

基于机载前向阵雷达的三通道斜视 SAR-GMTI 技术研究

张佳佳* 周芳 孙光才 邢孟道 保铮

(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: 现有的基于前向阵雷达的 SAR-GMTI 方法主要是空时自适应处理(STAP), 而 STAP 在实际工程中难以实现。针对这一情况, 该文提出了一种基于机载前向阵雷达的斜视 SAR-GMTI 新方法。文中建立了基于前向阵雷达的三通道斜视 SAR-GMTI 体制下的运动目标回波信号模型, 利用等效分析建立了该模型与传统三通道相位中心偏置天线(DPCA)模型的联系。通过改进的 DPCA 技术, 实现该体制下的动目标检测、测速和定位。最后仿真结果验证了改进的 DPCA 技术的有效性。

关键词: 前向阵雷达; SAR-地面运动目标检测(GMTI); 斜视模式; 相位中心偏置天线(DPCA)

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)02-0344-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00581

Study on Three Channels Squint SAR-GMTI System Based on the Forward-looking Airborne Radar

Zhang Jia-jia Zhou Fang Sun Guang-cai Xing Meng-dao Bao Zheng

(National Key Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Available SAR-Ground Moving Target Indication (SAR-GMTI) method based on the forward-looking antenna is mainly Space-Time Adaptive Processing (STAP), which is hard to be practically realized. For this fact, an advanced SAR-GMTI method based on the forward-looking airborne radar is proposed in this paper. This paper establishes the echo model of moving targets, and illustrates the connection between the traditional Displaced Phase Center Antenna (DPCA) systems and this proposed system. The improved DPCA technology is presented for moving target detection, location and velocity measurement. Finally, the simulation results confirm the effectiveness of the improved DPCA technology.

Key words: Forward-looking antenna; SAR-Ground Moving Target Indication (GMTI); Squint mode; Displaced Phase Center Antenna (DPCA)

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是一种全天时、全天候、多功能的微波遥感成像雷达, 在民用中和军事上都得到了广泛应用。地面运动目标检测(GMTI)是SAR在战场侦察中的重要应用, 多通道SAR-GMTI系统能够在获得高分辨率图像的同时完成地面动目标检测、测速及定位, 具有巨大的军事价值。常见的多通道 SAR-GMTI 方法有相位中心偏置天线(DPCA)^[1,2]、空时自适应处理(STAP)^[3,4]、顺轨干涉(ATI)^[5]和杂波抑制干涉(CSI)^[6]等, 这些方法大多是基于正侧面阵雷达系统。

机载火控雷达的天线多为前向阵, 其静止杂波回波特性具有距离空变性, 相较于正侧面阵雷达更为复杂, 这使得基于正侧面阵雷达的多通道SAR-

GMTI技术难以直接应用在前向阵雷达系统中。未来战争中复杂多变的战场形势要求前向阵雷达具备 SAR-GMTI能力, 现有基于前向阵雷达的多通道 SAR-GMTI方法除STAP外公开发表的较少, 而 STAP在实际工程中难以实现。针对这一情况, 本文提出一种基于机载前向阵雷达的三通道斜视 SAR-GMTI方法, 该方法利用改进的DPCA技术实现动目标检测、测速与定位, 具有较高性能且相对于STAP方法更容易在工程上实现, 是对基于前向阵雷达的SAR-GMTI方法的有效补充。

本文首先建立了基于机载前向阵雷达的三通道斜视SAR-GMTI系统几何模型, 对该体制的系统模型进行了等效分析, 建立起该系统模型与传统正侧面阵DPCA模型的联系, 同时利用改进的三通道DPCA技术, 实现了杂波抑制, 并提出一种测速定位方法实现动目标的定位。最后通过仿真分析验证了该改进的DPCA算法和动目标测速与定位方法的有效性。

2011-06-14 收到, 2011-10-19 改回

国家自然科学基金重大项目(60890072)和中央高校基本科研业务费专项资金(JY1000902031)资助课题

*通信作者: 张佳佳 plusharp@gmail.com

2 系统几何模型

基于机载前向阵雷达的三通道斜视 SAR-GMTI 系统几何模型如图 1，子孔径 1~3 分布在与航向垂直的前向阵面上，各子孔径之间同时具有水平方向和垂直方向的基线分量。雷达工作在前斜视模式，全孔径发射信号，3 个子孔径同时接收回波。载机沿 x 轴方向飞行，飞行速度为 v ，飞行高度为 H ，斜视角为 θ_0 ，俯仰角为 β 。在方位慢时间 $t_m = 0$ 时刻，波束中心指向场景中心 $(X, Y, 0)$ 。本文假设雷达作用距离远远大于子孔径间的基线，采用等效相位中心原理进行模型分析， $t_m = 0$ 时刻，3 个子孔径等效相位中心坐标标记为 $(0, Y_i, H + Z_i)$ ， $i = 1, 2, 3$ ，且 $Y_2 = 0$ ， $Z_2 = 0$ 。

