

文章编号: 1001- 2486(2010) 01- 0057- 06

# 机载 UWB SAR 实时信号处理算法研究\*

李建阳<sup>1</sup>, 常文革<sup>1</sup>, 王 亮<sup>2</sup>, 李悦丽<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 北京信息技术研究所, 北京 100082)

**摘要:** 机载超宽带合成孔径雷达(UWB SAR)实时信号处理具有大数据量、大计算量等特点。用于实时信号处理的 NCS 算法需要较大的存储空间, 针对这个问题, 提出了改进的 NCS 算法, 减小实时成像处理对存储空间的要求。同时, 给出了 UWB SAR 实时信号处理的流程, 分析了前向速度误差对成像质量的影响, 推导了在改进 NCS 算法中基于测量数据的视线误差补偿的性能, 采用仿真数据和实测数据对整个系统的性能进行了验证。

**关键词:** UWB SAR; NCS; 实时信号处理; 运动补偿

**中图分类号:** TN958      **文献标识码:** A

## Real-time Processing of Airborne Ultra-wide Band SAR

LI Jian-yang<sup>1</sup>, CHANG Wen-ge<sup>1</sup>, WANG Liang<sup>2</sup>, LI Yue-li<sup>1</sup>

(1. College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Research Institute of Information Technology, Beijing 100082, China)

**Abstract:** Large data volume and computation burden are the main characteristics of real-time ultra-wide band synthetic aperture Radar (UWB SAR) processing. The nonlinear chirp scaling (NCS) algorithm adopted in the real-time processing needs large data volume. In order to reduce the data volume demand, an improved NCS algorithm is proposed. Meanwhile, the flow of Real-time UWB SAR processing is given, and the effect of forward velocity error is also analyzed, and it can be removed by real-time pulse repeat frequency (PRF) adjusting. The performance of loss of sight (LOS) compensation in improved NCS algorithm based on the data measured is analyzed. Finally, the performances of the algorithm are verified by the simulation and real UWB SAR data.

**Key words:** UWB SAR; NCS; real-time processing; motion compensation

UWB SAR 能够穿透叶簇、浅地表探测隐蔽目标, 是 SAR 系统发展的一个重要方向<sup>[1]</sup>。UWB SAR 信号带宽宽, 频率低, 要实现高分辨率成像, 所需的合成孔径长度非常长, 因此回波的数据量非常大, 同时成像所需的计算量也非常大。大存储量和大计算量是 UWB SAR 实时成像处理的主要特点。

在 UWB SAR 中, 回波信号距离向和方位向的耦合现象非常严重, 采用 NCS 算法可以有效地消除距离向和方位向的高阶耦合项<sup>[2-3]</sup>, 适合于 UWB SAR 成像处理; 但是, NCS 算法需要首先对方位向进行处理, 无法在回波接收的同时进行距离压缩, 去除脉冲持续时间的点数, 而机载 SAR 脉冲持续时间一般很长, 这对实时处理硬件平台的存储空间提出了较高要求。针对 NCS 算法所需的存储量过大的问题, 本文提出了改进的 NCS 算法, 消除标准 NCS 算法所需存储量过大的问题。同时在实时处理中, 需要采用多片 DSP 进行并行处理, 因此, 在成像算法中引入子孔径的结构。

由于 UWB SAR 孔径比较长, 载机的前向速度误差和视线位移误差对成像质量的影响比较大, 因此在成像处理中需要引入运动补偿模块。本文给出了 UWB SAR 实时处理的流程, 通过一阶补偿和二阶补偿消除视线误差的影响<sup>[4-6]</sup>; 针对改进 NCS 算法与标准 NCS 算法流程的不同, 推导了应用于改进 NCS 算法的视线误差补偿算法, 并与应用于标准 NCS 算法的视线误差补偿算法进行了比较, 得出两种补偿算法具有相同的补偿性能。

\* 收稿日期: 2009- 05- 20

作者简介: 李建阳(1981-), 男, 博士生。

## 1 适合于 UWB SAR 实时处理的 NCS 算法

标准 NCS 算法<sup>[2]</sup> 由于在接收回波的同时不能进行距离压缩, 进而将脉冲持续时间所对应的距离向点数去掉, 因此所需的存储空间较大, 这对实时信号处理板的存储空间提出了较高的要求。

