

## 高速目标解调频处理的相位特性及其补偿

冯德军 王雪松 肖顺平 王国玉  
(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

**摘要:** 对宽带回波进行解调频(Dechirping)处理是降低信号处理带宽的有效方法, 但该方法会带来残余相位。在目标高速运动的情况下, 解调频处理和目标运动产生的残余相位对二维成像的影响不可忽略。该文推导了高速目标解调频处理的相位特性, 分析了各项相位因子的性质, 提出了残余相位的补偿方法, 进一步分析了影响补偿精度的因素, 并根据残余相位特性提出了一种新的补偿方法: 利用包络对齐估计相邻回波的残余相位差, 达到精细补偿的目的。仿真结果表明理论和方法的正确性。

**关键词:** 运动目标; 解调频; 相位特性; 相位补偿

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)04-0916-05

## Phase Signatures and Compensating Approach to Moving Target Echoes by Dechirping Processing

Feng De-jun Wang Xue-song Xiao Shun-ping Wang Guo-yu  
(The Electron Sci. and Eng. Inst., Nat. Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Dechirping is an effective method for decreasing the bandwidth of input signals. For high velocity moving targets ISAR imaging, the residual phase arisen from dechirping processing and target moving can not be ignored. The theoretic model of phase signatures is derived thoroughly and the compensation methods are presented when dechirping technology is employed. In addition, the factors which influence residual phase and the precision of compensating are analyzed. According to the signatures of residual phase, a new compensation method is proposed in which the range alignment is applied to estimate the residual phase difference of adjacent echoes. Numerical simulation results illustrate the validities of proposed theories and methods.

**Key words:** Moving target; Dechirping; Phase signature; Phase compensation

### 1 引言

现代雷达应用十分广泛的宽带信号是线性调频(LFM)信号, 对它的处理不但可以采用匹配滤波方法, 还可以用解调频(dechirping)方法<sup>[1]</sup>。解调频处理的优点是能将大带宽信号转换为中频甚至视频信号, 大大降低对硬件的要求, 因此在一维和二维成像中应用甚广<sup>[2]</sup>, 该方法虽然带来应用上的简便, 但会带来残余相位。特别是在目标高速运动的情况下, 目标的高速运动不但带来距离像的展宽, 也会产生相位因子的畸变<sup>[3]</sup>。解调频产生的残余相位和由运动导致的相位畸变(为方便起见, 本文将其统称为残余相位)扰乱了各散射中心相对雷达视线的相对相位变化, 造成各次回波相位关系的紊乱, 使得后续的横向压缩无法进行, 为进行二维成像, 必须进行准确补偿。

雷达成像中应用较广的相位补偿方法有特显点法、多特显点综合法和相位梯度法等<sup>[4-6]</sup>。这些方法的实质均是以一个(或多个)距离分辨单元为基准, 对其它单元进行校准, 因此它只能补偿掉那些对分辨单元影响相同的相位因子, 而无

法补偿残余相位(因为残余相位与各散射点的相对位置密切相关)。文献[7]在没有考虑目标高速运动影响的情况下, 提出了一种残余相位的补偿方法, 其基本思想是: 对解调频的信号进行频谱估计, 利用估计结果在频域进行补偿, 这种方法由于受到频谱估计精度的影响, 其补偿精度难以令人满意。本文首先从理论上推导了高速目标解调频处理的相位模型, 提出了相应的补偿方法, 分析了补偿精度。然后根据残余相位的特性, 提出利用包络对齐补偿残余相位的新思想, 并进行了相应的理论分析和仿真试验。

### 2 解调频处理的残余相位及其补偿

解调频处理方法亦称“全去斜率脉压处理方法”, 文献[1]称为 STRETCH 处理方法, 该方法常用于对大带宽回波信号处理。设雷达发射线性调频信号, 其回波信号  $S_R(t)$  为

$$S_R(t, t_m) = \text{rect}\left\{\frac{\hat{t} - \tau}{T}\right\} \exp\left\{2j\pi\left[f_0(t - \tau) + \frac{1}{2}\gamma(\hat{t} - \tau)^2\right]\right\} \quad (1)$$

