

匹配傅里叶变换检测 SAR 中的运动目标¹

王盛利^{***} 于立^{**} 张光义^{**}

^{*}(西安电子科技大学电子所 西安 710071)

^{**}(南京电子技术研究所 南京 210013)

摘 要: 该文介绍了应用匹配傅里叶变换检测 SAR 中运动目标的方法。文中讨论了信号模型、检测方法,并进行了仿真研究。仿真和实际的 SAR 数据中运动目标检测处理结果表明:在雷达平台运动速度被补偿,且脉冲压缩之后,再应用匹配傅里叶变换进行运动目标检测是比较好的检测方法;在一定的条件下,也可以比较相邻 SAR 图像中强点间相对位置的变化来判断运动目标。

关键词: SAR, 高分辨, 检测, 运动目标, 匹配傅里叶变换

中图分类号: TN951 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)06-0959-07

Detecting the Moving Target in SAR Data Using the Match Fourier Transform

Wang Sheng-li^{***} Yu Li^{**} Zhang Guang-yi^{**}

^{*}(*Institute of Electronic Xidian University, Xian 710071, China*)

^{**}(*Nanjing Research Institute of Electronic Technology, Nanjing 210013, China*)

Abstract In this paper, a method of detecting moving targets in SAR using the match Fourier transform is introduced. The signal model and the detecting method are discussed and simulations are performed. The results of the simulations and the practices of detecting moving targets in SAR data show that when the velocity of the radar platform is compensated and pulses are compressed, the moving targets are easily detected using match Fourier transform, and under certain conditions, the moving targets may be detected depending on the relative position of strong points in contiguous SAR image.

Key words SAR, High resolution, Detection, Moving target, Match Fourier transform

1 引言

在机载雷达对地面运动目标检测^[1]方法的研究中,目前主要从两个方面进行研究:一是研究新体制雷达,如通过多天线、多通道以及与之相应的信号处理方法等来检测地面运动目标^[2-4];另一方面的研究是以现有体制雷达为基础,研究新的信号处理方法检测地面运动目标^[5-9]。应用 SAR 雷达数据检测运动目标就属此类。本文研究如何以高分辨 SAR 数据,应用匹配傅里叶变换检测地面运动目标。

在 SAR 数据中,由于雷达平台的运动,会造成地面回波中不仅有多普勒频移,还会产生线性调频项,而且每一点都不相同,但在某一区域范围内,线性调频项值的大小差别不大,当雷达平台的运动速度已知时,就可以对其进行补偿,聚焦成像;而就地面运动目标来说,由于其运动速度未知,其多普勒频移和线性调频项也就未知,这就造成了必须首先检测出运动目标。若有多个运动目标的存在,这就提出了对多运动目标的检测和分辨问题。

针对线性调频信号处理, Wigner-Ville, Radon-Wigner, 分数阶 Fourier 变换, 多普勒速率滤波, Chirp- Fourier 变换^[10]以及匹配傅里叶变换^[11]均是处理线性调频信号的方法。本文

¹ 2002-12-26 收到, 2003-07-29 改回

从高分辨 SAR 信号回波特性出发, 研究降低地杂波对目标检测的影响和匹配傅里叶变换检测地面运动目标的方法.

2 信号模型

假设雷达平台距地面高度为 h_o , 运动速度为 v_o , 雷达平台沿 X 轴飞行, 地面上雷达波束内某点的坐标为 (x_i, y_i) , 如图 1 所示. 若地面有一运动目标的坐标为 (x_p, y_p) , 其在 X 轴方向的速度投影为 v_{xp} , 在 Y 轴方向的速度投影为 v_{yp} .

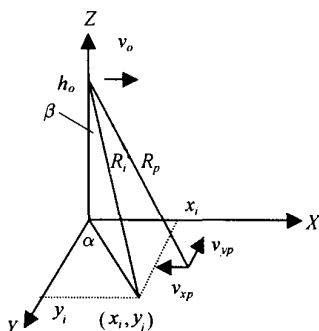


图 1 信号模型

若设: $R_i^2(x_i, y_i) = h_o^2 + y_i^2 + x_i^2$, $R_i(x_i, y_i)$ 是与时间无关的项. 在 t 时刻, 此点对雷达回波的延时为

$$T_i(t) \cong T_{oi} - 2 \frac{x_i v_o}{c R_i(x_i, y_i)} t + \frac{v_o^2}{c R_i(x_i, y_i)} \left(1 - \frac{x_i^2}{R_i^2(x_i, y_i)} \right) t^2 \quad (1)$$

式中 $T_{oi} = 2R_i(x_i, y_i)/c$, c 为光速.