为了减小标准 NCS 算法对存储空间的要求, 本文提出了改进的 NCS 算法, 算法流程如图 1 所示。与标准 NCS 算法相比, 在进行实时成像时, 改进的 NCS 算法首先对回波进行距离压缩, 去除脉冲持续时间的点数, 然后再对回波进行方位向 FFT, 将结果存储到 SDRAM 空间中, 再取出一条条距离线, 对距离线补充脉冲持续时间点数, 然后变换到距离频域进行距离逆压缩, 其他步骤与标准 NCS 算法一致。

在改进 NCS 算法中, 由于不需要存储脉冲持续时间所对应的点数, 因此所需的存储空间较标准 NCS 算法有较大的减小。在计算量方面, 与标准的 NCS 算法相比, 改进的 NCS 算法距离逆压缩部分可与三次相位滤波放在一起完成, 不需要增加运算量, 仅需要增加一次距离向 FFT、一次距离向 IFFT 和一次复乘运算, 但同时, 进行方位向 FFT 的方位线条数却减小了脉冲持续时间的点数。因此整个算法的运算量基本不变。

为了验证本文所提算法的可行性, 可从理论上进行分析。正侧视 SAR 回波信号可以表示为

$$s(\hat{t}, t_m, R_B) = a_r \left[ \hat{t} - \frac{2R(t_m, R_B)}{c} \right] a_a(t_m) \cdot \exp\{j\pi\gamma \left[ \hat{t} - \frac{2R(t_m, R_B)}{c} \right]^2\} \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} R(t_m, R_B)\right] \quad (1)$$

其中,  $a_r$ ,  $a_a$  分别为距离向和方位向的窗函数,  $\hat{t}$  为距离快时间,  $t_m$  为方位慢时间,  $R_B$  为雷达到目标的垂直斜距,  $\gamma$  为调频率,  $\lambda$  为波长,  $R(t_m, R_B)$  为雷达到目标的瞬时斜距。

在标准 NCS 算法中, 式(1)变换到二维频域可以表示为

$$s(f_r, f_a, R_B) = a_r(\bullet) a_a(\bullet) \exp(-j\pi \frac{f_r^2}{\gamma}) \exp(-j2\pi f_a \frac{X_n}{V}) \exp[-j4\pi R_B \sqrt{\frac{(f_c + f_r)^2}{c^2} - (\frac{f_a}{2V})^2}] \quad (2)$$

其中,  $f_r$  为距离频率,  $f_a$  为方位频率。

在改进的 NCS 算法中, 首先对回波进行距离压缩, 距离压缩后回波信号可以表示为

$$s(\hat{t}, t_m, R_B) = a_a(t_m) \text{sinc}\left\{\Delta f_r \left[\hat{t} - \frac{2R(t_m, R_B)}{c}\right]\right\} \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} R(t_m, R_B)\right] \quad (3)$$

将式(3)变换到二维频域, 可以表示为

$$s(f_r, f_a, R_B) = a_r(\bullet) a_a(\bullet) \exp\left[-j2\pi f_a \frac{X_n}{V}\right] \exp\left[-j4\pi R_B \sqrt{\frac{(f_c + f_r)^2}{c^2} - (\frac{f_a}{2V})^2}\right] \quad (4)$$

