

基于 SPECAN 处理的斜视 SAR 实时成像 算法及其 FPGA 实现

李学仕, 梁毅, 李蓓蕾, 邢孟道, 张亢

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要: 斜视合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)成像具有广阔的应用前景。首先提出一种基于 SPECAN 算法的斜视 SAR 实时成像处理方法, 具有运算量小、操作简单的特点。针对 SPECAN 处理带来的图像扇形畸变, 提出采用 Sinc 插值校正方位采样间隔空变性的方法, 实现图像扇形畸变的校正。在此基础上采用 FPGA(field programmable gate arrays, FPGA)实时编程实现, 重点阐述基于“空域滤波”思想的 Sinc 插值模块设计。实测数据处理结果验证了该算法的有效性及其 FPGA 实时实现的可行性。

关键词: 斜视 SAR; SPECAN 算法; Sinc 插值; 实时成像; FPGA

中图分类号: TN 957

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.12.10

Real-time imaging algorithm for squint SAR based on SPECAN processing and its implementation in FPGA

LI Xue-shi, LIANG Yi, LI Bei-lei, XING Meng-dao, ZHANG Kang

(National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Due to a wide application of squint synthetic aperture radar (SAR), a real-time imaging algorithm of squint SAR based on SPECAN processing is firstly presented, which is characterized by its small amount of computation and convenient operation. To cope with the sector distortion of SPECAN processing, a Sinc interpolation approach removing the varying of azimuth sampling grid distance is proposed. Based on the aforementioned, real-time programming of field programmable gate arrays (FPGA) implemented, emphasizing on the design of Sinc interpolation based on the spatial filtering approach. The good experimental images validate the effectiveness of this algorithm and the feasibility of implementation in FPGA.

Keywords: squint SAR; SPECAN algorithm; Sinc interpolation; real-time imaging; FPGA

0 引言

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)具有全天时、全天候、远距离成像等特点, 可以大大提高雷达对目标信息的捕获能力, 因而成为雷达技术的热门研究领域。用于战场侦察、资源勘探、地形测绘的 SAR 一般都采用正侧视成像模式, 然而许多应用场合需要进行斜视观测, 如战斗机、轰炸机、导弹精确末制导等, 需提前观测斜前方情况。而且斜视 SAR 具有区外探测能力, 即可以不直接飞越某一地区而能对该区域的地物目标进行观测, 提高了载机平台的安全性及隐蔽性, 这对于现代条件下局部战争的战场侦察具有重要意义。

现有的斜视 SAR 成像算法主要有基于距离多普勒

(range-doppler, R-D)的改进算法^[1-2]、基于 CS(chirp scaling, CS)的改进算法^[3]以及 NCS(nonlinear chirp scaling, NCS)算法^[4-5]。基于 RD 的改进算法对方位向处理采用匹配滤波的方式: 分别对每一个距离单元的方位向数据和参考函数作 FFT, 然后复乘, 再做 IFFT 实现方位向的脉压, 整个处理包含三次 FFT 和一次复乘。基于 CS 的改进算法以及 NCS 算法可以处理更大斜视角以及更高分辨率的情况, 但由于本身操作比较复杂, 在工程实现时一般不采用。相比而言, SPECAN 算法处理则较为简单, 其方位向只需要一次复乘(Deramp 操作)和一次 FFT。直观上 SPECAN 算法运算量要小很多, 然而 SPCEAN 处理的直接 FFT 操作会带来图像的扇形畸变, 进一步的校正过程需要庞大的运算开销, 从而限制了 SPECAN 算法的工程应用。

收稿日期: 2011-05-09; 修回日期: 2011-07-12。

基金项目: 国家自然科学基金(60890072); 中央高校基本科研业务费专项资金(JY10000902031)资助课题

作者简介: 李学仕(1988-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为雷达成像。E-mail: lixueshi@stu.xidian.edu.cn

