# 双通道沿迹干涉 SAR 地面动目标检测

郑明洁 杨汝良 (中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘要: 该文深入研究了双通道沿迹干涉(Along-Track Interferometry, ATI)SAR 的机理,给出了运用该机理在静止 目标去线性调频后的频域内进行动目标检测的方法。文中详细描述了该方法的检测过程,分析了杂波、噪声以及目 标速度对检测性能的影响,最后给出了计算机仿真结果。分析及仿真结果表明, 与同常规方法相比,该方法对可 检测运动目标信杂比的要求降低,对于淹没在主瓣杂波谱内的动目标以及在主瓣杂波谱外的动目标能够同时检测; 同时,在频域检测计算量下降。

关键词:沿迹干涉(ATI),动目标检测,双通道,检测函数 中图分类号:TN957.51 文献标识码:A 文章编号:1009-5896(2005)10-1560-04

# Dual Channels Along -Track Interferometry SAR Ground Moving Target Detection

Zheng Ming-jie Yang Ru-liang

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

**Abstract** This paper provides a ground moving target detection algorithm in Range-Doppler domain with Along-Track Interferometry(ATI) for dual channels SAR after studying ATI theory deeply. It describes the procedure of detection in detail and analyzes the effect of Signal-Noise-Ratio(SNR), Signal-Clutter-Ratio(SCR) and moving target's velocity. Finally, some typical computer simulation results are presented. Comparing with routine method, the method in the paper requires lower SCR of moving target, and can detects targets both in and out of the clutter main lobe frequency. In addition, it needn't compress echoes in azimuth, so the computation decreases.

**Key words** Along-Track Interferometry(ATI), Moving target detection, Range-Doppler domain, Dual channels, Detection function

1 引言

沿迹干涉(ATI)方法最早应用于海洋表面流速的测量、波 浪成像和海面运动目标显示等<sup>[1]</sup>。近几年来ATI技术得到越来 越广泛的应用,不仅可以用在机载合成孔径雷达(SAR)中, 在星载SAR也将得到很好的应用,如Shuttle Radar Topography Mission(SRTM),TerraSAR-X<sup>[2]</sup>,RadarSat-2<sup>[3]</sup>等 都采用了沿迹干涉技术。除了应用在海洋观测等方面外,它 还能够用于检测陆地运动目标,尤其对慢速运动目标检测效 果较好。常规的ATI检测方法是针对图像域检测,因此对频 谱在主瓣杂波谱外的动目标无法检测;另外,在图像域动目 标不能完全匹配,使得目标信杂比(SCR)较小,而ATI方法检 测性能在很大程度上依赖于目标的SCR,SCR越小,越不可 能提取出动目标信息。针对上述缺点,本文在文献[4]中提 出了一种在静止目标经过去线性调频后的频域内采用干涉 处理检测动目标的新方法,同时Gierull<sup>[5]</sup>也提出了相似的思 想,并且给出了机载实验结果。本文将进一步深入分析该方 法的机理,给出详细的动目标检测过程,分析杂波、噪声以 及目标速度对检测性能的影响,最后给出计算机仿真结果。

### 2 基本原理

采用 ATI 进行动目标检测时, SAR 天线工作示意图如 图 1 所示, 假设载机沿x轴方向飞行, 速度为va, 将天线分成 两个子孔径, 子孔径中心间距 2B。SAR系统全孔径发射线性 调频信号, 两个子孔径同时接收回波信号, 形成两路通道, 回波信号相位中心间距等于B, 基线长度为B。地面上 有一个点运动目标, 沿着载机飞行方向和距离向速度分别为  $v_x$ 和 $v_r$ 。



图 1 沿迹干涉 SAR 工作的几何关系图

初始时刻目标方位位置为x<sub>0</sub>,目标到载机飞行方向的斜 距为*R<sub>c</sub>*,到全孔径相位中心*A*<sub>0</sub>的斜距为*R*<sub>0</sub>,到两个子孔径相 位中心*A*<sub>1</sub>和*A*<sub>2</sub>的斜距分别为*R*<sub>1</sub>和*R*<sub>2</sub>。在*t*时刻,载机飞行到*v<sub>d</sub>*, 目标到全孔径相位中心*A*<sub>0</sub>的斜距为*R*<sub>0</sub>(*t*),到两个子孔径相位 中心*A*<sub>1</sub>和 *A*<sub>2</sub>的斜距分别为*R*<sub>1</sub>(*t*)和*R*<sub>2</sub>(*t*)。

