

强背景杂波下的地面运动目标干涉式三维成像

张 群^{①②} 金亚秋^②

^①(空军工程大学电讯工程学院 西安 710077)

^②(复旦大学波散射与遥感信息国家教育部重点实验室 上海 200433)

摘 要: 基于逆合成孔径雷达(ISAR)成像与干涉式测角原理的结合, 该文提出一种地面运动目标的干涉式雷达三维成像方法。利用获得的角运动参数对回波信号在原始数据域进行补偿, 完成对应干涉天线上的复图像对准。按照目标散射中心点的空间位置, 重构运动目标的三维图像。该文提出的基于线性调频信号拉伸处理的杂波剔除方法, 在用干涉技术进行三维成像之前剔除强背景杂波, 方法简单易用于工程实现。仿真结果证明了该方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达(SAR); 运动参数估计; 地面运动目标成像; 地杂波

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)01-0001-05

Three-Dimensional Interferometric Imaging of a Moving Ground Target in Strong Background Clutters

Zhang Qun^{①②} Jin Ya-qiu^②

^①(Institute of Telecommunication Engineering, AFEU, Xi'an 710077, China)

^②(Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Based on the principles of ISAR and interferometric observation, a three-dimensional (3D) imaging method of Interferometric ISAR (InISAR) is developed. Making use of compensation of the resultant angular motion parameters for the echoes in the raw data level, two complex images from interferometric antennas are, sequentially, co-registered. A 3D image of a moving target is reconstructed from the spatial coordinates of these scatter centers of the target. Also, a stretch processing of LFM signal to remove the background clutter is discussed. This method is simple and easily implemented in engineering. Simulations show that this 3D imaging method works well even for a moving target in strong clutters.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Motion parameters estimation; Ground moving target imaging; Ground clutter

1 引言

干涉式逆合成孔径雷达(InISAR)成像方式是利用多天干涉方法对运动目标成像, 二维(2D)逆合成孔径雷达(ISAR)像是获得干涉式三维(InISAR 3D)像的基础。众所周知, ISAR 图像是目标在距离维与多普勒维的 2D 图像, 未能完全反映 3D 目标的真实空间尺寸。与 ISAR 图像相比, InISAR 3D 图像提供了目标真实的空间 3D 信息, 有利于目标识别, 近年来, 这种成像方式逐渐受到国内外的关注^[1-5]。一般地, 干涉式 SAR(InSAR)成像主要用于固定地面的绘图。如果将 InSAR 的干涉图方法引入 ISAR, 就可能对地面运动目标进行 3D 成像。但是, 地面运动目标回波信号往往被地背景的强杂波掩盖, 在目标成像前要先进行杂波抑制处理^[5,6]。本文提出的 3D 成像方法中, 先剔除地面固定背景^[7]。在将固定地物和运动目标分离后, 利用通常的 InSAR 和

InISAR 技术分别对目标与地背景进行 3D 成像处理。另外需要说明的是: 由于本文提出的杂波剔除方法是基于线性调频信号的“拉伸”处理方法, 该方法的应用不仅要考虑对消处理信号之间的相干性, 还要保持多天干涉系统中各天线接收信号的相干性。这与普通的 ISAR 成像中的对消方法是有区别的。

2 雷达系统设置与三维空间位置测量

机载雷达系统如图 1 所示, 天线 O 的雷达电轴是 X 轴, 载机以恒速 V_a 沿 Y 轴运动。3 根天线在坐标系 $O-XYZ$ 中的坐标分别为 $(0, 0, 0)$, $(0, l_y, 0)$, $(0, 0, l_z)$ 。合成孔径 u 由雷达载机的运动产生, 孔径长度为 $2L$ 。第一个天线位于坐标原点 O , 在离散位置 $(0, u, 0)$ ($u \in [0, 2L]$) 处发射并接收雷达信号, 其它两个天线 O_y 与 O_z 仅接收雷达信号。合成孔径在慢时间域可被表示为 $\tau = u/V_a$ 。在初始相干处理时, 初始时刻目标位于坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 的原点, 并在雷达的覆盖区里运动(不妨假设为一已知半径的园盘形状——如同 Spotlight SAR 成像模式)。假设雷达与目标中心 (X_c, Y_c, Z_c) 之间的距离为 R_c , 目标的运动速度为 V_t 。