近年来,采用 FPGA(field programmable gate arrays, FPGA)进行实时处理取得了飞速发展,这主要是由于 FPGA 采用硬件并行处理架构,数据吞吐率高、资源丰富,易于实现高度并行、流水处理的特点。由于 SAR 成像本身具有大数据量、运算复杂度相对较高、流程相对固定的特点,因此 FPGA 成为 SAR 实时成像处理的最佳选择。如果对于 SPECAN 算法的方位处理和后续的图像畸变校正能够采用 FPGA 流水处理完成,则能充分发挥 SPECAN 算法的优势。以此为出发点,本文研究基于 SPECAN 算法的斜视 SAR 实时成像处理方法及其 FPGA 实现。

1 基于 SPECAN 算法的斜视 SAR 实时成像处理

1.1 基于 SPECAN 算法的斜视 SAR 成像算法

假设雷达发射线性调频信号,则接收端经相干检波处理后的基带信号可以表示为^[6]

$$s(\hat{t}, t_m; R_0) = a_r(\hat{t} - 2R(t_m; R_0)/c) a_a(t_m) \times \exp(j\pi\gamma(\hat{t} - 2R(t_m; R_0)/c)^2) \exp(-j4\pi R(t_m; R_0)/\lambda) \quad (1)$$

式中, \hat{t} 为距离快时间; t_m 为方位慢时间; c 为光速; R_0 为波束中心线扫过目标时的斜距; $R(t_m; R_0)$ 为瞬时斜距; $a_r(\cdot)$ 和 $a_a(\cdot)$ 分别为雷达发射线性调频(linear modulation frequency, LMF)信号的距离窗函数和方位窗函数; γ 为发射信号的调频率; λ 为载波波长。在式(1)中,第一指数项为距离向信号,反映目标的距离向位置,第二指数项包含方位调制相位,决定方位向的聚焦。

基于 SPECAN 算法的斜视 SAR 实时成像处理研究以式(1)回波信号表达式为基础,针对斜视 SAR 信号表现为大距离走动和小距离弯曲的特点,这里主要考虑距离走动的影响,而忽略距离弯曲的情况。整个实时成像处理包括距离向处理、距离走动校正和方位向处理等操作,具体的计算过程可参见文献[6-10],这里只给出其计算结果如式(2)。

$$s(\hat{t}, f_a; R_0) = A \operatorname{sinc} \left[B \left(\hat{t} - \frac{2(R_0 + x_n \sin \theta_0)}{c} \right) \right] \cdot \operatorname{sinc} \left[T_s \left(f_a - K_a \frac{x_n}{v} \right) \right] \cdot \exp \left(-j4\pi \frac{R_0}{\lambda} \right) \exp \left(-j4\pi \frac{x_n \sin \theta_0}{\lambda} \right) \quad (2)$$

式中, A 为复常数; B 为发射信号带宽; v 为飞行速度; x_n 为 t_m 时刻目标与参考原点的距离; θ_0 为波束中心射线指向的斜视角; T_s 为方位处理时间; f_a 为方位多普勒频率; K_a 为方位多普勒调频率。从式(2)可以看出,脉压后的信号在距离向和方位向均是 sinc 函数,而且在距离向存在 $x_n \sin \theta_0$ 的几何形变,所以处理完成后还需要进行几何形变的校正。

1.2 扇形畸变

由于方位 Deramp 处理时,参考函数对应的方位调频率是随距离空变的,直接 FFT 成像会造成图像的扇形畸变^[11]。下面通过公式解释这一现象,假设脉冲重复频率为 PRF ,方位采样点数为 N ,可得频域采样间隔为 PRF/N ,

