

## 机载SAR大斜视角成像算法及其性能分析

汪亮<sup>①②</sup> 禹卫东<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要** 文章研究了机载合成孔径雷达(SAR)在大斜视角下的成像算法,并分析了算法的成像性能。根据大斜视角SAR成像的空间几何模型和回波信号特点,提出了RD算法的改进方案。对改进的RD算法和ECS算法的仿真表明,其成像性能满足了大斜视角下机载SAR成像处理的要求。

**关键词** 合成孔径雷达(SAR), 大斜视角, 改进的RD算法, ECS算法

中图分类号: TP957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)03-0502-05

## Imaging Algorithms and Analysis of Airborne SAR in Large Squint Mode

Wang Liang<sup>①②</sup> Yu Wei-dong<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

<sup>②</sup>(Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** This paper studies image algorithms and analyses imaging quality of air-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) in large squint mode. Based on the spatial geometry model of squint mode air-borne SAR and echo response, a method to improve RD algorithm is introduced in detail, and the flowcharts of this algorithm and Extended Chirp Scaling (ECS) algorithm are given. The simulation results demonstrate that these two algorithms meet the requirements of air-borne SAR imaging in large squint mode.

**Key words** Synthetic Aperture Radar(SAR), Large Squint, Improved Range-Doppler (RD), Extended Chirp Scaling (ECS) algorithm

### 1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)通过在飞机或卫星平台上收集反射回波,并对这些微波信号相干处理得到地面图像。雷达天线的覆盖面积在地面上移动而形成条带状区域,我们称这种模式为条带式SAR成像。在传统的条带模式SAR中,天线指向与平台的飞行航线基本垂直,即正侧视模式。天线的指向也可以向前或向后,通常我们称之为斜视探测模式,并定义斜视角为天线指向与垂直于航线方向之间的夹角。此外,在星载SAR中,虽然可以进行天线指向补偿,但雷达天线与探测带内目标之间仍无法完全垂直,会存在一斜视角。

SAR斜视成像在实用中具有很高的机动灵活性。它通过天线改变波束指向,可以对前方的目标预先成像、对其后方的目标再次成像,这对于现代条件下局部战争的战场侦察具有重要意义。

然而,在大斜视角探测模式下,回波信号存在严重的距离方位耦合和很大的距离徙动,这样,传统算法中的各种近似就会造成斜视模式成像质量下降。要消除耦合,最重要的是通过距离向的滤波操作,即二次距离压缩(Secondary Range Compression, SRC),补偿SAR回波信号中的二次距离方位耦合项;此外,还应该采用精确的距离向和方位向匹配函数,或根据斜视下的实际要求,补偿更高次的耦合项。

在斜视角不大于 $20^\circ$ 时,文献[1]给出了RD算法方位处理的两种SRC处理方法,但其SRC调频斜率表达式并不能适用大斜视角成像。文献[2]通过距离对准和相位补偿,改善了SAR斜视区域成像的方位聚焦性能,但仍未对大斜视角RD算法成像作详细论述。文献[3-5]实现了非线性Chirp Scaling(CS)算法的斜视模式成像,但相比标准CS算法,该算法增加了很多计算量,却仍未解决SRC随距离改变的难题。

本文详细分析了大斜视角下RD算法和标准CS算法成像分辨率下降的机理,从距离迁徙校正(Range Cell Migration Correction, RCMC)、二次距离压缩和方位聚焦3个方面推导

了RD算法的改进方法; 给出了改进的RD算法和扩展的CS算法(Extended Chirp Scaling, ECS)<sup>[6]</sup>的成像处理流程; 最后, 在不同斜视角下, 对参考距离上和参考距离外的点目标进行了成像仿真, 并对比分析了这两种算法的成像性能。