式中  $\text{rect}(t)$  为矩形包络,  $\tau$  为回波延时,  $f_0$  为起始频率,  $T$  为时宽,  $\gamma$  为调频斜率,  $\hat{t}$  为以发射时刻为起点的快时间,  $t_m = mT$  为慢时间, 这两个时间与全时间  $t$  的关系为  $\hat{t} = t - mT$ 。进行去斜处理, 当雷达和目标相距为  $R$  时, 采用距离参考延时为  $\tau_0$ , 处理后输出为

2006-06-26 收到, 2006-12-20 改回

国家自然科学基金(60672033), 新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0997)和全国优秀博士论文专项资金(08100101)资助课题

$$S_f(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left\{\frac{\hat{t} - \tau}{T}\right\} \exp\left\{-j\frac{4\pi}{C}\gamma(\hat{t} - \tau_0)R_\Delta\right\} \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi}{C}f_0R_\Delta\right\} \exp\left\{j\frac{4\pi\gamma}{C^2}R_\Delta^2\right\} \quad (2)$$

式中  $R_\Delta = R - R_0$ ,  $R_0 = C\tau_0/2$ ,  $C$  为光速。可见去斜率混频器输出为一单频信号, 其频率和目标与参考信号间的距离  $R_\Delta$  成比例。为获得参考时延  $\tau_0$ , 雷达通常采用宽、窄带分时工作的方式。观察式(2), 令  $\tilde{t} = \hat{t} - \tau_0$ , 即将以发射时刻为起点的快时间转换为以参考点为起点的快时间。同时考虑到  $f_0\lambda = C$ ,  $\lambda$  为波长, 将式(2)重写如下:

$$S_f(\tilde{t}) = \text{rect}\left\{\frac{\tilde{t} - 2R_\Delta/C}{T}\right\} \exp\{-4j\pi\gamma\tilde{t}R_\Delta/C\} \cdot \exp\{-4j\pi R_\Delta/\lambda\} \cdot \exp\{4j\pi\gamma R_\Delta^2/C^2\} \quad (3)$$

式(3)中的相位项共包含3项: 第1项为距离项, 它表征了目标和参考点的相对距离; 第2项为线性相位项, 当  $R_\Delta$  变化时, 该项产生线性相位变化; 第3项为解线性调频方法所特有的, 称为残余视频相位(RVP), RVP项于成像无益, 应该补偿。文献[2]提出了一种补偿方法, 令  $f_i = -2\gamma R_\Delta/C$ , 对式(3)进行傅氏变换, 得到

$$S_f(f_i) = T \text{sinc}\left[T\left(f_i + 2\frac{\gamma}{C}R_\Delta\right)\right] \cdot \exp\left\{-j\left[4\pi R_\Delta/\lambda - 4\pi R_\Delta^2/C^2 + 4\pi f_i R_\Delta/C\right]\right\} \quad (4)$$

式(4)中最后一项相位称为包络斜置相位, 它是由各散射点回波在时间上错开而带来的, 也应当补偿。后两项相位经进一步化简为

$$\Delta\Phi = 4\pi\gamma R_\Delta^2/C^2 - 4\pi f_i R_\Delta/C = 3\pi f_i^2/\gamma \quad (5)$$

因此, 通过频谱估计获得  $f_i$  后, 在频域乘以补偿因子  $\exp(-3j\pi f_i^2/\gamma)$ , 则 RVP 和包络斜置项都得到补偿。

