

极化白化滤波器的一种多通道扩展

吴永辉 计科峰 郁文贤

(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要 为减小相干斑对分类、检测的影响,通常要对极化合成孔径雷达图像进行相干斑抑制。极化白化滤波器(PWF)是利用多个极化通道的复数据抑制相干斑的有效方法,但其输出只有一个通道。为了在后续处理中能够利用全极化数据,该文对PWF进行了改进,提出了多通道极化白化滤波器法(MCPWF)。该方法在保持PWF最少相干斑图像输出的同时,还能得到各个极化通道滤波后的输出。Pi-SAR实测数据的实验结果验证了该方法的有效性。

关键词 极化合成孔径雷达,极化白化滤波器,相干斑抑制

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)09-1590-04

A Multi-channel Extension of Polarimetric Whitening Filter

Wu Yong-hui Ji Ke-feng Yu Wen-xian

(School of Electronics Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract In order to reduce the effect of speckle on classification and detection, the polarimetric synthetic aperture radar imagery should be preprocessed to suppress speckle. The Polarimetric Whitening Filter (PWF) is efficient in speckle suppression by using complex data of three polarimetric channels. Nevertheless, it only outputs one channel of data. In this paper, a method called Multi-Channel Polarimetric Whitening Filter (MCPWF) is presented. It maintains the optimal speckle reduction performance of the PWF, and three polarimetric channels of output are obtained as well, so that fully polarimetric data can also be used in advanced processing. The effectiveness of the MCPWF is verified through experimental results of Pi-SAR data.

Key words Polarimetric Synthetic Aperture Radar (SAR), Polarimetric Whitening Filter (PWF), Speckle reduction

1 引言

相干斑是存在于合成孔径雷达(SAR)图像中的一种乘性噪声。它会造成图像模糊,并给目标分类、检测等处理带来困难。多视平均是一种常用的相干斑抑制方法,但在抑制相干斑的同时,也会导致图像空间分辨率降低。

极化SAR的出现使得遥感数据由单极化扩展到全极化,更全面地包含了目标的电磁散射信息。利用全极化数据抑制相干斑已成为一个可行的发展方向。1987年,Zebker等人^[1]提出了极化总功率法,对HH, HV和VV 3个极化通道的功率数据进行非相干叠加,得到的图像比单极化图像具有更少的相干斑。Lee等人^[2]提出的最优加权法的输出是3个极化功率图像的最优线性加权组合^[2],这相当于极化总功率法的一种扩展。这两种方法都只利用了数据的幅度而忽略了重要的相位信息。1990年Novak等人^[3]提出的极化白化滤波器法(Polarimetric Whitening Filter, PWF)则充分利用了3个极化通道的幅度和相位信息,即利用3种极化下的复数据得到了使标准差与均值之比最小的输出图像。但此方法只适用于单视图像,且输出只有一个通道数据,损失了极化信息。刘国庆等人^[4,5]将PWF扩展到了多视的情况。为了在SAR图像的分类、检测与识别等后续处理中能够利用多通道极化数据,必

须在对全极化SAR数据进行相干斑抑制时保持多个极化通道输出。皮亦鸣等人^[6]利用白化矩阵得到了3种极化的滤波结果,但正如作者分析的那样,该方法对于HH和HV极化图像中的相干斑没有抑制作用。

本文在研究PWF的基础上,提出了多通道极化白化滤波器法(Multi-Channel Polarimetric Whitening Filter, MCPWF)。该方法从极化测量矢量的协方差矩阵出发,在保持PWF最少相干斑图像输出的同时,利用白化矩阵得到了3个极化通道经白化滤波后的输出图像。Pi-SAR实测数据的实验结果验证了本文所得到的3个通道的输出图像较原始图像有更少的相干斑。

2 极化白化滤波器

在满足互易定理的情况下,极化SAR测量矢量可表示为

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \text{HH} \\ \text{HV} \\ \text{VV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{HH}_r + j\text{HH}_i \\ \text{HV}_r + j\text{HV}_i \\ \text{VV}_r + j\text{VV}_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 HH_r 表示HH极化的实部, HH_i 表示其虚部。假定各种极化的实部和虚部分别服从高斯分布,且两者之间是独立的^[3],因此HH, HV和VV分别服从联合复高斯分布, $\mathbf{Y}$ 的概率密度函数为

$$f(\mathbf{Y}) = \frac{1}{\pi^3 |\mathbf{C}|} \exp\{-\mathbf{Y}^H \mathbf{C}^{-1} \mathbf{Y}\} \quad (2)$$

