

# 基于波形预先设计和相位对消技术的 步进频信号 ISAR 成像研究

胡杰民<sup>1</sup>,付耀文<sup>1</sup>,黎 湘<sup>1</sup>,景 宁<sup>2</sup>

(1. 国防科技大学空间电子信息技术研究所,湖南长沙 410073; 2. 国防科技大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

**摘 要:** 针对步进频雷达系统,分析了目标匀加速运动对回波相位的调制效应,提出基于波形预先设计和相位对消技术组合的 ISAR 成像方法,该方法通过对脉冲重复时间的设计消除目标速度带来的相位高次项,并通过相位对消技术消除由目标加速度带来的相位高次项.因此对于匀加速运动的目标,算法不需要估计速度和加速度,减少了计算量.仿真试验演示了算法的性能,证明了算法的有效性.

**关键词:** 逆合成孔径雷达; 相位对消; 步进频率信号; 运动补偿

**中图分类号:** TN95      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2011) 07-1575-06

## Research on ISAR Imaging Based on Predesigned Waveform and Phase Cancellation Technique via Stepped-Frequency Signals

HU Jie-min<sup>1</sup>, FU Yao-wen<sup>1</sup>, LI Xiang<sup>1</sup>, JING Ning<sup>2</sup>

(1. Institute of Space Electronics Information Technology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

2. College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** In the stepped-frequency radar system, motion introduces additive high order phase terms, which results in distortion of range profile. The phase modulation effect is analyzed and a novel ISAR imaging method is proposed for uniformly accelerative target, which based on predesigned waveform and phase cancellation. The pulse repetition time is predesigned to eliminate the high order phase terms introduced by velocity of the target. Then the high order phase terms introduced by acceleration are removed by phase cancellation. For a uniformly accelerative target, the velocity and acceleration are not need to estimate in the proposed method, so the computation burden is greatly reduced. Simulations with synthetic data demonstrate the performance of the new method. The results confirm its effectiveness.

**Key words:** inverse synthetic aperture radar (ISAR); phase cancellation; stepped frequency waveform; motion compensation

### 1 引言

逆合成孔径雷达 (ISAR) 成像能够反演目标散射点在成像平面的投影,是雷达目标识别的重要途径之一. ISAR 成像的距离向分辨能力是通过发射宽频带信号获得,横向分辨力是小角度转动等效为时间积累获得的多普勒分辨能力.

利用步进频信号对目标进行成像时,由于观测时间较长,目标运动会导致回波相位增加高次项,以致成像模糊,因此需要对高次项进行补偿.文献[1]利用图像的自聚焦方法估计目标运动参数,通过运动参数获得回波相位高次项的估计值并进行补偿,这类方法存在局部最

优值的干扰;文献[2~6]分别从不同的角度对运动参数估计方法进行设计,降低了估计结果收敛于本地最优值的概率,但是这些方法需要二维搜索或迭代搜索,因此计算量较大,不利于对目标进行实时成像的同时受到参数估计精度的影响;文献[7~9]研究了匀速运动目标 ISAR 成像技术,其中,文献[7,8]分别利用信号参数预先设计和相位对消的方法合成高分辨距离像,由于不需要估计运动参数,这两种方法计算量都很小,且成像过程简单,易于工程实现,其缺点是算法只对匀速运动的目标有效,对高次运动目标成像仍会导致成像模糊;文献[10]分析了目标运动速度和加速度对成像结果的影响,并给出了需要对目标加速度进行估计的条件;文

献[11,12]研究了步进信号的高分辨距离像抽取算法。

采用参数估计方法对步进频信号进行补偿成像时,参数估计精度和计算量大小直接影响成像方法的有效性和实用性,通常参数估计方法总会有一定的估计误差,造成成像结果可能出现模糊.本文将研究基于波形预先设计和相位对消技术的 ISAR 成像新方法,针对匀加速运动目标或在成像时间内可近似为匀加速的目标,推导了回波相位与目标运动参数的解析关系,通过对信号波形的预先设计,消除目标速度带来的相位高次项,并通过相位对消技术消除由目标加速度带来的相位高次项.通过包络对齐和初相校正处理后对方位向作傅立叶变换即可得到目标 ISAR 像,成像过程没有对运动参数进行估计,新方法在有效性和实时性方面有较大改进.

