

干涉式逆合成孔径雷达三维成像技术研究¹

张 群 马长征* 张 涛 张守宏

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

*(北京邮电大学信息系 北京 100876)

摘 要 该文提出了干涉式逆合成孔径雷达三维成像的方法, 并对干涉式测角出现的角闪烁现象提出了判断并剔除角闪烁点的准则。然后分析了两种跟踪体制下的三维成像方法, 并提出了克服连续跟踪体制下跟踪误差引起的相位随机抖动问题的方法, 解决了步进跟踪体制下各天线 ISAR 像焦点对齐问题。

关键词 干涉式逆合成孔径雷达, 三维成像, 角闪烁, 连续跟踪, 步进跟踪

中图分类号 TN951

1 引 言

为获得地形高度信息, 合成孔径成像雷达引进了干涉技术, 即干涉式合成孔径雷达 (InSAR)。它通过增加一个与原天线在高度上有差别的天线, 然后对各天线通道所接收到的信号成像并对其结果作相干处理, 从而获得高度信息^[1-7]。多天线的干涉技术已经用在了测量目标偏离轴线的横向位置上^[8]并且很容易推广到逆合成孔径雷达三维成像中, 成为干涉式逆合成孔径雷达 (InISAR), 即通过在水平、垂直方向排列多个天线, 通过发射宽带信号获得距离上的高分辨, 对每一距离单元计算相位差, 可获得目标上不同距离单元上的散射点相对于基线的水平和高度信息, 再加上距离信息, 就可获得目标的三维像。因同一距离单元上往往可能有多个散射点, 会出现角闪烁, 成像质量变差。若对每个天线的接收数据在横向再进行谱分析, 分离同一距离单元上的各散射点, 即进行 ISAR 成像, 然后对 ISAR 像上的每个散射点计算相位差, 可提高三维像的质量。

本文分析角闪烁点的判断及剔除准则, 讨论了天线的两种工作方式。第一种是天线轴线随着目标转动, 波束一直处于跟踪状态, 称为“连续跟踪体制”。第二种是在成一幅像的数据录取期间波束固定, 在成下一幅像时波束再跳跃跟上目标, 称为“步进跟踪体制”。

2 干涉式三维成像基本原理和角闪烁点剔除

2.1 干涉式三维成像基本原理

如图 1 所示, 设 A, B 是水平方向的两根天线, A, B 之间的间距为 D , A, B 的中点记为 O , A, B 的延线为 X 轴, 以 O 为中心和 X 轴垂直的轴为 Y 轴并称其为天线电轴 (基线)。目标位于 P 处, P 点坐标 (x, y) , P 到 A 的距离为 R_1 , P 到 B 的距离为 R_2 , P 到 O 的距离为 R 。设从天线 A 发射的信号为 $s(t) = \exp(j2\pi ft)$, 经过点目标的反射后, 天线 A, B 接收到的信号分别为

$$s_1(t) = \rho \exp(j2\pi f(t - \tau_1)) = \rho \exp(j2\pi f(t - 2R_1/c)) \quad (1)$$

$$s_2(t) = \rho \exp(j2\pi f(t - \tau_2)) = \rho \exp(j2\pi f(t - (R_1 + R_2)/c)) \quad (2)$$

那么混频后

$$s_2(t)s_1^*(t) = \rho\rho^* \exp\left(j2\pi f \frac{R_1 - R_2}{c}\right) = \rho\rho^* \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \frac{2xD}{R_1 + R_2}\right) \quad (3)$$

