

文章编号: 1672-2892(2012)05-0589-05

剪切波域梯度取大策略的 SAR 与红外图像融合

张余宽^{1,2}, 张 弓¹

(1.南京航空航天大学 电子信息工程学院, 江苏 南京 210016; 2.中国人民解放军 94865 部队 92 分队, 浙江 杭州 310000)

摘 要: 为了综合合成孔径雷达(SAR)与红外成像这 2 种探测手段各自的优点, 提高侦察效果, 运用剪切波变换工具, 提出一种能充分保留原 SAR 与红外图像边缘特征的融合策略。算法利用了剪切波对多曲线图像多分辨表示的优势, 通过梯度取大的融合策略保留了原 SAR 与红外图像中的边缘信息。实验结果表明, 该算法能有效抑制斑点噪声干扰, 保留原图像边缘信息, 是一种有效的 SAR 与红外图像融合方法。

关键词: 剪切波; 梯度; 合成孔径雷达; 红外; 图像融合

中图分类号: TN957.52⁺²

文献标识码: A

SAR/infrared image fusion based on gradient maximin in the shearlet domain

ZHANG Yu-kuan^{1,2}, ZHANG Gong¹

(1.College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China;
2. The 92nd squadron of Troops 94865, Chinese People's Liberation Army, Hangzhou Zhejiang 310000, China)

Abstract: To integrate the advantages of Synthetic Aperture Radar(SAR) and infrared imaging and improve the reconnaissance effect, this paper applies shearlet transform tool and propose a fusion strategy to fully maintain the margin features of SAR and infrared imaging. Taking advantage of shearlet in representing images containing edges in multi-resolution, the algorithm can retain the edge information of original images with the gradient maximin strategy. The numerical experiments demonstrate that the proposed algorithm can effectively suppress speckle noise, and retain the original edge information, which is an effective method for SAR and infrared image fusion.

Key words: shearlet; gradient; Synthetic Aperture Radar; infrared; image fusion

合成孔径雷达(SAR)具有全天时、全天候、探测距离远的优点, 成为不可替代的侦察工具。但是在某些情况下, 由于环境条件、目标状态(如运动密集目标、伪装目标等)、目标位置(如远近障碍物等)以及 SAR 固有特性等因素的影响, 通过单一 SAR 所获得的图像信息不足以用来对目标或场景进行更好的分析和理解。红外成像^[1]主要依据目标与背景之间的红外辐射差, 提取出潜在目标, 同时红外成像系统具有一定的穿透能力, 在一定范围土层、水层乃至混凝土层都不能完全隐蔽目标的红外辐射。然而相对于 SAR 成像, 红外成像存在受云层、雨雾等天气影响大的缺点^[2]。因此结合 SAR 侦察与红外侦察的优势, 开展 SAR 图像与红外图像融合的研究可以极大提高侦察效率。美国 F-16 战机上的“LANTIRN”吊舱^[3], 将红外侦察作为低空侦察的主要手段, 结合 SAR 侦察发挥了良好的效果。文献[4-5]将 SAR 与红外数据融合作为导弹多模制导方面研究的核心问题之一。文献[6]结合非下采样轮廓波理论提出了一种 SAR 与红外图像融合方法, 但是该算法容易遗漏图像细微边缘、纹理等细节信息。文献[7]论述了 SAR 与红外数据融合的意义和发展方向。由于同一场景下 SAR 与红外图像获取代价高, 相关研究论文较少。本文研究 SAR 与红外图像融合的目的是为了增强图像中特定目标(包括飞机、坦克、装甲车以及其他军用车辆)的特征, 以利于后续的检测。SAR 与红外成像机理的差异, 使得 2 种图像特性存在很大差别。传统同源图像融合处理的图像分辨率一般是相同的, 图像纹理特征、目标几何结构、不同材质物体成像特性基本相似, 而在 SAR 图像和红外图像融合中, 2 种图像分辨力通常不同, 目标成像特性存在较大差异, 如何排除这种差异干扰, 提取 2 种图像的有效信息是融合效果好坏的关键。多分辨力分析理论的魅力在于, 能根据需求在不同分辨力下对图像进行研究。传统图像多分辨力处理用小波作为分析工具, 在处理多曲线、稀疏表示图像边缘方面已经

