

基于分数阶 Fourier 变换的机载 SAR 运动目标检测¹

孙泓波 顾 红 苏卫民 刘国岁

(南京理工大学电子工程研究中心 南京 210094)

摘 要 该文首先建立了机载合成孔径雷达 (SAR) 对运动目标的回波信号模型, 阐述了其本质为线性调频信号的特点。根据这种特点, 提出了一种基于分数阶 Fourier 变换的机载 SAR 运动目标检测新方法, 有效地消除了线性调频信号的时频耦合特性对信号检测的影响。与双线性时频分布类算法相比, 分数阶 Fourier 变换是线性变换, 在多运动目标存在的情况下, 不会受到交叉项的影响。仿真结果验证了算法的有效性。

关键词 分数阶 Fourier 变换, 合成孔径雷达, 运动目标检测

中图分类号 TN951

1 引 言

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 是一种新型高分辨力雷达体制, 它借助于脉冲压缩技术实现距离维的高分辨, 借助于方位多普勒分析的技术实现方位维的高分辨, 它已经广泛用于军事及民用领域当中。但是, 传统的 SAR 通常是对地面上的固定目标成像, 而在军事应用当中, 许多情况下我们只对地面的运动目标感兴趣。因此, 机载 SAR 运动目标检测技术成为当前 SAR 技术的一个研究热点。

自从 R.K.Raney 于 1971 年发表了关于机载 SAR 运动目标检测与成像的开创性文章以来, 世界各国学者都提出了许多有关的技术和方法^[1]。在地杂波抑制方面, 著名的空时二维信号处理方法无疑具有最优的性能, 但它很难在机载 SAR 上实现, 可能得到应用的几种相对简单的技术参见文献 [2]。在运动目标的参数估计方面, 近年来以 Wigner-Ville 分布 (WVD) 为代表的时频分布技术得到了广泛的应用^[3], 许多学者都利用其对线性调频信号良好的时频聚集性将其用于 SAR 回波参数估计, 并结合 Radon 变换进一步改善其性能^[4]。但是, 在多运动目标存在的情况下, WVD 中的交叉项将严重影响目标的检测和参数估计, 这是此类双线性时频分布固有的缺陷。尽管通过一些技术可以在一定程度上抑制交叉项, 但其分辨率也随之降低。本文从一个新的思路出发, 将分数阶 Fourier 变换^[5]引入机载 SAR 运动目标检测技术当中, 利用其特性有效地消除了线性调频信号的时频耦合对信号检测的影响。由于分数阶 Fourier 变换是线性变换, 在多运动目标存在的情况下不会受到交叉项的影响, 具有明显的优越性。

2 机载 SAR 运动目标回波信号模型

假设 SAR 处于正侧视工作状态, 雷达载机与地面运动目标的几何位置关系如图 1 所示。其中 R_0 为零时刻雷达与目标的距离, V 为载机运动速度。我们将目标的运动分解为相对于飞机的径向分量和切向分量, v_r, a_r 分别为径向速度和加速度, v_c, a_c 分别为切向速度和加速度。在 t 时刻雷达与运动目标的距离 $R(t)$ 可近似为

$$R(t) = R_0 - v_r t + [(V - v_c)^2 - R_0 a_r][t^2 / (2R_0)] \quad (1)$$

首先考虑雷达发射连续波的情况, 忽略距离压缩的影响, 接收的回波信号为

$$s(t) = \sigma_T g(t) \exp(j\Psi_T) \exp(-j4\pi R(t)/\lambda) \quad (2)$$

¹ 2001-04-09 收到, 2001-08-27 定稿

“雷达信号处理国防科技重点实验室基金”资助项目 (No.99JS01.4.1.DZ2401)