## 2 斜视回波模型分析

### 2.1 斜视SAR回波几何模型

图1为机载SAR斜视空间几何模型。其中,  $\theta_s$  是斜视角,  $H$  是载机飞行高度, 设载机飞行速度为  $v$ ,  $r$  是目标与载机飞行航线间的垂直距离,  $r_c$  是目标P到合成孔径中心的距离,  $t$  是方位向时间,  $t_c$  是载机处于合成孔径中心的时刻。从空间几何关系图上, 我们可以得到雷达与目标间的瞬时斜距:

$$R(t; r) = \sqrt{r_c^2 + [v(t - t_c)]^2 + 2r_c v(t - t_c) \cdot \sin(\theta_s)} \quad (1)$$

$$r_c = \frac{r}{\cos(\theta_s)} \quad (2)$$

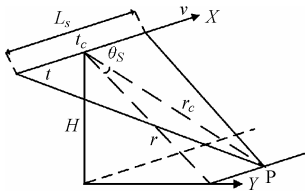


图1 机载SAR斜测视空间几何模型  
Fig.1 Squint mode geometry of airborne SAR

### 2.2 回波信号形式

设SAR发射线性调频信号的包络为  $s_0(\cdot)$ , 带宽为  $B$ , 脉冲持续时间为  $\tau_p$ ,  $K = B/\tau_p$  为调频斜率,  $\tau$  为距离向时间, 则发射信号为

$$p(\tau) = s_0(\tau) \exp\left\{-j\pi \frac{B}{\tau_p} \tau^2\right\} = s_0(\tau) \exp\{-j\pi K \tau^2\} \quad (3)$$

设天线方向图在天线水平波束角内增益恒定, 这里简化为 1;  $c$  为光速,  $\lambda$  为发射信号波长, 则回波信号可以表示为

$$s(\tau, t; r) = s_0\left(\tau - \frac{2R(t, r)}{c}\right) \exp\left\{-j\pi K \left(\tau - \frac{2R(t, r)}{c}\right)^2\right\} \cdot \exp\left\{-j\pi \frac{4}{\lambda} R(t, r)\right\} \quad (4)$$

式(4)中, 第1项表示回波信号包络在距离向的延时, 它决定了信号在距离-多普勒域的弯曲轨迹; 第2项是  $\tau$  的二次相位项, 它决定了距离向的聚焦函数; 第3项与  $\tau$  无关, 决定了信号方位向的匹配函数。

## 3 算法分析

SAR回波信号经过二维FFT变换后可表示为<sup>[8]</sup>

$$S_2(f_t, f_\tau; r) = C \exp\left(j\pi \frac{f_\tau^2}{K}\right) \exp[j\Phi(f_t, f_\tau; r)] \quad (5)$$

$$\Phi(f_t, f_\tau; r) = \phi_0(f_t; r) + \phi_1(f_t; r) f_\tau + \phi_2(f_t; r) f_\tau^2 + \dots \quad (6)$$

式(5)中的  $C$  是傅氏变换得到的复常数。式(6)中的第1项不随距离向频率  $f_\tau$  变化, 它对应的是方位聚焦所需的相位信息; 第2项是  $f_\tau$  的线性项, 它反映了目标的位置和距离徙动大小; 第3项是  $f_\tau$  的二次项, 正是二次距离压缩要补偿的相位; 更高次的项只有在需要进行非常精确的距离徙动校正时才会被补偿<sup>[3]</sup>。

### 3.1 改进的RD算法

RD算法是基于匹配滤波原理的。标准的RD算法把二维移变滤波器近似分解为距离向和方位向两个一维滤波处理, 在距离-多普勒域中使用插值方法校正距离徙动。而在斜视模式下, 必须对标准的RD算法改进: 在距离向进行SRC以补偿高次距离方位耦合, 采用准确的距离徙动计算公式和方位向匹配函数, 否则会造成严重散焦。改进的RD算法成像包括距离向处理, SRC, RCMC和方位向压缩。其算法处理流程图如图2所示。