设运动目标与雷达之间的初始距离为 $R_p^2(x_p, y_p) = h_o^2 + y_p^2 + x_p^2$, 它是与时间无关的项. 那么运动目标对雷达回波的延时为

$$T_p(t) \cong T_{op} - 2 \frac{x_p(v_o - v_{xp}) + y_p v_{yp}}{c R_p(x_p, y_p)} t + \left(\frac{(v_o - v_{xp})^2 + v_{yp}^2}{c R_p(x_p, y_p)} - \frac{(x_p(v_o - v_{xp}) + y_p v_{yp})^2}{c R_p^3(x_p, y_p)} \right) t^2 \quad (2)$$

式中 $T_{op} = 2R_p(x_p, y_p)/c$.

若 SAR 发射的是线性调频信号, 则雷达接收到 i 点的回波信号经混频后, 可表示为

$$\chi_i(\tau, t) = A_i \exp(j2\pi f_o T_i(t)) \exp(j\pi K(\tau - T_i(t))^2) g_T(\tau - T_i(t)) \quad (3)$$

式中 f_o 为发射信号载频, K 为信号的线性调频率, $g_T(\tau)$ 是脉宽为 T 的门函数.

运动目标的回波信号可以表示为

$$\chi_p(\tau, t) = A_p \exp(j2\pi f_o T_p(t)) \exp(j\pi K(\tau - T_p(t))^2) g_T(\tau - T_p(t)) \quad (4)$$

由于 SAR 接收的地面回波是许多点组成的, 考虑到多个运动目标的回波, 故雷达接收到的回波模型可以表达为

$$\chi(\tau, t) = \sum_i \chi_i(\tau, t) + \sum_p \chi_p(\tau, t) \quad (5)$$

将式 (1) 代入式 (3), 由于一般正侧视 SAR 满足 $R_i(x_i, y_i) \gg x_i$, 可得地面固定目标的多普勒频率和线性调频率为

$$f_{id} = 2x_i v_o / [\lambda R_i(x_i, y_i)] \quad (6)$$

$$f_{is} = v_o^2 / [\lambda R_i(x_i, y_i)] \quad (7)$$

将式 (2) 代入式 (4), 可令

$$f_{pd} = 2[x_p(v_o - v_{xp}) + y_p v_{yp}] / [\lambda R_p(x_p, y_p)] \quad (8)$$

地面运动目标的速度一般都是小于 50m/s, 对于机载 SAR 雷达来说, $y_p \gg x_p$, 若目标的速度 v_{yp} 稍大一点, 则式 (8) 所表示的目标回波的多普勒频率取决于目标的运动速度, 若 $f_{pd} < f_{id}$ 或 $f_{pd} > f_{id}$, 使目标谱在杂波谱之外, 这是运动目标比较容易检测的情况; 而目标的速度 v_{yp} 比较小时, 则会使目标回波谱在杂波谱之中, 这就给目标检测造成困难。

由于正侧视 SAR 满足 $R_p(x_p, y_p) \gg x_p$, $R_p(x_p, y_p) \approx y_p$, 故有

$$f_{ps}(v_o - v_{xp})^2 / [\lambda R_p(x_p, y_p)] \quad (9)$$

从这里可以看出: 运动目标速度在 X 轴上的投影产生线性调频率的变化。

3 检测方法

3.1 时域数据检测

所谓时域数据检测就是对 SAR 数据不做任何处理, 直接以某一时刻周期性信号进行检测处理, 即将式 (3) 和式 (4) 代入式 (5), 并在式 (5) 中, 令 $\tau = nT_s$, $nT_s - T_{oi} = \Delta T_i$, $nT_s - T_{op} = \Delta T_p$, 若 $1 \gg K\Delta T_i/f_o$, $1 \gg K\Delta T_p/f_o$, 三次项和四次项的影响比较小, 则有

