

# 一种新的双孔径天线干涉 SAR 动目标检测方法

孙 娜, 周荫清, 李景文

(北京航空航天大学电子工程系, 北京 100083)

**摘 要:** 提出了一种基于双孔径天线沿航迹向干涉 SAR 进行动目标检测、测速及定位的新方法. 该方法在分析杂波对消必要性的基础上, 给出了进行地杂波对消、动目标检测、径向速度分量估计及定位的原理和实现方法. 在恒虚警处理后, 通过比较杂波对消后的残差图像与原始图像中运动目标和静止目标对消幅度的差异, 检测出运动目标. 同时, 可以利用残差图像中杂波的对消特性进行运动目标径向速度的估算以及目标的定位. 这种检测方法具有良好的杂波对消性能, 能够完成被地面背景杂波掩盖的运动目标的检测、测速及定位. 计算机仿真结果验证了其有效性.

**关键词:** 动目标检测; 杂波对消; 沿航迹向干涉; 对消特性

**中图分类号:** TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 12-1820-04

## A New Moving Target Detection Method Based on Dual-Aperture Antenna Interferometric SAR

SUN Na, ZHOU Yin-qing, LI Jing-wen

(Dept. of Electronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In this paper, a new method of moving target detection, radial velocity estimation and relocation based on dual-aperture antenna along-track interferometric SAR is proposed. The principle and realization of clutter cancellation, moving target detection, radial velocity estimation and relocation are presented based on the analysis of clutter cancellation necessity. After constant false alarm rate (CFAR) processing, the moving targets are separated and the detection process is realized by comparing the cancellation extent between the residue SAR image and the original SAR image. In the meanwhile, the radial velocity estimation and relocation of moving targets can be performed by using the clutter cancellation characteristics of the residue SAR image. This method features significant clutter cancellation and can perform the detection, radial velocity estimation and relocation of moving targets masked by ground clutters. Simulation results show that the method proposed in this paper is effective.

**Key words:** moving target detection; clutter cancellation; along-track interferometry; cancellation characteristics

### 1 引言

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 是一种高分辨率微波成像雷达, 具有全天时、全天候、探测距离远、穿透能力强等显著优点, 在军事侦察、灾害监测、地形测绘、海洋研究、资源勘探、科学研究以及民用等领域得到了广泛应用<sup>[1]</sup>. 合成孔径雷达动目标检测与成像在军事上具有特殊重要的意义, 一直是人们关注的焦点问题. 随着现代军事的发展, 希望能够检测并聚焦动目标, 同时将运动目标标注在静止目标图像上, 或者检测出重点战区中的运动目标及其运动趋势, 使指挥者能够全面了解和掌握战场态势, 作出有力决策. 因此, 动目标检测方法的研究是 SAR 信号处理领域的一个重要发展方向, 具有广阔的应用前景. 1971 年, 美国的 R. Keith Raney 首先开始研究 SAR 动目标检测与成像<sup>[2]</sup>. 指出地面上低速运动目标的距离向加速度和方位向速度会造成图像方位散焦, 距

离向速度则造成图像的方位偏移和距离模糊, 并提出了对点目标模型运动目标的频率检测和相位检测方法. 在 1991 年海湾战争中战绩卓越的美军联合监视目标攻击雷达系统 (JSTARS)<sup>[3]</sup>, 可以提供全天候大区域战场监视和动目标检测, 在高分辨率雷达图像上能同时显示地面静止目标和场景中的低速运动目标. JSTARS 采用三孔径杂波抑制干涉技术对消杂波并定位动目标<sup>[3,4]</sup>. 加拿大的 Radarsat 2 卫星<sup>[5]</sup> 具备 GMTI 模式, 采用双天线结构, 但对其具体实现知之甚少.

运动目标检测涉及杂波对消、测速和定位三个内容. 对于双孔径天线雷达系统, 如果不存在地杂波或地杂波很小, 则可以采用类似干涉仪测量技术进行动目标测速和定位. 如果存在强背景杂波, 必须首先完成地杂波对消, 然后进行动目标检测. 双孔径天线通常不能同时实现测速和定位.