式中 $\mathbf{C} = E\{\mathbf{Y}\mathbf{Y}^H\}$ 为复极化测量矢量的协方差矩阵, 上标 H 表示共轭转置, $|\mathbf{C}|$ 表示 $\mathbf{C}$ 的行列式。假定相同极化与交叉极化不相关, 而相同极化分量相关^[3], 则复极化测量矢量协方差矩阵的表达式为

$$\mathbf{C} = \sigma_{HH} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \rho\sqrt{\gamma} \\ 0 & \varepsilon & 0 \\ \rho^*\sqrt{\gamma} & 0 & \gamma \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{式中 } \sigma_{HH} = E\{|\mathbf{HH}|^2\}, \quad \varepsilon = \frac{E\{|\mathbf{HV}|^2\}}{E\{|\mathbf{HH}|^2\}}, \quad \gamma = \frac{E\{|\mathbf{VV}|^2\}}{E\{|\mathbf{HH}|^2\}},$$

$$\rho = \frac{E\{\mathbf{HH} \cdot \mathbf{VV}^*\}}{\sqrt{E\{|\mathbf{HH}|^2\} \cdot E\{|\mathbf{VV}|^2\}}}, \text{ 上标 } * \text{ 表示复共轭。}$$

通常认为相干斑是乘性的, 其模型为

$$\mathbf{Y} = \sqrt{g} \mathbf{X} \quad (4)$$

式中 g 为服从 Gamma 分布的纹理变量, 用来表征地表的辐射特征, 与场景的起伏有关, $\mathbf{X}$ 为独立的复高斯极化矢量, 用来表征相干斑, g 和 $\mathbf{X}$ 是独立的。

PWF 的核心思想是通过复极化测量矢量 $\mathbf{Y}$ 的各分量之间的最优组合来构造一幅相干斑最少的图像, 衡量相干斑强弱的指标是图像标准差与均值之比:

$$\frac{s}{m} = \frac{\sqrt{\text{var}\{y\}}}{\text{mean}\{y\}} \quad (5)$$

式中 y 为功率图像。该指标的值越大说明相干斑越强。

给定极化测量矢量 $\mathbf{Y}$, 构造输出图像形式如下:

$$y = \mathbf{Y}^H \mathbf{A} \mathbf{Y} = g \mathbf{X}^H \mathbf{A} \mathbf{X} \quad (6)$$

式中, 加权矩阵 $\mathbf{A}$ 为非负定 Hermite 对称阵以保证输出图像强度不出现负值。这样, 相干斑抑制问题就转化为求最优加权矩阵 $\mathbf{A}_{\text{opt}}$, 以使输出图像的 s/m 最小。Barnes 已经证明^[7], 对于上式有以下结论:

$$\left. \begin{aligned} E\{\mathbf{X}^H \mathbf{A} \mathbf{X}\} &= \text{tr}(\mathbf{C} \mathbf{A}) = \sum_{i=1}^3 \lambda_i \\ \text{var}\{\mathbf{X}^H \mathbf{A} \mathbf{X}\} &= \text{tr}(\mathbf{C} \mathbf{A})^2 = \sum_{i=1}^3 \lambda_i^2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中 $\text{tr}(\cdot)$ 表示矩阵的迹, $\lambda_i (i=1,2,3)$ 为矩阵 $\mathbf{C} \mathbf{A}$ 的特征值。根据式(5)和式(7), 可得

$$\left(\frac{s}{m}\right)^2 = \frac{\text{var}\{y\}}{E^2\{y\}} = \left(1 + \frac{1}{v}\right) \cdot \frac{\left(\sum_{i=1}^3 \lambda_i^2\right)}{\left(\sum_{i=1}^3 \lambda_i\right)^2} + \frac{1}{v} \quad (8)$$

式中 $\frac{1}{v} = \frac{\text{var}\{g\}}{E^2\{g\}}$ 表征图像纹理波动程度, 对于给定的图像, 该值可视为常量^[8], 因此, 求 s/m 的最小值等价于求