$$\begin{aligned} \chi(nT, t) = & \sum_i A_i \exp \left[-j2\pi f_o \left(\Delta T_i + \frac{f_{id}}{f_o} t - \frac{f_{is}}{f_o} t^2 \right) \right] \left[1 + \frac{K}{f_o} \left(\Delta T_i + \frac{f_{id}}{f_o} t - \frac{f_{is}}{f_o} t^2 \right) \right] \\ & \times \exp(j2\pi f_o nT_s) g_T \left(\Delta T_i + \frac{f_{id}}{f_o} t - \frac{f_{is}}{f_o} t^2 \right) \\ & + \sum_p A_p \exp \left\{ -j2\pi f_o \left(\Delta T_p + \frac{f_{pd}}{f_o} t - \frac{f_{ps}}{f_o} t^2 \right) \right\} \left[1 + \frac{K}{f_o} \left(\Delta T_p + \frac{f_{pd}}{f_o} t - \frac{f_{ps}}{f_o} t^2 \right) \right] \\ & \times \exp(j2\pi f_o nT_s) g_T \left(\Delta T_p + \frac{f_{pd}}{f_o} t - \frac{f_{ps}}{f_o} t^2 \right) \end{aligned} \quad (10)$$

由于数据是在时域直接选取的, 故 i 包含了一个脉冲覆盖区域的地面回波, 这就造成了地杂很强, 这对运动目标检测是不利的, 但若运动目标的多普勒频率在杂波谱之外, 还是可以检测运动目标的。

分析式 (7), 考虑回波信号在距离向有一定范围, 这也就造成了不同点信号的线性调频项的差异, 也就是线性调频项值有一范围, 若设距离向范围宽度为 W , 距离向开始点为 R , 则线性调频项值的范围为

$$f_{is} = \left\langle \frac{v_o^2}{\lambda(R+W)}, \frac{v_o^2}{\lambda R} \right\rangle \quad (11)$$

当运动目标的线性调频项值在地杂波线性调频项值的范围之外时, 应用匹配傅里叶变换, 检测出运动目标。

3.2 频域数据检测

若雷达发射信号包络的傅里叶变换谱为 $S(\omega)$ ，则式 (5) 的傅里叶频谱为

$$X(\omega, t) = S(\omega) \left\{ \sum_i A_i \exp \left[-j2\pi f_o T_i(t) \left(1 + \frac{\omega}{2\pi f_o} \right) \right] + \sum_p A_p \exp \left[-j2\pi f_o T_p(t) \left(1 + \frac{\omega}{2\pi f_o} \right) \right] \right\} \quad (12)$$

当选定一个 ω 之后， $S(\omega)$ 为一常数，它不影响检测，信号随时间变化的规律取决于 $T_i(t)$ 和 $T_p(t)$ 。频域数据检测与时域数据检测所存在的问题相类似，即地杂波影响大，在杂波谱之外易于检测运动目标，应用匹配傅里叶变换可检测线性调频项值在地杂波线性调频项值的范围之外的运动目标。

3.3 脉冲压缩后数据检测

从式 (12) 中可以看出由于雷达平台或目标运动不影响 $S(\omega)$ ，所产生的线性调频项在一定范围内对消。

式 (12) 还可以表示成

$$X(\omega, t) = S(\omega) \left\{ \sum_i A_i \exp \left[-j2\pi(f_{id}t - f_{is}t^2)T_i(t) \left(1 + \frac{\omega}{2\pi f_o} \right) + \varphi_i \right] + \sum_p A_p \exp \left[-j2\pi(f_{pd}t - f_{ps}t^2)T_p(t) \left(1 + \frac{\omega}{2\pi f_o} \right) + \varphi_p \right] \right\} \quad (13)$$

为了减小雷达平台运动所产生线性调频分量的影响，式 (13) 是很容易补偿的。由于雷达平台运动速度和成像区域是已知的，若对某一区域进行运动目标检测，可以计算出线性调频分量的值，以此值来减小线性调频分量。设计算出某一区域的线性调频分量为 f_{os} ，则补偿的表达式为

$$Y(\omega, t) = S(\omega) \left\{ \sum_i A_i \exp \left[-j2\pi(f_{id}t - (f_{is} - f_{os}t^2) \left(1 + \frac{\omega}{2\pi f_o} \right) + \varphi_i \right] + \sum_p A_p \exp \left[-j2\pi(f_{pd}t - (f_{ps} - f_{os}t^2) \left(1 + \frac{\omega}{2\pi f_o} \right) + \varphi_p \right] \right\} \quad (14)$$