本文提出了一种基于双孔径天线沿航迹向干涉 SAR 对强背景杂波下慢速运动目标的检测、测速及定位的方法, 该方

法首先进行地杂波对消,然后进行动目标检测,并同时完成动目标测速与定位. 论文首先分析了不进行杂波对消直接利用两回波图像进行动目标检测的方法、原理及其仿真,然后在分析杂波对消必要性的基础上,给出了进行地杂波对消、动目标检测、径向速度分量估计和动目标定位的原理和实现方法,针对提出的方法进行了计算机仿真,并在仿真结果分析的基础上给出了结论.

## 2 杂波对消的必要性分析

### 2.1 双孔径干涉动目标检测、测速与定位

双孔径天线沿航迹向干涉 SAR 空间几何关系图如图 1 所示. 其中, 载机沿  $X$  轴以速度  $V_a$  直线飞行, 飞行高度  $h$ ; 两天线沿航迹向线性排列, 间隔为  $D$ , 天线 1 为发射天线, 两个天线同时接收回波信号; 地面上运动目标  $P$  初始位置为  $(X_0, Y_0, 0)$ , 速度为  $(V_x, V_y, 0)$ ; 发射天线到目标  $P$  的初始距离为  $R_0$ ; 假设  $t$  时刻目标  $P$  到两个天线的距离分别为  $R_1(t)$  和  $R_2(t)$ .

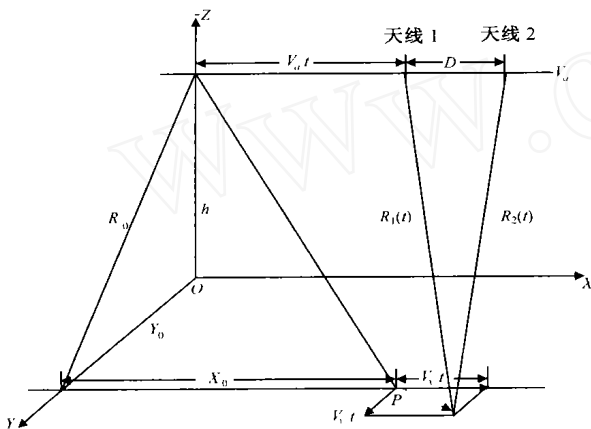


图 1 双孔径天线沿航迹向干涉 SAR 空间几何关系图

由图中几何关系可推导出  $t$  时刻两个天线到目标  $P$  的距离, 泰勒展开 (忽略时间  $t$  二次以上的高次项) 为:

$$\begin{cases} R_1(t) & R_0 + \frac{X_0^2}{2R_0} + \frac{V_x Y_0}{R_0} t - \frac{(V_a - V_x) X_0}{R_0} t + \frac{V_y^2 + (V_a - V_x)^2}{2R_0} t^2 \\ R_2(t) & R_0 + \frac{X_0^2}{2R_0} + \frac{D^2 - 2X_0 D}{2R_0} + \frac{V_x Y_0}{R_0} t - \frac{(V_a - V_x) X_0}{R_0} t \\ & + \frac{(V_a - V_x) D}{R_0} t + \frac{V_y^2 + (V_a - V_x)^2}{2R_0} t^2 \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $|t| \leq \frac{T_s}{2}$  且  $V_a \gg V_x, V_a \gg V_y, R_0 = \sqrt{h^2 + Y_0^2}, T_s$  为合成孔径时间.

忽略系统噪声, 回波信号图像中含有运动目标和静止目标 (即地面背景杂波) 的信息. 即天线 1 的图像可表示为:  $I_1(f) = I_{\text{moving},1}(f) + I_{\text{clutter},1}(f)$ , 其中  $I_{\text{moving},1}(f)$  为感兴趣的动目标信息,  $I_{\text{clutter},1}(f)$  为杂波信息. 同理, 天线 2 的图像表示为:  $I_2(f) = I_{\text{moving},2}(f) + I_{\text{clutter},2}(f)$ .

