

基于线性调频步进信号的 ISAR 成像技术研究¹

张 涛 马长征 张 群 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)

摘 要 分析了线性调频步进雷达信号 (LMFS) 的形式及成像的特点, 利用对雷达发射信号的设计, 提出了此类信号切实可行的运动补偿方案; 提出了两种形成延展目标 ISAR 像的拼接方法; 最后通过实测数据验证所提运动补偿方法的有效性并通过仿真验证了所提 ISAR 像拼接方法的正确性。

关键词 线性调频步进雷达信号, 运动补偿, 距离像拼接, 逆合成孔径雷达

中图分类号 TN951

1 引 言

在雷达成像中, 通常利用宽带信号获得高分辨距离像, 其中步进频率信号是一种主要的信号形式。该信号通过发射一组载频线性跳变的子脉冲, 通过脉冲回波的 IFFT 处理合成高距离分辨波形, 即目标的一维距离像^[1]。这种信号的优点是瞬时带宽较窄, 便于实现; 缺点是当脉冲重复周期较长、波长较短及目标速度较快时对目标的多普勒效应比较敏感和数据利用率低。为了解决上述问题, 人们提出了新的信号形式“线性调频步进雷达信号”^[2,3]。该信号是把步进频率中的常载频子脉冲换成线性调频子脉冲, 其处理步骤是首先将线性调频子脉冲通过一次脉冲压缩形成粗高分辨的距离像, 然后利用步进频率信号特性对该粗高分辨距离像上的分辨单元进行二次脉压形成精高分辨的一维距离像。文献 [2, 3] 指出了对于目标的最大径向长度不大于粗高分辨距离单元时的雷达信号参数选取条件和信号处理方案。

一般来说, 延展目标可能占据多个粗高分辨距离单元, 在形成延展目标的 ISAR 像时, 需要进行特殊处理消除不同模糊距离窗口间散射点能量泄漏引起的虚假散射点。文献 [1] 中提出了形成延展目标高分辨距离像的方法。本文针对延展目标形成 ISAR 像的特点, 提出了两种延展目标形成 ISAR 像的方法。这两种方法比文献 [1] 所提方法具有更好的性能。

步进频率信号成像, 必须先估计目标运动参数, 补偿后, 才能形成距离像和 ISAR 像。文献 [4] 提出了利用目标在不同载频下多普勒频移不同, 克服目标运动参数估计中可能存在的速度模糊的方法。这种方法在单散射点情况下是可行的, 但是对于多散射点情况, 由于目标在不同载频下的多普勒频移的对应关系难以精确寻找, 引起较大的估计误差。文献 [5] 提出了利用回波的相位解卷绕估计目标运动参数的方法。但具有相同载频的调频子脉冲的信号存在速度模糊, 使用前必须首先解速度模糊。本文针对线性调频步进信号的特点, 通过对雷达发射信号的设计, 克服了具有相同载频的调频子脉冲的信号存在速度模糊的问题, 利用时频分析估计目标运动参数。最后, 通过一段实测数据验证了应用时频分析估计目标运动参数的有效性; 通过仿真数据所形成的 ISAR 像验证了所提形成延展目标 ISAR 像的方法的有效性。

2 线性调频步进信号的形式及特性分析

2.1 线性调频步进信号的形式

线性调频步进雷达信号是将线性调频信号作为频率步进信号的子脉冲, 其特点是在频率步进信号发射能量和总带宽不变的前提下, 减少了合成一维高分辨距离像的脉冲数, 降低了

¹ 1999-05-21 收到, 1999-11-09 定稿

目标运动对形成高分辨距离像的影响, 提高了系统的数据率。其发射波形的频率变化如图 1 所示。设雷达发射的第 0 簇子脉冲串中的第 i 个子脉冲信号为^[3](设信号起始时间为 $-T_1/2$)

$$U(t) = u_1(t - iT_r)e^{j2\pi(f_0 + i\Delta f)t + \theta_i}, \quad 0 \leq i \leq N - 1 \quad (1)$$