¹ 1999-12-03 收到, 2000-05-11 定稿

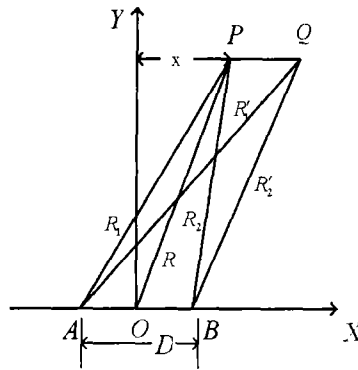


图 1 天线和目标的几何关系

当 $R_1 + R_2 \gg x$ 和 $R_1 + R_2 \gg D$ 时有: $R_1 + R_2 \approx 2R$, 且当 x 变化时 $R_1 + R_2$ 变化很小可以认为是常数, $s_2 s_1^*$ 的相位与 x 成正比。因 $R_1 + R_2$ 是可以测量出来的, 故通过计算 $s_2 s_1^*$ 的相位即可把 x 求出。记 $s_2 s_1^*$ 的相位为 φ , 那么

$$x = \varphi \lambda R / (2\pi D) \quad (4)$$

因相位差以 2π 为周期, 为使测距无模糊, 应保证 $|2\pi x D / (\lambda R)| < \pi$ 。那么最大横距范围为

$$X = [-\lambda R / (2D), \lambda R / (2D)] \quad (5)$$

即目标要位于 X 规定的横向范围内。

同样, 对于目标的高度信息的测量, 可以通过在高度方向放置一个天线 C , 计算天线 C 和天线 A 的回波信号的相位差以测量目标相对于天线电轴的高度。

为了对目标三维成像, 可基于一维距离像也可基于二维 ISAR 像。基于一维距离像的方法因一个脉冲就可成像, 在一个脉冲时间内, 目标上各散射点相对于天线轴线的距离没有改变, 可直接通过对各距离单元计算相位差得到目标三维像。若同一距离单元有多个散射点, 就会有角闪烁现象发生。可通过 ISAR 技术在横向上再分离各散射点, 减小角闪烁。在转台目标小角度成像条件下, 目标上各散射点相对于天线轴线的距离近似不变, 通过对不同天线接收信号的 ISAR 像上的对应散射点计算相位差, 同样可得到目标三维像。

2.2 角闪烁及其判断准则

因 ISAR 像的分辨率有限, 在同一距离单元中具有相同多普勒频移的散射点会投影到同一个分辨单元上去, 利用干涉法测角也会出现“角闪烁”, 即存在测角误差。如图 1 所示。设 Q 是与 P 同一距离单元的散射点, R'_1, R'_2 分别为散射点 Q 到天线 A, B 的距离。转动轴平行于 P, Q 的连线, 那么 P, Q 相对于 A, B 的多普勒频移是一样的, 在 ISAR 像上为一个点。设 P, Q 回波强度分别为 V_1, V_2 , 那么 A, B 天线接收的回波信号分别为

$$S_A = V_1 \exp(-4\pi R_1 / \lambda) + V_2 \exp(-4\pi R'_1 / \lambda) \quad (6)$$

$$S_B = V_1 \exp(-2\pi(R_1 + R_2) / \lambda) + V_2 \exp(-2\pi(R'_1 + R'_2) / \lambda) \quad (7)$$

令

$$\Delta V = |(|S_A| - |S_B|) / (|S_A| + |S_B|)| \quad (8)$$

对于理想的单一散射点即只有 P 或 Q 点, 明显有 $\Delta V = 0$, 此时利用 (4) 式可正确计算出散射点偏离基线的距离。若同一分辨单元内有多散射点, 利用 (4) 式就不能正确计算出散射点

偏离基线的距离,即存在位置误差,影响成像质量,在这种情况下一般有 $\Delta V \neq 0$ 。为此,我们把散射点简单地分成两类,一类是所谓“孤立散射点”,即在一个分辨单元内由一个主散射点另加若干小的散射点,此时 ΔV 虽不为零,但为一极小量,这类散射点在成像时应保留。一类是所谓“合成孤立散射点”,即若干散射点因多普勒频移相近而投影到一个点上去,此时 ΔV 为一个相对较大的量,这类散射点在成像时应剔除。

为了判断一个散射点在成像时是否应该剔除,我们要选取一个判断阈值 δ ,若 $\Delta V > \delta$,则判断此散射点应剔除。而关于 δ 的取值大小,一般情况下不太好给出一个理论分析,下面我们通过计算机仿真给出一个 δ 的估值。

