

高掠海角下基于 Radon 变换的海杂波抑制方法

李 强 张守宏 张焕颖 曹运合

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘 要: 高掠海角情况下, 目标完全淹没在杂波里面, 这使得雷达难以对海面目标进行三维成像。该文提出一种基于 Radon 变换的适用于高掠海角情况下三维成像处理的海杂波抑制方法。利用 ISAR 技术得到回波二维像, 差波束补偿之后, 对其进行 Radon 变换, 再利用该文提出的结合边缘检测技术的搜索算法得到的参数, 完成目标与海杂波分离处理。三维成像仿真结果表明该方法对克服海杂波影响是有效的。

关键词: 海杂波; 高掠海角; Radon 变换; 三维成像

中图分类号: TN959.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)05-1087-05

Method for Radon Transform Based Sea Clutter Suppression at High Grazing Angles

Li Qiang Zhang Shou-hong Zhang Huan-ying Cao Yun-he

(Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: At high grazing angles, the sea clutter background has a strong impact on 3-D imaging. A method for Radon transform based sea clutter suppression is given in this paper. ISAR technique is used to get two-dimension image of the target firstly. Then angular motion compensation and Radon transformation are performed to the ISAR image. A novel search algorithm based on the edge detection is used to divide the target from the sea clutter in the end. The result of the 3-D imaging shows the effectiveness of the new method for sea clutter suppression.

Key words: Sea clutter; High grazing angle; Radon transform; 3-D Imaging

1 前言

当雷达对海面目标进行观察时, 海杂波问题一直是重要的甚至是“致命”的问题。当掠海角接近 90° 时, 海面的散射系数 σ_0 迅速增大, 一般达到 +10dB 左右, 从而使海面等效后向反射面积迅速增大, 称之为“高度杂波”, 这将严重影响雷达的性能, 甚至使其失效。在雷达垂直下视的情况下, 对于有一定高度的海面目标, 目标顶部的回波信号的延时最短(距离最近), 较远处为海面, 其回波信号的延时较长且强度也大得多, 可以在高分辨距离像中提取目标的回波信号。但是掠海角稍稍偏离 90° , 在高分辨距离像中海杂波和目标就会混叠, 随着偏离角度的增大, 海杂波将逐渐淹没目标。

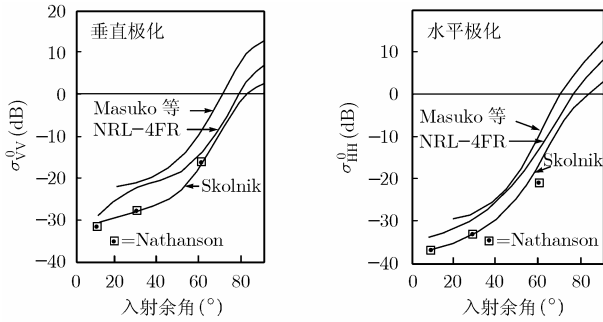
有关高掠海角下的雷达成像及杂波抑制方法的研究国内外几乎没有文献报道, 本文对此进行了探索性的研究, 提出了此情况下的海杂波抑制方法, 可以应用于高掠海角下对目标的三维成像。利用 ISAR 技术, 对海面和目标同时成像, 利用本文提出的基于 Radon 变换的目标杂波分离算法将 ISAR 像中的海杂波抑制掉, 再进行单脉冲测角, 得到目标的三维像。这样使得雷达可以克服海杂波的影响对目标进行精确定位, 进而完成目标识别。此成果对开发制导雷达, 特别是弹载末端精确制导雷达的成像功能, 改善其在复杂背景

下目标的识别, 特别是精确打击性能有着重要意义。

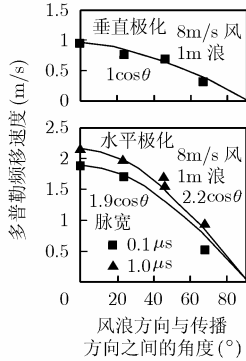
2 高掠海角情况下海杂波特性分析

当海面平静时, 在 0° 入射角(即掠海角为 90°)时海面的反射率很高。此时雷达下视一个像镜子一样的平面, 仅由于海面的球状特性而略有曲率。因此, 海面如同平面金属板一样会有一个增益因子。对于平静海面, 任何极化情况下, 垂直入射的 σ_0 (单位面积的散射截面积)值可从 +10~26dB 间变化。图 1(a)为 15kn 标准风速下, 不同数据源的 X 波段海杂波数据比较^[1](依据 Masuko 等, NRL4FR 雷达, Skolnic 和 Nathanson 的数据)。可以看出当掠海角大于 75° 时, σ_0 开始变为“正数”, 海面的后向反射截面迅速增大。

