

一种改进的 DPCA 运动目标检测方法

郑明洁, 杨汝良

(中国科学院电子学研究所, 北京 100080)

摘要: 本文分析了多孔径 SAR 动目标检测和成像的特点, 改进了传统的移位相位中心天线 (DPCA) 运动目标检测方法. 采用两孔径检测时, 通过图像的插值和配准, 在图像域实现动目标检测, 消除了传统 DPCA 方法必须满足的限制条件; 增加孔径数目, 不仅能够检测动目标, 还能够估计出动目标参数, 对动目标聚焦成像, 并且消除盲速. 文章最后通过计算机仿真数据验证了本文算法的正确性和有效性.

关键词: 移位相位中心天线 (DPCA); 多孔径; 动目标检测和成像; 图像插值和配准

中图分类号: TN951 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372 2112 (2004) 09 1429 04

An Improved DPCA Moving Targets Detecting Algorithm

ZHENG Ming-jie, YANG Ru-liang

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: After analyzing the characteristics of multi-aperture moving targets detecting and imaging, the paper improves the classical displaced phase center antenna (DPCA) measurements. The improved algorithm detects moving targets through pictures interpolation and pictures registering when using two apertures. Moving targets parameters can be estimated and at the same time moving targets images can be obtained if aperture number is increased. The blind speeds can also be removed. In the last, some typical computer simulation results are presented which illustrate the methods' validities.

Key words: displaced phase center antenna (DPCA); multi-aperture; moving targets detecting and imaging; pictures interpolation and registering

1 引言

动目标检测和成像是合成孔径雷达 (SAR) 应用的一个重要方面. 地面动目标显示 (GMTI) 主要是检测和分类地面运动目标, 由于受到地面大量杂波的影响, 使得地面运动目标不易于检测, 尤其是地面慢速运动目标. 目前研究和使用的较多的是多孔径动目标检测方法, 主要有移位相位中心天线 (DPCA)、空时二维自适应处理 (STAP) 和沿迹干涉 (ATI) 等方法.

移位相位中心天线方法是空时二维自适应处理的一种特例, 早在上个世纪八十年代就开始使用, 但是由于其固有的缺陷, 使其应用受到限制. 首先, 采用 DPCA 进行动目标检测时, 相位中心间距、脉冲重复频率及载机速度必须满足严格的限制条件^[1], 但是实际中这一限制条件很难满足; 其次, 以往 DPCA 方法往往采用两个相位中心^[2], 能够检测目标, 但是不能得到较全面的目标信息. 针对上述缺陷本文进行了改进, 指出如果将 DPCA 应用在图像域, 通过对两幅复图像插值和配准消去杂波, 就不必满足上述的限制条件, 因此扩大了 DPCA 在实际中的应用范围; 本文进一步讨论了采用 3 个相位中心, 通过对 3 路信号的相位进行补偿来实现动目标检测, 然后采

用干涉的方法对目标定位及测速, 并对目标成像; 文中还针对一些问题如通道失配、盲速等给予分析和讨论, 并给出了解决盲速问题的方法; 最后给出了典型的计算机仿真结果.

2 两孔径动目标检测

传统的两孔径 DPCA 方法是在距离-多普勒域检测, 所以孔径间距 d 、载机飞行速度 v_a 、脉冲重复频率 prf 必须满足 $d = 2m \cdot v_a / \text{prf}$ (m 为整数, 且 $m \neq 0$), 才能够消除杂波, 但是实际中这一条件很难满足. 针对这一限制条件, 本文提出了如果在图像域检测, 通过对两幅复图像插值和配准, 使得两幅图像杂波信息相同, 然后将二者相减, 这样即使不满足上述条件也能够消去杂波, 使图像仅剩余噪声和动目标信号, 然后通过设置一定的门限实现动目标检测. 本文中“杂波”是指地面静止目标产生的回波, 不考虑杂波内部运动. 下面详细介绍在图像域进行动目标检测.

2.1 复图像域动目标检测

SAR 几何结构图如图 1 所示, 假设两个子孔径相距为 d , 载机速度为 v_a , 沿 x 轴方向飞行, 孔径 2 发射信号, 孔径 1 和 2 同时接收回波信号; 目标真实方位位置为 x_0 , 到航迹方向的

斜距为 R , 方位向速度为 v_x , 斜距平面内距离向速度为 v_r . 本文只对慢速目标进行检测, 即 $v_x \ll v_a$, $v_r \ll v_a$.