为了使得到的 δ 和雷达到目标的距离、波长及天线间距 D 无关,通过分析(6),(7)式我们看到, S_A, S_B 的差别是由各散射点相对于 A, B 两天线的相位差引起的,在较为理想的“孤立散射点”的情况下,由散射点的回波信号计算得到的 ΔV 只与“一个孤立散射点内各散射点的相位差”有关。横向不模糊距离 $2X$ 对应的相位差为 2π ,我们假设横向分辨单元为 Δx ,那么统计的散射点的 ΔV 只和 $2X/\Delta x$ 的大小有关。我们设一个“孤立散射点”由一个幅度为 1 的强散射点,另外 1~8 个强度在 0 到 0.5 之间随机分布的小散射点组成。对于不模糊横向距离可划分的横向分辨单元为 20 到 60 个,统计 ΔV 的均方根,得到的结果示于图 2。可以看到,在“孤立散射点”情况下,得到的 ΔV 的均方根在 5×10^{-2} 量级以下,在实际中,一般情况“孤立散射点”较多,“合成散射点”较少,因而我们可以选取 $\delta = 15 \times 10^{-2}$ 作为判断阈值。

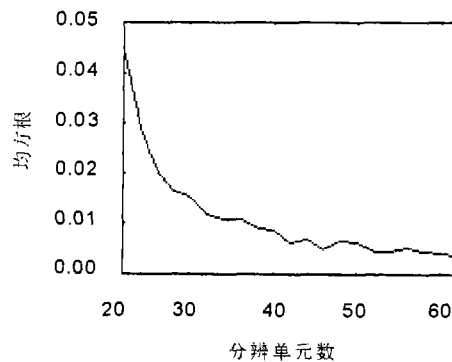


图 2 ΔV 的均方根随不模糊单元内分辨单元数的变化

3 两种跟踪体制下的三维成像

3.1 连续跟踪情况下的 InISAR

设 $\alpha(t)$ 为目标由于切向运动相对于某参考轴线的转角变化,雷达电轴相对于同一参考轴线的转角的变化为 $\beta(t) = \alpha(t) + n(t)$,其中 $n(t)$ 为角跟踪误差。设 $R_P^A(t), R_P^B(t)$ 分别为散射点 P 相对于无跟踪误差时天线 A, B 的径向距离变化,那么 $R_P^A(t) - R_P^B(t) \approx \text{const}$ (近似精度比波长还要小得多)。 P 相对于有跟踪误差时天线 A 的径向距离变化近似为 $R_P^A(t) - n(t)D/2$, A 天线接收的 P 散射点单位强度回波信号为

$$S_P^A(t) = \exp\{[4\pi(R_P^A(t) - n(t)D/2)]/\lambda\} \quad (9)$$

因 B 天线的跟踪误差和 A 天线相反,跟踪误差相互抵消, B 天线接收的 P 散射点回波信号为

$$S_P^B(t) = \exp\{[2\pi(R_P^B(t) + R_P^A(t))]/\lambda\} \quad (10)$$

设运动补偿的目标径向距离变化为 $\tilde{R}(t)$, 相干处理的初始时刻 $t_0 = 0$ 。假设无跟踪误差时运动补偿后目标匀速转动, 则补偿后相位变化为

$$\varphi_P^A(t) = \frac{4\pi(R_P^A(t) - n(t)D/2 - \tilde{R}(t))}{\lambda} = \frac{4\pi(R_P^A(t_0) - \tilde{R}(t_0))}{\lambda} - \frac{2\pi n(t)D}{\lambda} + 2\pi f_P^A \times t \quad (11)$$

$$\varphi_P^B(t) = \frac{2\pi(R_P^A(t) + R_P^B(t) - 2\tilde{R}(t))}{\lambda} = \frac{2\pi(R_P^A(t_0) + R_P^B(t_0) - 2\tilde{R}(t_0))}{\lambda} + 2\pi f_P^A \times t \quad (12)$$