注: 式(5)与参考文献[7]中结果不同, 这是因为文献[7]推导时发生了错误, 读者可自己推导。

### 3 高速目标解调频处理的相位特性

当雷达和目标径向速度很小时, 可以认为在脉冲持续时间内雷达与目标的距离近似不变, 但当目标速度较高时, 该假设就不再成立。假设目标和雷达的径向速度为  $v$ , 即雷达与目标的距离变为  $R' = R + vt$ 。用  $R'$  代替  $R$ , 仍采用  $\tau_0$  作为参考混频时延, 进行混频后, 可得到:

$$S_f'(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left\{\frac{(\hat{t} - \tau_0)\left(1 - \frac{2v}{C}\right) - (\tau - \tau_0 + \frac{2v}{c}\tau_0)}{T}\right\} \cdot \exp\left\{j\pi\gamma\left[(\tau - \tau_0)^2 + \frac{4v}{C}\tau_0(\tau - \tau_0)\right]\right\} \cdot \exp\left\{-2j\pi f_0\left(\tau - \tau_0 + \frac{2v}{C}\tau_0\right)\right\} \cdot \exp\left\{-2j\pi\gamma\left[\tau - \tau_0 - \frac{2v}{C}\tau + \frac{4v}{C}\tau_0\right](\hat{t} - \tau_0)\right\} \cdot \exp\left\{-2j\pi f_0\frac{2v}{C}(\hat{t} - \tau_0)\right\} \cdot \exp\left\{-2j\pi\gamma\frac{2v}{C}(\hat{t} - \tau_0)^2\right\} \quad (6)$$

对式(6)进一步化简, 考虑到  $v \ll C$ , 并令  $\tilde{t} = \hat{t} - \tau_0$  则有

$$S_f'(\tilde{t}) = \text{rect}\left\{\frac{\tilde{t} - \left(\frac{2R_\Delta}{C} + \frac{2v}{C}\tau_0\right)}{T}\right\} \cdot \exp\left\{-j2\pi[\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3\tilde{t} + \Phi_4\tilde{t}^2]\right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1 &= -\gamma\left(\frac{2R_\Delta^2}{C^2} + \frac{4v}{C^2}R_\Delta\tau_0\right) \\ \Phi_2 &= f_0\left(\frac{2R_\Delta}{C} + \frac{2v}{C}\tau_0\right) \\ \Phi_3 &= \gamma\left(\frac{2R_\Delta}{C} + \frac{2v}{C}\tau_0\right) + f_0\frac{2v}{C}, \quad \Phi_4 = \gamma\frac{2v}{C} \end{aligned} \right\}$$

由式(7)可以看出, 经混频处理后, 运动目标的回波的相位项共包括4项, 其中  $\Phi_1$  为残余视频相位项,  $\Phi_2$  为线性相位项,  $\Phi_3$  为一维距离像项,  $\Phi_4$  为距离像展宽项。

一维成像时, 一般都只关心一维像的幅度特性, 只需补偿关于  $\tilde{t}$  的一次项和二次项。 $\tilde{t}$  的一次项引起距离像飘移, 可通过后续的包络对齐来消除, 因此, 只要补偿  $\Phi_4$  后, 就可获得较为理想的一维像。文献[8]作了一维像补偿的详细讨论, 在此不多述。倘若要进行二维成像, 则对补偿的要求更高, 不但要获得较理想的脉内信息(一维像), 而且要保持脉间的相位相干关系, 才能进行后续的横向压缩。对于宽窄交替工作方式的雷达而言, 由于每次跟踪的误差不同, 使得同一散射点各次混频处理的  $R_\Delta$  不同, 因此采用宽窄交替工作方式获得的各次宽带混频回波初相是不相干的。为获得相干回波, 在进行包络对齐后, 需要进行相位补偿, 现在采用较多相位补偿方法有特显点法和加权多特显点法。不论是哪一种方法, 相位补偿只能补偿那些对距离分辨率影响相同的相位因子, 如果某项相位因子对各个分辨率单元的影响不同, 则相位补偿方法无法补偿。再来观察式(7), 在补偿掉  $\tilde{t}$  的二次项后, 式(7)还剩余3项, 分别为  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  和  $\Phi_3$ 。其中  $\Phi_3$  只会造成距离像的飘移, 可以通过后续包络对齐消除, 因此无需补偿;  $\Phi_2$  为线性相位项, 当  $R_\Delta$  变化时,  $f_0R_\Delta/C$  产生线性的多普勒变化, 这是进行二维成像所必需的, 由目标径向速度引起的相位变化为  $2f_0\tau_0v/C$ , 该项因子虽对成像无益, 但它对于各分辨率单元的影响是相同的, 通过普通的相位补偿可以消除, 因此也无需补偿;  $\Phi_1$  项包括由解调频处理产生的 RVP 项和由于目标运动引起的相位因子  $-4\gamma R_\Delta\tau_0v/C$ , RVP 项和该相位因子对于各个距离分辨率单元是不同的, 为进行二维成像, 必须补偿掉  $\Phi_1$ 。

