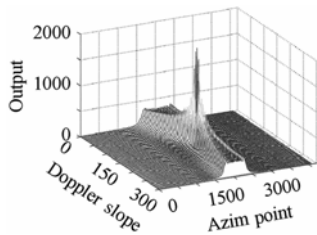


图 2 匹配滤波器调频率变化与输出
Fig.2 Match filter output vs. Doppler slope

量较普通 SAR 算法明显提高。

分别采用 100 个多普勒斜率滤波器对一实际运动目标回波进行匹配滤波, 图 3 显示了匹配滤波器输出最大值与多普勒斜率比之间的关系。图中横坐标为滤波器多普勒调频斜率 K_f 与静止目标参考函数调频斜率 K_{f0} 的比值。纵坐标为各个滤波器输出图像中目标点输出幅值。从曲线可以看出, 滤波器多普勒斜率与目标一致时输出幅值最大, 而在偏离目标实际多普勒斜率时, 输出幅值随偏差加大而快速降低。如果要提高多普勒斜率辨识精度, 需要增加滤波器组中滤波器数量, 加大了运算量。另外, 如果同一方位线上存在多个目标, 各目标聚焦成像幅值将相互干扰而无法判断各个目标的正确参数。

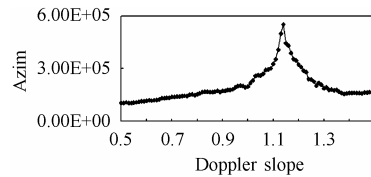


图 3 多普勒调频斜率 K_f 与目标聚焦亮度关系图

Fig.3 Real target focus output vs. Doppler slope

为此本文提出结合恒虚警概率检测(CFAR)方法和逐次逼近方法的局部多普勒斜率滤波方法, 大大降低了多普勒斜率滤波方式的运算量, 对同一方位线上不同方位坐标的多个运动目标也能区分和进行重新聚焦。

该方法采用频域滤波法或者其他地杂波消去方法去除地面静止背景回波信号, 然后采用静止目标的参考函数对原始数据进行成像。所得图像中可能包含运动目标的散焦图像和已经正确聚焦的运动目标图像, 同时包含了噪声信号等因素造成的背景杂波干扰。

首先利用 CFAR 检测将可能存在的运动目标检出。CFAR 处理在图像域进行, 根据给定的虚警概率及对干扰杂波的估计求得判别阈值 S 。当检测器输出高于阈值即判断目标存在。算法的流程图如图 4。

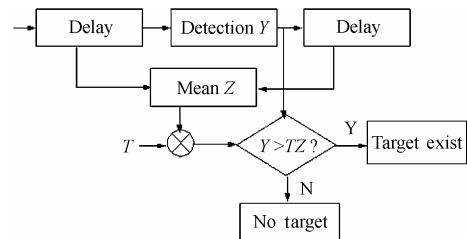


图 4 典型恒虚警检测(CFAR)算法流程图

Fig.4 Classic CFAR flow chart

SAR 图像由目标回波及地面背景杂波信号两部分组成。地面背景杂波信号为一随机信号, 可以表示为 $\tilde{A} = A \cdot e^{j\zeta}$, 其中 A 为信号幅值, ζ 为相位。两者均为随机变量。杂波信号的相位 ζ 服从均匀分布, 而杂波幅值 A 成瑞利分布, 其概率密度函数为

$$f(A) = \begin{cases} (A/\mu^2)e^{-A^2/2\mu^2}, & A \geq 0 \\ 0, & A < 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中 μ 为表征瑞利分布的常数。根据瑞利分布特性可以得到均值 I 与 μ 的关系为

$$I = \sqrt{\pi/2}\mu \quad (8)$$

系统对被检测单元临近区域采样, 估算信号中包含的杂波均值, 根据给定的虚警概率确定阈值系数 T 。阈值 $S=IT$ 。信号 Y 与 IT 进行比较确定目标是否存在。

利用恒虚警概率检测方法检出可能存在运动目标的方位线进行多普勒斜率滤波处理, 去除了大多数不存在目标的方位线, 大大降低多普勒斜率滤波的运算量。如果一条方位线上检出多个分离的可能目标, 则采用多普勒斜率滤波法分段对各个可能目标进行聚焦处理, 在各段得到聚焦同时可以获得多个目标的多普勒调频率估计。由于目标运动影响, 运动目标成像可能存在散焦而降低目标亮度, 需要降低虚警概率指标, 提高对低亮度目标的检出率, 从地面背景噪声中辨识出可能的运动目标, 虚警目标在后续处理中将被检出。

