

文章编号: 2095-4980(2021)05-0851-07

外辐射源雷达距离徙动校正并行实现与实验研究

张汉五^{1a}, 万显荣^{*1a}, 谢德强^{1a}, 程 丰^{1a}, 饶云华^{1a,1b}, 熊良建²

(1.武汉大学 a.电子信息学院, 湖北 武汉 430072; b.深圳研究院, 广东 深圳 518000;
2.中国民航飞行学院 洛阳分院, 河南 洛阳 471001)

摘 要: 增加相参积累时间是一种提高雷达探测能力的有效方法, 但当目标速度较高时, 长时间相参积累会导致目标出现距离徙动效应, 从而降低了信噪比, 影响雷达的探测威力。针对距离徙动问题, 本文给出了 Keystone 变换(KT)校正算法, 仿真评估了三种实现 KT 方法的性能, 进而提出并实现了基于图形处理器(GPU)的线性调频 Z 变换(CZT)并行算法, 结合外辐射源雷达实验证实了该方法的实时性和有效性。

关键词: 外辐射源雷达; 距离徙动; Keystone 变换; 线性调频 Z 变换; 图形处理器

中图分类号: TN958.97

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020033

Parallel implementation and experimental research of range migration correction for passive radar

ZHANG Hanwu^{1a}, WAN Xianrong^{*1a}, XIE Deqiang^{1a}, CHENG Feng^{1a}, RAO Yunhua^{1a,1b}, XIONG Liangjian²

(1a.School of Electronic Information, Wuhan Hubei 430072; 1b.Shenzhen Research Institute, Shenzhen Guangdong 518000, Wuhan University, China; 2.Luoyang College, Civil Aviation Flight University of China, Luoyang Henan 471001, China)

Abstract: Increasing the coherent accumulation time is an effective method to improve radar detection capability. However, when target velocity is high, long-time coherent accumulation will lead to the range migration effect of the target, reduce the Signal-to-Noise Ratio, and affect the radar's detection power. Aiming at the range migration problem, Keystone Transform(KT) correction algorithm is given. The performance of three KT implementation methods are simulated and evaluated. Then, a parallel implementation algorithm based on Chirp Z Transform(CZT) on the Graphics Processing Unit(GPU) is proposed and implemented. Experimental results verify the real-time performance and effectiveness of the proposed method in combination with the passive radar system.

Keywords: passive radar; range migration; Keystone Transform; Chirp Z Transform(CZT); Graphics Processing Unit(GPU)

外辐射源雷达自身不发射电磁波, 是一种利用非合作照射源进行目标探测的新体制雷达, 可用照射源包括广播、电视、通信、导航等信号, 相比于传统的主动雷达, 它具有节约频谱资源、安全隐蔽、易部署、无电磁污染等特点, 近年来在军用和民用领域得到了广泛应用^[1-2]。外辐射源雷达进行目标探测时, 通过接收照射源的直达波和经过目标散射的回波, 计算这两路信号的二维互相关, 实现相参积累。增加相参积累时间是提升目标探测能力的重要手段之一, 但在长相参积累时间内, 目标的高速运动会造成距离徙动现象, 导致回波能量在距离维扩展, 信噪比(SNR)降低, 雷达的检测性能变差。相比主动雷达, 外辐射源雷达所使用的非合作照射源信号模式和带宽不受控, 其较大的带宽, 拥有较高的距离分辨力, 更容易受到距离徙动的影响。因此, 解决高速目标在外辐射源雷达长时间积累中产生的距离徙动效应是一个不可忽视的问题^[3]。

徙动包括距离徙动和多普勒徙动^[4]。距离徙动校正早期应用在合成孔径雷达中^[5], 用来改善成像质量。常

收稿日期: 2020-01-17; 修回日期: 2020-03-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61931015,62071335); 湖北省科技创新资助项目(2019AAA061); 深圳市科技计划资助项目(JCYJ20170818112037398)

*通信作者: 万显荣 email: xrwan@whu.edu.cn

用的距离徙动校正的方法是 Keystone 变换^[6], 也有其他校正类算法^[7-9]。文献[8]从模糊函数的角度出发, 解决距离维扩展问题; 文献[9]则是根据目标运动状态利用 Radon 变换解决距离徙动。相比较其他校正类算法, Keystone 变换因不受目标数量和先验信息的限制而具有优势, 同时实现 Keystone 变换(KT)的方法比较成熟, 常用方法有插值法、DFT-IFFT 算法、CZT 变换等^[10-12]。多普勒徙动出现在变速运动的目标中, 相参积累时间内在多普勒维出现扩展, 导致目标能量降低。常用的多普勒徙动补偿方法有分数阶傅里叶变换^[13]、Lvd 变换^[14]、Wigner-Hough 变换^[15]等参数估计方法, 或广义 Radon 变换、Radon 分数阶傅里叶变换^[16]等方法, 但是在处理多目标、运动复杂的情况时, 大部分多普勒徙动补偿方法面临着参数难以估计、高阶徙动或者计算负担较大等问题。本文针对外辐射源雷达中的距离徙动问题, 首先建立了外辐射源雷达回波模型, 接着研究了距离徙动产生的原因和 Keystone 校正算法, 然后综合 GPU 在多线程、高并发数据处理上的优势, 提出了基于 GPU 实现 CZT 的并行算法, 最后结合实测数据, 验证算法的有效性。