其中 $u_1(t) = \text{rect}(t/T_1) \cdot e^{j\pi Kt^2}$ 为线性调频子脉冲, K 为子脉冲调频斜率, T_1 为子脉冲宽度, T_r 为脉冲重复周期, $f_0 + i\Delta f$ 为第 i 个调频步进子脉冲的载频, θ_i 为第 i 个子脉冲初相, N 为每一簇子脉冲串中的步进频率数。假设发射脉冲幅度为 1。对于单点目标, 其回波和发射脉冲载频相同的相参本振信号混频后, 视频输出为

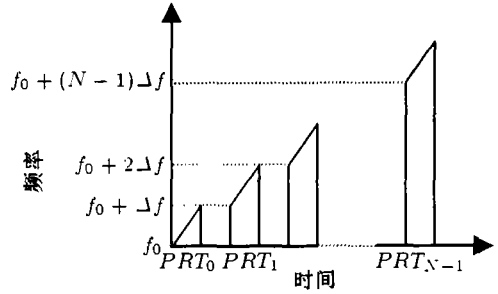


图 1 调频步进雷达信号发射频率变化规律

$$S_i(t) = A_i \text{rect} \left[\frac{t - iT_r - \tau(t)}{T_1} \right] e^{j\pi K[t - iT_r - \tau(t)]^2} e^{-j2\pi(f_0 + i\Delta f)\tau(t)} \quad (2)$$

其中 $\tau(t) = 2(r_0 + vt + at^2/2)/c$ 表示目标回波的时间延时, 其中 r_0 为目标距雷达的初始距离, v, a 分别为目标相对于雷达的径向速度和加速度, c 为光速。

2.2 特性分析

(2) 式经过脉冲压缩后, 输出结果为^[3]

$$u_i(t) = A_i \text{rect} \left[\frac{t'}{2T_1} \right] (t_1 - |t'|) \frac{\sin[\pi(Kt' + f_{di})T_1(1 - |t'|/T_1)]}{\pi(Kt' + f_{di})T_1(1 - |t'|/T_1)} e^{-j2\pi(f_0 + i\Delta f)\tau(t)} \quad (3)$$

其中 $t' = t - iT_r - \tau(t)$, $f_{di} = 2(f_0 + i\Delta f)(v + at)/c$ 。从 (3) 式可以看出: 第一, 脉压输出处于 $[iT_r + \tau(t) - T_1, iT_r + \tau(t) + T_1]$ 之间, 具有 $Sa(x)$ 函数形式, 脉压输出峰值不是出现在目标位置, 而是存在由目标径向运动引起的多普勒效应造成的耦合时移, 其大小为 $\Delta\tau_i = 2((f_0 + i\Delta f)/K)((v + at)/c)$ 。因此, 第 i 个调频步进子脉冲的脉压回波的耦合时移与第 0 个子调频脉冲的脉压回波的耦合时移的变化量 Δ'_i 为

$$\Delta'_i = \Delta\tau_i - \Delta\tau_0 = 2i(v + at)T_1/c \quad (4)$$

在雷达成像中由于 $2(v + at)/c \ll 1$ ^[2], $\Delta'_i \approx 0$ 。(4) 式约等于零表示脉冲串之间的耦合时移变化量很小, 可以忽略不计。即第 i 个子脉冲脉压回波的包络与第 0 个子调频脉冲的脉压回波包络的变化量可以表示为

$$\tau_i = 2(v + at)T_1/c \quad (5)$$

第二, (3) 式中最后一项为不同脉冲重复周期期间相参合成高分辨距离像所需的线性相位信息。多散射点的情况与单散射点的情况相同。从以上两点的分析可以得出: 利用线性调频步进雷达信号成像的可行的步骤是: (1) 进行一次脉冲压缩, 形成粗高分辨距离像; (2) 利用粗高分辨距离像之间的位置移动, 粗略估计目标运动参数并进行补偿; (3) 利用某粗距离单元信号经时频分析精确估计目标的运动参数并补偿; (4) 利用粗分辨距离像中的每一分辨单元通过 IFFT 二次脉压形成子精高分辨距离像, 然后拼接形成目标精高分辨距离像; (5) 利用多个高分辨距离像之间的相位信息形成 ISAR 像。

3 基于线性调频步进信号特性的目标运动补偿

由上述分析可以得出: 线性调频步进雷达回波信号目标运动参数估计的方案可以分为如下 5 个步骤:

步骤 1 目标运动参数粗估计。(5) 式表明: 通过脉冲串的包络间的位移量可以估计目标的运动参数, 其估计精度受第一次脉压的距离分辨率影响。利用距离像的重心, 通过曲线拟合粗略估计目标运动参数 (\hat{v}, \hat{a}) , 在最小均方误差准则下, 在采样率为调频带宽的 2 倍时, 其估计精度满足

$$|\Delta\hat{v}T + \Delta\hat{a}T^2/2| < \Delta R/2 \quad (6)$$

其中 $\Delta\hat{v}$, $\Delta\hat{a}$, $T = T_1(MN - 1)$, $\Delta R = c/(2B_M)$ 分别为速度误差, 加速度误差, 成像时间和第一次脉压后的距离分辨率, B_M 为调频子脉冲带宽, M 为调频步进子脉冲总簇数。(6) 式表示了利用估计参数补偿回波后目标中的散射点在整个数据记录时间内不移出半个粗高距离分辨单元, 但 $\Delta\hat{v}$, $\Delta\hat{a}$ 不满足成像要求, 需要再精估计。

步骤 2 粗高距离分辨单元挑选。为在时频分析中获得较高的估计精度, 在补偿后的具有相同载频 f_s 的脉压数据中挑选具有特显点性质的粗高分辨距离单元^[6]形成序列 $S_f(n)$ 。挑选准则为: 在能量较大的粗高距离分辨单元中选取归一化起伏方差最小的单元, 其保证了在该单元具有特显点性质^[6]。因该序列的等效重复周期 $T_{fr} = NT_r$, 步骤 1 中的测速误差 $\Delta\hat{v}$ 可能大于步骤 2 中形成的 $S_f(n)$ 的等效脉冲重复周期可表示的最大速度, 因此可能存在速度模糊, 需要进一步提高步骤 1 中的测速精度, 以便使得最大测速误差小于 $S_f(n)$ 的等效脉冲重复周期可表示的最大速度。

步骤 3 为了进行解速度模糊处理, 可在发射调频步进回波前以脉冲重复周期 T_r 为间隔发射 $N' = (2 \sim 3) \times N$ 个载频为 f_s 的线性调频脉冲(注: 此在雷达中是可行的), 脉压后的特定距离分辨单元记为序列 $s_{fs}(n)$ 。在 $s_{fs}(n)$ 中利用目标速度的多普勒效应估计目标速度。由于记录 $s_{fs}(n)$ 的时间短, 目标的加速度对测速的影响可以忽略。利用 $s_{fs}(n)$ 可估计的速度范围和精度分别为

$$|v_{fs}| \leq \lambda/(4T_r), \quad |\Delta v_{fs}| \leq \lambda/(4T_r N') \quad (7)$$

(7) 式中 v_{fs} 表示利用步骤 3 可估计的最大步模糊速度, Δv_{fs} 表示利用步骤 3 可估计的速度最大误差, $\lambda = c/f_s$ 。设 $T = MNT_r$, 可以证明, 一般情况下, 当 $MN \geq 2\Delta R/\lambda$ 时,

$$|\Delta\hat{v}| < |v_{fs}| \quad (8)$$

(8) 式表明: 步骤 3 中形成的序列 $s_{fs}(n)$ 的不模糊速度大于步骤 1 中的最大测速误差, 可以利用 (8) 式进一步提高测速精度。在调频步进回波中具有相同载频 f_s 的序列 $s_f(n)$ 的不模糊速度为 $|v| = \lambda/(4T_r N)$, 由于 $N' \geq 2N$, 使得

$$|v| > |\Delta v_{fs}| \quad (9)$$

由 (8) 式和 (9) 式可以得出: 通过步骤 1, 3 的补偿后, 克服了在 $s_f(n)$ 中可能存在的速度模糊问题, 可以利用时频分析进一步精确估计目标运动参数。

步骤 4 利用时频分析估计目标运动参数。以短时 FFT 为例说明。若目标运动参数估计精确, 在对 $s_f(n)$ 作重频抽取后作短时 FFT 谱分析, 其谱中心基本没有偏移。为了减少运算量, 首先利用文献 [5] 中提出的回波相位解卷绕的方法进一步精确估计目标运动参数,