因有限频率点计算, 对 $s_P^B(t)$ 做傅里叶变换后的谱峰位置 \tilde{f}_P^A 不一定在 f_P^A 处, 故

$$S_P^A(\tilde{f}_P^A) = \exp\left[j\frac{4\pi(R_P^A(t_0) - \tilde{R}(t_0))}{\lambda}\right] \times \int \exp\left(-j\frac{2\pi n(t)D}{\lambda} + j2\pi(f_P^A - \tilde{f}_P^A)t\right) dt \quad (13)$$

$$S_P^B(\tilde{f}_P^A) = \exp\left[j\frac{2\pi(R_P^A(t_0) + R_P^B(t_0) - 2\tilde{R}(t_0))}{\lambda}\right] \times \int \exp(j2\pi(f_P^A - \tilde{f}_P^A)t) dt \quad (14)$$

记误差项

$$E = \hat{E} \exp(j\hat{\varphi}) = \int \exp\left[j\left(\frac{2\pi n(t)D}{\lambda} + 2\pi(\tilde{f}_P^A - f_P^A)t\right)\right] dt \\ \times \int \exp[j2\pi(f_P^A - \tilde{f}_P^A)t] dt \quad (15)$$

那么

$$S_P^A(\tilde{f}_P^A)^* S_P^B(\tilde{f}_P^A) = \exp\left(j\frac{2\pi(R_P^B(t_0) - R_P^A(t_0))}{\lambda}\right) \hat{E} \exp(j\hat{\varphi}) \quad (16)$$

由 (16) 式看到, 由 ISAR 像散射点计算相位差引入了一个相位误差 $\hat{\varphi}$ 。 λ/D 为不模糊横距相对雷达的张角, $n(t)D/\lambda$ 为随机角度跟踪误差和不模糊横距相对雷达的张角之比, 称为“角度随机跟踪误差占空比”, 由 (15) 式可以看到, $\hat{\varphi}$ 不仅与 $n(t)D/\lambda$ 有关, 而且与 $\tilde{f}_P^A - f_P^A$ 有关。而在实际上, 因有限频率点计算, 对不同的散射点, $\tilde{f}_P^A - f_P^A$ 可能是不一样的, 进而导致 $\hat{\varphi}$ 的不同, 会造成散射点的位置错误。我们做两种仿真: (1) 首先对所有的 $\tilde{f}_P^A - f_P^A$ 的取值, 统计一下 $\hat{\varphi}$ 平均随 $n(t)D/\lambda$ 的变化, 假设 $n(t)D/\lambda$ 为零均值高斯随机过程, 统计结果如图 3 所示。可以看到, 在小占空比条件下, 相位误差均方根和占空比均方根成线性关系, 线性比小于 1。(2) 对不同的 $n(t)D/\lambda$, $\hat{\varphi}$ 随不同散射点之间 $\tilde{f}_P^A - f_P^A$ 的差 Δf 的变化, 它能体现散射点之间相对位置关系的变化。统计结果如图 4 所示。可以看到, 角度跟踪误差和 Δf 同时影响相位误差, 进而影响三维像的质量。对于 Δf 的影响, 应尽量提高谱分辨的能力, 减小 $\tilde{f}_P^A - f_P^A$ 。对于角度跟踪误差的影响, 有两种解决方案, 一种是预测目标的近似航迹, 天线平稳跟踪目标, 此时跟踪误差是一个时变平稳分量。另一种是借助与天线同轴的高精度角度传感器而获得实时的角运动轨迹, 并在录取回波数据时同时录取该运动轨迹。机动目标 (如飞机) 一般是惰性目标, 其相对雷达的转角是平滑的。通过平滑及拟合可获得接近真实的角运动轨迹。拟合前、拟合后的角轨迹信号相减可获得实时的角跟踪误差。这样再结合天线间距可计算出相应的相位误差而对回波进行预先补偿, 然后再完成 ISAR 成像。但这种方法对传感器精度要求较高, 而且距离越远, 要求越高。这里我们假设传感器能满足要求, 不存在时变系统滞后误差, 在后面的仿真结果中验证了采用预先补偿方法, 基本克服了跟踪噪声的影响。

