

7-2-2020

Novel Algorithm of High-Speed Target ISAR Imaging Based on Stretch Method

Wenmao Luo

1. Department of Telecommunication, Nanjing College of Information Technology, Nanjing 210023, China;;

Yingliu Cui

2. School of Technology, Nanjing Audit University, Nanjing 211815, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Novel Algorithm of High-Speed Target ISAR Imaging Based on Stretch Method

Abstract

Abstract: The pulse compression result will be distorted while the target moves very fast and it cannot get right ISAR images. A novel algorithm based on chirp-Fourier transform was proposed to solve this problem. *In the scheme, every echo's differential frequency signal of stretch processing was calculated by chirp-Fourier transform to estimate the target's location and speed, and the target's precious speed could be averaged by the estimations during the whole dwell time. Then the penalty function could be constructed to eliminate the intra and inter-pulse motion, and it could get right ISAR images.* Because the chirp-Fourier transform was completed during the pulse repetition period, the algorithm could meet the real-time requirement. Further more the algorithm could simultaneously accomplish moving parameters estimation and imaging. The algorithm has the advantages of simple structure and strong anti-noise ability, so it is easy to implement in Engineering.

Keywords

ISAR imaging, stretch method, LFM, chirp-Fourier transform, motion parameter estimation

Recommended Citation

Luo Wenmao, Cui Yingliu. Novel Algorithm of High-Speed Target ISAR Imaging Based on Stretch Method[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(4): 851-858.

一种基于去斜的高速目标 ISAR 成像新方法

罗文茂¹, 崔应留²

(1. 南京信息职业技术学院通信学院, 江苏 南京 210023; 2. 南京审计学院工学院, 江苏 南京 211815)

摘要: 目标高速运动会使回波脉冲压缩结果畸变, 导致 ISAR 的传统 R-D 成像算法失效。据此, 提出了一种基于调频傅里叶变换的高速目标成像算法。该算法对去斜差频信号进行调频傅里叶变换, 得到每个回波的距离和速度估计, 对成像积累时间内的速度估计值求平均, 得到目标的精确速度估计, 以此构造补偿信号消除脉内和脉间走动, 从而得到正确的成像结果。由于调频傅里叶变换在脉冲重复周期内完成, 所以该算法能满足实时性要求。该算法能同时进行目标运动参数估计和成像, 且算法结构简单, 抗噪能力强, 易于工程实现。

关键词: ISAR 成像; 去斜处理; 线性调频信号; 调频傅里叶变换; 运动参数估计

中图分类号: TN9571 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 04-0851-09

Novel Algorithm of High-Speed Target ISAR Imaging Based on Stretch Method

Luo Wenmao¹, Cui Yingliu²(1. Department of Telecommunication, Nanjing College of Information Technology, Nanjing 210023, China;
2. School of Technology, Nanjing Audit University, Nanjing 211815, China)

Abstract: The pulse compression result will be distorted while the target moves very fast and it cannot get right ISAR images. A novel algorithm based on chirp-Fourier transform was proposed to solve this problem. In the scheme, every echo's differential frequency signal of stretch processing was calculated by chirp-Fourier transform to estimate the target's location and speed, and the target's precious speed could be averaged by the estimations during the whole dwell time. Then the penalty function could be constructed to eliminate the intra and inter-pulse motion, and it could get right ISAR images. Because the chirp-Fourier transform was completed during the pulse repetition period, the algorithm could meet the real-time requirement. Further more the algorithm could simultaneously accomplish moving parameters estimation and imaging. The algorithm has the advantages of simple structure and strong anti-noise ability, so it is easy to implement in Engineering.

Keywords: ISAR imaging; stretch method; LFM; chirp-Fourier transform; motion parameter estimation

引言

采用宽带线性调频(LFM)信号的逆合成孔径(ISAR)雷达在成像算法的第一步常采用去斜的方

式进行脉冲压缩。相对匹配滤波方法, 去斜可以有效降低中频处理带宽, 降低设备复杂度。

在去斜过程中, 雷达必须能实时跟踪目标的运动, 以获得本地信号的参考距离。为此, 对于采用宽、窄带交替体制的雷达, 可以用窄带雷达提供参考距离, 而单一的宽带成像雷达则只能通过参数估计获得参考距离。

在采用宽、窄带交替体制的雷达中, 如果参考



收稿日期: 2014-11-11 修回日期: 2015-01-21;
基金项目: 国家自然科学基金(61170105); 南京信息职业技术学院“青蓝工程”;
作者简介: 罗文茂(1975-), 男, 四川, 博士生, 副教授, 研究方向为雷达信号处理; 崔应留(1974-), 男, 安徽, 硕士, 讲师, 研究方向为雷达信号处理。

<http://www.china-simulation.com>

距离通过窄带雷达获取, 由于分辨率的限制, 参考距离是在其窄带分辨率的范围内随机分布的, 导致去斜参考信号失配。为了能抵消这种信号失配, 进行精确运动补偿, 可以通过基于延时量补偿方法^[1]、RAT 线性化参数估计^[2]、目标运动轨迹估计^[3]、最小熵速度估计^[4]等方法补偿参考距离引起的失配, 从而得到聚焦良好的成像结果。这些方法算法较简单, 但在低信噪比下效果较差。