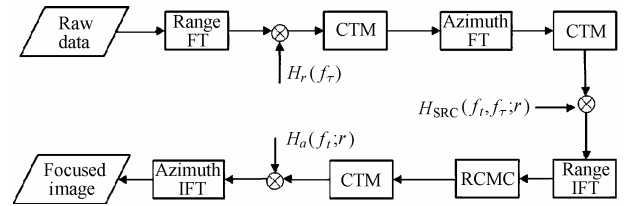


图2 改进的RD算法流程图

Fig.2 Flowchart of Improved Range-Doppler

在第一次距离压缩处理中去掉  $f_\tau$  的二次项后, 回波数据的二维频域表达式为

$$S(f_t, f_\tau; r) = \exp\left\{j\left[\phi_0(f_t; r) + \phi_1(f_t; r) f_\tau + \phi_2(f_t; r) f_\tau^2 + \dots\right]\right\} = \exp\left\{-j\pi \frac{4r \cdot \gamma(f_t)}{\lambda} - j\pi \frac{4r}{c \cdot \gamma(f_t)} f_\tau + j\pi \frac{2}{\left\{\frac{c^2 \cdot \gamma^3(f_t)}{r\lambda[1 - \gamma^2(f_t)]}\right\}} f_\tau^2 - \dots\right\} \quad (7)$$

式(7)中

$$\gamma(f_t) = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_t}{2v}\right)^2} \quad (8)$$

所以, 由式(7)可得, 二次调频斜率为

$$K_{\text{SRC}} = \frac{c^2 \gamma^3(f_t)}{2r\lambda[1 - \gamma^2(f_t)]} \quad (9)$$

信号在距离-多普勒域的迁徙距离为

$$d_r(f_i, r) = \frac{r}{\gamma(f_i)} \quad (10)$$

其弯曲轨迹如图3所示。正侧视下,多普勒频率中心 $f_{dc}$ 约为0,  $(\lambda f_i / (2v))^2$ 远小于0.1,所以式(8)可近似为:  $1 - (1/2)(\lambda f_i / (2v))^2$ 。但在大斜视角下,  $f_{dc}$ 的值可能很大,则式(8)的近似条件不能被满足,必须采取准确计算公式,否则不同 $f_i$ 对应的徙徙距离会与实际值有数十个距离门的误差。

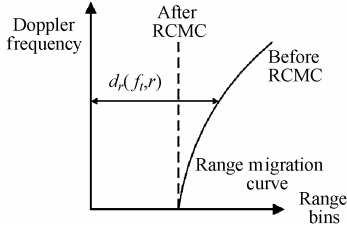


图3 距离-多普勒域中距离弯曲示意图

Fig.3 Range migration curve in Range-Doppler domain

距离徙徙校正RCMC,就是在距离-多普勒域,通过插值消除回波信号随方位向频率的延迟变化,使之仍为沿垂直于距离方向的直线分布。通常的插值算法有最近邻域近似、拉格朗日插值、三次样条插值、截断Sinc插值等<sup>[8]</sup>。

对距离徙徙校正后的信号进行方位向聚焦,如果只是要得到实图像,那么直接对式(7)中的 $\phi_0(f_i; r)$ 进行匹配滤波就可以了;如果是为了进行干涉处理而要得到复数图像,那么还需保留由距离 $r$ 引起的延迟相位项 $-j\pi 4r/\lambda$ ,并对其进行匹配滤波,这里不予考虑。所以,改进RD算法的各匹配函数表达式如下:

$$H_r(f_r) = \exp\left\{-j\pi \frac{f_r^2}{K}\right\} \quad (11)$$

$$H_{SRC}(f_i, f_r; r) = \exp\left\{-j\pi \frac{f_r^2}{K_{SRC}}\right\} \quad (12)$$

$$H_a(f_i; r) = \exp\left\{-j\pi \frac{4r}{\lambda} \gamma(f_i)\right\} \quad (13)$$

