

基于 FPGA 的并行可配置 Keystone 实时处理架构设计*

孙 健, 凌 元, 韩文俊
(南京电子技术研究所 南京 210000)

摘要: 针对雷达高速运动目标脉间存在距离单元走动而不利于长时间积累的问题, 采用 Keystone 变换技术补偿距离单元走动是雷达提升高速运动目标检测和 ISAR 成像性能的一种有效方法。但 Keystone 变换计算复杂度高, 在工程上实现实时处理极为困难。提出一种并行度可配置的 Keystone 实时处理架构, 支持增加并行度来提升处理性能, 实现资源与处理性能的互换。通过仿真和板上验证表明, Keystone 处理架构是有效的。使用 Keystone 实时处理架构实现高速运算目标的相参积累与理论结果相比, 最大相对误差小于 $10e-8$; 在并行度为 1 的情况下, 平均单频点 2048 脉冲的 Keystone 处理需小于 $25\mu s$, 满足 Keystone 实时处理要求。

关键词: Keystone 变换; Chirp-Z 变换; 距离走动; 并行可配置

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** CN11-1780(2020)05-0016-07

The configurable parallel architecture design for real-time Keystone transform processing based on FPGA

SUN Jian, LING Yuan, HAN Wenjun

(Nanjing Institute of Electronic Technology, Nanjing 210000, China)

Abstract: Aimed at the problem that long-term coherent integration is troublesome for the range migration of high velocity moving targets, the Keystone transform is employed for compensating the range migration and is an efficient method for improving the performance of high velocity targets detection and ISAR imaging. However, the implementation of Keystone transform in real time is very difficult for the high calculation complexity. In this paper, a configurable parallel architecture for the real-time Keystone processing is proposed, which can achieve the resources and performance exchange, by increasing the parallel number to improving the performance. The result of simulation and verification on board show that our architecture for the Keystone processing is effective, comparing to the theoretical result, the maximal relative error of which is less than $10e-8$, when used to accomplish the coherent integration of high velocity targets, and which need about $25\mu s$ to achieve single frequency Keystone transform with 2048 pulses in average, meeting the real-time processing requirement, when setting the parallel number is 1.

Key words: Keystone transform; Chirp-Z transform; Range migration; Configuration parallel

引 言

高速小目标的检测和成像在雷达技术领域一直备受关注。由于这类目标具备雷达散射截面积小、运动速度快等特点, 脉冲多普勒雷达往往需要增加目标驻留时间来达到提升目标检测和成像性能的目的。然而, 目标驻留时间的增加会导致高速小目标出现跨距离单元走动现象, 严重影响雷达相参积累的性能。Keystone 变换是消除运动目标距离走动的一种有效方法^[1-13]。其中, 文献[1-10]介绍了基于 Keystone 变换的高速运动目标相参积累方法, 解决了高速运动目标脉间存在的跨距离单元走动问题, 实现了目标回波长时间积累, 有效提升了目标的检测性能; 文献[11-13]介绍了基于 Keystone 变换的目标 ISAR 成像技术, 实现目标的长时间积累, 有效提升了 ISAR 成像效果。

假定距离维频率的采样点为 N , 脉冲数为 M , 直接进行 Keystone 变换的计算复杂度高达 $O(N \times M^2)$,

*基金项目: 核高基项目 (2017ZX01013210-004)

收稿日期: 2020-09-13 收修改稿日期: 2020-09-20

因此,在工程上完成实时处理极为困难。文献[14]和文献[15]对 Keystone 工程实现中常用的 DFT+IFFT 算法、Chirp-Z (CZT) 变换法、sinc 函数内插法和 Lagrange 内插法进行计算复杂度评估,其中,Chirp-Z 变换计算复杂最低,为工程实现首选方案。文献[15]采用多核 DSP 来实现 Keystone 变换,实时性差。本文采用了 Chirp-Z 变换方案来实现 Keystone 变换,并设计了并行度可配置的 FPGA 处理架构,支持增加运算并行度来提升 Keystone 变换的处理性能,实现了运算资源和处理性能的互换,可以完成 Keystone 的实时处理。