对于采用单一体制的宽带成像雷达, 在没有窄带雷达提供参考距离信息时, 文献[5-7]提出了利用 keystone 变换消除距离走动, 实时跟踪目标运动的成像方法, 但是由于 Keystone 变换需要插值, 所以计算量较高。

另外, 随着军事科学的进步, 飞行器的速度越来越高。高速将使距离像展宽, 传统 R-D 成像结果变差甚至失效, 同时也给目标的实时运动跟踪带来了挑战。由于高速目标的脉内运动将导致去斜处理中的差频信号成为一种单一调频率、多中心频率的多分量线性调频信号(见本文(8)式), 所以可以采用时频方法估计多分量调频信号参数, 补偿脉内运动, 最终得到成像结果。这方面的文献采用了分数阶傅里叶变换方法^[8-10]、chirplet 小波分解等^[11]方法获取脉冲压缩和成像结果。通常时频变换对于多分量 LFM 信号而言有交叉项的问题, 而且运算较大。

针对去斜体制的线性调频 ISAR, 本文提出了一种利用调频傅里叶变换进行高速目标实时运动参数估计和成像算法。该算法结构简单, 能满足实时性需求, 且低信噪比下性能稳健。

1 LFM 去斜处理模型

假设 ISAR 雷达发射脉冲重复周期 T_p , 带宽为 B 的线性调频(LFM)信号, 第 m 个脉冲可以表示为:

$$s(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T}\right) \exp\left[j2\pi\left(f_c \hat{t} + \frac{1}{2}\gamma \hat{t}^2\right)\right] \quad (1)$$

式中: \hat{t} 为快时间; t_m 为慢时间; T 为脉冲持续时间; f_c 为载波频率; $\gamma = B/T$ 为调频率。

目标回波可以表示为:

$$s_r(\hat{t}, t_m) = \sum_{i=1}^P \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R_i/c}{T}\right) \times \exp\left\{j2\pi\left[f_c\left(\hat{t} - \frac{2R_i}{c}\right) + \frac{1}{2}\gamma\left(\hat{t} - \frac{2R_i}{c}\right)^2\right]\right\} \quad (2)$$

式中: P 为目标散射点的个数。

目标第 i 个散射点到雷达的距离可以表示为:

$$R_i = R_i(\hat{t}, t_m) = R_{i0} + vt_m + \hat{t} \quad (3)$$

式中: R_{i0} 是第 i 个散射点相对雷达的初始距离; v 为目标距离向速度。该式表示了脉内距离走动和脉间距离走动。

去斜的参考信号为:

$$s_{ref}(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R_{ref}/c}{T_{ref}}\right) \times \exp\left\{j2\pi\left[f_c\left(\hat{t} - \frac{2R_{ref}}{c}\right) + \frac{1}{2}\gamma\left(\hat{t} - \frac{2R_{ref}}{c}\right)^2\right]\right\} \quad (4)$$

式中: R_{ref} 是本地信号的参考距离。

将式(2)和(4)差频处理, 得到的信号为:

$$s_1(\hat{t}, t_m) = s_r(\hat{t}, t_m) \cdot s_{ref}^*(\hat{t}, t_m) = \sum_{i=1}^P \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R_{ref}/c}{T_{ref}}\right) \exp\left(j\frac{4\pi\gamma}{c^2} R_{\Delta}^2\right) \times \exp\left[-j\frac{4\pi}{c} f_c R_{\Delta}\right] \exp\left[-j\frac{4\pi}{c} \gamma \left(\hat{t} - \frac{2R_{ref}}{c}\right) R_{\Delta}\right] \quad (5)$$

式中: $R_{\Delta} = R_i - R_{ref}$ 是本地信号的参考距离; 第 1 个相位项是多普勒项, 第 2 个相位项是距离项, 第 3 个相位项是剩余视频相位(RVP)项。在该式中如果 R_{ref} 是有窄带搜索雷达提供的, 其值是一个在窄带雷达分辨率内的随机变量, 将影响多普勒项, 导致目标成像结果在距离轴上的偏移, 偏移量为 $R_{i0} - R_{ref}$ 。如果直接用距离-多普勒方法成像, 将导致目标散射点散焦, 严重时将不能成像。

2 基于调频傅里叶变换的成像算法

2.1 调频傅里叶变换

调频傅里叶变换^[13]是匹配傅里叶变换^[14]的一种极坐标表示方法, 对于线性调频信号的处理具有先天的优势。通过调频傅里叶变换可以得到线性调

频信号的载波频率和调频率, 而且是一种线性变换, 和时频变换相比不存在交叉项。另外其抗噪性能和脉冲压缩一致。

对于一个二次相位信号:

$$s(t) = \exp\left[j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2}\gamma t^2\right)\right] \quad (6)$$

式中: 载波频率 f_c 和调频率 γ 是信号参数。

其调频傅里叶变换为:

$$xF(f, \mu) = \int s(t) \exp\left[-j2\pi\left(ft + \frac{1}{2}\mu t^2\right)\right] dt \quad (7)$$