国内外关于海杂波谱特性测量结果的文献报道很少, 尤其是大掠海角的情况。在小掠海角时有如下结论: 海杂波速度谱宽与风速或海情级几乎是线性关系, 而与雷达频率或掠海角的相关性较小。逆风方向海杂波速度谱的均值与风速或海情级也为线性关系。对于观测方向不是逆风方向的海杂波谱, 它的平均多普勒频移与风速有一余弦因子的关系。图 1(b)为在与风向不同角度时, 海面回波的平均多普勒频移速度^[2](Pidgeon 用工作频率为 5.8GHz 雷达的实验结果)。将小掠海角的情况外推, 可以认为在掠海角为 $80^\circ \sim 90^\circ$ 范围内海杂波的平均多普勒频率基本为零, 而其谱宽与海情级成线性关系。



(a) 15 kn 标准风速下, 不同数据源的 X 波段海杂波数据比较



(b) 回波的平均多普勒频移速度

图 1

3 海面目标成像的特点分析

由第 2 节的分析得知, 当掠海角接近 90°时, 海表面散射系数 σ_0 很大, 但多普勒频移很小。如果目标回波和海杂波存在于同一个距离单元内, 目标肯定会被杂波淹没。对于海面的非合作目标, 采用 ISAR 技术, 在距离-多普勒域进一步分辨目标散射点。由于雷达运动方式不同, ISAR 成像平面会随之不同。设雷达与目标的相对运动关系如图 2 所示。雷达位于目标的顶空, 我们认为对目标的跟踪已经完成, 波束指向目标。波束指向与雷达运动方向决定了成像平面, 海平面和目标在该平面上的投影就是 ISAR 图像。可以看到, 图 2 所示的成像平面中, 目标与海面是可以区分开来的。但是当跟踪存在较大偏差时, 也就是说成像平面远离目标时, ISAR 成像结果中部分目标散射点将会被海杂波淹没。

可以预见成像结果会出现弯曲, 这是由于: (1)雷达信号的波前为球面, 海平面则等效为弯曲的二次曲面, 即产生距离弯曲。(2)多普勒频移与实际目标横向距离不是线性关系, 引起多普勒弯曲。

本文对海面舰船目标的 ISAR 成像进行仿真。设目标为 $150 \times 60 \times 50\text{m}^3$ 的舰船散射点模型, 运动速度 $V=10\text{m/s}$, 雷达发射线性调频连续波, 波长 2cm , 带宽 100MHz , 重复频率为 15kHz , 载机飞行高度 15000m , 飞行速度 400m/s , 波束掠海角为 86° , 海面大小为 $1000 \times 1000\text{m}^2$, 假设海表面杂波服从 Rayleigh 分布, 散射系数 σ_0 和多普勒频移参照图 1 所示。将成像结果以及沿 2 个方向作投影的结果绘制到图 3 中, 观察他们的特点。ISAR 像中幅度较大呈弯曲形状连片

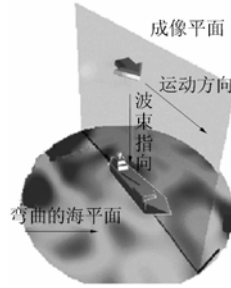


图 2 雷达与目标的相对运动关系

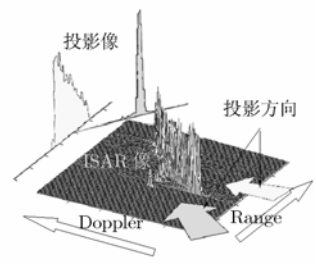


图 3 回波 ISAR 像及其沿不同方向的投影

分布的是海面, 而幅度较小只有几个峰值明显可见的就是目标。可以发现目标回波与海杂波不论在幅度上还是所占据的面积上都是相差悬殊的。从两个不同方向的投影像中可以看到, 在沿着目标与海面相切的方向观察时, 目标与海表面是左右分开的, 并且投影像中的幅度值从海面过渡到目标的时候是急剧下降的, 而沿着另一个方向的投影则不具有上述特征。