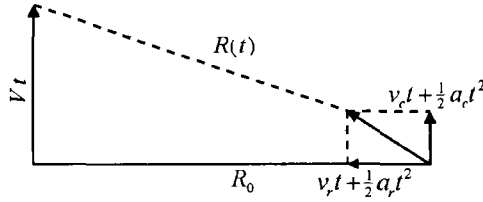


图 1 机载雷达与地面运动目标相对位置

其中 σ_T 为一常数, 与目标的雷达反射截面积 (RCS) 有关; Ψ_T 为目标反射回波的起始相位; $g(t)$ 为受雷达天线方向图调制项。这三项的影响一般不予考虑, 我们认为回波的全部信息体现在相位上。 λ 为载波波长。将 (1) 式代入 (2) 式 (再忽略 R_0 引入的常数相位项), 得

$$s(t) = \exp(j2\pi f_{d0}t) \exp(j\pi Kt^2) \quad (3)$$

其中 $f_{d0} = 2v_r/\lambda$ 为多普勒质心, $K = [2/(\lambda R_0)][-(V - v_c)^2 + R_0 a_r]$ 为调频斜率。由上式可见, 正侧视情况下机载 SAR 地面运动目标的回波可近似为线性调频信号。

3 分数阶 Fourier 变换简介

普通的 Fourier 变换可以看作是时间信号 $s(t)$ 在时频平面内逆时针旋转 $\pi/2$, 即从时间轴转到频率轴 $S(f)$, 即一阶 Fourier 变换。由此, $s(t) \rightarrow s(t)$ 可看作是一个零旋转的零阶 Fourier 变换, $s(t) \rightarrow s(-t)$ 是一个旋转角度为 π 的二阶 Fourier 变换, $s(t) \rightarrow S(-f)$ 是一个旋转角度为 $3\pi/2$ 的三阶 Fourier 变换。很自然地, 将 $s(t)$ 旋转 $\pi/2$ 的非整数倍的线性变换就可以称为分数阶 Fourier 变换。如果将 Fourier 变换看作一种线性算子 F , 上述零阶、一阶、二阶和三阶 Fourier 变换可以看成是 F 的零次、一次、二次和三次幂。若旋转角度 $\alpha = p\pi/2$, p 为分数, p 阶 Fourier 变换就可看作 F 的 p 次幂。Fourier 变换的分数幂理论最早是由 Namias 于 1980 年建立的^[6], 他将这种推广的 Fourier 变换称为分数阶 Fourier 变换 (fractional Fourier transform)。后来 McBride 和 Kerr 对分数阶 Fourier 变换作了数学上更为严格的定义, 使之具备了一些重要的性质^[7]。

函数 $s(t)$ 具有角度 $\alpha = p\pi/2$ 的广义 Fourier 变换定义为

$$S_p(u) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1 - j\cot\alpha}{2\pi}} \exp\left(j\frac{u^2}{2}\cot\alpha\right) \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \exp\left(j\frac{t^2}{2}\cot\alpha\right) \exp(jut\csc\alpha) dt, & \alpha \neq n\pi \\ s(t), & \alpha = 2n\pi \\ s(-t), & \alpha = (2n+1)\pi \end{cases} \quad (4)$$

它具有如下的基本性质:

- (1) 广义 Fourier 变换为线性算子;
- (2) $F^0[s(t)] = F^4[s(t)] = s(t)$ (恒等变换);
- (3) $F^1[s(t)] = F^5[s(t)] = S(f)$ (标准 Fourier 变换);
- (4) 广义 Fourier 变换算子为加性算子, 即有 $F^{p+q} = F^p F^q$ 。

包括普通的 Fourier 变换在内的所有整数阶 Fourier 变换和分数阶 Fourier 变换都可统一为上面定义的广义 Fourier 变换。需要说明的是, 由于角度以 2π 为模, 在讨论分数阶 Fourier 变换时只需考虑 $0 \leq |p| \leq 2$ 的旋转角度。另外还容易得出结论, 具有角度 $\alpha = p\pi/2$ 的分数阶 Fourier

