

基于 DPCA 和干涉技术的 SAR 动目标检测¹

郑明洁 杨汝良

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘 要 通过分析相位中心偏置天线 (DPCA) 技术和干涉处理的优点和缺点, 该文提出了一种用三孔径合成孔径雷达 (SAR) 对地面运动目标进行检测的新方法。该方法不仅能够检测出动目标, 还能够精确估计动目标参数, 即确定出动目标的真实位置和运动速度, 然后对动目标聚焦成像。该文方法简单, 运算量小。通过计算机仿真数据验证了该文算法的正确性和有效性。

关键词 DPCA, 干涉, 动目标检测, 合成孔径雷达 (SAR)

中图分类号 TN951, TN953

1 引言

合成孔径雷达是一种全天时、全天候的高分辨率传感器, 已经广泛用于军事、民用及其它领域。动目标检测一直是合成孔径雷达应用的一个重要方面, 尤其在军事侦察中更显示出其重要性。目前研究和使用的动目标处理方法有相位中心偏置天线 (DPCA)^[1]、空时二维自适应处理 (STAP)、干涉合成孔径雷达动目标检测技术^[2,3] 等。

DPCA 方法往往采用 2 个相位中心, 在相位中心间距, 脉冲重复频率及载机速度满足一定关系的基础上进行动目标检测, 但是不能较全面地描述动目标位置信息及速度信息。干涉处理方法采用 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、定位及测速, 但是在相位补偿时 3 路信号均需乘以不同的参考函数, 大大增加了处理的复杂度; 对于 3 孔径天线需要分成多个数据块处理, 运算量很大。通过对 DPCA 技术和干涉处理方法进行分析, 本文提出了一种对三孔径机载 SAR 地面慢速运动目标进行检测、测速和定位的新方法。该方法首先用 DPCA 技术两两对消 3 个孔径杂波信号, 获得两路杂波对消了的动目标信号, 然后对这两路信号进行干涉处理, 估计出运动目标参数。文中最后给出了典型的计算机模拟结果, 验证了该方法的正确性和可行性。

2 基本原理

载机沿 x 轴方向飞行, 速度为 v_a , 沿载机飞行方向将天线分成等间隔 3 个孔径 1, 2, 3, 形成 3 个相位中心, 相邻孔径中心距离为 d 。斜距平面内几何结构如图 1 所示, 初始时刻孔径 2 位于坐标原点, 其中孔径 2 发射线性调频信号, 发射脉冲重复频率为 prf , 三个孔径同时接收信号。由于 DPCA 技术要求 d , v_a 及 prf 满足一定的关系, 本文中三者满足 $d = 2n_1 \cdot v_a / \text{prf}$, n_1 为正整数。在 $t = 0$ 时, 点运动目标方位位置 (又称真实方位位置) 为 x_0 , 到天线的垂直距离为 R_0 , 到 3 个相位中心的斜距分别为 R_1, R_2, R_3 ; 沿载机飞行方向 (方位向) 和斜距平面内垂直于载机飞行方向 (距离向) 的速度分别是 v_x 和 v_r 。

令 $T = 1/\text{prf}$, 雷达发射 n 个脉冲后, 即经过 nT 时刻, 目标 (如无特殊声明, 均指动目标) 到 3 个孔径中心的距离分别为 $R_1(n)$ 、 $R_2(n)$ 、 $R_3(n)$ 。动目标检测、定位、测速处理框图见图 2, 图中分为两部分, 第 1 部分是 DPCA 处理, 第 2 部分是干涉处理。

