

一种基于子孔径的 GMTI 方法

冯宏川^{①②} 王岩飞^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 该文研究了一种基于子孔径分割的 GMTI(Ground Moving Target Indication)方法。在该方法中将天线孔径沿方位向对称分割为两个子孔径。当天线波束在空间扫描时,两个子孔径先后扫过目标所在区域。由于两个子孔径之间有二分之一合成孔径时间的时差,动目标在前后两个孔径中运动状态发生改变,而静止目标的运动状态不变。因此,可以通过比较目标在两个子孔径中运动状态的差异发现动目标,并根据目标轨迹判断其运动参数。为了避免方位压缩造成的动目标模糊或动目标能量损失,同时为保留目标运动轨迹,这里不进行方位压缩处理。与多通道 GMTI 方法相比较,此方法具有只需一副单通道天线,处理方法简单,运算量小,可与合成孔径雷达工作模式兼容等诸多优势。

关键词: 合成孔径雷达; 动目标; GMTI; 子孔径

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)02-0397-04

A Novel GMTI Method Based on Subaperture

Feng Hong-chuan^{①②} Wang Yan-fei^①

^①(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

^②(*Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: A novel approach of Ground Moving Target Indication (GMTI) based on subaperture is proposed in this paper. In this approach, the aperture of an antenna is divided into two subapertures. When the radar is in operation, the two subapertures pass the same ground patch in tandem with an interval of half of synthetic aperture time. During this interval, the position of a stationary target keeps unchanged, but that of a moving one is altered. Then, the moving target is detected by comparing images derived from the two subapertures, and its motion parameters can be estimated with its trajectory. In order to avoid the moving target being smeared and preserve its trajectory, azimuth focusing process is omitted. Compared with present GMTI approaches, the new one has many advantages, only single channel antenna, low cost, less computation load, compatible with SAR mode, etc.

Key words: SAR; Moving target; GMTI; Subaperture

1 引言

近年来有许多工作是围绕合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)动目标聚焦和检测进行的。由于SAR的方位向聚焦参数是来自静止目标的运动状态,而动目标的相对运动状态与静目标不同,因此在SAR图像中动目标不能聚焦,造成目标检测困难。Perry^[1], Jao^[2], Kirscht^[3]和Dias^[4]等提出了一些动目标聚焦的方法。但这些方法都存在运算量大,聚焦性能差的缺点。Goldstein和Zebker^[5]提出的利用沿航迹干涉法(Along Track Interferometry, ATI)测量洋流。但也存在目标聚焦困难,只能检测低速目标的问题。DPCA^[6](Displaced Phase Centre Antenna)法通过回波对消检测动目标。该方法存在对平台要求过于严格,方位分辨率低等困难。STAP(Space-Time Adaptive Processing)法根据

动、静目标回波在角度-频谱平面上分布的差别,采用二维自适应滤波将静目标滤掉。该方法存在运算量大,系统结构复杂对非平稳杂波难以适应等问题。

为了克服上述方法的缺陷本文提出了一种基于子孔径的动目标检测算法。文中首先介绍了该算法的基本原理,然后通过仿真实验验证该算法的有效性。最后分析了该算法的性能。

2 原理分析

雷达采用条带 SAR 的工作模式,其工作俯视图如图 1 所示,假设雷达平台匀速直线飞行,天线波束中心轴线垂直于航迹(正侧视),波束在航迹方向对地面均匀扫描。运用 SAR 中多视(multi-look)处理的方法,把波束沿轴线在方位向等分成前后两个子波束 A 和 B。地面静止目标先后跨越两个子波束的时间差是半个合成孔径时间。对于动目标,由于

目标速度的任意性, 穿越两个子孔径的时间可能不相同。由于波束角较小, 静目标之间的相对位置在两个子波束照射期间不变, 除了图像位置有整体平移之外, 无其它差异。而动目标在前后两次照射期间不满足这种关系, 目标位置的改变量不同于静目标。因此, 按照静目标位置的平移规律对两幅图像进行简单配准后, 静目标位置重合, 而动目标不重合。比较配准后的两幅图像, 即可发现动目标。

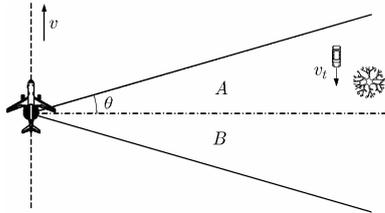


图 1 雷达工作几何关系俯视图

图 2 给出了该方法的信号处理流程。原始数据首先进行距离压缩, 之后进行距离徙动校正和子孔径分割(多视)。此后信号分成两路, 一路进行 SAR 成像, 另一路进行 GMTI 处理。GMTI 处理时首先将两幅复图像的模图像相减; 然后恢复动目标的轨迹; 经目标检测后进行目标运动参数估计。最后将检测出的动目标在 SAR 图像上进行标定。下面将详述其中的一些重要步骤。