从式 (14) 可以看出，调频分量的大小被调整为相对于 f_{os} 的大小，这就减小了线性调频分量的影响。式 (14) 的时域表达式为

$$\begin{aligned} y(\tau, t) = & \sum_i A_i \exp \left[j2\pi(f_{id}t - (f_{is} - f_{os}t^2) + \frac{K}{2} \left(\tau - T_i(t) + \frac{f_{os}}{f_o} t^2 \right) \right] \\ & \times g_T \left(\tau - T_i(t) + \frac{f_{os}}{f_o} t^2 \right) \\ & + \sum_p A_p \exp \left[j2\pi(f_{pd}t - (f_{ps} - f_{os}t^2) + \frac{K}{2} \left(\tau - T_p(t) + \frac{f_{os}}{f_o} t^2 \right) \right] \\ & \times g_T \left(\tau - T_p(t) + \frac{f_{os}}{f_o} t^2 \right) \end{aligned} \quad (15)$$

以门函数 $g(\tau)$ 近似代替 $\sin(\pi KT\tau)/\pi KT\tau$, 压缩后的信号为

$$\begin{aligned} z(\tau, t) = & \sum_i A_i \exp [j2\pi(f_{idt} - (f_{is} - f_{os})t^2)] \exp [-j\pi K((\tau - T_i(t))^2 \\ & - (\tau - T_i(t)))g(\tau - T_i(t)) \\ & + \sum_p A_p \exp [j2\pi(f_{pdt} - (f_{ps} - f_{os})t^2)] \exp [-j\pi K((\tau - T_p(t))^2 \\ & - (\tau - T_p(t)))g(\tau - T_p(t))] \end{aligned} \quad (16)$$

从式 (16) 可以看出, 通过脉冲压缩, 在距离向将不同距离门的地杂波分开, 这就大大地减小了地杂波对运动目标的检测影响, 故推荐的运动目标检测处理是在脉冲压缩后进行, 此时, 一般运动目标是一强反射点。

4 仿真研究

在仿真中, 以实际的 3mSAR 数据进行研究, 在研究中加入一定幅度仿真的运动目标数据, 以研究匹配傅里叶变换的运动目标检测规律。

4.1 时域数据运动目标检测

在仿真中, 首先考虑运动目标在距离向运动的影响, 此时加入运动目标信号的幅度为 $5W$, $v_y=4\text{m/s}$, 二步处理匹配傅里叶变换的计算结果如图 2 所示。从图 2 中可以看出运动目标的信号谱与地杂波谱相分离, 这种分离的程度还与运动目标所在位置有关, 从式 (8) 中可以明显看出, 运动目标的多普勒频率与目标的位置和各速度分量之间的关系。

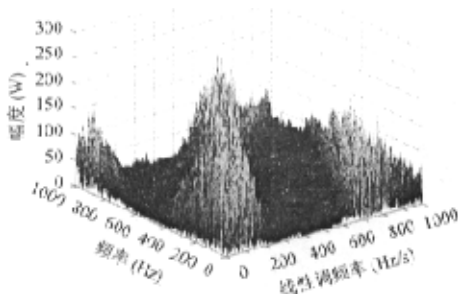


图 2 目标在 Y 向的速度为 4m/s 时的时域二步匹配傅里叶变换谱

4.2 脉压后数据运动目标检测

在做此项仿真时, 首先设计好运动目标的地理位置, 然后将数据在距离向变换到傅里叶频域进行线性调配补偿, 再进行距离压缩, 并以相邻的 5 个距离门数据相加做二步处理匹配傅里叶变换处理。当信号的幅度为 $1W$, $v_y=2\text{m/s}$ 时的二步处理匹配傅里叶变换谱如图 3 所示。图中可以明显发现运动目标。

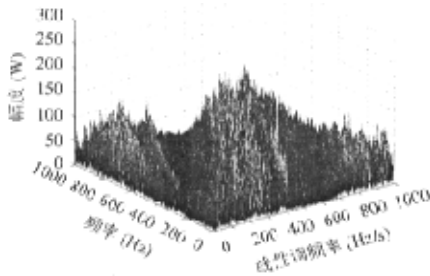


图 3 目标在 Y 向的速度为 2m/s 时的脉压后二步匹配傅里叶变换

5 实际数据中的运动目标检测

我们以同一批 3mSAR 数据进行了运动目标检测的研究，采用的是脉压后数据运动目标检测。图 4 是二步处理匹配傅里叶变换谱 (图 4 中对数据的坐标进行了移动，以便观察，后面的图也是如此)，在杂波谱之外有一信号峰，这与前文的仿真相近，它是由于运动目标在距离向有一分量造成的。从谱中可以看到运动目标的谱距杂波谱比较近，故可以判断它是一慢速运动目标。从这里我们得到这样一个结论：如果运动目标在方位向运动分量比较小，在距离向有一定运动分量，则运动目标的谱可能出现在成像区域之外，故可检测在成像区域之外强点的存在来判断运动目标的存在；当然，这要根据多幅 SAR 图来判断。若运动目标在方位向有较大速度时，在成像时，运动目标散焦，这就影响运动目标谱的强度，有可能检测不出运动目标。

