

# UWB SAR 叶簇遮蔽目标中的变化检测技术

王广学 黄晓涛 周智敏

(国防科学技术大学电子科学与工程学院超宽带室, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 在超宽带合成孔径雷达叶簇隐蔽目标检测中, 目前采用的变化检测算法主要包括归一化相减法和似然比法, 这两种算法在实际应用中存在如下问题: 归一化相减法在图像相关性较低时性能下降严重, 而似然比法需要目标及杂波充分的先验知识。鉴于上述问题, 本文提出了一种两级处理变化检测算法, 第一级基于修正的线性均方估计构造变化检测量; 第二级采用一种改进的秩序滤波器, 在保持目标边缘特性的同时, 克服了待检测图像中杂波分布的正向拖尾特性, 提高了算法检测性能。文中最后基于实测数据验证了算法的有效性。

**关键词:** 超宽带合成孔径雷达; 叶簇隐蔽目标检测; 变化检测; 修正线性最小均方估计

**中图分类号:** TN957.51    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1003-0530(2010)03-0327-05

## Change Detection in UWB SAR FOPEN Target Detection

WANG Guang-xue HUANG Xiao-tao ZHOU Zhi-min

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

**Abstract:** The main change detection algorithms include forming likelihood ratio algorithm and normalized image subtraction algorithm in FOPEN target detection using UWB SAR. There are respective problems for two change detection algorithms: The performance of normalized image subtraction algorithm will greatly degrade, when the correlation of sar images is reduced, and forming likelihood ratio algorithm needs enough prior knowledge. In this paper, a two stage change detection algorithm is proposed. In first stage, a change test statistic is computed based on modified LMSE estimation. In second stage, a improved rank order filter is introduced. It is used to overcome the positive tail of clutter pdf without destroying the edge information of target, which improves the performance of detection. Finally, the experimental results show that an obvious performance improvement on detect can be obtained through the new algorithm.

**Key words:** UWB SAR; FOPEN; change detection; modified LMSE estimation

## 1 引言

由于超宽带合成孔径雷达 (Ultra-WideBand SAR, UWB SAR) 具有很强的叶簇穿透特性, 对树林隐蔽目标有着良好的侦察成像能力, 因而在军事侦察领域具有广泛的应用前景。然而, 大量的理论与实验数据表明<sup>[1-3]</sup>, 由于粗大树干强杂波的影响, 在实际 UWB SAR 图像中除了车辆、坦克等战术目标, 还有许多类似目标的冲击亮点, 给 UWB SAR 图像的目标检测带来了严重困难。变化检测技术是一种利用同一地区不同时间 SAR 图像之间差异性来实现目标检测的方法, 与常用的基于单幅图像目标检测技术<sup>[3-6]</sup>相比, 变化检测

技术由于进一步利用了同一地区不同时间图像背景的相关性, 具有更高的抑制强树干杂波的潜力, 因而在超宽带合成孔径雷达叶簇隐蔽目标检测中日益受到关注<sup>[7-10]</sup>。

目前在超宽带合成孔径雷达叶簇隐蔽目标检测中常用的变化检测算法分为: 归一化相减法<sup>[8]</sup>和似然比法<sup>[9]</sup>。其中归一化相减法对多幅图像间相关性的依赖非常高, 在相关性较低时性能下降严重; 而似然比法需要目标及杂波分布充分的先验知识, 实现困难。为此, 本文提出了一种两级处理变化检测方法, 第一级采用修正线性均方估计构造变化检测量, 第二级基于变化检测量的统计特性, 采用一种改进的秩序滤波器, 在保

持目标边缘特性的同时,克服了变化检测中杂波分布的正向拖尾效应,进一步提高了检测效果。本文组织结构如下:第二部分比较分析了两种主要的变化检测算法,提出了一种基于最小均方误差准则的变化检测的构造方法,并对上述三种方法的变化检测的杂波统计特性进行了比较分析;第三部分提出了一种改进的秩序滤波器,在保持目标边缘特性的同时,改善了变化检测的杂波分布特性;第四部分对本文算法进行了总结,并基于实测数据对似然比法、归一化相减法和本文算法的检测性能进行了比较分析;第五部分为结论部分。