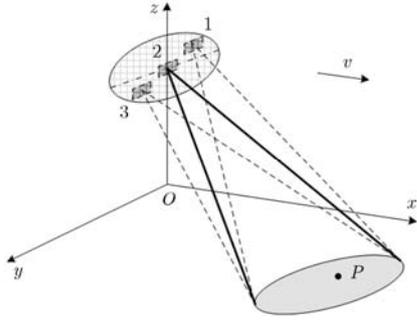


图 1 前向阵三通道斜视 SAR-GMTI 系统几何模型

设地面场景上某动目标 P 的初始坐标为 $(X + x_n, y_n, z_n)$ ，动目标沿 x 轴和 y 轴方向速度分量分别为 v_x 和 v_y ，则动目标 P 到第 i ($i = 1, 2, 3$) 个等效相位中心的瞬时斜距为

$$R_i(t_m) = \left((X + x_n - (v - v_x)t_m)^2 + (y_n - Y_i + v_y t_m)^2 + (z_n - H - Z_i)^2 \right)^{1/2} \quad (1)$$

为了以通道 2 为基准，研究 3 个通道的回波信号，记 $t_m = 0$ 时刻的瞬时斜距为 $R_{ni} = R_i(t_m = 0)$ ，在 $Y_i = 0, Z_i = 0$ 处对 R_{ni} 进行一阶泰勒展开，有

$$R_{ni} = R_i(t_m = 0) \approx R_n - \Delta r_i \quad (2)$$

其中

$$\Delta r_i = [y_n Y_i + (z_n - H) Z_i] / R_n \quad (3)$$

记 $R_n = R_2(t_m = 0) = \sqrt{(X + x_n)^2 + y_n^2 + (z_n - H)^2}$ 为 $t_m = 0$ 时刻通道 2 到目标 P 的距离。由式(2)可知，由于天线空间位置的差异， $t_m = 0$ 时刻通道 1 与通道 3 相对于通道 2 到目标 P 的距离存在距离差 Δr_i 。

3 模型等效分析

我们首先从模型等效的角度来分析机载前向阵三通道斜视 SAR-GMTI 体制的系统模型。对于斜视

SAR 数据，进行距离走动校正后，可以等效为正侧视数据进行处理，那么可以通过基线分解，建立起本模型与传统三通道 DPCA 模型之间的联系。

斜视数据等效正侧视处理后，“等效方位向”为成像平面上与场景中心 C 的斜距 R_{ref} 垂直的方向，那么载机等效方位速度为 $v \cos \theta_0$ 。如图 2，3 个子孔径的等效相位中心 a, b, c 不处于成像平面上，我们首先将子孔径的基线 \overline{ab} 和 \overline{bc} 投影到成像平面上，即得到投影 $\overline{a'b}$ 和 $\overline{b'c'}$ ，再向等效方位向进行投影，得到等效方位向上的基线分量 $\overline{a''b''}$ 和 $\overline{b''c''}$ ，且有

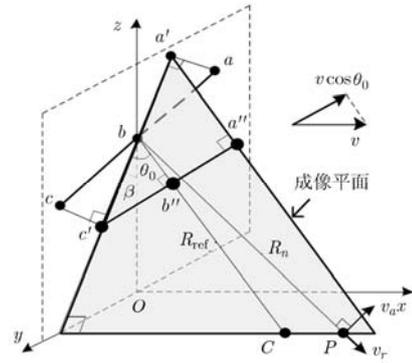


图 2 模型等效示意图

$$\overline{a''b''} = \Delta r_1 \tan \theta_0, \quad \overline{b''c''} = \Delta r_3 \tan \theta_0 \quad (4)$$

同时得到径向方向的基线分量为 Δr_1 和 Δr_3 。等效方位向的基线分量使本模型具备应用传统 DPCA 技术的基础，而径向的基线分量会造成距离通道偏置和通道间相位偏差。在对二者进行补偿之后，本模型即可等效为传统的正侧视三通道 DPCA 模型。而对径向基线的处理是本文方法与传统 DPCA 技术不同的地方。

4 改进的 DPCA 技术

设雷达发射线性调频脉冲信号，则第 i 个等效相位中心接收的距离脉冲压缩后的基频回波信号为

$$S_i(\hat{t}, t_m; R_{ni}) = \sigma_n \text{sinc} \left(B(\hat{t} - 2R_i(t_m)/c) \right) \cdot a_a(t_m) \exp(-j4\pi R_i(t_m)/\lambda) \quad (5)$$

其中 \hat{t} 为距离快时间， σ_n 为散射系数， $a_a(\cdot)$ 为方位窗函数， B 为发射信号带宽， γ 为调频率， c 为光速， λ 为中心载频 f_c 对应的波长。