1 外辐射源雷达回波模型

外辐射源雷达系统探测模型如图 1。发射站 Tx 到接收站 Rx 的基线距离为 D , Rx 可直接接收到由 Tx 发射的参考信号 $s_r(t)$, 同时接收经目标散射回来的监测信号 $s_e(t)$ 。假设目标初始时刻的位置为 O , 速度为 v , 此时 Tx 和 Rx 到目标的距离分别为 R_T 和 R_R , 双基地角为 α 。经过 t 时刻运动到位置 N , 此刻由 Tx 和 Rx 到目标的距离分别为 $R_T(t)$ 和 $R_R(t)$ 。目标 t 时刻内运动距离为: $R_v = vt$, 运动方向与双基地角平分线的夹角为 β , 则 $R_T(t)$ 和 $R_R(t)$ 可表示为:

$$R_T(t) = \sqrt{R_T^2 + R_v^2 - 2R_T R_v \cos(\beta + \frac{\alpha}{2})} \quad (1)$$

$$R_R(t) = \sqrt{R_R^2 + R_v^2 - 2R_R R_v \cos(\beta - \frac{\alpha}{2})} \quad (2)$$

则目标回波与直达波产生的时延为:

$$\tau(t) = [R_T(t) + R_R(t) - D] / c \quad (3)$$

式中: c 为光速。经过泰勒一阶展开可得:

$$\tau(t) \approx (R_T + R_R - D) / c - [2v \cos \beta \cos(\alpha / 2)] t / c = \tau_0 + \tau_1 t \quad (4)$$

式中: $\tau_0 = (R_T + R_R - D) / c$; $\tau_1 = -[2v \cos \beta \cos(\alpha / 2)] / c$ 。

设 $s_r(t) = s(t)$ 是收到的参考信号, 暂时不考虑噪声和杂波的影响, 则运动目标的回波监测信号可表示为:

$$s_e(t) = A s[t - \tau(t)] e^{-j2\pi f_0 \tau(t)} = A s(t - \tau_0 - \tau_1 t) e^{-j2\pi f_0 (\tau_0 + \tau_1 t)} \quad (5)$$

式中 A 表示回波信号幅度。根据接收到 $s_r(t)$ 和 $s_e(t)$, 经过匹配滤波处理可以提取目标的信息。

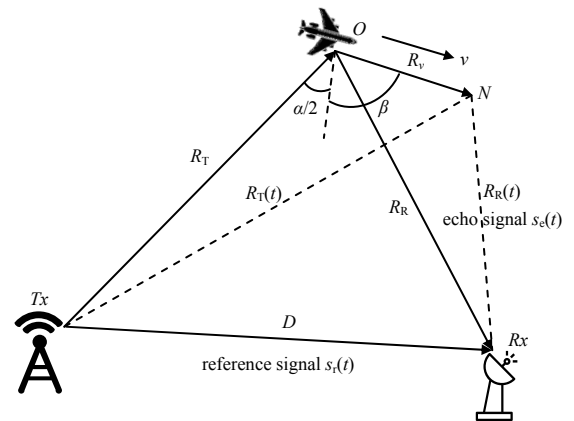


Fig.1 Schematic diagram of passive radar

图 1 外辐射源雷达示意图

2 信号处理流程

在外辐射源雷达信号处理中, 首先对接收到的参考信号进行提纯重构, 同时对监测信号进行杂波抑制^[17], 以消除直达波以及多径干扰, 之后将参考信号和监测信号进行二维互相关处理, 即匹配滤波, 画图得到距离多普勒谱(Range-Doppler spectrum, RD), 最后通过恒虚警检测(Constant False Alarm Rate, CFAR)^[18]后, 结合距离和多普勒分辨率, 获取目标的距离和速度信息。

2.1 匹配滤波

连续采样信号也可以像脉冲雷达的处理方式, 划分成等效的脉冲信号进行处理。首先把参考信号和监测信号分别划分成 $L \times M$ 的数据矩阵, L 表示快时间维数, M 表示慢时间维数。 \hat{t} 和 t_m 表示快时间和慢时间, $\hat{t} = t - mT$, $t_m = mT$, $m = 0, 1, \dots, M - 1$, T 为等效脉冲重复周期, 则参考和监测信号的离散形式表示为:

$$s_r(\hat{t}, t_m) = s(\hat{t}, t_m) \quad (6)$$

$$s_e(\hat{t}, t_m) = A s[\hat{t} - \tau(t_m)] e^{-j2\pi f_0 \tau(t_m)} \quad (7)$$