## 2 基于修正线性均方估计的变化检测构造

考虑基于两幅图像的变化检测,设没有目标的一幅图像为参考图像,而存在目标的一幅图像为检测图像,目前在超宽带合成孔径雷达叶簇遮蔽目标检测中常见的两种变化检测算法为:归一化相减法和似然比法,下面首先对这两种进行分析。

### 2.1 归一化图像相减法<sup>[8]</sup>

实现变化检测最直接的方法就是将参考图像和检测图像进行配准相减,从而消除固定杂波,归一化图像相减法即是采用此种思路。设配准后的参考图像为 $z_1$ ,检测图像为 $z_2$ ,分别对两幅图像归一化并相减得到式(1)所示变化检测量 $\Lambda$ :

$$\Lambda(i, j) = \left[ \frac{z_2(i, j) - \mu_2(i, j)}{\sigma_2(i, j)} \right] - \left[ \frac{z_1(i, j) - \mu_1(i, j)}{\sigma_1(i, j)} \right] \begin{cases} \geq \gamma & \text{change} \\ \leq \gamma & \text{no change} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $u_1, \sigma_1, u_2, \sigma_2$ 分别为图像1、2的杂波统计均值和方差, $\gamma$ 为检测门限。式(1)可等价写为:

$$\Lambda(i, j) = [z_2(i, j) - \mu_2(i, j)] - \left[ \frac{\sigma_2(i, j)(z_1(i, j) - \mu_1(i, j))}{\sigma_1(i, j)} \right] \begin{cases} \geq \gamma & \text{change} \\ \leq \gamma & \text{no change} \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可得:

$$E_{\Lambda}(i, j) = \begin{cases} s - u_2(i, j) & \text{change} \\ 0 & \text{no change} \end{cases} \quad (3)$$

$$\sigma_{\Lambda}(i, j) = (2 - 2\rho_{z_1 z_2}(i, j))\sigma_2(i, j)$$

其中 $s$ 为目标回波信号。由式(3)可知归一化图像相减法的效果与两幅图像的相关系数 $\rho_{z_1 z_2}$ 有关,相关系数越接近1所得检测效果越好,反之当相关系数小于

0.5时所得变化检测量的方差将会大于检测图像归一化后的方差,从而严重影响检测效果。考虑到SAR系统成像过程中的时间、空间去相关性,以及图像配准误差等因素的影响,实际两幅图像的相关性通常较低,为了提高算法的性能,需要采用递归区域自适应最小二乘估计等方法提高图像的相关性<sup>[10]</sup>,然而这将大大的增加算法的运算量,降低算法的运行速度,从而难以满足大区域快速检测的要求。

### 2.2 似然比法<sup>[9]</sup>

首先构造一组与参考图像和检测图像对应的二维向量,其中目标、杂波分别表示为

$$s = \begin{bmatrix} s_1(i, j) \\ s_2(i, j) \end{bmatrix} \quad c = \begin{bmatrix} c_1(i, j) \\ c_2(i, j) \end{bmatrix} \quad (4)$$

为了判断两幅SAR图像中有无变化,构造如下假设检验:

$$H_0: z(i, j) = c(i, j) \quad \text{no change} \\ H_1: z(i, j) = s(i, j) + c(i, j) \quad \text{change} \quad (5)$$

其中, $z$ 表示由参考图像和检测图像构成的二维变量。在上述假设检验条件下,由Neyman-Pearson准则设计如下似然比检测器

$$\Lambda(i, j) = \frac{P(z(i, j) | H_1)}{P(z(i, j) | H_0)} > \psi \quad \text{change} \\ < \psi \quad \text{no change} \quad (6)$$

由(6)式可以看出,似然比法利用似然比函数作为变化检测量,然而这需要在检测时充分掌握目标、杂波的先验知识,以获得其计算表达式,而在实际SAR目标检测中,很难对被检测地区的一些情况进行事先了解和判断,因此似然比变化检测算法所要求的检测条件在多数情况下难以满足,该算法只能在有限的假设情况下进行使用。

### 2.3 基于修正线性均方估计的变化检测量的构造

比较上述方法可知,归一化图像相减法构造变化检测量时由于没有充分考虑参考图像与检测图像间杂波分布的统计规律导致了算法性能的减低,而似然比法由于过多依赖目标及杂波的先验知识而导致算法在实际应用中难以实现。为了解决上述问题,本文提出一种基于修正线性均方估计的变化检测量的构造方法,其具体步骤如下:

① 对参考图像和检测图像进行配准;

② 对于图像中每一点基于参考图像1对检测图像2采用下述修正线性最小均方估计进行预测:

$$\hat{z}_2(i, j) = u_2(i, j) + \frac{\text{cov}(i, j)}{\sigma_1(i, j)}(z_1(i, j) - u_1(i, j)), \\ \text{cov}(i, j) > T \quad (7a)$$

$$\hat{z}_2(i, j) = u_2'(i, j) + \frac{\text{cov}(i, j)}{\sigma_1(i, j)}(z_1(i, j) - u_1(i, j)),$$

$$\text{cov}(i, j) < T \tag{7b}$$

其中  $u_1(i, j)$ 、 $\sigma_1(i, j)$ 、 $u_2(i, j)$ 、 $\sigma_2(i, j)$ 、 $\text{cov}(i, j)$  分别为图像 1、2 中以  $(i, j)$  为中心的本地杂波统计均值、方差、协方差,其具体定义参考式(8)。 $u_2'(i, j)$  为图像 2 以  $(i, j)$  为中心的邻近区域杂波统计均值。

$$u_1(i, j) = \frac{1}{(2l_1 + 1) * (2l_2 + 1)} \sum_{m=-l_1}^{l_1} \sum_{n=-l_2}^{l_2} z_1(i - m, j - n) \tag{8}$$

$$u_2'(i, j) = \frac{1}{M} \left( \sum_{m=-l_1'}^{l_1'} \sum_{n=-l_2'}^{l_2'} z_2(i - m, j - n) - \sum_{m=-l_1}^{l_1} \sum_{n=-l_2}^{l_2} z_2(i - m, j - n) \right) \tag{9}$$

$$M = (2l_1' + 1) * (2l_2' + 1) - (2l_1 + 1) * (2l_2 + 1),$$

$$l_1' > l_1 > 0, l_2' > l_2 > 0 \tag{10}$$

③ 基于预测结果采用式(11)构造变化检测量

$$\Lambda_z(i, j) = z_2(i, j) - \hat{z}_2(i, j) \begin{cases} \geq \gamma & \text{change} \\ \leq \gamma & \text{no change} \end{cases} \tag{11}$$

需要注意的是文中第二步在进行线性均方估计时基于协方差系数进行了修正,这是因为图像变化区域的协方差通常要小于无变化区域,通过式(7)即可避免由  $u_1(i, j)$  造成大的信噪比损失,又可减少由  $u_2'(i, j)$  引入的估计误差,其中门限  $T$  可以通过对  $\text{cov}(i, j)$  进行统计分析得到。显然,此时  $\Lambda_z(i, j)$  的均值和方差可记为:

$$E_{\Lambda}(i, j) = \begin{cases} s - u_2'(i, j) & \text{change} \\ 0 & \text{no change} \end{cases}$$

$$\sigma_{\Lambda}(i, j) = (1 - \rho_{z_1 z_2}^2(i, j)) \sigma_2(i, j) \tag{12}$$

比较公式(3)、(12)可知,当参考图像与检测图像背景区域由于受图像配准误差、SAR 系统成像过程中的时间、空间去相关性等因素影响,造成相关性降低时,本文算法由于充分利用了杂波的二阶统计特性,使得在同样的信号强度下,所得变化检测图象的杂波方差明显小于归一化相减法,提高了算法的性能,同时又避免了似然比法对图像统计特性的过分依赖。

### 2.4 变化检测量杂波统计特性比较分析

此处,利用实测数据对上述三种方法的变化检测量杂波特性进行比较分析。图 1 所示为某树林区域不同时间两幅 UWB SAR 图像,图 2 所示为分别采用上述三种方法构造变化检测量所得杂波概率密度曲线( $T$  取为 0,似然比法采用高斯杂波模型假设<sup>[9]</sup>),表 1 为图 1 中五个变化区域所得目标信号峰值。