由于雷达工作在斜视模式，信号存在较大的距离走动，必须在距离频域进行距离走动校正。距离走动校正函数为

$$H_1 = \exp(-j4\pi(f_c + f_r)vt_m \sin \theta_0 / c) \quad (6)$$

距离走动校正之后，变换到 2 维频域得到

$$\begin{aligned}
S_i(f_r, f_a; R_n) &= \sigma_n A_r(f_r) A_a(f_a) \exp\left(-j\pi \frac{f_r^2}{\gamma_e(f_a; R_n)}\right) \\
&\cdot \exp\left(-j \frac{\pi \lambda R_n}{2(v \cos \theta_0 - v_a)^2} f_a^2\right) \\
&\cdot \exp\left(-j \frac{2\pi(f_r + f_c)}{c} R_n\right) \\
&\cdot \exp\left(-j \frac{2\pi R_{\text{ref}}}{c} \left(\frac{f_a}{f_{aM}}\right)^2 f_r\right) \\
&\cdot \exp(j(\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3)) \quad (7)
\end{aligned}$$

其中 $A_r(\bullet)$ 和 $A_a(\bullet)$ 分别为频域距离和方位窗函数, f_r 为距离频率, $f_a = 2v \cos \theta_0 \sin \theta / \lambda$ 为方位频率, θ 为点目标瞬时斜视角, 其满足关系式: $\sin \theta = f_a / f_{aM}$, $f_{aM} = 2v \cos \theta_0 / \lambda$, $\frac{1}{\gamma_e(f_a; R_n)} = -\frac{2\lambda R_{\text{ref}} \sin^2 \theta}{c^2 \cos^3 \theta}$, $R_{\text{ref}} = \sqrt{X^2 + Y^2 + H^2}$ 。结合图 1 和图 2, 知 $v_r = \frac{v_x(X + x_n) + v_y y_n}{R_n}$, $v_a = \frac{v_x \sqrt{y_n^2 + (z_n - H)^2}}{R_n} - \frac{v_y y_n (X + x_n)}{R_n \sqrt{y_n^2 + (z_n - H)^2}}$ 分别是动目标的速度在斜距方

向和垂直径向方向的分量, 本文称之为动目标的径向速度和等效方位速度。相位 $\Phi_1 \sim \Phi_3$ 分别为

$$\Phi_1 = \frac{2\pi}{c} \frac{R_n^2 v_r^2 - 2x_n R_n v_r v \cos^2 \theta_0}{R_n (v \cos \theta_0 - v_a)^2} f_r + \frac{4\pi}{c} \Delta r_i f_r \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
\Phi_2 &= \frac{2\pi R_n v_r}{(v \cos \theta_0 - v_a)^2} f_a - \frac{2\pi v \sin \theta_0}{R_n (v \cos \theta_0 - v_a)^2} \\
&\cdot \Delta r_i f_a - \frac{2\pi x_n v \cos^2 \theta_0}{(v \cos \theta_0 - v_a)^2} f_a \quad (9)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Phi_3 &= \frac{2\pi}{\lambda} \frac{(x_n v \cos^2 \theta_0 - R_n v_r)^2}{R_n (v \cos \theta_0 - v_a)^2} \\
&- \frac{4\pi}{\lambda} \frac{v_r v \sin \theta_0}{R_n (v \cos \theta_0 - v_a)^2} \Delta r_i + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_i \quad (10)
\end{aligned}$$

Φ_1 的第 1 项是动目标速度引起的动目标距离向位置偏移, 第 2 项是 Δr_i 引起的三通道 SAR 图像距离向整体偏移, 需要在成像过程中补偿掉; Φ_2 的第 1 项是由径向速度 v_r 引起的动目标方位向位置偏移, 第 2 项是由 Δr_i 引起的三通道 SAR 图像方位向整体偏移, 第 3 项为点目标的位置信息; Φ_3 的第 1 项是动目标信号的固有相位, 不影响动目标的检测、测速和定位, 第 2 项包含通道间的干涉相位信息, 第 3 项是 Δr_i 引起的通道间相位偏差, 会导致复图像相减时, 地面杂波无法被充分抑制, 因此需要在杂波相消前补偿掉。

构造 2 维频域补偿函数 H_2 进行弯曲校正和二次距离脉冲压缩, 并补偿 Δr_i 引起的通道间距离偏移和方位偏移, 补偿函数为

$$\begin{aligned}
H_2(i) &= \exp\left(j\pi \frac{f_r^2}{\gamma_e}\right) \exp\left(j \frac{2\pi R_{\text{ref}} f_r}{c} \left(\frac{f_a}{f_{aM}}\right)^2\right) \\
&\cdot \exp\left(-j \frac{4\pi \Delta r_i}{c} f_r\right) \exp\left(j \frac{2\pi \Delta r_i \tan \theta_0}{v \cos \theta_0} f_a\right) \quad (11)
\end{aligned}$$

补偿 H_2 后, 将信号变换到 2 维时域, 整理后得到

$$\begin{aligned}
S_i(\hat{t}, t_m; R_n) &= \sigma_n \text{sinc}\left(B\left(\hat{t} - \frac{2}{c}\left(R_n - \frac{R_n v_r^2}{2v^2 \cos^2 \theta_0} + \frac{x_n v_r}{v}\right)\right)\right) \\
&\cdot a_a(t_m) \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\Delta r_i v_r v \sin \theta_0}{(v \cos \theta_0 - v_a)^2}\right) \\
&\cdot \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} (R_n - \Delta r_i)\right) \\
&\cdot \exp\left(j \frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{x_n v \cos^2 \theta_0}{R_n} - v_r\right) t_m\right) \\
&- j \frac{2\pi}{\lambda} \frac{(v \cos \theta_0 - v_a)^2}{R_n} t_m^2 \quad (12)
\end{aligned}$$