### 3.2 ECS算法

CS算法<sup>[9]</sup>充分利用了线性调频信号的属性,首先在距离-多普勒域对信号进行Cs操作(乘以另一个线性调频信号,对距离向的调频信号中心和调频斜率进行微调),使得不同距离上点目标的弯曲轨迹与参考点一致。然后在二维频域统一进行RCMC,通过增加一次复乘和两次转置存储的方法,不但避免了插值处理的巨大运算量,而且克服了插值时因为截断而引入的误差。算法的处理流程如图4所示。

然而,在距离-多普勒域对未经过距离压缩的信号进行Cs操作,会使信号产生一个随距离变化的频谱偏移,大斜视角下,Cs操作引起的距离向频谱移动会使距离向信号超出处理带宽 $F_s$ ,并产生频谱翻褶,造成成像点在距离方向上散焦。ECS算法<sup>[6]</sup>与标准CS算法的处理流程基本是一样的,其主要贡献之一,就是通过采用扩展的Cs因子,很大程度上减小了距离向的频谱移动所造成的距离向散焦,扩展的Cs因子表达

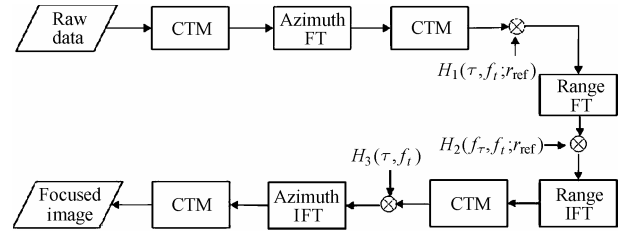


图4 CS算法流程图

Fig.4 Flowchart of chirp scaling algorithm

式为

$$C_s = \frac{\gamma(f_{dc})}{\gamma(f_i)} - 1 \quad (14)$$

文献[9]中详细推导了该算法的各匹配函数表达式,其中Cs操作(平衡徙徙曲线)函数为

$$H_1(\tau, f_i; r_{ref}) = \exp\left\{-j\pi K_s(f_i; r_{ref}) C_s(f_i) [\tau - \tau_{ref}(f_i)]^2\right\} \quad (15)$$

上式中, $r_{ref}$ 是参考点的距离, $\tau_{ref}$ 是延迟的时间, $K_s$ 是距离向压缩调频斜率,为

$$1/K_s = 1/K + 1/K_{SRC} \quad (16)$$

距离项处理包括距离压缩、SRC、RCMC,其函数表达式为

$$H_2(f_r, f_i; r_{ref}) = \exp\left\{-j\pi \frac{f_r^2}{K_s(f_i; r_{ref}) [1 + C_s(f_i)]}\right\} \cdot \exp\left\{j\pi \frac{4}{c} f_r r_{ref} C_s(f_i)\right\} \quad (17)$$

方位向聚焦函数为

$$H_3(\tau, f_i) = \exp\left\{-j\pi \frac{4r}{\lambda} [1 - \gamma(f_i)] + j\theta_\Delta(f_i; r)\right\} \quad (18)$$

其中 $\theta_\Delta$ 是相位残留项,

$$\theta_\Delta(f_i; r) = \frac{4\pi}{c^2} K_s(f_i; r_{ref}) C_s(f_i) [1 + C_s(f_i)] (r - r_{ref})^2 \quad (29)$$

## 4 计算机仿真及性能分析

### 4.1 计算机点目标仿真参数

成像区域中心斜距 $r_c = 41.6667\text{km}$ ,发射信号波长 $\lambda = 0.03\text{m}$ ,信号持续时宽 $T = 1.667\mu\text{s}$ ,发射信号带宽 $B = 60\text{MHz}$ ,回波采样频率 $f_s = 150\text{MHz}$ ,所以距离向分辨率 $\rho_r = c/(2B) = 2.5\text{m}$ ,采样间隔 $\delta_r = 1\text{m}$ ;正侧视时合成孔径长度 $L_s = 250\text{m}$ ,PRF与飞机速度 $v$ 之比 $K_v = \text{PRF}/v = 1$ ,所以方位向分辨率 $\rho_a = \lambda r_c / (2L_s) = 2.5\text{m}$ ,方位向采样间隔 $\delta_a = 1/K_v = 1\text{m}$ 。本文仿真中采用三次立方样条插值算法校正距离徙徙。

