

修正离散 Chirp-Fourier 变换及其在 SAR 运动目标检测中的应用

孙泓波, 郭 欣, 顾 红, 苏卫民, 刘国岁

(南京理工大学电子工程技术研究中心, 江苏南京 210094)

摘 要: 离散 Chirp-Fourier 变换(DCFT)是最新提出的一种检测线性调频信号的有效技术,但它对信号的采样点数和信号参数有着近乎苛刻的约束条件,限制了它的工程应用.本文对 DCFT 的定义进行了修正,它不附带任何约束条件,是一种优越而又实用的线性调频信号检测技术.本文将其用于机载合成孔径雷达(SAR)运动目标检测当中,取得了良好的效果.此外,本文又提出了基于 CLEAN 思想的检测技术,与修正 DCFT 相结合,可以有效地检测出被强目标掩盖的弱目标,具有很大的实用价值.仿真的结果验证了算法的有效性.

关键词: 离散 Chirp-Fourier 变换; 线性调频信号; 合成孔径雷达; 运动目标检测

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 01-0025-04

Modified Discrete Chirp-Fourier Transform and Its Application to SAR Moving Target Detection

SUN Hong-bo, GUO Xin, GU Hong, SU Wei-min, LIU Guo-sui

(Research Center of Electronic Engineering Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract: The Discrete Chirp-Fourier Transform (DCFT) proposed recently is an effective technique for chirp signal detection. But it requires some rigorous restrictions on the signal length and parameters. These requirements restrict the application of DCFT. In this paper, the definition of DCFT is modified. No restrictions are included in this new definition. It is an excellent and practical technique for the detection of chirp signal. Then the modified DCFT is applied to airborne SAR moving target detection and good results are achieved. In addition, a new CLEAN technique combined with the modified DCFT is proposed to detect the small targets submerged by the large ones effectively. This new combination technique is valuable in practice. The simulation results prove its validity.

Key words: discrete chirp-Fourier transform; chirp signal; synthetic aperture radar; moving target detection

1 引言

机载合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)运动目标检测技术是当前 SAR 技术的一个研究热点.地面运动目标的回波可以近似为线性调频信号^[1],所以,机载 SAR 运动目标检测问题可以看作噪声背景下的线性调频信号检测问题. Wigner-Ville 分布对线性调频信号具有良好的时频聚集性^[2],许多学者都利用这一性质将其用于 SAR 运动目标检测和参数估计,并与 Radon 变换(又称作 Hough 变换)相结合进一步改善了性能^[3].但是,在多运动目标存在的情况下, Wigner-Ville 分布中的交叉项将严重影响目标的检测和参数估计.离散 Chirp-Fourier 变换(Discrete Chirp-Fourier Transform, DCFT)是最近提出的一种有效的线性调频信号检测技术^[4],它是 Fourier 变换的一种推广形式,可以同时实现对 chirp 信号多普勒频率和调频斜率的匹配.但是它要求总的采样点数为质数,并且经过采样变换后的信号参数必须是整数,否则其性能将急剧

下降.这些约束条件限制了 DCFT 的工程应用.为了克服这些缺点,本文对 DCFT 的定义进行了修正,它对信号的采样点数和信号参数不附带任何约束条件,并将其用于机载 SAR 运动目标检测当中.强度相差较大的多运动目标检测历来是机载 SAR 技术的一个重点和难点,为了解决这个问题,本文提出了一种基于 CLEAN 思想的检测技术,与修正离散 Chirp-Fourier 变换相结合可以有效地检测出被强目标掩盖的弱目标,具有很大的实用价值.

2 离散 Chirp-Fourier 变换分析

与传统的离散 Fourier 变换相类似,文献[4]中定义离散信号 $x(n)$, $n = 1, 2, \dots, N-1$ 的 N 点离散 Chirp-Fourier 变换(DCFT)为

$$X_c(k, l) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn + ln^2}, 0 \leq k, l \leq N-1 \quad (1)$$