对式(12)进行方位 Dechirp 成像, 完成方位向的聚焦, 得到 SAR 复图像

$$\begin{aligned}
S_{\text{Imgi}}(\hat{t}, f_a; R_n) &= \sigma_n \text{sinc}\left(B\left(\hat{t} - \frac{2}{c}\left(R_n - \frac{R_n v_r^2}{2v^2 \cos^2 \theta_0} + \frac{x_n v_r}{v}\right)\right)\right) \\
&\cdot \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} R_n\right) \text{sinc}\left(T_a\left(f_a - \frac{2x_n v \cos^2 \theta_0}{\lambda R_n} + \frac{2v_r}{\lambda}\right)\right) \\
&\cdot \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\Delta r_i v_r v \sin \theta_0}{(v \cos \theta_0 - v_a)^2}\right) \exp\left(j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_i\right) \quad (13)
\end{aligned}$$

其中 T_a 为合成孔径时间。此时杂波已经 2 维聚焦。

从式(13)可以看出, 得到三通道 SAR 图像后, 要通过三通道两两相减的方式充分抑制杂波, 就必须先补偿掉 Δr_i 引起的通道间相位偏差。需要注意的是, 用本文的成像算法成像得到的 SAR 图像存在几何形变, 因此补偿相位偏差的时候需要考虑几何形变的影响。记 SAR 图像上各像素坐标对应的位置信息为 (\hat{R}_n, \hat{x}_n) , 根据几何关系对图像上每个像素点计算其对应的 \hat{y}_n , 代入式(3)得到 $\Delta \hat{r}_i$ 后构造补偿相位

$$H_3(i) = \exp(-j4\pi \Delta \hat{r}_i / \lambda) \quad (14)$$

其中 $\Delta \hat{r}_i = (\hat{y}_n Y_i + (z_n - H) Z_i) / \hat{R}_n$ 。对于静止杂波来说, 乘以补偿相位之后通道间相位偏差已经被补偿, 但是对于动目标来说, 径向速度会使动目标在

图像上偏离原本的位置，记动目标初始位置为 (R_n, x_n) ，由式(13)可知成像后动目标位置为

$$\left(\hat{R}_n, \hat{x}_n\right) = \left(R_n - \frac{R_n v_r^2}{2v^2 \cos^2 \theta_0} + \frac{x_n v_r}{v}, x_n - \frac{R_n v_r}{v \cos^2 \theta_0}\right) \quad (15)$$

乘以补偿相位 H_3 之后，动目标信号的通道间相位偏差没有被完全补偿，剩余的通道间相位偏差为

$$\Delta\phi_i = 4\pi(\Delta r_i - \Delta\hat{r}_i)/\lambda \quad (16)$$

此相位会影响动目标的测速和定位，我们将在第5节具体讨论对 $\Delta\phi_i$ 的处理。

补偿通道间相位偏差之后，进行杂波抑制，得到通道1和通道2相消结果 $I_{12}(t_m)$ 和通道3和通道2对相消结果 $I_{32}(t_m)$ 。

$$\begin{aligned} I_{i2}(t_m) &= S_{\text{Imgi}}(t_m) \cdot H_3(i) - S_{\text{Img2}}(t_m) \cdot H_3(2) \\ &= S_{\text{Img2}}(t_m) \cdot j2 \exp(j\psi_i) \sin(j\psi_i) \end{aligned} \quad (17)$$

其中 $i = 1, 3$ ，且有

$$\psi_i = \frac{\Delta\phi_i}{2} - \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\Delta r_i v_r \tan \theta_0}{v \cos \theta_0} \quad (18)$$

这里做了 $1/(v \cos \theta_0 - v_a) \approx 1/v^2 \cos^2 \theta_0$ 的近似，为了方便估计径向速度。对于慢速运动目标， $v_a \ll v$ ，此近似是成立的。

根据以上分析我们可以得到以下结论：

(1) 天线间距不一致并不影响动目标检测，可以选择任意对消通道进行检测。 $v_r = 0$ 时， $|I_{12}(t_m)| = |I_{32}(t_m)| = 0$ ，地杂波和径向速度为零的运动目标同时被抑制。

(2) 以 $I_{12}(t_m)$ 为例，当 $v_r = \frac{\lambda v \cos \theta_0}{4\pi \Delta r_1 \tan \theta_0} \Delta\phi_1 - k \frac{\lambda v \cos \theta_0}{2\Delta r_1 \tan \theta_0}$ ， $k = \pm 1, \dots, \pm n$ 时， $I_{12}(t_m) = 0$ ，动

目标被对消，无法检测到，此时的径向速度即为盲速，可见盲速跟 $\Delta\phi_i$ 有关。

(3) 同样以 $I_{12}(t_m)$ 为例，结合传统的 DPCA 技术可以得到本模型下的最小可检测速度为 $\text{MDV} = \frac{\lambda v \cos \theta_0}{2\Delta r_1 \tan \theta_0}$ 。