假设 $v_x = 0$, 两个孔径接收的回波数据经过距离向和方位向压缩后分别为 $S_{01}(t)$ 和 $S_{02}(t)$. 如果 $d = 2m \cdot v_a / \text{prf}$, 将 $S_{01}(t)$ 时移 τ , $\tau = m / \text{prf}$, 即时移 m 个脉冲后, 与 $S_{02}(t)$ 相减, 得到幅度对消特性:

$$\begin{aligned} |I(t)| &= |S_{01}(t + \tau) - S_{02}(t)| \\ &= |k' \cdot \sin c\left(\frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{v_a^2(t - T_{02})}{R} + v_r\right)T_s\right)| \\ &\quad \cdot T_s \cdot 2l \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}v_r\tau\right) \end{aligned} \quad (1)$$

其中 k' 是与目标后向散射系数有关的常数, T_s 是合成孔径时间, $T_{02} = x_0 / v_a$.

由式(1)可见, 对于静止目标而言, $v_r = 0$, 式(1)为零, 即杂波被消除; 如果动目标速度满足 $v_r\tau / \lambda = l$ (l 为整数, 且 $l \neq 0$), 则式(1)等于零, 仍然检测不到目标, 该速度就是盲速; 如果 $v_r\tau / \lambda \neq l$, 式(1)不等于零, 动目标信号就被保留下来.

但是, 实际中往往 $d \neq 2m \cdot v_a / \text{prf}$, 所以 $\tau \neq m / \text{prf}$, 这样就无法将 $S_{01}(t)$ 恰好时移 m 个脉冲, 也就无法完全消除杂波. 所以必须对图像进行插值, 然后配准, 使得配准后的 $S_{01}(t)$ 经过移位后, 与 $S_{02}(t)$ 相减, 能够在消除杂波的同时保留动目标信息. 实际中即可以对 $S_{01}(t)$ 插值, 也可以对 $S_{02}(t)$ 插值, 插值精度取决于 d 和 $2mv_a / \text{prf}$ 之间差的精度, 一般来说, 插值精度达到 0.01 像素级时就能够满足杂波消去的条件. 图像插值有多种方法, 如线性插值、样条插值等, 插值精度越高, 需要花费的时间越长. 图像插值后, 需要进行配准, 一般来说, 插值精度越高, 图像配准精度就越高, 杂波消去程度越好, 动目标检测效果也就越好.

2.2 接收通道失配对检测结果的影响

上述分析是在接收通道之间完全匹配的情况下进行的, 实际中总有一定的失配, 下面分析通道失配对检测结果的影响.

假设通道 1 存在一个恒定的相位和幅度误差, 此时回波信号成像后:

$$S'_{01}(t) = S_{01}(t) \cdot A \exp(j\varphi) \quad (2)$$

其中 A 表示幅度误差, φ 表示相位误差. 接收通道 2 不存在误差, 则两幅图像经过图像插值、配准、时移后相减并取模, 在最大值处可得:

$$|I'_m(t)| = |k'_m \cdot T_s \cdot (A \exp(j\varphi) - 1)| \quad (3)$$

其中 k'_m 是与动目标雷达截面积有关的常数. 对静止目标而言, 经过相同的处理后, 得:

$$|I'_c(t)| = |k'_c \cdot T_s \cdot (A \exp(j\varphi) - 1)| \quad (4)$$

其中 k'_c 是与杂波雷达截面积有关的常数. 没有失配时, $A = 1$, $\varphi = 0$, $|I'_c(t)| = 0$, 杂波完全被消除; 存在失配时, $|I'_c(t)|$

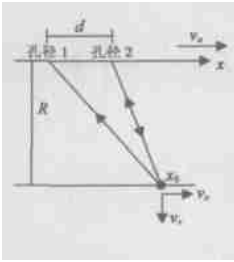


图 1 SAR 几何结构

$\neq 0$, 杂波没有被完全消除. 为了分析之便, 不考虑动目标和杂波自身幅度的大小, 仅考虑通道失配产生的影响, 此时动目标信杂比 (SCR) 可以表示为:

$$\text{SCR} = 20 \log\left(\frac{|I'_m|}{|I'_c|}\right) = 20 \log\left(\frac{|A \exp(j\varphi) - 1|}{|A \exp(j\varphi) - 1|}\right) \quad (5)$$

下面通过给定一组参数深入分析 SCR 损失与通道失配的关系. 假设目标距离向速度 $v_r = 1.2 \text{ m/s}$, 波长 $\lambda = 0.03 \text{ m}$, $\tau = 0.0025 \text{ s}$, 图 2 画出了 SCR 损失与通道失配的关系. 由图 2 可见, 当两路信号没有失配, 即 $A = 1$, $\varphi = 0$ 时, SCR 损失为 0. 随着失配程度增加, SCR 急剧下降, 当 $A > 1.15$, $\varphi > 7^\circ$ 时, SCR 损失已经超过了 30 dB, 此时很难检测到目标了.

