

机载前视合成孔径雷达 Chirp Scaling 成像算法研究

陈琦^{①②} 杨汝良^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 针对目前机载侧视合成孔径雷达(SAR)无法对飞行路线正前方进行高分辨率成像的问题, 该文研究了一种新型机载前视 SAR, 分析了前视 SAR 的工作原理和方位分辨率提高的可行性。基于空间几何模型和回波信号形式, 推导并给出了适用于机载前视 SAR 成像的 chirp scaling 算法, 给出了各相位补偿因子表达式及算法实现步骤。模拟了前视 SAR 点目标回波数据, 并利用该方法对分布于场景中心及边缘的点目标阵进行了成像仿真, 分析了成像效果, 成像质量指标与理论值基本吻合, 证实了算法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 前视; chirp scaling 算法

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)01-0228-05

Research of Chirp Scaling Imaging Algorithm for Air-borne Forward-looking SAR

Chen Qi^{①②} Yang Ru-liang^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Based on the problem that side-looking SAR can not image in flight direction with high azimuth resolution, an innovative forward-looking SAR system is studied. The operation mechanism and feasibility of high azimuth resolution are analyzed. According to the spatial geometry and the model of echo signal, chirp scaling algorithm is proposed for forward-looking SAR. The phase compensation factors and realized steps of algorithm are given. Raw data of forward-looking SAR is simulated, and image is achieved by using the chirp scaling algorithm proposed in this paper. The imaging effect is analyzed, and imaging quality is consistent with theory value. Simulation results demonstrate the validity of the algorithm.

Key words: SAR; Forward-looking; Chirp scaling algorithm

1 引言

自合成孔径雷达(SAR)概念提出起, 五十年来在民用遥感和军事侦察等领域获得了广泛应用。目前机载 SAR 的工作模式主要有正侧视、斜视、扫描、聚束和干涉模式, 所有这些工作模式都是对载机飞行方向左、右两侧的目标进行高分辨率测绘。由于 SAR 的工作特点, 现有的侧视 SAR 无法覆盖飞行路线正前方目标, 不具备前视高分辨率能力, 在成像区域上存在固有盲区。

近年来, 国外提出了一种能对飞行路线正前方扇形区域进行相当分辨率成像的新型机载前视SAR系统——用于视景增强的新型区域成像雷达(SIREV)。该雷达系统首先由德国宇航局(DLR)提出并申请专利, 目前已完成了SIREV的理论研究、前视成像算法、计算机仿真与样机研制, 并在DLR的E-SAR试验平台上进行飞行测试, 形成了较为完整的技术报告^[1]。文献[2,3]介绍了该前视SAR系统的基本参数及工作

原理, 文献[4,5]以结论的形式给出了前视SAR的方位分辨率、有效合成孔径、有效方位带宽和接收天线个数选择的理论表达式。与ScanSAR类似, 前视SAR成像也是利用方位向部分孔径原理, 因此文献[6-8]以ECS算法^[9]为基础, 通过直接改变相应的补偿因子仿真了前视SAR成像, 从理论上验证了该前视SAR成像的可行性。前视SAR的ECS算法方位向处理采用“方位Scaling”结合SPECAN的方法, 为避免出现频谱混叠, 对方位处理时间进行了扩展, 由于方位处理步骤较多, 运算并不经济。RD类算法、波数域类算法是另外两种常用SAR成像算法, 但都采用了插值运算, 引入了插值误差的同时, 插值带来的额外运算量也显著增加。

本文在分析了一种“收发分置”前视SAR工作原理的基础上, 根据前视SAR的空间几何模型和回波信号形式, 推导并给出了一种适用于机载前视SAR成像的CS算法, 借鉴ScanSAR常用的直接将数据补零至全孔径的方法处理方位向数据, 给出了各补偿因子表达式及算法实现步骤, 完善了前视ECS算法中未处理的部分相位项。整个算法只需复乘和

傅里叶变换,不涉及插值过程,本质上能保持回波信号的相位关系,适合于前视SAR成像处理。根据实际飞行参数模拟了前视SAR点目标回波数据,对分布于场景中心及边缘的9个点目标进行成像仿真,分析了成像效果,图像质量指标与理论值基本吻合,验证了算法的有效性。