### 4 高速目标解调频处理的相位补偿方法及精度分析

不论是一维还是二维成像, 首先应当进行距离展宽因子  $\Phi_4$  的补偿<sup>[9]</sup>, 在  $\Phi_4$  被补偿后, 则式(7)变为

$$S_f''(\tilde{t}) = \text{rect}\left\{\frac{\tilde{t} - \left(\frac{2R_\Delta}{C} + \frac{2v}{c}\tau_0\right)}{T}\right\} \exp\left\{-j2\pi[\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3\tilde{t}]\right\} \quad (8)$$

将式(8)变换到频域,则有

$$S_{ij}''(f_j, t_m) = T \text{sinc} \left[ T(f_j + \Phi_3) \right] \cdot \exp(-2j\pi(\Phi_1 + \Phi_2)) \cdot \exp \left[ -2j\pi f_j \left( \frac{2R_\Delta}{C} + \frac{2v}{c} \tau_0 \right) \right] \quad (9)$$

由式(9)可看出,差频回波变换到频域后,成为宽度很窄的 sinc 函数,其峰值位于  $f_j = -\Phi_3$  处。在式(9)的3个相位项中,  $\Phi_2$  无需补偿,  $\Phi_1$  需要补偿,最后一个相位项为回波包络的斜置项,需要消除,因此总的需要补偿的总相位为

$$\Delta\Phi' = -2\pi \left[ \Phi_1 + f_j \left( \frac{2R_\Delta}{C} + \frac{2v}{c} \tau_0 \right) \right] = -2\pi \left[ -\gamma \left( \frac{2R_\Delta^2}{C^2} + \frac{4vR_\Delta\tau_0}{C^2} \right) + f_j \left( -\frac{f_j}{\gamma} - f_0 \frac{2v}{C\gamma} \right) \right] \quad (10)$$

在式(10)中,除开  $R_\Delta$  外,其它的量都是已知的或已经求得的,由于 sinc 函数的峰值位于  $f_j = -\Phi_3$  处,因此有

$$f_j = -\gamma \left( \frac{2R_\Delta}{C} + \frac{2v}{C} \tau_0 \right) - f_0 \frac{2v}{C} \quad (11)$$

通过式(11)可得

$$\frac{R_\Delta}{C} = - \left( \frac{v}{C} \tau_0 + \frac{vf_0}{C\gamma} + \frac{f_j}{2\gamma} \right) \quad (12)$$

将式(11),式(12)代入式(10),可以得到:

$$\begin{aligned} \Delta\Phi' &= -2\pi \left[ \frac{R_\Delta}{C} \left( f_j + f_0 \frac{2v}{C} - \frac{2v}{C} \tau_0 \gamma \right) + f_j \left( -\frac{f_j}{\gamma} - f_0 \frac{2v}{C\gamma} \right) \right] \\ &= -2\pi \left[ - \left( \frac{v}{C} \tau_0 + \frac{vf_0}{C\gamma} + \frac{f_j}{2\gamma} \right) \left( f_j + f_0 \frac{2v}{C} - \frac{2v}{C} \tau_0 \gamma \right) \right. \\ &\quad \left. + f_j \left( -\frac{f_j}{\gamma} - f_0 \frac{2v}{C\gamma} \right) \right] \\ &= 2\pi \left[ \frac{4v}{C\gamma} f_0 f_j + \frac{3}{2\gamma} f_j^2 + \frac{2v^2}{C^2} \left( \frac{f_0^2}{\gamma} - \tau_0^2 \gamma \right) \right] \quad (13) \end{aligned}$$