反变换就是具有角度 $-\alpha = -p\pi/2$ 的分数阶 Fourier 变换。限于篇幅, 分数阶 Fourier 变换的其它重要性质这里不再罗列, 读者可参见文献 [5]。

根据 (4) 式广义 Fourier 变换的定义, 对于不是 $\pi/2$ 整数倍的角度, 分数阶 Fourier 变换的计算对应于以下的步骤:

- (1) 原信号与一线性调频信号相乘;
- (2) Fourier 变换 (其变元乘以尺度系数 $\csc\alpha$);
- (3) 再与一线性调频信号相乘;
- (4) 乘以一复常数因子。

有关分数阶 Fourier 变换的具体数值计算方法可参见文献 [5]。由此, 我们也可以将分数阶 Fourier 变换理解为原始信号在时频域旋转一定角度后的 Fourier 变换。由第 2 节的讨论可知, 机载 SAR 运动目标的回波为线性调频信号形式, 所以我们特别关心分数阶 Fourier 变换对线性调频信号的作用。线性调频信号是一种典型的非平稳信号, 其瞬时频率随时间变化线性增长, 在时频面上表示呈斜刀刃状, 具有明显的时频耦合特性。常规的 Fourier 变换可看作是信号的时频分布在频率轴 f 上的投影, 线性调频信号的谱被展宽, 如图 2(a) 所示。而分数阶 Fourier 变换可看成是信号的时频分布在旋转后的频率轴 u 上的投影, 若旋转角度合适, 就可以得到线性调频信号能量高度聚集的分数阶 Fourier 域分布, 如图 2(b) 所示。这就是利用分数阶 Fourier 变换检测线性调频信号的基本原理。

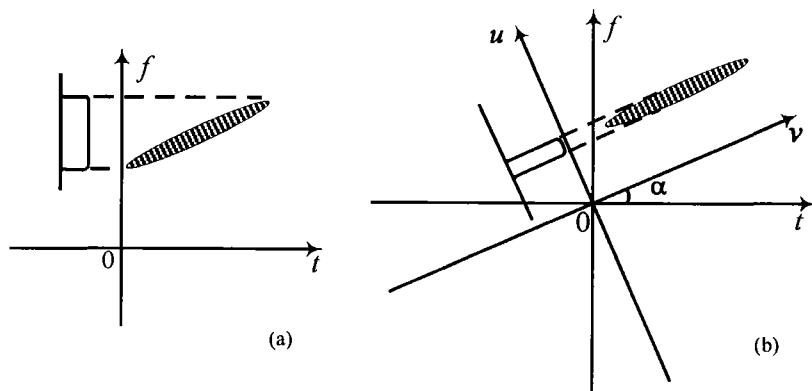


图 2

(a) 线性调频信号在 Fourier 域的投影

(b) 线性调频信号在分数阶 Fourier 域的投影

4 基于分数阶 Fourier 变换的运动目标检测方法仿真

4.1 单目标情况下的目标检测

根据第 2 节的讨论, 机载 SAR 运动目标的回波为线性调频信号, 而均匀分布的地杂波信号可以看作是叠加在目标信号上的白噪声。因此, 在单目标的情况下, 机载 SAR 运动目标检测问题就等价于白噪声当中单个线性调频信号的检测问题。基于分数阶 Fourier 变换的思想, 我们根据线性调频信号的调频斜率确定适当的角度, 那么在此角度的分数阶 Fourier 域中线性调频信号的能量最为集中, 而杂波信号的能量分布没有什么变化, 这样就可以获得最佳的动目标检测性能。实际上, 动目标回波信号的调频斜率参数是不知道的, 此时需要对各角度进行搜索。哪个角度上回波信号的分数阶 Fourier 变换取得最大的信噪比, 该角度的值就对应着目标信号的调频斜率 K , 由该角度上分数阶 Fourier 变换峰值点的位置可以确定目标信号的多普勒质心

f_{d0} 。由简单的几何三角关系可以推出 K 和 f_{d0} 的计算公式如下: $K = \tan\alpha$, $f_{d0} = f'_{d0} \csc\alpha$, 其中 f'_{d0} 为分数阶 Fourier 域中信号峰值点的“多普勒频率”, 这里假设采用零中频混频处理。然后根据 K 和 f_{d0} 就可以计算出目标的运动方向和运动速度, 这些参数可以用来实现对运动目标的进一步精确补偿和成像。