2005-05-06 收到, 2006-04-03 改回

国家重点基础研究项目(2001CB309405)和国家自然科学基金项目(60672032)资助课题

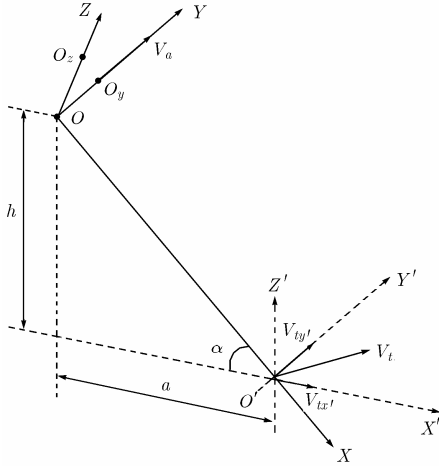


图 1 三维成像几何示意图

设雷达发射的信号为 $p(t)$ ，且运动目标是由位于 (x_n, y_n, z_n) ($n = 1, 2, \dots, N$) 的有限个散射中心点构成，则 3 个天线在合成孔径 u 处从运动目标接收的慢时间压缩信号可以分别表示为^[5]

$$S_{oc}(\omega, u) = \left(\sum_n S_{no}(\omega, u) \right) \cdot S_c^*(\omega, u) \\ = \sum_n \exp(-jk \cdot (R_{no}(u) - R_c(u))) \quad (1a)$$

$$S_{yc}(\omega, u) = \sum_n \exp(-jk \cdot (R_{ny}(u) + R_{ny}(u) - 2R_c(u))) \quad (1b)$$

$$S_{zc}(\omega, u) = \sum_n \exp(-jk \cdot (R_{nz}(u) + R_{nz}(u) - 2R_c(u))) \quad (1c)$$

其中 $k = \omega/c$ 为波数， R_{no} ， R_{ny} 以及 R_{nz} 分别是第 n 个散射中心点到 3 个天线的距离。为方便起见，我们省略了信号幅度 $P(\omega)$ ，并设 $l_y = l_z = l$ 。按照泰勒级数展开距离表达式 $R_{no}(u)$ ， $R_{ny}(u)$ ， $R_{nz}(u)$ 以及 $R_c(u)$ 并忽略高阶项，在窄刈宽和窄波束的假设条件下得到如下距离差：

$$R_{no}(u) - R_c(u) = \frac{1}{R_c} \cdot [(v_y - 1)(y_n - Y_c) + v_z(z_n - Z_c)] \cdot u \quad (2a)$$

$$R_{ny}(u) - R_c(u) = \frac{1}{R_c} \cdot ((v_y - 1)(y_n - Y_c) + v_z(z_n - Z_c)) \cdot u \\ + \frac{1}{2} \cdot \frac{l^2}{R_c} - \frac{(y_n + (v_y - 1)u) \cdot l}{R_c} \quad (2b)$$

$$R_{nz}(u) - R_c(u) = \frac{1}{R_c} \cdot ((v_y - 1)(y_n - Y_c) + v_z(z_n - Z_c)) \cdot u \\ + \frac{1}{2} \cdot \frac{l^2}{R_c} - \frac{(z_n + v_z u) \cdot l}{R_c} \quad (2c)$$

并记

$$\theta_y(u) = \frac{(v_y - 1) \cdot u}{R_c}, \quad \theta_z(u) = \frac{v_z \cdot u}{R_c} \quad (3)$$

其中 $\theta_y(u)$ ， $\theta_z(u)$ 分别是 X 轴与目标参考点连接在空间位置 $(0, u, 0)$ 处的雷达 O 的连线之间在 XOY 平面和 XOZ 平面上的夹角。则慢时间压缩信号式(1a)–式(1c)的相位因子可分别表示为

$$\phi_{on}(u) = -2k \cdot (\theta_y(u) \cdot (y_n - Y_c) + \theta_z(u) \cdot (z_n - Z_c)) \quad (4a)$$

$$\phi_{yn}(u) = \phi_{on}(u) + \frac{k(v_y - 1) \cdot l}{R_c} \cdot u \\ = -2k \cdot \left(\theta_y(u) \cdot \left(y_n - Y_c - \frac{1}{2} \cdot l \right) + \theta_z(u) \cdot (z_n - Z_c) \right) \quad (4b)$$

$$\phi_{zn}(u) = \phi_{on}(u) + \frac{kv_z \cdot l}{R_c} \cdot u \\ = -2k \cdot \left(\theta_y(u) \cdot (y_n - Y_c) + \theta_z(u) \cdot \left(z_n - Z_c - \frac{1}{2} \cdot l \right) \right) \quad (4c)$$

