

## 一种去除采样造成的多极化 SAR 成像误差的方法

王朔<sup>①②</sup> 禹卫东<sup>①</sup> 祁海明<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要:** 合成孔径雷达系统通常要对回波进行数字处理, 方位向、距离向采样会给 SAR 点目标响应的峰值带来测量误差。该文针对此问题进行了深入分析, 给出了峰值测量误差与点目标位置的关系。对时分工作方式多极化 SAR 系统的分析结果表明, 在某些情况下, 由方位向采样和非同时测量造成的极化数据间相对幅度和相位误差会很大。该文提出了使不同极化回波的匹配滤波函数相隔一定延时的匹配滤波方法, 以使方位向采样对各极化数据具有相同的影响。仿真结果表明该方法有效地改善了极化数据间幅相一致性。该文研究的问题对 SAR 的精确定标有着重要意义。

**关键词:** 极化 SAR; 采样; 点目标; 误差分析; 定标

**中图分类号:** TN957.52

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2010)02-0490-05

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2009.00025

## A Method to Reduce the Effect of 2-D Sampling Error on Pol-SAR Imagery

Wang Shuo<sup>①②</sup> Yu Wei-dong<sup>①</sup> Qi Hai-ming<sup>①</sup>

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

<sup>②</sup>(Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Analog SAR echoes are usually sampled in both azimuth and range for digital processing, which will introduce error to point target peak measurements. This problem is analyzed in detail and the theoretical relationship between peak error and target location is given. For time-divided mode polarimetric SAR systems, azimuth sampling will also introduce relative error between different polarization data. A match-filtering method is proposed, which uses different time-delayed filtering functions for different polarization data, to produce the same effect of azimuth sampling on them. Simulation results prove its effectiveness in improving the magnitude and phase consistency.

**Key words:** Polarimetric SAR; Sampling; Point target; Error analysis; Calibration

### 1 引言

SAR 接收的地物回波是模拟信号, 为了便于数字信号处理, 要将回波采样后再进行记录。距离向和方位向的过采样率通常设置为 1.1~1.4。低采样率减小了数据存储量, 但势必带来信息的丢失和数据的测量误差。

在 SAR 系统辐射定标过程中需要在弱背景回波地域摆放各种人造定标器, 它们在 SAR 图像中显示为点目标<sup>[1-3]</sup>。辐射定标是将点目标响应的测量值与真实值进行比较从而对 SAR 图像强度进行校准的过程<sup>[4]</sup>。以往关于定标精度的文献多涉及多径效应<sup>[5]</sup>、法拉第旋转<sup>[6, 7]</sup>等, 罕见关于采样影响的论述。本文对过采样率较低导致的点目标响应峰值测量误差问题进行了研究。

现在的多极化 SAR 系统一般采用时分工作方式<sup>[8-11]</sup>, 交替发射 H,V 两种极化信号, 这种“准同时”的工作方式势必带来两组极化数据(HH,VH 与 HV,VV)间的相对幅度和相位误差<sup>[12]</sup>。采样造成的极化数据间的相对幅度和相位误差在某些条件下不可忽略, 本文给出了减小这种误差的一种方法。

### 2 采样对单极化 SAR 成像的影响

对机载 SAR 成像过程的仿真参数如表 1 所示。假设测绘带内有两个后向散射系数都为 1 的点目标, 在不考虑距离衰减、距离向和方位向天线方向图调制, 并且已经对距离徙动进行补偿的情况下, 使用 RD 成像算法得到它们的点目标散布函数(PSF)如图 1 所示, 峰值的测量值分别为 0.8410 和 0.6566, 误差分别为 1.5 dB 和 3.7 dB, 可见误差相当大。下面说明采样是如何影响峰值测量的。