式中: A 是信号幅度; s 表示时域信号。数字信号的匹配滤波, 可以转换到频域实现。

参考信号和监测信号的频域表示为：

$$S_r(f, t_m) = FFT[S_r(\hat{t}, t_m)] = S(f, m) \quad (8)$$

$$S_e(f, t_m) = FFT[S_e(\hat{t}, t_m)] = AS(f, m)e^{-j2\pi(f+f_0)\tau(t_m)} \quad (9)$$

式中： f 是频率， S 表示频域信号； FFT 为快速傅里叶变换。两者共轭相乘可得匹配滤波的频域输出：

$$S_{r,e}(f, t_m) = S_e(f, t_m)S_r^*(f, t_m) = A|S(f, m)|^2 e^{-j2\pi(f+f_0)\tau(t_m)} = A|S(f, m)|^2 e^{-j2\pi(f+f_0)\tau_0} e^{-j2\pi(f+f_0)\tau_1 t_m} \quad (10)$$

观察上式，第一个指数项 $e^{-j2\pi(f+f_0)\tau_0}$ 不变，表示目标的初始位置；第二个指数项 $e^{-j2\pi(f+f_0)\tau_1 t_m}$ 中，频率 f 和慢时间 t_m 耦合在一起，此时对应于带宽信号的每个不同频率，相邻慢时间之间的相位间隔不同，直接进行相参积累会带来目标能量的扩散，这也是距离徙动产生的原因。速度和积累时间分别影响 τ_1 和 t_m 的大小，当速度很小或者总积累时间较短，这个指数项的影响可以忽略，直接在慢时间维多普勒处理(FFT)，即可提取目标的多普勒信息；反之速度很大或者积累时间变长时，相互耦合的影响不能忽略，则要采用方法消除此影响，常用 Keystone 变换实现解耦合。

2.2 Keystone 变换矫正距离徙动

为了解决式(10)中第二个指数项中相位耦合的影响，可以构造一个新的变换 $(f+f_0)t_m = f_0 t'_m$ ，即 Keystone 变换，相当于调整了慢时间维的缩放，代入式(10)，再变换到快时间维时域，可得：

$$S'_{r,e}(f, t'_m) = A|S(f, m)|^2 e^{-j2\pi(f+f_0)\tau_0} e^{-j2\pi\tau_1 f_0 t'_m} \quad (11)$$

$$S'_{r,e}(\hat{t}, t'_m) = IFFT[S'_{r,e}(f, t'_m)] = AS_{r,e}(\hat{t} - \tau_0 f_s, t'_m) e^{-j2\pi\tau_0 \tau_0} e^{-j2\pi\tau_1 f_0 t'_m} \quad (12)$$

式中： f_s 为采样率； $IFFT$ 是快速傅里叶逆变换。频率 f 和慢时间 t_m 耦合解除，相位只随新慢时间维式 t'_m 变化，目标的距离被校正到初始位置。

2.3 三种 KT 实现算法

2.3.1 sinc 插值

慢时间维由 t_m 得到 t'_m ，相当于对原慢时间 t_m 重新进行插值。借助 sinc 插值，卷积重建新慢时间 t'_m 信号，卷积核是 sinc 函数， $\text{sinc}(x) = \text{sinc} / x$ ，实现 KT 的方法如下：

$$S'_{r,e}(f, t'_m) = \sum_{t_m=0}^{m-1} S_{r,e}(f, t_m) \text{sinc}\left(\frac{f_0}{f_0+f} t'_m - t_m\right) \quad (13)$$

式中 $S_{r,e}(f, t_m)$ 表示快时间维频域的数据。

2.3.2 DFT-IFFT

由于慢时间维 t_m 到 t'_m 的变化，相当于尺度变化，所以可以利用 DFT-IFFT 尺度变换的性质，实现 KT 变换。在 KT 中： $t_m = f_0 / (f_0 + f) t'_m$ ，则令 $\lambda = f_0 / (f_0 + f)$ ，则实现的过程如下：

$$S_{r,e}(f, \frac{k}{\lambda}) = \sum_{m=0}^{M-1} S_{r,e}(f, t_m) e^{-j\frac{2\pi}{M}\frac{1}{\lambda} k t_m} \quad (14)$$

$$S'_{r,e}(f, t'_m) = \frac{1}{M|\lambda|} \sum_{k=0}^{M-1} S_{r,e}(f, \frac{k}{\lambda}) e^{-j\frac{2\pi}{M} k t'_m} \quad (15)$$