4 海杂波抑制方法

高掠海角情况时, 假设雷达波束跟踪上目标, 成像平面则近似垂直于海平面, 目标与海面在成像平面上是分离的, 但是如果直接对 ISAR 图像单元测角, 得到的是海面和目标整体的三维像。由于目标本身存在角闪烁, 有效的回波散射点已经很少, 如果混叠在海杂波中将不可分辨, 这将会造成单脉冲三维成像结果失去意义。因此在成像处理之前必须先进行杂波抑制。在相干积累期间, 由于目标的相对横向平动引起的差波束幅度调制将会导致多普勒展宽和虚部增大, 这加重了角闪烁程度。因此本文把差波束运动补偿作为抑制海杂波的第一步, 补偿之后再行后续处理。

4.1 差波束运动补偿

设雷达在相干积累期间横向角运动函数为 $\theta(t)$, 回波和波束为

$$s_h = A \sum a_i e^{j\varphi_i(t)} + n_h \quad (1)$$

差波束可表示为^[3]

$$\begin{aligned} s_c(t) &= \sum K(\theta_i + \theta(t)) a_i e^{j\varphi_i(t)} + n_c \\ &= \sum K\theta_i a_i e^{j\varphi_i(t)} + (K/A)\theta(t)(s_h - n_h) + n_c \end{aligned} \quad (2)$$

其中 A 为和波束天线增益, K 为差波束天线方向图的斜率, $a_i e^{j\varphi_i(t)}$ 为第 i 个散射点的回波复包络, n_h 和 n_c 分别为和、差通道的噪声。由于雷达的运动参数可通过自身位置传感器得到, 即在 ISAR 成像中 $\theta(t)$ 是已知的, 对于海面平台, 例如海岛等静止目标, 不存在目标的运动参数估计问题, 利用自身传感器传送的位置信息即可完成差波束运动补偿, 此时的情况近似于聚束式 SAR 成像。考虑误差的存在, 补偿函数设为

$$\hat{\theta}(t) = \theta(t) + \Delta\theta(t) \quad (3)$$

差波束补偿公式为

$$\begin{aligned} \tilde{s}_c(t) &= s_c(t) - (K/A)(\theta(t) + \Delta\theta(t))s_h \\ &= K \sum (\theta_i - \Delta\theta(t))a_i e^{j\varphi_i(t)} \\ &\quad - (K/A)(\theta(t) + \Delta\theta(t))n_h + n_c \end{aligned} \quad (4)$$

如果海面平台为机动目标,如舰艇类目标,则角运动补偿因子 $\hat{\theta}(t)$ 中还应当考虑到目标的角运动参数,即在完成自身的差波束平动补偿的同时还要对目标进行角运动参数估计。同样,利用现有的角运动估计方法测得的目标角运动参数后,代入式(4)完成补偿。

4.2 海杂波与目标的分离处理

我们可以采取非相干积累的办法实现对目标的检测和跟踪,在波束跟踪上目标之后,再进行相干成像处理。当成像平面穿过目标时,目标与海杂波的分离度最大,随着成像平面与目标距离的增大,目标将逐渐被海杂波淹没。完全精确的跟踪是理想化的,必须考虑跟踪误差存在的条件下海杂波的分离方法。由图3可知,如果在成像平面上沿着目标与海面相切的方向观察,此时二者的分离程度是最大的。但是这个方向是未知的,我们先要对图像作全角度的观察,然后才能确定该方向。利用Radon变换^[4]实现对一幅图像的变角度“观察”。下面详细介绍其步骤。

4.2.1 Radon 变换 一个 N 维函数 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的 Radon 变换定义为 $n-1$ 维超平面上的积分值。当 $N=2$ 时,平面上函数 $f(x, y)$ 的 Radon 变换定义为 f 沿任意方向直线 $l_{t,\theta}$ 投影,记作

$$R[f(x, y)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t \cos \theta - s \sin \theta, t \sin \theta + s \cos \theta) ds \quad (5)$$