在式(4b)和式(4c)中，公共项 $-kl^2/(2R_c)$ 已经被去掉了。这是因为 l 与 R_c 的值是已知的，对它们的补偿可以通过对信号 $S_{yc}(\omega, k_u)$ 和 $S_{zc}(\omega, k_u)$ 乘以 $\exp(jk \cdot l^2/(2R_c))$ 得到。显然地，只要计算出相位因子 $\phi_{on}(u)$ ， $\phi_{yn}(u)$ 和 $\phi_{zn}(u)$ ，目标散射中心点在对应的 SAR/ISAR 图像上就可以被各自分开。这里， ϕ_{on} ， ϕ_{yn} 和 ϕ_{zn} 既是合成孔径 u 的函数，也是慢时间 τ 的函数。为简单起见，本文假设目标以一个恒定的角速度(参见式(3))慢速运动(相对于雷达载机速度)。在目标具有非线性角速度的情况下，也就是说目标是机动运动时，下方方程能够被表示成 $\theta_y(u)$ 和 $\theta_z(u)$ 的二阶、甚至更高阶导数形式，利用一些诸如联合时频分布、Chirplet 分解这样的算法来进行估计^[8,9]。设

$$\left. \begin{aligned} \theta_y(u) &= \theta_y(0) + \theta_y'(0) \cdot u = \theta_y' \cdot u \\ \theta_z(u) &= \theta_z(0) + \theta_z' \cdot u = \theta_z' \cdot u \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

分别为目标在 Y 方向以及 Z 方向上的角速度，其中 θ_y' ， θ_z' 是 $\theta_y(u)$ 和 $\theta_z(u)$ 各自的一阶导数。对 $S_{oc}(\omega, u)$ ， $S_{yc}(\omega, u)$ 和 $S_{zc}(\omega, u)$ 按照合成孔径 u 进行傅里叶变换，得到

$$S_{oc}(\omega, k_u) = 2L \cdot \sum_n \text{sinc} \left\{ \left[k_u + 2k \cdot \left(\theta_y' \cdot (y_n - Y_c) + \theta_z' \cdot (z_n - Z_c) \right) \right] \cdot L \right\} \quad (6a)$$

$$S_{yc}(\omega, k_u) = 2L \cdot \sum_n \text{sinc} \left\{ \left[k_u + 2k \cdot \left(\theta_y' \cdot \left(y_n - Y_c - \frac{1}{2} \cdot l \right) + \theta_z' \cdot (z_n - Z_c) \right) \right] \cdot L \right\} \cdot \exp \left\{ jk \cdot \frac{y_n \cdot l}{R_c} \right\} \quad (6b)$$

$$S_{zc}(\omega, k_u) = 2L \cdot \sum_n \text{sinc} \left\{ \left[k_u + 2k \cdot \left(\theta_y' \cdot (y_n - Y_c) + \theta_z' \cdot \left(z_n - Z_c - \frac{1}{2} \cdot l \right) \right) \right] \cdot L \right\} \cdot \exp \left\{ jk \cdot \frac{z_n \cdot l}{R_c} \right\} \quad (6c)$$

其中 $2L$ 是合成孔径长度， k_u 表示关于合成孔径 u 的空间频率。然后进行如下的干涉式处理：

$$S_{yc}(\omega, k_{uy}) \cdot S_{oc}^*(\omega, k_{uo}) = \sum_n \exp \left\{ jk \cdot \frac{y_n \cdot l}{R_c} \right\} \\ = \sum_n \exp(j\varphi_{ym}) \quad (7a)$$

$$S_{zc}(\omega, k_{uz}) \cdot S_{oc}^*(\omega, k_{uo}) = \sum_n \exp \left\{ jk \cdot \frac{z_n \cdot l}{R_c} \right\} \\ = \sum_n \exp(j\varphi_{zm}) \quad (7b)$$