目标距离向速度不同, SCR 损失也不相同. 假定 $A = 1.1$, $\varphi = 5^\circ$ 时, 在上述假定的系统参数下, SCR 损失与目标距离向速度的关系见图 3. 由图 3 可见当距离向速度为 $\pm 3 \text{ m/s}$ 时 SCR 损失最小, 此时最容易检测到目标, 随着目标速度向两端靠近, SCR 损失增加, 越不容易检测到目标.

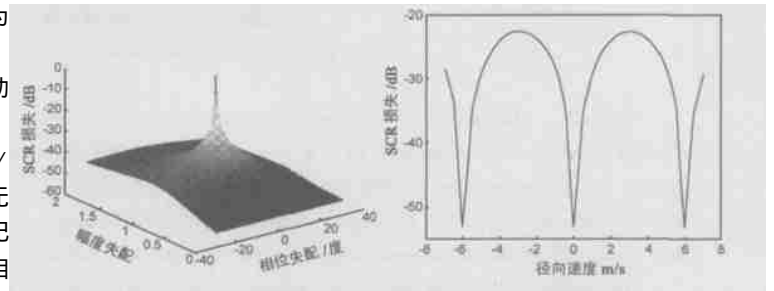


图 2 通道失配与 SCR 损失

图 3 目标距离向速度与 SCR 损失

经过上述分析可见, 采用 DPCA 方法检测动目标时, 检测结果对通道失配比较敏感, 应该尽量避免通道失配, 以获得较好的检测效果. SCR 损失还受到目标距离向速度的影响, 距离向速度不同, SCR 损失程度也不同.

3 三孔径 SAR 动目标检测

从前面的分析可见, 使用两个孔径虽然方法简单并且能获得较好的检测效果, 但是无法确定目标的真实位置和速度, 也就无法对动目标聚焦成像. 如果增加孔径数目, 则能够解决上述问题. 下面分析三孔径动目标检测情况(只考虑通道完全匹配情况).

3.1 动目标检测、定位、测速及成像

三孔径 DPCA 基本原理见文献[3]. 由于要获得目标运动参数, 所以在原始数据域分析, 仍然需要满足 $d = 2m \cdot v_a / \text{prf}$ (如果不满足该式, 通过插值也可以检测目标, 但是目标参数无法正确计算).

三孔径动目标检测和成像流程图见图 4, 对前两个孔径和后两个孔径数据分别进行 DPCA 处理后, 获得了两路杂波对消了的动目标信号 $S_{21}(t)$ 和 $S_{32}(t)$. 对 $S_{21}(t)$ 和 $S_{32}(t)$ 进行相位补偿, 去除由于载机运动带来的多普勒频率, 然后对其进行方位向傅立叶变换, 获得了两路频域信号, 通过任一路信号都可以完成动目标检测. 在进行动目标检测的同时就可以估计出目标距离向位置; 检测到动目标后, 确定其多普勒中心

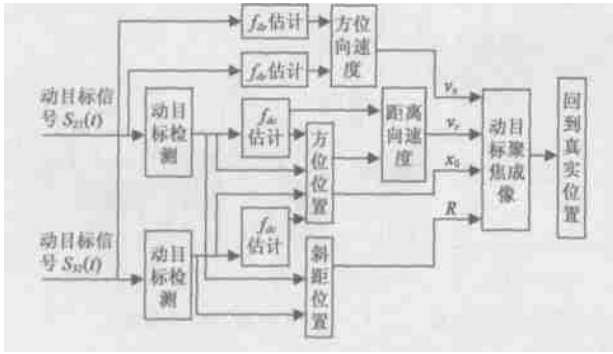


图 4 三孔径动目标检测和成像

频率, 然后采用干涉处理方法确定目标的方位位置, 进而可得目标距离向速度估计值。目标方位向速度在估计出多普勒调频率后即可确定, 而动目标的多普勒调频率则需要对 $S_{21}(t)$ 和 $S_{32}(t)$ 进行估计得到。