假设雷达处于正侧视工作状态, 我们选用如下的仿真参数: 雷达与目标的距离 R_0 为 50km, 雷达载机飞行速度 V 为 200m/s, 雷达波长 λ 为 3cm, 脉冲重复频率 500Hz, 处理脉冲数 256 个, 目标径向运动速度 v_r 为 2m/s, 切向运动速度 v_c 为 5m/s, 径向加速度为 4.5m/s^2 。首先考虑无噪声的情况, 图 3(a) 为目标信号的频谱, 图 3(b) 为对应角度上目标信号的分数阶 Fourier 变换, 从中可见目标信号的能量在分数阶 Fourier 域得到了很好的聚集。我们再加入零均值的高斯白噪声来模拟地杂波存在时的情况, 信噪比为 -3dB , 图 4(a) 和 4(b) 分别为回波信号的频谱和分数阶 Fourier 谱。从图 4 中可见, 传统的 Fourier 滤波方法在此已无法检测到目标, 而分数阶 Fourier 变换方法仍然可以清楚地检测出运动目标的存在。

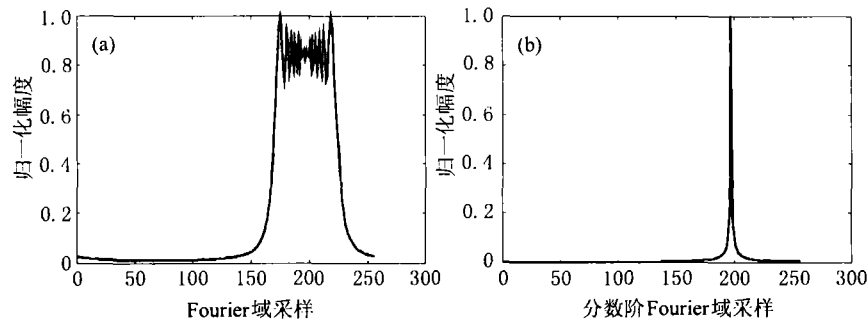


图 3

(a) 回波信号的 Fourier 变换 (无噪声)

(b) 回波信号的分数阶 Fourier 变换 (无噪声)

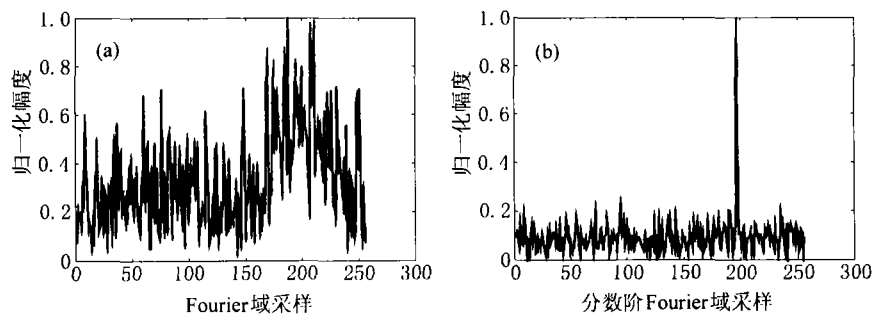


图 4

(a) 回波信号的 Fourier 变换 (有噪声)

(b) 回波信号的分数阶 Fourier 变换 (有噪声)