1 雷达目标回波模型与 Keystone 变换

以点目标为例,假设有多个不同距离、不同速度的点目标时,其雷达接收机下变频得到的基带回波信号可以表示为

$$s_r(t) = s_r(\hat{t}, t_m) = \sum_i A_i p(\hat{t}, t_m) e^{-j\frac{4\pi f_c}{c} R_i(t_m)} \quad (1)$$

式中, $\hat{t} = t - mT_r$ 表示快时间, $t_m = mT_r$ 表示慢时间, T_r 为脉冲重复周期, A_i 为第 i 个点目标回波幅度, $R_i(t_m)$ 为第 i 个点目标在时刻 t_m 距雷达的距离, $p(\bullet)$ 为归一化的回波包络, f_c 为载波频率, c 为光速。

将式(1)表示的回波信号通过傅里叶变换,从快时间域变换到基带频(f)域,得

$$S_r(f, t_m) = P(f) \sum_i A_i e^{-j\frac{4\pi}{c}(f_c+f)R_i(t_m)} \quad (2)$$

式中, $P(f)$ 为 $p(\hat{t})$ 的傅里叶变换。假设各点目标在 t_m 时刻近似以恒速飞行,即 $R_i(t_m) = R_{i0} + v_i t_m + \frac{1}{2} a_i t_m^2 + \dots \approx R_{i0} + v_i t_m$, 为各点目标的径向速度,代入式(2)中,可得:

$$S_r(f, t_m) = P(f) \sum_i A_i e^{-j\frac{4\pi}{c}(f_c+f)R_{i0}} e^{-j\frac{4\pi}{c}(f_c+f)v_i t_m} = P(f) \sum_i A_i e^{-j\frac{4\pi}{c}(f_c+f)R_{i0}} e^{-j2\pi f_{di}(\frac{f_c+f}{f_c})t_m} \quad (3)$$

式中 $f_{di} = -\frac{2f_c v_i}{c}$ 为第 i 个目标的多普勒频率。假定虚拟慢时间 τ_m , 令 $t_m = \frac{f_c}{f_c+f} \tau_m$, 得到 Keystone 变换后的结果为

$$S_r(f, \tau_m) = P(f) \sum_i A_i e^{-j\frac{4\pi}{c}(f_c+f)R_{i0}} e^{-j2\pi f_{di} \tau_m} \quad (4)$$

此时,进行 Keystone 变换后的不同 f 对应的多普勒频率相同,便可以实现回波的相参积累。假定距离维频率的采样点为 N , 脉冲数为 M , 文献[15]给出 Keystone 变换在工程实现中几种方法计算复杂度的比较,如表 1 所示。

可见,当 N 和 M 较大时, CZT 变换方法运算量最小。

2 基于 Chirp-Z 变换的 Keystone 实现

Chirp-Z 变换算法的思想就是在单位圆上取不相等间隔的信号 Z 变换,设 $x(n)$ 为已知的信号,其 Z 变换的结果可以表示为

$$X(z) = \sum_{n=0}^{\infty} x(n) * z^{-n} \quad (5)$$

式中, $z = A e^{j\omega}$ 。令 $z_r = A W^{-r}$, 则 $x(n)$ 信号的 CZT 变换的结果为

表 1 文献[15]给出的几种 Keystone 变换工程化方案计算复杂度比较

Table 1 The calculation complexity comparison of several Keystone transform implementation methods in 15th reference

方案名称	复数个数	备注
CZT	$N \times [L + 2M + (3L/2) \times \log_2 L + (M/2) \times \log_2 M]$	
SINC 内插	$N \times M^2$	
DFT+IFFT	$N \times M^2 + N \times [(M/2) \times \log_2 M]$	

$$X(z_r) = \sum_{n=0}^{\infty} x(n) * A^{-n} W^{nr} \quad (6)$$

其中, $A = e^{j\theta_0}$, $W = e^{-j\phi_0}$, θ_0 为选取频率范围的起始取样点相角; ϕ_0 为两相邻 Z_k 点之间角频率差, 决定了选频范围内的频率分辨率。由于, $nr = \frac{1}{2}[r^2 + n^2 - (r-n)^2]$, 所以, 式 (6) 又可以写成:

$$X(z_r) = \sum_{n=0}^{\infty} x(n) * A^{-n} W^{r^2/2} W^{n^2/2} W^{-(r-n)^2/2} \quad (7)$$