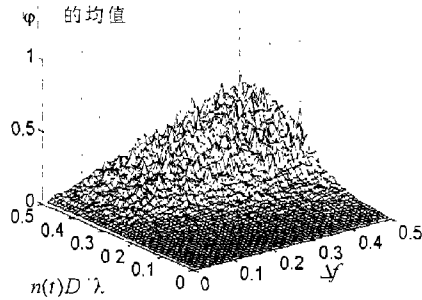
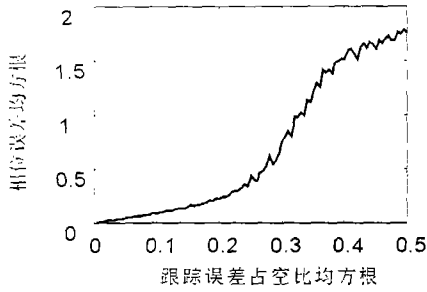


图 3 相位误差随“角度随机跟踪误差占空比”的变化 图 4 相位误差随 $n(t)D(t)/\lambda$ 和 Δf 的变化

3.2 步进跟踪情况下的 InISAR

前面讨论的“连续跟踪”方式对跟踪精度和角度传感器要求较高。下面我们讨论天线波束静止，目标穿过波束的情况，如果能成像，就不需要连续跟踪。目标相对于雷达的切向运动可以分解为平动和相对于雷达的转动，平动是需要补偿掉的，总转动由切向运动引起的转动和目标本身的转动组成。如图 1 所示，设对于天线 A , P 是聚焦中心，如果对于天线 B , P 也是聚焦中心，那么各平动分量补偿以后目标只有转动，没有平动，相当于转台模型，干涉式三维成像没有问题。若 P 所在距离单元只包含 P 一个孤立散射点，则很容易把 P 点作为目标相对于两天线的 ISAR 像的聚焦中心 (对于线性调频信号)。如果利用运动参数估计做运动补偿，那么， P 相对于 A, B 的运动参数不容易同时精确估计出。如果以估计出的参数分别做运动补偿，则相当于两 ISAR 像的聚焦中心不在同一点，ISAR 像肯定存在平移。下面给出具体的分析。(需要补充说明的是 ISAR 像在纵向上是对齐的，因为散射点相对于两天线的相位差最大为 2π ，对应的距离差是 λ ，远小于一个距离单元。)

设相干处理的初始时刻 $t_0 = 0$, $\varphi_P^A(t), \varphi_P^B(t)$ 代表 A, B 两天线接收到的 P 点的回波信号的相位，运动补偿的相位为 $\varphi(t)$ ，并设补偿后目标为均匀转动， ω_P^A, ω_P^B 分别为 P 相对于天线 A, B 的角速度。则补偿后两天线接收的信号为

$$s_P^A(t) = \exp[j\varphi_P^A(t) - j\varphi(t)] = \exp[j\varphi_P^A(t_0) - j\varphi(t_0) + j\omega_P^A \times t] \quad (17)$$

$$s_P^B(t) = \exp[j\varphi_P^B(t) - j\varphi(t)] = \exp[j\varphi_P^B(t_0) - j\varphi(t_0) + j\omega_P^B \times t] \quad (18)$$

经傅里叶变换后，输出为

$$S_P^A(\omega) = \int s_P^A(t) \exp(-j\omega t) dt = \exp [j (\varphi_P^A(t_0) - \varphi(t_0))] \delta (\omega - \omega_P^A) \quad (19)$$

$$S_P^B(\omega) = \int s_P^B(t) \exp(-j\omega t) dt = \exp [j (\varphi_P^B(t_0) - \varphi(t_0))] \delta (\omega - \omega_P^B) \quad (20)$$

$$S_P^A (\omega_P^A) \times S_P^B (\omega_P^B)^* = \exp [j (\varphi_P^A(t_0) - \varphi_P^B(t_0))] \quad (21)$$

可以看到经过 ISAR 处理以后，得到的是初始时刻 P 点相对于 A, B 两天线的相位差。也就是说，只要在数据录取初始时刻，目标位于相位不模糊区域内，不论在相干处理时间内目标是否运动出不模糊区域，都能正确得出三维像。