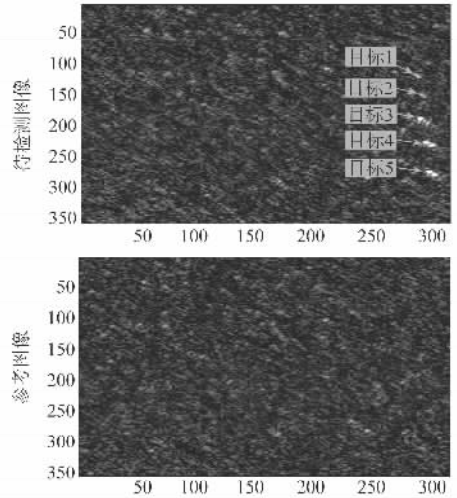


图 1 UWB SAR 图像

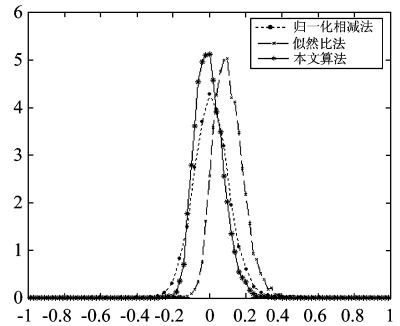


图 2 杂波概率密度曲线

表 1 变化区域目标信号峰值测试结果

	目标 1	目标 2	目标 3	目标 4	目标 5
归一化相减	0.6489	0.5739	1.782	1.500	1.72
似然比法	0.8712	0.6857	2.017	1.821	2.047
本文算法	0.8693	0.6563	1.985	1.786	2.032

综合图 2、表 1 可知,采用似然比法所得变化检测量得杂波方差和目标信号峰值与本文方法接近,但杂波均值明显大于本文方法;归一化相减法的杂波均值与本文方法接近,但杂波方差及目标信号峰值明显较差;显然,本文方法的杂波分布特性优于其它两种方法。但是需要指出的是,图 2 表明本文方法所得杂波由于树干杂波对消不干净而在正半轴大于 0.2 处仍存在少部分较大得杂波信号,即具有一定的正向拖尾,这将影响检测效果,本文第三部分将就此进行讨论。

### 3 一种改进的中值滤波器

由本文第二部分可知,采用修正线性均方估计构造变化检测量时,由于树干杂波对消不干净使得对消后图像在非变化区域存在一些较强杂波信号,这使得

对消后图像杂波灰度值落在正半轴大值区的概率增加,即在杂波分布曲线中形成了前文所述拖尾。对杂波概率分布的拖尾现象,目前主要通过两种手段加以克服:设计具有针对性的杂波模型从而实现对具有拖尾特征的杂波分布曲线的精确估计,进而在此基础上设置合理的检测门限以降低杂波拖尾造成的虚警;采用秩序滤波器对拖尾杂波进行抑制,以提高检测性能。其中第一种方法的缺点在于缺乏普遍适用的杂波模型,且算法复杂,计算量大;第二种方法的缺点在于秩序滤波对杂波的分布特性改善效果有限,且会破坏目标的边缘信息,从而影响目标的后续处理。考虑到变化检测中经过图像相消,树干杂波已得到了很大抑制,剩余杂波拖尾较小,因而本文决定采用改进的秩序滤波进行处理,在有效克服杂波拖尾效应的同时,更好的保持目标边缘特性。

秩序滤波器有着多种实现形式,文献[6]研究表明,相对于其它常用秩序滤波器,Inner\_Sigma 滤波器在抑制树干杂波拖尾效应中具有更好的效果。二维 Inner\_Sigma 滤波器可描述如下:

$$y(i, j) = \text{mean} \{x(m, n) \mid x(m, n) \in I, x(m, n) < \text{mean}(I) + 2 * \text{std}(I)\} \quad (13)$$

其中  $I = \{z(m, n) \mid i - l_1 < m < i + l_1, j - l_2 < n < j + l_2\}$ , 显然 Inner\_Sigma 滤波器通过设置门限去除偏离均值较大的信号来消除大的杂波信号。但是式(13)中求均值处理将不可避免的导致目标边缘信息的损失。需要注意的是,在目标边缘区域,由于目标与背景信号的分布特性存在差异,因而此时信号分布呈现非均匀特性。为此,本文借鉴 VI-CFAR 思想,对式(13)修改如下:

$$y(i, j) = \begin{cases} \text{Inner\_Sigma}(x(i, j)) & VI \leq K_{VI} \\ x(i, j) & VI > K_{VI} \end{cases},$$

$$VI = 1 + \frac{\sum_I (x(m, n) - \bar{x})^2}{(2l_1 + 1) * (2l_1 + 1) * \bar{x}^2} \quad (14)$$