相应的时域间隔为

$$\Delta t = PRF/N/K_a \quad (3)$$

由于 K_a 是随距离空变的,使得方位采样间隔 Δt 随距离变化,引起图像畸变。

然而,这种形变并不是在所有的情况下都需要考虑,下面通过公式来分析说明影响这种扇形畸变的因素。假设场景的最近和最远斜距分别是 R_{\min} 和 R_{\max} ,则由于扇形畸变引起的成像场景远距和近距的方位长度差为

$$\Delta x = \left| \frac{PRF}{N_1} \cdot \frac{v}{K_{a_{R_{\max}}}} \cdot N_2 - \frac{PRF}{N_1} \cdot \frac{v}{K_{a_{R_{\min}}}} \cdot N_2 \right| = \frac{PRF \cdot N_2 \cdot \lambda}{2 \cdot N_1 \cdot v} \cdot (R_{\max} - R_{\min}) \quad (4)$$

式中, $K_{a_{R_{\max}}} = -\frac{2v^2}{\lambda R_{\max}}$ 为远距对应的方位调频率; $K_{a_{R_{\min}}} = -\frac{2v^2}{\lambda R_{\min}}$ 为近距对应的方位调频率; N_1 为方位向的采样点数; N_2 为场景支撑区对应的点数。

场景中心处对应的方位向成像长度为

$$x_c = \left| \frac{PRF}{N_1} \cdot \frac{v}{K_{a_{R_s}}} \cdot N_2 \right| = \frac{PRF \cdot N_2 \cdot \lambda}{2 \cdot N_1 \cdot v} \cdot R_s \quad (5)$$

式中, $K_{a_{R_s}} = -\frac{2v^2}{\lambda R_s}$ 为场景中心对应的方位调频率; R_s 为场景中心处的斜距。假设以场景中心作为参考,则衡量扇形畸变程度的量可以定义为

$$\frac{\Delta x}{x_c} = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_s} \quad (6)$$

从式(6)可以看出,影响扇形畸变程度的因素可以归结为测绘带宽与场景中心距离的比值,当比值较小时,不需要考虑由于扇形畸变对成像处理带来的影响,当比值较大时,则不能忽略由扇形畸变带来的影响。本文考虑扇形畸变对成像处理影响不能忽略的情况。

为了校正图像的畸变,已有文献提出解决办法,一种近似的校正方法是随着 K_a 的减小而增加方位向 FFT 处理的点数,使得 NK_a 恒定,从而保证时域输出采样间隔的等间隔化。另一种方法是采用基于 chirp-z 变换的变标处理^[8],通过变尺度操作来调整采样间隔。然而这两种方法在实时成像处理应用时都面临困难:第一种方法需要调整每次 FFT 处理的点数,无法保证每次处理点数都是 2 的幂次方;第二种方法则需要庞大的运算开销。基于这种情况,本文提出一种基于 sinc 插值校正图像畸变的新方法,易于实时处理。

1.3 sinc 插值校正图像扇形畸变

由第 1.2 节分析,图像扇形畸变是由于对不同距离单元采样间隔不一致造成的,如果能够设法将不同距离单元方位采样间隔调整成一样,则可以校正扇形畸变。图像采样间隔的调整实际上是一个重采样的过程,很容易想到采用插值来实现。由于 sinc 插值核可以选取的较短,方便实时实现,本文考虑采用 sinc 插值校正图像的扇形畸变。

sinc 插值的公式为

$$g(x) = \sum_i g_d(i) \operatorname{sinc}(x - i) \quad (7)$$

式中, $g_d(i)$ 为等间隔采样样本; $\operatorname{sinc}(x) = \sin(\pi x)/(\pi x)$ 为插值核因子; $g(x)$ 即得到的重建信号。利用参考距离单元离散采样点的位移和待插值距离单元的采样间隔可计算得到待插值距离单元的插值位置,利用式(7)可得到插值位置

处的数值。

为了验证 sinc 插值校正图像扇形畸变的有效性,下面通过仿真数据处理结果来说明,其中部分仿真参数如表 1 所示。

表 1 成像仿真参数

参数	数据	参数	数据
载波波长/m	0.03	脉冲持续时间/ μs	2
发射信号带宽/MHz	80	天线长度/m	0.8
脉冲重复频率/Hz	800	载频/GHz	10
载机飞行速度/(m/s)	100	采样率/MHz	100
测绘带宽度/m	400	场景中心距离/m	1 500