¹ 2002-06-12 收到, 2002-11-22 改回

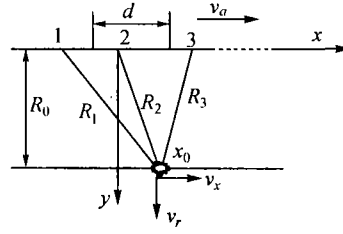


图 1 三孔径 SAR 工作几何关系图

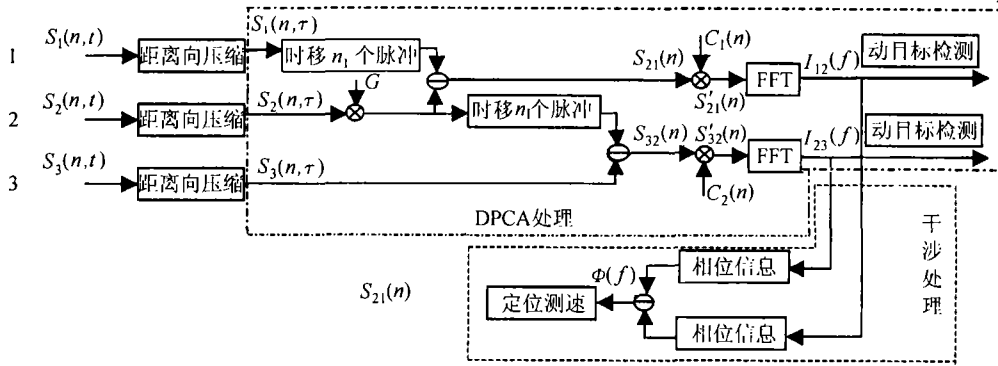


图 2 动目标检测、定位、测速处理框图

3 个孔径接收到回波信号后, 进行同步检波除去载频, 然后进行距离向压缩, 得

$$\left. \begin{aligned} S_1(n, \tau) &= \sigma(x_0) \cdot \exp(-j2\pi f_c \alpha_1) \cdot \exp(-j\pi k_r (\tau - \alpha_1)^2) \cdot T_0 \cdot \frac{\sin \pi k_r (\tau - \alpha_1) T_0}{\pi k_r (\tau - \alpha_1) T_0} \\ S_2(n, \tau) &= \sigma(x_0) \cdot \exp(-j2\pi f_c \alpha_2) \cdot \exp(-j\pi k_r (\tau - \alpha_2)^2) \cdot T_0 \cdot \frac{\sin \pi k_r (\tau - \alpha_2) T_0}{\pi k_r (\tau - \alpha_2) T_0} \\ S_3(n, \tau) &= \sigma(x_0) \cdot \exp(-j2\pi f_c \alpha_3) \cdot \exp(-j\pi k_r (\tau - \alpha_3)^2) \cdot T_0 \cdot \frac{\sin \pi k_r (\tau - \alpha_3) T_0}{\pi k_r (\tau - \alpha_3) T_0} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 $\sigma(x_0)$ 是目标雷达散射截面积, f_c 是载频, T_0 是发射脉冲宽度, k_r 是发射信号调频斜率, $\alpha_1 = (R_1(nT) + R_2(nT))/c$, $\alpha_2 = 2R_2(nT)/c$, $\alpha_3 = (R_3(nT) + R_2(nT))/c$, c 是光速。

对 1, 2 路信号采用 DPCA 方法对消地杂波, 首先对 $S_2(n, \tau)$ 进行相位补偿, 除去由于相邻孔径水平排列产生的相位偏差, 然后进行时间校准, 即将 1 路信号向前时移 n_1 个脉冲, 再与相位补偿后的 2 路信号相减, 获得杂波对消了的信号 $S_{21}(n, \tau)$ 。同样对 2, 3 路信号采用 DPCA 方法对消地杂波, 获得另外一路杂波对消了的信号 $S_{32}(n, \tau)$ 。相位补偿参考函数 G 选取如下:

$$G = \exp\{-j \cdot [2\pi/\lambda + (2\pi k_r/c)(\tau - 2R_0/c)] \cdot d^2/(4R_0)\} \quad (2)$$

进行地杂波对消

$$\left. \begin{aligned} S_{21}(n, \tau) &= S_2(n, \tau) \cdot G - S_1(n + n_1, \tau) \\ S_{32}(n, \tau) &= S_3(n, \tau) - S_2(n + n_1, \tau) \cdot G \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由于 $\sin x/x$ 在最大值附近变化很小, 且本文只对慢速运动目标进行检测, 即 $v_x \ll v_a$, $v_r \ll v_a$, 所以 (3) 式经过整理后得

$$\left. \begin{aligned} S_{21}(n) &= \sigma(x_0) \cdot T_0 \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} \left(R_0 + v_r \cdot nT + \frac{x_0^2 + d^2/4 + (nT \cdot v_a)^2 - 2x_0 nT \cdot v_a}{2R_0} \right) \right] \\ &\quad \times \left[1 - \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} v_r n_1 T \right) \right] \\ S_{32}(n) &= \sigma(x_0) \cdot T_0 \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} \left(R_0 + v_r \cdot nT + (x_0^2 - x_0 d + d^2/2 + (nT \cdot v_a)^2 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - (2x_0 - d)nT \cdot v_a) / 2R_0 \right) \right] \cdot \left[1 - \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} v_r n_1 T \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