2.3.3 线性调频 Z 变换算法

线性调频 Z 变换(CZT)在处理非等间隔采样值时具有很大的优势，其基本原理是采用螺旋线抽样，求取各采样点的 Z 变换，以此作为各采样点的 DFT 值，而 KT 的慢时间维尺度变换相当于一次非等间隔采样过程，因此可以使用 CZT 算法实现。首先 N 点的 Z 变换为：

$$X(z) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)z^{-n} \quad (16)$$

对于一般路径的采样点 $z_k = AW^{-k}$ ， $k = 0, 1, \dots, M-1$ ， M 是要分析的点数， A 是采样点矢量半径 $A = A_0 e^{j\theta}$ ， W 是螺旋线伸展率 $W = W_0 e^{j\phi}$ ，把 z_k 代入表达式可得 CZT 变换：

$$X(z_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)A^{-n}W^{kn} = W^{\frac{k^2}{2}} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)A^{-n}W^{\frac{n^2}{2}} W^{-\frac{(k-n)^2}{2}} = W^{\frac{k^2}{2}} [x(n)A^{-n}W^{\frac{n^2}{2}}] * W^{-\frac{n^2}{2}} \quad (17)$$

式中 * 表示线性卷积，可使用圆周卷积转化到频域用 FFT 快速实现。

于是 KT 中的 CZT 过程如下:

$$S'_{r,e}(f,k) = W^{k^2/2} [S_{r,e}(f,t_m) A^{-n} W^{n^2/2}] * W^{-n^2/2} \quad (18)$$

由于使用圆周卷积, $W^{-n^2/2}$ 的实际长度 $K \geq 2M - 1$, 为了使用 FFT 快速算法, 需将其补零至 2 的整数幂, 即 $K = 2^{\log_2(2 \times M - 1)}$, 则有:

$$W^{-n^2/2} = \begin{cases} W^{-n^2/2}, & 0 \leq n \leq M - 1 \\ W^{-(K-n)^2/2}, & M \leq n \leq K - 1 \end{cases} \quad (19)$$

式中: $S_{r,e}(f,t_m)$ 表示快时间维频域的数据; $A=1$; $W = e^{-j \frac{(f_0+f) 2\pi}{f_0} \frac{n}{M}}$ 。上述过程即可完成 Keystone 变换。

3 仿真分析

仿真分析上述 3 种算法的有效性和性能。仿真参数设置如下: 信号的载波频率为 626 MHz, 带宽 10 MHz, 数据段的划分为快时间维数 4 096, 慢时间维数 2 048。设置 3 个匀速运动目标, 其初始距离和速度为: $R_1=1\ 300\text{ m}, v_1=400\text{ m/s}; R_2=2\ 600\text{ m}, v_2=500\text{ m/s}; R_3=2\ 500\text{ m}, v_3=250\text{ m/s}$, 信噪比统一设置为 -40 dB。图 2 分别展示了目标在距离徙动校正前后的目标状态, 噪声基底全部归一化到 0 dB。

由图 2(a)、图 2(b)可以看出, 由于目标的高速运动, 信号分段相参积累后, 时域距离谱和匹配滤波 RD 谱均出现严重的跨距离元徙动, 而且设置的目标 2 和 3 距离很接近, 时域距离谱上出现交叉。经过 KT 算法校正后, 图 2(c)的时域距离谱显示每个目标的距离都校正到各自初始的距离上, 图 2(d)的 RD 谱给出了 KT 校正后相参积累的结果, 3 个目标的距离徙动都能有效地校正。由于实现 KT 的 3 种算法在 RD 谱上的显示效果无差异, 所以只给出一组结果展示, 图 2(c)、图 2(d)距离徙动校正方法使用的是 CZT 校正算法。

3 种实现 KT 的方法对仿真目标信噪比的改善在表 1 中给出。当目标速度越高, 徙动的距离元越多, 匹配滤波后目标距离维扩展越严重, 信噪比损失越多, 但是经过 KT 校正距离徙动后, 信噪比的改善也越多; 而对同一个徙动目标, 3 种算法的改善性能基本相同。

同时表 2 给出了 3 种算法的复数乘法运算量。设快时间维数为 L , 慢时间维数 M , 其中 CZT 方法中为了使用基 2-FFT 快速算法, 圆周卷积的长度 $K = 2^{\log_2(2 \times M - 1)}$ 。

对比可得, DFT-IFFT 方法的运算量最高, sinc 插值次之, CZT 最少。以本节中的仿真参数为例: $L=4\ 200, M=2\ 048$, CZT 比 sinc 插值的运算量少了近 100 倍。