在静止目标聚焦雷达图像上, 动目标不仅偏离其真实方位位置, 而且图像模糊和散焦, 无法识别, 所以必须估计出动目标的多普勒调频率和中心频率, 才能对目标聚焦成像。在检测到动目标后, 对目标所在距离单元进行多普勒中心频率估计, 本文仍然采用改进的回波谱域杂波锁定法估计动目标中心频率^[4]。在估计多普勒调频率时, 由于频域相关算法要求目标信噪比(SNR)较大, 如果 SNR 较小, 就可能得不到相关峰值, 无法准确估计多普勒调频率。因此本文做了进一步改进, 采用了更加稳定的子孔径相关算法。子孔径相关算法用于动目标检测时存在一个问题, 就是在没有动目标的单元进行估计时, 估计值不收敛。对于该问题可以采用两种方法解决, 一种是根据估计精度设置一定的循环次数, 使得程序得以运行下去。第二种是先对图像采用 CFAR 方法进行检测, 对检测值超过门限的单元进行估计, 这样就能保证估计值收敛。经过仿真验证, 采用子孔径相关算法能够得到较好的估计结果, 但是该方法计算量大, 无法进行实时处理。

估计了目标的多普勒中心频率和调频率, 就可以对目标进行成像, 并且使目标回到其真实位置。由于每个目标的运动速度不一样, 所以其多普勒中心频率和调频率也不相等。在进行成像之前需要进行距离徙动校正, 距离徙动包括距离走动和距离弯曲。距离走动校正可以在时域直接完成, 距离弯曲采用一般的插值方法在距离-多普勒域内就能完成。对于机载系统来说, 距离弯曲较小, 可以通过平均多个距离单元来减小甚至可以忽略。

3.2 消除盲速

从前面的分析可见, 无论是使用两孔径还是三孔径, 检测时动目标速度都存在盲速, 使得该速度下运动的目标不能被检测到。

改变孔径间距, 使得子孔径 1 和 2 之间的间距不等于子孔径 2 和 3 之间的间距, 假设 d_{21} 和 d_{32} 分别是孔径 2 和 1 之间间距及孔径 3 和 2 之间的间距。经过分析可得, 采用三个子孔径时, 如果 d_{21} 和 d_{32} 之间满足式(6)就可以消除盲速。

$$d_{21} \neq l_1 \cdot d_{32} / l_2, \quad l_1, l_2 \text{ 为正整数} \quad (6)$$

如果想要对动目标精确定位, d_{21} 和 d_{32} 之间还应满足:

$$d_{21} = m_1 \cdot d_{32} / m_2, \quad m_1, m_2 \text{ 为正整数} \quad (7)$$

显然式(6)和式(7)不能同时满足, 所以采用三孔径不能从根本上解决盲速问题, 为了解决这

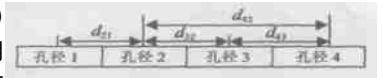


图 5 多孔径消除盲速

个问题, 使得既能精确测量动目标位置, 又能消除盲速, 必须增加孔径数目。如图 5 所示, 使用 4 个孔径, 孔径 3 和 4 之间距离为 d_{43} , 孔径 4 到孔径 2 的距离为 d_{42} , 满足 $d_{21} = d_{32} \neq d_{43}$ 。孔径 2 发射信号, 4 个孔径同时接收信号。前三个孔径实现对目标检测、测速、精确定位及成像, 孔径 2 和 4 用来消除盲速, 只要满足式(8)就能够消除盲速:

$$d_{42} \neq l \cdot d_{21} / l_1, \quad l_1, l \text{ 为正整数} \quad (8)$$

4 计算机仿真验证

为验证本文算法的有效性, 采用计算机进行了仿真验证, 仿真参数选取如下: 载机速度 $v_a = 200\text{m/s}$, 相邻孔径间距 $d = 1.0\text{m}$, 目标斜距 $R = 20\text{km}$, 波长 $\lambda = 0.03\text{m}$, 发射带宽 $f_B = 40\text{MHz}$, 采样频率 $f_s = 50\text{MHz}$, 脉冲重复频率 $\text{prf} = 800\text{Hz}$, 杂波服从瑞利分布。