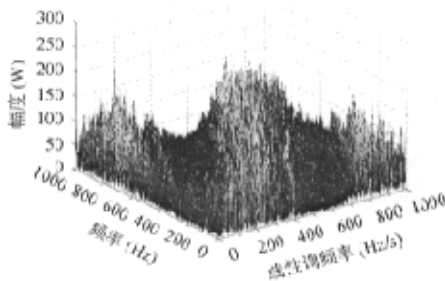


图 4 实际 SAR 数据脉压后二步匹配傅里叶变换谱

应用匹配傅里叶变换还检测在方位向的运动目标，图 5 为检测的结果。图中加三角的箭头为加入的人工固定强目标，它处在匹配傅里叶谱图的中心，加方块的箭头为运动目标的强点，它的线性调频率相对于谱中心小 7，由此可以判断出此强点为运动目标。

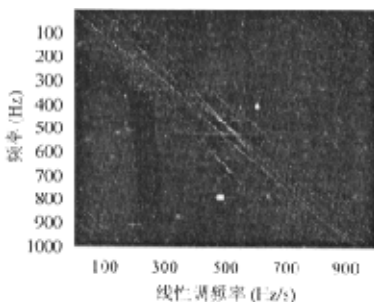


图 5 实际 SAR 数据脉压后二步匹配傅里叶变换谱投影图, 可发现方位向运动目标

6 结论

前文讨论了匹配傅里叶变换从 SAR 数据中检测运动目标的方法, 通过对信号模型、检测方法的分析, 仿真研究和实际的 SAR 数据中运动目标检测处理表明: 在雷达平台运动速度被补偿, 且脉冲压缩之后, 再应用匹配傅里叶变换进行运动目标检测, 这种检测是根据强点的多普勒频率和线性调频率的大小来判断是否为运动目标。这种检测方法在实际 SAR 数据检测中取得了比较好效果, 故本文介绍的方法在实际中是可行的。

参 考 文 献

- [1] Raney R K. Synthetic aperture imaging radar and moving targets. *IEEE Trans. on AES.*, 1971, AES-7(3): 499-505.
- [2] Stone M I, Ince W J. Air to ground MTI radar using a displaced phased center phased array. *IEEE National Radar Conference*, Washington, April 1980: 225-230.
- [3] Nohara T J. Comparison of DPCA and STAP for space-based radar. *IEEE International Radar Conference Radar-95. Phrygia*, 1995: 113-119.
- [4] Yadin E. A performance evaluation model for a two port interferometer SAR-MTI. *IEEE International Radar Conference Radar-96. Beijing*, 1996: 261-266.
- [5] Barbarossa S, Farina A. Detection and imaging of moving objects with synthetic aperture radar. Part 2: Joint time-frequency analysis by Wigner-Ville distribution. *IEE Proc.-F*, 1992, 139(1): 89-97.
- [6] Barbarossa S. Analysis of multicomponent LFM signals by a combined Wigner-Hough transform. *IEEE Trans. on SP*, 1995, 43(4): 1511-1515.
- [7] Namias V. The fractional Fourier transform and its application in quantum mechanics. *J. Inst. Math. Its Appl.*, 1980, 25(1): 241-265.
- [8] Barbarossa S. Doppler-rate filtering for detecting moving targets with synthetic aperture radars. in Huddleston G K, Tanenhaus M, Williams B P(Eds.): *Millimeter wave and synthetic aperture radar. Proceedings of SPIE*, 1989, 1101: 140-147.
- [9] Werness S, Carrara W, Joyce L, Franczak D. Moving target imaging algorithm for SAR data. *IEEE Trans. on AES.*, 1990, AES-26(1): 57-67.
- [10] X-G Xia. Discrete chirp-fourier transform and its application to chirp rate estimation. *IEEE Trans. on SP.*, 2000, SP-48(11): 3122-3133.
- [11] 王盛利, 李士国, 倪晋麟, 张光义. 一种新的变换——匹配傅立叶变换. *电子学报*, 2001, 29(3): 403-405.

王盛利: 男, 1957 年生, 高级工程师, 研究领域: 雷达系统与信号处理.

于立: 男, 1975 年生, 工程师, 研究领域: 计算机技术与信号处理.

张光义: 男, 1935 年生, 院士, 研究领域: 雷达系统与信号处理.