其中“*”表示共轭运算, 并且

$$k_{uo} = -2k \cdot [\theta'_y \cdot (y_n - Y_c) + \theta'_z \cdot (z_n - Z_c)] \quad (8a)$$

$$k_{uy} = -2k \cdot \left[\theta'_y \cdot \left(y_n - Y_c - \frac{1}{2} \cdot l \right) + \theta'_z \cdot (z_n - Z_c) \right] \quad (8b)$$

$$k_{uz} = -2k \cdot \left[\theta'_y \cdot (y_n - Y_c) + \theta'_z \cdot \left(z_n - Z_c - \frac{1}{2} \cdot l \right) \right] \quad (8c)$$

$$\varphi_{ym} = ky_n l / R_c, \quad \varphi_{zm} = kz_n l / R_c \quad (8d)$$

明显地, k_{uo} 与 k_{uy} , k_{uz} 不相等, 也就是说: 复图像 $S_{oc}(\omega, k_u)$ 在 k_u 域的峰值位置与 $S_{yc}(\omega, k_u)$ 和 $S_{zc}(\omega, k_u)$ 的峰值位置不同。这意味着 3 个 SAR(或 ISAR)复图像相互之间没有对准。我们将在下一节仔细讨论这个问题。根据式(8d), 任一散射点在 Y 和 Z 方向上的空间位置可以通过下面方程确定:

$$y_n = \varphi_{ym} R_c / kl, \quad z_n = \varphi_{zm} R_c / kl \quad (9)$$

而散射点在 X 方向的位置 x_n 可以根据它属于哪个距离单元来确定。

3 图像对准与三维运动参数估计

SAR 图像的失配准将会带来相位噪声^[2,10,11]、损失两个复图像之间的相干性, 从而导致较差的干涉处理结果。因此在干涉处理之前, 要先实现复图像之间的对准。与通常的图像对准方法不同, 本文实施图像对准处理是在原始数据域内完成的。

我们在式(8a-8c)中已说明了复图像 $S_{oc}(\omega, k_u)$ 在 k_u 域中的峰值位置与另外两个从 Y , Z 方向上(方位向和俯仰向)的天线得到的复图像不同。这意味着由于目标与雷达之间的相对运动而使两个 SAR/ISAR 图像之间存在一定的偏移量。这些偏移量可以从下面的公式中得到

$$\left. \begin{aligned} \Delta k_{uy} &= k_{uo} - k_{uy} = -kl \cdot \theta'_y \\ \Delta k_{uz} &= k_{uo} - k_{uz} = -kl \cdot \theta'_z \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

明显地, 这些偏移量与基线长度以及角速度成正比。换句话说, 天线位置的不同是引起失配准的直接原因。上面偏移量中的距离差因子 $\theta_y(u) \cdot l$ 和 $\theta_z(u) \cdot l$ 是随合成孔径 u 变化的。因此, 我们可以在原始数据域 $s_y(t, u)$ 和 $s_z(t, u)$ 对两个回波分别乘以随变量 u 变换的因子 $\exp(-jk\theta_y(u) \cdot l)$ 和 $\exp(-jk\theta_z(u) \cdot l)$ 来剔除这个相位差:

$$\bar{s}_y(t, u) = s_y(t, u) \cdot \exp(-jk\theta_y(u) \cdot l) \quad (11a)$$

$$\bar{s}_z(t, u) = s_z(t, u) \cdot \exp(-jk\theta_z(u) \cdot l) \quad (11b)$$

经过这个处理后, 获得的对应 ISAR 图像将会被对准, 并且具有相同的聚焦点。一旦 InISAR 系统完成配置, 基线的长度 l 将是已知的, 并且是一常数。于是, 这里需要解决的主要问题是角度 $\theta_y(u)$ 和 $\theta_z(u)$ 的测量。我们给出一个估计角运动参数的方法, 它是文献[2]中的方法的一个修改形式, 但更为简单有效。

设 H_o , H_y 和 H_z 分别表示从天线 O , O_y 与 O_z 上所获得的距离像的数据集, 则有

$$H_o = \{r_o(m, n), 0 \leq m \leq M, 0 \leq n \leq N\} \quad (12a)$$

$$H_y = \{r_y(m, n), 0 \leq m \leq M, 0 \leq n \leq N\} \quad (12b)$$

$$H_z = \{r_z(m, n), 0 \leq m \leq M, 0 \leq n \leq N\} \quad (12c)$$

其中 M 是采样数, N 是回波数。注意到这些距离像已被准确地对准。

角运动参数估计的步骤如下:

(1) 对每一个 $n_0 \in [0, N]$, 利用距离像集合 H_o 来确定距离像在快时间域的范围。我们用 I_o 来表示

$$I_o = [m_1, m_2] \subseteq [0, M] \quad (13)$$

其中 $m_2 = m_1 + p$, $m_1 \geq 0$ 并且 p 是正整数, 即对每一个 $m \in I_o$, 我们有

$$|r_o(m, n_0)| \geq K \quad (14)$$

其中 K 是一个常数阈值。

(2) 对每一个 $m \in I_o$, 计算 Y , Z 方向上在固定的 n_0 处的角度:

$$\left. \begin{aligned} \theta_y(m, n_0) &= \text{tg}^{-1} \left(\frac{\text{Im}(r_{oy}(m, n_0))}{\text{Re}(r_{oy}(m, n_0))} \right) \cdot \frac{\lambda}{2\pi \cdot l_y} \\ \theta_z(m, n_0) &= \text{tg}^{-1} \left(\frac{\text{Im}(r_{oz}(m, n_0))}{\text{Re}(r_{oz}(m, n_0))} \right) \cdot \frac{\lambda}{2\pi \cdot l_z} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

其中 $\text{Im}(\cdot)$ 和 $\text{Re}(\cdot)$ 分别表示取实部和虚部, 并且

$$\left. \begin{aligned} r_{oy}(m, n_0) &= r_y(m, n_0) \cdot r_o^*(m, n_0) \\ r_{oz}(m, n_0) &= r_z(m, n_0) \cdot r_o^*(m, n_0) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

(3) 计算下面一阶矩以获得散射中心曲线:

$$\left. \begin{aligned} G_y(n) &= \frac{\sum_{m=m_1}^{m_2} \theta_y(m, n) \cdot |r_o(m, n)|}{\sum_{m=m_1}^{m_2} |r_o(m, n)|} \\ G_z(n) &= \frac{\sum_{m=m_1}^{m_2} \theta_z(m, n) \cdot |r_o(m, n)|}{\sum_{m=m_1}^{m_2} |r_o(m, n)|} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

(4) 根据(3)所得到的散射中心曲线来拟合角运动曲线, 得到

$$\left. \begin{aligned} \theta_y(u) &= \theta_y(0) + \theta'_y(0) \cdot u + \theta''_y(0) \cdot u^2 \\ \theta_z(u) &= \theta_z(0) + \theta'_z(0) \cdot u + \theta''_z(0) \cdot u^2 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

经过以上 4 个步骤, 可以根据式(11)对相位误差因子 $\theta_y(u) \cdot l$ 和 $\theta_z(u) \cdot l$ 进行补偿。如果测角结果不能满足成像要求, 可以重复上面的步骤以获得更为精确的角运动参数。

4 地杂波剔除

本节讨论一种基于“延迟线”技术的线性调频信号“拉伸”处理^[6]地杂波处理方法。在成像处理中, 由于地杂波影响, 直接采用“延迟线”技术对消杂波难以保证处理后的信号相干性^[12], 对后续成像处理(包络对齐)带来困难。因而, 本文在对回波信号的混频处理时采用了同一个参考信号以保证对消前后两次回波的相干性。

假设雷达发射机发射线性调频信号脉冲, 经过全去斜率并归一化处理后的数字采样信号为

$$\begin{aligned} s(n) &= \exp(-j2\pi f_0 \Delta \tau_i) \cdot \exp(j\pi \mu \Delta \tau_i^2) \cdot \exp(j2\pi \mu \Delta \tau_i n \Delta t) \\ &= \exp(j2\pi \Delta F_i n \Delta t) \exp(j\varphi_i) \end{aligned} \quad (19)$$

其中 $\Delta F = \mu \cdot (\tau - \tau_i)$, $\varphi = -2\pi \cdot (f_0 \cdot \Delta \tau_i - (\mu/2) \Delta \tau_i^2)$, $0 \leq n \leq N-1$, f_0 为起始频率, μ 为调频斜率, N 为采样个数, $\tau = 2R/c$ 为目标回波延时, τ_i 是测距所得点目标的延时量, 然后对式(19)进行 FFT 处理后, 就可得到目标散射中心点的距离像函数, 实现了纵向压缩。