表 1

方位向、距离向分辨率	0.5 m
载波频率	9 GHz
飞机速度	150 m/s
高度	10000 m
下视角	55°
方位向、距离向过采样率	1.2

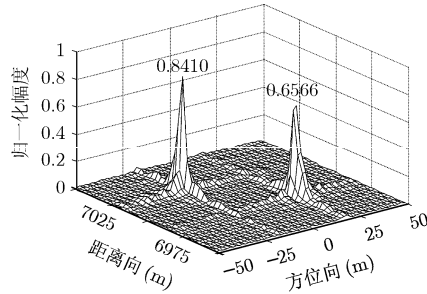


图 1 两个点目标的 PSF

2.1 1 维采样的情形

SAR 的距离向、方位向采样点在地面上形成了 2 维采样网格。由 2 维采样造成的点目标峰值误差与目标位置有关，更具体地讲，与目标在 2 维采样网格中的相对位置有关。我们先来看 1 维的情形。仅考虑 SAR 与点目标距离最短(零多普勒频率)的时刻，设发射信号为  $s(t) = \exp\{j\pi k_r t^2\}$ ， $k_r$  为 LFM 信号调频斜率， $t$  是快时间。经距离向匹配滤波后得到的点目标 1 维响应近似成 sinc 函数形状，

$$PSF(x) = \left| \frac{\sin[\pi(x - x_0)/\delta_r]}{\pi(x - x_0)/d_r} \right| \quad (1)$$

其中  $\delta_r$  为距离向采样间隔， $d_r$  为距离向分辨率。

图 2 画出了 PSF(x)(仅主瓣)与点目标斜距  $x_0$  的关系<sup>[13, 14]</sup>。假设 SAR 的 3 个距离向采样点分别位于斜距  $(n-1)\delta_r, n\delta_r, (n+1)\delta_r$  处，当点目标位于前两个

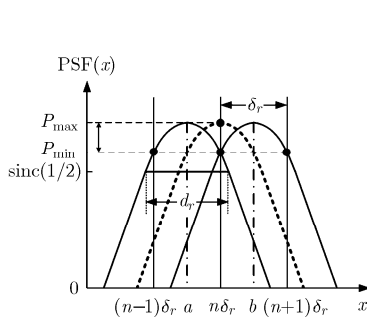


图 2 距离向 PSF 与点目标斜距的关系

采样点的中点  $a = (n - 0.5)\delta_r$  与后两个采样点的中点  $b = (n + 0.5)\delta_r$  之间时，峰值为第  $n$  个采样点处的响应；当的目标位于点  $a$  以左时，峰值为第  $n-1$  个采样点的响应；当点目标位于点  $b$  以右时，峰值为第  $n+1$  个采样点的响应；而且这种关系是以  $\delta_r$  为周期的。峰值的测量值由点目标在采样格栅中的相对位置决定：越接近采样点，峰值误差越小；越接近相邻采样点的中点，峰值误差越大。当  $x_0 = k\delta_r$  ( $k$  为整数)时取得极大值  $P_{\max} = 1$ ；当  $x_0 = k\delta_r + 0.5\delta_r$  ( $k$  为整数)时取得极小值

$$P_{\min} = \left| \text{sinc}\left(\frac{0.5\delta_r}{d_r}\right) \right| = \left| \text{sinc}\left(\frac{1}{2q_r}\right) \right| \quad (2)$$

其中  $q_r = \frac{d_r}{\delta_r} = \left(\frac{c}{2B_r}\right) / \left(\frac{c}{2f_s}\right) = \frac{f_s}{B_r}$  为距离向过采样率， $f_s$  为距离向采样频率， $B_r$  为带宽。可见采样造成的最大峰值测量误差是采样率  $q_r$  的函数，与分辨率  $d_r$  无关。

采样带来的不仅有峰值测量误差，还有定标器定位误差，定位误差直接影响 SAR 图像的几何定标精度<sup>[15, 16]</sup>。容易得到点目标斜距误差为  $D_r(x_0) = x_0 - n\delta_r$ ， $a < x_0 < b$ 。它也是关于  $x_0$  的周期为  $\delta_r$  的函数。点目标斜距的最大误差为半个距离向采样间隔，在过采样率  $q_r > 1$  的情况下小于  $\delta_r/2$ 。

图 3 示出了按表 1 参数仿真的结果，横坐标表示斜距与  $\delta_r$  的比值。PSF 峰值误差最小 0 dB，由式 (2) 得到最大误差 -2.6 dB；最大地距误差  $0.5\delta_r / \sin(35^\circ) = 1.45$  m，与图所示吻合。图 4 给出了距离向 PSF 峰值测量误差与过采样率  $q_r$  的关系。对每一个采样率，得到均匀分布于距离向采样间距内的 50 个点目标的仿真结果。由图可见当过采样率为 1 时，最大峰值误差 -4 dB；峰值误差随过采样率增大而减小；当过采样率为 2 时，最大峰值误差为 -1 dB 左右。提高采样率可以减小峰值测量误差，但这是以增大数据量作为代价的。