另外，本文的公式推导假设地面近似为平面，但是由于系统存在垂直高度方向的基线，处理高度起伏的地形时，地形高度将明显影响各通道图像之间的干涉相位，导致杂波抑制性能变差。假设坐标为 $(X, y_A, 0)$ 的静止点 A 的干涉相位已补偿为零，则处在同一距离单元坐标为 (X, y_B, z_B) 的静止点 B 的干涉相位为

$$\Phi_B = \exp\left\{j \frac{4\pi}{\lambda} \frac{(y_B - y_A)Y_i + z_B Z_i}{R_B}\right\} \quad (19)$$

其中 $R_B = \sqrt{X^2 + y_B^2 + (z_B - H)^2}$ 。假设高度基线为 0.1 m，水平基线为 0.25 m，杂波抑制后 B 点的归一化杂波剩余随地形高度的变化曲线如图 3 所示。

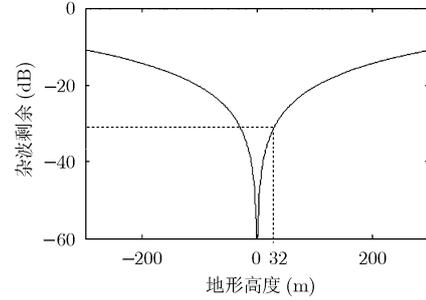


图3 B点杂波剩余随地形高度的变化曲线

可见，当高度为 32 m 的时候杂波剩余为 -30 dB，所以本文的方法对于高度起伏在 30 m 以下的杂波可以有效抑制。当杂波剩余太大影响动目标检测时，可以使用参考文献[7]提出的方法抑制高度起伏的杂波：首先去除各通道图像的局部平地相位，然后通过适当的曲面拟合补偿掉起伏地形高程相位，最后自适应相消抑制杂波。

5 动目标测速与定位

取两对消通道 $I_1(t_m)$ 与 $I_2(t_m)$ 的干涉相位，有

$$\begin{aligned} \varphi &= \text{angle}\left(I_{12}(t_m) \text{conj}\left(I_{32}(t_m)\right)\right) \\ &= \frac{\Delta\phi_1 - \Delta\phi_3}{2} + \frac{2\pi}{\lambda} \frac{(\Delta r_3 - \Delta r_1) v_r \tan \theta_0}{v \cos \theta_0} \end{aligned} \quad (20)$$

由式(20)可知，干涉相位跟 $\Delta\phi_i$ 和 v_r 都有关，这与正侧面阵 DPCA 系统^[8-12]的情况不同，如果忽略 $\Delta\phi_i$ 直接用常规干涉方法进行测速，得到的结果误差很大，无法准确定位。虽然可以由式(15)的位置信息，式(16)和式(20)的干涉相位表达式联立方程组求解 v_r 并进行定位，但是求解困难且计算量较大。针对以上问题，本文提出一种运算量小而精度较高的测速方法。本方法步骤如下：

(1) 令 $y_n = Y$ ， $R_n = R_{\text{ref}}$ ，代入式(16)和式(20)中得到接近 v_r 真实值的估计值 \tilde{v}_r ；

(2) 将 \tilde{v}_r 代入式(15)，求得 (R_n, x_n) ，继而由几何关系可求得 y_n 。由于 $\Delta\phi_i$ 对于位置上的误差并不敏感，所以可以根据 \tilde{v}_r 粗估计得到的位置信息代入式(16)估计出 $\Delta\phi_i$ ；

(3) 这时由式(20)根据干涉相位 φ 和 $\Delta\phi_i$ 即可估计出动目标径向速度：

$$v_r = \frac{(\varphi - \Delta\phi_1/2 + \Delta\phi_3/2)\lambda v \cos \theta_0}{2\pi(\Delta r_3 - \Delta r_1) \tan \theta_0} \quad (21)$$

一般情况下，此时得到的 v_r 相对于 \tilde{v}_r 是更为精确的

估计值，我们可以将估计出的 v_r 重复步骤(2)，步骤(3)得到新的 v_r 估计值，这样运用循环迭代的方法，在一定的迭代次数内可以提高测速和定位的准确性。

根据求得的目标径向速度 v_r 和图像上动目标在图像上的距离位置 \hat{R}_n 和方位位置 \hat{X}_n ，可得到动目标在图像上的真实位置

$$R_n = \frac{2v \cos^2 \theta_0 (v \hat{R}_n - x_n v_r)}{2v^2 \cos^2 \theta_0 - v_r^2}, \quad X_n = \hat{X}_n + \frac{\hat{R}_n v_r}{v \cos^2 \theta_0} \quad (22)$$