## 2 目标回波模型

雷达与目标的几何示意图如图 1 所示,雷达坐标系为  $xoy$ ,目标以速度  $v$  和加速度  $a$  在  $xoy$  面内飞行,速度和加速度在雷达径向上的投影分别为  $v_R$  和  $a_R$ .在任意时刻  $t_{m,n}$ ,雷达与目标之间的距离为  $R_0(t_{m,n})$ , $r_k(t_{m,n})$  表示目标上第  $k$  个散射点到雷达的距离,该散射点在雷达坐标系中的位置为  $(x_k(t_{m,n}), y_k(t_{m,n}))$ . $\theta(t_{m,n})$  为目标轴线与雷达坐标系  $x$  轴之间的夹角,在 ISAR 成像通过  $\theta(t_{m,n})$  的变化对各散射点相位的影响不同来实现方位向的分辨.

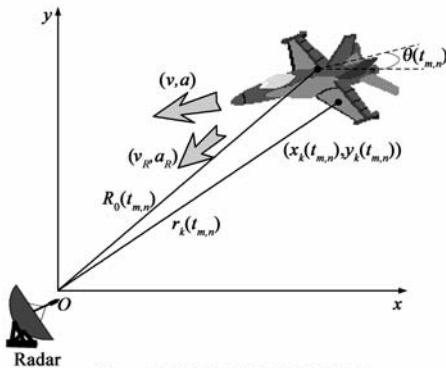


图1 雷达与目标几何示意图

雷达发射的步进频信号如图 2 所示,雷达脉冲重复频率为  $PRF$ ,每个脉冲串包含  $N$  个单频脉冲,雷达载频为  $f_0$ ,频率步长为  $\Delta f$ ,则某一脉冲串内第  $n$  个脉冲的频率为  $f_n = f_0 + n\Delta f$ . $M$  表示雷达观测时间内脉冲串的累积数目.

目标回波经混频后可以表示为:

$$s(m, n) = \sum_{k=1}^K \delta_k \exp\left(-\frac{j4\pi f_n r_k(t_{m,n})}{c}\right) \quad (1)$$

其中  $K$  为目标散射点的个数, $\delta_k$  表示第  $k$  个散射点的散射强度, $c$  为光速.假定同一脉冲串内目标旋转所带

来的影响可以忽略,则式(1)中  $r_k(t_{m,n})$  可以表示为速度和加速度的关系式(见式(2)).

$$r_k(t_{m,n}) = r_{k0} + \Delta r_{km} + v_R t_{m,n} + \frac{1}{2} a_R t_{m,n}^2 \quad (2)$$

其中  $r_{k0}$  为第  $k$  个散射点在  $t_{m,n} = 0$  时与雷达得距离, $\Delta r_{km}$  表示目标旋转  $m$  个脉冲串周期所带来的距离变化量.将式(2)和  $t_{m,n} = (Nm + n)/PRF$  带入式(1)得:

$$\begin{aligned} s(m, n) &= \sum_{k=1}^K \delta_k \exp\left[-\frac{j4\pi}{c}(f_0 + n\Delta f)\left(r_{k0} + \Delta r_{km} + v_R t_{m,n} + \frac{1}{2} a_R t_{m,n}^2\right)\right] \\ &= \sum_{k=1}^K \delta_k \exp\left\{-\frac{j4\pi}{c}(f_0 + n\Delta f)\left[r_{k0} + \Delta r_{km} + \frac{v_R Nm}{PRF} + \frac{1}{2} a_R \left(\frac{Nm}{PRF}\right)^2\right]\right\} \\ &\quad \cdot \exp\left[-\frac{j4\pi}{c}(f_0 + n\Delta f)\left(v_R + \frac{a_R Nm}{PRF}\right)\frac{n}{PRF}\right] \\ &\quad \cdot \exp\left[-\frac{j4\pi}{c}(f_0 + n\Delta f)\frac{a_R}{2}\left(\frac{n}{PRF}\right)^2\right] \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中相位项包含三项:第一项是各散射点距离在  $t = \frac{Nm}{PRF}$  时刻的相位延迟,是高分辨距离成像所需要的信息;第二项是目标速度引入的附加相位项,包括一次项和二次项;第三项是目标加速度引入的附加相位项,包括二次项和三次项.其中相位一次项会使高分辨距离像发生移位,但不会影响距离像的形状,高分辨距离成像过程中不需要补偿;二次项和三次项都会导致距离像展宽和峰值降低,使 ISAR 成像结果在距离向上出现模糊.