将两天线接收到的回波信号处理得到两幅频域图像, 详

细推导过程见文献 [4].

$$\begin{cases} I_1(f) = G \cdot I_1(f) + I_{\text{clutter},1}(f) \\ I_2(f) = G \exp\left\{-j2 \left[\frac{D^2 - 2X_0 D}{2R_0}\right]\right\} I_2(f) + I_{\text{clutter},2}(f) \end{cases} \quad (2)$$

其中,

$$\begin{cases} I_1(f) = \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left\{-j2 \left[\frac{2V_x Y_0}{R_0} - \frac{2(V_a - V_x) X_0}{R_0}\right] nT\right\} \\ \quad \exp\{-j\phi(n)\} \exp\{-j2fnT\} \\ I_2(f) = \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left\{-j2 \left[\frac{2V_x Y_0}{R_0} - \frac{2(V_a - V_x) X_0}{R_0} - \frac{V_x D}{R_0}\right] nT\right\} \\ \quad \exp\{-j\phi(n)\} \exp\{-j2fnT\} \end{cases} \quad (3)$$

$$\phi(n) = \frac{2[(V_a - V_x)^2 + V_y^2 - V_a^2]}{R_0} (nT)^2 \quad (4)$$

当检测被主瓣杂波掩盖的运动目标时, 满足  $V_a \gg V_x, V_a \gg V_y$  条件, 所以式 (3) 近似为

$$\begin{aligned} I(f) &= I_2(f) = I_2(f) \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left\{-j2 \left[\frac{2V_x Y_0}{R_0} - \frac{2V_a X_0}{R_0}\right] nT\right\} \exp\{-j2fnT\} \\ &= -\exp\left\{j2 \left[\frac{N-1}{2}\right]\right\} \frac{\sin f N T}{\sin f T} \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $= \left\{ \frac{2V_a X_0}{R_0} - \frac{2V_x Y_0}{R_0} - f \right\} \cdot T$

如果不存在地杂波或地杂波很小, 即  $I_{\text{clutter},1}(f) = 0, I_{\text{clutter},2}(f) = 0$ , 则利用式 (2) 和式 (5) 可以求出其干涉相位, 得到动目标的真实方位位置.

$$\text{即有 } \frac{I_1(f)}{I_2(f)} = \exp\left\{j \left[\frac{D^2 - 2X_0 D}{R_0}\right]\right\} = \exp\{j(f)\} \quad (6)$$

于是真实方位位置的估计值为  $X_0 = \frac{D}{2} - \frac{R_0(f)}{2D}$

由目标的多普勒频率  $f = \frac{2V_a X}{R_0}$  可求得目标在图像上的虚

假位置为  $X = \frac{R_0}{2V_a} f$

对于静止目标来说,  $X_0$  与  $X$  位置重合, 而动目标由于径向速度的影响使位置发生偏移. 基于这一原理, 可以根据下列条件实现运动目标的检测.

$$X = |X - X_0| = \frac{R_0}{2V_a} \cdot \frac{2V_x}{V_a} = R_0 \frac{V_x}{V_a} > R_{\text{bound}} \quad (7)$$

理想情况下,  $R_{\text{bound}} = 0$ ; 实际中, 为了避免杂波谱展宽对检测的影响, 取  $R_{\text{bound}} = R_0 \cdot \frac{V_{\text{ymin}}}{V_a}, V_{\text{ymin}}$  为设定的最小可检测速度值. 因此对于检测到的运动目标, 可估计出其径向速度:

$$V_y = \frac{V_a}{R_0} \cdot X \quad (8)$$

### 2.2 计算机仿真

采用如下仿真参数进行了计算机仿真: 载机速度  $V_a = 210\text{m/s}$ , 飞行高度  $h = 10000\text{m}$ , 雷达波长  $\lambda = 0.03\text{m}$ , 脉冲重复频率  $PRF = 1000\text{Hz}$ , 接收孔径间隔  $D = 2\text{m}$ . 地面静止目标 (即地杂波)  $\sigma_0^2 = -10\text{dB}$ , 幅度服从瑞利分布. 一个运动目标, 径向速度为  $V_y = 1.0\text{m/s}$ . 动目标雷达截面积为  $\sigma = 10\text{m}^2$ .