### 4.2 仿真结果及性能分析

对大斜视角下改进的RD算法和ECS算法点目标成像仿真,分为点目标在参考距离上和不在参考距离上两种情况,对仿真结果的主瓣宽度(-4dB宽度)、积分旁瓣比(Integrated Side-Lobe Ratio, ISLR)、峰值旁瓣比(Peak Side-Lobe Ratio,

PSLR)等指标进行了分析和对比(注: 仿真是在未对匹配函数加窗的情况下进行的)。

需要指出的是, 与正侧视相比, 斜视下, 图像的支撑区间(Region of support, 即有效数据区间)不同于原始回波数据的支撑区间, 即在二维频域被旋转了一个斜视角大小。所以, 尽管图像坐标是沿飞行方向(方位向)和垂直于飞行方向(距离向)的, 但成像点分辨率的测算, 应沿飞行方向(方位向)和天线指向方向(距离向)<sup>[10]</sup>。

图 5 给出了随斜视角的变化, 在参考距离上, 这两种算法方位向和距离向分辨率与理论值相比的曲线图。

图 6 给出了斜视角为 45°, 点目标在参考距离上和参考距离外 1km 时, 这两种算法的点目标成像结果。

表 1 和表 2 分别给出了点目标在参考距离上和参考距

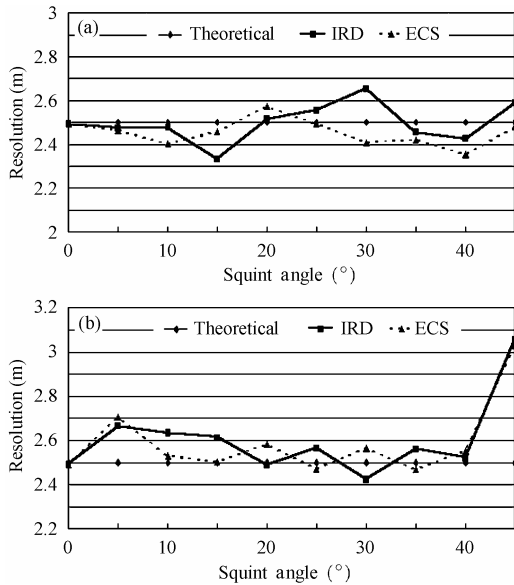


图 5 改进 RD 和 ECS 算法成像分辨率随斜视角变化图

Fig.5 Imaging resolutions in different squint angles

(a) 方位向分辨随斜视角度化图 (b) 距离向分辨随斜视角度化图

(a)Azimuth resolution (b)Range resolution

表 1 改进RD算法、ECS算法对参考距离处点目标成像性能比较

Table.1 Analysis results of imaged point targets at reference range

斜视角(°)	改进的RD算法				ECS 算法			
	方位向(dB)		距离向(dB)		方位向(dB)		距离向(dB)	
	ISLR	PSLR	ISLR	PSLR	ISLR	PSLR	ISLR	PSLR
0	- 9.995	- 12.9009	- 9.9953	- 12.9027	- 9.9914	- 12.9	- 9.9919	- 12.8999
5	- 9.8822	- 12.6685	- 10.2861	- 12.3839	- 9.8598	- 12.6429	- 13.6292	- 12.2277
10	- 10.3579	- 12.5936	- 13.4989	- 12.3886	- 10.2346	- 12.4994	- 10.2054	- 12.5489
15	- 13.6541	- 13.0835	- 11.7357	- 12.3813	- 10.152	- 12.8167	- 10.0453	- 12.4944
20	- 13.4863	- 11.5948	- 11.6391	- 12.3079	- 11.8284	- 13.0902	- 11.7308	- 13.0361
25	- 11.7919	- 12.2466	- 12.1376	- 12.1572	- 10.292	- 13.0795	- 10.0998	- 12.2928
30	- 10.0349	- 12.3424	- 12.4012	- 12.5823	- 10.1584	- 12.1142	- 10.9649	- 11.9164
35	- 11.3689	- 12.9454	- 11.8229	- 13.079	- 13.1684	- 13.9626	- 12.5829	- 13.5619
40	- 9.739	- 11.5685	- 12.9727	- 13.3888	- 10.3739	- 12.5769	- 12.5464	- 11.8302
45	- 10.1152	- 11.8167	- 14.7118	- 12.8412	- 10.771	- 12.4631	- 17.6719	- 12.1303

