

# UWB SAR 低信杂比环境下时频表示成像方法研究

金 添 周智敏 常文革 黄晓涛

(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

**摘 要** 超宽带合成孔径雷达(UWB SAR)为了探测隐藏在树林中或埋于地下的目标,通常工作在低信杂比的环境中。目标淹没在强烈的杂波背景之中很难被发现。该文利用时频表示成像(TFRIF)方法得到不同方位空间频率对应的一组 SAR 图像,并且分辨率几乎没有损失。通过这组 SAR 图像的融合能够提高信杂比。利用实际数据验证了该文方法的有效性。

**关键词** 合成孔径雷达,超宽带,时频表示,低信杂比

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)06-0973-04

## UWB SAR Time-Frequency Representation Image Formation in Low Signal-to-Clutter Ratio Environment

Jin Tian Zhou Zhi-min Chang Wen-ge Huang Xiao-tao

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

**Abstract** UWB SAR works usually in low Signal-to-Clutter Ratio (SCR) conditions in order to detect targets hidden in forest or buried in ground. A Time-Frequency Representation Image Formation (TFRIF) is proposed in this paper, which can get a series of SAR images of different spatial frequency without loss of resolution. The SCR is improved through fusion of those images. The efficiency of TFRIF is proved with real data.

**Key words** SAR, UWB, Time-Frequency representation, Low signal-to-clutter ratio

### 1 引言

超宽带合成孔径雷达(Ultra Wide-Band Synthetic Aperture Radar, UWB SAR)将超宽带技术和SAR技术结合在一起而成为一种具有独特应用价值的成像雷达<sup>[1-2]</sup>。它通常工作在VHF/UHF波段,能穿透叶簇和地表检测隐藏在树林中或掩埋在地下的目标<sup>[3-7]</sup>。UWB SAR对隐蔽目标成像时通常工作在低信杂比的环境中。

UWB SAR为了获得方位向的高分辨力需要较大的积累角,通常达到几十度甚至90°<sup>[8]</sup>。Runkle等通过划分成像子孔径,得到目标在各个方向的特征,并利用隐马尔可夫模型(HMM),实现UWB-SAR目标检测和识别<sup>[9-11]</sup>。采用子孔径使得方位向的分辨率降低,而变子孔径长度的成像方法<sup>[12]</sup>也只能在方位角特征信息精度与方位分辨率之间取折衷。本文提出一种UWB SAR时频表示成像(Time-Frequency Representation Image Formation, TFRIF)方法,并给出了实现框图。分析表明,时频表示为短时傅里叶变换(STFT)的TFRIF等效为多普勒域分割的重叠子孔径成像,会损失一定的分辨率;而利用其它时频表示,如Wigner-Ville分布(WVD)等,能够保持甚至提高分辨率。通过TFRIF得到同一场景的多幅SAR图像的融合,使得在低信杂比环境下“看不见”的目标“看得见”,得到比传统成像方法获得的SAR图像更丰富的信息。

### 2 UWB SAR 回波模型

本文的讨论是针对条带式SAR展开的。对条带式的工作模式, SAR与目标的几何关系如图1所示。图1(a)为正侧视SAR的空间坐标系,距地面高度为 $h$ 的载机沿 $y$ 方向以速度做匀速直线运动。地面上成像区域内有多个散射体,其中第 $n$ 个目标设为 $P$ 。当载机在 $u_0$ 点时到 $P$ 点有最短距离 $Y_0$ ,  $u_0$ 至 $P$ 点的连线为 $x$ 方向,载机与航线 $y$ 构成 $x$ - $y$ 平面,如图1(b)所示,该平面称为成像平面,所有问题都可以通过转换到该平面上来进行讨论,我们称 $x$ 方向为距离(斜距)向,  $y$ 方向为方位向。设天线的视角为 $\beta$ , 波束角为 $2\theta$ , 则目标的方位角 $\theta \in [-\theta, \theta]$ 。在成像平面上设雷达的坐标为 $(0, u)$ ,  $P$ 的坐标为 $(x_n, y_n)$ 。