2 机载前视 SAR 工作原理

前视 SAR 是指距离向与平台飞行方向一致,方位向与平台飞行方向垂直的合成孔径雷达系统,这与侧视 SAR 正好相反,其成像区域可用图 1 表示。机载前视 SAR 可以工作于多种模式,文献[3]给出了两种基本工作模式,即“收发同置”模式和“收发分置”模式,本文重点讨论第 2 种模式。

“收发分置”机载前视 SAR 的工作方式见图 2。载机平台在离地面高度为 h 的航线上沿 x 轴方向(距离向)以速率 v 飞行,与 x 轴垂直的方向为 y 轴方向(方位向),与 xoy 平面垂直的方向为 z 轴方向。各接收天线 R_x 以 $y=0$ 为中心沿方位向等间隔对称分布, y_i 为第 i 个接收天线的方位向坐标,等效在方位向上形成一定长度的合成孔径。发射天线 T_x 与接收天线分置,位于中心接收天线正下方 Z_{offset} 处。点目标 p 在 xoy 平面的坐标为 (x_0, y_0) , 它与发射天线和第 i 个接收天线的发、收路程分别用 R_{TX} 和 R_{RX} 表示。

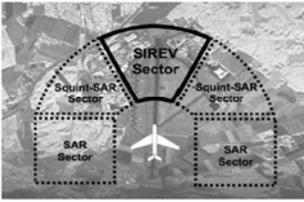


图1 前视 SAR 成像区域示意图

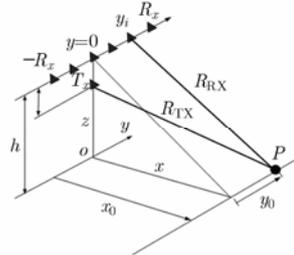


图2 前视 SAR 成像几何

前视SAR的发射天线沿飞行方向发射大时间带宽积信号,采用脉冲压缩提高距离向分辨率。为提高方位向分辨率,前视SAR在飞行过程中,发射天线以高脉冲重复频率(PRF)发射信号,各接收天线沿 y 轴方向以切换速率 v_s 顺次切换接收回波,相当于有一个接收天线在 y 轴方向以同样的速率 v_s 运动,在方位向形成类似于正侧视SAR的合成孔径,通过匹配滤波提高方位分辨率。通常接收天线的切换速率 v_s 选择为 $v_s = d/\text{PRT} = d \cdot \text{PRF}$, 其中 d 为相邻两个接收天线之间的距离间隔,即接收天线的切换频率选择为脉冲重复频率 PRF [6,8,11]。由于在方位向上有一个等效的飞行速率(即切换速率 v_s), 因此即便是载机的前向飞行速率 v 为零,前视SAR也可以对波束覆盖的正前方扇形区域进行成像。

由于在发射信号的过程中,载机继续向前飞行,成像区域内不同点目标的距离徙动轨迹各不相同,距离徙动问题变得复杂。但在载机飞行速率 v 很小,且 PRF 很高的情况下,

在接收天线切换时间 PRT 内,载机飞过的距离很小,对成像的影响可以忽略[11]。

由上述分析可知,方位分辨率由接收天线阵列的长度决定。接收天线阵列越长,接收单元越多,方位向空间采样点数就越多,方位分辨率也就越高。事实上经推导可知文献[4,5]给出的方位分辨率表达式是“收发同置”前视 SAR 的方位分辨率表达式。从图 2 可看到,由于发射路程对方位分辨率没有贡献,因此“收发分置”前视 SAR 方位分辨率将在“收发同置”前视 SAR 方位分辨率的基础上降低一倍。

由于机载前视 SAR 并不需要工作于大面积测绘模式,因此飞行高度较低,作用距离较近,发射毫米波信号变得可行。波长更短,对应的合成孔径长度也变短,只要机载接收天线阵列达到一定长度,方位分辨率仍然可以得到提高。

3 机载前视与侧视 SAR 成像等效性分析

机载侧视 SAR 的距离向为波束照射方向,方位向为载机飞行方向。侧视 SAR 的孔径合成是通过载机运动将天线单元顺序地从一个收/发位置移动到下一个收/发位置,对顺序采集到的各组回波信号进行正确移相与叠加来实现,以获取极高的方位向相干积累增益。侧视 SAR 距离向高分辨率则通过对接收的大时带积信号做匹配滤波获得。

与机载侧视 SAR 对飞行路线左、右两侧区域进行高分辨率成像不同,机载前视 SAR 是对飞行路线正前方区域进行成像。前视 SAR 的距离向为波束照射方向,方位向为垂直于载机飞行的方向。