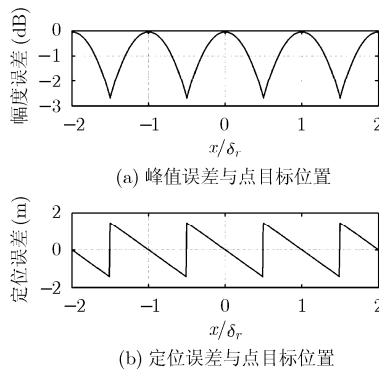


图 3 点目标距离向 PSF 峰值测量误差、定位误差与点目标位置的关系

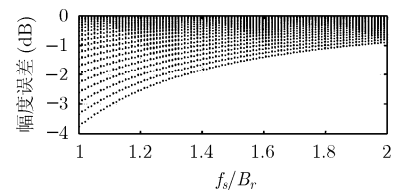


图 4 峰值误差与距离向过采样率的关系

## 2.2 2 维采样的情形

上述关于点目标距离向散布函数峰值测量的结论容易推广到方位向,从而得到 2 维的情形。点目标 2 维散布函数为

$$\text{PSF}(x, y) = \left| \frac{\sin[\pi(x-x_0)/\delta_r]}{\pi(x-x_0)/d_r} \right| \cdot \left| \frac{\sin[\pi(y-y_0)/\delta_a]}{\pi(y-y_0)/d_a} \right| \quad (3)$$

采样后的脉冲峰值是点目标斜距坐标  $x_0$ 、方位坐标  $y_0$  的函数  $P(x_0, y_0)$ , 它在距离向和方位向的周期分别是  $\delta_r, \delta_a$ , 最大值 1, 最小值  $|\text{sinc}(0.5/q_r)| |\text{sinc}(0.5/q_a)|$  ( $\delta_a, d_a, q_a$  分别是方位向采样间距、分辨率、过采样率)。

考虑到背景杂波及系统噪声的影响,在辐射定标中,通常对 PSF 按照某种算法进行积分作为 BSC 的测量值,或者采用插值方法,从而减弱采样带来的误差。受篇幅所限,本文暂不深入研究。另外,实际的定标器都具有一定尺寸,可以认为由无数个理想点目标组成,其所在像素亮度可看作是这些点目标脉冲响应的相干叠加。这在一定程度上减弱了采样造成的峰值测量误差,但却带来了相干斑问题<sup>[17,18]</sup>。采样造成的峰值测量误差与相干斑误差的作用孰轻孰重视定标器尺寸与分辨率大小相比较而定:定标器尺寸越小,越接近理想点目标,其峰值的测量值随位置的变动越明显;定标器尺寸越大,可以与分辨率相比拟时,相干斑是峰值测量的主要影响因素。

## 3 采样对多极化 SAR 成像的影响

对于单极化 SAR,我们只关心图像强度,无需知道回波的绝对相位。而对于多极化 SAR,不仅要测量每组极化回波的幅度,还要精确知道它们的相对相位。严格地讲,我们需要的极化数据应该是同时发射两种极化的电磁波产生的,但考虑到系统实现的复杂度等限制条件,极化 SAR 通常采用时分工作方式,这种“准同时测量”势必造成极化数据间的相对幅度和相位误差。

### 3.1 相对幅度和相位与点目标位置

脉冲重复频率为 PRF 的时分工作方式极化 SAR 系统在慢时间域里每隔  $\Delta\tau = 2/\text{PRF}$  发射一个  $H$  极化 LFM 脉冲  $\exp\{j\pi k_r t^2\}$  和一个同样波形的  $V$  极化脉冲,二者间隔  $\Delta\tau/2$ 。为了研究非同时测量造成的误差,本文使用散射矩阵为  $\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$  的点目标。发射  $H$  极化信号得到的 HH, VH 数据和发射  $V$  极化信号得到的 HV, VV 数据具有相同的理想回波形式

$$s_{pq}(t, \tau) = \exp\left\{j\pi k_r \left[t - \frac{2}{c}R(\tau)\right]^2 - j\frac{4\pi}{\lambda}R(\tau)\right\} \quad (4)$$