需要指出的是 ω_P^A 一般不等于 ω_P^B ，在利用 (21) 式时需要正确得到 P 点在两个 ISAR 像中的位置。在小角度成像条件下，相干处理时间内各散射点相对于雷达视线的横向相对位置近似不变，亦即各散射点相对于两天线的相位差的差近似为常数，同时不难证明 $\omega_P^A - \omega_P^B$ 是与 P

无关的, 这说明 A 天线接收信号的 ISAR 像是 B 天线接收信号的 ISAR 像在多普勒方向上的一个平移, 利用相关可以对齐两幅 ISAR 像。

一种对齐的方法是利用相关的方法和最小熵的方法, 为了提高对齐的精度, 在 ISAR 成像时需要补较长的零后再做谱分析。

另一种对齐方法是利用频移搜索, 对一个天线的一维距离像数据进行频移, 然后再成 ISAR 像并和另一个天线的 ISAR 像相关, 相关值最大的频移就是多普勒频差 Δf_d 。这种方法的好处是搜索步长可以较小, Δf_d 精度可以很高, 傅里叶变换的长度不需要加长。上面两种方法可以结合起来, 先做相关, 再在相关峰附近对频移进行搜索, 减小计算量。

这两种对齐方法三维成像都要求在数据录取初始时刻目标上各散射点的相位差是不模糊的, 因为它们不能校正初始相位模糊。如果初始相位模糊了, 我们希望能把它校正过来, 所以我们考虑下面第三种对齐方法。

第三种对齐方法基于角运动参数估计(空间谱估计)。先利用小间距的一对天线估计目标整体的角运动参数 $\alpha(t)$, 由(4)式可得到目标相对于两天线的整体的相位差 $\varphi = 2\pi D\alpha(t)/\lambda$, 设 s^A, s^B 为两天线接收信号, 令 $\tilde{s}^A = s^A \times e^{j\varphi}$, $\tilde{s}^B = s^B$, 那么, 由 \tilde{s}^A, \tilde{s}^B 得到的 ISAR 像是自然对齐的, 具有相同的焦点, 并且目标被校正到不模糊区。也相当于天线一直跟踪目标上某点, 不过这种跟踪是在数据域进行的, 不象 3.1 节是天线真正地跟踪。

当完成一幅像以后, 需要天线轴线重新指向目标。我们称这种方法为“步进跟踪体制”。

需要指出的是在前面的讨论中均假设运动补偿后目标相对雷达匀速转动, 若非匀速转动, 此时多普勒频差是一个时变分量, 利用瞬时 ISAR 像的概念可解决这一问题。

3.3 基于一维距离像和二维 ISAR 像的角运动参数估计技术

无论是连续跟踪还是步进跟踪, 首先需要测量目标的角运动轨迹。由(5)式知两天线的间距越小, 横向不模糊区越大, 故可以放置两个小间距的天线, 使得横向不模糊区非常大, 在相干处理时间内, 目标没有运动出小天线的模糊区。在每一瞬时时刻, 计算每一小间距天线回波信号的一维距离像, 利用能量较大、方差较小的距离单元的回波信号测角然后取平均或加权平均, 可以较好地跟踪上目标。

如果利用小间距天线得到的目标角运动参数不太精确, 还可以利用大间距天线对上面的结果进行校正, 因为大间距天线对相位的测量较精确, 并且此时对大间距天线来说相位已经不模糊了。

如果目标上没有只包含一个孤立散射点的距离单元, 为了提高测角精度, 可以对目标成二维像, 提高散射点的分离程度, 对目标上强散射点测角, 然后进行平均或加权平均, 可得目标角运动参数。由前面的讨论, 如果简单地对回波信号成 ISAR 像、测横向距离, 则得到的是数据录取初始时刻各散射点相对于雷达电轴的距离, 如果我们把信号“翻转”, 然后成 ISAR 像、测横向距离, 则得到的是数据录取末端各散射点相对于雷达电轴的距离, 再通过对横距的平均拟合可以得到很精确的目标横向运动轨迹。

4 仿真结果

仿真中我们利用 3 个天线 A, B, C , 在一个平面内构成一个等腰直角三角形。 A 天线位于直角顶点。 $AB = AC = 2\text{m}$ 。纵向距离分辨率为 1m 。