与式(2)相比, 式(3)仅缺少距离线性调频项, 进行距离逆压缩后, 改进 NCS 算法的二维频域表达式

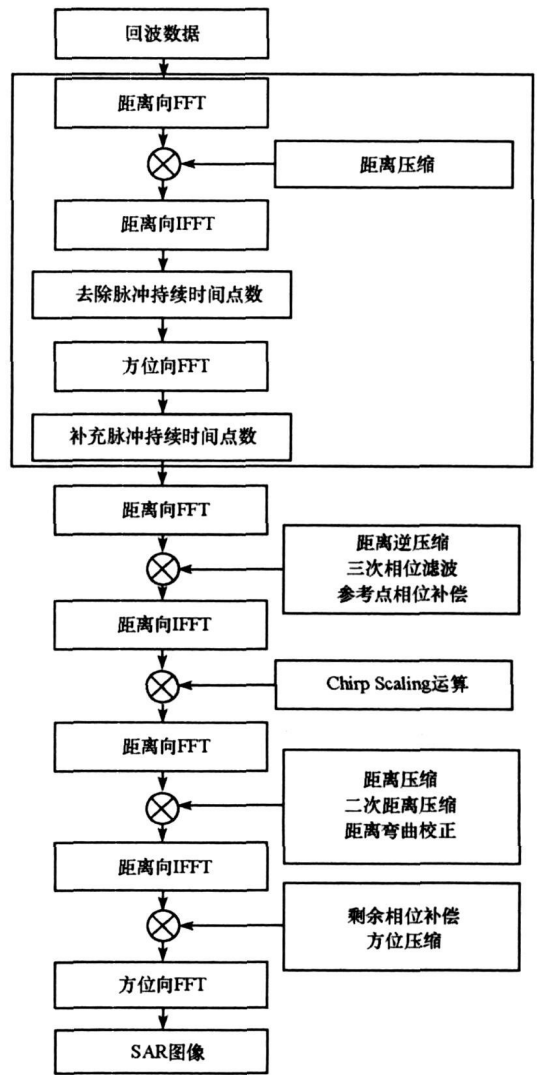


图 1 改进的 NCS 算法流程

Fig. 1 Flow diagram of improved NCS algorithm

与标准 NCS 算法相同, 因此不会对成像效果产生影响。

## 2 UWB SAR 实时信号处理设计

UWB SAR 实时信号处理具有大数据量和大计算量的特点, 在进行实时成像处理中需要引入子孔径结构。图 2 给出了结合改进 NCS 算法的 UWB SAR 实时信号处理的流程, 图中给出了实时处理的各模块。各模块的具体功能将在下面详细分析。

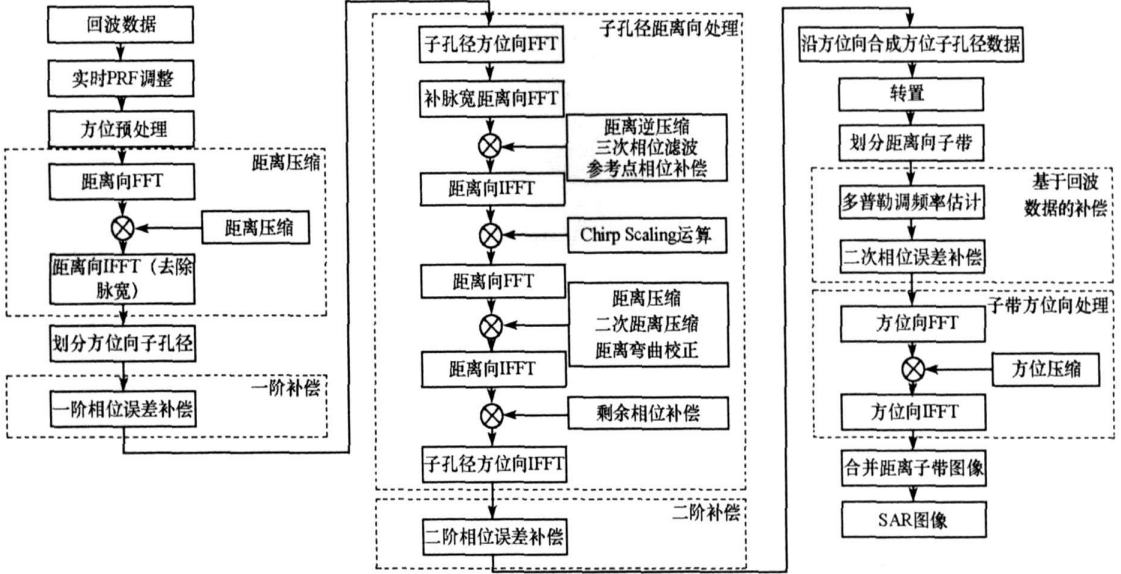


图 2 结合改进 NCS 算法的 UWB SAR 实时信号处理流程

Fig. 2 Flow diagram of real-time UWB SAR processing based on improved NCS algorithm

### 2.1 前向速度误差补偿

前向速度变化主要影响两个方面: 一是引起多普勒调频率的变化, 进而产生相位误差, 造成目标沿方位向的散焦; 二是对距离包络的影响, 使得距离包络偏离同一个距离分辨单元。

UWB SAR 回波信号的距离弯曲量比较大, 同时, 距离弯曲量与载机的前向速度有关, 可以表示为

$$\Delta R(f_a) = R_s \left\{ 1 / \sqrt{1 - [\chi_a / (2V)]^2} - 1 \right\} \quad (5)$$