其中  $p, q = h, v, R(\tau)$  是 SAR 平台与点目标之间距离,它是关于慢时间  $\tau$  (以及点目标位置  $x_0, y_0$ ) 的函数。这两组回波各自经过距离向匹配滤波器

$$h_r(t) = \exp\{-j\pi k_r t^2\} \quad (5)$$

和方位向匹配滤波器

$$h_a(\tau) = \exp\{-j\pi k_d \tau^2\} \quad (6)$$

其中  $k_r$  为 LFM 信号的调频斜率,  $k_d = 2V^2/(\lambda R_0)$  为方位向信号的多普勒调频斜率。脉冲压缩结果为<sup>[13]</sup>

$$s'_{pq}(x, y) = \text{sinc}\left(\frac{x-x_0}{d_r}\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{y-y_0}{d_a}\right) \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi x_0}{\lambda} - j\frac{4\pi}{\lambda x_0}(y-y_0)^2\right\} \quad (7)$$

SAR 实际接收数据是对上式的 2 维采样。注意这里的方位向过采样率定义为  $q_a = (\text{PRF}/2)/B_d = d_a/\delta_a$ ,  $B_d$  为多普勒带宽,  $\delta_a = V \cdot \Delta\tau = 2V/\text{PRF}$  为两个  $H$  信号(或两个  $V$  信号)发射时间间隔内载机飞过的距离,即  $H$  信号(或  $V$  信号)方位向采样间距。HH, VH 数据与 HV, VV 数据的方位向采样点交替分布,而它们的距离向采样点分布相同。由于距离向上采样点分布相同,故距离向采样对相对幅度和相位没有影响。在方位向上,HH, HV 数据的采样点与 HV, VV 恰好相差半个采样间隔  $\delta_a/2$ , 采样点位于方位向脉冲响应 sinc 函数的不同位置,采样值必然不同。例如,若点目标位于 HH, VH 数据的方位向采样点上,则它必然位于 HV, VV 数据的两个相邻方位向采样点的中点处,此时 HH, VH 采样后的方位向信号峰值为 1, HV, VV 峰值为  $|\text{sinc}(0.5/q_a)|$ , 它们的差别最大。

本文按照表 1 的参数对上述过程进行了仿真,图 5 给出了点目标的 HH 响应相对于 VV 响应的峰值幅相的仿真结果(VH 与 HH 同, HV 与 VV 同,故省略),距离向、方位向过采样率都为 1.2。由图可见,极化数据间的相对幅度和相位与点目标的斜距坐标无关,与方位坐标有关;相对幅度和相位是点目标方位坐标的周期函数,周期为一个方位向采样间距  $\delta_a$ 。HH 相对于 VV 的相对幅度最大为 2.6 dB, 相对相位不超过  $\pm 0.6^\circ$ ; 可见采样造成的相对幅度误差还是很大的。

### 3.2 改进的方位向匹配滤波器

极化数据间这样大的相对幅度是无法接受的,其原因在于 HH, VH 数据和 HV, VV 数据具有同样形式的脉冲响应式(7),却有分布不同的采样点。为了消除采样造成的相对幅度和相位误差,我们对 HV, VV 的方位向匹配滤波器函数进行改进,使 HV, VV 的脉冲响应相对于 HH, VH 在方位向上具有