获得了两路动目标信号后, 将每一路分别与参考函数相乘, 去除由于孔径间隔产生的多普勒中心频率的偏差, 同时去除回波信号中载机运动产生的线性调频项, 参考函数分别为

$$\left. \begin{aligned} C_1(n) &= \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} \frac{(nT v_a)^2}{R_0} \right] \\ C_2(n) &= \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{(nT v_a)^2}{R_0} + \frac{dnT v_a}{R_0} \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

与参考函数相乘后, 得到两路信号

$$\left. \begin{aligned} S'_{21}(n) &= S_{21}(n) \cdot C_1(n) \\ S'_{32}(n) &= S_{32}(n) \cdot C_2(n) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

对两路杂波对消后的信号进行方位向傅里叶变换, 得到频域内的两路动目标信号

$$\left. \begin{aligned} I_{21}(f) &= \sigma(x_0) \cdot T_0 \cdot \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda} \left(2R_0 + \frac{2x_0^2 + d^2/2}{2R_0} \right) \right] \\ &\quad \times \left[1 - \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} 2v_r n_1 T \right) \right] I'_{21}(f) \\ I_{32}(f) &= \sigma(x_0) \cdot T_0 \cdot \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda} \left(2R_0 + \frac{2x_0^2 - 2x_0 d + d^2}{2R_0} \right) \right] \\ &\quad \times \left[1 - \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} 2v_r n_1 T \right) \right] I'_{32}(f) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中

$$I'_{32}(f) = I'_{21}(f) = \exp[j\pi\delta(N_1 - 1)T] \frac{\sin(\pi\delta N_1 T)}{\sin(\delta\pi T)} \quad (8)$$

N_1 是傅里叶变换长度, $\delta = 2x_0 v_a / (\lambda R_0) - 2v_r / \lambda - f$.

利用 DPCA 处理获得了两路已经进行过杂波对消和消除了孔径间隔产生的相位差的频域动目标信号, 至此, 就可以通过任意一路信号进行动目标检测。

在获得了两路杂波对消后的动目标信号后, 本文采用干涉处理来确定目标的方位位置。由 (7) 式看出, 两路杂波对消后的信号中, 对同一个运动目标其幅度相同, 但相位不同。正是由于存在着相位差, 使得我们可以利用相位差信息确定目标的方位位置。在确定了目标的方位位置后, 就可以进一步求得目标的距离向速度。

3 动目标检测

对于落入主瓣杂波之外的快速目标, 用常规的方法, 如频域滤波法等等就可以检测, 但是对于落入主瓣杂波之内的慢速运动目标, 则需要杂波对消后才能检测。本文主要分析对地面慢速运动目标的检测。

从 (8) 式看出, 当 $f = 2x_0v_a/(\lambda R_0) - 2v_r/\lambda$ 时, $I'_{21}(f)$ 和 $I'_{32}(f)$ 取得最大值, 代入 (7) 式, 然后对 (7) 式取模得

$$\begin{aligned} |I_{32}(f)| &= |I_{21}(f)| = |\sigma(x_0)| \cdot T_0 \cdot \sqrt{2 \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi \cdot d \cdot v_r}{\lambda \cdot v_a} \right) \right]} \\ &= |\sigma(x_0)| \cdot T_0 \cdot \left| 2 \sin \left(\frac{\pi \cdot d \cdot v_r}{\lambda \cdot v_a} \right) \right| \end{aligned} \quad (9)$$

由 (9) 式看出:

(1) 当目标距离向速度 $v_r = m \cdot v_a \cdot \lambda/d (m = \pm 1, \pm 2, \dots)$ 时, (9) 式为零, 目标将被对消掉, 该速度就是盲速, 这时无法检测到目标;

(2) 当目标距离向速度 $v_r = (m + 1/2) \cdot v_a \cdot \lambda/d (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ 时, (9) 式达到最大, 此时动目标的信杂比得到最大改善;

(3) 当目标距离向速度在二者之间时, 目标信号被部分对消, 部分保留下来;

(4) 对于地面静止目标 ($v_r = 0$), (9) 式为零, 即静止目标产生的地杂波被对消掉。

由此看出, 增加 d , 有利于检测慢速运动目标, 但是盲速之间间距变小, 盲速点增多, 不利于速度检测, 因此 d 可以根据实际速度检测范围来确定。采用 CFAR 判别方法检测杂波对消后的图像幅度, 如果检测值超过了门限, 就认为检测到动目标, 否则认为没有动目标。