其中,  $R_s$  为参考斜距,  $\lambda$  为波长,  $f_a$  为方位频率,  $V$  为载机前向速度。

为了说明载机前向速度对距离弯曲校正的影响, 设载机速度为  $V$ , 采用  $V + \Delta V$  进行距离弯曲校正, 这时由于前向速度误差所导致的距离弯曲校正误差为

$$\Delta R_{err}(f_a) = R_s \left\{ 1 / \sqrt{1 - \left[ \chi_a / 2(V + \Delta V) \right]^2} - 1 / \sqrt{1 - [\chi_a / (2V)]^2} \right\} \quad (6)$$

距离弯曲校正的误差由前向速度误差所决定, 为了定量地分析前向速度误差对距离弯曲校正的影响, 图 3 给出了前向速度误差分别为 1m/s 和 2m/s (载频 400MHz, 载机速度 100m/s, 斜距 10km) 时不同多普勒频率处距离弯曲校正误差。从图中可以看出在前向速度误差为 1m/s 时, 多普勒频率 50Hz 处的弯曲量超过 3m, 这时残余的距离弯曲误差将对成像质量产生较大影响。

实时处理流程中的实时 PRF 调整, 就是为了消除载机的前向速度误差。UWB SAR 孔径特别长, 对前向速度误差补偿要求比较高, 同时考虑到运算量的限制, 因此采

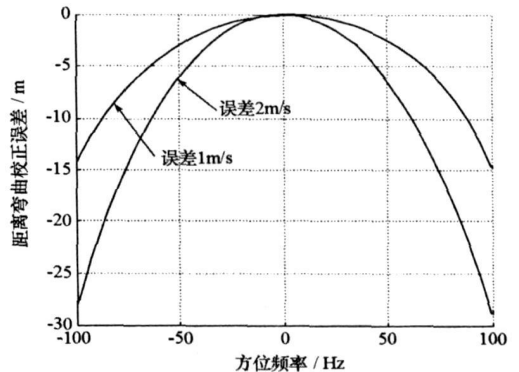


图 3 UWB SAR 速度误差所引起的包络误差  
Fig. 3 The range track of UWB SAR caused by the forward velocity

用基于GPS/INS测量的前向速度对PRF进行实时调整<sup>[4]</sup>。

## 2.2 基于测量数据的运动补偿

通过实时调整PRF消除载机前向速度误差的影响,这时载机还存在沿视线方向的运动误差,同样需要补偿。视线误差的补偿,通常采用一阶补偿和二阶补偿来完成<sup>[5]</sup>,在UWB SAR中考虑到视线误差沿方位向的空变性,需要采用改进的一阶补偿和二阶补偿方法<sup>[6-8]</sup>。在前面的分析中,为了减小实时成像处理所需存储空间过大的压力,采用改进的NCS算法进行实时成像处理,在改进NCS算法中需要首先进行距离压缩,这时一阶补偿就需要在距离压缩后进行,而在标准NCS算法中一阶补偿是在距离压缩前进行,下面我们将从理论上分析两种补偿方式的等价性。

当存在视线运动误差时,SAR与目标之间的斜距可以表示为

$$R(t_m, R_B) \approx \sqrt{[X(t_m) - X_n]^2 + R_B^2} + \frac{R_B}{\sqrt{[X(t_m) - X_n]^2 + R_B^2}} \Delta R = R_0(t_m) + \frac{R_B}{R_0(t_m)} \Delta R \quad (7)$$

其中, $X_n$ 为目标所在位置, $X(t_m)$ 为载机所在位置, $R_0(t_m) = \sqrt{[X(t_m) - X_n]^2 + R_B^2}$ , $\Delta R$ 为视线位移误差。

将式(7)代入到式(1)中,可以得到

$$s(f_r, t_m, R_B) = a_r(f_r) a_a(t_m) \exp(-j\pi f_r^2 / \gamma) \exp\{j \frac{4\pi}{c} [R_0(t_m) + \Delta R \cdot R_B / R_0(t_m)] (f_r + f_c)\} \quad (8)$$