$\frac{\left(\sum_{i=1}^3 \lambda_i^2\right)}{\left(\sum_{i=1}^3 \lambda_i\right)^2}$ 的最小值。由于 $\mathbf{C} \mathbf{A}$ 为非负定 Hermite 对称阵, 因此 $\lambda_i (i=1,2,3)$ 为实数, 易知

$$\frac{\left(\sum_{i=1}^3 \lambda_i^2\right)}{\left(\sum_{i=1}^3 \lambda_i\right)^2} \geq \frac{1}{3} \quad (9)$$

式中等号成立的条件为 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$ 。

由上述推导可知, 最优加权矩阵 $\mathbf{A}_{\text{opt}}$ 为使矩阵 $\mathbf{C} \mathbf{A}$ 的特征值相等的矩阵, 因此

$$\mathbf{A}_{\text{opt}} = \mathbf{C}^{-1} \quad (10)$$

$\mathbf{A}_{\text{opt}}$ 称为极化白化滤波器(PWF), 最小相干斑的输出图像为

$$y = \mathbf{Y}^H \mathbf{C}^{-1} \mathbf{Y} = g \mathbf{X}^H \mathbf{C}^{-1} \mathbf{X} \quad (11)$$

忽略倍乘因子 g , 可得

$$y = \frac{|\mathbf{HH}|^2}{\sigma_{HH}(1-|\rho|^2)} + \frac{|\mathbf{VV}|^2}{\sigma_{HH}(1-|\rho|^2)\gamma} + \frac{|\mathbf{HV}|^2}{\sigma_{HH}\varepsilon} - \frac{2|\rho|}{\sigma_{HH}(1-|\rho|^2)\sqrt{\gamma}} |\mathbf{HH}||\mathbf{VV}| \cos(\phi_{HH} - \phi_{VV} - \phi_\rho) \quad (12)$$

式中 ϕ_{HH} , ϕ_{VV} 和 ϕ_ρ 分别为复数 $\mathbf{HH}$, $\mathbf{VV}$ 和 ρ 的相位角。

3 多通道极化白化滤波器

由式(12)可以看出, PWF 将输入的 3 个通道的数据进行复加权后只得到了一个通道的图像。为了在分类、检测及识别等图像的后续处理中仍然能够利用 3 个通道的极化数据, 有必要在相干斑抑制时保留极化通道数目, 而不仅仅是输出一幅图像。

3.1 单视情况

设极化 SAR 的测量矢量 $\mathbf{Y}_1$ 如式(1)所示。在第 2 节的推导中假定相同极化和交叉极化不相关, 这里考虑更一般的两者相关的情况。当相同极化和交叉极化相关时, $\mathbf{Y}_1$ 的协方差矩阵 $\mathbf{C}_1$ 中不再有零元素。由于协方差矩阵 $\mathbf{C}_1$ 是正定的 Hermite 矩阵, 根据矩阵理论的 Cholesky 分解, 存在下三角矩阵 $\mathbf{G}_1$, 使得

$$\mathbf{C}_1 = \mathbf{G}_1 \mathbf{G}_1^H \quad (13)$$

设 $\mathbf{C}_1$ 中的元素为 $c_{1,ij} (i, j=1,2,3)$, $\mathbf{G}_1$ 中的元素为 $g_{1,ij} (i, j=1,2,3)$, 则

$$\left. \begin{aligned} g_{1,11} &= \sqrt{c_{1,11}} \\ g_{1,i1} &= c_{1,i1} / g_{1,11} \quad (i=2,3) \\ g_{1,kk} &= \sqrt{c_{1,kk} - \sum_{t=1}^{k-1} |g_{1,kt}|^2} \quad (k=2,3) \\ g_{1,32} &= \left(c_{1,ik} - \sum_{t=1}^{k-1} g_{1,it} g_{1,kt}^* \right) / g_{1,kk} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

根据式(11)和式(13)可得:

$$y_{11} = \mathbf{Y}_1^H \mathbf{C}_1^{-1} \mathbf{Y}_1 = \mathbf{Y}_{1w}^H \mathbf{Y}_{1w} \quad (15)$$