然后通过重频抽取法, 利用短时 FFT 的谱中心的移动, 逐次估计目标运动参数, 直至重频抽取使得目标的频谱基本占据大部分频谱, 并且短时谱的中心基本不再存在偏移为止。

步骤 5 利用以上步骤估计的目标运动参数补偿粗高分辨距离像后, 就可以利用步进频率信号的特性通过 IFFT 二次脉压形成精高分辨距离像。

4 延展目标精高分辨 ISAR 像的形成

在粗高分辨距离像经过运动参数补偿后, 如果目标只占据一个粗高分辨距离单元, 则可以直接形成精高分辨的一维距离像^[2]。但是对于延展目标, 则需要通过特殊处理形成精高分辨一维距离像。在纯步进频率信号情形, 文献 [1] 提出了形成延展目标高分辨距离像的方案。对于调频步进信号, 相当于选取频率步进量 $\Delta f \leq B_M/2$, 利用不同次采样形成的相互重叠的子距离像的复相加形成延展目标的精高分辨一维距离像, 进而形成 ISAR 像。其实质是利用不同次采样形成子距离像, 进而形成子 ISAR 像, 对其重叠的部分, 复相加求和。本文提出了两种新的延展目标形成 ISAR 像的方法, 用于形成高质量的 ISAR 像: (1) 距离像拼接法, (2) 子 ISAR 像叠加法。

4.1 距离像拼接法

距离像拼接法的原理: 当 $\Delta f \leq B_M/2$, 步进频率信号不模糊距离窗口 R_u 至少大于两个一次脉压形成的粗高分辨距离单元对应的距离, 因此在同一 R_u 中至少存在多次采样。这些采样形成的精高分辨距离像中包含的该不模糊距离窗口中的散射点的主瓣能量和其它不模糊距离窗口中的散射点的泄漏能量由于采样时刻的不同存在较大的差异。通过对由于采样引起的散射点能量的差异的分析, 本文提出了距离像拼接法。以 $\Delta f = B_M/2$ 为例说明。

在频率步进量 $\Delta f = B_m/2$ 时, 延展目标占据多个 R_u , 不同 R_u 上的散射点相互折叠, 其中以相邻 R_u 上的散射点的影响最为严重, 较远的 R_u 中的散射点折叠可以忽略。现以三个相邻 R_u 中散射点的情况说明, 如图 2 所示。图 2 表示了三个相邻 R_u 的中的散射点折叠现象的示意图。三个相邻 R_u 的中共包含 6 个粗高距离分辨率单元, 其编号分别为 d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 和 d_6 。6 个粗高距离分辨率单元合成的距离像分别为 $S_1(n), S_2(n), S_3(n), S_4(n), S_5(n), S_6(n)$, 其中 $S_1(n)$ 和 $S_2(n), S_3(n)$ 和 $S_4(n)$ 及 $S_5(n)$ 和 $S_6(n)$ 分别对应三个不模糊距离窗口的两次采样形成的距离像。由于调频子脉冲回波在脉压后包络为 $Sa(x)$, 因此各粗高分辨单元中散射点彼此存在能量泄漏问题。例: $S_3(n)$ 中粗高距离分辨率单元 d_2 中的散射点泄漏能量最大(例: 散射点 s_4), 散射点最大的泄漏能量为该散射点主瓣峰值能量的 4dB, 泄漏的位置处于 $S_3(n)$ 的第 $N/2 + 1$ 至第 N 个精高分辨距离单元, 在 $S_3(n)$ 中形成虚假散射点。其余粗分辨率单元中的散射点向 $S_3(n)$ 中泄漏的能量最大为其主瓣峰值能量的 -13.6dB。 $S_4(n)$ 中粗分辨率单元 d_5 中的散射点泄漏能量最大(例: 散射点 s_5), 散射点最大的泄漏能量为该散射点主瓣峰值能量的 -4dB, 其位置处于 $S_4(n)$ 的第 1 至第 $N/2$ 个高分辨距离单元, 在 $S_4(n)$ 中形成虚假散射点。其余粗分辨率单元中的散射点向 $S_4(n)$ 中泄漏的能量最大为其主瓣峰值能量的 -13.6dB。由于 $S_3(n), S_4(n)$ 为同一不模糊距离窗口的距离像。利用

$$S(1:N) = S_3(1:N/2) + S_4(N/2+1:N) \quad (10)$$

形成的距离像, 使得其它相邻不模糊距离窗口中的散射点能量泄漏抑制在 -13.6dB 以下。同理, 利用 (10) 式可以形成其它不模糊距离窗口的高分辨率距离像, 将这些距离像顺次连接就形成了延展目标的精高分辨一维距离像, 继而形成 ISAR 像。