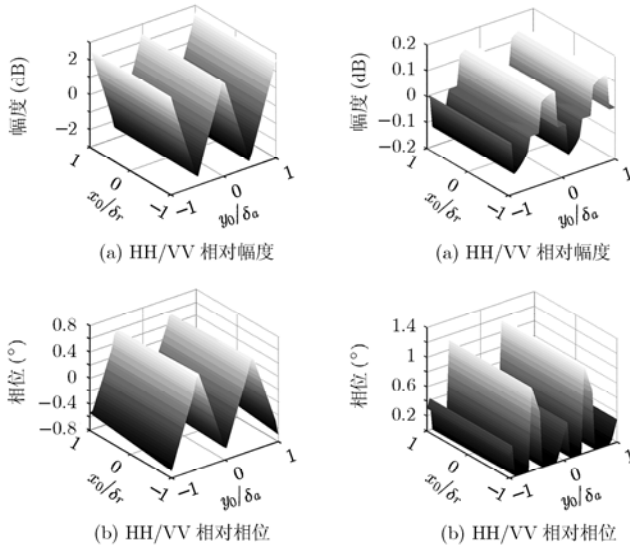


图 5 极化数据相对幅度和相位与点目标位置的关系

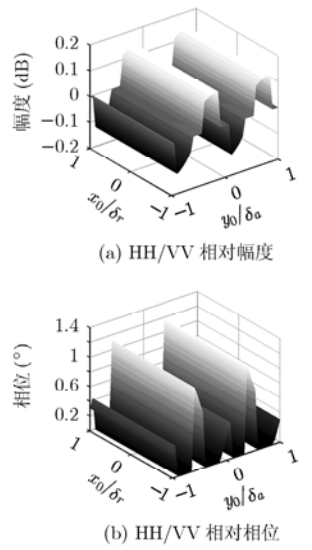


图 6 用改进的方位向匹配滤波器后的相对幅度和相位

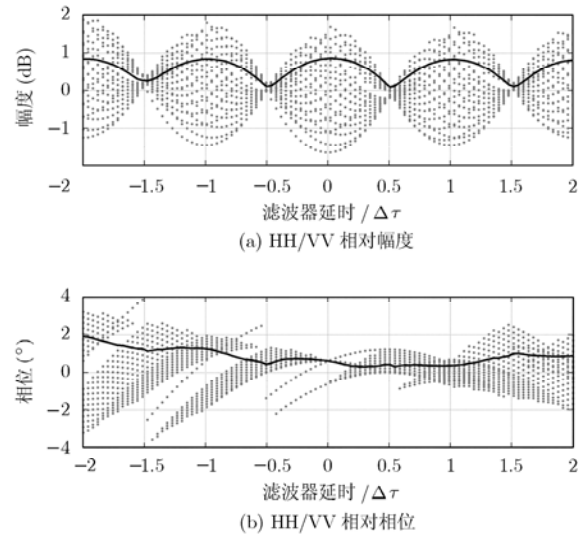


图 7 相对幅度和相位与方位向滤波器时移的关系

$\delta_a/2$  的平移，这样经过采样后才能得到相同的采样值。即对 HH,VH 数据仍然使用式(6)的方位向匹配滤波器，而对 HV,VV 数据使用

$$h'_a(\tau) = \exp\{-j\pi k_d(\tau + \Delta\tau/2)^2\} \quad (8)$$

即这两组极化数据的方位向匹配滤波器函数也要相差  $\Delta\tau/2 = 1/\text{PRF}$  的时移。

图 6 是使用改进后的方位向匹配滤波器(8)进行脉冲压缩后得到的相对幅度和相位与点目标位置的关系图。由图 6 可见，相对幅度最大不超过 0.25 dB，比使用原来的方位向匹配滤波器减小了一个数量级，虽然相对相位没有改善，最大值在  $2^\circ$  左右，仍然处于可以接受的范围内。

为了证明两个方位向滤波器时移  $\Delta\tau/2$  时点目标极化数据间相对幅度和相位最小，我们对 50 个均匀分布于方位向采样间隔内的点目标的成像过程进行了仿真，图 7 显示了 50 个点目标的相对幅度和相位(浅色圆点)及它们的标准差(黑色实线)与滤波器时移的关系，方位向、距离向过采样率都为 1.2。由图可见，相对幅度随滤波器时移的变化明显，而相对相位变化缓慢。当时移为  $(n+0.5)\Delta\tau$  时的相对幅度的标准差取得极小值( $n$  为整数)，为了尽量减小点目标的方位向坐标误差，选择延时为  $\pm 0.5\Delta\tau$ 。

#### 4 结束语

本文分析了距离向、方位向 2 维采样对单极化 SAR 点目标峰值测量和点目标定位带来的影响，指出脉冲响应峰值是点目标位置的函数，在采样点处取得极大值，在距采样点最远处取得极小值。给出了由方位向采样造成的时分工作方式多极化 SAR