ATI的基本原理是将沿轨迹方向接收的两路信号进行干 涉处理,由于运动目标的干涉相位信息不同于静止目标的, 根据这些差别信息就能够从干涉相位中检测出运动目标。检 测流程图如图2所示。首先,将接收的两路回波信号进行距 离向压缩和转置,接下来对处理后的两路信号分别进行相位 补偿,主要去除由于两个子孔径相位中心间隔产生的多普勒 中心频率偏差,同时去除载机飞行带来的多普勒频率线性调 频项。进行相位补偿的参考函数C<sub>1</sub>(*t*),C<sub>2</sub>(*t*)分别为

$$C_{1}(t) = \exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{(v_{a}t)^{2}}{R_{c}} - \frac{v_{a}\cdot B\cdot t}{R_{c}}\right)\right)$$

$$C_{2}(t) = \exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{(v_{a}t)^{2}}{R_{c}} + \frac{v_{a}\cdot B\cdot t}{R_{c}}\right)\right)$$
(1)

与参考函数相乘后,对得到的两路信号 $S_1'(t)$ 和 $S_2'(t)$ 进行时间 校准,即将 $S_1'(t)$ 时移 $\tau$ ,其中 $\tau=B/v_a$ ,如果假设 $v_r \ll v_a$ , $v_x \ll v_a$ , 整理后可得

$$S_{1}'(t+\tau) = \sigma' \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda} \left(2R_{c}+2v_{r}(t+\tau)\right) + \frac{x_{0}^{2}+B^{2}/2-x_{0}B-2x_{0}v_{a}t}{R_{c}}\right)\right)$$

$$S_{2}'(t) = \sigma' \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda} \left(2R_{c}+2v_{r}t\right) + \frac{x_{0}^{2}+B^{2}/2-x_{0}B-2x_{0}v_{a}t}{R_{c}}\right)\right)$$
(2)



图 2 沿迹干涉技术 SAR 运动目标检测流程

如果 $B=n\cdot v_a/\text{prf}$ ,则 $S_1'(t)$ 恰好时移整数个脉冲。但是实际 中基线长度B,载机速度 $v_a$ 和脉冲重复频率prf之间往往不满 足 $B=m\cdot v_a/\text{prf}$ ,即两路信号之间的时间延迟不满足 $\tau_a=m/\text{prf}$ , 所以就需要对 $S_1'(t)$ 或者 $S_2'(t)$ 进行插值,消除由于 $B\neq v_a/\text{prf}$ 带来 的相位偏差,使得插值后经过时间校准仍然得到式(2)形式。 由于是在频域进行插值,常规的图像插值方法不适用,本文 采用了一种特殊的插值方法<sup>[6]</sup>,该方法在频域按照一定的规 律补零后,相当于时域的插值。时间校准后,对两路信号进 行快速傅里叶变换,变换到频域,即将式(2)进行FFT得到

$$S_{1}(f) = \sigma' \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda} \left(2R_{c} + 2v_{r}\tau + \frac{x_{0}^{2} + B^{2}/2 - x_{0}B}{R_{c}}\right)\right) \cdot S'(f)$$

$$S_{2}(f) = \sigma' \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda} \left(2R_{c} + \frac{x_{0}^{2} + B^{2}/2 - x_{0}B}{R_{c}}\right)\right) \cdot S'(f)$$
(3)

其中

$$S'(f) = \int_{T_1}^{T_2} \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}\left(2v_r t - \frac{2x_0v_a}{R_c}t\right)\right) \cdot \exp(-j2\pi f t) dt \quad (4)$$

式(4)积分后,可得

$$S'(f) = \exp\left(-j2\pi \cdot \alpha \frac{T_1 + T_2}{2}\right) \frac{\sin(\pi \cdot \alpha \cdot (T_2 - T_1))}{\pi \cdot \alpha}$$
(5)

其中  $\alpha = \frac{2v_r}{\lambda} - \frac{2x_0v_a}{\lambda \cdot R_c} + f$ 。 将 $S_1(f)$ 和 $S_2(f)$  共轭相乘,得  $S(f) = S_1(f)^* \cdot S_2(f) = \sigma'^2 \exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda}2v_r\tau\right)$   $\cdot \left(\frac{\sin(\pi \cdot \alpha \cdot (T_2 - T_1))}{\pi \cdot \alpha}\right)^2$  (6) 式(6)给出了干涉处理结果,由此式就可以进行动目标检测,

式(6)给出了干涉处理结果,由此式就可以进行动目标检测, 从杂波中检测到动目标。

#### 3 动目标检测

为

下面详细分析动目标检测过程,由式(6)可见,干涉相位

$$\Delta \phi = \left(2\pi / \lambda\right) \cdot 2v_r \tau \tag{7}$$

对于静止目标来说, v<sub>r</sub>=0,则式(7)等于零,所以静止目标干涉相位为零。如果运动目标速度v<sub>r</sub>≠0,则式(7)不等于零,因此根据该相位信息,就能够检测到运动目标,进而能够求得目标地面速度:

$$v_{gr} = \frac{\Delta \phi \cdot \lambda}{4\pi} \cdot \frac{v_a}{B \cdot \sin(\theta_{\rm inc})} \tag{8}$$