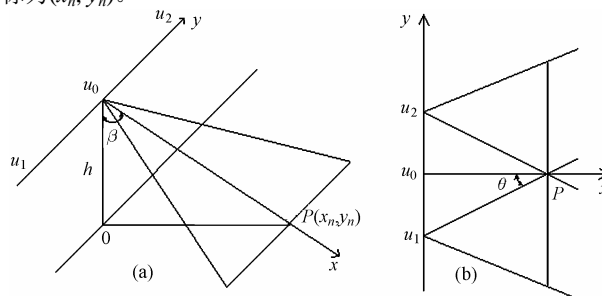


图1 SAR 成像几何示意图  
(a)成像几何立体图 (b)成像几何平面图  
Fig.1 SAR imaging geometry  
(a)Three-dimensional imaging geometry  
(b)Two-dimensional imaging geometry

目标散射特性  $g_s(k, \theta)$  是电磁波波数和目标方位角的函数, 其中波数  $k = 2\pi f/c$ ,  $f$  为电磁波频率,  $c$  为电磁波传播速度。目标的方位角  $\theta$ , 与目标与雷达的相对位置有关, 定义为

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_n - u}{x_n}\right) \quad (1)$$

雷达天线发-收响应  $a(k, \theta)$  也可表示为电磁波波数和目标方位角的函数, 表征了天线的特性:

$$a(k, \theta) = \begin{cases} \frac{1}{x_n^2 + (y_n - u)^2}, & -\Theta \leq \theta \leq \Theta \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

将天线发-收响应归入目标散射特征中用  $g(k, \theta)$  表示:

$$g(k, \theta) = g_s(k, \theta)a(k, \theta) \quad (3)$$

雷达发射宽带脉冲  $p(t)$ , 则  $P$  的回波为

$$Ss(k, u) = P(k)g(k, \theta)\exp\left[-j2k\sqrt{x_n^2 + (y_n - u)^2}\right] \quad (4)$$

其中

$$P(k) = \int p(t)\exp(-2\pi ft)dt \Big|_{f=kc/2\pi} \quad (5)$$

利用驻定相位原理计算  $Ss(k, u)$  对  $u$  的傅氏变换, 将回波变换到  $(k, k_u)$  域。然后将  $(k, k_u)$  域变换到  $(k_x, k_y)$  域,  $k_x$  为距离空间频率,  $k_y$  为方位空间频率。 $(k, k_u)$  域到  $(k_x, k_y)$  域的变换为

$$k_x(k, k_u) = 2k \cos \theta \quad (6)$$

$$k_y(k, k_u) = 2k \sin \theta \quad (7)$$

则回波可表示为

$$SS(k_x, k_y) = P(k)G(k_x, k_y)\exp(-jk_x x_n - jk_y y_n) \quad (8)$$

式(8)中忽略了常数相位项  $\exp(-j\pi/4)$ 。

对  $SS(k_x, k_y)$  进行距离向的匹配滤波得到:

$$F(k_x, k_y) = P^*(k)SS(k_x, k_y) \\ = |P(k)|^2 G(k_x, k_y)\exp(-jk_x x_n - jk_y y_n) \quad (9)$$

对  $F(k_x, k_y)$  进行二维逆傅氏变换可得到 SAR 图像:

$$f(x, y) = \iint F(k_x, k_y)\exp(jk_x x + jk_y y)dk_x dk_y \quad (10)$$

设目标为理想点目标, 即  $G(k_x, k_y)$  为常数时, 该 SAR 图像为  $f_0(x, y)$ , 则式(10)可表示为

$$f(x, y) = \iint f_0(x - x', y - y')g(x', y')dx'dy' \quad (11)$$

其中  $g(x, y)$  是  $G(k_x, k_y)$  的二维逆傅氏变换, 即

$$g(x, y) = \iint G(k_x, k_y)\exp(jk_x x + jk_y y)dx dy \quad (12)$$

式(11)表明  $f(x, y)$  是  $f_0(x, y)$  与  $g(x, y)$  的卷积结果。在 UWB SAR 的大相对带宽和大波束角特性使得传统的成像方法不能得到精细的目标特性。