其中 Inner\_Sigma(x(i, j)) 等价于式(13), VI 为可变性指示,文[11]分析表明当 x(i, j) 位于非均匀区域时, VI 值要小于非均匀区域。因而借助式(14),将 VI 值较小于区域的信号保持不变,而对其它区域的进行滤波,从而以较小的损失,保持了目标的边缘特性。其门限  $K_{VI}$  的确定可根据均匀区域 VI 的统计值设定<sup>[11]</sup>。

为了验证改进后滤波器的性能,下面以两组实验分别说明其边缘信息保护能力和杂波拖尾抑制能力,图 3a 所示为一幅测试图像,中心区域服从  $N(0.7, 0.1)$  分布,四周服从  $N(0, 0.2)$  分布,图 3b 为采用 Inner

\_Sigma 滤波后检测所得结果,图 3c 为改进滤波器滤波后检测所得结果,显然后者具有更好的边缘保持特性。图 4 为采用改进滤波器对变化检测量进行滤波后的杂波概率密度曲线,所用数据见图 1,变化检测量基于修正线性均方估计进行构造。比较图 2、4 可知变化检测量杂波拖尾得到有效克服,且方差进一步减小。

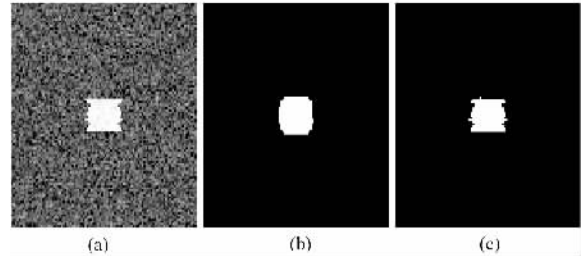


图3 滤波效果对比图

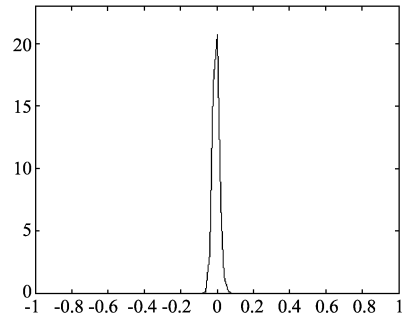


图4 滤波后杂波概率密度曲线

## 4 算法总结及实验验证

根据本文前两部分所述可知,本文所提 UWB SAR 叶簇遮蔽目标两级变化检测方法可归纳如下:

- ① 对参考图像和检测图像进行配准;
- ② 基于修正线性均方估计的构造变化检测量;(第 1 级)
- ③ 采用改进秩序滤波器对变化检测量进行滤波处理;(第 2 级)
- ④ 对滤波处理后的变化检测量进行检测。

为了验证算法性能,以下采用 1 组 UWB SAR 数据对本文算法、归一化相减法、似然比法进行性能分析。图 5 为实验所用数据,图 6 所示为三种算法检测所得 0-1 二值图像,考虑到经过秩序滤波后变化检测量接近与正态分布,因而在本文算法的最后一步中采用高斯模型假设对变化检测量进行处理,似然比及归一化相减法具体步骤参见文献[8,9],表 2 所示为对图 6 进行形态学滤波<sup>[9]</sup>后所得最终检测结果。综合图 6,表 2 可知,本文算法的检测结果要明显优于前两种算法,在发现概率为 100% 时仅存在若干小的点状虚警,可由形态