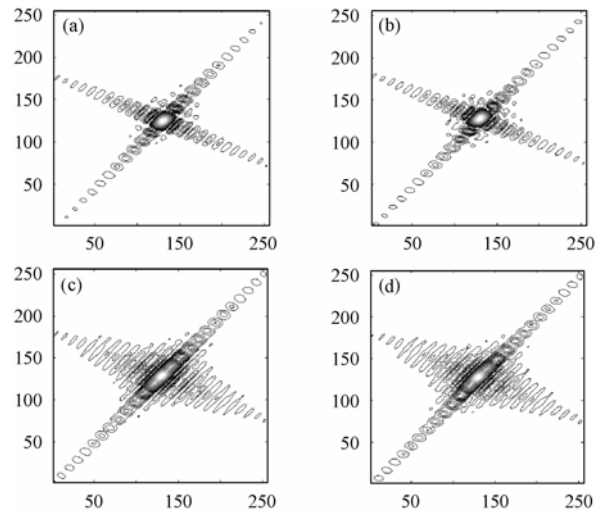


图 6 (a) 改进RD算法对参考距离处点目标成像 (b) ECS算法对参考距离处点目标成像 (c) 改进RD算法对参考距离外 1km 处点目标成像 (d) ECS算法对参考距离外 1km 处点目标成像

Fig.6 (a)Imaging result of IRD at reference range, (b)Imaging result of ECS at reference range, (c)Imaging result of IRD outside reference range, (d)Imaging result of ECS outside reference range

离外 1km 时, 斜视角从 0°~45°变化时的 ISLR 和 PSLR 值。

### 4.3 讨论

由图 5 结果, 改进的 RD 算法, 进行了 SRC 处理, 并采用精确的 RCMC 计算公式和方位向匹配函数, 克服了距离压缩后信号进入二维频域再次散开的现象, 准确校正了距离迁徙, 在距离和方位向都取得良好的聚焦性能。然而因存在插值截断的误差影响, 距离向和方位向分辨率随斜视角的增大略有下降, 但仍基本满足大斜视角成像的要求。

ECS 算法在成像的原理上与 RD 算法一样, 但因避免了插值运算, 所以, 计算效率比 RD 算法高, 而且, 有效克服了距离向频谱随斜视角的偏移和翻褶, 达到良好的成像质量。

表2 改进RD算法、ECS算法对参考距离外1km处点目标成像性能比较

Table.2 Analysis results of imaged point targets outside referere range

斜视角(°)	改进的RD算法				ECS 算法			
	方位向(dB)		距离向(dB)		方位向(dB)		距离向(dB)	
	ISLR	PSLR	ISLR	PSLR	ISLR	PSLR	ISLR	PSLR
0	-9.995	-12.9009	-9.9953	-12.9027	-9.9914	-12.9	-9.9919	-12.8999
5	-9.8823	-12.669	-10.2861	-12.3847	-9.8598	-12.6429	-13.6292	-12.2277
10	-10.3627	-12.593	-13.4987	-12.3893	-10.2346	-12.4994	-10.2054	-12.5489
15	-11.5119	-13.0365	-11.7312	-12.3833	-10.152	-12.8167	-10.0453	-12.4944
20	-10.0018	-11.8171	-11.6393	-12.2991	-11.8284	-13.0902	-11.7308	-13.0361
25	-9.868	-12.6115	-12.1408	-12.132	-10.292	-13.0795	-10.0998	-12.2928
30	-9.2873	-11.6822	-12.3201	-12.553	-10.1584	-12.1142	-10.9649	-11.9164
35	-8.4314	-10.6626	-11.8145	-13.0871	-13.1684	-13.9626	-12.5829	-13.5619
40	-6.0748	-8.1145	-12.6033	-13.1082	-10.3739	-12.5769	-12.5464	-11.8302
45	-9.9141	-10.103	-15.6768	-12.6573	-10.771	-12.4631	-17.6719	-12.1303