从式 (7) 可知, CZT 变换可以通过 FFT 快速计算实现圆周卷积而实现, 其实现架构如图 1 所示。

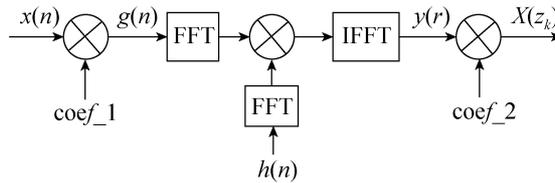


图 1 圆周卷积的 CZT 变换系统架构

Fig. 1 The CZT implementation architecture based on circular convolution

图 1 中各系数为

$$\text{coef_1} = A^{-n} W^{n^2/2}, \text{coef_2} = W^{r^2/2}, h(n) = W^{-n^2/2} \quad (8)$$

假设运动目标的多普勒模糊倍数为 N_{am} , 对公式 (3) 中的 f 在 $[-\pi, \pi]$ 内等间隔的 M 点, 那么取:

$$A = \exp \left[j2\pi \left(N_{am} - \frac{M-1}{2M} \right) \left(\frac{f_c + f}{f_c} \right) \right], W = \exp \left[-j \frac{2\pi}{M} \left(\frac{f_c + f}{f_c} \right) \right] \quad (9)$$

就利用 CZT 变换得到公式 (4) 的 Keystone 变换结果。

3 基于 FPGA 的并行可配置处理架构

基于 CZT 的并行可配置 Keystone 处理架构如图 2 所示。

该架构主要由 Keystone 控制模块、CZT 变换运算两部分组成。其中, Keystone 控制模块主要接收用户的配置信息, 并根据配置参数依次计算每个 f 下的 A 、 W 值, 并配置 CZT 变换运算模块; CZT 变换运算模块由 K 路并行的 CZT 变换运算核组成, 运算核个数由静态参数设置, 参与的运算核数越多, Keystone 变换处理的吞吐率越大。该架构可以有效利用资源换取处理性能, 灵活实现资源与处理性能的互换。

3.1 Keystone 控制模块处理架构

Keystone 控制模块主要接收用户的配置信息, 依次计算 A 、 W 值, 并配置 CZT 变换运算模块, 其处理架构如图 3 所示。

该模块主要由 Keystone 控制状态机、AW 计算核、AW 值缓存和 CZT 变换模块配置四个部分组成。Keystone 控制状态机用来接收用户的配置信息, 驱动 AW 计算核进行 AW 值运算; AW 计算核依次计

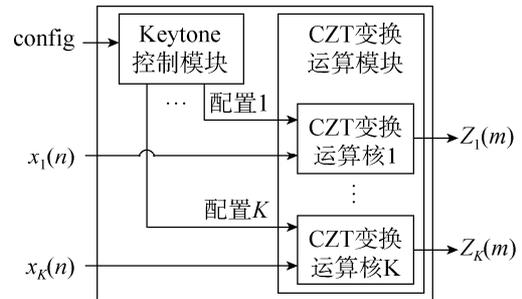


图 2 基于 CZT 的并行可配置 FPGA 处理架构
Fig. 2 The parallel configurable FPGA processing architecture based on CZT

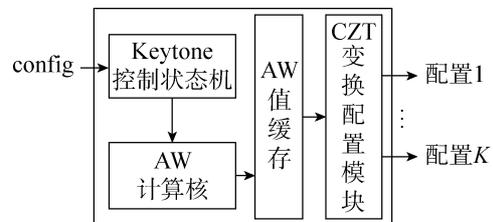


图 3 Keystone 控制模块处理架构
Fig. 3 The processing architecture of Keystone control module