式中: f 和 μ 是调频傅里叶变换的参数。

可以看出, 在调频傅里叶变换生成的 $f-\mu$ 谱图中, 当 $f=f_c$, $\mu=\gamma$ 时, 出现信号的相参积累峰值, 即可以通过调频傅里叶变换得到二次相位信号参数估计。通常要估计 f_c 和 γ 两个参数时, 需要执行二维搜索, 运算量较大, 但是可以通过适当的方法有效降低运算量, 具体方法见本文 2.4 节内容。

2.2 基于调频傅里叶变换的算法原理

对于差频处理得到的(5)式, 可以将(3)式带入化简, 可得:

$$\begin{aligned} s_1(\hat{t}, t_m) = & \sum_{i=1}^P \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R_{ref}/c}{T_{ref}}\right) \times \\ & \exp\left[j2\pi\left(\frac{2\gamma v^2}{c^2} - \frac{2\gamma v}{c}\right)\hat{t}^2\right] \times \\ & \exp\left[j2\pi\left(\frac{2\gamma R_{ref}}{c} - \frac{2\gamma R_{im}}{c} + \frac{4\gamma R_{im}v}{c^2} - \frac{2f_c v}{c}\right)\hat{t}\right] \times \\ & \exp\left[j2\pi\left(\frac{2f_c R_{ref}}{c} - \frac{2f_c R_{im}}{c} + \frac{2\gamma R_{im}^2}{c^2} - \frac{2\gamma R_{ref}^2}{c^2}\right)\right] \quad (8) \end{aligned}$$

式中: $R_{im}=R_{i0}+vt_m$, 对于每一个脉冲持续时间而言该距离是一个常数。

从式(8)可以看出该信号对快时间而言是一个线性调频信号, 而且调频率只和速度相关, 其频率项和 R_{im} 和速度相关, 可以看出该信号是一个具有单一调频率、多个中心频率的多分量线性调频信号。

利用式(7)对差频信号进行调频傅里叶变换, 可以搜索得到目标的速度和散射点距离的估计值 \tilde{v} 和 \tilde{R}_{im} 。在算法中不可能获得每个散射点的距离

估计值 \tilde{R}_{im} , 所以用散射点距离估计的特显点或重心代替(相当于目标自身参考坐标系的坐标原点 \tilde{R}_0 的估计)。由于 R_{im} 的误差对式(8)相位项的值影响是比较小的, 同时加上目标散射点具有一定的对称性的影响, 这种替代带来的相位误差是可以忽略不计的。

通过估计值 \tilde{v} 和 \tilde{R}_{im} 就可以构造如式(9)的相位补偿函数对式(8)进行补偿。

$$\begin{aligned} s_2(\hat{t}, t_m) = & \exp\left[-j2\pi\left(\frac{2\gamma \tilde{v}^2}{c^2} - \frac{2\gamma \tilde{v}}{c}\right)\hat{t}^2\right] \times \\ & \exp\left[-j2\pi\left(\frac{4\gamma \tilde{R}_{im} \tilde{v}}{c^2} - \frac{2f_c \tilde{v}}{c}\right)\hat{t}\right] \times \\ & \exp\left[-j2\pi\left(\frac{2\gamma \tilde{R}_{im}^2}{c^2} - \frac{2\gamma R_{ref}^2}{c^2}\right)\right] \quad (9) \end{aligned}$$

假定 \tilde{v} 和 \tilde{R}_{im} 等于 v 和 R_{im} , 则补偿后的信号为:

$$\begin{aligned} s_3(\hat{t}, t_m) = & \sum_{i=1}^P \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R_{ref}/c}{T_{ref}}\right) \times \\ & \exp\left[j2\pi\left(\frac{2\gamma R_{ref}}{c} - \frac{2\gamma R_{im}}{c}\right)\hat{t}\right] \times \\ & \exp\left[j2\pi\left(\frac{2f_c R_{ref}}{c} - \frac{2f_c R_{im}}{c}\right)\right] \quad (10) \end{aligned}$$

可以看出, 该方法实际上在快时间域补偿了脉冲走动。

将式(10)对快时间进行傅里叶变换, 可以得到目标的一维距离像。其中第 1 个相位项对应于散射点位置, 第 2 个相位项对应于慢时间域的多普勒。

2.3 成像算法步骤

本文算法所讨论的前提是: 针对高速平稳运动目标, 采用距离-多普勒算法成像。

先回顾一下常规 ISAR 雷达的 R-D 二维成像过程为: 首先解线调频脉冲压缩得到目标一维距离像; 其次进行包络对齐和相位聚焦实现平动补偿; 最后方位向傅里叶变换得到成像结果。

对于高速目标而言, 以上成像过程有几个问题需要考虑:

1、去斜的本地参考信号的参考距离 R_{ref} 如何确定。

这个问题即如何有效跟踪目标运动，这可以通过窄带雷达测量得到，也可以通过信号处理过程得到。

本文提出的方法是通过通过对单个差频信号进行调频傅里叶变换得到目标运动参数估计，即利用式(7)对式(5)进行目标速度估计，由目标速度推知下一脉冲周期中的去斜参考距离。而且由于每个脉冲都有实时速度估计，可以实时跟踪目标运动。