其中 $W_N = \exp(-j2\pi/N)$. 对于如下形式的离散 chirp 信号

收稿日期:2001-05-21;修回日期:2002-03-18

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

$$x(n) = W_N^{-(k_0 n + l_0 n^2)} \quad (2)$$

其中 k_0, l_0 为整数且 $0 \leq k_0, l_0 \leq N-1$. 文献[4]中证明,若采样点数 N 为质数, $x(n)$ 的 DCFT 幅值为

$$|X_c(k, l)| = \begin{cases} \sqrt{N}, & \text{for } l = l_0 \text{ and } k = k_0 \\ 1, & \text{for } l \neq l_0 \\ 0, & \text{for } l = l_0 \text{ but } k \neq k_0 \end{cases} \quad (3)$$

由上式可见,对于式(2)所示的离散 chirp 信号,式(1)定义的 DCFT 具有十分理想的匹配性能.但是,它在使用时必须满足以下两个约束条件^[4]:一是信号长度 N 必须为质数;二是离散 chirp 信号的参数 k_0 和 l_0 必须是整数(或极为接近整数).下面我们来分析上述约束对实际应用的影响.

考虑如下形式的模拟 chirp 信号

$$x_a(t) = \exp\{j2\pi(\alpha_0 t + \beta_0 t^2)\} \quad (4)$$

设总采样点数为 N (N 为质数),采样时刻满足 $t = \frac{nT}{N}$, $n=0, 1, 2, \dots, N-1$, 则总采样时间为 $N^{2/3}T$, 采样后的离散 chirp 信号可以变为如式(2)的形式^[4]

$$x(n) \triangleq x_a\left(\frac{nT}{N}\right) = \exp\left\{j2\pi\left[\frac{1}{N}(\alpha_0 TN^{2/3}n + \beta_0 TN^{1/3}n^2)\right]\right\} \\ = W_N^{-(k'_0 n + l'_0 n^2)} \quad (5)$$

其中 $k'_0 = \alpha_0 TN^{2/3}$, $l'_0 = \beta_0 TN^{1/3}$.

两个约束条件中第一条比较容易满足,但第二条的要求极为苛刻.暂且不考虑模糊的影响,在给定质数个采样点 N 的情况下, $N^{2/3}$ 和 $N^{1/3}$ 必定不是整数,它们分别与模拟参数 $\alpha_0 T$ 和 $\beta_0 T$ 相乘几乎不可能是整数.更为严重的是,即使 k_0 和 l_0 偏离整数一个不大的数值,式(1)定义的 DCFT 对 chirp 信号的检测性能将急剧下降.假设采样率为 500Hz,采样点数为 257,某离散 chirp 信号的离散参数 k_0 和 l_0 分别为 200 和 100,不考虑噪声的影响.图 1(a) 为对该信号作 DCFT 的结果;图 1(b) 中其它参数不变,只是总采样点数 $N=256$,不再为质数;图 1(c) 中总采样点数 N 仍为 257, k_0 不变, l_0 变为 100.03.由图 1 可见,信号参数和采样点数稍微偏离理想情况,文献[4]中定义的 DCFT 性能就急剧下降,这使得其很难用于实际工程当中.

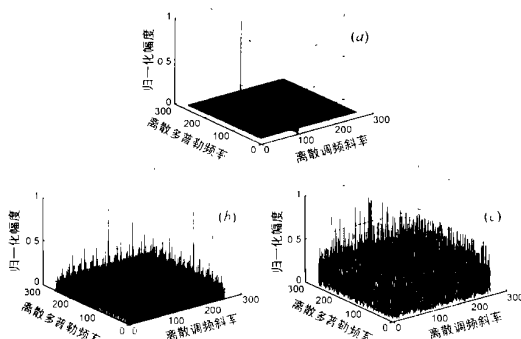


图 1(a) 理想情况下的 DCFT; (b) N 为非质数时的 DCFT;
(c) l_0 为非整数时的 DCFT

3 修正离散 Chirp-Fourier 变换

为了使离散 Chirp-Fourier 变换的思想能够用于工程实践当中,我们必须对 DCFT 的定义作出适当的修正.这里仍然考虑(4)式所示的模拟 chirp 信号,设总采样点数为 N (N 可为任意整数),采样时刻变为 $t = \frac{nT}{N}$, $n=0, 1, 2, \dots, N-1$, 总采样时间为 T , 采样后的离散 chirp 信号为

$$x'(n) \triangleq x_a\left(\frac{nT}{N}\right) = \exp\left\{j2\pi\left[\frac{1}{N}\left(\alpha_0 Tn + \frac{\beta_0 T^2}{N}n^2\right)\right]\right\} \\ = W_N^{-(k'_0 n + l'_0 n^2)} \quad (6)$$