由式(11),式(13)可看出,若  $v=0$ ,则有  $f_j = f_i$ ,  $\Delta\Phi' = \Delta\Phi$ ,因此,式(5)是式(13)的一种特殊情况。若要补偿残余相位,只需将式(9)乘以下式

$$S_c(f_j) = \exp \left\{ -j2\pi \left[ \frac{4v}{C\gamma} f_0 f_j + \frac{3}{2\gamma} f_j^2 + \frac{2v^2}{C^2} \left( \frac{f_0^2}{\gamma} - \tau_0^2 \gamma \right) \right] \right\} \quad (14)$$

就可将式中的混频处理相位项、包络斜置相位项及由运动引起的残余相位项补偿掉,再通过逆变换变回到时域,就可进行后续的一维成像和二维成像处理。补偿和处理的基本流程如图1所示。

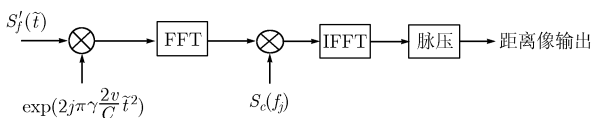


图1 高速目标宽带回波解调频后补偿和脉压处理流程

理论上,根据式(14)进行残余相位补偿后,可以将残余相位完全补偿掉,但实际上由于测速的误差及频谱估计精度的影响,残余误差不可能被完全补偿掉,会有一定的残余。

观测式(14),需要雷达确定的量为目标飞行速度和差频值  $f_j$ ,它们的估计误差也会引起补偿残余。倘若雷达估计的目标速度为  $\hat{v} = v + \Delta v$ ,其中  $\Delta v$  为估计误差,考虑到  $\Delta v \ll v$ ,则由于  $\Delta v$  引起的补偿残余为

$$\Delta\Phi_\Delta = -2\pi \left[ \frac{4\Delta v}{C\gamma} f_0 f_j + \frac{2\Delta v \cdot v}{C^2} \left( \frac{f_0^2}{\gamma} - \tau_0^2 \gamma \right) \right] \quad (15)$$

设信号中心频率  $f_0 = 10\text{GHz}$ ,带宽  $B = 1\text{GHz}$ ,脉宽  $T = 100\mu\text{s}$ ,当  $\Delta R = 1\text{m}$  时,则由  $\Delta v$  引起的  $\Delta\Phi_\Delta$  如图2所示。由图2可知,速度估计误差与其引起的补偿误差呈线性关系。在速度误差相同的条件下,速度较高时补偿误差也较大,为保证补偿精度,对于高速目标应保证较高的测速精度。在宽窄交替的工作模式下,一般由窄带提供目标的径向速度,但这种方法精度较低,为提高精度,可以采用宽带脉冲测速。可采用两种方法实现,一种是借助于相邻回波的滑动互相关处理,测得一个脉冲周期的移动距离,从而推算出目标的瞬时径向速度;另一种方法为对未进行的补偿的回波(式(7))进行解调频处理,从而精确测出目标的速度<sup>[9,10]</sup>。采用高精度测速技术后,由  $\Delta v$  引起的补偿残余可以达到  $10^{-5}$  量级甚至更小,达到较好的补偿效果。

采用式(14)式进行补偿时,还需根据回波估计出差频频谱  $f_j$ ,该项估计也是有偏差的,不妨设其估计值为  $\hat{f}_j = f_j + \Delta f_j$ ,式中  $\Delta f_j$  为估计偏差,则由  $\Delta f_j$  引起的估计偏差为

$$\Delta\Phi'_\Delta = -2\pi \left[ \frac{4v}{C\gamma} f_0 \Delta f_j + \frac{3f_j \cdot \Delta f_j}{\gamma} \right] \quad (16)$$