以上方法显然适用于单一体制的宽带成像 ISAR 雷达。但如果对于宽、窄带交替 ISAR 雷达而言，窄带测量距离可以为目标运动参数估计提供参考，简化调频傅里叶变换的二维搜索运算。所以该方法对于宽、窄带交替雷达和单一成像雷达两种体制都是适用的。

2、如何补偿由于目标高速运动引起的脉内运动。

在去斜脉冲压缩过程中的脉内运动，可以通过调频傅里叶变换得到的目标运动参数 \tilde{v} 和 \tilde{R}_0 ，并用 \tilde{R}_0 代替 \tilde{R}_m 依据式(9)构造补偿函数加以消除。目标速度的估计是有偏差的，为了尽可能消除这种偏差，可以将所有回波的速度估计值进行拟合，得到比较精确的速度估计值，如后文中实验所示，目标速度估计的拟合值是非常精确的。在求取了比较精确的速度估计值后将其带入式(9)构造补偿函数，从而得到精确的脉内运动补偿。

根据以上的讨论，可以构造如图 1 所示的典型成像算法。

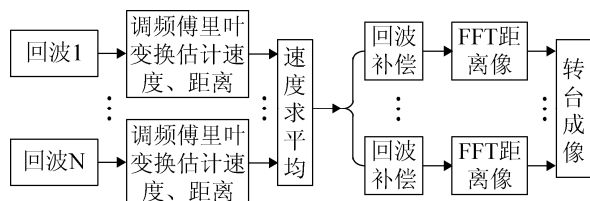


图 1 算法结构图

算法步骤描述如下：

1、在预警系统目标装订信息引导下截获目标

距离和速度信息，指定第一个参考信号的参考距离，构造出去斜参考信号，与回波进行差频处理，通过调频傅里叶变换(式(7))对差频信号(式(5))进行运动参数估计，得到速度和目标散射点距离的估计 \tilde{v} 和 \tilde{R}_0 。

其中 \tilde{R}_0 的估计由散射点距离估计的特显点或重心得到，如果雷达的本振相位精确，就可以得到每个脉冲时刻目标所处的原点位置(目标自身坐标系原点)，(如下文中实验 3 所示)，高速运动产生的距离走动可以直接矫正，不用包络对齐就可以形成对齐的距离像，这在低信噪比情况下相关法、最小熵法等包络对齐方法失效的情况下应用很有价值。

2、后一个脉冲以前一个脉冲的估计速度和散射点距离估计为参考，构造参考距离，完成去斜的差频处理，并应用调频傅里叶变换估计各次脉冲的目标运动参数 \tilde{v} 和 \tilde{R}_0 。

3、根据前面得出的所有速度估计值，拟合出精确速度估计，并用前面得到的各个 \tilde{R}_0 计算 $\tilde{R}_m = \tilde{R}_0 + \tilde{v}t_m$ 带入式(9)形成补偿函数，对差频信号式(5)进行补偿，由于 \tilde{v} 和 \tilde{R}_0 的估计是比较精确的，所以可以认为已经完成了每次回波的脉内运动和较精确的脉间运动补偿。

4、将上一步补偿得到的结果(式(10))进行傅里叶变换，即完成了脉冲压缩。

此时的脉冲压缩结果已经在波形上消除了高速运动引起的畸变，在一维距离像上已经基本实现对准，同时相位也消除了高速运动带来的影响。

5、在高信噪比情况下，可以对第 4 步的脉冲压缩结果进行常规的包络对齐和相位聚焦实现平动补偿，然后在方位向傅里叶变换实现成像。

6、在低信噪比情况下，由于雷达本振相位的漂移、电波传播信道畸变、距离像重心估计扰动等因素的影响， \tilde{v} 相对于 \tilde{R}_0 而言估计较为精确，可以通过 \tilde{v} 拟合出目标运动轨迹，对第 4 步得到的脉冲压缩结果按照运动轨迹插值校正包络和相位项，不用包络对齐和相位聚焦也能完成精确的运动补偿，然后在方位向进行傅里叶变换就可以得到成像结果。

2.4 调频傅里叶变换与 FrFT 算法复杂度比较

本文算法的主体部分是利用调频傅里叶变换实现目标运动参数估计, 针对线性调频信号参数估计而言, 线性化算法不存在双线性时频分析方法的交叉项问题, 且计算量也更低。分数阶傅里叶变换 (FRFT) 同样也是一种线性调频信号的线性变换方法, 其物理意义和算法精度与本文调频傅里叶变换类似, 以下对比这两种方法的计算复杂度。