以“收发分置”前视 SAR 为例,载机前部刚性安装一个阵列天线,天线收发单元等间隔排列,发射单元以高 PRF 发射距离向(飞行方向)大时带积信号,各接收单元依次接收回波信号,通过相参数据采集与处理,等效于在方位向(阵列天线方向)形成一个长的合成孔径,提高方位向分辨率。显然当接收天线分布在更长的基线上时,方位分辨率将进一步提高。

4 机载前视 SAR 回波信号

4.1 回波信号建模

如上节分析,前视 SAR 方位向合成孔径是通过一个物理存在的线性阵列形成的,各接收单元接收不同 PRF 时刻的回波信号,如图 2 所示,成像区域内任一点目标 p 的发射路程 R_{TX} 和接收路程 R_{RX} 可分别表示为

$$R_{\text{TX}} = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + (h - Z_{\text{offset}})^2} \quad (1)$$

$$R_{\text{RX}} = \sqrt{x_0^2 + (y_0 - y_i)^2} \quad (2)$$

其中 (x_0, y_0) 为点目标 p 在 xoy 平面的坐标, y_i 为第 i 个接收天线的方位向坐标。

设发射的线性调频信号为 $C_0 \cdot \exp(j\pi K_r \tau^2)$, 经点目标 p 反射后的回波信号为

$$ss(y_i, \tau; r, y_0) = C_0 \cdot \exp \left[j\pi K_r \left(\tau - \frac{R_{\text{TX}} + R_{\text{RX}}}{c} \right)^2 \right] \cdot \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda} (R_{\text{TX}} + R_{\text{RX}}) \right] \quad (3)$$

由于收、发天线分置, 相对接收路程而言, 发射路程为常数。将式(1)和式(2)代入式(3)并化简, 回波信号可重新表示为

$$ss(y_i, \tau; r; y_0) = C \exp \left\{ j\pi K_r \left[\tau - \frac{2}{c} \sqrt{r^2 + (y_0 - y_i)^2} \right]^2 \right\} \cdot \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{r^2 + (y_0 - y_i)^2} \right] \quad (4)$$

其中 $C = C_0 \exp(-j(2\pi/\lambda)R_{TX})$, τ 为距离时间, K_r 为距离调频率, c 为光速, λ 为发射信号波长。式中第 1 个相位项为距离向发射信号延迟, 第 2 个相位项为不同的接收路程在方位向对回波信号的调制。

4.2 回波信号方位特性

前视 SAR 回波信号的方位相位历程为式(4)中的第 2 个相位项:

$$\Phi(y_i; r) = -\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{r^2 + (y_0 - y_i)^2} \quad (5)$$

由于收发天线分置, 式(5)与侧视 SAR 的相应表达式不同。将方位位置变量 y_i 表示成为方位时间变量 t , 即 $y_i = v_s t$, 其中 v_s 为方位向接收天线切换速度。式(5)可表示成如下形式:

$$\Phi(t; r) = -\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{r^2 + (y_0 - v_s t)^2} \quad (6)$$

对式(6)中的变量 t 求导, 可求得方位多普勒频率:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \Phi(t; r)}{\partial t} = \frac{1}{\lambda} \frac{v_s (y_0 - v_s t)}{\sqrt{r^2 + (y_0 - v_s t)^2}} \approx \frac{v_s (y_0 - v_s t)}{\lambda r} = \frac{v_s (y_0 - y_i)}{\lambda r} \quad (7)$$

由上式可知, 不同方位位置(即 y_0 不同)的点目标所历经的多普勒频率历程不同, 这与 ScanSAR 同一子带内不同方位位置的点目标类似, 因此文献[6-8]采用 ScanSAR 的处理方法来处理前视 SAR 回波数据。

在式(7)的基础上可进一步求得前视 SAR 回波信号的多普勒调频率为

$$f_{dr} = -\frac{v_s^2 r^2}{\lambda [r^2 + (y_0 - v_s t)^2]^{3/2}} \approx -\frac{v_s^2}{\lambda r} \quad (8)$$

这与侧视 SAR 多普勒调频率表达式类似。由于收发天线分置, 前视 SAR 调频率只有侧视 SAR 调频率的一半。

5 前视 SAR Chirp Scaling 算法

5.1 方位向傅里叶变换

根据驻留相位原理, 回波信号经方位傅里叶变换后的表示式为

$$Ss(f, \tau; r; y_0) = C \exp \left\{ -j\pi K_s \left[\tau - \frac{2}{c} R(f; r) \right]^2 - j \frac{2\pi r}{\lambda} \gamma(f) - j 2\pi f \frac{y_0}{v} \right\} \quad (9)$$

