

# 利用短时 FFT 的距离-多普勒域 SAR 运动目标检测

王琦 王岩飞

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

**摘要** 该文提出了一种新的合成孔径雷达(SAR)运动目标检测和成像方法,即利用短时 FFT 处理原始数据,在距离多普勒域对运动目标进行识别和参数检测,获得的目标参数可以用来正确成像运动目标。对运动目标回波特点和雷达参数的分析证明了这一方法的可行性和有效性。最后通过对包含真实运动目标回波的原始数据进行处理,对该方法进行了验证。

**关键词** 合成孔径雷达, 运动目标, 距离迁移效应

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)04-0628-04

## Moving Target Detection with Short Time FFT for SAR

Wang Qi Wang Yan-fei

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

**Abstract** This paper presents a new method for moving target detection using SAR. With the help of short FFT analyses and CFAR detection, this method calculates the moving parameter of the target from range migration effect. An analysis on the detection precision and range of target speed is given in the following characters. The advantage and the limit of this method are indicated and the detection results from real data demonstrate the accuracy of the conclusion.

**Key words** Synthetic aperture radar, Moving target detection, Range migration

### 1 引言

合成孔径雷达(SAR)是一种高分辨率成像雷达,它采用相干雷达系统和运动中的单个天线模拟真实线性天线阵列,可以获得高分辨率的地物图像。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。很多情况下, SAR 系统除对地面静止目标成像外,还需要对运动目标进行检测和成像,例如辨别地面背景下运动中的车辆船只等。在许多应用中使用高分辨率的合成孔径雷达对成像区域内运动目标进行检测和聚焦成像具有重要的意义,因此成为目前合成孔径雷达研究的重点之一。

运动目标回波与地面静止目标雷达回波相比,因目标本身运动参数的影响存在许多差异,如果采用传统的合成孔径成像技术直接处理运动目标回波,成像结果将出现错误。目标运动对 SAR 回波的影响主要体现在两个方面,即回波的多普勒中心频率迁移和多普勒调频斜率的变化。多数运动目标成像和检测方法都是检测这两个参数的变化,将运动目标与静止的地面背景区分开。这些检测方法根据原理不同可以分为多普勒频率滤波法、多普勒斜率检测法、时频分析方法和多天线 SAR 运动目标检测。

本文在分析合成孔径雷达运动目标回波特点的基础上,

提出了一种新的运动目标检测和成像方法。这种方法参考了时频分析方法,将距离迁移效应应用于运动目标检测中,在距离多普勒域进行运动目标的检测和参数判别,最后可以应用频域滤波方法对运动目标回波进行正确成像。这一方法被应用于一段包含真实运动目标回波的原始数据处理,得到了运动目标的正确成像,证明了这一方法的有效性。

### 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。由图 1 有

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

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  $g(x)$  为天线方向图加权。运动目标的多普勒中心频率和多普勒调频斜率分别为

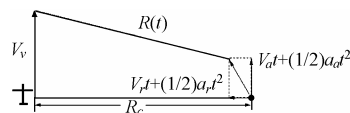


图 1 运动目标与雷达的几何关系

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

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

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。回波能量分布于各个方位线上,造成最终成像的距离向散焦。

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 $\varepsilon_r$ 相关。

$$x = v_v \left( -\frac{\varepsilon_r R_c}{v_v} \right) = -\varepsilon_r R_c \quad (5)$$

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 利用距离迁移效应对运动目标参数检测

第2节分析中可知,目标运动对回波的影响主要体现为回波距离向迁移、多普勒中心频率偏移以及多普勒斜率变化。以往各种运动目标检测和成像方法多数利用回波多普勒中心频率和斜率的变化对目标的运动参数进行检测,而距离向迁移则被视为影响检测的一个因素进行消除。尤其在高分辨率合成孔径雷达成像中,由于合成孔径时间较长以及距离向分辨单元 $\rho_r$ 较小,距离向速度引起的回波距离向迁移 $\Delta R$ 要远大于 $\rho_r$ ,对于目标的成像和检测都极为不利,一般检测方法中需要采取各种措施对距离向迁移效应进行消除。但是,利用这一效应也可以对目标的距离向速度进行估计。