设运动点目标为 a , 固定点目标为 b , 点目标 a 与雷达之间的径向速度为 v , 雷达发射机共发射了 $2m$ 次脉冲, 脉冲重复周期为 T_1 。经过精确测距并确定每个脉冲重复周期的拉伸延时量 $\tau_i(i)$ ($i = 1, 2, \dots, 2m$), 对每个回波作全去斜率处理。在对第 $i = 2k$ ($k = 1, 2, \dots, m$) 个回波进行全去斜率处理时, 采用与前一个(即第 $i = 2k-1$ ($k = 1, 2, \dots, m$))回波相同的参考信号, 也就是说, 这两个回波信号采用了一个相同的拉伸延时量 $\tau_i(i) = \tau_i(2k-1)$, 以保证前后两次回波信号保持相干。又设 $\tau_a(i)$, $\tau_b(i)$ ($i = 1, 2, \dots, 2m$) 为散射点 a , b 的回波延时, b 是固定点, 故 $\tau_b(i) = \tau_b$ 为常数。由式(19), 得到经全去斜率后的第 $2k-1$ 、第 $2k$ 次回波分别为

$$\begin{aligned} s(2k-1, n) &= \exp(-2\pi j f_0 (\tau_a(2k-1) - \tau(2k-1))) \\ &\quad \cdot \exp(j\pi \mu (\tau_a(2k-1) - \tau(2k-1))^2) \\ &\quad \cdot \exp(j2\pi \mu (\tau_a(2k-1) - \tau(2k-1)) n \Delta t) \\ &\quad + \exp(-2\pi j f_0 (\tau_b - \tau(2k-1))) \\ &\quad \cdot \exp(j\pi \mu (\tau_b - \tau(2k-1))^2) \\ &\quad \cdot \exp(j2\pi \mu (\tau_b - \tau(2k-1)) n \Delta t) \end{aligned} \quad (20a)$$

$$\begin{aligned} s(2k, n) &= \exp(-2\pi j f_0 (\tau_a(2k) - \tau(2k-1))) \\ &\quad \cdot \exp(j\pi \mu (\tau_a(2k) - \tau(2k-1))^2) \\ &\quad \cdot \exp(j2\pi \mu (\tau_a(2k) - \tau(2k-1)) n \Delta t) \\ &\quad + \exp(-2\pi j f_0 (\tau_b - \tau(2k-1))) \\ &\quad \cdot \exp(j\pi \mu (\tau_b - \tau(2k-1))^2) \\ &\quad \cdot \exp(j2\pi \mu (\tau_b - \tau(2k-1)) n \Delta t) \end{aligned} \quad (20b)$$

从上面两个方程不难看出, 两式右边第 2 项完全相同。经过一次相消处理后, 得到

$$\begin{aligned} s(2k, n) - s(2k-1, n) &= \exp(-2\pi j f_0 (\tau_a(2k) - \tau(2k-1))) \\ &\quad \cdot \exp(j\pi \mu (\tau_a(2k) - \tau(2k-1))^2) \\ &\quad \cdot \exp(j2\pi \mu (\tau_a(2k) - \tau(2k-1)) n \Delta t) \\ &\quad - \exp(-2\pi j f_0 (\tau_a(2k-1) - \tau(2k-1))) \\ &\quad \cdot \exp(j\pi \mu (\tau_a(2k-1) - \tau(2k-1))^2) \\ &\quad \cdot \exp(j2\pi \mu (\tau_a(2k-1) - \tau(2k-1)) n \Delta t) \end{aligned} \quad (21)$$

整理并化简上式, 不难看出, 经过以上处理, 作为地杂波的固定点回波信号已完全消去, 剩下的是运动目标回波相减后相邻重复周期振幅变化的部分输出, 其包络为一多普勒频率的正弦信号:

$$\sin(-2\pi f_0 \Delta \tilde{\tau}(2k) + \pi \mu \Delta \tilde{\tau}(2k)^2 + 2\pi \mu (\Delta \tilde{\tau}(2k) + f_d T_1) n \Delta t) \quad (22)$$

其振幅为

$$|2 \sin(\pi \mu (2\Delta \tilde{\tau}(2k) + f_d T_1))| \quad (23)$$

其中 $\Delta \tilde{\tau}_i(2k) = \tau_a(2k-1) - \tau_i(2k-1)$, $f_d = 2v/c$ 为多普勒频率, c 为光速。

最后要特别说明的是: 由于这里提出的固定目标剔除方法是针对干涉式 3D 成像的, 天线 O_y , O_z 所接收的回波信号在进行混频处理时, 要使用与天线 O 一样的参考信号(同一拉伸延时量)! 这样不仅保证了对消处理前后的信号之间的相干性, 也保证了天线系统中各天线接收信号之间的相干性。