在实际处理流程中, 为了得到最后的 RD 谱, CZT 还省去了最后慢时间维的 FFT, 因此相比之下, CZT 的复乘运算量更少。所以本文在平衡了算法性能和运算量的基础上, 选择 CZT 算法实现 Keystone 变换, 从而解决距离徙动问题。

表 1 三种算法对徙动目标信噪比的改善

Table1 SNR improvement of migrating targets by three algorithms

target	velocity/ (m/s)	number of range migration cells	matched filter SNR/dB	matched filter+KT SNR/dB		
				sinc interpolation	DFT-IFFT	CZT
target	400	11	53.71	64.37	64.34	64.38
target	500	14	51.86	64.19	64.09	64.13
target	250	7	57.11	62.44	62.39	62.43

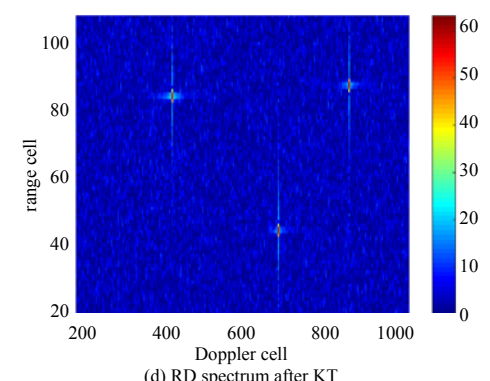
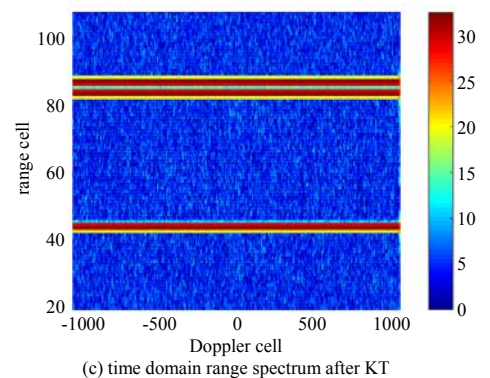
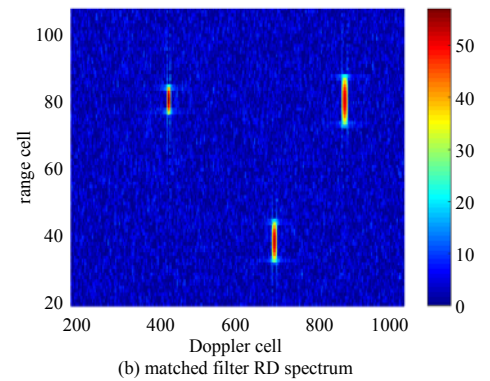
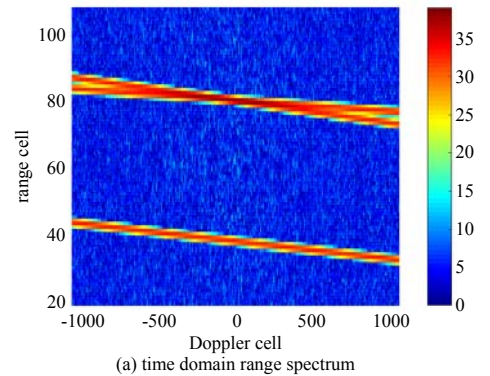


Fig.2 Simulation results

图 2 仿真结果

表 2 三种算法复乘运算量的比较

Table2 Three algorithms' complex multiplication

algorithm	computation
sinc	$L \times M^2$
DFT-IFFT	$L \times M^2 + L \times (M/2) \log_2 M$
CZT	$L \times (K + 2M + 3 \times (K/2) \log_2 K)$

4 CZT 算法在 GPU 上的实现

得益于 GPU 拥有高并行度、多线程、强大计算能力的优势，本文提出了 CZT 算法在 GPU 平台上的实现。GPU 主要使用 CUDA 编程模型，CPU 作为主机端，主要负责数据的传递分配、运行参数的初始化和配置、控制命令等，而将大规模的数据计算传送到 GPU 设备端进行处理。在具体操作上，编写不同的 Kernel 函数调度 GPU 上的 grid,block 和 thread，控制算法的实现和数据的运算。图 3 是提出的 CZT 算法在 GPU 上的实现流程。

测试该算法的性能，选择的实时化处理平台配置如表 3。在数据的划分上，快时间维数 $L=4\ 200$ ，慢时间维数 $M=1\ 024$ ，同时并行处理 7 个监测通道。采集多场雷达离线数据，分别在 GPU 和 Matlab 上处理对比，两者的计算结果吻合。单独使用 GPU 处理数据分析，除去初始化参数计算和数据传输所耗时间，匹配滤波+KT 的模块平均耗时约 260 ms，在一场数据的积累时间内，满足实时性的要求。