前面提到 $\Delta\phi_i$ 会对影响动目标的定位和测速，这里考察 $\Delta\phi_i$ 的估计误差对 v_r 的计算精度的影响。令 $\Delta\phi_{\text{err}} = -\Delta\phi_{1\text{err}} + \Delta\phi_{3\text{err}}$ ，其中 $\Delta\phi_{1\text{err}}$ 和 $\Delta\phi_{3\text{err}}$ 分别为 $\Delta\phi_1$ 和 $\Delta\phi_3$ 的估计误差。由式(21)得 v_r 的估计误差为

$$v_{r,\text{err}} = \frac{\Delta\phi_{\text{err}} \lambda v \cos \theta_0}{4\pi(\Delta r_3 - \Delta r_1) \tan \theta_0} \quad (23)$$

而 $v_{r,\text{err}}$ 会引起方位向定位误差 $X_{\text{err}} = R_n v_{r,\text{err}} / (v \cos^2 \theta_0)$ 。假设系统参数与本文第 6 节的仿真参数一致，且动目标初始位置为场景中心，则 $\Delta\phi_{\text{err}}$ 为 0.01 rad 时，其引起的 v_r 的误差 $v_{r,\text{err}}$ 为 0.0091 m/s，引起的方位向定位误差 X_{err} 约为 5.46 m。

综上所述，可以得到基于前向阵雷达的三通道斜视 SAR-GMTI 的流程，如图 4 所示。

6 仿真分析

为了验证本文提出的改进的 DPCA 算法和测速

与定位方法的有效性，现对静止点目标场景内 3 个不同速度的运动目标进行检测和定位。系统仿真参数为：发射 X 波段信号，信号带宽 $B = 40$ MHz，采样频率 $F = 50$ MHz，飞行高度 $H = 8$ km，作用距离 $R_{\text{ref}} = 50$ km，斜视角 $\theta_0 = 45^\circ$ 。载机飞行速度 $v = 200$ m/s，脉冲重复周期 PRF = 800 Hz，相邻通道天线水平间距为 0.5 m，垂直间距为 0.2 m。距离采样 512 点，方位采样取全孔径 6546 点。静止杂波为均匀排列的点阵。运动目标 $T_1 \sim T_3$ 的径向速度 v_r 、等效方位速度 v_a 分别为 (1.1210 m/s, 0 m/s)，(-2.0886 m/s, 0 m/s) 和 (1.7180 m/s, 2.8131 m/s)。杂波和动目标的 RCS 分别为归一化幅值 1 和 0.2。假设杂波和动目标所在高度都为零，且不考虑系统噪声。

通道 2 的数据成像结果如图 5(a)，运动目标被静止强杂波掩盖，按图 4 步骤进行杂波对消后结果如图 5(d)，可见杂波被抑制，呈现出 3 个清晰的动目标。为了方便观察杂波抑制的效果，取动目标 T_1 和动目标 T_3 所在距离门的数据，进行杂波相消前后的对比。对消前如图 5(b), 5(c)，动目标淹没在强杂波中，杂波对消后得到图 5(e), 5(f)。由于动目标 T_1 没有等效方位方向的速度，方位向是聚焦的能量集中，杂波抑制效果为 30 dB 左右，而动目标 T_3 具有等效方位速度，方位向散焦，能量较分散，但杂波抑制效果仍在 20 dB 以上，同样可以被检测到。