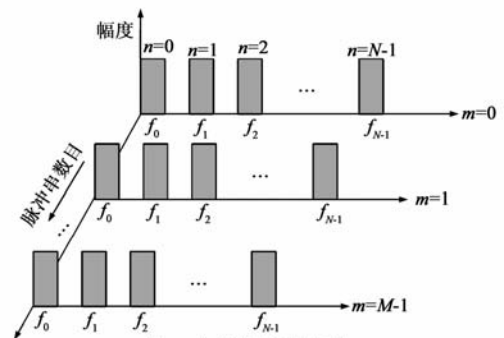


图2 步进频信号波形

## 3 基于波形预先设计和相位对消技术的成像方法

### 3.1 波形设计

预先设计的步进频信号如图 3 所示,每个脉冲串由两组脉冲构成,每组脉冲除重复时间外的其他信号参数均与普通步进频信号相同,第一组脉冲的时延由式(4)计算,第二组脉冲的发射时延由式(5)计算.

$$\tau_n = \frac{nf_0 T}{(f_0 + n\Delta f)} \quad (4)$$

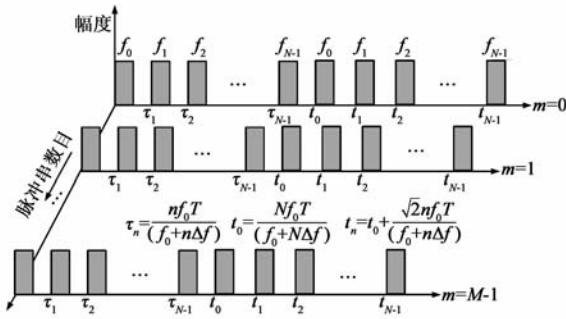


图3 预先设计的步进频信号波形

$$t_n = t_0 + \frac{\sqrt{2}nf_0 T}{(f_0 + n\Delta f)} \quad (5)$$

其中  $T$  为固定的时间参数且  $t_0 = \frac{Nf_0 T}{(f_0 + N\Delta f)}$ , 则每一脉冲串的周期为  $T_s = \frac{(1+\sqrt{2})Nf_0 T}{(f_0 + N\Delta f)}$ . 对于每组脉冲, 信号发射时延可以分别表示为:

$$t_{1m,n} = mT_s + \tau_n \quad (6)$$

$$t_{2m,n} = mT_s + t_n = mT_s + t_0 + \sqrt{2}\tau_n \quad (7)$$

将式(6)代入式(3), 可以得到新波形第一组脉冲回波的表示式:

$$\begin{aligned} s_1(m, n) &= \sum_{k=1}^K \delta_k \exp \left[ -\frac{j4\pi}{c} (f_0 + n\Delta f) \left( r_{k0} + \Delta r_{km} + v_R t_{1m,n} + \frac{1}{2} a_R t_{1m,n}^2 \right) \right] \\ &= \sum_{k=1}^K \delta_k \exp \left\{ -\frac{j4\pi}{c} (f_0 + n\Delta f) \left[ r_{k0} + \Delta r_{km} + v_R mT_s + \frac{1}{2} a_R (mT_s)^2 \right] \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left[ -\frac{j4\pi}{c} (v_R + a_R mT_s) n f_0 T \right] \\ &\quad \cdot \exp \left[ -\frac{j4\pi a_R}{c} \frac{(n f_0 T)^2}{2 f_0 + n\Delta f} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)中的相位项同样包含三项, 分别为  $t = mT_s$  时刻各散射点距离的相位延迟、目标速度引入的附加相位项和目标加速度引入的附加相位项. 由式可见, 目标速度引入的附加相位项只包含一次项, 对高分辨距离成像的影响是使距离像产生移位, 但不影响距离像的形状; 目标加速度引入的附加相位项为分数项, 仍然会导致距离像的展宽和峰值降低.