4 动目标定位

目标斜距 R_0 在目标被检测时就可确定; 目标真实方位位置 x_0 可采用干涉处理方法确定。首先确定每一路信号中检测出的动目标所在单元的相位, 由 (7) 式看到, 前一路信号中目标所在单元的相位为 $\phi_1(f)$, 后一路信号中目标所在单元的相位等于 $\phi_2(f)$, 将这两个相位相减, 就可以求出目标的真实方位位置, 即

$$\hat{\phi}(f) = \phi_2(f) - \phi_1(f) = -(2\pi/\lambda)[(-2x_0d + d^2/2)/(2R_0)] \quad (10)$$

确定了目标所在单元的相位差估计值 $\hat{\phi}(f)$, 就可以求得目标的真实方位位置的估计值:

$$\hat{x}_0 = [\lambda R_0 \hat{\phi}(f)] / (2\pi d) + d/4 \quad (11)$$

下面考虑方位位置模糊问题: 由于 $\hat{\phi}(f)$ 是以 2π 为周期, 因此目标方位位置估计值有可能出现模糊。由于目标方位位置最大值位于 $x_0 = \pm L_s/2$ 处, 且 $d \ll L_s$, 代入 (10) 式中得 $\hat{\phi}(f) = 2\pi[(\pm L_s d - d^2/2)/(2R_0 \lambda)] \approx \pm \pi d/D$, 其中 L_s 是合成孔径长度, D 是单天线方位向长度。如果 $d < D$, $\hat{\phi}(f)$ 处于 $(-\pi, \pi)$ 范围内, 目标方位位置不会出现模糊, \hat{x}_0 就是目标真实方位位置的估计值; 如果 $d > D$ 时, 可能会发生相位缠绕, 会产生方位位置模糊。

5 动目标速度测量

目标的真实方位位置估计值 \hat{x}_0 所对应的多普勒频率为 $\hat{f}_0 = \hat{x}_0 \cdot 2v_a / (\lambda R_0)$, 而在图像上检测到目标存在单元所对应的多普勒频率为 \hat{f}_1 , 目标距离向速度分量产生的多普勒频率是二者之差

$$\hat{f}_2 = 2v_r / \lambda = \hat{f}_0 - \hat{f}_1 = 2v_a \hat{x}_0 / (\lambda R_0) - \hat{f}_1 \quad (12)$$

由此估计出运动目标距离向速度: $v_r = v_a \hat{x}_0 / R_0 - \hat{f}_1 \lambda / 2$.

目标方位向速度需要根据目标多普勒调频率来确定, 因此首先需估计出目标多普勒调频率, 它可以采用一些自聚焦算法估计得到, 如相位梯度自聚焦算法, 子孔径相关算法等.

6 计算机仿真实验

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:

载机高度 $H=10\text{km}$, 载机速度 $v_a=200\text{m/s}$, 相邻孔径中心距离 $d=1.5\text{m}$,
中心斜距 $R=20\text{km}$, 波长 $\lambda=0.03\text{m}$, 发射脉冲宽度: $T_0=16\mu\text{s}$,
单天线方位向长度 $D=1.5\text{m}$, 发射脉冲重复频率 $\text{prf}=800\text{Hz}$.

静止杂波由均匀散射的一系列静止点目标组成, 两个弱散射点运动目标 (假设方位向速度为零) 位于其中, 动目标参数分别为: 目标 1 的距离向速度 $v_{r1}=0.3\text{m/s}$; 真实方位位置 $x_{01}=28\text{m}$, 斜距 $R_{01}=20040\text{m}$; 目标 2 的距离向速度 $v_{r2}=1.2\text{m/s}$, 真实方位位置 $x_{02}=70\text{m}$, 斜距 $R_{02}=20060\text{m}$; 动静目标的幅度比大约为 -15dB . 对任一子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, 如图 3 是中间孔径三维图像.

两个动目标在常规 SAR 图像上将偏离其真实方位位置, 偏离值分别为 $-v_{r1} \cdot R_{01} / v_a = -30.06\text{m}$, $-v_{r2} \cdot R_{02} / v_a = -120.36\text{m}$, 而其真实位置分别为 28m 和 70m , 故目标在方位向将出现在 -2.06m 和 -50.36m 处. 由于在 -2.06m 和 -50.36m 附近均有强散射杂波, 所以动目标淹没在杂波中, 无法识别.

对前两个孔径信号进行地杂波对消, 结果如图 4 所示, 杂波已经基本被消除, 可看出在 -2m 和 -50m 附近各有一个目标. 分别估计出两点的相位, 然后求出目标真实方位位置的估计值分别为 27.4m 和 69.1m . 估计出目标的真实方位位置后, 并且已知目标所在单元的多普勒频率, 即可求出目标距离向速度的估计值为 0.29m/s 和 1.1m/s . 估计出目标距离向速度后, 分别对两个动目标聚焦成像. 图 5, 图 6 分别是目标 1, 2 的俯视图. 由图可看出, 目标回到其真实位置处.