其中 $\theta_{inc}$ 是天线入射角。

虽然根据相位信息能够判断动目标存在与否,但是实际中,由于噪声的存在,使得主瓣杂波相位围绕着零值展开;如果目标所在的分辨单元中含有杂波,就会降低干涉相位;因此必须确定一个合适的检测门限,使得杂波和噪声相位低于该门限值,而动目标相位则大于该门限值。因此,检测门限非常重要,它决定了检测结果的好坏。在这里我们采用一种经验确定方法<sup>[3]</sup>,将干涉数据实部分成几部分,根据需要的虚警概率,求出与实部对应的各部分的虚部的值,得到一组(*x*, *y*)点,并以此拟合出一条*x=F*(*y*)曲线,该曲线就是相位检测函数,进而得到各点的相位门限。根据相位门限,就可以检测出动目标。

#### 4 检测性能分析

在检测过程中有多种因素会影响检测性能,如杂波、噪声、目标速度以及多视处理等,下面从目标信噪比(SNR), SCR以及动目标速度等3个因素对检测性能的影响来分析该 方法的检测性能。

#### 4.1 SNR 对检测性能的影响

在频域检测动目标时,由于目标没有进行方位向聚焦, SNR 相对下降,与常规方法相比,要求可检测目标的最小 SNR 增加。但是,用 ATI 方法检测不是依靠抑制杂波来提取 动目标信号,而是通过干涉相位来判断动目标存在与否。在 处理过程中对动目标信号进行了平方,增加了信噪比,所以 ATI 对噪声的增长不敏感,噪声影响比较小,即使在 SNR 较 小的情况下,仍然能够得到较好的检测结果。但是如果动目 标信号幅度小于噪声幅度,则无法检测到动目标。

#### 4.2 SCR 对检测性能的影响

ATI 检测性能虽然受噪声的影响较小,但是受杂波的影响很大,可以说在很大程度上依赖于目标 SCR。SCR 越小, 主瓣杂波中动目标被淹没得越厉害,越不可能提取出动目标 信息。图 3 画出了动目标和杂波在同一分辨单元时的矢量图。 由于杂波相位为零,所以合成矢量小于动目标矢量,见图 3 中实线,合成信号的干涉相位也就小于动目标的干涉相位。 随着 SCR 的减小,合成矢量进一步减小,见图 3 中虚线所示, 合成信号干涉相位也就越小,不利于动目标的检测。为降低 这种效果,应该选择雷达分辨单元尽可能接近动目标尺寸, 以提高 SCR。 在频域检测时,无论是静止目标还是动目标都没有经过 方位向聚焦,降低了常规成像时对静止目标匹配而对动目标 不匹配带来的信杂比的差距,因此对目标信杂比的要求相对 降低。



图 3 矢量图

如果没有杂波,则根据相位,就能够求出动目标距离向 速度。由于杂波的存在,使得动目标干涉相位产生变化,只 有知道了杂波大小,才能求出动目标距离向速度。

#### 4.3 动目标速度对检测性能的影响

动目标能否被检测到还受目标距离向速度的影响,如果 距离向速度太小,干涉相位就很小,目标可能就会被淹没在 杂波和噪声之中而无法检测。目标最小可检测速度主要受到 目标SNR(此处噪声主要指接收机热噪声),SCR和两路信号 的相干程度影响,此外还要受到用户需求的检测概率p<sub>d</sub>,虚 警概率p<sub>fa</sub>的限制。一般可根据上述因素按实际需求确定相位 检测门限,然后确定目标的最小可检测速度。

采用ATI方法检测动目标,存在盲速问题<sup>[7]</sup>。如果两个子 孔径接收的目标信号相位相等或者相差2  $\pi$ 倍,就会产生盲速, 由式(7)得目标距离向地速的盲速为 $v_{grbind} = \frac{n\lambda}{2} \frac{v_a}{B \cdot \sin(\theta_{inc})}$ , *n* 

是不等于零的整数,由该式可见目标盲速与基线长度有关,同时受到发射信号的波长、平台速度以及天线入射角的影响。

目标可检测的速度不是无限大的,要求实际干涉相位差 处于[ $-\pi$ , $\pi$ ]之间,即所检测的目标距离向速度应该处于 [ $-v_{rmax}$ , $v_{rmax}$ ]之间,由式(7)求得可检测的目标距离向地速的 最大速度为 $v_{grmax} = \pm \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{v_a}{B \cdot \sin(\theta_{inc})}$ 。由该式可见,能够检测 的速度范围与基线长度、载机速度、波长及天线入射角有关, 在其它因素确定的情况下,最大速度和基线长度成反比,基 线越短,能够检测的速度范围越大。