由仿真计算和图3实际计算结果可以得到, 多普勒斜率 K_f 的匹配滤波器输出最大值沿实际目标回波多普勒斜率 K_f 对称分布, 滤波器的输出幅值随多普勒斜率的偏差降低而提高。因此, 可以采用逐次逼近方式调整滤波器参数, 减少运算量。图5即逐次逼近方法的示意图。

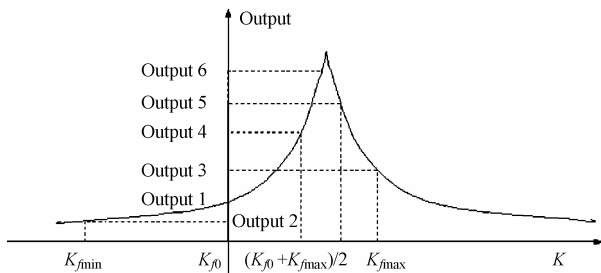


图5 逐次逼近法示意图

Fig.5 Recursively approach method

采用静止目标回波调频率 K_{f0} 对回波信号进行匹配滤波成像, 然后根据预测目标最大的方位向运动速度, 确定调频率范围, 分别取可能的调频率最高值 K_{fmax} 和最低值 K_{fmin} 成像。将其中输出幅值较大的滤波器调频率与中心调频率 K_{f0} 进行平均作为下一匹配滤波器的多普勒调频率。依次递推, 每次取输出幅值最大的两个匹配滤波器调频率进行平均作为下一匹配滤波器调频率, 可以很快逼近运动目标的真实调频率。

根据上述原理可知, 最终调频率辨识精度 ΔK_f 由下式决定

$$\Delta K_f = \frac{(K_{fmax} - K_{fmin})}{2^{(N_f - 2)}} \quad (9)$$

对给定精度 ΔK_f 可得

$$N_f = \log_2 \left(\frac{K_{fmax} - K_{fmin}}{\Delta K_f} \right) + 2 \quad (10)$$

与式(6)相比可以看出, 在需要较高精度调频率分辨率的场合, 采用递推法构造滤波器组可以大大降低所需滤波器数量。如假设 $(K_{fmax} - K_{fmin})/\Delta K_f = 100$, 根据式(6), 普通滤波器组法需要滤波运算数量 $N_f = 100$, 而由式(10)可得 $N_f = 9$, 只需重复9次匹配滤波运算, 较普通方式所需运算量明显降低, 而且, 要求的辨识精度越高, 递推方法运算量的优势越明显。

获得目标的回波调频率 K_f 后, 不仅可以对运动目标进行方位向的精确聚焦成像, 同时也可以根据调频率求得目标方位向运动速度 v_a 。由式(4)可以推得

$$v_a = -v_r(k_f - k_{f0}) / (2k_{f0}) \quad (11)$$

4 基于递推法的多普勒调频率滤波器实际应用

为了检验上述方法的可行性, 我们采用频域滤波法结合多普勒调频率滤波器组对一段包含运动目标的高分辨率合成孔径雷达数据进行处理。

首先采用标准方法对回波进行成像, 得到静止的地面图像如图6所示。

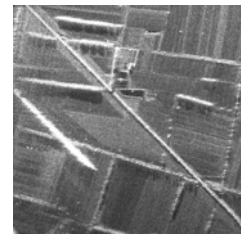


图6 静止地面目标回波成像

Fig.6 Ground image of SAR

贯穿图像的对角线方向亮线为铁道, 图像左侧模糊的亮带为运动的火车图像。由于火车距离向速度的影响, 火车的图像在方位向上有所偏移, 离开了铁道位置。同时由于存在方位向速度, 回波多普勒斜率发生了改变, 造成最终成像的散焦。

目标存在距离向速度, 其多普勒中心频率与静止目标回波相比有所偏离, 因此采用频域滤波法, 利用带通滤波器将运动目标回波信号与静止目标回波信号分离, 然后对运动目标回波信号单独进行成像和检测处理。