令视线位移由空变和空不变两部分组成,记为

$$\Delta R = \Delta R_{rf} + \Delta R_{diff} \quad (9)$$

将式(9)代入到式(8)中进行化简,可以得到

$$\begin{aligned} s(f_r, t_m, R_B) = & a_r(f_r) a_a(t_m) \exp(-j\pi f_r^2 / \gamma) \exp\{j \frac{4\pi}{c} R_0(t_m) (f_r + f_c)\} \\ & \cdot \exp\{j \frac{4\pi}{c} [\Delta R_{rf} \cdot R_B / R_0(t_m)] f_r\} \exp\{j \frac{4\pi}{c} [\Delta R_{rf} \cdot R_B / R_0(t_m)] f_c\} \\ & \cdot \exp\{j \frac{4\pi}{c} [\Delta R_{diff} \cdot R_B / R_0(t_m)] f_r\} \exp\{j \frac{4\pi}{c} [\Delta R_{diff} \cdot R_B / R_0(t_m)] f_c\} \quad (10) \end{aligned}$$

上式中第3个指数项为补偿距离空不变斜距误差引起的包络偏移,第4个指数项为补偿距离空不变斜距误差引起相位误差,第5个指数项为补偿空变斜距误差引起的包络偏移,第6个指数项为补偿空变斜距误差引起相位误差。

通过式(10)可以看出,距离压缩项与视线误差补偿项是分开的,这也就说明在距离频域进行一阶补偿,可以在距离压缩之后,也可在距离压缩之前,这对补偿效果没有影响。

## 2.3 基于回波数据的运动补偿

由于测量数据存在一定的误差,因此,需要再采用基于回波数据的运动补偿,进一步补偿载机运动非平稳性所产生的相位误差。常用的基于回波数据的运动补偿算法有MD<sup>[10]</sup>、COAA<sup>[11]</sup>等,考虑到运算量的限制,在实时处理中,采用运算量较小的COAA算法估计多普勒调频率。

## 3 仿真及实测数据处理结果

### 3.1 改进NCS算法性能分析

改进的NCS算法与标准NCS算法相比,节省较大的存储空间,而且运算的增加较小,适合于UWB SAR实时信号处理。前面从理论上推导了改进NCS算法与标准NCS算法具有相同的性能,为了进一步验证前面理论分析的正确性,采用仿真回波数据,分别由标准NCS算法与改进NCS算法进行成像处理,仿真参数如表1所示。

表 1 仿真 UWB SAR 回波参数

Tab. 1 The simulation parameters of UWB SRA

载频 (MHz)	带宽 (MHz)	采样频率 (MHz)	PRF (Hz)	参考斜距 (km)	载机速度 (m/s)	方位向分辨率 (m)
400	200	250	500	10	100	1

标准 NCS 算法的成像结果如图 4(a) 所示, 改进 NCS 算法的成像结果如图 4(b) 所示, 点目标的性能指标参数如表 2 所示, 从中可以看出, 改进 NCS 算法与标准 NCS 算法成像性能完全相同。

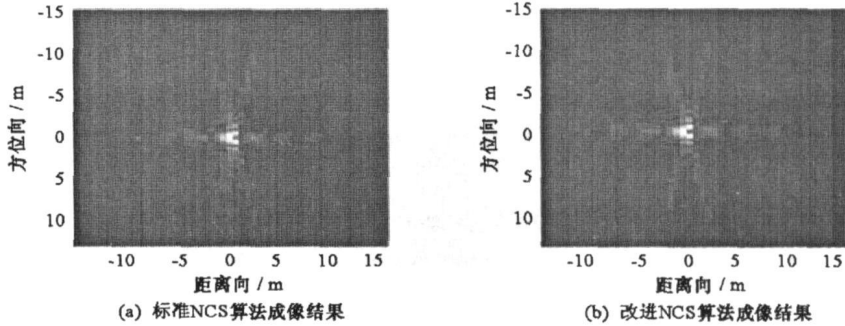


图 4 仿真数据处理结果

Fig. 4 The imaging result of simulation data

表 2 点目标性能参数

Tab. 2 Performance for the point target

	峰值旁瓣比 (dB)		积分旁瓣比 (dB)		分辨率 (m)	
	距离向	方位向	距离向	方位向	距离向	方位向
标准 NCS 算法	- 13. 99	- 14. 62	- 15. 3	- 13. 18	0. 69	0. 88
改进 NCS 算法	- 13. 99	- 14. 62	- 15. 3	- 13. 18	0. 69	0. 88

### 3.2 UWB SAR 实时信号处理结果分析

为了验证 UWB SAR 实时信号处理算法的性能, 采用地面仿真系统, 将事先录取的回波数据通过数据回放卡输入到实时处理硬件平台中进行处理, 从而测试算法的性能以及实时性。