### 3 时频表示成像(TFRIF)方法

#### 3.1 时频表示成像方法

对  $F(k_x, k_y)$  作关于  $k_x$  的逆傅氏变换:

$$fF(x, k_y) = \int F(k_x, k_y)\exp(jk_x x)dk_x \\ = \int |P(k)|^2 G(k_x, k_y)\exp(-jk_y y_n)\exp[jk_x(x - x_n)]dk_x \\ = gG(x, k_y)\exp(-jk_y y_n) \quad (13)$$

其中

$$gG(x, k_y) = \int G(k_x, k_y)\exp[jk_x(x - x_n)]dk_x \quad (14)$$

为了表达简洁, 将  $|P(k)|^2$  的变换项归入  $gG(x, k_y)$  中。

取距离单元  $x_m$  对应的  $fF(x_m, k_y)$ , 简记为  $fF(k_y)$  得到以  $k_y$  为变量的一维信号:

$$fF(k_y) = gG(x_m, k_y)\exp(-jk_y y_n) \quad (15)$$

对  $fF(k_y)$  进行时频变换得到:

$$ff(y, k_y) = e^{-jy k_y} \int fF(k'_y)H^*(k'_y - k_y)e^{jk'_y y} dk'_y \quad (16)$$

式(16)采用的时频变换是短时傅里叶变换(STFT),  $H(k_y)$  是方位空间频率  $k_y$  上的窗函数<sup>[13]</sup>。

当  $k_y$  取某一定值  $k_{yi}$  时,  $ff(y, k_{yi})$  为距离单元  $x_m$  内的散射强度沿方位  $y$  方向的分布。当  $x_m$  取遍所有距离单元时, 便得到了方位空间频率  $k_{yi}$  对应的 SAR 图像  $f_{k_{yi}}(x, y)$ 。当  $k_{yi}$  取不同的值时, 就得到了一组同一场景的 SAR 图像, 它们对应着不同的方位空间频率。

利用 STFT 得到一组 SAR 图像与基于频域分割的重叠子孔径成像原理是一致的, 它们都牺牲了方位分辨率。式(17)是利用 Wigner-Ville 分布(WVD)<sup>[13]</sup>定义的时频表示成像方法, 最后得到的是  $|f(x, y)|^2$ , 即 SAR 图像的功率图。利用实际数据处理结果表明, 采用 WVD 几乎没有损失分辨率, 但是交叉项干扰严重。因此本文还采用了平滑伪 Wigner-Ville 分布(SPWVD)<sup>[13]</sup>和重排平滑伪 Wigner-Ville 分布(RSPWVD)<sup>[13]</sup>, 它们既抑制了交叉项干扰还保持了较高的分辨率。SPWVD 如式(18)定义, 其中  $h_1(k'_y)$  和  $h_2(v)$  是实的偶窗函数。RSPWVD 如式(19)定义,  $\hat{y}(y', k'_y)$  和  $\hat{k}_y(y', k'_y)$  分别代表重排后的位置和空间频率点。

$$ff_{\text{WVD}}(y, k_y) = \int fF^*\left(k_y + \frac{v}{2}\right)fF\left(k_y - \frac{v}{2}\right)e^{jyv} dv \quad (17)$$

$$ff_{\text{SPWVD}}(y, k_y) = \iint h_1(k'_y)h_2(v) \cdot fF^*\left(k_y - k'_y + \frac{v}{2}\right) \cdot fF\left(k_y - k'_y - \frac{v}{2}\right)e^{jyv} dv dk' \quad (18)$$

$$ff_{\text{RSPWVD}}(y, k_y) = \iint ff_{\text{SPWVD}}(y', k'_y)\delta[y - \hat{y}(y', k'_y)] \cdot \delta[k_y - \hat{k}_y(y', k'_y)]dy'dk'_y \quad (19)$$

图 2 为时频表示成像处理的流程, 它能够获得目标散射特性随方位空间频率和距离空间频率的信息。

#### 3.2 不同方位空间频率 SAR 图像融合

通过不同方位空间频率的抽取, 获得了一组不同方位空间频率下的图像  $f_{k_{yi}}(x, y)$ 。同一目标在不同方位空间频率下的反射强度是不同的, 而且背景杂波也会不一样, 为了获得更多的信息, 将不同空间频率对应的图像进行融合。首先将  $f_{k_{yi}}(x, y)$  归一化, 定义为