假设场景中沿矩形对称分布 9 个点目标,两两之间的方位向间隔为 15 m,距离向间隔为 280 m。图 1 为点目标仿真处理结果,其中图 1(a)为先 Deramp、后直接 FFT 成像结果,由于方位 Deramp 处理时,参考函数对应的方位调频率是随距离空变的,直接 FFT 成像会使得方位向上的时域采样间隔随距离变化,引起图像的扇形畸变,从图中可以看出,原本沿矩形对称分布的点目标成像后变为倒置的“梯形分布”,且方位向两两之间的实际间隔为 15 m,由于 SPECAN 处理使得方位向远距存在压缩现象,因而从图中看到方位向每两点之间的间距都没有达到 15 m(这里以场景近距作为参考距离)。图 1(b)为 FFT 成像后采用 sinc 插值校正图像畸变的处理结果,由于 sinc 插值操作将不同距离单元的采样间隔调整成一样,因而成像结果仍然是“矩形分布”,从图中可以看到,由于校正了图像的扇形畸变,使得方位向每两点之间的距离又达到了 15 m,这也清晰表明,sinc 插值可以校正图像的畸变,即消除图像畸变。

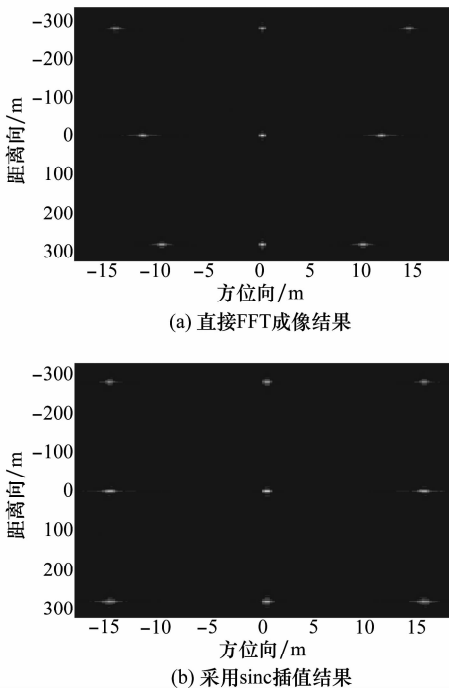


图 1 点目标仿真处理结果

1.4 算法运算量分析

现有的斜视 SAR 成像算法基于 RD 的改进算法和本文基于 SPECAN 算法的实时成像方法对于距离向处理基本相同,这里运算量分析主要针对方位向处理,而且主要考虑复乘次数。

基于 SPECAN 算法的方位处理需要一次复乘(Deramp 操作)和一次 FFT 运算,假设方位向处理点数为 N ,则总的复乘次数为

$$Num_{SPECAN} = (N/2) \log_2(N/2) + N \quad (8)$$

而改进的 RD 算法对于方位向处理则需要三次 FFT 和一次复乘,同样在方位向处理点数为 N 时,总的复乘次数为

$$Num_{RD} = (3N/2) \log_2(N/2) + N \quad (9)$$

可见如果单纯的从方位处理的角度来说,SPECAN 算法的运算量相对于改进的 RD 算法要省很多。

SPECAN 算法方位处理完成后还需要进行图像畸变校正,本文采用 sinc 插值的方法来完成。由于 sinc 插值是一个乘累加操作,采用 FPGA 实时实现时,可以采用 FPGA 内部的乘法器和加法器“流水”处理完成,因此如果采用 FPGA 实现,则基本不消耗运算时间。