$R[\cdot]$ 表示 Radon 变换,其中 $l_{t,\theta}$ 的直线方程可以表示为

$$x \cos \theta + y \sin \theta = t \quad (6)$$

图4表示的是对于函数 $f(x, y)$, 固定 θ 值 Radon 变换的函数曲线。其中 t 轴实际上就是由 x 轴旋转 θ 角之后得到的,投影方向就是旋转后的 y 轴的方向,式(5)中记为 s 轴。对某一图像函数求出对应于各个 θ 值的投影,也就实现了对该图像的全角度观察。设 ISAR 像函数为 $\text{Im}(r, \omega)$, 由式(5), 式(6)得到其 Radon 变换后输出为

$$R(t, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \text{Im}(t \cos \theta - s \sin \theta, t \sin \theta + s \cos \theta) ds \quad (7)$$

对于 $\text{Im}(r, \omega)$ 中目标某点 p 到最近处的海杂波点构成的矢量 \mathbf{a}_p , 根据矢量投影定理有

$$\|\mathbf{P}\mathbf{a}_p\| \leq \|\mathbf{a}_p\| = \sqrt{M} \quad (8)$$

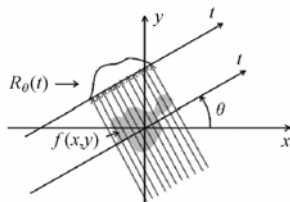


图4 Radon 变换

\mathbf{P} 是向任意方向的正交投影矩阵, $\|\cdot\|$ 表示向量的欧氏范数, 式中等号成立的条件是沿着 \mathbf{a}_p^{\perp} 向 \mathbf{a}_p 作投影。由于目标分布的范围相对杂波来说小得多, 相切处杂波边缘可以近似认为是直线, 因此目标的 N 个散射点各自对应的矢量 $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_N$ 均是同方向的。这样我们就可以得到此结论, 当

$$\theta = \theta_0 = \arg(\mathbf{a}_p) \quad (9)$$

即 t 轴与 \mathbf{a}_p 同向时, 式(7)将得到 ISAR 像中目标与海杂波距离最远的投影波形, 或者说是在非理想情况下(存在跟踪误差)海杂波影响最小的投影波形。由于海杂波是连片分布的, 满足式(9)条件的 Radon 变换结果将在海杂波边缘处存在一个阶跃式边缘。因此可以利用边缘检测技术找到该位置, 进而抑制海杂波。

4.2.2 结合边缘检测技术的参数搜索 边缘检测^[5]的基本算法有很多, 考虑到噪声的影响, 大多数边缘检测算法都包含平滑处理。而在本应用中, 海杂波边缘将存在一个相当大的阶跃, 比目标和通道噪声大得多, 因此选用不进行平滑处理的Roberts算子, 以保证精确定位。

有算子表达式:

$$\begin{aligned} g(x, y) &= |f(x, y) - f(x + 1, y + 1)| \\ &\quad + |f(x, y + 1) - f(x, y + 1)| \end{aligned} \quad (10)$$

对于本应用, 仅有 t 方向上的边缘是有意义的, 只需对图像切片 $R(t, \theta_i)$ 进行检测, 因此式(10)化为一维形式, 则有

$$g(t, \theta_i) = [R(t + 1, \theta_i) - R(t, \theta_i)] \quad (11)$$

此处括号替代了绝对值符号, 因为我们关心的只是图像中目标与海面之间的边缘, 也就是距雷达较近处的边缘。已知 t 轴是由距离轴 r 旋转得到, 在一定范围内, t 轴的方向表征了距离的正方向。式(11)使得对前沿突跳的检测结果为正值, 后沿突跳则为负值。再通过最大值寻优便可得到边缘位置:

$$\hat{t}_0(\theta_i) = \arg \max_t [g(t, \theta_i)] \quad (12)$$

对于 θ_0 的估计 $\hat{\theta}_0$, 我们以杂波抑制后剩余目标能量最大为寻优准则, 给出代价函数:

$$C(\theta_i) = \int_{-\infty}^{\hat{t}_0(\theta_i)} |R(t, \theta_i)|^2 dt \quad (13)$$