其中 $k'_0 = \alpha_0 T$, $l'_0 = \beta_0 T^2$, 这里不要求 k'_0, l'_0 一定为整数.下面我们来讨论 k'_0, l'_0 所应满足的范围.对于形如式(4)的模拟 chirp 信号,根据上面的采样规则,实际的采样率 $f_s = \frac{N}{T}$.为满足采样定理的要求,应有

$$0 \leq \alpha_0 < \frac{N}{T} \quad (7)$$

$$0 \leq \beta_0 < \frac{N}{2T^2} \quad (8)$$

$$0 \leq \alpha_0 + 2\beta_0 T < f_s = \frac{N}{T} \quad (9)$$

根据 k'_0, l'_0 与模拟参数 α_0, β_0 的关系,由式(7) - (9)可知, k'_0, l'_0 应满足如下三式

$$0 \leq k'_0 < N \quad (10)$$

$$0 \leq l'_0 < \frac{N}{2} \quad (11)$$

$$0 \leq k'_0 + 2l'_0 < N \quad (12)$$

要对形如式(6)的离散 chirp 信号进行检测和参数估计,我们给出一种新的 DCFT 定义公式

$$X'_c(k', l') = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{k'n + l'n^2} \quad (13)$$

其中 k', l' 应当满足式(10) - (12). 式(13)定义的 DCFT 可以看作是对式(1)定义的一种修正,故我们称之为“修正离散 Chirp-Fourier 变换”(Modified Discrete Chirp-Fourier Transform, MDCTF).

对于实际的模拟 chirp 信号而言,应用式(13)定义的 MDCTF 对信号的参数和采样点数没有任何要求,只是受到采样定理的约束,即式(7) - (9). 如果应用(1)式定义的 DCFT,它要求 $0 \leq k, l \leq N-1$, 由此可以推出

$$0 \leq \alpha_0 < \frac{N^{1/3}}{T} \quad (14)$$

$$0 \leq \beta_0 < \frac{N^{2/3}}{T^2} \quad (15)$$

很明显式(14) - (15)的范围比式(7) - (9)小的多.因此,在总采样点数不太大的情况下,DCFT 对信号参数的不模糊观测范围过小,这也是影响其用于实际 SAR 运动目标检测的主要因素之一.

总的来说,与文献[4]中介绍的 DCFT 相比,我们定义的 MDCTF 对信号的总采样点数和信号参数没有任何约束条件,它对信号参数的不模糊观测范围也远大于 DCFT,所以更具有

实用价值. 当然,应用 MDCFT 更大的不模糊观测范围是在相对于 DCFT 较大的实际采样率下取得的. 另外,它对线性调频信号的能量聚集性与 DCFT 相比也略有降低. 需要指出的是, MDCFT 为线性变换,在存在多个 chirp 信号分量时不存在交叉项,这是它的主要优点. 假设采样率为 500Hz,采样点数为 256,其中加了 -3dB 的白噪声以模拟地杂波的影响,目标回波多普勒中心频率为 200Hz,线性调频率为 200Hz/s. 图 2(a)和(b)中所示分别为 MDCFT 和 Radon-Wigner 变换的检测结果.

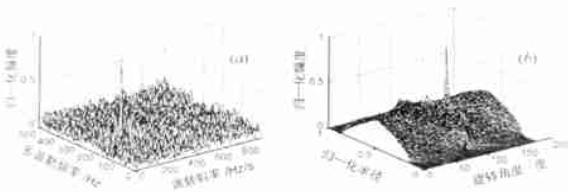


图 2 (a) 模拟回波信号的 MDCFT;

(b) 模拟回波信号的 Radon-Wigner 变换

4 基于 CLEAN 思想和修正离散 Chirp-Fourier 变换的 SAR 多运动目标检测

上一节中我们给出了 MDCFT 的定义,并且对其优越的性能作了简要分析,下面我们来讨论其在机载 SAR 运动目标检测中的应用. 根据文献[1],机载 SAR 运动目标检测可以看作白噪声中线性调频信号的检测问题. 对于单目标的情况,我们只需将杂波对消后的回波数据直接作 MDCFT,然后根据峰值点的位置就可以检测并估计出目标的运动参数. 下面我们重点来讨论多目标的情况.