其中

$$R(f; r) = \frac{r}{\gamma(f)} \quad (10)$$

$$\gamma(f) = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f}{v} \right)^2} \quad (11)$$

$$\frac{1}{K_s(f; r)} = -\frac{1}{K_r} + \frac{4\lambda r}{c^2} \frac{1 - \gamma^2(f)}{\gamma^3(f)} \quad (12)$$

式(10)是瞬时距离在距离-多普勒域的表达式, 式(12)是包含二次距离压缩在内的综合调频率。由于“收发分置”, 式(11)和式(12)不同于传统侧视 SAR CS 算法中相应的表达式。

5.2 Chirp Scaling 操作

在距离-多普勒域乘以 Chirp Scaling 因子 $H_1(f, \tau; r_{\text{ref}})$:

$$H_1(f, \tau; r_{\text{ref}}) = \exp[-j\pi K_s(f; r_{\text{ref}}) C_s(f) (\tau - \tau_{\text{ref}})^2] \quad (13)$$

其中

$$\frac{1}{K_s(f; r_{\text{ref}})} = -\frac{1}{K_r} + \frac{4\lambda r_{\text{ref}}}{c^2} \frac{1 - \gamma^2(f)}{\gamma^3(f)} \quad (14)$$

$$\tau_{\text{ref}} = \frac{2}{c} r_{\text{ref}} [1 + C_s(f)] \quad (15)$$

$$C_s(f) = \frac{1}{\gamma(f)} - 1 \quad (16)$$

r_{ref} 为参考距离。根据 Chirp Scaling 原理, 将 Chirp Scaling 因子式(13)与式(9)相乘后可得

$$Ss(f, \tau; r; y_0) = C \exp \left\{ -j\pi K_s(f; r_{\text{ref}}) (1 + C_s) \left[\tau - \frac{2}{c} (r + r_{\text{ref}} C_s) \right]^2 - j \frac{2\pi r_0}{\lambda} \gamma(f) \right\} \cdot \exp[j\Theta_1(f; r) + j\Theta_2(f)] \quad (17)$$

其中

$$\Theta_1(f; r) = -\frac{4\pi}{c^2} K_s(f; r_{\text{ref}}) C_s (1 + C_s) (r - r_{\text{ref}})^2 \quad (18)$$

$$\Theta_2(f) = -2\pi f \frac{y_0}{v} \quad (19)$$

如式(17)所示, 经过 Chirp Scaling 操作后, 回波信号有了新的距离调频率 $K_s(f; r_{\text{ref}})[1 + C_s(f)]$ 和新的相位中心 $(2/c)[r + r_{\text{ref}} C_s(f)]$ 。徙动轨迹 $r_{\text{ref}} C_s(f)$ 已经与 r 无关, 不同 r 处点目标的距离徙动被校正至相同轨迹。

5.3 距离向傅里叶变换

完成距离向傅里叶变换, 将得到经过 Chirp Scaling 操作后的二维频域表达式:

$$SS(f, f_r; r; y_0) = C \exp \left\{ j\pi \frac{f_r^2}{K_s(f; r_{\text{ref}}) (1 + C_s)} - j \frac{2\pi r}{\lambda} \gamma(f) - j \frac{4\pi}{c} (r + r_{\text{ref}} C_s) f_r \right\} \cdot \exp[j\Theta_1(f; r) + j\Theta_2(f)] \quad (20)$$

其中 $\Theta_1(f; r)$ 为 Chirp Scaling 操作引入残留的相位, $\Theta_2(f)$ 为目标偏离中心航线带来的多普勒相移^[12], 该项在仿真成像时将影响目标在方位向的位置, 实际成像时则不受影响。

5.4 距离压缩、二次距离压缩和距离徙动校正

由式(20)可知, 完成距离压缩、二次距离压缩和距离徙动校正的补偿因子为

$$H_2(f, f_r; r_{\text{ref}}) = \exp \left[-j\pi \frac{f_r^2}{K_s(f; r_{\text{ref}}) (1 + C_s)} + j \frac{4\pi}{c} r_{\text{ref}} C_s f_r \right] \quad (21)$$