2 实时成像处理的 FPGA 实现

2.1 算法处理流程

根据以上基于 SPECAN 算法的斜视 SAR 实时成像算法描述,确定其处理流程如图 2 所示:首先对录取回波数据进行距离向的脉冲压缩,脉压后进行点数截取,之后估计多普勒中心,构造走动校正函数完成距离走动校正。距离走动校正后的数据沿方位向分子孔径估计多普勒调频率,从多普勒调频率中分离运动误差信息,完成平台非平稳运动的补偿。接下来进行方位向处理,包括方位 Deramp 处理、方位 FFT 成像、基于 sinc 插值校正图像扇形畸变、多视处理和几何形变校正,之后就可以得到输出图像。

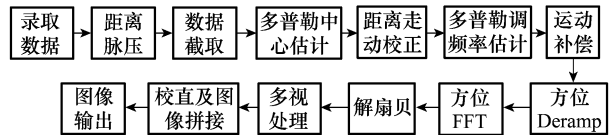


图 2 基于 SPECAN 算法的斜视 SAR 实时成像流程

2.2 基于“空域滤波”的 sinc 插值设计

实时成像处理的距离压缩 FPGA 设计、方位处理 FPGA 设计等已经较为成熟,可参见文献[12-17],这里重点考虑采用 sinc 插值校正图像扇形畸变的 FPGA 实现。图像扇形畸变是由于对场景近距、远距采样间隔不一致造成的,采用 sinc 插值可以调整近距、远距的采样间隔,从而校正图像扇形畸变。

本文插值设计时,sinc 插值核函数长度取为 8,量化位

移取为采样间隔的 $1/128$, 这可以综合考虑精度和资源利用来确定。由于插值是一个乘累加操作, 相当于数据经过一个滤波器, 只是滤波器系数需要实时调整; 另一方面, 待插值数据是连续输入的, 为了保证插值后输出数据的连续性, 借鉴空域滤波的思想, 利用 FPGA 内部丰富的存储资源和乘法器资源, 设计一种基于“空域滤波”思想的 sinc 插值模块, 其 FPGA 实现框图如图 3 所示。

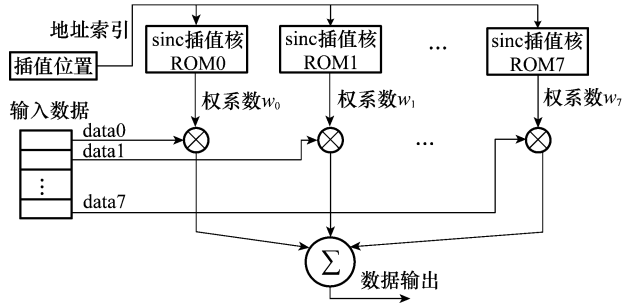


图 3 sinc 插值的 FPGA 实现

插值位置通过参考距离单元与待插值距离单元的采样间隔确定(由式(3)可知, 近距场景的采样间隔比远距场景的小, 因而对图像进行 sinc 插值操作时, 选取离航线最近的距离单元作为参考距离), 用参考距离单元离散采样点的位移除以待插值距离单元的采样间隔, 便可得到插值位置, 其中插值位置的整数部分用于控制输入数据的滑动, 小数部分用于确定 sinc 查找表的查找位置, 通过对 sinc 查找表的查找, 便可得到调整后的权系数。本文 sinc 插值核的量化位移取为采样间隔的 $1/128$, 所以 sinc 插值核系数需要 8 个存储深度为 128 的 ROM 进行存储, 每个 ROM 存储相邻两采样点之间 sinc 插值核函数的量化系数。这样, 通过权系数与输入数据进行乘累加操作后输出, 就完成了整个 sinc 插值操作的流水处理。

