

用聚束 SAR 对慢速运动目标进行轨迹跟踪和参数估计的方法

于海锋^{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 针对聚束式合成孔径雷达(SAR)动目标检测的问题,把回波信号进行连续重叠地时域分组,每组信号可以看成是来自一个时域子孔径,然后在每个子孔径内分别成像。地面固定目标在每幅图像上的成像情况是相同的,通过彼此相减就可以消去,达到了抑制杂波的目的,而运动目标由于每个时刻的位置都在变化,在每幅图像上的位置是不同的,从而在相减后剩余下运动目标的图像,把这些图像拼接起来就再现了运动目标的运动轨迹,根据运动轨迹就可以对其运动参数进行估计。该文给出了这个方法的原理推导和具体的检测过程。仿真结果证明了该方法的有效性。

关键词 合成孔径雷达(SAR),运动目标检测和成像,时域子孔径

中图分类号: TN953

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)06-0985-04

Method of Tracking Ground Slowly Moving Target and Estimating Its Velocity Parameters by Spotlight Mode Synthetic Aperture Radar

Yu Hai-feng^{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 Focused the issues on Moving Target Detection (MTD) in spotlight mode Synthetic Aperture Radar (SAR), the echo is divided into groups that are continuous and partly overlapping in time domain. Every group of data can be regarded as coming from a sub-aperture of time domain. The images of same ground scene are then generated in multiple sub-apertures. By Subtracting two consecutive sub-aperture SAR images, the stationary clutter or targets that appear in a sub-aperture SAR image can be suppressed or substantially eliminated, but moving target image is left. Superposing the result of subtracting every two consecutive sub-aperture SAR images, the tract of this moving target is obtained. Furthermore, its moving parameters can be estimated. This paper proved this method in theory and the simulation result testifies its validity.

Key words Synthetic Aperture Radar (SAR), Motion Target Detector (MTD), Time domain sub-aperture

1 引言

合成孔径雷达(SAR)动目标检测和成像的研究开始于1970年, Raney 首先研究了机载 SAR 对地面运动目标进行检测和成像的可能性,他提出了几种检测方法,并且分析了运动目标方位和距离向的速度及加速度对 SAR 成像的影响。之后, Freeman 分析了运动目标的频谱和静止地杂波的不同,提出了用前置滤波法对运动目标进行检测成像。Barbarossa 在 1990 年提出了用维纳-维勒分布(WVD)的方法检测动目标,由此估计出的相位历史对高分辨率成像非常有用。在这个基础上,人们提出了消除 WVD 交叉项的各种方法,比如采用扩展的 WVD 的方法,引入霍夫变换的 WVD-HT 法等,

基本上都是以牺牲一定的时频聚集性为代价来达到对交叉项的抑制。1992 年 Chen-H 等人提出估计目标的径向速度造成的频移的改进方法,从而实现了对目标的更好定位。1994 年至 1995 年, Moreira 等人提出了用 RDM(Reflectivity Displacement Method)来检测运动目标并估计其运动参数的理论。1998 年, Perry 等提出了用 Keystone 变换来消除回波中的线性位移项,继而消除高次项,获得运动目标图像的方法。1999 年, Gen-Yuan 等提出了改变雷达平台的速度来解决动目标方位移位的方法。2001 年, Fienup 等提出了一种通过 SAR 图像检测具有方位向速度或者径向加速度的目标的方法,又可称为截断平均法。其它的一些方法还有小波

变换法、Kirscht^[1]提出的利用图像匹配的观点进行动目标参数估计的方法、线性调频法、模糊函数-雷顿变换法、单视图图像序列法等^[2]。

聚束(spotlight)SAR 作为合成孔径雷达的一种工作模式,通过雷达视线角的变动,使要成像的区域始终处于波束的照射之下,从而通过延长合成孔径时间的方法,得到很高的方位分辨率^[3],理论上讲,适用于条带式 SAR 的动目标检测方法同样适用于聚束 SAR 的情况。并且聚束式的工作模式合成孔径长,分辨率高,这些特点又进一步为动目标检测提供了有利的条件。

本文在这些检测方法的基础上给出了在聚束 SAR 条件下利用时域重叠子孔径的方法来检测动目标,并根据每个子孔径的成像来估计运动目标的运动轨迹,从而进行运动参数估计的方法。