收稿日期: 2011-11-08; 修回日期: 2011-12-09

基金项目: 航空基金资助项目(2011ZC52034); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目; 江苏高校优势学科建设工程资助项目

不能满足需求。剪切波作为一种新兴的图像多分辨力分析工具,比传统小波对图像进行稀疏表示更具优势^[8]。本文致力于挖掘 SAR 与红外各自的侦察优势,为提高后续的检测、跟踪、识别效率,增强图像中目标的边缘信息,结合剪切波对图像边缘稀疏表示的优势,提出了一种剪切波变换域梯度取大的图像融合算法,并通过实验来验证该方法的有效性。

1 剪切波构造理论

传统的小波能很好地处理点状奇异性,但不能处理高维空间的奇异性,比如包含阶跃边缘较多的图像,用小波基就不能精确地稀疏表示。为了克服小波的这种限制,Guo K 和 Easley G 等人运用合成小波理论^[8-9]通过系统把几何和多尺度分析结合起来构造了剪切波框架。传统小波框架只能构造水平、垂直和对角 3 个方向元素,合成小波可将小波中一维的尺度变换因子变换到膨胀因子和剪切因子两维,通过变换得到的合成小波系统就可以构造任意方向的基元素。

在小波理论^[10]中,对于 $i \in \mathbf{Z}$ (i 为平移参数),小波集合 $\{\psi_{j,i}(x)\}$ 有:

$$\psi_{j,i}(x) = 2^{j/2} \psi(2^j x - i) \quad (1)$$

合成小波系统形式如下:

$$\psi_{j,l,k}(x) = |\det \mathbf{A}|^{j/2} \psi(\mathbf{B}^l \mathbf{A}^j x - k) \quad (2)$$

式中: j 为尺度参数, $j \in \mathbf{Z}$; l 为剪切参数, $l \in \mathbf{Z}$; $k \in \mathbf{Z}^2$, $\psi \in L^2(\mathbf{R}^2)$; \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 是 2×2 的可逆矩阵; $|\det \mathbf{B}| = 1$ 。通过对比式(1)和式(2),可以直观地把合成小波理解为用矩阵 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 对小波进行调制。通过 \mathbf{A}^j 和 \mathbf{B}^l 代替传统小波中的 2^j ,使得合成小波系统不仅能像小波一样构造不同尺度和区域的元素,而且能得到不同方向性的元素。

当式(2)中 $\mathbf{A} = \mathbf{A}_0 = \begin{pmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$ 和 $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ 时,其形式就是本文讨论的剪切波。

其支撑域示意图 1,图中 ζ_1 和 ζ_2 分别表示水平方向和垂直方向支撑域坐标,支撑域的具体求解在文献[9]中给出。

由剪切波的构造理论可知,剪切波是空间局部化的,任意方向与尺度都能通过平移获得,并且剪切波是具有紧支撑,在各尺度和方向上具有良好定位能力的波形,是稀疏表示图像边缘的最优工具。

剪切波变换就是将函数 $f \in L^2(\mathbf{R}^2)$ 映射到元素 $\langle f, \psi_{j,l,k}^{(d)} \rangle$,其中 $d=0,1$, $j \geq 0$, $-2^j \leq l \leq 2^j - 1$,剪切波变换的基本流程见图 2。文献[11-12]给出了 2 种不同的快速剪切波变换与反变换的具体方法。

2 剪切波域梯度取大融合策略

在图像目标检测中,边缘信息对于目标检测具有重要意义,边缘信息指标也是图像融合的一项重要性能指标。剪切波对于提取图像中边缘信息具有明显优势。文献[9]介绍了使用剪切波分析图像边缘的应用,指出剪切波不仅可以定位奇异点的位置,而且可以自动跟踪奇异曲线。剪切波的奇异性检测通过剪切波参数与剪切波系数的变化关系来得出。

剪切波系数在边缘附近的这种变化规律通过梯度能更好地被捕捉,梯度越大说明边缘信息越明显。梯度算子就是利用一阶导数检测领域变化,Sobel 算子因为其运算简单、性能优越得到最广泛的运用。因此本文以 Sobel 算子为工具提出了一种基于剪切波域梯度取大融合策略。