图2为一个运动目标在距离-方位向频率域轨迹的示意图,图中阴影条带即运动目标回波在R-F平面上的轨迹。 $\Delta R$ 为目标距离向速度引起的距离向迁移。设合成孔径时间为 $\Delta T$ ,则

$$\Delta R = v_r * \Delta T \quad (6)$$

可知距离向运动速度:

$$v_r = \Delta R / \Delta T \quad (7)$$

$\Delta R$ 可以由图中直接得到, $\Delta T$ 则可由 $\Delta f$ 推导得出。要实现这一运算,首先需要从距离-方位向频域图中将这一条带辨识出来,进行这一辨识比较困难,需要的运算量较大。另外,由于目标方位向运动速度等参数会影响回波多普勒斜率,由

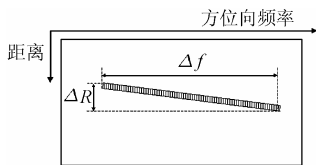


图2 目标距离-方位频谱示意图

频域 $\Delta f$ 推导 $\Delta T$ 同样存在误差。

为此,采用时频分析方法对经过距离压缩的数据进行处理。截取原始数据中短时间 $\Delta t$ 部分,进行短时傅里叶变换,可以获得短时间 $\Delta t$ 内的回波数据频谱分布。设短时傅氏变换长度为 $N_s$ ,则短时傅氏变换频率域的分辨率为 $\text{PRF}/N_s$ 。相应 $\Delta t$ 内的目标回波频率变化量

$$\Delta f = K_f * \Delta t = \frac{2(v_v - v_a)^2 N_s}{\lambda R_c \text{PRF}} \quad (8)$$

忽略目标方位向速度 $v_a$ 的影响,在 $N_s$ 较小情况下,只要满足

$$N_s < \frac{\text{PRF} * \sqrt{\lambda R_c / 2}}{v_v} \quad (9)$$

即可得到

$$\Delta f \approx \frac{2v_v^2}{\lambda R_c} * \frac{N_s}{\text{PRF}} < \text{PRF} / N_s \quad (10)$$

这种情况下,由于目标回波的频率变化量低于FFT的频率分辨率,变换后目标回波在频域图中反映为一个特定频率点。

如图3所示,上方为经过距离压缩的雷达回波数据,下方为经过方位向FFT变换后的距离-方位向频域图。某个小段 $\Delta t$ 回波数据中包含的运动目标回波信号经过短时FFT在距离-方位向频谱图中对应一个亮点,这样,采用CFAR等检测手段就可以将目标回波从杂波背景中检测出来。同样对回波数据的每小段进行短时FFT处理,获得各段数据的距离-方位向频谱图并对图中的目标回波进行检测。因为这些数据段在时域相邻,经过FFT变换为频域后,检测结果同样为相邻点,各点叠加成为图2中条带形式。采用数组存储各次短时变换后相邻的检出点距离和方位向频率,最终即可获得对应于运动目标的连续距离-方位向频域曲线。

运动目标回波信号强度较高时,在距离-方位向频域图中即使位于地面静止目标回波区域也可以被检测出来,但实际应用中更多存在的是较弱的回波信号,如果它们位于静止目标频率范围内会被背景遮盖而无法检出。对弱信号的检测需要以静止目标带宽 $B$ 进行滤波,消去静止目标回波信号的影响,可以认为中心频率偏移到静止目标回波带宽之外的运动

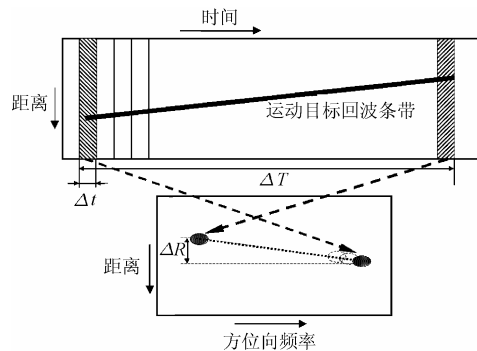


图3 短时 FFT 变换示意图

目标回波信号才能被检出,即

$$N * PRF + \frac{B}{2} < \frac{2 * |v_r|}{\lambda} < (N+1) * PRF - \frac{B}{2} \quad (11)$$