首先我们仿真雷达波束不动, 目标切向运动引起转动三维成像。假设目标以初始速度为 200m/s , 加速度为 10m/s^2 , 以和 X 轴夹角 20° , 俯冲角 10° 从原点前进, 雷达位于 $(0, -30\text{km})$ 不动, 横向不模糊距离 120m , 信噪比 26dB 。图 5 为目标的三视图, 图 6 为利用目标上某点相对于天线 A 的精确运动参数分别对 3 天线回波数据进行运动补偿、ISAR 成像, ISAR 像对齐后利用干涉法得到的目标的三视图, 图 5(a) 为水平-距离平面投影图, 图 5(b) 为水平-俯仰平面投影图(正面图), 图 5(c) 为距离-俯仰平面投影图, 本文中的三视图都是这种约定。我们看到, 它基本上能反映目标的三维形状信息(图 6)。



图 5 目标三视图

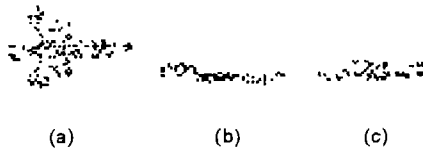


图 6 干涉式三维像的三视图

下面我们假设雷达处于跟踪状态，目标以速度 300m/s ，沿 X 轴从原点前进，雷达位于 $(0, -30\text{km})$ 不动，横向不模糊距离 120m ，信噪比 26dB 。图 7 为目标三视图，为空间的一个圆和三个点组成，其中每一幅 ISAR 像的横坐标为多普勒单元，纵坐标为距离单元（以下仿真中 ISAR 像的参量均与此相同，不再赘述）。设横向跟踪误差服从高斯分布，均方根误差为 20m 。图 8 为水平两天线的 ISAR 像，在仿真中我们是以其中的一个天线为基点转动，天线的抖动只发生在另一个天线上，所以我们看到第二个 ISAR 像由于随机相位误差发生模糊，在图 9 的三维像中某些散射点位置不精确，另一些散射点由于角闪烁给剔除掉了，这里我们的角闪烁阈值为 0.3 。图 10 为由角度传感器记录下跟踪角度，拟合后得到角跟踪误差，经过角跟踪误差补偿后得到的三维像，可以看到因跟踪误差补偿良好，干涉三维像的三视图接近目标本身三视图，这里我们假设角度传感器的精度是无限的。

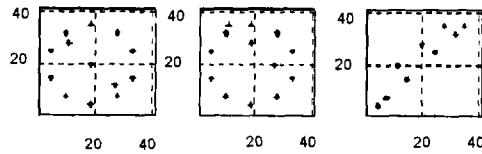


图 7 空间圆环目标三视

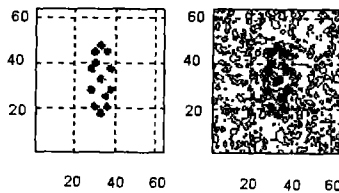


图 8 存在跟踪误差时的两水平天线上的 ISAR 像

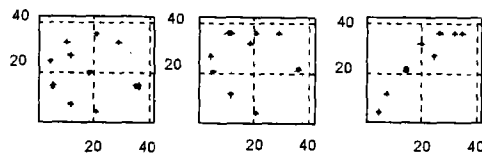


图 9 存在跟踪误差时的三维像

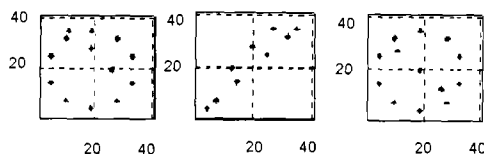


图 10 跟踪误差补偿后的目标三视图

图 11、图 12 显示当采取角运动参数估计后克服相干处理初始时刻相位模糊问题。仿真中目标横向不模糊距离为 120m，我们把目标放在横向位置为 -60m 的地方让目标切向运动，图 11 是利用相关对齐 ISAR 像得到的目标的三维像，由于相位在 $-\pi$ 处折叠，三维像也横向折叠。图 12 是采用 3.2 节提出的基于角运动参数估计，对天线的回波信号进行预先补偿后得到的目标的三维像，可以看到，克服了相位模糊的问题。