5 仿真结果

假设在 Stripmap SAR 模式下或 Spotlight SAR 模式下发现运动目标, 经过地杂波对消处理后, 按照 InISAR 技术对其进行三维成像。在仿真中本文选用了 Stripmap SAR 模式, 并假设已经完成了径向的运动补偿。图 2 是仿真目标模型, 目标的长、宽、高分别为 10m, 4m 和 4.4m。

仿真参数: 发射信号的波长 $\lambda = 0.03\text{m}$; 带宽 $B_\omega = 300\text{MHz}$; 假设 3 个天线均为平板天线, 长度为 $D = 1\text{m}$; Y , Z 方向的天线基线长度 $l_y = l_z = 0.5\text{m}$; 天线 O 到目标中心的距离 $R_o = 10\text{km}$; 雷达入射角 $\alpha = 90^\circ$; 雷达与目标之间的相对速度为 $V = 200\text{m/s}$, 即 $V_a - V_{ty} = 200\text{m/s}$, $V_{tx} = V_{tz} = 0$; 脉冲宽度 $1\mu\text{s}$, 雷达重复频率为 800Hz , 成像处理时间为 1s 。

图 3(a)是通常情况下分别从天线 O 上获得的目标 ISAR 像, 其中 X 坐标均为距离单元, Y 坐标均为横距单元, 从天线 O_y 和 O_z 上获得的目标 ISAR 像与图 3(a)类似, 很难看出这些图像在横向上的区别。假设存在一致分布的地杂波, 信杂比为 -25dB 。图 3(b)是地杂波处理前的成像。可以看出, 目标这时已被杂波完全掩盖。利用本文的地杂波对消方法进行处理, 所得到的成像结果如图 3(c)所示。不难看出, 零频附近的那些散射点也被剔除了, 这是由于延迟线技术本身的原因造成的(实际上, 这种情况可以利用逆向滤波方法进行一定的补偿, 本文不作讨论)。但是, 由于本文 3D 成像方法只处理复图像中的有限个像素, 个别散射点的丢失不会影响最终 3D 像的重构。另外, 与没有地杂波时的成像结果相比, 利用延迟线对消技术也造成了目标像的幅度(强度)的降低, 但幅度的降低也不会对后续的 3D 像处理造成大的影响。另外需要说明的是: (1)由于仿真中选择了 Stripmap SAR 成像模式, 对消前后两次波束照射的地面区域有差异, 这导致了有些固定点目标无法按照本文方法完全对消掉。随着脉冲重

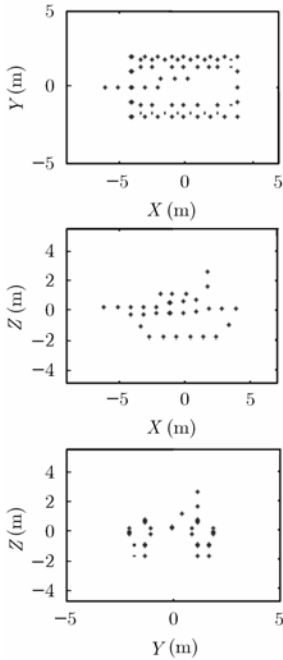


图 2 仿真目标模型三视图

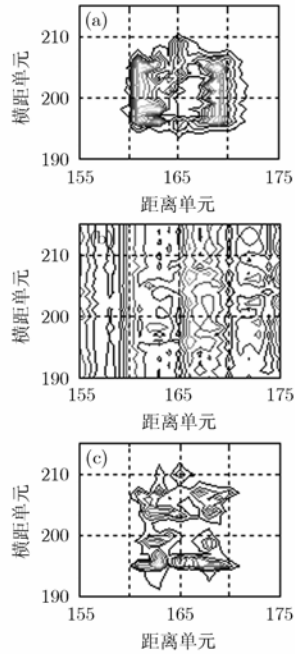


图 3 从天线 O 上获得的目标 ISAR 图像

复频率较低和纵向搜索距离增大时，地面更新面积也会增大，更多的固定点无法对消，后续的 ISAR 成像效果也会随之变差。如果选取 Spotlight SAR 成像模式则不会出现这种情况，(2)本文的处理方法是假设已发现运动目标，利用本文提出的对消方法去除固定地物，然后对运动目标成像 (ISAR/InISAR)，而固定地物图像仍采用通常的 SAR 处理方式得到。即利用同一雷达系统获得地物与目标的图像，所以本文仿真中的采样率仍采用了 300Mpsps。