图像中低频成分表现为图像的轮廓,是军事目标检测识别中最重要的部分,高频部分表现为图像的细节和纹理,为检测识别提供进一步的证据。由于 SAR 图像中斑点噪声较多,如果直接在空域运用梯度取大的融合策略,斑点噪声会对融合效果产生明显干扰(见图 3(c)),同时通过实验分析发现,即使在剪切波域高频系数也受到斑点噪声的干扰(见图 3(e)),因此本文提出的融合策略中仅对剪切波域低频系数进行梯度取大。

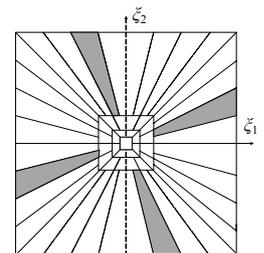


Fig.1 Shearlet support domain
图 1 剪切波支撑域

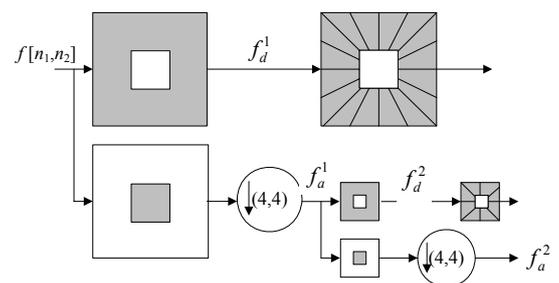
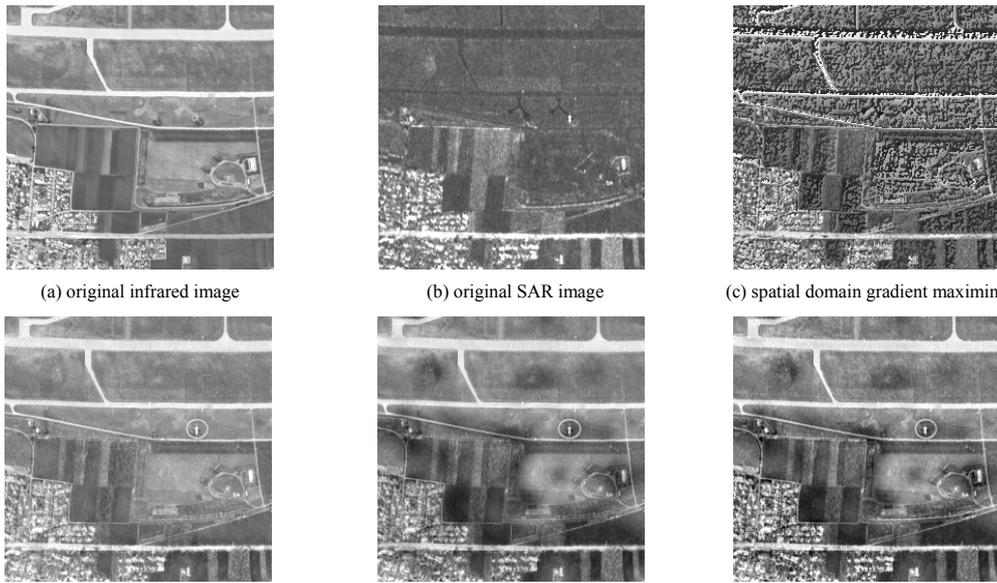


Fig.2 Shearlet translation
图 2 剪切波变换流程图



(d) high frequency coefficient gradient maximin (e) all frequency coefficient gradient maximin (f) low frequency coefficient gradient maximin
Fig.3 Comparison among different fusion strategies

图 3 不同融合策略比较

融合流程见图 4。定义 A_L 和 B_L 是低频系数矩阵, A_H 和 B_H 是高频系数矩阵, A'_L 和 B'_L 是低频系数梯度矩阵, A'_H 和 B'_H 是高频系数梯度矩阵, F_L 和 F_H 表示融合的低频、高频系数矩阵:

1) 采用 Sobel 算子对 A 和 B 图像的低频剪切波系数矩阵进行水平和垂直方向的 Sobel 滤波得到梯度矩阵 A'_L 和 B'_L , 其中 $A'_{L,x}$, $B'_{L,x}$ 和 $A'_{L,y}$, $B'_{L,y}$ 分别表示水平和垂直 2 个方向分量, m 和 n 分别表示水平方向和垂直方向对应点的坐标:

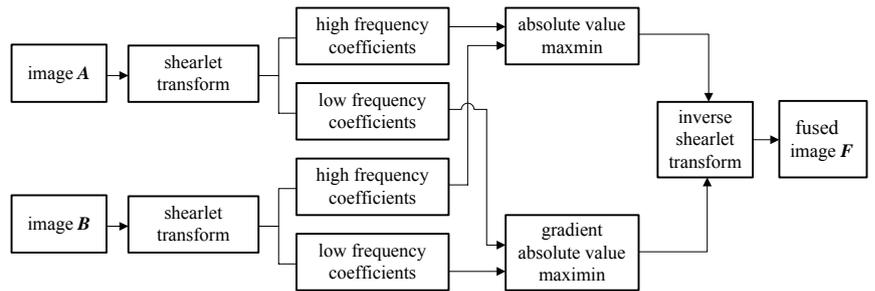


Fig.4 Shearlet transform-fusion
图 4 变换-融合流程图

$$A'_L(m,n) = \sqrt{|A'_{L,x}(m,n)|^2 + |A'_{L,y}(m,n)|^2} \tag{3}$$

$$B'_L(m,n) = \sqrt{|B'_{L,x}(m,n)|^2 + |B'_{L,y}(m,n)|^2} \tag{4}$$

对得到的梯度矩阵中对应元素取绝对值比较大小, 梯度绝对值大说明该点对应的边界明显, 取对应的剪切波系数为重构系数:

$$F_L = \begin{cases} A_L(m,n), & \text{if } |A'_L(m,n)| \geq |B'_L(m,n)| \\ B_L(m,n), & \text{else} \end{cases} \tag{5}$$

2) 对于高频系数, 由于梯度矩阵受噪声影响严重, 故不求梯度, 直接对变换域系数进行绝对值取大:

$$F_H = \begin{cases} A_H(m,n), & \text{if } |A_H(m,n)| \geq |B_H(m,n)| \\ B_H(m,n), & \text{else} \end{cases} \tag{6}$$

3) 对得到的融合系数进行剪切波逆变换, 重构得到融合图像。

3 两组实验性能比较

对已配准的红外图像^[13](分辨力为 5 m)和 SAR 图像(分辨力为 5 m)进行融合。在 matlab 2009 平台上编程进行仿真运算。图像融合性能, 用信息熵(Information Entropy, IE)、标准差(STANDARD Deviation, STD)、Q 因子^[14]和基于梯度信息相关性(Gradient Information Correlation Coefficient, GICC)^[15]这 4 个性能参数来评价。

图像的信息熵(IE)是衡量图像所含信息丰富程度的一个重要指标,熵值的大小反应了图像所含平均信息量的多少,其定义为:

$$IE = -\sum_{i=0}^{L-1} p_i \log_2 p_i \quad (10)$$

式中: L 表示全图像素总数; p_i 为每个灰度级的分布概率。

标准差(STD)反映图像灰度相对平均灰度的离散情况,在某种程度上标准差可以评价图像反差的大小,标准差越大,灰度级分布越分散,图像反差越大,可看出的信息越多,其定义为:

$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} [F(m,n) - \bar{F}]^2}{M \times N}} \quad (11)$$

式中: \bar{F} 为整幅图像的灰度平均值; M 和 N 分别表示水平方向和垂直方向像素个数。

Q 因子是评价的融合图像保留原图像视觉上比较重要的边缘信息的度量,也被称为边缘互信息客观评价指标,本文 Q 因子未归一化处理。

基于梯度信息相关性指标(GICC)是鉴于人眼对图像中边缘和纹理信息的敏感性,引入梯度,评价融合图像与原图像的相似度,本文 GICC 因子未归一化处理。

实验 1: 基于梯度取大的融合策略。图 3(c)是以原图像直接梯度取大融合得到的图像,可以看出空域直接梯度取大受噪声影响严重,目标基本被噪声淹没;图 3(d)是高频剪切波系数梯度绝对值选大得到的图像;图 3(e)是所有剪切波系数梯度绝对值选大方法融合得到的图像;图 3(f)是低频剪切波系数梯度绝对值选大方法融合得到的图像;从直观来看,图 3(f)层次感更强,对原图的地貌特征(平坦性、植被情况等)表现得更强烈,军事上感兴趣的飞机目标也得到更明显的加强,整体纹理特征与边缘特征得到较好保留。