为了提高实时化的效率，还进行了改进：当不需要观测很远距离的目标时，对快时间维的距离元预先截取，以节省存储和运算空间；CZT 参数的 $W^{-k^2/2}$ 预先 FFT 变换到频域，并同时存储在显存区，避免重复计算等，为后续优化提供了更多的策略。如果面临更大规模的数据，同时还要相应提高硬件配置。

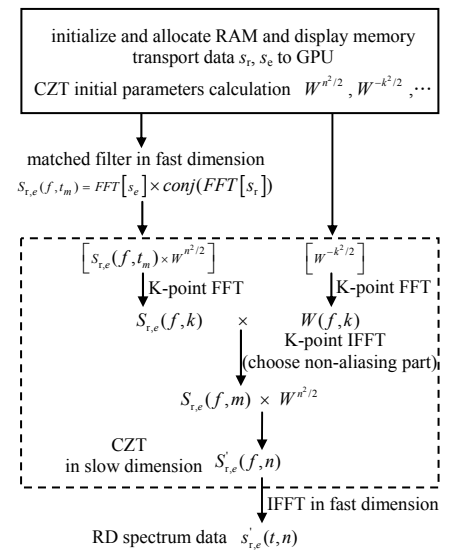


Fig.3 CZT implementation process on GPU

图 3 GPU 上 CZT 实现流程

表 3 实时化处理系统配置

Table3 Configuration of real-time processing system	
hardware	software
PCIe-x16 3.0	Windows 10
RAM 16G	CUDA 9.2
Intel Core i7-7700HQ	Visual Studio 2013
GTX 1050 Ti (4G memory)	

5 实验研究与分析

实验数据为武汉大学外辐射源雷达系统针对某机场民航和通航飞机的探测。外辐射源雷达使用的非合作照射源是数字电视广播信号，载波频率为 626 MHz，带宽为 7.56 MHz，以下展示是雷达采集的实测数据在 GPU 平台上的处理结果。

首先选取一组实测数据，相参积累时间为 2 s，并从本组数据中选取某一场，观察其中的两个民航飞机目标，它们都存在距离徙动问题。直接经过匹配滤波后的两个目标在 RD 谱上如图 4(a)所示，目标 1 的能量扩散到多个距离元和多普勒元，后续检测时容易造成误检；目标 2 扩散到多个距离元，信噪比非常低，容易造成漏检。但是经过匹配滤波+KT 距离徙动校正之后，两个目标在 RD 谱上的变化如图 4(b)，两个目标跨越的距离元减少，能量更聚焦和凸显，有利于提高检测概率并且减少错误检测的发生。

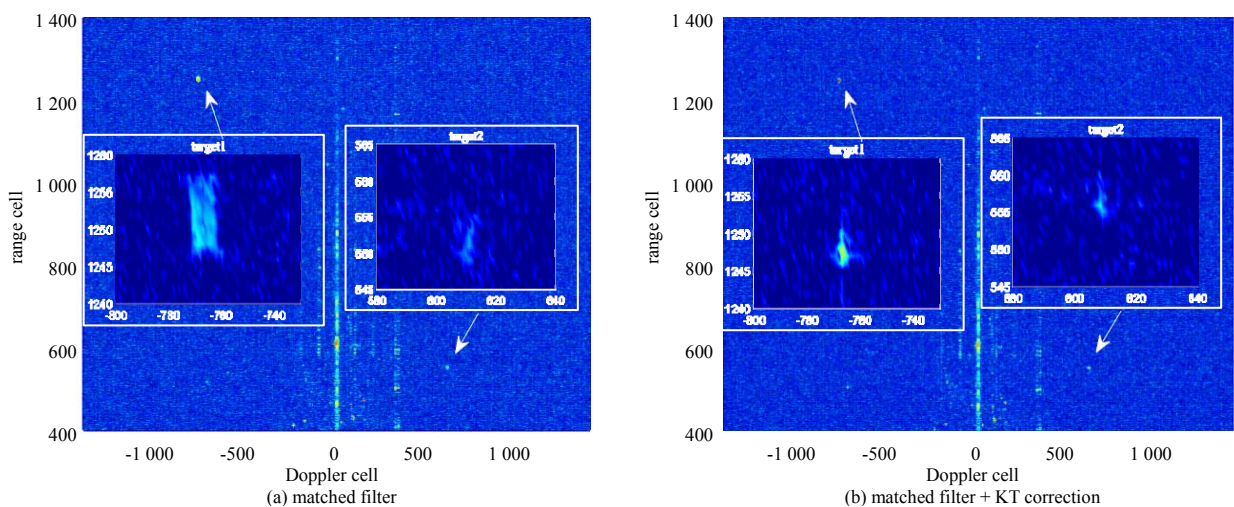


Fig.4 RD spectrum before and after range migration correction

图 4 距离徙动校正前后的 RD 谱

根据实际积累参数中的距离分辨率和多普勒分辨率，计算得到目标的具体信息，如表 4 所示。

目标 1 大约跨越 9 个距离元, 经过 KT 校正, 信噪比提高了约 9 dB; 目标 2 跨越 7 个距离元, 经过 KT 校正, 信噪比提高约 5 dB。实测数据说明 KT 算法有效校正距离徙动, 使目标更聚焦, 并同时提高信噪比。