图 4 是随机挑选的一组来自于天线 O 和天线 O_y 的归一化横向像剖面，图中实线表示天线 O 的横向像剖面、虚线表示天线 O_y 的横向像剖面。明显地，在两个横向像之间存在着很大的差异。图 5 是按照本文提出的方法所得到的精确对准的横向像(方位向与俯仰向的误差分别为 10^{-18} rad 和 10^{-10} rad 量级)。图 6 是最后重构的目标三维像，虽然不是每个散射点的位置都能被准确地确定，但整个重构图像能清楚地反映原始目标图像的形状。

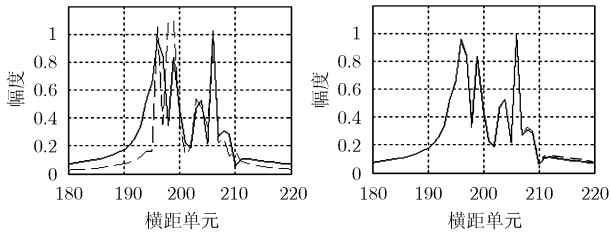


图 4 从天线 O, O_y 上得到的两个横向像剖面的比较

图 5 对应横向像剖面的比较

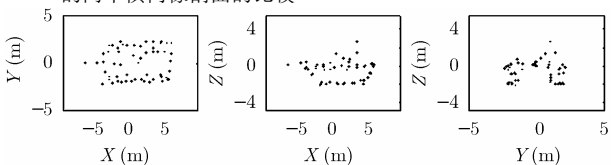


图 6 重构的目标三维像

6 结束语

地面背景中运动目标的 3D 像重构过程中，横向的失配问题可以被转化为方位向及俯仰向的角度测量。本文提出的基于距离像的测角方法可以有效地抑制角闪烁现象，获得的角运动参数的精度很高，最后得到的 3D 像的分辨同样也很高。基于线性调频信号拉伸处理的地杂波剔除方法保证了相消处理前后回波的相干性以便于进行后续的 3D 成像处理。按 Stripmap SAR 成像模式作的仿真结果证明了本文成像方法的有效性，也证明了该方法在强地杂波背景中的成像能力。

参考文献

- [1] Wang G, Xia X, and Chen V C. Three-dimensional ISAR imaging of Maneuvering targets using three receivers. *IEEE Trans. on Imaging Processing*, 2001, 10(3): 436-447.
- [2] Zhang Q, Yeo T S, Du G, and Zhang S H. Estimation of three-dimensional motion parameters in interferometric ISAR imaging. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 2004, 42(2): 292-300.
- [3] Xu X and Narayanan R M. Three-dimensional interferometric ISAR imaging for target scattering diagnosis and modeling. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2001, 10(7): 1094-1102.
- [4] 罗斌风, 张群, 张涛, 张守宏. 干涉式逆合成孔径雷达空间配置及其对三维像的影响. *西安电子科技大学学报*, 2001, 28(sup): 10-13.
- [5] Zhang Q and Yeo T S. Three-dimensional imaging of ground moving target using the InISAR technique. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 2004, 42(9): 1818-1828.
- [6] Zhang Q, Li Y, Zhang T, and Zhang S H. Low-altitude target imaging in strong ground clutter. *Proc. 2001 CIE International Conference on Radar*, Beijing, China, Oct. 2001: 665-669.
- [7] Soumekh M. *Fourier Array Imaging*. Englewood, P T R Prentice Hall, 1994, Chapter 5.
- [8] Chen V C and Qian S. Joint time-frequency transform for radar range Doppler imaging. *IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst.*, 1998, 34(2): 486-499.
- [9] Wang G and Bao Z. Inverse synthetic aperture radar imaging of maneuvering targets based on chirplet decomposition. *Opt. Eng.*, 1999, 38(9): 1534-1541.
- [10] Li F and Goldstein R M. Studies of multi-baseline spaceborne interferometric synthetic radar. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 1990, 28(1): 88-97.
- [11] Scheiber R and Moreira A. Coregistration of interferometric SAR images using spectral diversity. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2179-2191.
- [12] Skolnik M I. *Introduction to Radar Systems*. Singapore, McGraw-hill, 2001, Chapter 2.

张 群： 男，1964 年生，教授，博士生导师，研究方向为信号处理、杂波抑制及其在雷达成像中的应用。
 金亚秋： 男，1946 年生，教授，博士生导师，研究方向为电磁散射与辐射传输、空间遥感信息理论、计算电磁学。