式中 $\mathbf{Y}_{1w}$ 的表达式为

$$\mathbf{Y}_{1w} = \mathbf{G}_1^{-1} \mathbf{Y}_1 \quad (16)$$

其中下三角矩阵 $\mathbf{G}_1^{-1}$ 称为白化矩阵。为表示方便起见, 令

$D_1 = G_1^{-1}$, 则

$$D_1 = \begin{bmatrix} d_{1,11} & 0 & 0 \\ d_{1,21} & d_{1,22} & 0 \\ d_{1,31} & d_{1,32} & d_{1,33} \end{bmatrix} \quad (17)$$

于是 Y_1 经 G_1^{-1} 白化后得到

$$Y_{1w} = \begin{bmatrix} d_{1,11}HH \\ d_{1,21}HH + d_{1,22}HV \\ d_{1,31}HH + d_{1,32}HV + d_{1,33}VV \end{bmatrix} \quad (18)$$

Y_{1w} 中的元素可以理解为 Y_1 中对应元素经 G_1^{-1} 白化后的输出。式(18)与文献[6]的结果类似,但由于利用了交叉极化和相同极化之间的相关性,因此和文献[6]相比,式中第 2 个元素多了 HH 项,亦即 G_1^{-1} 对 HV 通道的相干斑也有一定的抑制作用。 Y_{1w} 的 3 个元素中,只有 VV 通道的输出利用了 3 个通道的输入数据,相干斑抑制效果最明显,因此这里取 Y_{1w} 的第 3 个元素作为 VV 通道的输出。

交换式(1)中元素的顺序,可得到极化测量矢量的另外两种形式:

$$Y_2 = \begin{bmatrix} VV \\ HV \\ HH \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} VV_r + jVV_i \\ HV_r + jHV_i \\ HH_r + jHH_i \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$Y_3 = \begin{bmatrix} HH \\ VV \\ HV \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} HH_r + jHH_i \\ VV_r + jVV_i \\ HV_r + jHV_i \end{bmatrix} \quad (20)$$

利用类似推导可得:

$$Y_{2w} = \begin{bmatrix} d_{2,11}VV \\ d_{2,21}VV + d_{2,22}HV \\ d_{2,31}VV + d_{2,32}HV + d_{2,33}HH \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$Y_{3w} = \begin{bmatrix} d_{3,11}HH \\ d_{3,21}HH + d_{3,22}VV \\ d_{3,31}HH + d_{3,32}VV + d_{3,33}HV \end{bmatrix} \quad (22)$$

式中 $d_{2,ij}(i, j=1,2,3)$ 和 $d_{3,ij}(i, j=1,2,3)$ 为白化矩阵 $D_2 = G_2^{-1}$ 和 $D_3 = G_3^{-1}$ 中的元素,与上面考虑的 VV 极化的情况类似, Y_{2w} 和 Y_{3w} 中的第 3 个元素分别对应 HH 和 HV 的白化输出。

由于极化测量矢量中元素位置的交换并不带来更多的信息,因此 Y_{1w} , Y_{2w} 和 Y_{3w} 中元素的功率和相等,这个结论也可以利用三者的表达式推导出来,限于篇幅,此处从略。有鉴于此,本文取 Y_{1w} 的元素功率和作为总的功率图像输出,它本质上相当于假设相同极化与交叉极化相关时 PWF 的输出。

3.2 多视情况

为求得多视时 VV 极化白化后的结果,令 C_{L1} 为极化测量矢量的协方差矩阵:

$$C_{L1} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L Y_{i1} Y_{i1}^H \quad (23)$$

式中 Y_{i1} 为第 i 视样本的极化测量矢量,下标 1 表示各极化通道排列顺序与式(1)相同, L 为视数。由乘性相干斑模型可得

到多视极化 SAR 协方差矩阵:

$$C_{L1} = g \Sigma_{L1} \quad (24)$$

式中 $\Sigma_{L1} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L X_{i1} X_{i1}^H$ 为多视平均后的相干斑协方差矩阵,

这里 X_{i1} 为第 i 视样本的相干斑矢量。由式(16)可得到白化后某视的极化测量矢量为 $Y_{i1w} = G_1^{-1} Y_{i1}$, 协方差矩阵为

$$C_{L1w} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L Y_{i1w} Y_{i1w}^H = G_1^{-1} C_{L1} G_1^{-H} \quad (25)$$