当无杂波时,图 2 为回波数据图像,图 3 为上述方法检测图像,径向速度估计为  $v_y = 0.9965256\text{m/s}$ ,定位位置为  $x_0 = 0.2056544\text{m}$ ;有杂波存在时,图 4 为回波数据图像,图 5、图 6 为当取  $V_{y\min} = 0.2\text{m/s}$  和  $V_{y\min} = 0.5\text{m/s}$  时的检测图像,径向速度估计为  $v_y = 1.027877\text{m/s}$ ,定位位置为  $x_0 = 15.13512\text{m}$ .

可见,这种方法适用于信杂比较高的情况.而当运动目标被主瓣杂波掩盖,即杂波的贡献占主导地位时,公式(6)中的干涉相位将产生噪声相位而使该方法失效,不能有效实现运动目标检测.因此,针对这种情况,必须进行地杂波的对消以可靠实现运动目标检测.

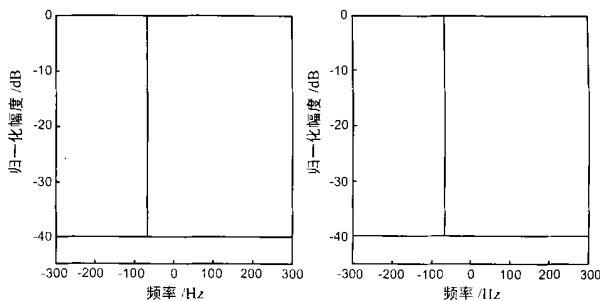


图 2 回波数据图像 图 3 位置差检测图像

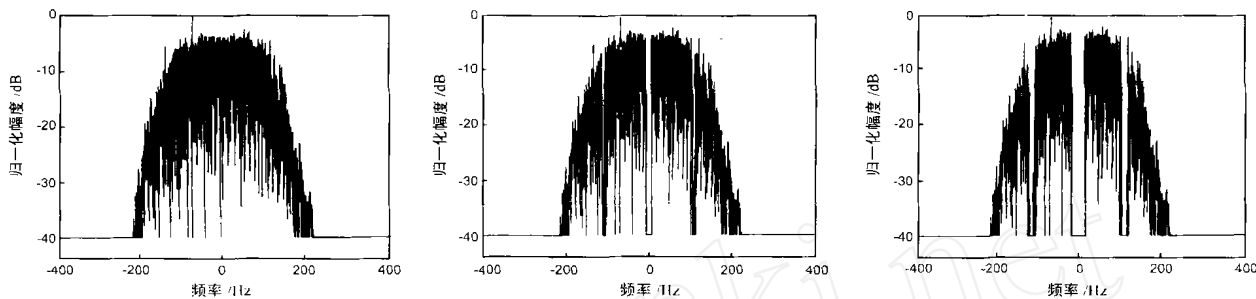


图 4 回波数据图像 图 5 位置差检测图像 ( $V_{y\min} = 0.2\text{m/s}$ ) 图 6 位置差检测图像 ( $V_{y\min} = 0.5\text{m/s}$ )

### 3 双孔径天线沿航迹向干涉 SAR 动目标检测方法

#### 3.1 杂波对消及对消特性

地杂波对消时需要补偿由于接收天线存在方位位置偏差产生的相位偏差.补偿函数为:

$$G_2(f) = \exp\left\{j2 \left[ \frac{D^2 - (R_0/V_a)Df}{2R_0} \right]\right\} \quad (9)$$

杂波对消后的残差图像为:

$$I_{12}(f) = I_1(f) - I_2(f) \cdot G_2(f) \quad (10)$$

将式(2)、(9)代入式(10)中整理后得到残差图像为

$$I_{12}(f) = G \exp\left\{ -j \left[ \frac{-2X_0D + (R_0/V_a)Df}{2R_0} \right] \right\} \cdot 2j \sin\left\{ - \left[ \frac{-2X_0D + (R_0/V_a)Df}{2R_0} \right] \right\} I(f) \quad (11)$$