算每个频点的 AW 值,并输出到 AW 值缓存模块;AW 值缓存模块缓存 AW 值并发送至 CZT 变换配置模块;CZT 变换配置模块用来实现对 CZT 变换模块中 K 个 CZT 运算核的配置功能。

3.2 CZT 变换运算核流水处理架构

CZT 变换运算模块由 K 路并行的 CZT 变换运算核组成,每个 CZT 变换运算核完全一致,支持静态参数设置,实现处理资源和处理性能的互换。CZT 变换运算核流水处理架构^[16]如图 4 所示。

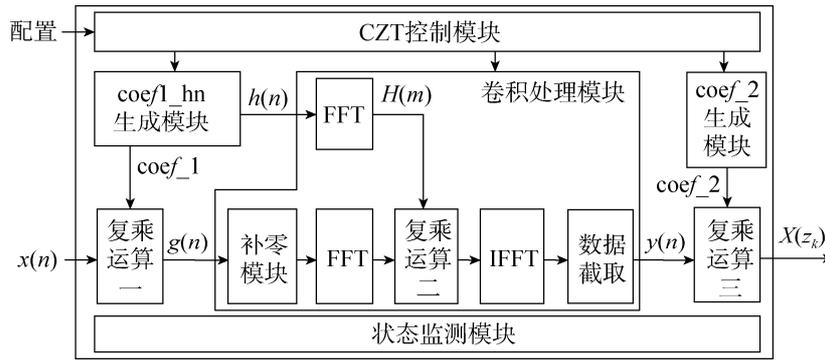


图 4 CZT 变换运算核流水处理架构

Fig. 4 The pipelined processing architecture of CZT operational core

可见,CZT 变换运算核主要由 CZT 控制模块、coef1_hn 生成模块、复乘运算一、coef2 生成模块、复乘运算三和卷积处理模块六部分组成。

CZT 控制模块接收 Keystone 控制模块给出配置信号,完成对 coef1_hn 生成模块、卷积处理模块、coef_2 生成模块的配置功能。

coef1_hn 生成模块和 coef_2 生成模块接收 CZT 控制模块给出的 A 、 W 值,采用 cordic 算法计算得到公式(8)中三种系数值。其中,coef1_hn 生成模块采用一个 cordic 运算核分时复用产生 coef_1 系数和 $h(n)$ 系数。

复乘运算一模块接收系数 coef_1 和输入数据 $x(n)$,进行复数相乘运算得到 $g(n)$,并输入到卷积处理模块。

卷积处理模块接收复乘运算一模块输出的 $g(n)$ 和 coef1_hn 生成模块输出的 $h(n)$ 数据,采用快速傅里叶变换的方式实现卷积处理得到 $y(n)$,输出到复乘运算三模块。

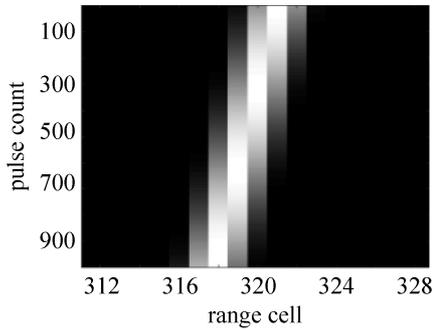
coef_2 生成模块采用 cordic 算法计算得到 coef_2 系数,并与卷积处理模块得到的结果 $y(n)$ 相乘,得到最终的 CZT 结果。