其中积分上限就是边缘位置 $\hat{t}_0(\theta_i)$, 这样就得到了沿着某方向的投影像中不包含海杂波的能量值。此时再搜索最大代价函数值对应的 θ_i , 完成最佳方向的估计:

$$\hat{\theta}_0 = \arg \max_{\theta_i} [C(\theta_i)] \quad (14)$$

利用式(12), 式(14)的联合搜索结果 $(\hat{t}_0, \hat{\theta}_0)$, 对 ISAR 像进行阈值处理:

$$I(r, \omega) = \begin{cases} \text{Im}(r, \omega), & (r, \omega) \in \{x \cos \hat{\theta}_0 + y \sin \hat{\theta}_0 = t, t < \hat{t}_0\} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (15)$$

在阈值处理完成之后, 便可以进行单脉冲三维成像了。虽然海杂波的影响已经基本消除, 但难免会出现同一分辨单

元内存在多个散射点的情况,通常要先进行角闪烁点剔除处理,再分别对方位和俯仰维测角成三维像。

5 仿真结果与分析

设目标为 $150 \times 60 \times 50\text{m}^3$ 的船舰散射点模型,如图 5(a)~5(c)目标模型所示,运动速度 $V=10\text{m/s}$ 。雷达发射线性调频连续波,波长 2cm ,带宽 100MHz ,重复频率为 15kHz ,波束掠海角为 86° ,载机飞行高度 15000m ,飞行速度 400m/s ,海面大小为 $1000 \times 1000\text{m}^2$,认为海表面杂波服从 Rayleigh 分布,散射系数 σ_0 和多普勒频移参照图 1 所示。图 5(d)~5(f)给出了对回波未作杂波抑制处理时的三维成像结果,也就是对包含目标的整个海面进行成像,显然目标混在其中已无法分辨。



图 5 目标散射点模型和对回波未作杂波抑制处理时的三维像

图 6 给出了跟踪良好时,回波 ISAR 像及其 Radon 变换结果,还有搜索曲线和最终的三维成像结果。考虑到二维搜索的算法复杂度,为节省计算量,没有必要进行全范围搜索。可以首先找到 Radon 变换输出的最大值,再在其对应的 θ 值左右选取一个小范围进行搜索。本仿真中我们选取全范围的 $1/3$ 即 60° 进行搜索。图 6(c)是搜索曲线。可以看到 60° 的搜索范围里,目标的剩余能量变化较大。剩余能量较大的位置对应 θ 值为 65° 到 77° 之间,此方向正是 ISAR 像中目标与海杂波分离较好的时候。我们利用搜索到的参数再在 ISAR 像中绘出阈值处理的边界线,这样可以直观的看出搜索结果是否正确,利用式(16):

$$\omega = -r \cdot \cot \hat{\theta}_0 + \hat{t}_0 \cdot \sec \hat{\theta}_0 \quad (16)$$

在图 6(a)中绘出此直线,可以看到正是目标与海面相切的位置,阈值处理也正是沿该直线对此直线下方的杂波进行抑制。从三维成像的结果来看,目标的轮廓较为明显,对比未作处理之前的成像结果,可以看到杂波抑制算法效果明显。

我们还仿真了跟踪偏差较大情况下的杂波抑制及三维成像,如图 7 所示。我们把目标移出波束的中心区域,其他参数不变。此时的 ISAR 像中一部分目标散射点已经被海杂波淹没,检验此时的杂波去除的效果是很有实际意义的。观察图 7(a)中阈值处理的边界线的位置可以认为搜索结果令人满意。从图 7(d)~7(f)三维成像结果来看,目标的下半部分由于混进了杂波被抑制掉了,而上半部分被还原了出来。虽