4.1 图像域动目标检测仿真

(1) $d = 2m \cdot v_a / \text{prf}$ 时仿真结果

仿真了两个动目标, 动目标 1 参数: $v_r = 1.2\text{m/s}$, $v_x = 8\text{m/s}$, $x_0 = 70\text{m}$, 动目标 2 参数: $v_r = -1.5\text{m/s}$, $v_x = 0$, $x_0 = -80\text{m}$ 。目标和杂波回波信号之比 $\text{SCR} = -7.96\text{dB}$, 对任意孔径进行 SAR 成像, 见图 6, 无法从图中识别出目标。

经过 DPCA 检测后, 结果见图 7, 此时杂波已经降到噪声水平, SCR 改善至少可达 $27 + 7.96 = 34.96\text{dB}$ 。目标发生偏移, 目标 2 移到 70m 附近, 目标 1 移到 -50m 附近, 由于目标 1 具有方位向速度, 所以图像散焦, 能量下降, 但是仍然能够检测到。

(2) $d \neq 2m \cdot v_a / \text{prf}$ 时仿真结果

改变 $d = 1.3\text{m}$, 其余参数不变。直接对两幅图像采用 DPCA 方法进行动目标检测, 检测结果见图 8, 由图可见存在大量的杂波, 不能检测到动目标。对通道 1 的复图像进行样条插值, 然后对两幅图像配准, 并采用 DPCA 进行检测, 检测结果见图 9, 此时杂波已经被消减到噪声水平, 检测效果同图 7 中相仿。

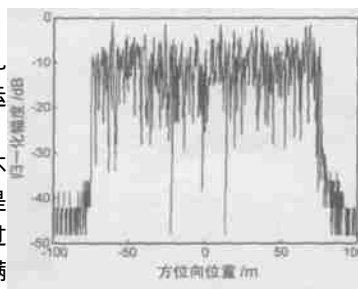


图 6 常规 SAR 图像

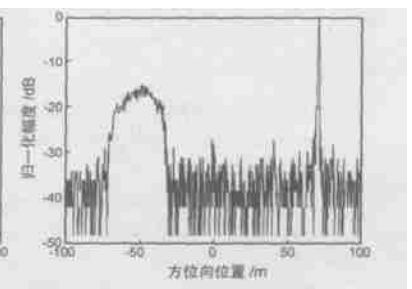


图 7 DPCA 检测结果

由图 8 和图 9 比较证明, 图像插值和配准非常重要, 对两幅复图像进行高精度的插值和配准, 几乎能够消除所有杂波, 大大提高了动目标检测概率。

4.2 数据域动目标检测仿真

系统参数不变, 动目标参数略有改变, 目标 1: $v_r = 1.2\text{m/s}$, $v_x = 8\text{m/s}$, $x_0 = 70\text{m}$; 目标 2: $v_r = 1.5\text{m/s}$, $v_x = 5\text{m/s}$, $x_0 = 80\text{m}$ 。为了有效的估计动目标的参数, 令两个目标位于不同的距离单元内。杂波仍然服从瑞利分布, 目标与杂波回波之比 $\text{SCR} = 12.04\text{dB}$ 。

对任意孔径的回波数据用对静止目标成像的方法处理获得常规 SAR 图像, 见图 10 是动目标 1 所处的距离单元图像。虽然动目标强度大于杂波, 但是对静止目标进行匹配成像时, 动目标由于运动, 使得图像幅度下降, 所以动目标仍然淹没在杂波背景中, 无法识别出来。由于目标方位向速度不为零, 所以消除载机运动带来的频率展宽后, 目标多普勒频率仍然有一定的展宽, 如图 11 是消除杂波后目标 1 所在距离门的频域图像。由图可见, 杂波下降到 -20dB , 所以 SCR 改善至少达到 20dB 。采用前面所述的方法进行中心频率估计, 得到中心频率分别为: -33.11Hz 和 -46.21Hz ; 采用干涉方法, 估计方位位置分别为: 70.05m 和 80.62m ; 根据估计的中心频率和目标方位位置就得到目标距离向速度估计值分别为: 1.21m/s 和 1.51m/s ; 采用子孔径相关算法估计多普勒调频率, 得到调频率估计值分别为: -122.79Hz/s 和 -127.19Hz/s , 进而可得方位向速度估计值分别为 7.90m/s 和 4.61m/s 。