某次实测机载 UWB SAR 回波数据距离向对应点数为 10 240, 每帧回波方位向点数为 11 872 (2 个孔径时间长度), 脉冲持续时间点数为 2500。按照图 2 中的实时处理流程, 采用 7 片 DSP 完成子孔径距离向处理, 7 片 DSP 完成子带方位向处理。若采用标准 NCS 算法, 进行距离向处理的 DSP 需要的存储空间

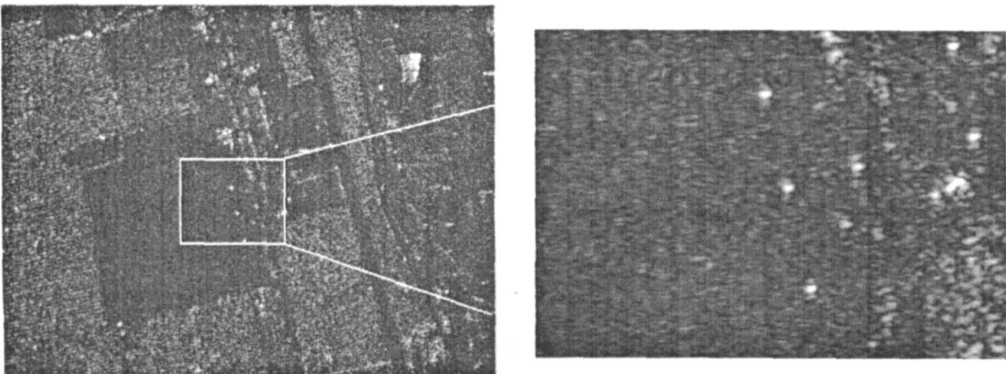


图 5 实测数据处理结果

Fig. 5 The real-time imaging result of real UWB SAR data

为 160MB(这里将子孔径回波方位向点数扩为 2 的幂次), 而采用改进 NCS 算法, 所需要的存储空间为 120MB, 从而减小了实时处理算法对存储空间的要求, 计算量的增加基本上可以忽略。由于缺少 GPS/INS 数据, 因此在实时处理地面系统中, 仅采用了基于回波数据的运动补偿, 实时处理的结果如图 5 所示, 右图为左图方框内目标放大的结果, 聚焦效果良好。

## 4 结论

提出了应用于 UWB SAR 实时信号处理的改进 NCS 算法, 从而降低了实时处理系统对存储空间的要求; 给出了 UWB SAR 实时信号处理的流程, 并对流程中基于测量数据和回波数据的运动补偿模块进行了分析; 最后采用仿真和实测数据验证算法的有效性。基于 GPS/INS 数据的运动补偿将在下一阶段的飞行试验中进行验证。

## 参考文献:

- [1] 周智敏, 黄晓涛, 梁甸农. 机载叶簇穿透超宽带 SAR 系统关键指标设计[J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(5): 63- 68.
- [2] Davidson G W, Cumming I G, Ito M R. A Chirp Scaling Approach for Processing Squint Mode SAR Data[J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(9): 1296- 1299.
- [3] 王亮. 机载超宽带合成孔径雷达实测数据成像处理技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2007.
- [4] 李建阳, 常文革, 李悦丽. UWB SAR 实时 PRF 调整[J]. 现代雷达, 2009, 31(4): 34- 37.
- [5] 薛国义. 机载高分辨超宽带合成孔径雷达运动补偿技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.
- [6] Potsis A, Reigber A, Mittermayer J, et al. Sub-aperture Algorithm for Motion Compensation Improvement in Wide-beam SAR Data Processing[J]. IEE Electronic Letters, 2001, 37(23): 1405- 1406.
- [7] Madsen S N. Motion Compensation for Ultra Wide Band SAR[C]//Proc. of IGARSS, 2001: 1436- 1438.
- [8] 李燕平, 邢孟道, 保铮. 结合非线性 CS 算法的 UWB- SAR 运动补偿[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(4): 514- 519.
- [9] 李建阳, 常文革. 大测绘带 UWB SAR 运动补偿技术研究[J]. 遥感学报, 2009, 13(1): 112- 116.
- [10] 邢孟道. 基于实测数据的雷达成像算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2002.
- [11] Berizzi F, Corsini G. Autofocusing of Inverse Synthetic Aperture Radar Images Using Contrast Optimization[J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(3): 1185- 1191.