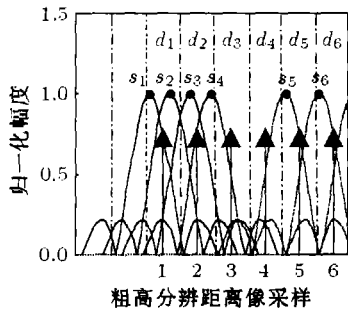


图 2 粗高分辨距离像中散射点主副瓣分布示意图

性调频子脉冲回波的加窗脉压,使得散射点主瓣宽度增加,由 $Sa(x)$ 函数的影响降低,同时降低了副瓣。因此,减少了数据采样中由 $Sa(x)$ 的影响引起的散射点主瓣的相对能量损失。由于距离像的拼接的方法实质上是消除散射点主瓣泄漏的能量对形成的拼接距离像的影响,在拼接的距离像中只残留了散射点泄漏的副瓣能量,因此脉压加窗大大增强了抑制散射点折叠的性能,加窗脉压后抑制散射点能量泄漏的性能改善至少是加窗函数主瓣峰值能量与第一副瓣峰值能量的比。

4.2 子 ISAR 像叠加法

同 (1) 式中所述:当 $\Delta f \geq B_M/2$, 步进频率信号不模糊距离窗口 R_u 至少大于两个一次脉压形成的粗高分辨距离单元,因此在同一 R_u 中至少存在多次采样。这些采样形成的高分辨距离像中包含的该不模糊距离窗口中的散射点的能量与其它不模糊距离窗口中的散射点的泄漏能量由于采样时刻的不同存在较大的差异。由同一 R_u 中的多次采样可以形成多个子精高分辨距离像,拼接后,形成延展目标的精高分辨距离像,进而形成多幅目标的 ISAR 像。只是这些 ISAR 像中的散射点强度和位置各不相同,但是散射点之间的相对位置是相同的。如果将其位置进行调整,并且取模相加,由于各个 ISAR 像中对应位置的散射点能量相加,获得好的 ISAR 像。这种方法与文献 [1] 中的区别是将文献 [1] 中的距离像对应分辨单元的复相加改为各 ISAR 像中的对应距离多普勒单元的模相加。对于形成 ISAR 像来说,子 ISAR 像的模叠加法优于文献 [1] 中的方法。这是因为对于距离像对应分辨单元的复相加来说,如果各个距离像对应单元的相位一致,对应分辨单元的能量相加;各个距离像对应单元的相位相反,对应分辨单元的能量相互抵消,造成形成 ISAR 像时某些位置散射点丢失,子 ISAR 像的模求和法不存在散射点的能量损失问题,这两种方法的其它性能相同。

5 仿真结果及分析

5.1 本文所提运动补偿方法的验证

本文利用实测脉压数据验证利用本文所提时频分析方法估计目标运动参数的有效性。实测脉压数据的参数为载频 $f_0 = 1092\text{MHz}$, 脉冲重复周期 $T_r = 1/400\text{s}$, 数据采样率 $f_s = 10\text{MHz}$, 共 4096 次回波。由于没有步进频信号数据,我们利用该实测脉压数据的包络替代调频步进回波信号脉压后的信号,经过回波抽取,形成第 3 节中步骤 2, 3 中的序列 $S_f(n), S_{f_s}(n)$ 。运动补偿过程如下。首选利用计算脉压数据的包络的中心,然后通过曲线拟合获取目标运动参数并补偿脉压数据,然后按照第 3 节中步骤 2, 3, 4, 5 中的方法进行计算。图 3 为利用脉压数据的包络位移粗略估计目标运动参数并补偿,并挑选特显点单元后,所作的短时 FFT 谱。图 4 为利用本文所提时频分析方法估计目标运动参数并补偿后,克服速度模糊并补偿后所作的短时 FFT 谱。从图 3 和图 4 中可以看出:经过应用时频分析