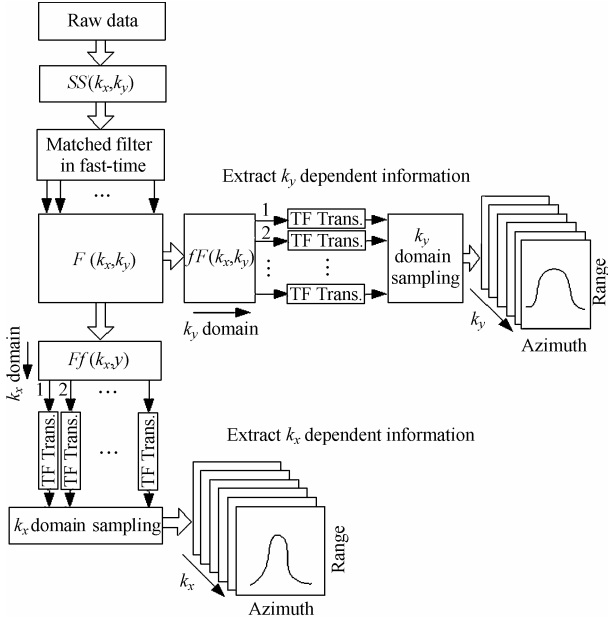


图 2 时频表示成像处理流程图  
Fig.2 TFRIF processing flow chart

$$f'_i(x, y) = f_{k_{yi}}(x, y) / \max_{x, y} \left( |f_{k_{yi}}(x, y)| \right) \quad (20)$$

融合得到的 SAR 图像为  $f(x, y)$ ，融合的法则为

$$f'(x, y) = f_{\max_i \{|f_i(x, y)|\}}(x, y) \quad (21)$$

## 4 实际飞行数据处理结果

### 4.1 对三角反射器的时频表示成像处理

场景内有 6 个 1m 的三角反射器，采用式(9)描述的波前重构(Wavefront reconstruction)<sup>[14]</sup>的传统成像方法的结果如图 3 所示。6 个角反射器的方位向 3dB 带宽  $\delta_a$  如表 1 所示。

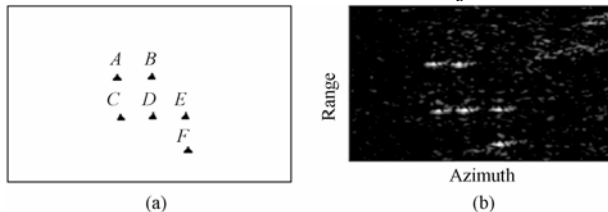


图 3 三角反射器传统成像方法结果  
(a)场景设置 (b)传统方法成像结果

Fig.3 Trihedral reflectors image with traditional image formation

(a)Targets map (b)Result of the traditional image formation

表 1 角反射器的方位向 3dB 宽度

Tab.1 Azimuthal 3dB width of trihedral reflectors

反射器	A	B	C	D	E	F
$\delta_a$ (azimuth cell)	4	3.8	3.7	3.7	4	4

利用 TFRIF 对实际数据成像，分别采用 STFT, WVD, SPWVD 和 RSPWVD，结果如图 4 所示。利用 STFT 使目标展宽了，WVD 虽然能够得到较好的分辨率但是交叉项干扰严重，SPWVD 有效地抑制了交叉项也保持了一定的分辨率，RSPWVD 的分辨率比 WVD 的更好，交叉项抑制得也最好。3 种时频表示得到图像的指标如表 2 所示。RSPWVD 的分辨率

最高，但是它出现了峰分裂的现象。采用 WVD、SPWVD 和 RSPWVD 时，A 和 B，C 与 D，D 和 E 之间均会出现交叉项，分别记为  $CT_{AB}$ 、 $CT_{CD}$  和  $CT_{DE}$ ，它们的定量指标参数如表 3 所示。