$f_j$  的估计精度取决于信号的时宽,当信号时宽为  $T$  时,  $f_j$  的估计精度为  $1/T$ ,其最大可能的估计偏差为  $1/(2T)$ ,将  $1/(2T)$  代替  $\Delta f_j$ ,代入式(16),可得

$$\Delta\Phi'_{\Delta\text{max}} = -\frac{2\pi}{T\gamma} \left[ \frac{4v}{C} f_0 + 3f_j \right] \quad (17)$$

设定参数同前,则由频谱估计误差引起的最大补偿误差如图3所示。比较图2,图3可看出,由于频谱误差造成的补偿误差要比速度误差引起的补偿误差大得多,它是补偿误差的主要来源。由于频谱估计误差取决于发射信号时宽,而该时宽是有限的,因此由它导致的误差较难减小,为达到更高的补偿精度,应寻求更好的补偿方法。

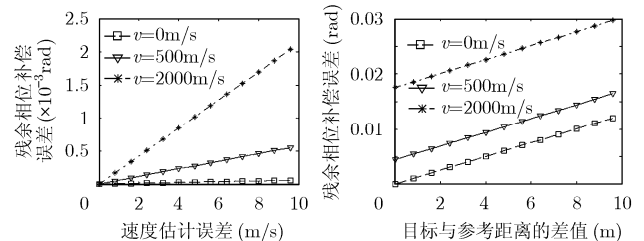


图2 速度误差对补偿精度的影响

图3 频谱估计误差对补偿精度的影响

## 5 利用包络对齐补偿残余相位变化

以上的补偿方法思路是尽量消除各次回波的残余相位,

使各个距离分辨单元的残余相位接近于 0, 但由于信号时宽限制了频谱估计精度, 这种方法难以得到令人满意的结果。不过, 残余相位的绝对大小并不影响成像效果, 真正起作用的因素是成像积累期间各个分辨单元中残余相位的相对变化不一致, 它扰乱了由于目标相对雷达视线转动引起的相对相位变化。因此, 即使不将各个距离单元的残余相位补偿到 0, 如果能使各个单元的残余相位在成像积累期间保持不变(也就是补偿掉残余相位在成像积累期间的变化量), 一样能达到补偿效果。

前已指出, 通过后续的相位补偿可以补偿掉对所有分辨单元影响相同的相位因子, 因此, 对于这种类型的相位因子在残余相位补偿中可以不考虑。观察式(13), 消除与  $R_{\Delta}$  无关的量, 有

$$\Delta\Phi'' = 2\pi \left[ \frac{4v}{C\gamma} f_0 f_j + \frac{3}{2\gamma} f_j^2 \right] \quad (18)$$

不妨设相邻两次脉冲之间残余相位分别为  $\Delta\Phi_1''$  和  $\Delta\Phi_2''$ , 考虑到相邻脉冲的速度变化很小, 则残余相位的变化为

$$\Delta\Phi_{\Delta}'' = 2\pi \left[ \frac{4v}{C\gamma} f_0 (f_{j2} - f_{j1}) + \frac{3}{2\gamma} (f_{j2}^2 - f_{j1}^2) \right] \quad (19)$$

式中  $f_{j1}$ ,  $f_{j2}$  分别为相邻脉冲的差频频率。根据式(11)有

$$f_{j2} - f_{j1} = -\frac{2\gamma}{C} (R_{\Delta 2} - R_{\Delta 1}) \quad (20)$$

式中  $R_{\Delta 1}$ ,  $R_{\Delta 2}$  分别为相邻脉冲目标距离和参考距离之差。

将式(20)代入式(19), 可得

$$\Delta\Phi_{\Delta}'' = -2\pi \left[ \frac{8v}{C^2} f_0 + \frac{3}{C} (f_{j2} + f_{j1}) \right] (R_{\Delta 2} - R_{\Delta 1}) \quad (21)$$