的成像误差，分析了极化数据间相对幅度和相位误差的成因，并给出了降低该误差的方法。定标器尺寸越小，越接近理想点目标，响应峰值和极化数据相对幅度和相位随位置起伏的现象越明显；对于面目标，采样单元(像素)的响应是无数理想点目标响应的相干叠加，起伏效应由于平均效应而被削弱，相干斑成为影响图像质量的主要因素。本文的结论和方法对于 SAR 图像的辐射定标和定量化应用有着至关重要的意义。

#### 参 考 文 献

- [1] 王一丁, 涂国防, 洪峻. SAR 辐射定标中的地物杂波抑制方法[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 544-548.  
Wang Yi-ding, Tu Guo-fang, and Hong Jun. Clutter suppression in SAR radiometric calibration [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(5): 544-548.
- [2] Curlander J C and McDonough R N. Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991, Chapter 7.
- [3] Zou K and Liang D. Radiometric calibration of low frequency UWB SAR images[C]. EUSAR 2004, Ulm, Germany, May 25-27, 2004: 917-920.
- [4] Freeman A. SAR calibration: an overview[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(6): 1107-1121.
- [5] Dostovalov M Y, Kadantsev A S, and Shaposhnikov V I. Improvement of radiometric calibration accuracy using super resolution methods[C]. EUSAR 2008, Friedrichshafen, Germany, 2008: 101-104.
- [6] Freeman A and Saatchi S. On the detection of Faraday rotation in linearly polarized L-band SAR backscatter

- signatures[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(8): 1607-1616.
- [7] Qi Ren-yuan and Jin Ya-qiu. Analysis of the effects of Faraday rotation on spaceborne polarimetric SAR observation at P-band[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(5): 1115-1122.
- [8] Zebker H A, Van Zyl J J, and Held D H. Imaging radar polarimetry from wave synthesis[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 91(B5): 683-701.
- [9] Zebker H A and Van Zyl J J. Imaging radar polarimetry: A review[J]. *Proceedings of IEEE*, 1991, 79(11): 774-789.
- [10] Held D N, Brown W E, and Freeman A. The NASA/JPL multifrequency, multipolarization airborne SAR system[C]. IGARSS'88, Edimburgh, Scotland, 1998: 345-349.
- [11] Jordan R L, Humeycutt B L, and Werner M. The SIR-C/X-SAR synthetic aperture radar system[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(4): 829-839.
- [12] 齐向阳. 极化合成孔径雷达的模拟研究[D]. [博士论文], 中国科学院研究生院, 2000.  
Qi Xiang-yang. Simulated study on polarimetric SAR [D]. [Ph.D. dissertation]. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2000.
- [13] Cumming I G, Wong F H 著, 洪文译. 合成孔径雷达成像——算法与实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007, 第 3 章.
- [14] 张澄波. 综合孔径雷达——原理、系统分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1989, 第 2 章.  
Zhang Cheng-bo. Synthetic Aperture Radar—Theory, System Analysis and Application [M]. Beijing: Science Press, 1989, Chapter 2.
- [15] Small D, Rosich B, and Meier E, *et al.* Geometric calibration and validation of ASAR imagery[C]. CEOS SAR 2004, Ulm, Germany, 2004.
- [16] 李立钢, 尤红建, 彭海良等. 一种新的星载 SAR 图像定位方法的研究[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(6): 1441-1444.  
Li Li-gang, You Hong-jian, and Peng Hai-liang, *et al.* A new method to locate satellite SAR imagery [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(6): 1441-1444.
- [17] Liu Guo-qing, Huang Shun-ji, and Xiong Hong, *et al.* Study on speckle reduction in multi-look polarimetric SAR image[J]. *Journal of Electronics*, 1999, 16(1): 25-31.
- [18] 陈红艳, 付毓生, 张睿等. 基于 ICA-SCS 算法的极化 SAR 图像相干斑抑制[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(4): 819-821.  
Chen Hong-yan, Fu Yu-sheng, and Zhang Rui. Speckle reduction of polarimetric SAR image based on ICA-SCS algorithm [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(4): 819-821.
- 王 朔: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为多极化合成孔径雷达定标技术.
- 禹卫东: 男, 1969 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为 SAR 信号处理及其硬件实现.
- 祁海明: 男, 1980 年生, 助理研究员, 研究方向为合成孔径雷达数据压缩技术.