当多个运动目标存在的情况下,由于 MDCFT 为线性变换,故不会出现类似于 Wigner-Ville 分布的交叉项. 对回波信号作 MDCFT 出现的多个峰值就分别对应了各目标信号. 但是,如果各目标散射强度相差较大,强目标信号的峰值旁瓣很容易将弱目标信号的峰值淹没,从而使得弱目标无法检测到. 该问题也历来是机载 SAR 运动目标检测技术的一个重点和难点. 为了检测到弱目标的存在,根据 CLEAN 的思想^[5],如果先从回波信号中剔除强目标的信号分量,然后再对回波信号作 MDCFT,就可以检测出被强目标掩盖的弱目标信号. 由于运动目标的回波近似为线性调频信号形式,弱目标的频谱有可能与强目标的频谱有部分相互重叠,甚至完全处于强目标频谱的内部,所以常规的频域滤波无法实现强、弱目标的分离. 受交叉项的影响,时频二维滤波也很难取得理想的效果. 这里我们以 MDCFT 为基础,结合解线调滤波的方法给出一种可行的基于 CLEAN 思想的多运动目标检测方案,其具体步骤如下:

(1) 首先对 SAR 回波信号作地杂波对消,尽可能地提高信杂噪比;

(2) 对杂波对消后的数据作 MDCFT,检测出若干强目标,选取一个最强的目标分量并估计出其信号参数,假设其多普勒中心频率和调频斜率分别为 f_{d1} 和 K_1 ;

(3) 构造解线调参考信号 $s_r(t) = \exp(-j\pi K_1 t^2)$,将其与

回波信号相乘,此时最强目标的信号分量被补偿为频率为 f_{d1} 的单频信号,其它目标分量仍为线性调频信号;

(4) 在频域构造一个频带极窄的带阻滤波器,其中心频率位于 f_{d1} ,对解线调后的回波信号进行滤波,滤除最强的目标分量,同时对其它信号分量影响不大;

(5) 将滤波后的信号乘以 $s_r^*(t) = \exp(j\pi K_1 t^2)$,把其它信号分量校正回原来的形式,从而得到最强目标分量基本消除后的回波信号;

(6) 对滤除最强目标后的时域信号再作 MDCFT,检测出第二个强目标信号,重复步骤(3) - (5),直到所有的强目标信号分量都被滤除;

(7) 对滤除各强目标分量后的信号作 MDCFT,此时弱目标信号的峰值就显露出来;

(8) 如有必要,重复步骤(2) - (7),直到检测不出明显的目标信号为止.

5 仿真实验

设 SAR 处于正侧视工作状态,我们选用如下的仿真参数:雷达与目标的距离为 100km,雷达载机飞行速度为 200m/s,雷达波长为 3cm,脉冲重复频率 400Hz,处理脉冲数 256 个. 假设有 3 个点目标,其径向速度分别为 1.5m/s、3m/s、0.75m/s,切向速度分别为 5m/s、-5m/s、4m/s,径向加速度分别为 3.38m/s^2 、 6.42m/s^2 、 4.88m/s^2 ,切向加速度 a_c 不影响回波信号的形式(见文献[1]中的近似),此处忽略不计. 3 个目标的散射系数分别为 1、0.8 和 0.2,仿真中还加入了零均值的高斯白噪声来模拟地杂波的存在,3 个目标相对于杂波的信杂比分别为 5dB、3dB 和 -9dB.

图 3(a) 给出了回波信号的频谱,其中各目标的频谱与噪

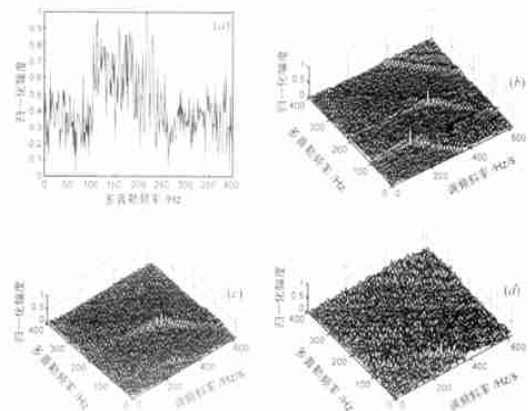


图 3 (a) 回波信号的频谱; (b) 回波信号的 MDCFT; (c) 滤除强目标 1 后的 MDCFT; (d) 滤除所有强目标后的 MDCFT

声混杂在一起无法分辨. 图 3(b) 为对回波信号直接作 MDCFT 的结果,其中强目标 1 和 2 的峰值清晰可见,但弱目标 3 的峰值被强目标 1 的旁瓣所掩盖,其位置如图中箭头所指,已经完全不可见.