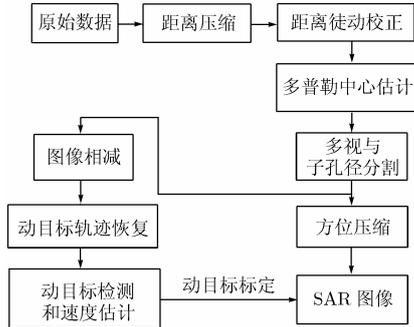


图 2 SAR/GMTI 信号处理流程

2.1 子孔径分割

在 SAR 中, 静目标的多普勒频率为

$$f_d = \frac{2v \sin \theta}{\lambda} \approx \frac{2v\theta}{\lambda}, \quad \theta \ll \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

其中 v 为雷达平台飞行速度, θ 为目标方位角, λ 为发射信号载波波长。图 3 为静目标的方位频谱。由式(1)可以看出把回波多普勒频率分成两段就等效于把波束分成两段。因此, 分别用两个复的带通滤波器在回波的方位谱上滤波就分别得到两个子波束成像结果。

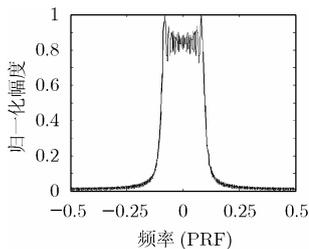


图 3 静目标方位向频谱

图 4 为两个滤波器的频谱响应。为了在滤波结果中保留动目标, 两个滤波器的通带均取脉冲重复频率(PRF)的一半。为了使静目标滤除效果更好, 取滤波器的窗函数与天线方向图的窗函数相同。

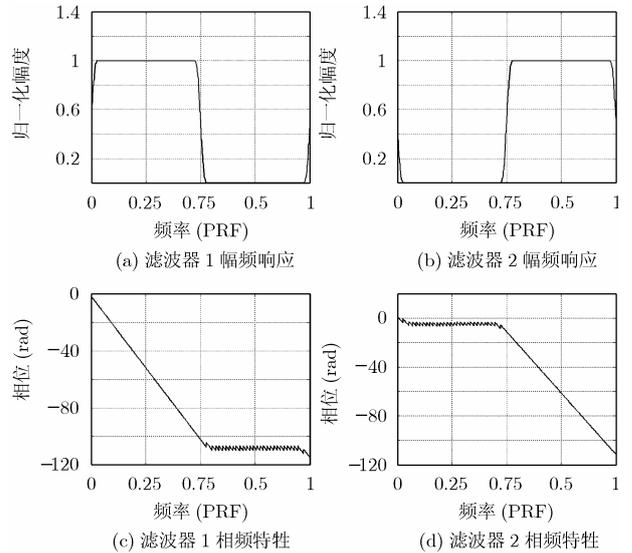


图 4 子波束分割滤波器频率响应

2.2 图像相减和动目标轨迹恢复

为了避免方位向压缩使动目标模糊, 同时为保留动目标的轨迹并根据轨迹估计目标的运动参数, 因此在 GMTI 处理时不进行方位压缩。对于静目标, 两个位置平移量是二分之一合成孔径时间。因此将其中一个子孔径的图像平移二分之一合成孔径时间, 同一目标的轨迹在两幅图像上的位置就完全重叠。然后, 模值图像相减即可消除静目标。再将差图像中的正值和负值部分分开得到正值图像和负值图像, 并将负值图像求绝对值。将其中的一幅平移, 与另一幅求和就得到恢复的动目标图像。

2.3 运动状态估计

雷达图像上的两个坐标分别是快时间和慢时间。在距离向, 电磁波的传播速度是光速, 因此距离向坐标可以等效成斜距。在方位向, 地面静止场景相对于雷达平台的运动速度是平台的飞行速度, 因此方位向坐标可以等效成方位位移。然而对于动目标而言, 目标方位向相对于平台的运动速度一般不是平台飞行速度, 因此动目标在方位向的坐标与静目标不同, 是目标沿航迹方向速度和平台速度差与慢时间的积。假设一种最简单的情况, 目标为匀速直线运动, 由图 5 可知斜距为

$$R(t) = \sqrt{H^2 + (x_0 + v_t^\perp t)^2 + \left(\frac{L_s}{2} - v^\parallel t\right)^2} = \frac{c(\tau - \tau_0)}{2} \quad (2)$$

其中 t 为慢时间, τ 为快时间, τ_0 为测绘带靠近平台的边缘处的回波时延, H 为飞行高度, x_0 为目标进入波束时的地距坐标, L_s 为目标进入波束处的合成孔径长度, v_t^\perp 为目标垂直于航迹的分速度, v^\parallel 为目标与平台在平行于航迹方向的相对速度, c 为光速。可以看到式(2)是双曲线方程。令