2 用连续重叠子孔径的方法进行动目标轨迹跟踪

对聚束 SAR 来说,每个脉冲回波信号都是同一地域的反射回波,我们可以把回波信号进行连续重叠地时域分组^[4],每组可以看成是一个时域子孔径信号,这样在每个子孔径内可以分别成像,地面固定目标在每幅复图像上的像素彼此相减就可以消去,达到了抑制杂波的目的,而运动目标由于每个时刻的位置都在变化,通过图像相减并不能消去,从而在每幅图像上都剩余下动目标的图像,把这些动目标的图像拼接起来就再现了运动目标的运动轨迹,根据运动轨迹就可以进行运动参数的估计,进而可以根据运动参数对运动目标进行精确的聚焦成像。下面进行详细的推导和说明。

图 1 是聚束式合成孔径雷达系统示意图。A 所示的阴影区为波束辐照区; o 为波束中心,也是坐标原点; 载机以 V_s 速度沿 y 轴正向飞行,在载机由 B 飞到 C 的过程中,虚线所示的波束始终照射 A 区域,设共发射和接收 $N + N_0$ 个脉冲(其中 N 是每个时域子孔径内发射和接收的脉冲个数); B 和 C 以 o 点对称,合成孔径 $BC = 2L$ (L 是半个合成孔径长度),并假设: $\Delta L = 2L / (N + N_0)$,把载机从 B 点飞过 $n\Delta L$ 距离长度的时刻作为起始时间,飞过 $(N + n)\Delta L$ 的距离的时刻作为结束时间,也就是以 $n\Delta L \sim (N + n)\Delta L$ 这个飞行距离作为合成孔径长度,其中 $n = 1, 2, 3, \dots, N_0$ 。这个长度可以认为是一个子孔径的合成孔径长度,这样当 n 取不同的值的时候,全合成孔径长度 $2L$ 可以被分成多个在时域上重叠的子孔径,如图 2 沿飞行方向, $n_1\Delta L \sim (N + n_1)\Delta L$ 作为子孔径 1, $n_2\Delta L \sim (N + n_2)\Delta L$ 作为子孔径 2, $n_3\Delta L \sim (N + n_3)\Delta L$ 作为子孔径 3,以此类推。

下面首先分析固定目标在第 n 个子孔径内的成像情况:设在 A 区域内有一固定点目标 q , 坐标为 $(x_q, y_q, 0)$, 载机坐

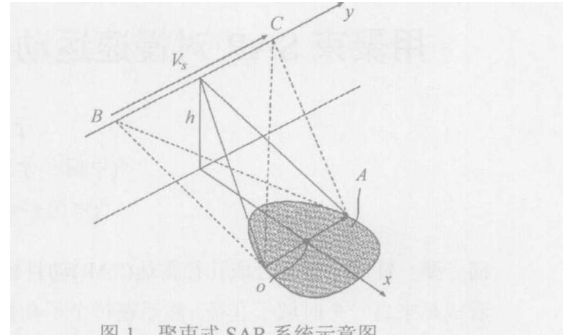


图 1 聚束式 SAR 系统示意图

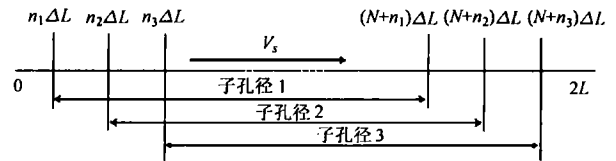


图 2 子孔径的分割示意图

标为 (x_m, u, h) , 其中 u 代表载机在 y 方向的坐标, 则载机到 q 点的距离 $R_{mq} = \sqrt{x_M^2 + (y_q - u)^2}$, 其中 $x_M = \sqrt{(x_m - x_q)^2 + h^2}$, 那么发射信号 $\delta(t)$, PRF 周期为 T , 经过距离压缩以后的目标点 q 回波信号:

$$s_q(\omega, u) = \sigma_q \exp \left[-2jk \sqrt{x_M^2 + (y_q - u)^2} \right] \quad (1)$$

设 $\theta(u) = \arctan \left(\frac{y - u}{x_M} \right)$, $k = \omega / c$, 把回波信号变换到波数域, 即 k_u 域, 在载机位于长度为 $n\Delta L \sim (N + n)\Delta L$ 的子孔径内:

$$\begin{aligned} S_q(\omega, k_u) &= \int_{n\Delta L - L}^{(N+n)\Delta L - L} s_q(\omega, u) \exp(-jk_u u) du \\ &= \int_0^{N\Delta L} s_q(\omega, u + n\Delta L - L) \exp\{-jk(u + n\Delta L - L)\} du \\ &= \int_0^{N\Delta L} \sigma_q \exp \left\{ -2jk \sqrt{x_M^2 + \{y_q - (u + n\Delta L - L)\}^2} \right\} \\ &\quad \cdot \exp[-jk(u + n\Delta L - L)] du \\ &= \sigma_q \exp \left[-j\sqrt{4k^2 - k_u^2} x_M - jk_u (y_q - n\Delta L + L) \right] \\ &\quad \cdot \exp[-jk_u (n\Delta L - L)] \\ &= \sigma_q \exp \left[-j\sqrt{4k^2 - k_u^2} x_M - jk_u y_q \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$S_q(\omega, k_u) \text{ 与参考信号 } S_0(\omega, k_u) = \exp \left[-j\sqrt{4k^2 - k_u^2} x_M \right]$$