下面应用上一节提出的检测算法. 首先根据图 3(b) 中最高峰的位置确定最强的目标 1 的信号参数: $f_{d1} = 100\text{Hz}$, $K_1 =$

200Hz/s;构造参考信号 $s_{r1}(t) = \exp(-j\pi K_1 t^2)$,与原回波信号相乘,使强目标 1 在频域表现为窄谱;然后在频域设置一个中心频率为 f_{d1} 的窄带带阻滤波器,将强目标 1 滤除;最后再乘以参考信号 $s'_{r1}(t) = \exp(j\pi K_1 t^2)$,就得到了滤除强目标 1 后的回波信号.对其再作 MDCFT 的结果如图 3(c) 所示.

按同样的方法,再估计出强目标 2 的参数: $f_{d2} = 200\text{Hz}$, $K_2 = 400\text{Hz/s}$;乘上参考信号 $s'_{r2}(t) = \exp(-j\pi K_2 t^2)$ 使强目标 2 表现为窄谱;并且设置中心频率为 f_{d2} 的窄带带阻滤波器将其滤除;再乘以参考信号 $s'_{r2}(t) = \exp(j\pi K_2 t^2)$,这样就得到了强目标 1 和 2 都被滤除后的回波信号.此时我们对该信号作 MDCFT,原先被强目标掩盖的弱目标 3 就显露了出来,如图 3(d) 所示,进而可估计出其参数: $f_{d3} = 50\text{Hz}$, $K_3 = 300\text{Hz/s}$.

6 结束语

离散 Chirp-Fourier 变换(DCFT)是一种检测线性调频信号的有力技术,但其苛刻的约束条件限制了它的实际应用.本文提出的修正离散 Chirp-Fourier 变换(MDCFT)不附带任何约束条件,为 DCFT 的工程应用铺平了道路. MDCFT 是线性变换,在存在多个信号分量的情况下不会出现交叉项,大大优于常用的 Radon-Wigner 变换.本文将 MDCFT 用于机载 SAR 运动目标检测当中,并依据 CLEAN 思想提出了一种多目标检测方法,可以有效地检测出被强目标掩盖的弱目标,具有较大的实用价值.

参考文献:

- [1] Raney, R. K. Synthetic aperture imaging radar and moving targets [J]. IEEE Trans., 1971, AES-7(3): 499 - 505.
- [2] Barbarossa S, Farina A. Detection and imaging of moving objects with synthetic aperture radar. Part 2: Joint time-frequency analysis by Wigner-Ville distribution [J]. IEE Proc., -F, 1992, 139(1): 89 - 97.
- [3] Barbarossa S. Analysis of multicomponent LFM signals by a combined Wigner-Hough transform [J]. IEEE Trans., SP-43(6): 1511 - 1515.
- [4] Xia X G. Discrete Chirp-Fourier transform and its application to chirp rate estimation [J]. IEEE Trans., 2000, SP-48(11): 3122 - 3133.
- [5] Tsao J, Steinberg B D. Reduction of sidelobe and speckle artifacts in microwave imaging: the CLEAN technique [J]. IEEE Trans., 1988, AP-36(4): 543 - 556.

作者简介:



孙泓波 男, 1975 年 4 月生于河南郑州, 1997 年获南京理工大学电子工程专业学士学位, 同年免试进入通讯与信息系统学科攻读硕士学位, 1998 年开始提前攻读博士学位, 现为南京理工大学电子工程与光电技术学院博士研究生, 主要研究方向为雷达成像、空时二维信号处理、机载雷达运动目标检测和非平稳信号处理等. e-mail: rceet@mail.njust.edu.cn

mail: rceet@mail.njust.edu.cn



郭欣 女, 1977 年 4 月生于江苏淮安, 1999 年获南京理工大学电子工程专业学士学位, 同年免试直接攻读通讯与信息系统学科博士学位, 现为南京理工大学电子工程与光电技术学院博士研究生, 主要研究方向为天波超视距雷达信号处理和海杂波环境中的弱目标检测等.