易知,式(25)中对角线上的元素 $C_{L1w,ii}(i=1,2,3)$ 分别对应于 HH, HV 和 VV 极化的输出,其中只有 $C_{L1w,33}$ 充分利用了 3 个通道的输入数据,因此选取该元素作为白化后 VV 通道的输出。利用类似单视的思路和推导,可得到多视情况下 HH 和 HV 白化后的输出,并取 $C_{L1w,33}$ 中对角线上元素的功率和作为多视情况下的总功率图像。

4 实验结果及讨论

在 PWF 和 MCPWF 处理的过程中,都需要估计协方差矩阵中的元素。估值可以采用非自适应和自适应两种方法,其中非自适应方法在整个图像区域内计算协方差矩阵,自适应方法则在滑动矩形窗内提取协方差矩阵。一般将利用非自适应方法估值的极化白化滤波器简称为 PWF,将对应的自适应方法简称为 APWF (Adaptive Polarimetric Whitening Filter)。类似地,本文将非自适应估值的多通道极化白化滤波器简称为 MCPWF,而将对应的自适应方法简称为 AMCPWF (Adaptive Multi-Channel Polarimetric Whitening Filter)。

实验中使用的是日本 Pi-SAR 全极化 4 视数据,从图像中截取 400×400 像素的场景。对于自适应方法,为避免因窗口过小而导致参数估计不准确,滑动窗口大小取为 31×31 像素。选取图像左半部分较暗的均匀场景计算参数 s/m 以评估相干斑抑制效果。

表 1 给出了文献[6]的方法和本文方法对各个极化通道的相干斑抑制效果比较。可以看出,在非自适应情况下,文献[6]的方法只对 VV 通道的相干斑有抑制作用,而 HH 和 HV 通道的相干斑没有得到任何抑制;在自适应情况下,由于采用滑动窗对协方差矩阵进行估值,任一通道图像不同像素对应的白化矩阵 G^{-1} 的元素各不相同,因此文献[6]的方法对 3 个通道图像的相干斑均有一定抑制作用。本文提出的 MCPWF 对 3 个极化通道的相干斑都有较好的抑制效果,其中 HH 和 HV 通道的抑制效果明显优于文献[6]的方法。由于 AMCPWF 对白化矩阵 G^{-1} 的估值较 MCPWF 更为准确,因此相干斑抑制效果更好。

表 2 给出了 PWF 和 MCPWF 对总功率图像的相干斑抑制效果比较。可以看出,在非自适应情况下,考虑了相同极化和交叉极化相关性的 PWF 比未考虑相关性的 PWF 的相干斑抑制效果要好一些;对自适应情况,相同极化与交叉极化

表1 文献[6]方法和本文方法对3个极化通道数据的相干斑抑制效果比较

Tab.1 Comparison on performance of the method in Ref. [6] and the method proposed in this paper for reducing speckle of 3 polarimetric channels data

	$ HH ^2$	$ HV ^2$	$ VV ^2$
原始图像	0.2618	0.4828	0.2342
文献[6]的非自适应方法	0.2618	0.4828	0.2225
MCPWF	0.2440	0.4281	0.2223
文献[6]的自适应方法	0.1931	0.1624	0.1111
AMCPWF	0.1570	0.1420	0.1111

表2 PWF和MCPWF对总功率图像的相干斑抑制效果比较

Tab.2 Comparison of performance of the PWF and the MCPWF for reducing speckle of the total power image

	相同极化与交叉极化不相关时的PWF	相同极化与交叉极化相关时的PWF	MCPWF
非自适应	0.1902	0.1855	0.1855
自适应	0.0688	0.0686	0.0686

的相关性并不会显著影响PWF的相干斑抑制性能。如前所述, MCPWF的总功率图像与相同极化与交叉极化相关时PWF的结果相同, 因此这两种方法对输出总功率图像的相干斑抑制作用是相同的。