为了检验本文方法对高度起伏的杂波的抑制效果，设置杂波高度为 30 m，则动目标 T_1 ，动目标

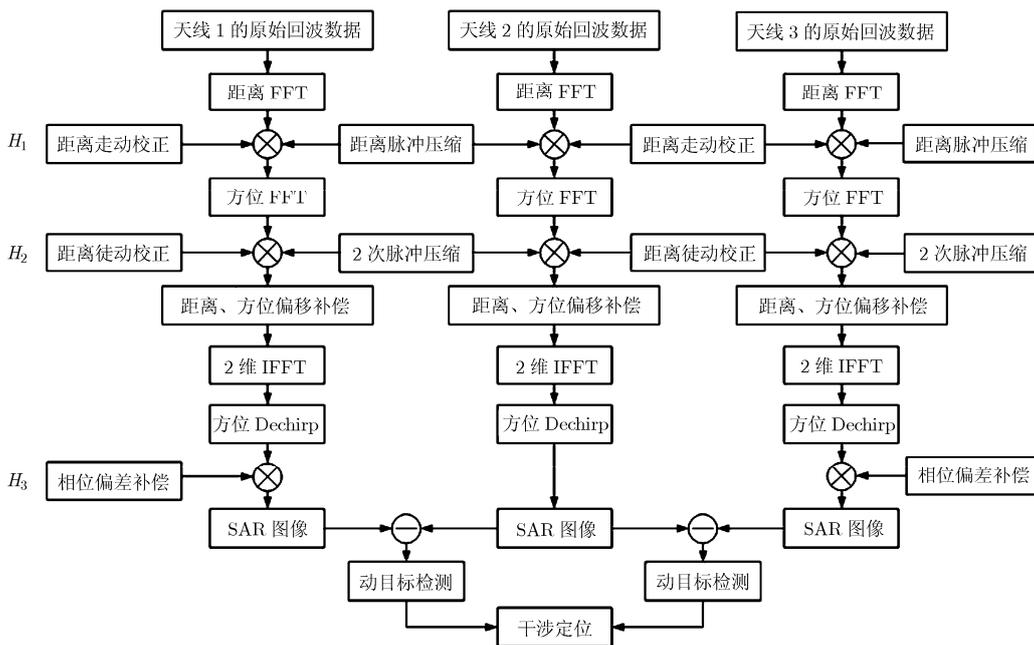


图 4 基于前向阵雷达的三通道斜视 SAR-GMTI 流程图

T_3 检测效果如图 6(a), 6(b), 可见虽然由于杂波高度的存在导致杂波抑制效果变差, 但是动目标能量比周围杂波高 15 dB 以上, 仍然能够被检测到。由以上分析可见, 本文提出的改进的 DPCA 方法能够有效地实现杂波抑制。

检测到动目标之后, 使用本文提出的测速方法, 测得动目标 $T_1 \sim T_3$ 的径向速度分别为 1.1225 m/s, -2.0842 m/s 和 1.7136 m/s, 利用测得的径向速度进行定位, 对比设定的动目标初始位置可知 3 个动目标的定位误差均小于 3 m。可见利用本文方法可以得到很好的定位效果。

以上的仿真是在理想情况下进行的, 而实际情况中系统噪声会对动目标的定位产生影响。这里通过蒙特卡罗试验^[13], 在不同信噪比条件下, 考察噪声对定位精度的影响程度。定义信噪比为动目标聚焦后峰值点功率与噪声功率之比。在每种信噪比条件下, 对动目标 T_2 重复进行 200 次测速与定位试验, 计算定位误差的平均值, 试验结果如图 7。可见,

信噪比小于 15 dB 时, 平均定位误差大于 10 m, 噪声对平均定位精度的影响程度较大; 信噪比大于 22 dB 时, 平均定位误差小于 2.5 m, 噪声对平均定位精度的影响程度较小。

7 结束语

现有的基于前向阵雷达的 SAR-GMTI 方法主要是 STAP 方法, 而 STAP 方法在实际工程中难以实现。针对这一情况, 本文提出了一种基于机载前向阵雷达的斜视 SAR-GMTI 新方法。利用等效分析建立了基于前向阵雷达的斜视 SAR-GMTI 体制的系统模型与传统 DPCA 模型的联系, 研究了改进的 DPCA 算法, 实现了对地面慢速运动目标的检测, 并针对动目标信号中通道间剩余相位偏差给测速和定位带来的困难, 提出了一种计算量小而精度较高的测速和定位方法。最后, 仿真分析证明了该改进的 DPCA 算法及测速和定位方法能够有效实现运动目标的检测、测速和定位。