$t = m \cdot \text{PRT}$ ， $\tau = nT_s$ (PRT 为脉冲重复周期， T_s 为距离向采样周期)，分别对两个时间进行离散化可以得到

$$\frac{(n - n_0)^2}{a^2} - \frac{(m - m_0)^2}{b^2} = 1 \quad (3)$$

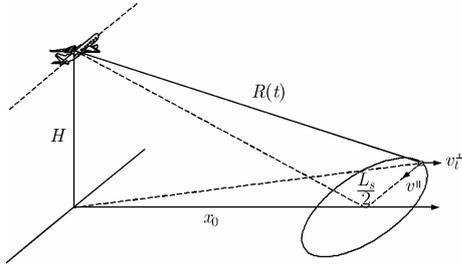


图 5 雷达工作几何关系图

其中

$$n_0 = \frac{\tau_0}{T_s}, \quad m_0 = \frac{x_0 v_t^{\perp} - (L_s/2) v_t^{\parallel}}{(v_t^{\perp 2} - v_t^{\parallel 2}) \cdot \text{PRT}}$$

$$a = 2\sqrt{v_t^{\perp 2} + v_t^{\parallel 2}} / cT_s \sqrt{H^2 (v_t^{\perp 2} + v_t^{\parallel 2}) + ((L_s/2) v_t^{\perp} + x_0 v_t^{\parallel})^2}$$

$$b = 1 / \text{PRT} \cdot \sqrt{H^2 (v_t^{\perp 2} + v_t^{\parallel 2}) + ((L_s/2) v_t^{\perp} + x_0 v_t^{\parallel})^2}$$

利用式(3)将动目标轨迹上的点坐标代入，即可求出目标两个方向的速度。另外，如果距离徙动较大时，在求解的过程中也应考虑距离徙动校正对轨迹造成的影响。

3 仿真实验

为了验证此方法的有效性，本节对该方法进行仿真验证。表 1 为仿真时采用的系统参数，其中 PRF 为静目标带宽的 5 倍。图 6 中有 4 个目标，上面轨迹平行的是两个静目标，下面是两个动目标，左边的动目标速度为平行航迹速度 $v_t^{\parallel} = 30\text{m/s}$ (平台速度方向为正方向)，垂直航迹斜距方向速度为 $v_t^{\perp} = -30\text{m/s}$ (远离航迹方向为正方向)；右边的动目标速度

表 1 系统仿真参数

参数	数值	参数	数值
载频	3GHz	作用距离	40km
距离向带宽	10MHz	平台速度	150m/s
距离向脉冲宽度	8μs	合成孔径时间	2.67s
距离向过采样系数	5	PRF	150Hz

为 $v_t^{\parallel} = 30\text{m/s}$ ， $v_t^{\perp} = 30\text{m/s}$ 。图 6(a)为经距离压缩和距离徙动校正后得到的图像；6(b)为滤波器 1 的输出图像；6(c)为平移后的滤波器 2 输出图像；6(d)为经图像相减并进行轨迹恢复后的图像。图 7(a)中左边动目标的速度为 $v_t^{\parallel} = 30\text{m/s}$ ， $v_t^{\perp} = 0\text{m/s}$ ；右边目标的速度为 $v_t^{\parallel} = 0\text{m/s}$ ， $v_t^{\perp} = 1\text{m/s}$ 。由图 7(b)可以看出，对于沿航迹运动的目标用此方法难以检测到。

4 讨论

在仿真实验中看出沿航迹方向匀速运动的目标难以检测到，这是由于这种动目标频谱关于频率零点对称。但是这个方向的动目标和静目标的合成孔径时间长度和多普勒带宽都不相同，可以利用其它方法(如采用小角度斜视)检测到动目标。最小可检测速度(Minimal Detectable Velocity, MDV)是 GMTI 雷达的一个重要参数。要检测出目标条件是目标在方位向存在多普勒中心偏移。因此，方位向频率分辨率是影响目标检测的重要因素，MDV 表达式如下：

$$\text{MDV} = \frac{\lambda \cdot \text{PRF}}{2N \cos \phi} \quad (4)$$

其中 N 为一个 PRF 内的频率采用点数， ϕ 为目标速度与航迹垂线的夹角。可以看到 MDV 是随着目标速度的方向变化的。当目标速度垂直于航迹时，MDV 最小，当目标速度平行于航迹时，就难以检测得到。

上面讨论的是正侧视的情况，对于大斜视角，小波束角的情况，角度和频率之间仍满足线性关系。因此，仍然可以利用多普勒频谱进行子孔径分割。不过为了保证两个子孔径中静目标的合成孔径时间相同，子孔径不能沿着波束角的角