4 实现结果验证

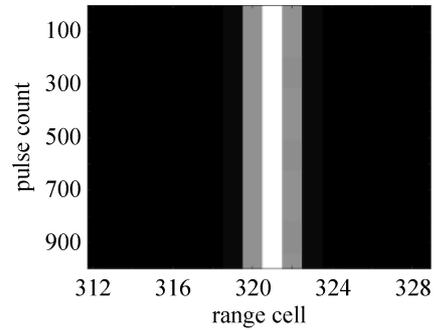
4.1 Keystone 处理架构实现与理论结果比对

根据文中给出的 Keystone 处理架构,采用 vivado2015.1 设计工具在型号为 xc690tffg1158-2 的 FPGA 上实现,处理采用浮点复数运算。为了验证该架构的正确性,使用 MATLAB 产生单目标的雷达回波数据,使用 FPGA 进行 Keystone 处理后的结果与 MATLAB 处理结果进行对比。设置载频 $f_c=500\text{MHz}$,信号带宽 $B=5\text{MHz}$,采样频率 $f_s=6\text{MHz}$,线性调频信号脉宽 $T=40\mu\text{s}$,脉冲重复周期性 $\text{PRT}=200\mu\text{s}$,目标速度 $v=400\text{m/s}$,当脉冲个数取 1024 时,单个目标有无 Keystone 处理匹配滤波后的结果如图 5 所示。

对比图 5 中单目标在有无 Keystone 处理的匹配滤波结果可以看出,经过 Keystone 处理后,每个脉冲的回波的跨距离走动现象得以消除,图 6 为单个目标有无 Keystone 处理后进行相参积累的结果。由图 6 可知,在进行 Keystone 处理后进行相参积累,各个脉冲的回波信息可以得到有效积累,可显著提升目标回波的检测性能。图 7 为 Keystone 处理在 FPGA 上实现的结果与理论结果的比较。



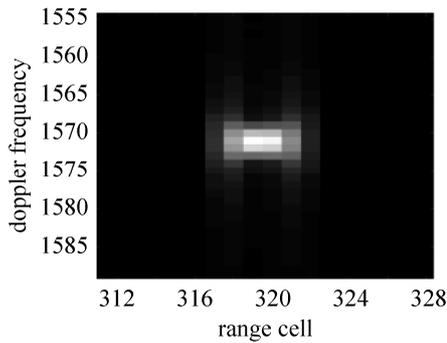
(a) 单目标无 Keystone 处理的匹配滤波结果
 (a) The matched filtering result without Keystone transform for the single target



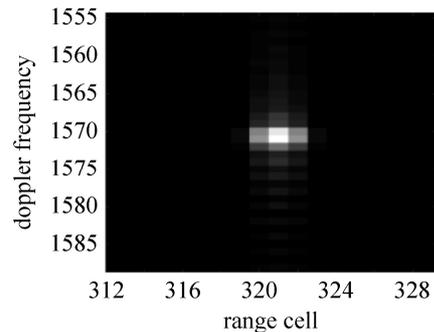
(b) 单目标 Keystone 处理后的匹配滤波结果
 (b) The matched filtering result with Keystone transform for the single target

图 5 单目标有无 Keystone 处理的匹配滤波结果

Fig. 5 The matched filtering results with and without Keystone transform for the single target



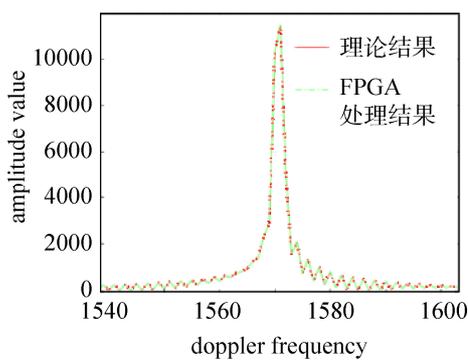
(a) 单目标无 Keystone 处理的相参积累结果
 (a) The coherent integration result without Keystone transform for the single target



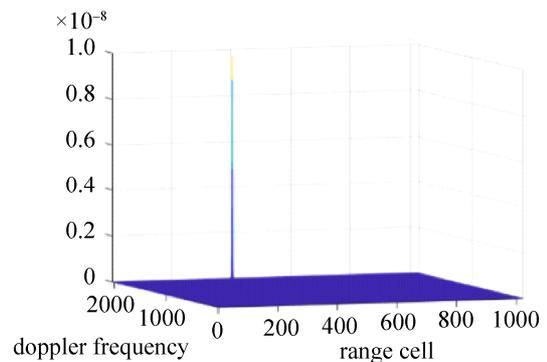
(b) 单目标 Keystone 处理后的相参积累结果
 (b) The coherent integration result with Keystone transform for the single target