### 3.2 相位对消技术

将式(7)代入式(3), 可以得到第二组回波的表示式:

$$\begin{aligned} s_2(m, n) &= \sum_{k=1}^K \delta_k \exp \left[ -\frac{j4\pi}{c} (f_0 + n\Delta f) \left( r_{k0} + \Delta r_{km} + v_R t_{2m,n} + \frac{1}{2} a_R t_{2m,n}^2 \right) \right] \\ &= \sum_{k=1}^K \delta_k \exp \left\{ -\frac{j4\pi}{c} (f_0 + n\Delta f) \left[ r_{k0} + \right. \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\left. \Delta r_{km} + v_R (mT_s + t_0) + \frac{1}{2} a_R (mT_s + t_0)^2 \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left\{ -\frac{j4\pi}{c} [v_R + (a_R mT_s + t_0)] \sqrt{2} n f_0 T \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left[ -\frac{j4\pi a_R}{c} \frac{2(n f_0 T)^2}{2 f_0 + n\Delta f} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

假定在一个脉冲串周期内, 目标相对散射点不发生变化, 目标回波信号可以利用表达式(10)进行相位对消:

$$s_0(m, n) = \frac{(s_1(m, n))^2}{s_2(m, n)} \quad (10)$$

将式(8)和式(9)代入, 经过化简得到:

$$\begin{aligned} s_0(m, n) &= \sum_{k=1}^K \delta_k \exp \left[ -\frac{j4\pi}{c} (f_0 + n\Delta f) (r_{k0} + \Delta r_{km}) \right] \\ &\quad \cdot \exp \left\{ -\frac{j4\pi}{c} [(\sqrt{2}-1)(v_R + a_R mT_s) - a_R t_0] \sqrt{2} n f_0 T \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left\{ -\frac{j4\pi}{c} (f_0 + n\Delta f) \left[ v_R mT_s + \frac{a_R}{2} (mT_s)^2 - v_R t_0 - a_R mT_s t_0 - \frac{a_R}{2} t_0^2 \right] \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

通过对消处理后, 式(11)中由目标运动速度和加速度所带来的相位附加项只包括一次项, 因此对式(11)作快速傅立叶变换便可以得到目标高分辨距离像.

### 3.3 运动补偿方法及物理意义

利用步进频信号观测目标时, 目标的运动会使回波相位产生调制, 使之成为多项式相位信号, 无法利用傅立叶变换直接对回波进行高分辨距离成像. 存在三种方法可以用于解决这一问题, 第一种是利用参数估计方法从回波信号中估计出目标运动参数, 补偿后成像; 第二种是鉴于利用傅立叶变换只能对相位线性变化的信号进行聚焦, 可以研究其他变换方式来代替傅立叶变换进行成像; 第三种方法是研究新的信号调制方式, 使目标运动对回波的调制可以忽略或者很容易被补偿. 本文方法是通过预先设计信号脉冲时延, 用以消除目标速度和信号频率的耦合, 对于目标加速度对相位的影响, 本文通过两组不同延迟时间的脉冲回波进行对消处理, 以消除加速度对目标相位调制的高次相位项.

通过上述处理后, 目标运动只会使距离像产生移位, 而不会影响距离像的聚焦. 然而目标的非合作运动不仅导致散射点在每个距离像中处于不同单元内, 且会破坏距离像间的相干性. 因此必须进行补偿, 通过包络对齐处理将不同距离像上相应的散射点对齐到同一距离单元中, 然后通过相位校正恢复不同距离像之间的相干性. 经过运动补偿后的信号等效为目标转台数据, 通过  $\Delta r_{km}$  的近似线性变化对回波产生的相位调制而获得横向分辨率.