RSPWVD 分辨率和交叉项抑制都是最好的，但是对实际数据的处理中，角反射器出现了峰分裂的现象，这是对实际成像不利的。

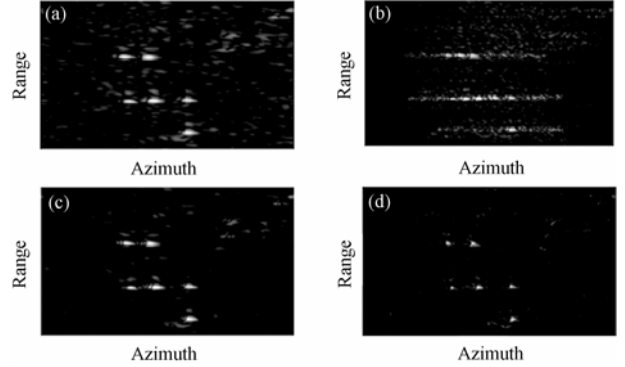


图 4 TFRIF 的成像结果( $k_y = -0.1$ ) (a)基于 STFT 的成像结果  
(b)基于 WVD 的成像结果 (c)基于 SPWVD 的成像结果  
(d)基于 RSPWVD 的成像结果

Fig.4 Result of TFRIF( $k_y = -0.1$ ) (a) Result of STFT-based TFRIF  
(b) Result of WVD-based TFRIF (c) Result of SPWVD-based TFRIF  
(d) Result of SPWVD-based TFRIF

表 2 不同时频表示时反射器的方位分辨率( $k_y = -0.1$ )

Tab.2 Trihedral reflectors' azimuthal resolution of TFRIF with different time-frequency distribution ( $k_y = -0.1$ )

$\delta_a$ (azimuth cell)	A	B	C	D	E	F
STFT	6.5	6.2	6.1	6	6	6.2
WVD	4.75	5	4.25	4.5	4.7	5.2
SPWVD	6	5.5	5	5.2	5.1	5.2
RSPWVD	1.1*	1.7	1.1	1.1*	2.75	1.1*

\*: 峰分裂

表 3 WVD, SPWVD 和 RSPWVD 的交叉项( $k_y = -0.1$ )

Tab.3 Comparison of cross-term of WVD, SPWVD and RSPWVD( $k_y = -0.1$ )

	$CT_{AB}$ (dB)	$CT_{CD}$ (dB)	$CT_{DE}$ (dB)
WVD	-0.01	-0.05	-2.72
SPWVD	-15.9	-18.5	-19.3
RSPWVD	-24.8	-26.8	-26.9

### 4.2 对埋地目标的时频表示成像处理结果

成像区域有 A, B 两个目标。A 目标为裸露在地面的汽油桶，B 目标为埋于地下的汽油桶，上面覆盖着约 20cm 的沙土。利用传统成像方法得到的 SAR 图像如图 5(b)所示，B 目标几乎淹没在强烈的杂波背景之下，不能分辨。

利用 TFRIF 对数据处理，时频表示采用 SPWVD，得到了不同方位空间频率的 SAR 图像。在不同空间频率的 SAR 图像中，目标反射强度与杂波背景的对比是不同的。某些方位空间频率对应的 SAR 图像能够很清晰的看到埋地目标 B

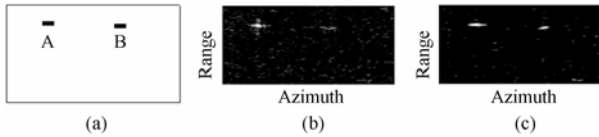


图5 目标布置, 传统方法成像结果和 TFRIF 融合结果

(a)目标布置图 (b)传统成像方法  
(c)基于 SPWVD 时频成像方法的融合结果

Fig.5 Targets map, traditional imaging result and fusion result based on TFRIF

(a)Targets map (b) Result of the traditional image formation  
(c)Fusion result of SPWVD-based TFRIF images

利用融合准则式(20)和式(21)将不同方位空间频率对应的 SAR 图像融合得到融合后的 SAR 图像, 如图 5(c)所示, 利用传统成像方法“看不见”的埋地目标 B 在融合后的 SAR 图像中“看得见”了。融合之后的图像比传统方法得到的图像提供了更丰富的信息。

定义目标在图像中 $(x,y)$ 处的对比度  $C(x,y)$ 为

$$C(x,y) = 20 \log \left( \frac{|f(x,y)|}{\max_{x,y} |f(x,y)|} \right) \quad (22)$$