按照 (10) 式拼接的距离像可以抑制相邻不模糊距离窗口中的散射点的能量泄漏对距离像形成的影响,但是却造成了部分散射点能量损失。由图 2 中 d_5, d_6 中的散射点说明。由于脉压后 $Sa(x)$ 的加权作用在采样后使得处于 d_5 和 d_6 结合处的散射点在合成处理后在 $S_5(n), S_6(n)$ 中的能量存在损失。如散射点 s_6 。散射点可能的最大能量损失为 -4dB ,但是通过对回波数据加窗脉压可以有效地减少能量损失,同时使得距离像拼接法抑制散射点折叠的性能大大提高。其原因是:对线

估计目标运动参数, 并补偿后, 目标的短时 FFT 谱的中心基本处于零频的位置, 说明了应用本文的方法补偿是有效。

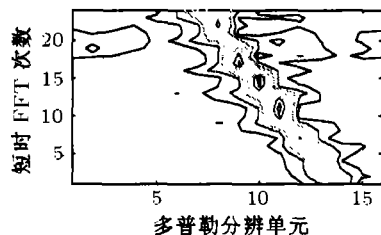


图 3 时频分析前经粗补偿的短时 FFT 谱

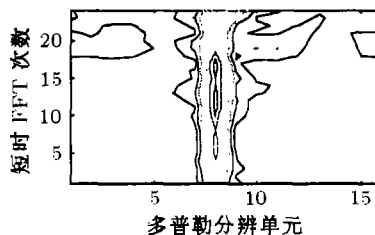


图 4 时频分析后经精确补偿的短时 FFT 谱

5.2 三种形成延展目标 ISAR 像方法的比较

本文仿真的信号参数为: 发射频率 35GHz, 波长 8mm。线性调频子脉冲带宽 $B_m = 16\text{MHz}$, 子脉冲时宽 $T_1 = 16\mu\text{s}$, 频率步进 $\Delta f = 8\text{MHz}$, 脉冲重复周期 $T_r = 400\mu\text{s}$, 信号处理的采样频率 $f_s = 32\text{MHz}$ (I/Q 采样)。由上述参数可以得出: 线性调频子脉冲形成的粗分辨率距离像的距离分辨率为 $\Delta R_c = c/(2B_m) = 9.375\text{m}$, 当 $\Delta f = 8\text{MHz}$ 时, 高分辨距离像的距离分辨率 $\Delta R_s = c/(2N\Delta f) = 0.5859 \times 2\text{m}$; 目标中共 44 个散射点, 散射点分布为: 距离雷达 10000m 的两个同心圆, 半径分别为 34m 和 14m, 散射点的散射强度均为 1。目标匀速转动, 雷达以 100m/s 的速度向目标运动。成像时间是 0.4096s。图 5 表示了利用文献 [1] 所提距离像复拼接法形成的 ISAR 像, 图 6 表示了利用子 ISAR 像模叠加法形成的 ISAR 像, 图 7 表示利用距离像拼接法形成的 ISAR 像。图中的每一距离分辨单元表示 $\Delta R_s/2$ 。比较图 5、图 6 和图 7, 可以看出: 图 5, 图 6 中的 ISAR 像都存在散射点的位置错乱, 同时存在由散射点的旁瓣引起的小的虚假散射点, 造成图像杂乱。比较图 5 和图 6 可以发现: 图 6 中散射点的能量较图 5 中的散射点的能量均匀, 图 5 中个别散射点 (坐标 [42, 18]) 能量损失较大, 而图 6 中对应位置散射点的能量损失较小, 于上述理论分析符合。图 7 中的 ISAR 像与图 5 和图 6 中的 ISAR 像相比, 散射点的位置错乱现象基本被消除, 且散射点的能量均匀, 散射点的能量基本不存在损失。这表明对于延展目标形成 ISAR 像来说, 距离像拼接法具有较好地抑制由于不同模糊距离窗口散射点能量泄漏引起的散射点位置错乱和虚假散射点的能力。