### 3.4 误差分析与实际应用探讨

与常规步进频雷达相比, 本文所设计的信号波形脉

冲重复时间是不断变化的,其变化趋势如图4所示,假设实际过程中雷达脉冲重复时间的最大误差为 $\Delta t$ ,则两组脉冲回波的表达式可分别表示为:

$$\bar{s}_1(m, n) = s_1(m, n) \cdot \exp\left[-\frac{j4\pi}{c}(f_0 + n\Delta f)(v_R\Delta t + a_R t_{1m,n}\Delta t)\right] \quad (12)$$

$$\bar{s}_2(m, n) = s_2(m, n) \cdot \exp\left[-\frac{j4\pi}{c}(f_0 + n\Delta f)(v_R\Delta t + a_R t_{2m,n}\Delta t)\right] \quad (13)$$

令 $v_{\max} = v_R + a_R MT_s$ ,则每组脉冲的最大相位误差和对消后回波的最大相位误差可分别表示为:

$$\Delta\bar{s}_1(m, n) = \exp\left[-\frac{j4\pi}{c}(f_0 + n\Delta f)v_{\max}\Delta t\right] \quad (14)$$

$$\Delta\bar{s}_2(m, n) = \exp\left[-\frac{j4\pi}{c}(f_0 + n\Delta f)v_{\max}\Delta t\right] \quad (15)$$

$$\Delta\bar{s}_0(m, n) = \exp\left[-\frac{j4\pi}{c}3(f_0 + n\Delta f)v_{\max}\Delta t\right] \quad (16)$$

要保证本文方法有效必须满足下述条件:(1)要求每组回波和对消后回波的最大相位误差不会使目标散射点在距离像成像时间内发生越距离单元走动;(2)保留相位相干特性,对回波作傅立叶变换后能聚焦,本文中设定为相位误差小于 $\frac{\pi}{4}$ .因此可得下述不等式:

$$\left|3v_{\max}\Delta t\right| < \frac{c}{2B} \quad (17)$$

$$\left|\frac{4\pi}{c}3(f_0 + n\Delta f)v_{\max}\Delta t\right| < \frac{\pi}{4} \quad (18)$$

综合式(17)、(18),代入 $v_{\max}$ 可得:

$$\Delta t < \left|\frac{c}{48(f_0 + n\Delta f)(v_R + a_R MT_s)}\right| \quad (19)$$

式(19)即为脉冲重复时间的精度要求.在工程实现时,雷达通过晶振参考源以倍频的方式控制脉冲重复时间,其精度为晶振参考源的振荡周期,一般可以达到 $0.01\mu\text{s}$ 甚至更高,同时在设计电路时,可以使接收信号和参考信号通过相同数量的器件来获得大致相同的时延,因此误差精度主要由晶振参考源的振荡周期决定.

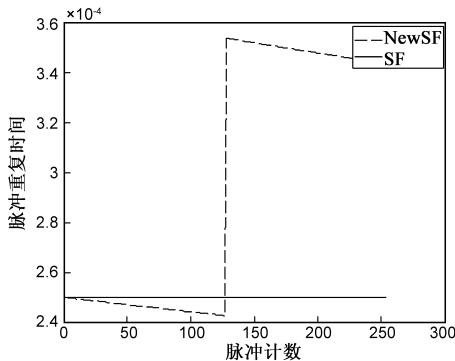


图4 脉冲重复时间变化趋势

## 4 成像试验及结果分析

### 4.1 仿真数据验证试验

假设雷达工作在 X-波段,其中心频率为 10GHz,每个脉冲串有 2 组脉冲,每组脉冲包含  $N = 128$  个脉冲,频率步长为  $\Delta f = 1.172\text{MHz}$ ,由此获得 150MHz 的带宽,时间参数  $T = 0.25\text{ms}$ ,脉冲串的周期为  $T_s = 0.0761\text{s}$ .目标模型如图 5(a)所示,目标包含 23 个散射点,且散射强度均相同,目标距离雷达 20km 向雷达方向飞行,假设径向速度和加速度分别为  $v_R = 300\text{m/s}$  和  $a_R = 20\text{m/s}^2$ ,目标相对于雷达的转动速度为  $0.003\text{rad/s}$ ,脉冲串的积累数目为  $M = 128$ ,由此获得的方位分辨率为  $0.483\text{m}$ .假设常规步进频雷达信号的脉冲周期为  $T$ ,图 5(b)给出了分别利用常规步进频信号和新的步进频信号的距离像成像结果,可以看出,常规步进频信号对目标由于运动引起的相位高次项没有抑制作用,距离像存在散焦现象,新波形生成的高分辨距离像没有高次项的影响,距离像没有出现散焦现象,只存在一次项引起的距离像移位.分别利用互相关法<sup>[13]</sup>和多普勒中心跟踪方法<sup>[14]</sup>对新波形的高分辨距离像进行包络对齐和初相校正后的 ISAR 成像结果如图 5(c)所示,可以看出,利用新波形对匀加速运动目标进行观测,可获得高质量的 ISAR 像.