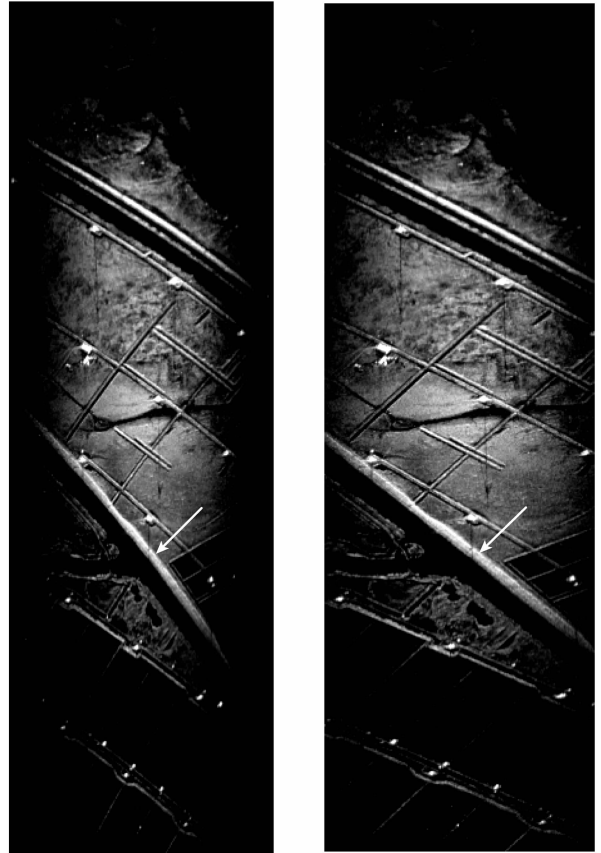
3 实测数据处理结果与分析

下面通过实测数据处理进行说明, 雷达相关参数如下: 信号带宽 400 MHz, 脉冲重复频率 1 000 Hz, 脉宽 $32 \mu\text{s}$, 载频 17.15 GHz, 斜视角 45° , 场景中心距离 8 220 m, 载机飞行高度 1 500 m, 飞行速度 64 m/s。

图 4 为 FPGA 实时处理得到的图像, 其中图 4(a) 为先 Deramp、后直接 FFT 成像结果, 图 4(b) 为图 4(a) 基础上进一步采用 sinc 插值校正图像畸变的结果。对比图 4(a)、图 4(b) 可以发现, 图 4(a) 图像产生了严重的“倒梯形”扇形畸变, 如果以场景中心为参考, 相当于对近距图像存在“拉伸”, 对远距图像存在“压缩”。这从图像中的细节可以明显看出, 如图中白色箭头指向的轨迹, 在图 4(a) 中由于扇形畸变导致远距场景存在压缩, 使轨迹产生了弯曲的形变。这种形变最终会影响两幅图像的拼接, 使得近距、中心、远距

图像无法同时进行良好的拼接。而对于图 4(b), 由于采用 sinc 插值校正了图像畸变, 使得成像结果仍然是沿矩形分布, 这样使得图像最终能够进行良好的拼接。

图 5 为 FPGA 实时处理得到的 9 幅图像的拼接结果, 图像中已经校正了由距离走动校正和斜视时数据录取方式带来的几何形变, 从图中可以看到斜视角度约为 45° , 从拼接结果可以看出 FPGA 对扇形畸变的校正结果较好。



(a) 方位FFT后直接成像结果

(b) 采用sinc插值后结果

图 4 实时成像结果

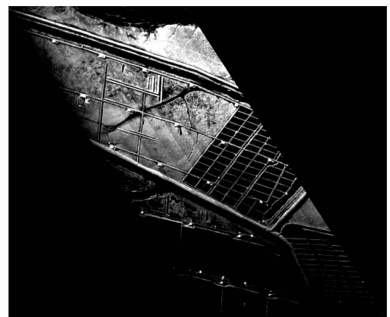


图 5 拼接后结果

以上实测数据的处理结果进一步验证了本文处理方法的有效性。

4 结束语

本文研究了基于 SPECAN 算法的斜视 SAR 实时成像处理方法,由于 SPECAN 算法独特的方位处理方式,带来了图像的扇形畸变。针对这种情况,本文提出了一种适于 FPGA 进行实时处理的 sinc 插值校正图像扇形畸变的新方法,并通过仿真结果验证了 sinc 插值的有效性。另外,根据 SPECAN 算法的成像原理,确定了基于 SPECAN 算法的斜视 SAR 实时成像处理流程,并详细介绍了基于“空域滤波”思想的 sinc 插值的 FPGA 设计。文中最后给出了实测数据的处理结果,通过图像良好的拼接结果,进一步验证了本文处理方法的有效性和准确性。