图 6 单目标有无 Keystone 处理的相参积累结果

Fig. 6 The coherent integration results with and without Keystone for the single target



(a) Keystone 处理在 FPGA 实现与理论结果的幅度值比较 (取第 321 个距离门)
 (a) The Keystone processing magnitude value comparison of FPGA implementation results and the theoretical results



(b) Keystone 处理的 FPGA 实现结果与理论结果的相对误差值
 (b) The relative difference of Keystone processing results between FPGA implementation and the theoretical ones

图 7 Keystone 处理的 FPGA 实现与理论结果比较结果

Fig. 7 The Keystone processing comparison of FPGA implementation results and the theoretical results

从图7可以看出,采用本文给出的Keystone处理架构处理结果与理论结果一致,最大相对误差不大于 $10e-8$ 。

4.2 Keystone处理架构资源与性能总结

本文的Keystone处理架构的主频可达200MHz,需要的资源与最大可支持的脉冲数与CZT变换运算核个数相关,处理时间与要处理的频点个数(对应时域距离门)有关,表2为支持最大脉冲数2048(可向下兼容)的Keystone变换的资源消耗与处理性能情况。

表2 浮点复数Keystone变换在FPGA中实现的性能总结
Table 2 The performance summary of the FPGA implementation for the floating complex Keystone transform

序号	并行度	Slice LUT (共 433200)	Slice Register (共 866400)	RAM (共 1470)	DSP (共 3600)	1024 频点处 理时间 (ms)	备注
1	1	38964	52812	34.5	178	23.4	
2	2	78522	108171	114	416	11.8	
3	4	155534	213651	227	820	5.95	
4	8	309558	424611	453	1628	3.05	

由表2可知,当并行度为1时,处理1024个频点需要约23.4ms,平均每个频点处理时间小于 $24\mu\text{s}$ 。当并行度越高时,消耗的计算资源也越多,处理时间就越短,架构可以实现运算资源和处理性能的互换。

5 结束语

脉冲多普勒雷达往往通过增加高速小目标的驻留时间来达到提升目标检测和成像性能的目的,但由此导致的目标跨距离单元走动现象会严重影响雷达相参积累的性能。采用Keystone变换可以有效补偿距离单元走动,但Keystone变换计算复杂度高,在工程上实现实时处理极为困难。本文提出了一种并行度可配置的Keystone实时处理架构,支持增加并行度来提升处理性能,实现资源与处理性能的互换。通过仿真和板上验证表明,本文的Keystone处理架构十分有效,在并行度为1的情况下,平均单频点2048脉冲的Keystone处理需小于 $25\mu\text{s}$,最大相对误差小于 $10e-8$,满足Keystone高性能处理需求。

参考文献

- [1] YANG Gang, LUO Haikun, TIAN Jing, et al. Long term integration algorithm for high-dynamic target[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2016, 27(5): 979-985.
- [2] DAI Zuoning, ZHANG Xingan, FANG Hui, et al. High accuracy velocity measurement based on Keystone transform using entropy minimization[J]. Chinese Journal of Electronics, 2016, 25(4): 774-778.
- [3] 罗丁利, 向聪. 一种基于Keystone变换的运动目标相参积累方法[J]. 现代雷达, 2017, 39(10): 49-55.
LUO Dingli, XIANG Cong. An algorithm for moving target coherent integration based on Keystone transform[J]. Modern Radar, 2017, 39(10): 49-55.
- [4] 赵杰, 郭德明, 陈果, 等. 基于改进Keystone变换的高速目标参数积累方法[J]. 现代雷达, 2016, 38(4): 34-37.
ZHAO Jie, GUO Deming, CHEN Guo, et al. A method of high-velocity target coherent integration based on improved Keystone transform[J]. Modern Radar, 2016, 38(4): 34-37.
- [5] 高玉祥, 张兴敢, 柏业超. 基于Keystone变换的高速运动目标检测方法研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2014, 50(1): 30-34.
GAO Yuxiang, ZHANG Xinggan, BAI Yechao. Research on high-velocity targets detection based on Keystone transform[J]. Journal of Nanjing University (Nature Science), 2014, 50(1): 30-34.
- [6] 田超, 文树梁, 杜智远. 高阶运动目标的长时间相参积累算法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(6): 1229-1236.