1、对于 FRFT 的讨论

对于 FRFT 而言, 其变换算法计算量^[8]为 $O[N\log_2 N]$ 次复数乘法, 其中 N 为信号采样点数。

FRFT 对 LFM 信号调频率 μ 的估计^[12]是: $\sin\alpha_0=1/(\mu^2+1)^{0.5}$, 其中 $\alpha_0=p_0\pi/2$ 是“最佳”分数阶旋转角, p_0 是匹配变换阶数。如果调频率很大, 则 $\sin\alpha_0\approx 1/\mu$ 。据式(8)所示, 需要估计参数的 LFM 信号的调频率为: $\mu\approx 4\gamma v/c$ 。依照本文的仿真实验参数, 带宽 $B=1$ GHz, 脉冲持续时间 $T_1=100$ μ s, 调频率 $\gamma=B/T_1=10^{13}$ Hz/s, 所以需要估计的调频率与速度相关, 为: $\mu=4v/3\times 10^5$, 由于 $\sin\alpha_0$ 为很小的值, 取近似 $\sin\alpha_0\approx\alpha_0$, 那么 $p_0\approx 3\times 10^{-5}/2\pi v$ 。如果要搜索速度区间 $[4\ 950\ \text{m/s}, 5\ 050\ \text{m/s}]$, 搜索精度 $1\ \text{m/s}$, 则需要搜索 p 值区间约为 $[9.455, 9.646]\times 10^{-10}$, 且离散 100 个点。如果信号的采样点数 N 取 1024, 则 FRFT 实现以上速度区间搜索的计算量约为 $100\times 10\times 1024$ 次复数乘法。在完成 p 值匹配后, 可以通过 FRFT 域 u 轴投影坐标值联合调频率的估计值确定。

2、对于调频傅里叶变换的讨论

根据(7)式, 对于 N 点采样信号的调频傅里叶变换计算量约为 N 次复数乘法, 对比 FRFT 的计算量 $O[N\log_2 N]$ 而言是很小的。

而对于参数估计来说, 本文提出的调频傅里叶变换方法是要进行距离和速度的二维参数搜索, 搜索量由距离和速度搜索范围大小和精度确定。如果进行速度范围 $100\ \text{m/s}$ 、精度 $1\ \text{m/s}$ 和距离范围 $100\ \text{m}$ 、精度 $1\ \text{m}$ 的搜索, 信号采样点数 N 取 1024, 则计算量约为 $100\times 100\times 1024$ 次复数乘法。显然这个计算量是以上讨论的 FRFT 计算量的 10 倍。

但是由于本文的调频傅里叶变换方法是 2 个参数的估计, 可以通过 2 个参数循环估计方法有效降低计算量。比如: 可以先在距离区间固定一个距离值, 以 $10\ \text{m/s}$ 的速度精度离散距离区间, 即速度区间离散 10 个点, 这样的调频傅里叶变换计算量约为 10×1024 次复数乘法; 然后利用估计出的速度值固定速度, 且以 $10\ \text{m}$ 的距离精度离散距离区间, 即距离区间离散 10 个点, 这样的调频傅里叶变换计算量约为 10×1024 次复数乘法; 下一步, 利用估计出的距离值固定距离, 且以 $1\ \text{m/s}$ 的速度精度离散速度估计值附近的 $20\ \text{m/s}$ 范围, 离散出 20 个点, 这样的调频傅里叶变换计算量约为 20×1024 次复数乘法; 利用估计出的速度值固定速度, 且以 $1\ \text{m}$ 的距离精度离散距离估计值附近 $20\ \text{m}$ 的范围, 离散出 20 个点, 这样的调频傅里叶变换计算量约为 20×1024 次复数乘法。通过这种方法, 总的计算量从约 $100\times 100\times 1024$ 次复数乘法变为了约 60×1024 次复数乘法, 计算量得到了大大降低。

如果以相同的搜索方法利用 FRFT 进行计算, FRFT 的运算量约为 $30\times 10\times 1024$ 次复数乘法。可见本文方法比 FRFT 方法计算量小, 且算法实现简单。

3 算法仿真

仿真采用线性调频信号, 其载波频率 $f_c=10$ GHz, 带宽 $B=1$ GHz, 脉冲持续时间 $T_1=100$ μ s, 脉冲采样点数 $N=2\ 000$, 调频率 $\gamma=B/T_1$, 脉冲重复周期 $T_p=10$ ms, 观测脉冲数 $M=100$ 。目标为 15 个散射点构成的十字架, 各散射的后向散射系数都为 1, 如图 2 所示。目标的初始距离为 $R_0=20$ Km, 朝向雷达做径向匀速运动, 并存在 $4^\circ/\text{s}$ 的自转速度。

实验 1 高速平稳目标未经脉内补偿的 R-D 成像

本实验仿真是在去斜的参考距离 R_{ref} 准确、未添加噪声的前提下得到的。

具体的成像算法过程为: 首先采用去斜脉冲压缩方法构造目标一维距离像, 然后进行包络对齐和相位聚焦, 最后对方位向 FFT 得到二维像。图 3(a) 和图 3(b) 是对径向速度 $v=100\ \text{m/s}$ 和 $v=5\ 000\ \text{m/s}$

的目标成像结果进行的对比。两者对比可以看出，高速运动目标的脉冲压缩结果相对低速情况发生了严重的包络展宽和谱峰分裂，通过图 4 可以直观看出高速情况下的成像结果出现了散射点分裂、散焦、扭曲等现象。通过实验可知高速目标必须进行有效的运动补偿，才能正确成像。另外可以从图 3 直观看出，高速运动导致了脉冲压缩幅度减半，这对低信噪比情况下的目标检测是不利的。实际上，目标的速度越高，脉冲压缩幅度减小得越多。