表 4 目标信息提取

target	information	matched filter	matched filter+KT
target1	bistatic range/km	49.564	49.480
	bistatic velocity/(m/s)	-184.3	-183.8
	SNR/dB	18.30	27.47
target2	bistatic range/km	21.900	22.060
	bistatic velocity/(m/s)	146.4	145.7
	SNR/dB	13.61	18.48

提取本组实测数据中的多场数据, 并经过恒虚警检测得到各目标的点迹信息如图 5, 其虚警概率 $P_f = 5 \times 10^{-6}$ 。可以明显地看出经过距离徙动校正后, 所观察的两个目标都能够被连续检测到。

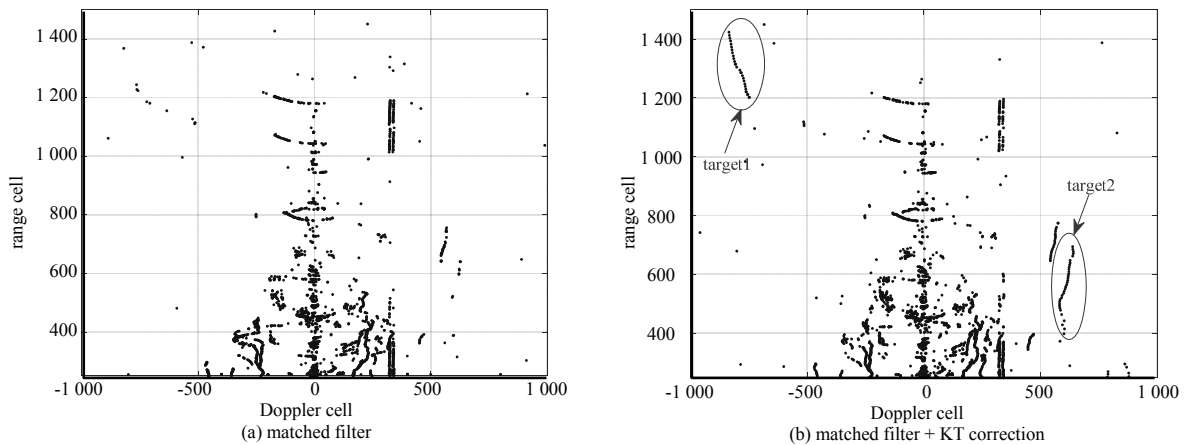


Fig.5 Detection results before and after range migration correction

图 5 距离徙动校正前后的检测结果

最后表 5 统计了两个目标检测点迹的数量, 经过距离徙动校正, 目标的检测点个数显然增多。

实测数据结果表明, 本文所提出并实现的距离徙动校正算法, 可以显著提高雷达对徙动目标的检测能力, 有助于提升外辐射源雷达的探测性能。

表 5 距离徙动校正前后检测点个数

detection points	matched filter	matched filter +KT
target1	5	24
target2	10	34

6 结论

本文针对高速运动目标在长时间相参积累中出现的距离徙动问题, 提出了基于 CZT 距离徙动校正算法在 GPU 上的实现方法, 并结合外辐射源雷达系统开展了外场实验研究。实验结果证明, 该方法不仅满足实时处理的需求, 而且有效地校正距离徙动, 显著提高目标的积累增益, 增强了雷达系统的探测威力。除此之外, 解决外辐射源雷达系统中遇到的多普勒徙动问题也将是下一步的研究重点。

参考文献:

- [1] KUSCHEL H,O'HAGAN D. Passive radar from history to future[C]// 11th International Radar Symposium. Vilnius, Lithuania:IEEE, 2010:1-4.
- [2] 王珏,高博,李英军. 基于 L 波段导航信号无源雷达探测[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(2):216-220. (WANG Jue,GAO Bo,LI Yingjun. Target detection based on L-band navigation signal for passive radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(2):216-220.)
- [3] 杨金禄,单涛,陶然. 数字电视辐射源雷达的相参积累徙动补偿方法[J]. 电子与信息学报, 2011,33(2):407-411. (YANG Jinlu,SHAN Tao,TAO Ran. Method of migration compensation in coherent integration for digital TV based passive radar[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2011,33(2):407-411.)
- [4] 王慧,洪丽娜,易建新,等. 数字电视外辐射源雷达目标徙动补偿新方法[J]. 电子与信息学报, 2015,37(5):1017-1022. (WANG Hui,HONG Lina,YI Jianxin,et al. A novel migration compensation algorithm for passive radar using digital TV signals[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2015,37(5):1017-1022.)