从表 1 的客观评价参数来看,低频梯度法融合得到的图像在 IE、STD、GICC 这 3 个参数优于全系数梯度融合的结果,而衡量边缘互信息的指标 Q 略低于全系数梯度融合的结果,通过分析图 3(e)和图 3(f),低频系数梯度取大算法的边缘保持性能优于全系数梯度取大算法。从图像信息量的角度来看,由于高频系数受相干斑噪声影响较大,全系数梯度取大算法产生了平滑效果,会造成一定程度信息量损失。

表 1 不同融合策略性能比较

comparison items	IE	STD	Q	GICC
spatial domain gradient maximi	7.49	54.91	0.18	19.63
low frequency coefficient gradient maximin	7.54	50.45	13.18	91.08
high frequency coefficient gradient maximin	7.08	38.43	9.59	87.43
all frequency coefficient gradient maximin	7.43	45.85	14.26	83.51

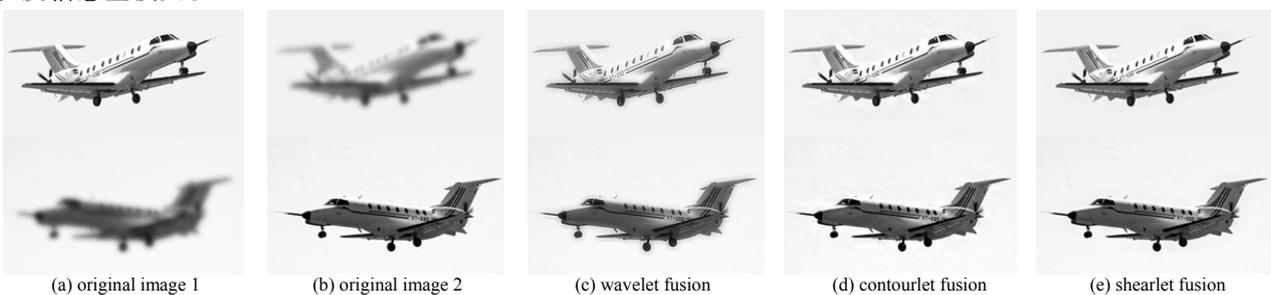


Fig.5 Fused images using wavelet, contourlet, shearlet

图 5 小波、轮廓波、剪切波图像融合结果

实验 2: 剪切波域系数绝对值取大融合策略与其他融合算法的性能比较。本实验的目的是验证剪切波对图像边缘特征的提取性能的优越性。为了实验的可比性,小波融合、轮廓波融合、剪切波融合这 3 种方法都采用变换域系数绝对值取大融合策略。从图 5 的融合效果来看,这 3 种算法都对原虚焦图像进行了较好的融合,其中小波算法边缘有模糊的现象,轮廓波算法边缘不平滑,剪切波算法对边缘的保持效果要优于其他 2 种算法,融合结果中机体轮廓清晰,放大后可以看到图像中机身上的文字清晰。

从表 2 指标比较来看,这 3 种算法的 IE 指标都很接近,轮廓波算法的 STD 指标略优于剪切波算法,而剪切波融合算法的 Q 指标和 GICC 指标明显优于其他 2 种算法,说明剪切

表 2 三种融合方法性能比较

comparison items	IE	STD	Q	GICC
wavelet	4.76	52.79	20.89	25.22
contourlet	4.83	56.46	25.77	50.32
shearlet	4.63	55.89	31.55	57.73

波算法对图像的边缘信息保留效果是这3种算法里最优越的。综合比较来看,轮廓波融合算法性能优于小波融合算法,剪切波融合算法是这3种算法中性能最好的。

4 结论

综合2组实验的性能比较,可以看出剪切波域低频系数梯度取大融合方法对SAR图像中相干斑具有一定抑制效果,同时充分保留了原SAR与红外图像的边缘信息,主要性能指标得到明显提升,取得了良好的融合效果,是一种有效的SAR与红外图像融合方法。