分别计算目标 A, B 在传统方法成像结果和融合后结果的对比度如表 4 所示。目标 A 的对比度几乎没损失, 而目标 B 的对比度提高了 9dB。

表4 传统成像方法结果与融合后的结果目标 A、B 图像对比度比较

Tab.4 Comparison of targets' contrast of the traditional image formation and TFRIF

	目标 A	目标 B
传统方法成像结果	-0.092dB	-12.529 dB
融合后的结果	-0.095dB	-3.147 dB

## 5 结束语

利用时频表示成像方法得到的不同方位空间频率时同一场景的 SAR 图像, 由于目标的方位特性, 使得目标的信杂比显著提高, 使得原来在低信杂比下“看不见”的目标在新图像中“看得见”。利用一定的融合准则融合不同方位空间频率的 SAR 图像, 融合之后的图像比传统方法得到的 SAR 图像提供了更丰富的信息。

## 参考文献

[1] Sheen D R, Strawitch C M, Lewis T B. UHF wideband SAR design and preliminary results [C]. IGARSS'94 Proceedings, Pasadena, USA, 1994: 289-291.  
[2] Skolnik M, Andrews G, Hansen J P. Ultrawide band microwave-radar conceptual design [J]. *IEEE Trans. on Aero. and Elec. Sys. Magazine*, 1995, 10(10): 25-29.  
[3] Binder B T, Toups M F, Ayasli S, Adams E M. SAR foliage penetration phenomenology of tropical rain forest and northern U. S. forest[C]. IEEE International Radar Conference, Washington

D.C., USA, 1995: 158-163.

- [4] Sheen D R. Foliage transmission measurements using a ground-based UWB(300-1300MHz) SAR system [J]. *IEEE Trans. on Geosci Remote Sensing*, 1994, 32(1): 18-130.  
[5] Sheen D R, Lewis T B, Wei S C, Kletzli D W. Imaging of buried and foliage-obscured objects with an ultrawide-bandwidth polarimetric SAR [C]. SPIE, 1993, Vol.1942: 12-20.  
[6] Cameron R M, Stryker T, et al.. Development and application of airborne ground-penetrating radar for environmental disciplines [C]. SPIE, 1993, Vol.1942: 21-42.  
[7] Carin L, Kapoor R, Baum C E. Polarimetric SAR imaging of buried landmines [J]. *IEEE Trans. on Geo. And Remote Sensing*, 1998, 36(12): 1985-1988.  
[8] Soumekh M. Reconnaissance with ultra wideband UHF synthetic aperture radar [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1995, 12(7): 21-40.  
[9] Runkle P, Bharadwaj P K, Couchman L, Carin L. Hidden Markov models for multispect target classification [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1999, 47(7): 2035-2040.  
[10] Runkle P, Varin L, Couchman L, Yoder T, Bucaro J. Multiaspect target identification with wave-based matched pursuits and continuous hidden Markov models [J]. *IEEE Trans. on Pattern Anal. Machine Intell.*, 1999, 21(12): 1371-1378.  
[11] Dong Yanting, Runkle P R, Carin L, Damarla R, Sullivan A, Ressler M A, Sichina J. Multi-aspect detection of surface and shallow-buried unexploded ordnance via ultra-wideband synthetic aperture radar [J]. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 2001, 39(6): 1259-1270.  
[12] Chaney R D, Willsky A S, Novak L M. Coherent aspect-dependent SAR image formation [C]. SPIE, 1994, Vol. 2230: 256-274.  
[13] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 20-68.  
[14] Soumekh M. Synthetic aperture radar signal processing with MATLAB algorithm [M]. A Wiley-Interscience publication, John Wiley & Sons, INC, 1999: 196-198.

金添: 男, 1980年生, 博士生, 从事 SAR/ISAR 信号处理、数据融合、目标检测与识别等领域的研究工作。

周智敏: 男, 1957年生, 博士, 教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, 主要从事 SAR 系统设计与高速实时信号处理等领域的研究工作。

常文革: 男, 1965年生, 博士, 教授, 从事 SAR 信号处理、自适应信号处理等信号与信息处理领域的研究工作。

黄晓涛: 男, 1972年生, 博士, 副教授, 中国电子学会高级会员, 从事 SAR 信号处理、阵列信号处理、谱分析等信号与信息领域研究工作。