图1给出了3个极化通道的原始图像以及对应的经MCPWF和AMCPWF处理后的结果。从图1中可以看出,

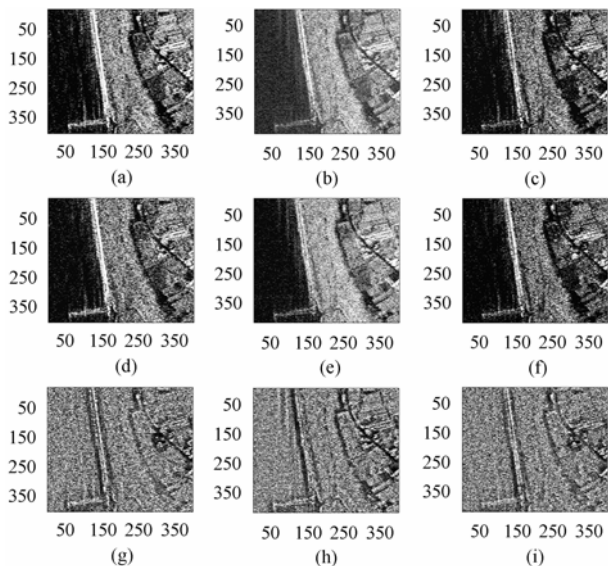


图1 MCPWF和AMCPWF相干斑抑制效果比较 (a)~(c)分别为HH, HV和VV通道的原始图像, (d)~(f)分别为MCPWF处理后的HH, HV和VV通道图像, (g)~(i)分别为AMCPWF处理后的HH, HV和VV通道图像

Fig.1 Comparison on performance of the MCPWF and the AMCPWF for reducing speckle (a)~(c) are respectively original images of HH,

HV and VV, (d)~(f) are respectively images of HH, HV and VV processed using the MCPWF, (g)~(i) are respectively images of HH, HV and VV processed using the AMCPWF

经MCPWF处理后, 3个通道的输出图像在视觉上显得更为清晰, 图中右边的细节部分更加清楚。利用窗口大小为 31×31 的AMCPWF处理后, 图中的边缘信息更加突出, 而细节部分有一定的损失, 这也是自适应方法的一个缺点^[6]。

5 结束语

本文在研究PWF的基础上, 提出了多通道极化白化滤波器(MCPWF), 该方法克服了PWF的输出只有一个通道的缺点, 在保持PWF最少相干斑输出图像的同时, 利用白化矩阵得到了3个极化通道经白化滤波后的结果, 并通过实验验证了MCPWF对各通道输出图像的相干斑抑制效果。如何利用MCPWF输出的多通道数据进行图像的分类、检测等后续处理将是下一步的研究目标。

感谢 电子科技集团第38所张长耀主任提供日本Pi-SAR全极化数据。

参考文献

- [1] Zebker H A, van Zyl J J, Held D N. Imaging radar polarimetry from wave synthesis. *Journal of Geophysics Research*, 1987, 92 (B1): 683–701.
- [2] Lee J S, Grunes M R, Mango S A. Speckle reduction in multipolarization and multifrequency SAR imagery. *IEEE Trans. on GRS*, 1991, 29 (4): 535–544.
- [3] Novak L M, Burl M C. Optimal speckle reduction in polarimetric SAR imagery. *IEEE Trans. on AES*, 1990, 26 (2): 293–305.
- [4] Liu Guoqing, Huang Shunji, Torre A, et al.. The Multilook Polarimetric Whitening Filter (MPWF) for intensity speckle reduction in polarimetric SAR images. *IEEE Trans. on GRS*, 1998, 36 (3): 1016–1020.
- [5] 刘国庆, 黄顺吉, 熊红等. 多视极化SAR图像相干斑抑制的研究. *电子科学学报*, 1998, 20 (3): 379–385.
- [6] 皮亦鸣, 邹琪, 黄顺吉. 极化SAR相干斑抑制——极化白化滤波器. *电子与信息学报*, 2002, 24 (5): 597–603.
- [7] Barnes R M. Detection of randomly polarized target. [Ph. D. dissertation], Department of Electrical Engineering, Northeastern University, Boston, MA, 1984, 6.
- [8] Novak L M, Burl M C, Irving W W. Optimal polarimetric processing for enhanced target detection. *IEEE Trans. on AES*, 1993, 29 (1): 234–244.

吴永辉: 男, 1976年生, 博士生, 研究方向为全极化SAR信息处理。

计科峰: 男, 1974年生, 博士, 讲师, 主要研究方向为遥感信息处理、SAR图像理解。

郁文贤: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电子系统信息处理与集成。