上式中第 1 个相位项完成距离压缩和二次距离压缩, 第 2 个相位项完成距离徙动校正。

5.5 距离向傅里叶逆变换

在二维频率域完成距离压缩和徙动校正后做距离向傅里叶逆变换, 将信号变换到距离图像-多普勒域:

$$S_s(f, \tau; r; y_0) = C \exp \left[-j \frac{2\pi r}{\lambda} \gamma(f) + j\Theta_1(f; r) + j\Theta_2(f) \right] \quad (22)$$

5.6 方位压缩和残留相位补偿

补偿式(22)中的相位项将完成方位压缩和残留相位补偿, 因此第 3 个相位补偿因子为

$$H_3(f, \tau; r) = \exp \left\{ -j \frac{2\pi r}{\lambda} [1 - \gamma(f)] - j\Theta_1(f; r) - j\Theta_2(f) \right\} \quad (23)$$

完成方位压缩和残留相位补偿后, 再经方位傅里叶逆变换就得到 SAR 图像。

6 仿真结果及分析

为验证本文算法的有效性, 进行了 9 点目标阵成像仿真, 仿真参数参照文献[8]。为节约运算量, 对部分参数进行了适当调整, 具体参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

发射信号波长	0.0315m
发射信号带宽	60MHz
发射信号脉宽	1.0μs
阵列天线长度	2.85m
接收单元个数	56
脉冲重复频率	14793Hz
载机飞行速度(直升机)	28m/s
载机飞行高度	1056m
波束视角(°)	40
波束方位张角(°)	25
波束距离张角(°)	15

根据仿真参数, 产生点目标回波信号, 并应用本文算法进行成像。单个点目标回波数据和 9 个点目标成像结果如图 3 和图 5 所示。由表 1 所给参数可计算出成像场景范围约为: 近距方位宽(梯形上边)464m, 远距方位宽(梯形下边)795m, 距离向跨度(梯形高)480m。成像场景内有 9 个点目标, 其中中心点目标位于波束视线中心, 其余点目标分布于成像场景边缘, 9 个点目标的位置设定如图 6 所示。

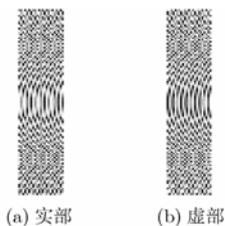


图 3 单个点目标回波

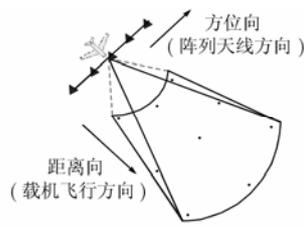


图 4 9 点目标位置设定示意图

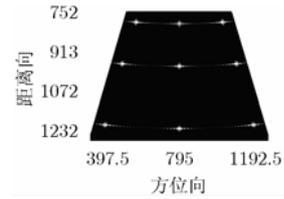


图 5 9 点目标成像(单位: m)

为详细分析成像效果, 以中心点目标和右下角点目标为例, 给出了经插值后的图像和二维压缩曲线, 如图 6 所示。从图中可看到点目标图像清晰, 距离向和方位向压缩曲线效果较好。

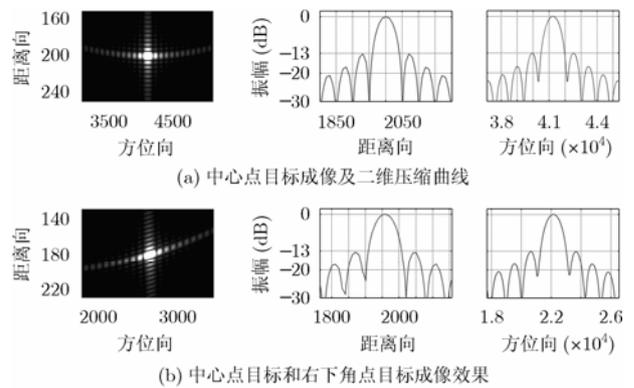


图 6 中心点目标和右下角点目标成像效果

仍然以成像场景中心点和右下角点为例, 分别给出了距离向和方位向的峰值旁瓣比、积分旁瓣比和分辨率, 并与理论值进行对比, 如表 2 所示。仿真峰值旁瓣比和积分旁瓣比与理论值基本吻合, 仿真分辨率与文献[4,5]计算的分辨率接近, 点目标响应质量指标满足要求。