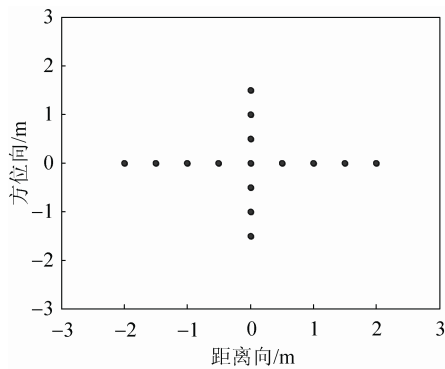


图 2 目标散射点设定

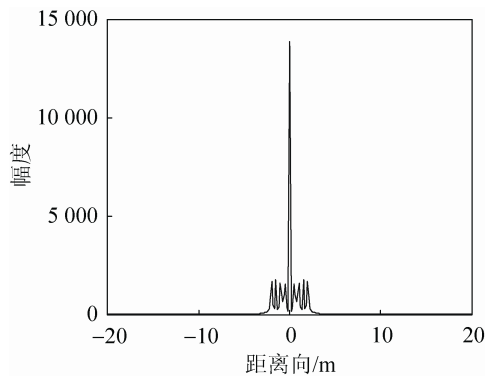
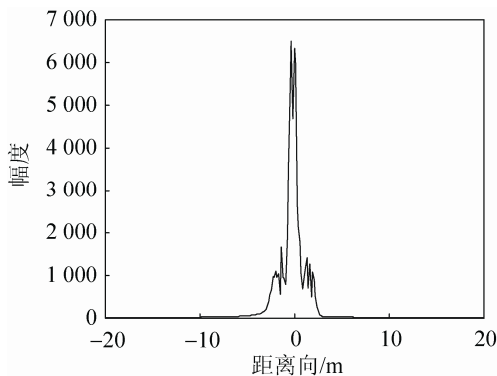
(a) $v=100\text{ m/s}$ (b) $v=5\ 000\text{ m/s}$

图 3 第一个回波脉冲压缩结果

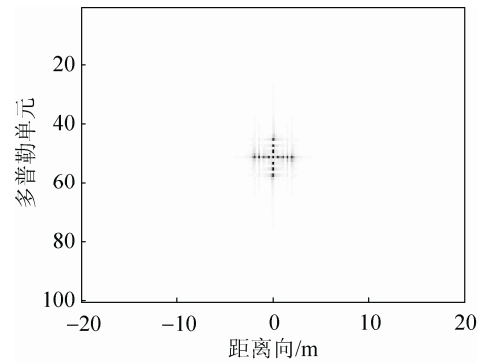
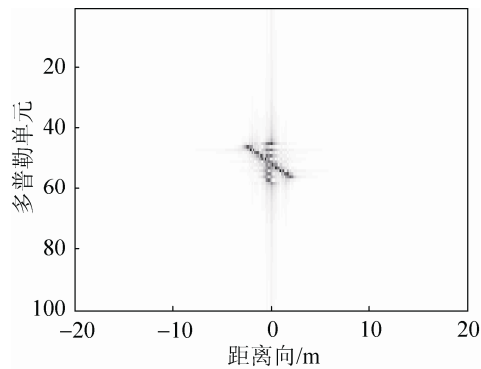
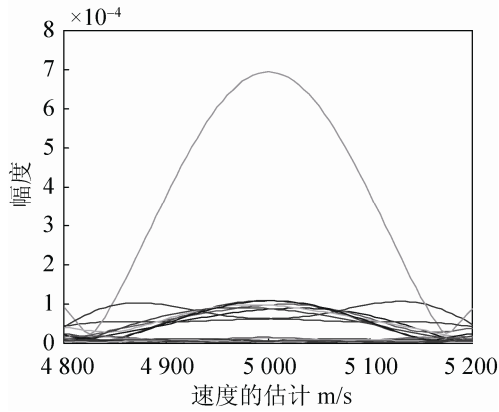
(a) $v=100\text{ m/s}$ (b) $v=5\ 000\text{ m/s}$