的共轭相乘, 得到 k_u 域的压缩结果:

$$F(\omega, k_u) = S_q(\omega, k_u) S_0^*(\omega, k_u) = \sigma_q I(\omega, k_u) \exp\{-jk_u y_q\} \quad (3)$$

$$\text{其中 } I(\omega, k_u) = \begin{cases} 1, & k_u \in [2k \sin \theta_n(0), 2k \sin \theta_n(N\Delta L)] \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

由式(3)可见固定点目标成像与 n 值的选取无关, 也就是固定目标在一系列的时域连续子孔径内的成像情况相同, 它们的合成孔径长度都是 $N\Delta L$, 分辨率都相同。这样, 把经过 stolt 插值得到的连续图像相减, 就能够消去固定目标的成像,

从而达到去除杂波的目的。

下面分析运动目标的成像:假设在 A 区域内与前述 q 点同一距离线上存在一个动目标点,初始坐标为 (x'_{i0}, y_{i0}) , 方位向速度为 v_i , 距离向速度为 0, 在第 n 个子孔径内, 设

$$x_{i0} = \sqrt{(x'_{i0} - x_m)^2 + h^2}, \quad \text{则回波信号:}$$

$$\begin{aligned} s_i(\omega, u) &= \sigma_i \exp \left[-2jk\sqrt{x_{i0}^2 + (y_i - u)^2} \right] \\ &= \sigma_i \exp \left[-2jk\sqrt{x_{i0}^2 + \left\{ y_{i0} + nv_iT + \left(\frac{L+u}{V_s} \right) (v_i - u) \right\}^2} \right] \\ &= \sigma_i \exp \left[-2jk\sqrt{x_{i0}^2 + \left(y_{i0} + nv_iT + \frac{Lv_i}{V_s} - \alpha u \right)^2} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $\alpha = 1 - v_i/V_s$, 在长度为 $n\Delta L \sim (N+n)\Delta L$ 的子孔径内将回波信号变换到 k_u 域:

$$\begin{aligned} S_i(\omega, k_u) &= \int_{n\Delta L-L}^{(N+n)\Delta L-L} s_i(\omega, u) \exp(-jk_u u) du \\ &= \int_0^{N\Delta L} s_i(\omega, u+n\Delta L-L) \exp[-jk_u(u+n\Delta L-L)] du \\ &= \frac{\sigma_i}{\alpha} \exp \left[-j\sqrt{4k^2 - (\alpha k_u)^2} - j\alpha k_u \left(y_{i0} + nv_iT + \frac{Lv_i}{V_s} \right) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{设 } I_i(\omega, k_u) = \begin{cases} 1, & k_u \in [2k \sin \theta_n(0), 2k \sin \theta_n(\alpha N \Delta L)] \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, \quad \text{对}$$

于慢速运动目标, 采用固定目标的参考函数进行压缩, 得到动目标点的 k_u 域压缩结果:

$$F_i(\omega, k_u) = \frac{\sigma_i}{\alpha} I_i(\omega, \alpha k_u) \exp \left[-j\alpha k_u \left(y_{i0} + nv_iT + \frac{Lv_i}{V_s} \right) \right] \quad (6)$$

可见, 经过 Stolt 插值以后, 运动目标点的成像与 n 有关, 也就是与子孔径的选取有关, 在不同的子孔径内动目标点的成像位置不同。取 $n = n_1$ 和 $n = n_2$ 两个子孔径, 将 k_u 域压缩结果相减, 固定目标点的成像被消除, 只剩余动目标的成像:

$$\begin{aligned} F_{i_1}(\omega, k_u) - F_{i_2}(\omega, k_u) &= \frac{\sigma_i}{\alpha} I_i(\omega, \alpha k_u) \exp \left[-j\alpha k_u \left(y_{i0} + \frac{Lv_i}{V_s} \right) \right] \\ &\quad \cdot \exp(-j\alpha k_u n_1 v_i T) - \exp(-j\alpha k_u n_2 v_i T) \end{aligned} \quad (7)$$