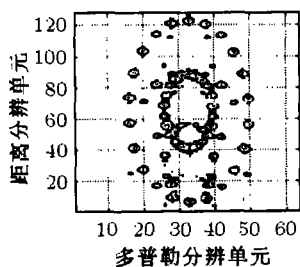


图 5 子距离像复求和法形成距离像后, 形成的 ISAR 像

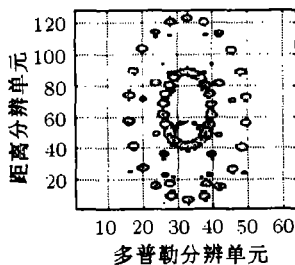


图 6 子 ISAR 像取模求和法形成的 ISAR 像

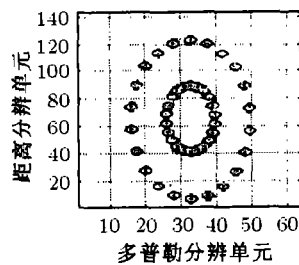


图 7 距离像拼接法形成距离像后, 形成的 ISAR 像

6 结 论

通过以上理论分析、脉压实测数据的运动补偿处理和调频步进体制雷达成像的仿真结果, 可以得出以下结论: (1) 通过对具有本文所设定要求的实测脉压数据的处理说明了在调频步进雷达体制下本文所提运动补偿方法的有效性; (2) 通过对在调频步进雷达体制下延展目标 ISAR 成像的三种不同方法的比较, 说明了本文所提的距离像拼接法和子 ISAR 像模叠加法在成像中可以有效地抑制调频步进雷达体制下延展目标成像中的出现的虚假散射点, 获得较好的 ISAR 像, 其中以距离像拼接法性能最优。

参 考 文 献

- [1] D. R. Wehner, High Resolution Radar, London: Artech House, 1995, 197-236.
- [2] 龙腾, 毛二可, 何佩琨, 调频步进雷达信号分析与处理, 电子学报, 1998, 26(12), 84-88.
- [3] 郑学合, 高分辨力雷达导引头多维信息提取技术研究, 博士论文, 航天部二院, 1998, 48-53.
- [4] F. Berizzi, G. Pinelli, Maximum-likelihood ISAR image autofocusing technique based on instantaneous frequency estimation, IEE proc.-F, 1997, 144(5), 284-291.
- [5] J. Sok, S. Tariq, B. C. Flores, Phase difference method for target motion compensation of stepped-frequency ISAR signature, SPIE Radar Processing, Technology, and Application, 1996, 2485, 163-174.
- [6] 叶炜, 保铮, 逆合成孔径雷达子聚焦的新方法——局域特显点综合法, 中国科学 (E 辑), 1997, 25(5), 424-429.
- [7] T. Itoh, H. Sueda H, Y. Watanabe, Motion compensation for ISAR via centroid tracking, IEEE Trans. on AES, 1996, 32(3), 1191-1197.

RESEARCH ON ISAR IMAGING BASED ON LINEARLY MODULATED FREQUENCY STEPPED RADAR SIGNAL

Zhang Tao Ma Changzheng Zhang Qun Zhang Shouhong

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

Abstract The features of the linearly modulated frequency stepped radar signal (LMFS) and imaging based on it are analyzed. A feasible scheme of target motion compensation is proposed by using designation of radar transmitting signal; ISAR image is achieved by two methods of ISAR image combination for LMFS. The effectiveness of the scheme of target motion compensation is shown by the theoretical analysis and processing of the practical data, and the effectiveness of these methods of ISAR image combination are shown by the theoretical analysis and computer simulation.

Key words LMFS, Motion compensation, Profile combination, ISAR

- 张 涛: 男, 1971 年生, 博士生, 现主要从事雷达三维成像、电路 CAD/CAT、阵列信号处理等方面的研究工作。
- 马长征: 男, 1967 年生, 讲师, 博士, 现主要从事雷达三维成像、阵列信号处理、无线通信中的信号处理等方面的研究工作。
- 张 群: 男, 1964 年生, 副教授, 博士生, 现主要从事雷达三维成像、阵列信号处理、杂波抑制等方面的研究工作。
- 张守宏: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事时频分布、雷达成像、阵列信号处理、高分辨信号处理等方面的研究工作。