取模平方,得到对消特性公式:

$$|I_{12}(f)|^2 = 4 |G|^2 \sin^2 \left\{ - \left[ \frac{-2X_0D + (R_0/V_a)Df}{2R_0} \right] \right\} \cdot \frac{\sin^2[N]}{\sin^2[f]} \quad (12)$$

可见,当  $f = \frac{2V_a X_0}{R_0} - \frac{2V_y Y_0}{R_0}$  时,  $|I(f)| = N^2$  取得最大值,所以

$$|I_{12}(f)|^2 = 4 |G|^2 N^2 \sin^2 \left( \frac{V_y Y_0 D}{V_a R_0} \right) \quad (13)$$

#### 3.2 实现方法

基于双孔径天线沿航迹向干涉 SAR 动目标检测算法实现框图如图 7 所示.

3.2.1 恒虚警 (CFAR) 处理 杂波数据的幅度近似服从瑞利分布,分布密度函数为  $p(A) = \frac{A}{2} \exp\{-\frac{A^2}{2}\}$ ,  $A > 0$ . 虚警概率

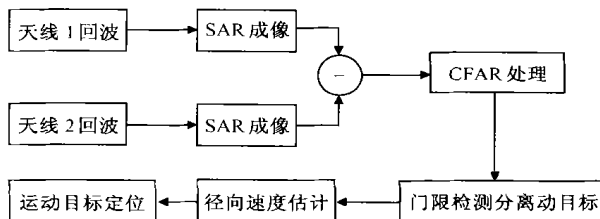


图 7 双孔径天线沿航迹向干涉 SAR 动目标检测算法实现框图

$P_{fa} = \int_T \frac{A}{2} \exp\{-\frac{A^2}{2}\} dA = \exp\{-\frac{T^2}{2}\}$ , 其中  $T$  为检测门限,可取为  $T = K \cdot u$ ,  $u = \sqrt{J/2}$  为杂波均值,则  $P_{fa} = \exp\left\{-\frac{K^2}{4} \cdot k^2\right\}$ ,  $k = \sqrt{-4 \ln P_{fa}}$  为门限系数.因此虚警概率只取决于门限系数  $k$ ,可实现恒虚警功能.

采用单元平均恒虚警 (CA-CFAR) 算法的判决准则是当  $T_i > k \cdot u$  时认为有目标存在,其中,  $T_i$  为欲检测单元数据,  $u = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L R_i$  为参考单元数据的平均值.利用滑动的窗口判断所有的回波数据.

3.2.2 门限检测分离运动目标 杂波对消处理使静止目标对消程度远大于运动目标,因此通过比较杂波对消后的残差图像与原始图像中运动目标和静止目标对消幅度的差异,分离出运动目标,从而实现运动目标的检测.即由式(2)和式(11),当满足下列门限检测条件时,认为是运动目标信息,反之,认为是静止目标信息.

$$\frac{|I_{12}(f)|}{|I_1(f)|} > \text{threshold} \quad (14)$$

3.2.3 径向速度估计 在确定出运动目标后,利用残差图

像中杂波的对消特性可以进行运动目标径向速度的估算. 由式(13)得到径向速度估算公式:

$$V_y = \sin^{-1} \left[ \frac{|I_{12}(f)|^2}{\sqrt{4|G|^2 N^2}} \right] \cdot \frac{V_a R_0}{Y_0 D} \quad (15)$$

3.2.4 目标定位 由检测到的目标位置对应的多普勒频率与目标径向速度及目标真实位置之间的关系式  $f = \frac{2V_a X_0}{R_0} - \frac{2V_y Y_0}{R_0}$ , 可得出目标的真实方位位置:

$$X_0 = \frac{R_0}{2V_a} f + \frac{V_y Y_0}{V_a} \quad (16)$$

### 3.3 计算机仿真

仿真参数同 2.2 节, 当动目标雷达截面积为  $\sigma = 1.0\text{m}^2$ , 一个运动目标, 径向速度为  $V_y = 1.0\text{m/s}$  时, 图 8 和图 9 为两天线回波图像, 图 10 为进行地杂波对消后的图像, 图 11 为 CFAR 处理后的图像, 检测出的动目标速度估算为  $v_y = 0.9831631\text{m/s}$ , 目标的方位位置为  $-8.50422\text{m}$ .