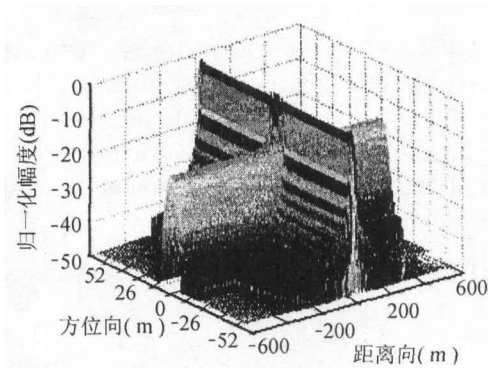


图 3 中间孔径地面场景 SAR 图像

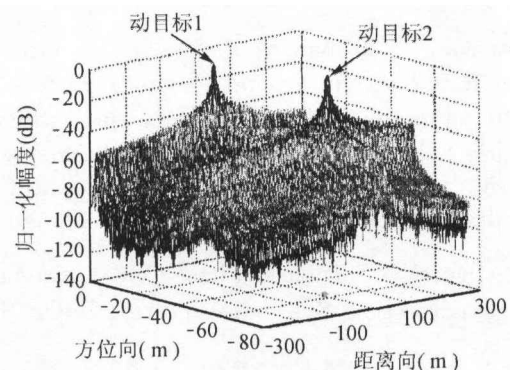


图 4 前两路信号杂波对消后图像

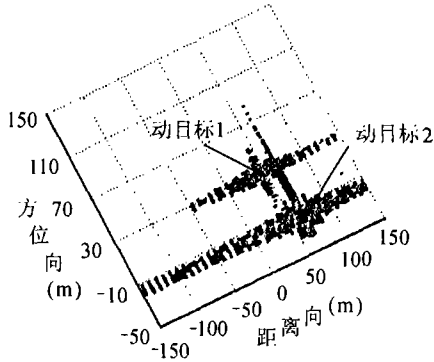


图 5 目标 1 聚焦 SAR 俯视图

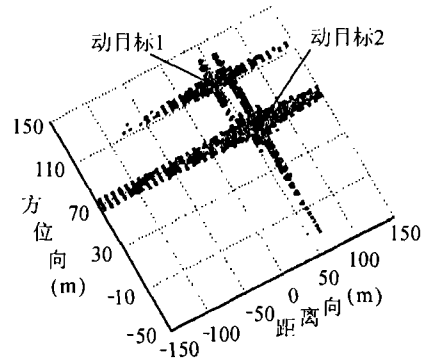


图 6 目标 2 聚焦 SAR 俯视图

7 结 论

在深入分析 DPCA 原理和干涉 SAR 处理技术的基础上, 经过理论推导, 本文将二者优点相结合, 提出了一种新方法, 该方法可对三孔径 SAR 进行动目标检测、定位、测速。计算机仿真证明本文方法可以有效地抑制地杂波, 增强被主瓣杂波遮掩的动目标的信杂比, 而且能够对慢速动目标进行精确定位, 并估计出目标的距离向速度分量。

参 考 文 献

- [1] 王永良, 陈建文, 吴志文, 现代 DPCA 技术研究, 电子学报, 2000, 28(6), 118-121.
- [2] E. F. Stockburger, D. N. Held, Interferometric moving ground target imaging, Proceedings of the IEEE International Radar Conference, Alexandria VA, USA, May 1995, 438-443.
- [3] 李景文, 李春升, 周荫清, 三孔径 INSAR 动目标检测和成像, 电子学报, 1999, 27(6), 40-43.

SAR MOVING TARGETS DETECTION BASED ON DPCA AND INTERFEROMETRIC PROCESSING

Zheng Mingjie Yang Ruliang

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

Abstract This paper puts forward a new method of detecting three-aperture Synthetic Aperture Radar (SAR) ground moving targets after studying Displaced Phase Center Antenna (DPCA) and interferometric processing technique. This method can not only discover moving targets but also estimate the targets parameters such as real positions and velocities. Furthermore it is simpler and needs fewer computations. Finally some typical computer simulation results are presented which illustrate the method's validity.

Key words Displaced Phase Center Antenna (DPCA), Interferometric processing, Moving targets detection, Synthetic Aperture Radar(SAR)

郑明洁: 女, 1974 年生, 博士生, 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 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事航空航天电子系统工程研制。