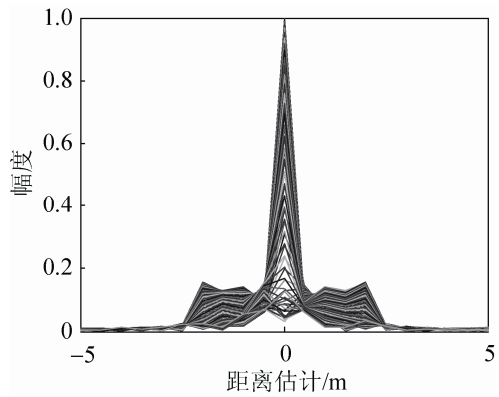
图 4 R-D 成像结果

实验 2 调频傅里叶变换在高速平稳目标中的参数估计性能分析

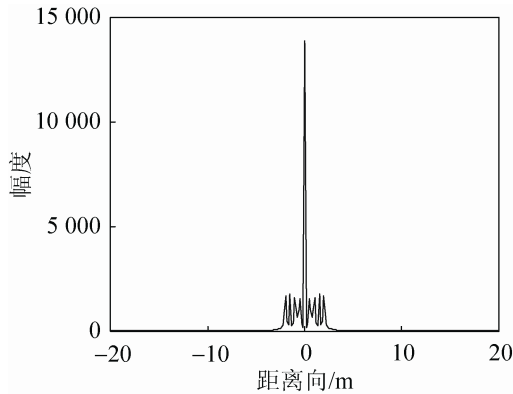
本实验假设目标速度 $v=5\ 000\text{ m/s}$ 。图 5 假定 $R_{ref}=2\ 010\text{ m}$ ，信噪比 $\text{SNR}=20\text{ dB}$ 时，对第一个回波的差频信号，进行调频傅里叶变换得到的相应参数估计曲线，从中可以看出目标散射点距离估计曲线在坐标原点 $x=0$ 处并未出现由于高速运动引起的脉冲压缩谱峰分裂现象。从图 5 曲线可以看到速度的估计是非常准确的，如果以 0.1 m/s 的步长搜索得到具体速度值是 $5\ 000.5\text{ m/s}$ ，可以带入式(9)作为 \tilde{v} 来构造补偿函数，补偿后的脉冲压缩结果如图 5(c)所示，可见补偿结果是准确的。其出现的估计值偏差是由信噪比引起的，信噪比越大，速度估计误差越大。从散射点距离的估计曲线可以看出和 $v=100\text{ m/s}$ 时的距离像(图 3)完全类似，没有出现谱峰分裂的现象。同时可以依据该曲线估计出 R_0 的数值为 $20\ 010\text{ m}$ (作为单特显点位置)，带入式(9)作为 \tilde{R}_{im} 来构造补偿函数；如果没有特显点的情况下，可以将距离像的重心位置作为 \tilde{R}_{im} 。



(a) 目标速度估计



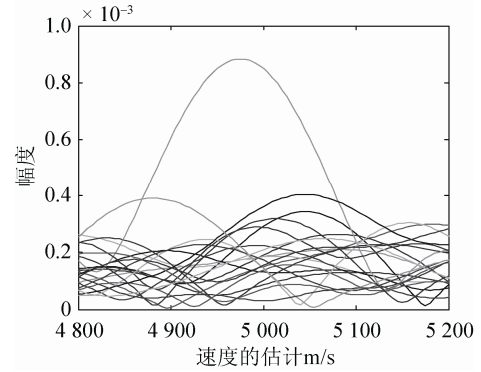
(b) 目标散射点距离估计



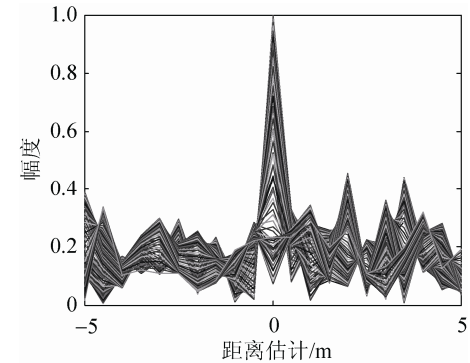
(c) 经过相位补偿后的脉冲压缩结果

图 5 SNR=20 dB 时调频傅里叶变换结果

图 6~8 是在信噪比 SNR=-20 dB 的条件下的仿真结果。图 6 显示了目标速度 $v=5000$ m/s 时第一个回波的速度和散射点距离估计情况。可以看出速度的估计存在一定的误差, 而散射点距离的估计是准确的。图 7 显示了目标速度 $v=0$ 时, 第一个回波的脉冲压缩结果。图 8 显示了信噪比为 -20 dB 时 500 次蒙特卡洛仿真得到的速度估计分布。



(a) 目标速度估计



(b) 目标散射点距离估计

图 6 SNR=-20 dB 时调频傅里叶变换结果

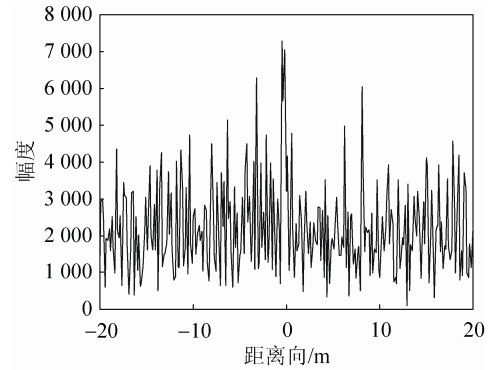


图 7 SNR=-20dB 时脉冲压缩结果

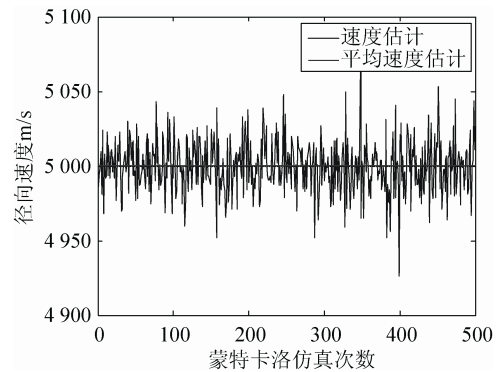


图 8 SNR=-20dB 时速度估计分布

为了对比不同算法的速度估计性能,表 1 仿真了不同算法在一定信噪比条件下,经过 500 次蒙特卡洛实验后的速度估计平均值。从表中可以看出其它算法在高信噪比下估计精度差不多,但在低信噪比下估计精度下降很快。其中最小熵法^[4]在低信噪比下完全失效,而 RAT 方法^[2]和 Chirplet 方法^[11]在低信噪比下还能估计,但精度较差。而本文方法在的速度估计在低信噪比下也是很稳健的。