- TIAN Chao, WEN Shuliang, DU Zhiyuan. Long time coherent integration algorithm for moving targets with high order motion[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2015, 37(6): 1229–1236.
- [7] 战立晓, 汤子跃, 朱振波. 高机动小 RCS 目标长时间相参积累检测新方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2013, 35(3): 512–516.
- ZHAN Lixiao, TANG Ziyue, ZHU Zhenbo. Novel method of long term coherent integration detection for maneuvering small RCS targets[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(3): 512–516.
- [8] 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(自然科学版)*, 2013, 40(2): 99–102.
- ZHAO Yongbo, ZHOU Xiaopei, WANG Juan. Generalized Keystone transform algorithm for dim moving target detection[J]. *Journal of Xidian University*, 2013, 40(2): 99–102.
- [9] 张卫杰, 高昭昭, 许博. 基于 Keystone 变换的警戒雷达信号处理[J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(9): 2007–2011.
- ZHANG Weijie, GAO Zhaozhao, XU Bo. Novel signal processing method for surveillance radar based on Keystone transform[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(9): 2007–2011.
- [10] 武洋, 夏忠婷. 低信噪比下基于 Keystone 变换的高速多目标检测[J]. *计算机与数字工程*, 2016, 44(4): 625–629.
- WU Yang, XIA Zhongting. Fast maneuvering multiple targets' detection at low SNR level based on Keystone transform[J]. *Computer and Digital Engineering*, 2016, 44(4): 625–629.
- [11] 杨利超, 高悦欣, 邢孟道. 基于广义 Keystone 和频率变标的微波光子 ISAR 高分辨实时成像算法[J]. *雷达学报*, 2019, 8(2): 215–223.
- YANG Lichao, GAO Yuexin, XING Mengdao, et al. High resolution microwave photonics radar real-time imaging based on generalized Keystone and frequency scaling[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(2): 215–223.
- [12] 贺小慧, 张龙. 基于广义 Keystone 变换的机载雷达舰船目标 ISAR 成像[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2013, 43(6): 885–889.
- HE Xiaohui, ZHANG Long. Airborne radar ISAR imaging of ship target based on generalized Keystone transform[J]. *Journal of Northwest University (Nature Science Edition)*, 2013, 34(6): 885–889.
- [13] 万俊, 周宇, 张林让, 等. 基于时间反转和降价 Keystone 的 SAR-GMTI 快速聚焦方法[J]. *航空学报*, 2018, 39(6): 1–10.
- WAN Jun, ZHOU Yu, ZHANG Linrang, et al. A fast SAR-GMTI focusing method based on time reversal and reduced-order Keystone[J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2018, 39(6): 1–10.
- [14] 帅晓飞, 朱玉军, 詹旭. 基于 Keystone 变换的弱目标积累检测级工程实现方法[J]. *火控雷达技术*, 2018, 47(3): 26–30.
- SHUAI Xiaofei, ZHU Yujun, ZHAN Xu. Weak target accumulation detection based on Keystone transform and implementation methods in engineering[J]. *Fire Control Radar Technology*, 2018, 47(3): 26–30.
- [15] 高原. 多秒冲宽带雷达目标检测方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- GAO Yuan. Research on target detection of multi pulse wideband radar[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [16] 孙健, 韩文俊, 凌元. Chirp-Z 变换 FPGA 流水架构设计与实现[J]. *信息技术与信息化*, 2018(8): 24–26.
- SUN Jian, HAN Wenjun, LING Yuan. FPGA pipelined architecture design and implementation for Chirp-Z transform[J]. *Information Technology and Information*, 2018(8): 24–26.

[作者简介]

- 孙 健 1987 年生, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为雷达信号处理算法及加速处理架构设计。
- 凌 元 1987 年生, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为雷达信号处理算法及加速处理架构设计。
- 韩文俊 1984 年生, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为雷达信号处理算法及系统处理架构设计、软件化雷达体系架构等。