前后两幅图像相减得到的剩余动目标点图像如图 3 所示, 静止目标点的图像已经被消除, 在 y 方向上剩余两个由运动目标形成的 sinc 函数形状的尖峰。目标点速度越大, 如果 n_1 和 n_2 相差越大, 也就是后一个子孔径和相邻的前一个子孔径的起始时间相差越大, 那么两个尖峰的距离越大, 但同时散焦越严重。在速度较小的情况下, n 取多个值, 把得到的多幅图像彼此相减, 剩余的动目标点成像相叠加就得到了如图 4 的运动目标轨迹图形。

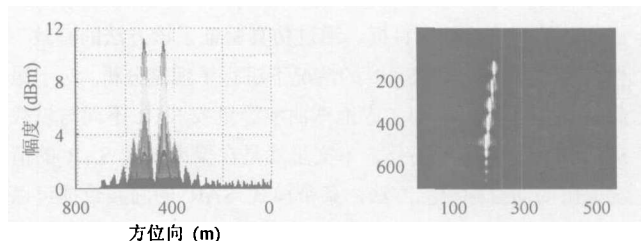


图 3 两幅图像相减后的
剩余目标点图像

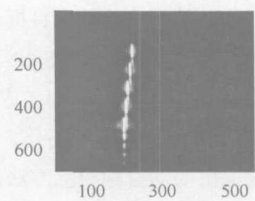


图 4 相减后叠加得到的
目标点运动轨迹

在目标点仅存在方位向速度的情况下, 它的成像轨迹依然发生了径向移位, 根据文献[2]第一章的分析: 无论是静止目标还是运动目标, 在合成孔径时间内都会发生距离徙动现象, 对运动目标而言, 距离徙动包含两部分, 第一部分是载机运动引起的, 第二部分是目标距离向运动引起的。因此这里目标点的径向移位可以认为是来自载机运动引起的距离向徙动。

3 运动参数的估计

根据运动目标的轨迹和雷达本身的系统参数, 可以对目标的运动参数进行估计。如图 4, 取其中的某两个像素点 pn_1 和 pn_2 分别是 n 等于 n_1 和 n_2 时两幅图像相减得到的动目标像素点, 可以测量得到 pn_1 和 pn_2 沿方位向相距 D 个像素点, 则可以认为:

$$V_q = D\delta y / (\Delta t) \quad (8)$$

其中 δy 是图像上一个像素点对应地面的一个分辨单元的方位向尺度, 可以根据系统参数进行计算, 其中 Δt 是 n_1 和 n_2 两个时域连续重叠子孔径的时间间隔, 有:

$$\Delta t = (n_2 - n_1)\Delta L / V_s \quad (9)$$

所以可以通过式(8)和式(9)可以计算 q 点速度。

为了理论推导的方便, 文中只给出了目标点具有方位向速度的情况分析, 对于同时具有距离向速度的情况, 根据目标点在每个子孔径内的成像单元的相对移动距离和 Δt 就可以对距离向的速度分量进行估计。还可以根据目标点在多个子孔径内的成像情况对估值进行修正, 比如可以利用最简单的取均值法, 最小二乘估计法等。

4 结束语

利用单通道 SAR 进行动目标检测最困难的问题就是动目标的回波信号被周围较强的背景杂波信号所淹没。本文给出了把整个聚束 SAR 的合成孔径分割成多个彼此重叠的连续多个子孔径的方法来抑制杂波, 并且通过检测各个子孔径

成像的差别来检测动目标。通过仿真验证了该方法的有效性。本文是在机载 SAR 的情况下进行了理论分析,对于星载 SAR 的情况,还要考虑地球曲率等星载 SAR 不同与机载 SAR 的实际情况。另外,本文虽然是在聚束模式 SAR 的情况提出的动目标检测方法,条带模式 SAR 的回波数据可以转换成聚束模式 SAR 的回波数据^[5],所以同样适用于条带模式 SAR 的情况。

参 考 文 献

- [1] Martin Kirscht. Method of detecting moving object. US Patent, Num: US2004/0032361 A1, Feb.19, 2004.
- [2] 郑明浩.合成孔径雷达动目标检测和成像研究. [博士论文],北京:中国科学院研究生院,2003年6月.
- [3] 孙进平. 机载聚束模式的合成孔径雷达的成像算法研究. [博士论文],北京:北京航空航天大学,2001年10月.
- [4] Larry K. System and method for moving target detection. US patent, Num: 6697010, 2/24/2004.
- [5] Yeo T S, Tan N L, Lu Y H, *et al.* A stripmap to spotlight data converting algorithm. Geosciences and Remote Sensing Symposium Proceedings, Seattle, 1998, 2: 1168 – 1170.

于海锋: 男, 1978年生, 博士生, 研究方向为 SAR 成像理论及动目标检测.

王岩飞: 男, 1963年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波成像雷达系统及其成像理论、数字信号处理等.