参考文献:

- [1] Wang S Y, Su Z G, Wu R B. Modified range-Doppler imaging method for the high squint SAR [C] // *Proc. of the IEEE Radar Conference*, 2010: 1450 - 1453.
- [2] Xiao J, Hu X C. A modified RD algorithm for airborne high squint mode SAR imaging [C] // *Proc. of the 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar*, 2007: 444 - 448.
- [3] Wang K Z, Liu X Z. Squint mode SAR imaging with range-walk removal [C] // *Proc. of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2005: iv/1113 - 1116.
- [4] Sun G C, Jiang X W, Xing M D, et al. Focus improvement of highly squinted data based on azimuth nonlinear scaling [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49 (6): 2308 - 2322.
- [5] Wang K Z, Liu X Z. Improvement of non-linear chirp scaling algorithm [C] // *Proc. of the 3rd International Conference on Computational Electromagnetics and Its Applications*, 2004: 391 - 394.
- [6] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 125 - 150. (Bao Z, Xing M D, Wang T. *Radar imaging technology* [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005: 30 - 45.)
- [7] Pei L, Jin Y, Lomng T, et al. DSP implementation of SPECAN algorithm [C] // *Proc. of the IET International Radar Conference*, 2009: 1 - 4.
- [8] Lanari R, Hensley S, Rosen P A. Chirp z-transform based SPECAN approach for phase-preserving ScanSAR image generation [J]. *IEEE Proceeding Radar, Sonar Navigation*, 1988, 145(5): 254 - 261.
- [9] An D X, Huang X T, Zhou Z M. A new deramping algorithm for airborne squint-mode spotlight SAR data processing [C] // *Proc. of the 2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar*, 2009: 84 - 88.
- [10] Lanari R, Hensley S, Rosen P. Modified SPECAN algorithm for ScanSAR data processing [C] // *Proc. of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings*, 1998: 636 - 638.
- [11] 梁毅, 王虹现, 张龙, 等. 基于二维 Chirp-Z 变换的前视 FMCW 雷达成像新方法 [J]. 中国科学: 信息科学, 2010, 40: 719 - 731. (Liang Y, Wang H X, Zhang L, et al. A new forward looking mode FMCW SAR imaging method based on Chirp Z-transform [J]. *China Science: information Science*, 2010, 40: 719 - 731.)
- [12] Wang X J, Wei S H, An G C. System design and experimental analysis of digital pulse compression based on FPPA [C] // *Proc. of the Intelligent Information Technology Application Workshops*, 2008: 757 - 760.
- [13] Xie Y Z, Long T. Implementation of spaceborne SAR imaging processor based on FPGA [C] // *Proc. of the 9th International Conference on Signal Processing*, 2008: 2318 - 2321.
- [14] Sun Z J, Liu X M, Ji Z X. The design of SAR signal processor's data compress system in FPGA [C] // *Proc. of the International Symposium on Intelligent Information Technology Application Workshops*, 2008: 769 - 772.
- [15] Xie Y Z, Long T. Implementation of two dimensional pulse compression based on embedded processor in FPGA [C] // *Proc. of the IET International Radar Conference*, 2009: 1 - 4.
- [16] Sun Z J, Liu X M. The realization of SAR real-time signal processor by FPGA [C] // *Proc. of the International Conference on Computer Science and Software Engineering*, 2008: 79 - 82.
- [17] Bian M M, Gao L N, Xie Y Z, et al. High-performance system design of SAR real-time signal processing [C] // *Proc. of the International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCSM)*, 2010: V12/126 - 129.