#### 5 计算机仿真验证

#### 5.1 仿真参数

为验证本文算法的有效性,采用计算机进行了仿真验证,仿真参数选取如下:载机速度 $v_a$ =200m/s,目标斜距  $R_c$ =20km,波长  $\lambda$  =0.03m,脉冲重复频率prf=800Hz,基线 长度B=0.25m。杂波服从瑞利分布,虚警概率为 10<sup>-6</sup>。仿真了 4 个动目标,参数见表 1 所示,假设目标方位向速度为零。

目标编号	距离向速度(m/s)	方位位置(m)	SCR(dB)
1	1.5	120	5.3
2	5.6	0	13.3
3	1.5	180	5.3
4	1.0	110	5.3

# 5.2 复图像域检测

为了对两种算法进行比较,对常规方法也给出了仿真。 仿真的回波数据经过 SAR 处理后,其中一个通道目标所在 距离单元图像如图 4 所示。由于目标 1,3 和 4 的 SCR 都比 较小,从图中无法直接识别。目标 2 的 SCR 较大,但是由于 其距离向速度较大,使得多普勒移动超出了杂波频谱,大部 分能量在方位向匹配滤波器之外,进入滤波器的很少一部分 能量也淹没在噪声之中,因此也无法从图像中识别。

接下来对两幅复图像数据进行干涉处理,求出检测函数 x=16.5[y]<sup>2.4</sup>-0.05,通过该检测函数得到检测结果如图 5 所 示。由图可见,杂波和噪声已经完全被消除,检测到 3 个目 标,目标 2 则没有被检测到。



#### 5.3 频域检测

下面采用本文方法检测。图 6 是其中一个孔径目标所在 距离单元的频域图像(取多个距离门做平均)。由图可见,目标 1,3,4 由于多普勒频移较小,淹没在杂波谱内,目标 2 的距离向速度较大,频谱移到杂波谱之外,而且超出了噪声 水平,所以能够从图中看到。

将两路数据进行干涉处理,根据经验方法求出检测函数: x=7.9|y|<sup>3.0</sup>-0.25,并对干涉结果进行检测,检测结果如图7所示。由图可见,4个目标全部能够检测出来。



从上述仿真可见,对于淹没在主瓣杂波谱内的目标,用

本文提出的方法和常规方法检测效果相近,但是对于在主瓣 杂波谱外的目标,则前者的效果远远好于后者。

#### 6 结束语

ATI 对地面动目标检测和对洋流测量有所不同,由于地 面存在大量的杂波使得检测难度增加,检测函数的确定比较 复杂,不适合实时检测,而且动目标的速度也很难确定。

但是 ATI 也有很多优势,比如对慢速运动目标检测效果 较好,受噪声的影响较小等。在 SAR 图像域检测和在本文 提出的频域检测对于淹没在杂波谱中的目标来说效果相近, 对于在杂波谱外的目标,后者检测效果要好于前者;在频域 检测,要求的目标 SCR 相对下降;另外,从运算量来看,在 频域检测运算量要少于在 SAR 图像域检测。

# 参 考 文 献

- Carnade Richard E. Dual baseline and frequency along-track Interferometry. IGARSS, Houston, America, 1992: 1585 – 1588.
- [2] Gill Eberhard. A formation flying concept for an along-track interferometry SAR mission. DLR/GSOC TN. 2003.
- [3] Shen Chiu. Computer simulation of Canada's RADARSAT2 GMTI. RTO SET Symposium. Greece, Held on the Island of Samos. 2000.
- [4] 郑明洁. 合成孔径雷达动目标检测和成像研究. [博士论文], 北京: 中国科学院电子学研究所, 2003.6.
- [5] Gierull C H, Sikaneta Ishuwa C. Raw data based two-aperture SAR ground moving target indication. IGARSS. Toulouse, France, 2003.7: 1032 – 1034.
- [6] 胡广书.数字信号处理一理论、算法与实现.北京:清华大学 出版社,2002,第3.8节.
- [7] Thompson Alan A, Livingstone Charles E. Moving Target Performance for RADARSAT-2. IGARSS, Honolulu, USA, 2000: 2599 2601.
- 郑明洁: 女,1974年生,助研,博士,主要从事雷达信号处理、运动目标检测方面的研究.
- 杨汝良: 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事航空航天 电子系统工程研制.