检测数组记录各短时段频域图中依次存在的相邻检出点,仅仅在某些短时段频域图中存在的孤立噪声点均可以被忽略不计,这样提高了目标的检测性能。根据相邻点组成数组的长度等参数,即可以排除多数干扰获得运动目标对应曲线。在  $\Delta t$  段时间内,可以认为目标距离  $R$  基本不变,  $\Delta R$  可以由检出数组记录的不同时间段目标距离差值求出,而  $\Delta T$  也可以由目标信号的起始和末端对应方位线差值除以脉冲重复频率  $PRF$  获得,由式(7)即可推得目标的距离向运动速度  $v_r$ 。同时根据频域变化可以得到目标的多普勒斜率  $K_f = \Delta f / \Delta T$ ,结合式(4)即可获得目标的方位向运动速度  $v_a$ 。

可以看出目标的距离向运动速度  $v_r$  和方位向运动速度  $v_a$  估计精度与合成孔径雷达的距离向分辨率  $\rho_r$ 、短时傅氏变换的时间片长度  $\Delta t$ 、雷达脉冲重复频率  $PRF$  和回波条带时间长度也就是合成孔径时间  $\Delta T$  相关。

距离向分辨率  $\rho_r$  和时间片长度  $\Delta t$  影响距离迁移估计值  $\Delta R$  的估计精度。在时间片  $\Delta t$  中,如果目标距离向速度较小,满足  $v_r * \Delta t < \rho_r$ , 在每一时间片的FFT变换后目标能量集中于一条方位线,  $\Delta R$  估计精度仅受距离向分辨率影响,其估计精度即距离向分辨率  $\rho_r$ 。否则在FFT变换后目标能量分散于几条方位线,只能取其中点作为目标在该时段的距离向位置估计,估计精度为  $v_r * \Delta t$ 。目标距离向运动速度估计精度与  $\Delta R$  误差和  $\Delta T$  相关

$$\Delta v_r = \max(\rho_r, v_r * \Delta t) / \Delta T \quad (12)$$

目标的方位向运动速度估计精度则与  $\Delta f$  估计精度相关。由于短时FFT长度  $N_s = \Delta t * PRF$ , 方位向频域分辨率  $\rho_{fa} = PRF / N_s = 1 / \Delta t$ 。根据式(4)可推得

$$\Delta v_a \approx \frac{\lambda R c}{4 v_r \Delta T^2 \Delta t} \quad (13)$$

从式(12),式(13)中可知加大合成孔径时间  $\Delta T$  能够改善对运动目标距离以及方位向的估计精度。但是增大合成孔径时间的同时增大了地面静止目标的回波带宽,弱反射的运动目标回波很有可能被静止地面背景回波遮盖而无法检测出来。同样,提高  $PRF$  可以增大运动目标速度的检测范围,但是  $PRF$  的提高相应增大了系统处理能力的需要,而降低静止目标回波带宽则影响成像的方位向分辨率以及对目标运动参数的估计精度。短时FFT长度  $\Delta t$  对距离和方位向的影响不同,还需要结合式(10)的要求进行确定。因此,各参数均应针对应用的具体需求进行分析确定。

经过以上处理,运动目标回波可以从距离-多普勒域数据中识别出来,同时也可以确定目标的运动参数  $v_r$  以及  $v_a$ , 利用这些参数采用频域滤波等方法对原始数据进行成像,即

可得到正确聚焦成像的运动目标图像。

#### 4 采用实际数据的检验和成像分析

为了进一步对这一方法进行分析 and 验证,采用这种方法对一段实际飞行获得的高分辨率合成孔径雷达回波数据进行处理。雷达脉冲重复频率  $PRF = 2096$ , 已经过距离向脉冲压缩,距离向分辨单元为  $1.5\text{m}$ 。信号长度为  $8192$  方位线长度。