由式(19)可知, $\Delta t \approx 1.4 \times 10^{-6}\text{s}$ ,设定脉冲重复时间

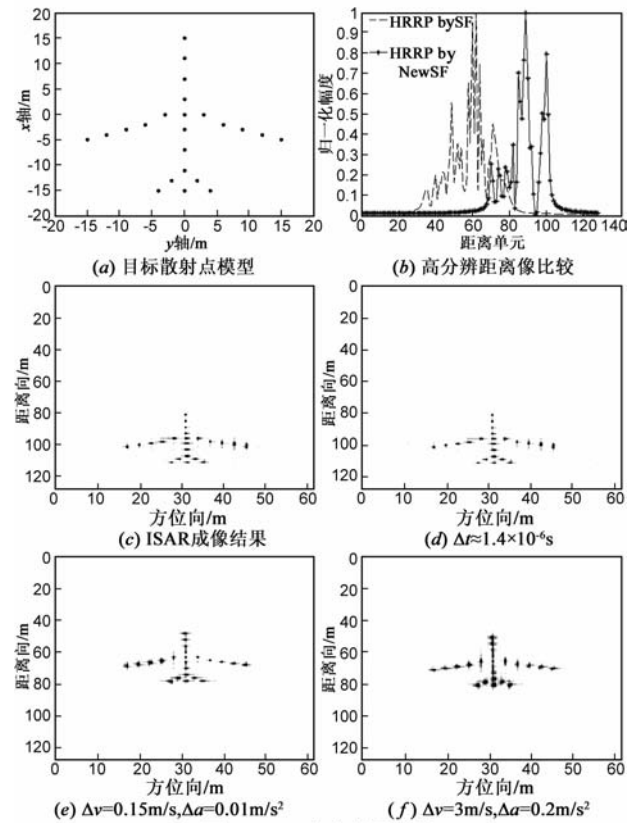


图5 ISAR成像结果比较

的误差在 $[-\Delta t, \Delta t]$ 内均匀分布,利用本文方法进行 ISAR 成像的最终结果如图 5(d)所示,利用图像对比度对成像效果进行分析<sup>[1]</sup>,可知图 5(c)和图 5(d)的图像对比度分别为 17.455 和 16.223.可知,当满足式(19)时,本文算法仍具有较好的成像效果.

文献[9]分析了参数估计方法能容忍的最大速度估计误差范围,将本文参数代入可得最大速度估计误差为 $\Delta v = 0.4\text{m/s}$ ,为比较算法的性能,在此也模拟了利用参数估计结果对目标回波进行补偿后成像的结果,图 5(e)和图 5(f)分别给出了目标运动参数的估计误差为 $\Delta v = 0.15\text{m/s}$ , $\Delta a = 0.01\text{m/s}^2$ 和 $\Delta v = 3\text{m/s}$ , $\Delta a = 0.2\text{m/s}^2$ 时的成像结果.目标在图 5(c)和图 5(e)的位置不一样,这是由于本文方法没有消除目标运动引入的一次相位项造成的.通过计算可知图 5(e)和图 5(f)的对比度分别为 17.242 和 15.287,对比图 5(c)可知,当估计误差为小于最大速度估计误差时,补偿后成像的结果与本文提出的方法结果相当,而当估计误差为 $\Delta v = 3\text{m/s}$ , $\Delta a = 0.2\text{m/s}^2$ 时,补偿后的成像结果在距离向上分辨率降低.在目标可近似为匀加速运动情况下,本文方法没有估计运动参数,因此计算量相对较小且成像效果不受参数估计精度的影响.