4.2 多目标情况下的目标检测

多目标的情况要复杂一些, 可以看作是白噪声中多个线性调频信号的检测问题。如果采用 WVD 等双线性时频分布类算法, 多个线性调频信号的交叉项将严重影响信号的检测和参数估计。这里基于分数阶 Fourier 变换的思想, 仍然采用多角度搜索的办法, 根据不同角度分数阶 Fourier 变换峰值点的个数和位置, 可以检测出目标的数目和各自的运动参数, 具体的计算方法同上。

我们这里假设有 4 个强度相等的点目标, 其径向运动速度 v_r 分别为 2m/s, -2m/s, 1m/s, -1m/s, 切向运动速度 v_c 分别为 5m/s, -5m/s, 10m/s, -10m/s, 径向加速度 a_r 分别为 3.76m/s^2 , 5.3m/s^2 , 2.2m/s^2 , 6.88m/s^2 , 切向加速度 a_c 不影响回波信号的形式(见(1)式的近似), 此处忽略不计。这里选取较低的 v_r 是为了避免目标的多普勒模糊, 如果出现多普勒模糊, 则只影响目标的参数估计, 与检测无关。雷达的其它有关参数与前面的仿真相同。根据以上参数我们可以计算出 4 个目标回波信号的多普勒质心 f_{d0} 分别为 133Hz, -133Hz, 66Hz, -66Hz, 调频斜率 K 分别为 200Hz/s, 300Hz/s, 100Hz/s, 400Hz/s。

在 4 个目标存在的情况下, 回波信号的 WVD 如图 5 所示, 信号的交叉项与信号项混杂在一起, 从图中已经无法分辨出有几个目标。图 6(a) 为在不同角度上对回波信号作分数阶 Fourier 变换的结果, 图中可以清楚地看出有 4 个目标, 根据峰值点的位置可以计算出各目标的运动参数。我们再将信号中加上 -3dB 的高斯白噪声来仿真地杂波的存在, 某个角度分数阶 Fourier 变换的结果如图 6(b) 所示, 仍然可以检测到 4 个目标并估计其运动参数。

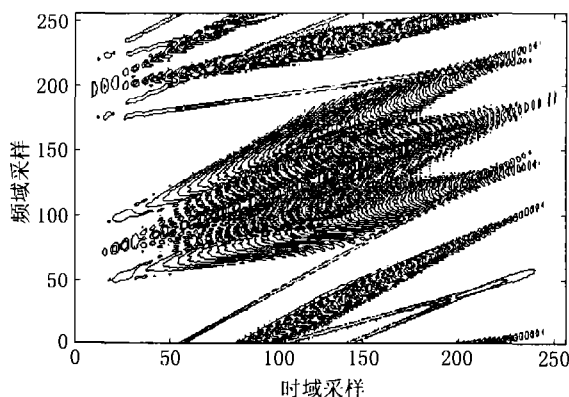


图 5 多目标情况下回波信号的 WVD(无噪声)

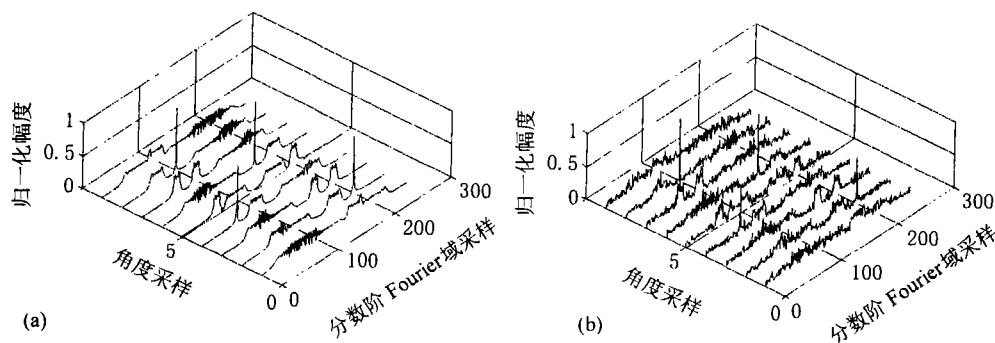


图 6

(a) 多目标时各角度的分数阶 Fourier 变换(无噪声)