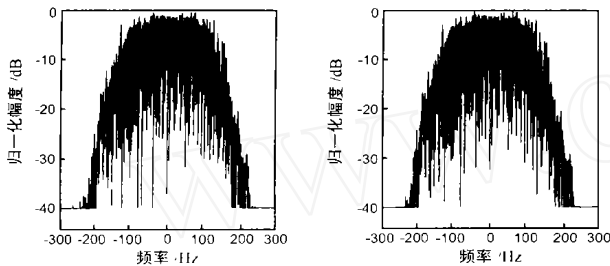


图 8 通道 1 图像

图 9 通道 2 图像

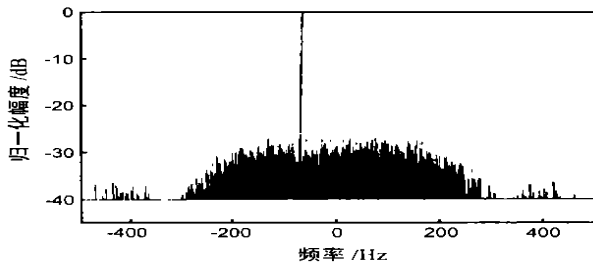


图 10 杂波对消后图像

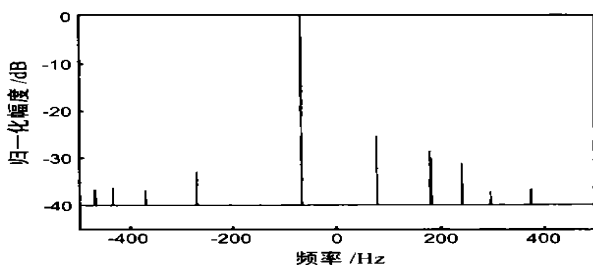


图 11 CFAR 处理后图像

## 4 结论

本文基于双孔径天线沿航迹向干涉 SAR, 在分析杂波对消必要性的基础上, 给出了进行地杂波对消、动目标检测、径向速度分量估计及目标定位的原理和实现方法. 在恒虚警处理后, 通过比较杂波对消后的残差图像与原始图像中运动目标和静止目标对消幅度的差异, 检测出运动目标. 并利用残差图像中杂波的对消特性进行运动目标径向速度的估算及目标定位. 该法具有良好的杂波对消性能, 能够实现地面背景杂波掩盖的慢速运动目标的检测、测速及定位.

### 参考文献:

- [1] John C Curlander, Robert N McDonough. Synthetic aperture radar systems and signal processing[M]. New York: John Wiley & Sons, 1991.
- [2] R Keith Raney. Synthetic aperture imaging radar and moving targets [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, May 1971, 7 (3): 499 - 505.
- [3] E F Stockburger, D N Held. Interferometric moving ground target imaging[J]. IEEE International Radar Conference, 1995. 438 - 443.
- [4] 李景文. 合成孔径雷达动目标检测与成像[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1999. 9.
- [5] Tim J Nohara, Peter Weber, et al. SAR- GMTI processing with Canada's radarsat 2 satellite[J]. Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium, 2000. 379 - 384.

### 作者简介:



孙 娜 女, 1975 年 10 月生于山东省烟台市, 北京航空航天大学通信与信息系统专业在读博士研究生, 主要研究方向: SAR 动目标检测与成像、数字信号处理、高分辨率 SAR 成像.

周荫清 男, 1936 年 4 月生于湖南省湘潭市, 北京航空航天大学电子工程系教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, 主要从事雷达、通信与信息系统、信息获取与处理、高分辨率成像雷达和时变谱估计等方面的教学和科研工作.

李景文 男, 1964 年生于黑龙江省齐齐哈尔市, 北京航空航天大学电子工程系教授, 博士, 中国电子学会高级会员, 主要从事信号与信息处理、机载及星载高分辨率 SAR 成像、动目标检测与成像、机载、弹载 DBS 技术、机载脉冲雷达的信号处理, 系统仿真, 数字信号处理, 杂波谱估计等方面的研究工作.