## 4.2 实测数据验证试验

在前面的分析中,我们利用理想散射点仿真数据验证了本文方法的有效性,理想的散射点模型在目标处于光学区时适用,然而它不能完全反映复杂目标的电磁散射机理,本节利用实测数据验证方法的有效性.

由于目前没有本文设计所雷达信号的实测数据,因此需要对实测数据进行转换,其过程如下:首先对实测线性调频信号解线频调,获得目标距离像序列,然后进行包络对齐和初相校正,将校正后的数据通过逆傅立叶变换重新变换到原始数据域.此时的雷达回波等效为目标转台模型的回波,即目标平动分量已完全补偿掉.然后将每两个脉冲回波的数据分为一组,分别对应所设计波形的前一组脉冲数据和后一组脉冲数据.假设目标运动速度和加速度分别为 $v_R = 300\text{m/s}$ 和 $a_R = 20\text{m/s}^2$ ,时间参数 $T = 0.05\text{ms}$ ,雷达中心频率为 $10\text{GHz}$ ,带宽为 $1\text{GHz}$ ,每个脉冲的采样频点数为 1000,则每个采样频点数据的回波相位延迟项可由式(8)和式(9)中含有 $v_R$ 或 $a_R$ 的相位项计算得到.对每一个频点数据分别乘以相对应的相位延迟项就可转换为所设计波形的回波数据.

雷达积累脉冲数为 512,由此通过上述转换可得到 256 组新信号波形的回波,假设常规步进频雷达信号的脉冲周期为 $T$ ,图 6(a)给出了分别利用常规步进频信号和新的步进频信号的距离像成像结果.由图可知,目

标运动导致常规步进频信号合成的距离像散焦严重,不能反映目标散射点的径向分布,而新信号波形没有高次项的干扰,距离像没有产生散焦现象.包络对齐后的结果如图 6(b)所示,其中个别脉冲时间内没有回波存在,这是由于雷达没有跟踪上目标所致;另外由于相邻两组回波存在微小变化,导致对消后少数脉冲的距离像变化较大,这基本上不影响最后的成像结果.对包络对齐后的距离像序列进行初相校正后的 ISAR 成像结果如图 6(c)所示,由成像结果可以明显看出飞机的轮廓.

由式(19)可知,脉冲重复时间误差 $\Delta t \approx 1.12 \times 10^{-6}\text{s}$ ,当脉冲重复时间的误差在 $[-\Delta t, \Delta t]$ 内均匀分布时,ISAR 成像结果如图 6(d)所示,通过计算可知图 6(c)和图 6(d)的对比度分别为 17.418 和 16.761,可见,当满足式(19)时,图像对比度下降不大,本文方法仍然有效.

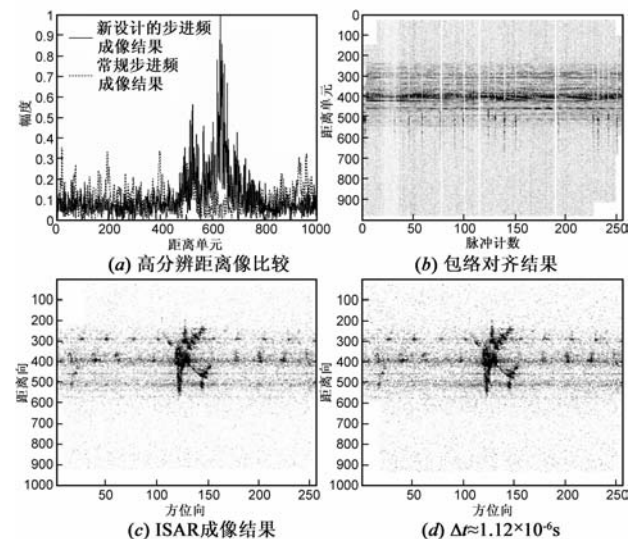


图 6 实测数据 ISAR 成像结果比较

## 5 结束语

目标运动会导致步进频信号回波相位增加高次项,造成成像模糊.本文针对可近似为匀加速运动的目标,提出一种基于波形预先设计和相位对消技术组合的 ISAR 成像方法,首先通过预先设计步进频的脉冲延迟时间来消除目标速度引入的相位高次项,然后利用相位对消技术抵消目标加速度引入的相位高次项,成像过程不需要估计目标运动参数,简化了算法流程.分别利用仿真数据和实测数据演示了基于本文方法的成像结果,证实了算法的有效性.需要指出的是,当目标在成像时间内存在大机动时,无法近似为匀加速运动,其成像方法还有待于进一步的研究.