表 1 蒙特卡洛速度估计值

速度估计	m/s				
	SNR=20dB	SNR=10dB	SNR=0dB	SNR=-10dB	SNR=-20dB
本文算法	5 000.5	5 000.5	5 000.9	5 001.6	5 004.1
RAT ^[2]	5 000.7	5 001.2	5 006.4	5 022.0	5 318.3
最小熵 ^[4]	5 000.3	5 000.4	5 009.5	5 081.8	7 442.6
Chirplet ^[11]	5 000.6	5 000.6	5 002.6	5 016.7	5 105.2

实验 3 本文算法与 R-D 算法在低信噪比下成像的比较

在目标速度 $v=5\ 000\ \text{m/s}$, $\text{SNR}=-20\ \text{dB}$ 情况下,本文算法的成像结果如图 9 所示,而图 10 是直接采用脉冲压缩、包络对齐、相位聚焦、方位向傅里叶变换的传统 R-D 算法的成像结果。

由于普通 R-D 成像算法在目标高速运动时脉冲压缩谱峰分裂、展宽,且峰值降低。同时,在包络对齐和相位聚焦过程中,由于信噪比低,导致不能很好对齐包络且相位散焦。所以最终不能得到成像结果。而本文算法的成像结果在低信噪比情况下也是稳健的,说明了其有效性。

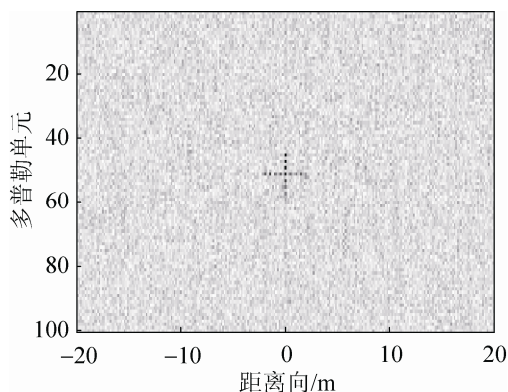


图 9 本文算法成像结果

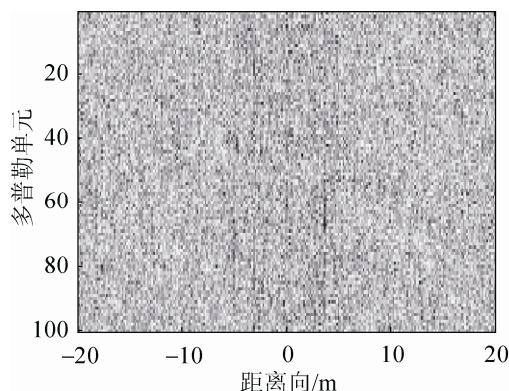


图 10 普通 R-D 算法成像结果

4 结论

调频傅里叶变换是一种线性变换,对线性调频信号的处理有先天的优势。本文采用调频傅里叶变换方法,对采用去斜方式的 ISAR 雷达回波进行参考距离、速度的估计,可以精确跟踪目标运动,消除高速引起的脉内运动,从而得到精确的成像结果。本文提出的算法计算量不大、结构简单,能满足实时性要求,且在低信噪比下性能稳健,在实际工程中具有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] 张焕颖,张守宏,李强. 基于stretch处理的ISAR成像补偿新方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(7): 960-964.
- [2] 李文臣,王雪松,王国玉. 机动目标一维距离像RAT法线性化补偿 [J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(5): 38-42.
- [3] 张焕颖,张守宏,李强. 高速运动目标的ISAR成像方法 [J]. 电子与信息学报, 2007, 29(8): 1789-1793.
- [4] 王瑜,秦忠宇,文树梁. 高分辨雷达去斜处理一维距离像速度补偿技术 [J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(12): 1757-1759.
- [5] 赵永波,周晓佩,王娟. 一种用于弱信号检测的广义Keystone变换算法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2013, 40(2): 120-125.
- [6] Xing Mendao, Wu Renbiao, Bao Zheng. High resolution ISAR imaging of high speed moving targets [J]. IEE Proceedings-Radar, Sonar, and Navigation (S1751-8784), 2005, 152(2): 58-67.
- [7] Ruan Hang, Wu Yanhong, Jia Xin, et al. Novel ISAR imaging algorithm for maneuvering targets based on a modified keystone transform [J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE (S1545-598X), 2014, 11(1): 128-132.

(下转第 866 页)