表 2 点目标响应质量指标及对比

		仿真值			理论值
		峰值旁瓣比(dB)	积分旁瓣比(dB)	分辨率(m)	分辨率(m)
中心点目标	距离向	-13.18	-9.55	2.532	2.500
	方位向	-12.96	-9.42	15.702	15.284
右下角点目标	距离向	-13.20	-9.98	2.579	2.500
	方位向	-12.99	-9.48	18.346	17.856

7 结束语

前视 SAR 是一种全新的合成孔径雷达工作体制, 具有自身显著的特点。由于前视 SAR 的研究刚起步不久, 仍然有许多理论和实际问题有待探索, 相信随着研究工作的进一步深入, 前视 SAR 的实用性和优越性将更加明显。本文以德国宇航局(DLR)提出的“收发分置”前视 SAR 系统(SIREV)为对象, 根据空间几何模型和回波信号形式, 推导并给出了

一种适用于机载前视 SAR 成像的 Chirp Scaling 算法, 给出了各补偿因子表达式及算法实现步骤。利用该方法进行了仿真试验, 模拟了前视 SAR 回波数据, 在此基础上完成了前视 SAR 成像, 分析了成像效果, 峰值旁瓣比、积分旁瓣比和分辨率等图像质量指标与理论值基本吻合, 证实了算法的有效性。

参 考 文 献

- [1] <http://www.dlr.de/hr/sirev/home.html>
- [2] 周其焕. 前视探测和多传感器综合视景系统在民机上的应用. 航空电子技术, 2002, 9(33): 1-6.
Zhou Qi-luan. The applications of forward looldng detection and multi--sensor integrated vision system on civil aeroplane. *Avionics Technology*, 2002, 9(33): 1-6.
- [3] Sutor T, Buckreuss S, and Krieger G. Sector Imaging Radar for Enhanced Vision(SIREV): Theory and applications. *Enhanced and Synthetic Vision 2000, Proceedings of SPIE*, 2000, Vol.4023: 292-297.
- [4] Sutor T and Witte F. 用于视景增强的新型区域成像雷达. 空载雷达, 2001, (2): 7-14.
Sutor T and Witte F. A new Sector Imaging Radar for Enhanced Vision. *Airborne radar*, 2001, (2): 7-14.
- [5] Sutor T, Witte F, and Moreira A. A new Sector Imaging Radar for Enhanced Vision - SIREV. *Enhanced and Synthetic Vision 1999, Proceedings of SPIE*, 1999, Vol.3691: 39-47.
- [6] Mittermayer J, Wendler M, and Krieger G. Sector Imaging Radar for Enhanced Vision(SIREV): Simulation and Processing Techniques. *Enhanced and Synthetic Vision 2000, Proceedings of SPIE*, 2000, Vol.4023: 298-305.
- [7] Mittermayer J, Wendler M, and Krieger G. Data processing of an innovative forward looking SAR system for enhanced vision. In *proc. EUSAR 2000*, 2000, Munich: 733-736.
- [8] Krieger G, Mittermayer J, and Wendler M. Sector imaging radar for enhanced vision. *Aerospace Science and Technology, ELSEVIER*, 2003, Vol.7: 147-158.
- [9] Moreira A, Mittermayer J, and Scheiber R. Extended chirp scaling algorithm for air-and spaceborne SAR aata processing in stripmap and scanSAR imaging modes. *IEEE Trans. on GRS*, 1996, 34(5): 1123-1136.
- [10] 丁丁, 王贞松, 荆麟角等. 星载 ScanSAR 成像研究. 遥感学报, 2002, 6(4): 259-265.
Ding ding, Wang Zhen-song, and Jing Ling-jiao, *et al.*. Study of space-borne scanSAR image processing. *Journal of remote sensing*, 2002, 6(4): 259-265.
- [11] 刘光炎, 黄顺吉. 斜视及前视合成孔径雷达系统的成像与算法研究. [博士论文]. 成都. 电子科技大学, 2002: 109-129.
- [12] 黄岩, 李春升. 高分辨率星载 SAR 改进 Chirp Scaling 成像算法. 电子学报, 2000, 28(3): 35-38.
Huang Yan and Li Chun-sheng. Refined chirp scaling algorithm for high resolution spaceborne SAR imaging. *Acta Electronica Simica*, 2000, 28(3): 35-38.
- 陈 琦: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为前斜视、前视合成孔径雷达信号处理.
- 杨汝良: 男, 1943 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.