图7为进行频域滤波和距离向迁移补偿后, 所成图像成像结果。可以看到, 火车分解成为多个短线, 不同距离的强反射点成像得以分离, 距离向迁移也得到了补偿, 火车成像恢复到应有位置, 同静止图像中的铁道位置重合。

图7中的火车图像在方位向上仍然表现为短的线段, 这是由于火车具有方位向速度, 造成方位聚焦不完全。为此采用第3节中多普勒斜率滤波器组对运动目标的方位向运动参数进行检测和估值。经过10级递推, 可以得到较好聚焦的目标图像如图8所示。

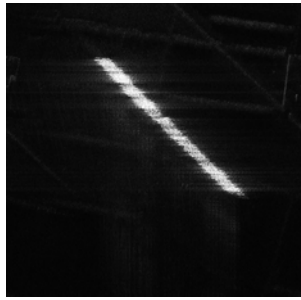


图7 频域滤波及迁移校正

Fig.7 Train image after frequency filter and range walk correction

图8为进行频域滤波和距离向迁移补偿后,所成图像的成像结果。可以看到经过多普勒斜率滤波器后,运动目标的方位向聚焦情况有了很大改善,图像峰值亮度提高很多,有利于后期的目标检测。同时根据递推过程得到了对目标多普勒斜率的估计值,可以判断出运动目标的对应运动参数。在本例中,目标多普勒斜率的校正系数 $K_f = 1.25K_{f0}$,则 $v_a / v_p \approx -(k_f - k_{f0}) / (2k_{f0}) = -0.125$ 。其中 v_a 为目标方位向运动速度, $v_p = 125\text{m/s}$,为平台的运动速度。从中可以求得火车方位向运动速度为 15.6m/s 左右。这一数值符合三角方法从目标距离向运动速度推导出的目标方位向运动速度。从另一方面证明了多普勒斜率滤波器组方法估计运动目标多普勒斜率的准确性。

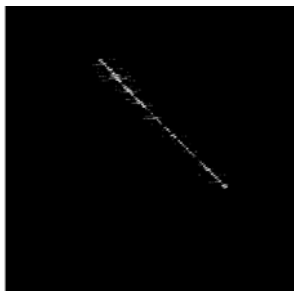


图8 多普勒斜率校正后输出图像

Fig.8 Train image after Doppler slope correction

5 结束语

本文分析了合成孔径雷达运动目标回波特性以及运动目标成像存在的问题,根据目标方位向运动对回波多普勒斜率的影响,提出采用多普勒斜率滤波器组对目标的回波多普勒斜率参数进行辨识的方法,利用递推法构造的斜率滤波器组大大降低了估计回波多普勒斜率所需要运算量,提高了估计精度。通过对一段包含运动目标回波的真实回波数据进行处理,获得了较好的运动目标成像,验证了这种多普勒斜率滤波方法在合成孔径雷达运动目标检测和成像中应用的可行性,为实用化的合成孔径雷达运动目标成像检测处理提供了有益的思路。

参考文献

- [1] Curlander J, McDonough R. Synthetic Aperture Radar System and Signal Processing, New York: Wiley, 1991, chapter 1, 2.
- [2] 张澄波, 综合孔径雷达原理、系统分析与应用, 北京: 科学出版社, 1989, 第四章.
- [3] Freeman A, Currie A. Synthetic aperture radar (SAR) images of moving targets. *GEC Journal of Research*, 1987, 5(2): 106-115.
- [4] D'Addio E, Di Bisceglie M, Bottalico S. Detection of moving objects with airborne SAR. *Signal Processing*, 1994, 36(2): 149-162.
- [5] Hern-Chung Chen, Clare D, McGillem. Target motion compensation by spectrum shifting in synthetic aperture radar. *IEEE Trans. on AES*, 1992, 28(3): 895-901.
- [6] 李杰, 向敬成, 黄顺吉. 合成孔径雷达慢运动目标成像处理的研究. *电子科技大学学报*, 1995, 24(2): 119-125.

王琦: 男, 1976年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达信号处理.

王岩飞: 男, 1963年生, 博士, 研究员, 主要从事有关微波成像雷达系统和基本理论、数字信号处理等方面的研究工作.