参考文献:

- [1] 郑黎义,陈兴无,王磊,等.一种红外/雷达双传感器融合目标跟踪算法[J].现代电子技术,2005(3):50-52.(ZHENG Liyi, CHEN Xingwu,WANG lei,et al.A Target Tracking Algorithm Based on Fusion of an Infrared Sensor and a Radar Sensor[J]. Modern Electronics Technique, 2005(3):50-52)
- [2] 成天乐,胡玮,袁玉俊,等.红外点目标图像的两种滤波技术[J].信息与电子工程,2009,7(1):37-40.(CHEN Tianle,HU Wei,YUAN Yujun,et al. Preprocessing Based on Morphologic Filtering and Wiener Filtering in Point Target Image[J]. Information and Electronic Engineering, 2009,7(1):37-40.)
- [3] Amatzia Feinberg,Hyman L Shulman,Louis Miller,et al. Supporting Expeditionary Aerospace Force:expanded analysis of Lantirn options[M]. Santa Monica,CA:Rand, 2001.
- [4] ZENG Xianwei,FANG Yangwang,WU Youli,et al. A New Guidance Law Based on Information Fusion and Optimal Control of Structure Stochastic Jump System[C]// Automation and Logistics,2007 IEEE International Conference on Digital Object Identifier. Jinan:[s.n.], 2007:624-627.
- [5] Uhumeister B. Kalman Filters for a Missile with Radar and/or imaging Sensor[J]. Journal of Guidance,Control,and Dynamics, 1994,17(6):1339-1344
- [6] ZHANG Ying,LI Yanjun,ZHANG Ke,et al. SAR and Infrared Image Fusion Using Nonsubsampled Contourlet Transform[C]// 2009 International Joint Conference on Artificial Intelligence. Hainan:[s.n.], 2009:398-401.
- [7] 王国宏,毛士艺,何友.雷达与红外数据融合评述[J].火力与指挥控制,2002,27(2):3-7.(WANG Guohong,MAO Shiyi, HE You. A Survey of Radar and Infrared Data Fusion[J]. Fire Control & Command Control, 2002,27(2):3-7.)
- [8] Guo Kanghui,Demetrio Labate. Optimally Sparse Multidimensional Representations using Shearlet[J]. SIAM J Math. Anal., 2007,39(1):298-318.
- [9] Easley G,Labate D,Lim W. Sparse directional image representation using the discrete shearlet transform[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2008,25(1):25-46.
- [10] Gonzalez R C,Wood R E. Digital Image Processing[M]. 2nd ed. London: Prentice Hall, 2002.
- [11] Averbuch A,Coifman R R,Donoho D L,et al. A Framework for Discrete Integral Transformations I-the Pseudo-polar Fourier Transform[J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 2008,30(2):764-784.
- [12] Donoho D L,Kutyniok G,Shahram M,et al. A Rational Design of a Digital Shearlet Transform[EB/OL]. [2011-11-01]. http://www.math.tu-berlin.de/fileadmin/i26_fg-kutyniok/Kutyniok/Papers/ShearLab_SampTA.pdf.
- [13] Pascal Druyts,Wim Mees,Dirk Borghys,et al. SAHARA-semi-automatic help for aerial region analysis[EB/OL]. [2011-11-01]. http://www.sic.rma.ac.be/~pdruyts/publi/sahara_isprs.pdf.
- [14] Xydeas C S,Petrovic V. Objective Image Fusion Performance Measure[J]. Electronics Letters, 2000,36(4):308-309.
- [15] CHEN Guanhao,YANG Chunling,PO Laiman. Edge-Based Structure Similarity for Image Quality Assessment[C]// Acoustics, Speech and Signal Processing. Toulouse:[s.n.], 2006,2:933-936.

作者简介:



张余宽(1984-),男,浙江省龙游县人,在读硕士研究生,研究方向为雷达信号处理,email: zhangyukuan1984@163.com.

张弓(1964-),男,安徽省蚌埠市人,教授,研究方向为雷达信号处理、目标探测与识别。