## 参考文献

- [1] M Martorella, B Haywood, F Berizzi, E Dalle Mese. Performance analysis of an ISAR contrast-based autofocus algorithm

- rithm using real data [A]. Proceedings of the International Radar Conference [C]. USA: IEEE Press, 2003. 30 – 35.
- [2] D Yau, P E Berry, B Haywood. Eigenspace-based motion compensation for ISAR target imaging [J]. EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2006: 1 ~ 9, Article ID: 90716.
- [3] Ho-Ryung Jeong, Hyo-Tae Kim, Kyung-Tae Kim. Application of subarray averaging and entropy minimization algorithm to stepped-frequency ISAR autofocus [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56(4): 1144 – 1154.
- [4] Marco Martorella, Fabrizio Berizzi, Silvia Bruscoli. Use of genetic algorithms for contrast and entropy optimization in ISAR autofocus [J]. EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2006, Article ID: 87298.
- [5] S H Park, H T Kim. Stepped-frequency ISAR motion compensation using Particle Swarm Optimization with an island model [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2008, PIER 85: 25 – 37.
- [6] Igor Djurović, Thayananthan Thayaparan, Ljubiša Stanković. Adaptive local polynomial Fourier Transform in ISAR [J]. EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2006, Article ID: 36093.
- [7] 陈行勇, 姜卫东, 刘永祥, 黎湘, 郭桂蓉. 相位匹配处理微动目标 ISAR 成像 [J]. 电子学报, 2007, 35(3): 435 – 440. CHEN Hang-yong, JIANG Wei-dong, LIU Yong-xiang, et al. Phase matching processing for ISAR imaging of target with micro-motion [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 435 – 440. (in Chinese)
- [8] Chen Hang-yong, Liu Yong-xiang, Jiang Wei-dong, Guo Guirong. Phase cancellation for synthesizing range profile of target with micro-motion [A]. 2006 CIE International Conference on Radar [C]. China: CIE Press, 2006, 817 – 820.
- [9] 罗贤全, 于久恩, 尚朝轩, 黄允华. 步进频雷达目标 ISAR 成像运动补偿新方法 [J]. 宇航学报, 2007, 28(5): 1288 – 1294.
- [10] F Berizzi, M Martorella, A cacciamano. Synthetic range profile focusing via contrast optimization [A]. Proceedings of the International Radar Conference [C]. USA: IEEE Press, 2007. 3563 – 3566.
- [11] 毛二可, 龙腾, 韩月秋. 频率步进雷达数字信号处理 [J]. 航空学报, 2001, 22(6): 16 – 25.

- [12] 李耽, 龙腾. 步进频率雷达目标去冗余算法 [J]. 电子学报, 2000, 28(6): 60 – 63. LI Dan, LONG Teng. Target's redundancy removed algorithms of step frequency radar [J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(6): 60 – 63. (in Chinese)
- [13] C C Chen, H C Andrews. Target motion induced radar imaging [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1980, AES – 16(1): 2 – 14.
- [14] A Ausherman, A Kozma, J L Waker. Developments in radar imaging [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1984, AES – 20(8): 363 – 400.

#### 作者简介



**胡杰民** 男, 1983 年生于安徽省绩溪县, 现为国防科技大学信息与通信工程专业博士生, 研究方向为自动目标识别, 雷达成像等。  
E-mail: hujiemindawang@126.com



**付耀文** 男, 1976 年生于江西进贤县, 国防科技大学空间电子信息技术研究所副教授, 研究方向为雷达目标识别, 信息融合等。



**黎湘** 男, 1967 年生湖南省浏阳市, 国防科技大学空间电子信息技术研究所所长, 教授, 博士生导师. 研究方向为空间信息处理, 自动目标识别, 非线性信号处理等。

**景宁** 男, 1963 年生. 国防科技大学电子科学与工程学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为分布式数据库, 地理信息系统, 雷达信号处理等。