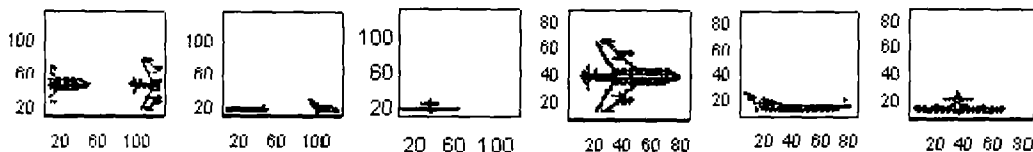


图 11 相关对齐方法得到的目标的三维像

图 12 利用角运动参数估计得到的目标的三维像

4 结 论

我们分析了干涉式逆合成孔径雷达成像的基本原理，讨论了两种天线跟踪体制即连续跟踪体制、步进跟踪体制存在的问题及解决的办法。在连续跟踪体制下，提出了一种利用角度传感器补偿跟踪误差的方法。在步进跟踪体制下提出了三种对齐 ISAR 像的方法。提出了基于一维距离像和二维 ISAR 像的角运动参数估计技术。对于干涉法测角中出现的角闪烁问题给出了角闪烁判断的准则。仿真结果表明了本文方法的正确性。

参 考 文 献

- [1] L. C. Graham, Synthetic interferometer radar for topographic mapping, Proc. IEEE, 1974, 62(6), 763-768.
- [2] R. Bamler, P. Hartl, Synthetic aperture radar interferometry, Inverse Problems, 1998, 14(4), R1-R54.
- [3] G. Fornaro, G. Franceschetti, R. Lanari, Interferometric SAR phase unwrapping using Green's formulation, IEEE Trans. on GRS, 1996, GRS-34(3), 720-727.
- [4] Q. Lin, J. F. Vesecky, H. A. Zebker, New approaches in interferometric SAR data, IEEE Trans. on GRS, 1992, GRS-30(3), 560-567.
- [5] H. A. Zebker, J. Villasenor, Decorrelation in interferometric radar echoes, IEEE Trans. on GRS, 1992, GRS-30(5), 950-959.
- [6] U. Spagnolini, 2-D phase unwrapping and instantaneous frequency estimation, IEEE Trans. on GRS, 1995, GRS-33(3), 579-589.
- [7] F. K. Li, R. M. Goldstein, Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars, IEEE Trans. on GRS, 1990, GRS-28(1), 88-97.

- [8] R. M. Narayanan, R. D. Mueller, R. D. Palmer, Random noise radar interferometry, SPIE, 1996, 2845, 75-82.

RESEARCH ON 3-D IMAGING TECHNIQUE FOR INTERFEROMETRIC INVERSE SYNTHETIC APERTURE RADAR

Zhang Qun Ma Changzheng* Zhang Tao Zhang Shouhong

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

*(Dept. of Information, Beijing University of Posts and Telecomm., Beijing 100876, China)

Abstract In this paper, a 3-D imaging technique for interferometric inverse synthetic aperture radar is presented. And the criteria of determining and the angle glint in interferometric angle measurement are given. Furthermore, the 3-D imaging technique under two tracking systems is analyzed. This technique can effectively overcome the random phase dithering caused by tracking error under the continuous tracking system and satisfactorily solve the alignment of the different focuses of ISAR images under the step tracking system.

Key words Interferometric inverse synthetic aperture radar, Three-dimensional imaging, Angle glint, Continuous tracking, Step tracking

张 群: 男, 1964 年生, 博士, 研究兴趣为: 雷达成像, 阵列信号处理, 杂波抑制等.

马长征: 男, 1967 年生, 博士后, 研究方向为: 雷达成像, 阵列信号处理, 智能天线, 多用户检测等.

张 涛: 男, 1971 年生, 博士, 研究兴趣为: 雷达成像, 阵列信号处理, 计算机辅助设计与测试.

张守宏: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域: 雷达信号处理.