将各项参数代入式(10),短时FFT长度选取为  $256$  点较为合适,由式(11)-式(13)可以求得目标距离向运动速度检测范围为  $20.5 * N + (5.1 \sim 15.4) \text{ m/s}$ , 目标距离向速度识别精度  $\Delta v_r$  在  $v_r < 12.3\text{m/s}$  时为  $0.37\text{m/s}$ ,  $v_r > 12.3\text{m/s}$  时为  $v_r * \Delta t / \Delta T \approx 0.03 v_r$ 。而方位向速度识别精度  $\Delta v_a$  为  $0.28\text{m/s}$ 。采用距离向迁移辨识方法的性能基本满足实际需要。

对  $8192$  线数据进行整体方位向FFT获得频域图像局部如图4,两侧亮带为地面静止目标回波,由于  $PRF$  大于静止目标带宽,中间可见暗部即  $PRF$  较静止目标回波带宽高出部分。图中可以看到存在一条运动目标回波。用短时傅里叶变换处理回波数据,取  $256$  线作为处理单元,则  $\Delta t = 256 / 2096 = 0.122\text{s}$ 。第  $250$  线到  $506$  线数据短时FFT变换结果如图5所示,图中两侧黑色部分为静止目标频谱,已被程序滤除。



图4 距离-方位向频域图局部

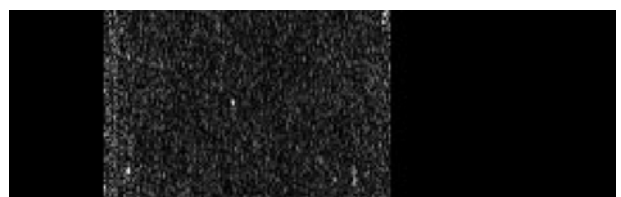


图5 250-506线数据FFT变换结果

经过恒虚警概率检测(CFAR)后,从中辨别出运动目标对应信号。将各小段数据检测结果合并得到图6。从图中可以看到运动目标回波在各小段FFT后检出信号叠加所得亮线。在检测数组中可得到这一线条参数,其起始点坐标为(94, 1284),对应方位线第250线,终点坐标(50, 1267),对应方位线第7250线。根据式(6),式(7)求得目标距离向运动速度  $v_r = \Delta R / \Delta T = -(1284 - 1267) * 1.5 / (7000 / 2096) = -7.64\text{m/s} = -27.5 \text{ km/s}$ 。多普勒斜率  $K_f = \Delta f / \Delta T = 107.87 \text{ Hz/s}$ , 对应目标方位向速度基本为0。

从距离-多普勒域叠加图不仅可以检测出雷达回波中运



图6 各段检测结果合成图



图7 最终成像合成图

动目标回波信号的存在,同时也确定了这一运动目标的距离向坐标和运动参数,根据这些参数,采用频域滤波法很容易将运动目标恢复成像于原有位置。经过恒虚警概率检测后的目标图像与原有静止地面图像叠加成为图7。图中中心偏右位置暗色区域中的亮点即运动目标,已被检出并叠加于地面静止图像上。图中运动目标其方位向位置位于跑道上,与实际情况相吻合,证明了该方法的有效性。

## 5 结论

本文在分析运动目标回波特性的基础上,提出了一种采用时频分析方法和运动目标距离向迁移效应对运动目标进行检测的方法,结合频域滤波等方式可以得到一定范围内

运动目标的正确成像。这种方法较传统时频分析法具有运算量小,不需要对距离迁移效应进行补偿等优点,尤其适合于高分辨率合成孔径雷达对运动目标进行检测和成像。通过对一段包含运动目标的实际飞行数据进行处理,验证了这种方法的有效性。

## 参考文献

- [1] Curlander J, McDonough R. Synthetic Aperture Radar System and Signal Processing, New York: Wiley, 1991.
- [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.
- [3] 王岩亭. 合成孔径雷达并行处理与距离模糊研究.[硕士学位论文], 北京: 中国科学院电子学研究所, 1997.
- [4] 张冰尘. 合成孔径雷达实用化运动目标检测和成像技术研究.[硕士学位论文], 北京: 中国科学院电子学研究所, 1999.
- [5] 孙泓波, 顾红, 苏卫民, 刘国岁. 基于互 Wigner-Ville 分布的 SAR 运动目标检测. 电子学报, 2002, 30(3): 347-350.

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, 博士生导师, 从事有关微波成像雷达系统和基本理论、以及数字信号处理方面的研究工作.