- [5] 姚迪,龙腾. 合成孔径雷达实时距离徙动校正算法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2006,28(8):1128-1130. (YAO Di, LONG Teng. Study on SAR real-time range migration correction algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(8):1128-1130.)
- [6] 张顺生,曾涛. 基于Keystone变换的微弱目标检测[J]. 电子学报, 2005,33(6):1675-1678. (ZHANG Shunsheng,ZENG Tao. Weak target detection based on Keystone transform[J]. Acta Electronica Sinica, 2005,33(6):1675-1678.)
- [7] 杨鹏程,吕晓德,张丹,等. 机载外辐射源雷达空时处理中距离徙动校正算法研究[J]. 电子与信息学报, 2016,38(12):3230-3237. (YANG Pengcheng,LYU Xiaode,ZHANG Dan,et al. Research on range migration compensation algorithm in space time processing for airborne passive radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016,38(12):3230-3237.)
- [8] MALANOWSKI M,KULPA K,OLSEN K E. Extending the integration time in DVB-T based passive radar[C]// Proceedings of the 8th European Radar Conference. Manchester,England:IEEE, 2011:190-193.
- [9] XU Jia,YU Ji,PENG Yingning,et al. Radon-Fourier Transform(RFT) for radar target detection (I): generalized Doppler filter bank[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011,47(2):1186-1202.
- [10] SHAN Tao,LIU Shengheng,ZHANG Yimin,et al. Efficient architecture and hardware implementation of coherent integration processor for digital video broadcast based passive bistatic radar[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2016, 10(1):97-106.
- [11] 王娟,赵永波. Keystone变换实现方法研究[J]. 火控雷达技术, 2011,40(1):45-51. (WANG Juan,ZHAO Yongbo. Research on implementation of Keystone transform[J]. Fire Control Radar Technology, 2011,40(1):45-51.)
- [12] PIGNOL F,COLONE F,MARTELLI T. Lagrange polynomial interpolation based Keystone transform for passive radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018,54(3):1151-1167.
- [13] 张南,陶然,王越. 变标处理和分数阶傅里叶变换的运动目标检测算法[J]. 电子学报, 2010,38(3):683-688. (ZHANG Nan,TAO Ran,WANG Yue. A target detection algorithm based on scaling processing and fractional Fourier transform[J]. Acta Electronica Sinica, 2010,38(3):683-688.)
- [14] LYU Xiaolei,BI Guoan,WAN Chunru,et al. Lv's distribution: principle, implementation, properties and performance[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011,59(8):3576-3591.
- [15] 刘建成,王雪松,肖顺平,等. 基于Wigner-Hough变换的径向加速度估计[J]. 电子学报, 2005,33(12):2235-2238. (LIU Jiancheng,WANG Xuesong,XIAO Shunping,et al. Radial acceleration estimation based on Wigner-Hough transform[J]. Acta Electronica Sinica, 2005,33(12):2235-2238.)
- [16] 陈小龙,刘宁波,王国庆,等. 基于Radon-分数阶傅里叶变换的雷达动目标检测方法[J]. 电子学报, 2014,42(6):1074-1080. (CHEN Xiaolong,LIU Ningbo,WANG Guoqing,et al. Radar detection method for moving target based on Radon-fractional Fourier transform[J]. Acta Electronica Sinica, 2014,42(6):1074-1080.)
- [17] YI Jianxin,WAN Xianrong,LI Deshi,et al. Robust clutter rejection in passive radar via generalized subband cancellation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018,54(4):1931-1946.
- [18] 吴顺君,梅晓春. 雷达信号处理和数据处理技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2008:160-162. (WU Shunjun,MEI Xiaochun. Radar signal processing and data processing technology[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2008:160-162.)

作者简介:

张汉五(1993-),男,安徽省阜阳市人,在读硕士研究生,主要研究方向为外辐射源雷达信号处理技术。email:hw_zhang@whu.edu.cn.

谢德强(1995-),男,贵州省黔南州市人,在读硕士研究生,主要研究方向为外辐射源雷达信号处理技术。

程丰(1975-),男,湖北省武汉市人,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为雷达与通信信号处理。

万显荣(1975-),男,湖北省天门市人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为新体制雷达设计,如外辐射源雷达、高频雷达系统及信号处理。

饶云华(1972-),男,重庆市人,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为新体制雷达设计、无线通信网。

熊良建(1969-),男,江苏省盐城市人,本科,中国民用航空飞行学院洛阳分院副院长,主要研究方向为无线电定位在飞行指挥中的应用。