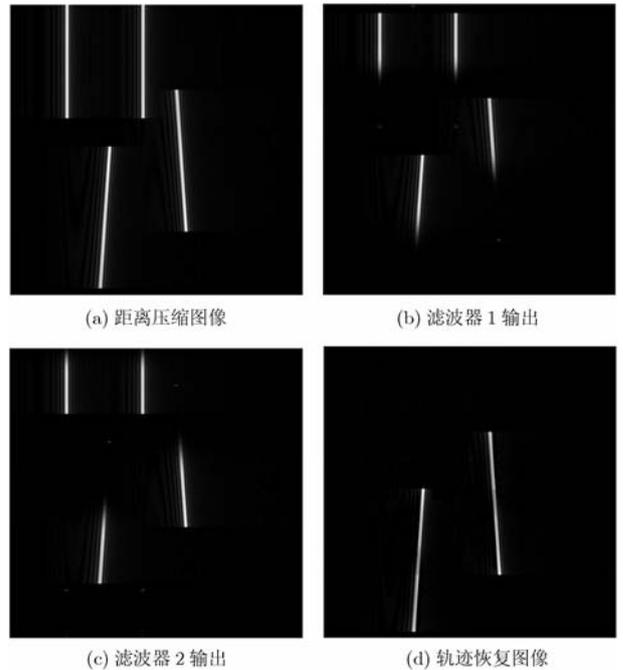


图 6 仿真结果 1

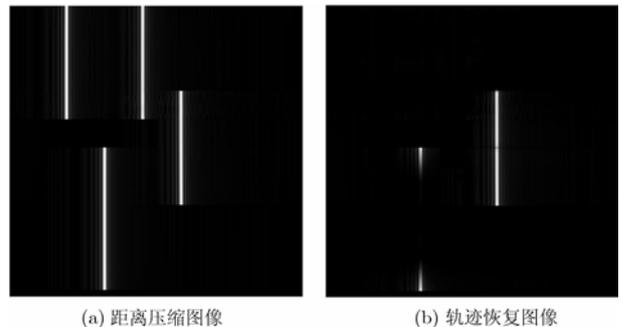


图 7 仿真结果 2

平分线(即静目标的频谱中心)划分。

由于雷达平台存在运动误差,为了减轻或消除运动误差对检测性能的影响,需要进行运动补偿。此外,为了减轻相干斑噪声对检测性能的影响,可以在每个子孔径内进行多视处理。

与多通道检测方法和方位向聚焦的 GMTI 方法相比较,此方法有如下优势:

(1) 处理性能不受目标距离徙动影响,无需限定目标的运动状态,对非匀速直线运动的目标仍然有效;

(2) 可以避免因聚焦可能导致的目标丢失;

(3) 对于密集多点目标和分布式目标的情况仍然适用;

(4) 对信杂比要求不高,不需要强散射点存在;

(5) 可检测速度范围宽,尤其对于沿垂直于航迹方向运动的目标;

(6) 只需单通道天线即可实现,天线造价低廉;

(7) 处理方法简单,运算量小,便于实时实现;

(8) 与 SAR 工作模式兼容性好,便于系统集成。

此外,该方法也存在一些缺陷:

(1) 与 SAR 图像相比,由于没有进行方位向聚焦处理,因此,检测目标时信噪比降低;

(2) 难以检测平行航迹运动的目标,对于此类型的目标,需要采取其它辅助措施。

5 结束语

通过原理分析和仿真实验证明本文提出的基于子孔径的 GMTI 方法能够有效抑制地面杂波,检测到运动目标。本方法与现有 GMTI 方法相比较,具有诸多优势,是一种简便、有效的方法。为了进一步确认和完善该方法,还需要进行外

场实验进行进一步验证。

参考文献

- [1] Perry R P, DiPietro R C, and Fante R L. SAR imaging of moving targets. *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(1): 499-505.
- [2] Jao J K. Theory of synthetic aperture radar imaging of a moving target. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(9): 1984-1992.
- [3] Kirscht M. Detection and imaging of arbitrary moving targets with single-channel SAR. *IEE Proc.-Radar Sonar Navig.*, 2003, 150(1): 1984-1992.
- [4] Dias J and Marques P. Multiple moving target detection and trajectory estimation using a single SAR sensor. *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(2): 604-624.
- [5] Goldstein R M and Zebker H A. Interferometric radar measurement of ocean surface currents. *Nature*, 1987, (328): 707-709.
- [6] Stimson G W. Introduction to Airborne Radar, 2nd edition, Mendham, New Jersey, USA: SciTECH Publishing, Inc., 1998: 318-322.
- [7] Klemm R. Principles of Space-Time Adaptive Processing, London, UK: The Institution of Electrical Engineers, 2002: 117-150.

冯宏川: 男, 1971 年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达和 GMTI.

王岩飞: 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为合成孔径雷达系统设计.