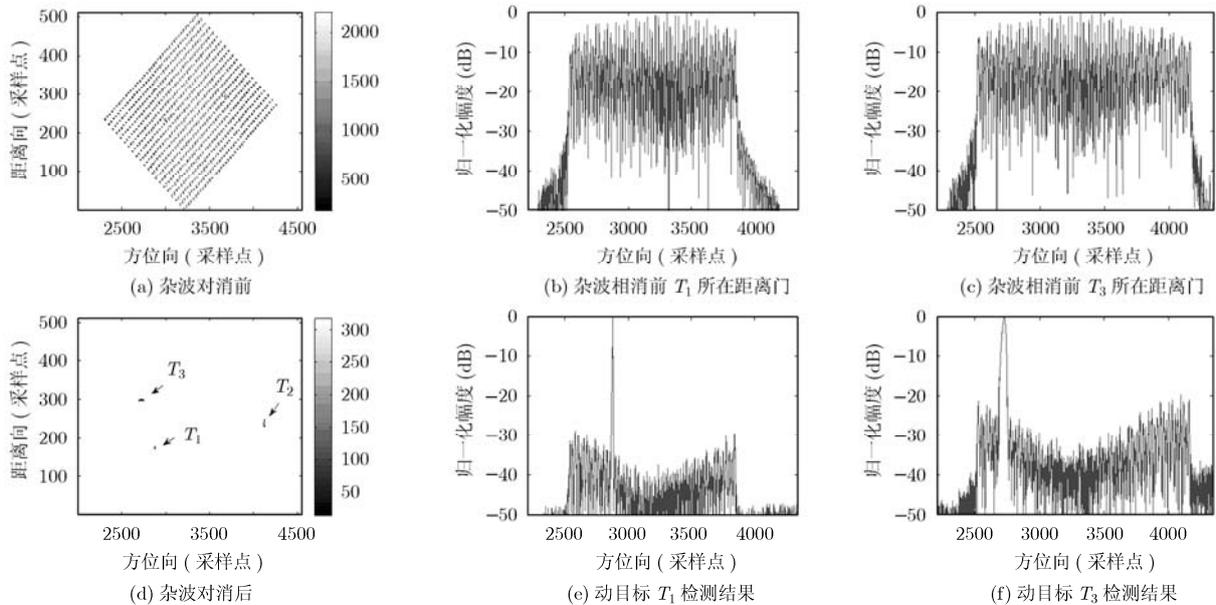


图5 动目标检测结果

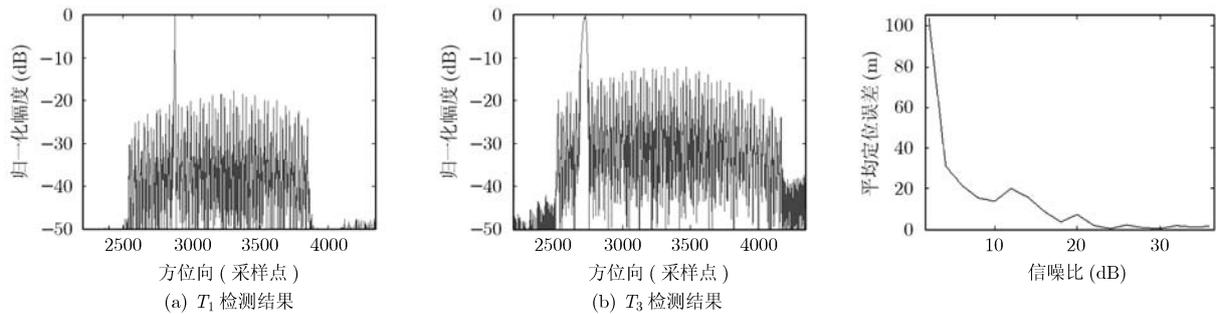


图6 杂波高度为 30 m 时动目标检测结果

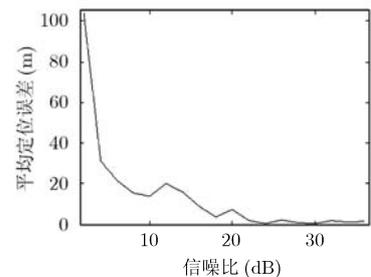


图7 噪声对定位精度的影响

参考文献

- [1] 王永良, 陈建文, 吴志文. 现代DPCA技术研究[J]. 电子学报, 2000, 28(6): 118-121.
Wang Yong-liang, Chen Jian-wen, and Wu Zhi-wen. Research on modern DPCA techniques[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(6): 118-121.
- [2] 郑明洁. 合成孔径雷达动目标检测和成像研究[D]. [博士学位论文], 中国科学院电子学研究所, 2003, 6.
Zheng Ming-jie. Study on SAR-GMTI and imaging[D]. [Ph.D. dissertation], Institute of Electronics of Chinese Academy of Sciences, 2003, 6.
- [3] Ender J H G. Space-time processing for multichannel synthetic aperture radar[J]. *IEEE Electronics & Communication Engineering Journal*, 1999, 11(1): 29-38.
- [4] Richardson P G and Hayward S D. Adaptive space time processing for forward looking radar[C]. IEEE International Radar Conference, Alexandria, USA, 1995: 629-634.
- [5] Chen C W. Performance assessment of along-track interferometry for detecting ground moving targets[C]. IEEE Radar Conference, Philadelphia, USA, 2004: 99-104.
- [6] Stockburger E F and Held D N. Interferometric moving ground target imaging[C]. IEEE International Radar Conference, Alexandria, USA, 1995: 438-443.
- [7] Yang Lei, Wang Tong, and Bao Zheng. Ground moving target indication using an InSAR system with a hybrid baseline[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(3): 373-377.
- [8] 李亚超, 李晓明, 邢孟道, 等. 天线斜置情况下三通道 SAR-GMTI 技术研究[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(3): 578-582.
Li Ya-chao, Li Xiao-ming, Xing Meng-dao, *et al.*. Study on the three channels SAR-GMTI system with the slant-placed antennae[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(3): 578-582.
- [9] Zhu Sheng-qi, Liao Gui-sheng, and Qu Yi. Ground moving targets imaging algorithm for synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(1): 462-477.
- [10] 余慧, 王岩飞, 耿旭朴, 等. 分布式卫星干涉 SAR 测速误差分析[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(6): 1497-1500.
Yu Hui, Wang Yan-fei, Geng Xu-pu, *et al.*. Error analysis for distributed-satellite InSAR measurements of ground moving targets' velocity[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(6): 1497-1500.
- [11] Li G, Xu J, Peng Y, *et al.*. Bistatic linear antenna array SAR for moving target detection, location and imaging with two passive airborne radars[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(3): 554-565.
- [12] Zhu S Q, Liao G S, Qu Y, *et al.*. A new slant-range velocity ambiguity resolving approach of fast moving targets for SAR system[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(1): 432-451.
- [13] Liu Bao-chang, Wang Tong, and Bao Zheng. Slant-range velocity estimation based on small-FM-rate chirp[J]. *Signal Processing*, 2008, 88(10): 2472-2482.
- 张佳佳: 男, 1986 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 成像、动目标检测.
- 周 芳: 女, 1987 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 成像、空时频成像.
- 孙光才: 男, 1984 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 成像、动目标检测等.
- 邢孟道: 男, 1975 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为 SAR 成像和目标识别等.
- 保 铮: 男, 1927 年生, 教授, 中国科学院院士, 研究方向为 SAR 成像和空时自适应等.