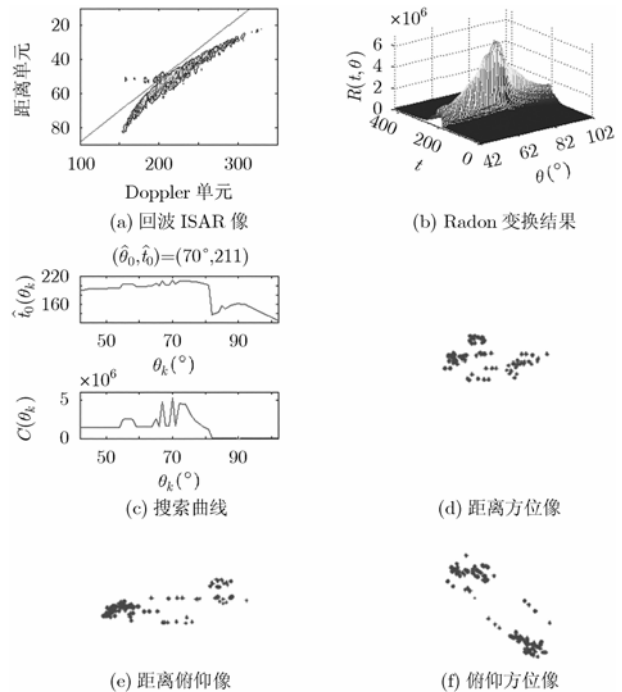


图 6 跟踪良好时的杂波抑制及成像结果

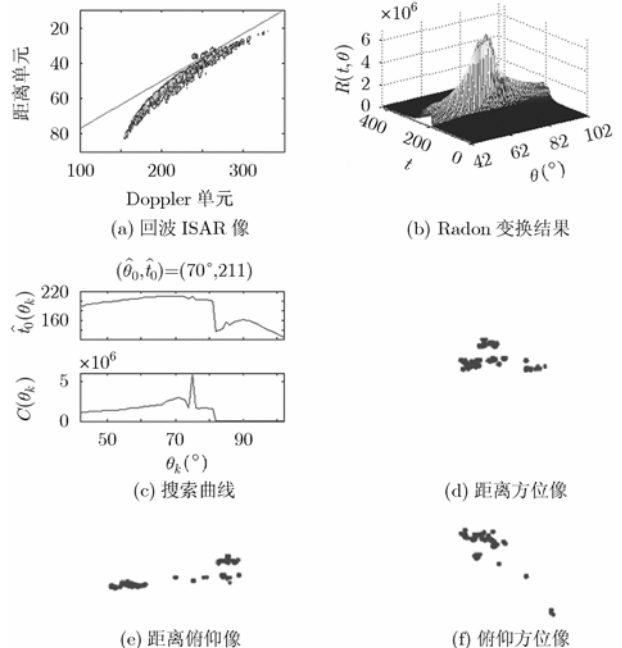


图 7 跟踪不良时的杂波抑制及成像结果

然杂波抑制效果明显,但是剔除过多的目标点不利于目标识别,因此我们应尽量降低跟踪误差。

6 结束语

本文在研究了海杂波特性的基础上,针对高掠海角情况下三维成像时海杂波抑制的问题展开讨论。分析了该情况下雷达成像的影响因素以及特点,提出首先利用 ISAR 技术得到回波二维像,角运动补偿之后,进行 Radon 变换,边缘检测,完成海杂波分离。角闪烁抑制之后,对各单元单脉冲测角得到目标的三维像。最后给出了相关仿真结果和分析,说

明了本方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] Skolnik M I and Wetzel L B. Radar Handbook(SE) [M]. The McGraw-Hill Companies Inc., 1990: 511.
 - [2] Pidgeon V W. The Doppler dependence of radar sea return [J]. *J. Geophysical Research*, 1968, 73(2): 1333-1341.
 - [3] 马长征. 雷达目标三维成像技术研究. [博士论文], 西安: 西安电子科技大学, 1999.
 - [4] Kong Young-Kyun, Cho Byung-Lae, and Kim Young-Soo. Ambiguity-free Doppler centroid estimation technique for airborne SAR using the Radon transform. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(4): 715-721.
 - [5] 贾云得. 机器视觉. 北京: 科学出版社, 2000, 6.2-6.8.
- 李 强: 男, 1979 年生, 博士生, 从事信号处理、雷达成像等方面的研究工作.
- 张守宏: 男, 1938 年生, 教授, 电子学会会士, 博士生导师, 主要从事时频分布、雷达成像、阵列信号处理、高分辨信号处理等方面的研究工作.
- 张焕颖: 男, 1980 年生, 博士生, 从事信号处理、雷达成像等方面的研究工作.