(b) 多目标时各角度的分数阶 Fourier 变换(有噪声)

5 结束语

由上可见, 利用分数阶 Fourier 变换可以有效消除线性调频信号时频耦合特性对信号检测的影响; 与双线性时频分布类算法相比, 分数阶 Fourier 变换是线性变换, 在多运动目标存在的

情况下不会受到交叉项的影响, 这是其主要优点。另外, 分数阶 Fourier 变换的数值计算可以借助常规的快速 Fourier 变换算法, 运算量并不大; 根据它与 Radon-Wigner 变换之间的关系^[8], 分数阶 Fourier 变换对线性调频信号的分辨性能与常用的时频分布类算法相当。因此, 分数阶 Fourier 变换为机载 SAR 的运动目标检测提供了一个新的思路, 值得深入研究下去。

致谢 本文的研究工作是在信息产业部电子第十四研究所王盛利高工的启发下进行的, 倪晋麟副总工程师也给予了很多关心和支持, 在此作者向他们致以诚挚的谢意。

参 考 文 献

- [1] H. B. Sun, H. Gu, W. M. Su, G. S. Liu, A review of moving target detection and imaging by airborne synthetic aperture radar, EUSAR'2000, Munich Germany, May 2000, 544-548.
- [2] H. B. Sun, W. M. Su, H. Gu, G. S. Liu, Performance analysis of several clutter cancellation techniques by multi-channel SAR, EUSAR'2000, Munich Germany, May 2000, 549-552.
- [3] S. Barbarossa, A. Farina, 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.
- [4] S. Barbarossa, Analysis of multicomponent LFM signals by a combined Wigner-Hough transform, IEEE Trans. on SP., 1995, SP-43(6), 1511-1515.
- [5] 张贤达, 保铮, 非平稳信号分析与处理, 北京, 国防工业出版社, 1998 年, 第 1 版, 186-223.
- [6] V. Namias, The fractional Fourier transform and its application in quantum mechanics", J. Inst. Math. Its Appl., 1980, 25(2), 241-265.
- [7] A. C. McBride, F. H. Kerr, On Namias's fractional Fourier transform, IMA J. Appl. Math., 1987, 39(2), 159-175.
- [8] L. M. Bernardo, O. D. D. Soates, Fractional Fourier transform and imaging, J. Opt. Soc. Amer. A., 1994, 11(9), 2622-2626.

THE AIRBORNE SAR MOVING TARGET DETECTION BASED ON FRACTIONAL FOURIER TRANSFORM

Sun Hongbo Gu Hong Su Weimin Liu Guosui

(Res. Center of Electron. Eng. Tech., Nanjing Univ. of Sci. and Tech., Nanjing 210094, China)

Abstract In this paper, the signal model of airborne SAR moving target echo is constructed firstly, which is a chirp signal naturally. According to this feature, a new technique of SAR moving target detection based on fractional Fourier transform is proposed. The effects of coupling in time-frequency domain on signal detection are eliminated. Compared with the bilinear time-frequency distribution algorithms, the fractional Fourier transform is a linear operator, and it will not be affected by the intercross terms when multiple moving targets exist. The simulation results validate the effectiveness of this technique.

Key words Fractional Fourier transform, Synthetic Aperture Radar (SAR), Moving target detection

孙泓波: 男, 1975 年生, 博士生, 研究方向为机载合成孔径雷达成像、运动目标检测、非平稳信号处理等。
顾红: 男, 1967 年生, 副教授, 研究方向为噪声雷达系统、现代雷达信号处理、高速数字信号处理等。
苏卫民: 男, 1959 年生, 副教授, 研究方向为阵列信号处理、自适应信号处理等。
刘国岁: 男, 1933 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为噪声雷达系统、现代信号处理、神经网络雷达目标识别等。