已知目标的多普勒参数, 对目标成像, 并将其回到真实位置, 如图 12 和 13 分别是目标 1 和 2 的聚焦图像。

5 结束语

本文针对移位相位中心天线方法进行了改进, 指出在图像域进行两孔径动目标检测扩大了该方法的使用范围, 使其更具有实际意义。采用三孔径进行动目标检测和成像, 能够获得目标较全面的参数, 并对动目标聚焦成像。本文还针对通道失配问题给予了分析讨论, 指出通道失配对检测结果影响较大, 实际中应该尽量避免。对采用三孔径以下的 SAR 系统检测动目标时存在的盲速问题, 本文指出如果继续增加孔径数目, 不仅能够对动目标检测和成像, 还能够消除盲速。

参考文献:

[1] D J Coe, R G White. Moving target detection in SAR imagery: Experimental Results[A]. Pro IEEE In Radar Conf[C]. British: IEEE, 1995. 644- 649.

[2] Eli Yadin. A performance evaluation model for a two port interferometer SAR MTI[A]. IEEE National Radar Conference[C]. America: IEEE, 1996. 261- 266.

[3] 郑明洁, 杨汝良. 基于 DPCA 和干涉技术的 SAR 动目标检测 [J]. 电子与信息学报, 2003, 25(11): 1525- 1530.

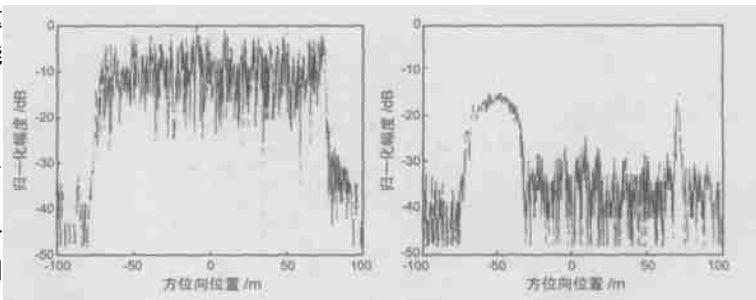


图 8 配准前检测结果

图 9 配准后检测结果

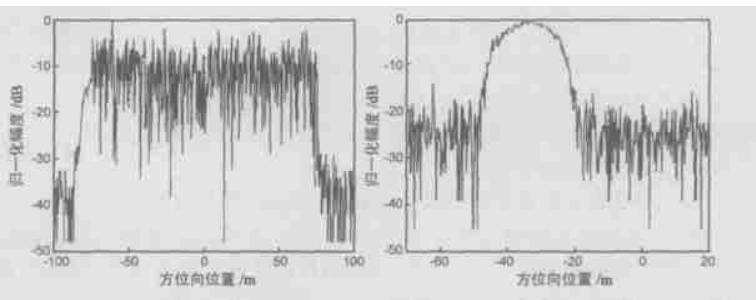


图 10 常规 SAR 图像

图 11 目标 1 检测结果

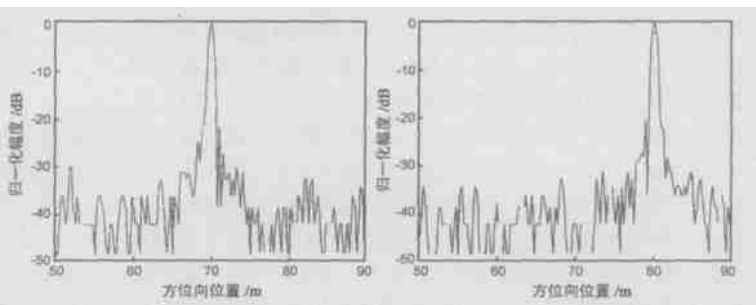


图 12 目标 1 聚焦图像

图 13 目标 2 聚焦图像

[4] 郑明洁, 杨汝良. 一种多相位中心天线的动目标检测和成像算法[J]. 现代雷达, 2003, 25(12): 55- 58.

作者简介:



郑明洁 女, 1974 年 1 月生于吉林省白山市, 2000 年 9 月考入中国科学院电子学研究所通信与信息系统专业攻读博士学位, 主要从事合成孔径雷达信号处理、运动目标检测方面的研究。



杨汝良 男, 1943 年 4 月生于云南省昆明市, 研究员, 博士生导师, 1965 年毕业于原成都电讯工程学院(现电子科技大学)雷达系雷达专业, 英国 ABERDEEN 大学工程系高级访问学者, 现为中国科学院联合遥感中心理事, 中国通信学会无线通信委员会委员, 中国空间科学学会遥感专业委员会委员, 中国电子学会高级会员, 主要从事星载、机载合成孔径雷达系统研制。