图6说明,对在参考距离外的点目标成像,会因为SRC调频斜率的误差影响距离向聚焦,但对方位向聚焦无明显影响。

成像后,一般要求图像质量达到 $ISLR < -10\text{dB}$ ,  $PSLR < -15\text{dB}$ ,考虑到仿真是在未对匹配函数加窗下得到的,而加窗处理可以有效抑止响应函数旁瓣能量,所以,表1,表2的数据说明这两种算法基本达到了成像质量要求。

## 5 结束语

本文根据机载SAR斜视下的空间几何模型和回波信号性质,详细分析了大斜视角下RD算法和标准CS算法成像分辨率下降的机理,从距离徙徙校正、二次距离压缩和方位聚焦三个方面推导了RD算法的改进方法,并给出改进RD算法和ECS算法的处理流程和参考函数形式。仿真表明,这两种算法的成像性能满足了机载SAR在大斜视角模式下的要求。

大斜视角模式下的实时成像对于战场侦察具有重要意义,目前,国内还没有研制成可工作在大斜视角模式下的实时成像处理器。因此,考虑到硬件实现的复杂性,根据算法本身特点和成像性能的分析,合理设计硬件实现方案,简化上述精确公式,使之能够在硬件上实现,满足设计要求,是SAR大斜视角成像下一步的研究方向。

## 参考文献

- [1] Shao Yulong, Zhu Zhaoda. Squint mode airborne SAR processing using RD algorithm. NAECON 1997, Ohio, USA, 1997: 1025 - 1029.
- [2] 朱岱寅, 朱兆达, 叶少华, 张昆辉, 谢求成. 机载SAR斜视区

域成像研究. 电子学报, 2002, 30(9): 1387 - 1389.

- [3] Davidson G W, Cumming L G, ITO M R. A chirp scaling approach for processing squint mode SAR data. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems*, 1996, 32(1): 121 - 133.
- [4] 刘光炎, 黄顺吉. 非线性CS算法的前斜视SAR成像. 电子与信息学报, 2003, 25(10): 1308 - 1315.
- [5] 黄永红, Moreira A, 毛士艺. 一种适于机载前斜视SAR成像处理的Chirp Scaling算法. 电子学报, 1996, 24(3): 37 - 41.
- [6] Moreira A, Mittermayer J, Scheiber R. Extended chirp scaling algorithm for air- and space-borne SAR data processing in stripmap and scanSAR imaging modes. *IEEE Trans. on GRS*, 1996, 34(5): 1123 - 1136
- [7] 禹卫东. 合成孔径雷达信号处理研究. [博士论文], 南京: 南京航空航天大学, 1997.
- [8] 禹卫东, 吴淑梅. 距离-多普勒方法中的几种插值算法比较. 电子与信息学报, 2001, 23(3): 308 - 312.
- [9] Raney R K, Runge H, Bamler R, et al.. Precision SAR processing using chirp scaling. *IEEE Trans. on GRS*, 1994, GRS-32(4): 786 - 799.
- [10] Davidson G W. Some general properties of SAR signals and processing algorithms, EUSAR'96, Königswinter, Germany, 1996: 261 - 266.

汪亮: 男, 1980年生, 硕士生, 从事结合实时处理器的合成孔径雷达成像算法研究。

禹卫东: 男, 1969年生, 研究员, 博士生导师, 长期从事机载、星载合成孔径雷达系统研究工作。