学滤波加以虑除,而其它两种算法所得虚警明显增多,且部分斑状虚警区难以由形态学滤波去除,最终在检测结果中引入了虚假目标。

表2 三种算法最终检测结果

算法性能	归一化相减法	似然比法	本文算法
发现概率	100%	100%	100%
虚警个数	3个	1个	0个

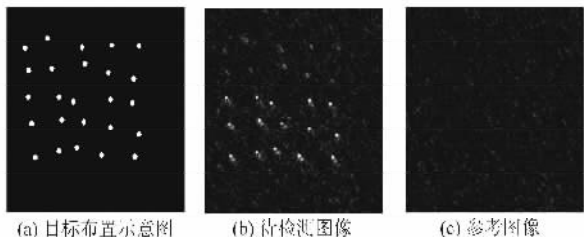


图5 测试用UWB SAR图像数据

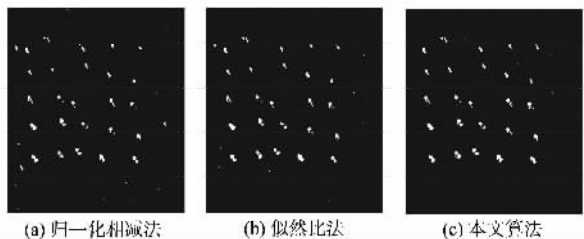


图6 检测所得0-1二值图像

## 5 结论

本文针对两种UWB SAR叶簇遮蔽目标检测中常见的两种变化检测算法:归一化相减法和似然比法,进行了比较分析,针对问题存在的问题提出了一种两级处理变化检测算法。第一级基于SAR图像的二阶统计特性采用修正线性均方估计构造变化检测量,即避免了对杂波及目标统计特性的过分依赖,又改善了变化检测量的分布特性。第二级基于变化检测量的统计特性,采用一种改进的秩序滤波器,在保持目标边缘特性的同时,克服了变化检测量中杂波分布的正向拖尾效应,进一步提高了检测效果。文中最后基于实测SAR图像数据验证了本文算法的有效性。

## 参考文献

- [1] A. Mitra, T. Lewis, A. Paul, S. Paul and A. K. Shaw. Ultra-Wideband Radar data models and target detection with adaptive rank-order filters[C]. SPIE Conference on Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery, 2002, 4727: 112-121.
- [2] A. Jackson, L. Moses, Clutter model for VHF sar imagery [C]. SPIE Conference on Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery [C]. 2004, 5427: 271-282.

- [3] L. Nguyen, R. Kapoor, D. Wong, J. Sichina. Ultra-Wideband Radar Target Discrimination Utilizing an advanced feature set[C]. SPIE Conference on Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery, 1998, 3370: 289-305.
- [4] Y. Zhiguo, H. Xiaotao, Z. Zhimin. Multiresolution feature extraction in target detection of UWB sar[C], APSAR, 2007, 457-461.
- [5] R. Kapoor, A. Baberjee, G. A. Tsihrintzis, N. Nandhakar. UWB radar detection of targets in foliage using alpha-stable clutter models[J]. IEEE Transactions on aerospace and electronic system, 1999, 35(3): 819-833.
- [6] A. K. Mitra, T. Lewis, A. Paul, and A. K. Shaw. Rank-order filters for Fopen target detection[J]. 2004, 11(2): 93-96.
- [7] M. H. Ulander. Modeling of change detection in VHF- and UHF-band SAR[C]. EUSAR2008, 2: 127-131.
- [8] R. Jame, R. Hendrickson. Efficacy of frequency on detecting targets in foliage using incoherent change detection [J]. SPIE, 6237: 62370k1-62370k12.
- [9] M. Lundberg, M. H. Ulander, E. Pierson, and A. Gustavsson. A challenge problem for detection of targets in foliage [C]. SPIE Conference on Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery, 2006, 6237: 62370k1-62370k12.
- [10] 杨志国, 黄小涛, 周智敏. SAR目标检测中的一种稳健变化检测算法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(9): 2094-2098.
- [11] M. E. Smith, P. K. Varshney. Intelligent cfar processor based on data variability[J]. Transactions on aerospace and electronic system, 2000, 36(3): 837-847.
- [12] 杨志国, 黄小涛, 周智敏. 应用形态学方法提高SAR目标检测中的聚类效果[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与技术版), 2007, 31(2): 212-215.

## 作者简介



王广学(1981-),男,江苏南通人,国防科学技术大学电子科学与工程学院博士研究生,主要从事SAR图像处理、SAR目标检测等领域的研究工作。

E-mail: wxhappyradar@tom.com

黄晓涛(1972-),男,湖北武汉人,博士,国防科学技术大学电子科学与工程学院教授,主要从事SAR信号处理、阵列信号处理、谱分析等信号与信息领域的工作。

周智敏(1957-),男,河北易县人,博士生导师,中国电子学会高级会员,国防科学技术大学电子科学与工程学院教授,主要从事SAR系统设计、高速实时信号处理等领域的工作。