式(21)中,  $R_{\Delta 2} - R_{\Delta 1}$  实质上就是相邻两次脉冲一维像包络位移, 这可通过包络对齐来估计, 通过插值处理, 其精度可以达到 1/8 到 1/10 个距离分辨单元<sup>[11]</sup>。获得包络位移的估值后, 对第 2 个脉冲乘以相位补偿因子  $-\Delta\Phi_{\Delta}''$ , 则可完成对残余相位变化的补偿。对后续的脉冲也进行相同的处理, 则可完成整个成像积累期间所有脉冲的补偿。不妨设  $R_{\Delta 2} - R_{\Delta 1}$  的估计误差为  $\Delta R/8$ ,  $\Delta R$  为距离分辨单元的大小。则可以得到补偿误差为

$$\Delta\tilde{\Phi}_{\Delta}'' = 2\pi \left\{ \frac{8v}{C^2} f_0 + \frac{3}{C} (f_{j1} + f_{j2}) \right\} \Delta R/8 \quad (22)$$

在应用上式时,  $f_{j1}$  和  $f_{j2}$  实际只能通过频谱估计来获得其估计值  $\hat{f}_{j1}$  和  $\hat{f}_{j2}$ , 由于频谱估计误差相对  $f_{j1}$  和  $f_{j2}$  很小, 因此, 由此产生的二次误差可以忽略。设置参数同前, 采用改进的补偿方法后, 得到的补偿误差如图 4 所示。比较图 3 与图 4, 可以看出, 采用改进的补偿方法后, 补偿误差约降低了 10 倍, 这说明新补偿方法是有效的。实际上, 图 4 所示为误差上限, 而一般实际误差总是小于误差上限, 因此, 采用该方法进行补偿效果是比较理想的。

为进一步验证以上方法的有效性, 设置仿真目标结构如图 5 所示, 整个目标由 16 个散射点构成, 目标尺寸  $4 \times 5 \text{m}$ 。目标尖顶的散射点 RCS 为  $2 \text{m}^2$ , 其它散射点均为  $1 \text{m}^2$ 。雷达发射线性调频信号, 中心频率 10GHz, 带宽 1GHz, 脉宽

128 $\mu\text{s}$ 。成像期间累积 128 个脉冲, 相对转角为  $5.8^\circ$ 。采用包络相关对齐法进行距离像对齐, 采用特显点聚焦法进行相位校准, 成像时采用 R-D 算法。不同速度及不同残余相位补偿方法下的成像结果如图 6 所示。

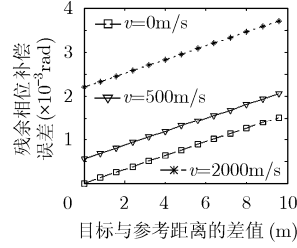


图4 利用包络对齐补偿残余相位的补偿精度

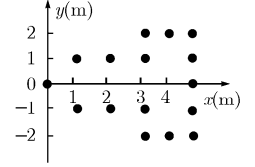
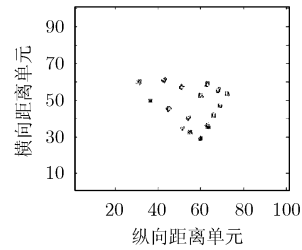
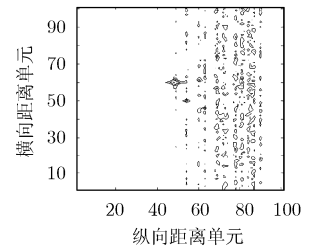


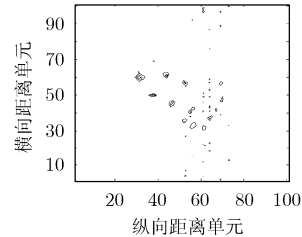
图5 仿真目标散射点结构



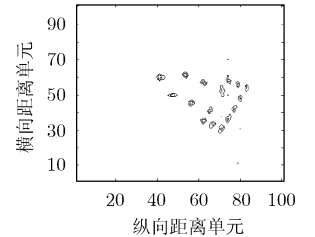
(a)  $v=0\text{m/s}$  时的成像 (根据式(5)补偿)



(b)  $v=3000\text{m/s}$  时的成像 (未补偿)



(c)  $v=3000\text{m/s}$  时的成像 (根据式(14)补偿)



(d)  $v=3000\text{m/s}$  时的成像 (利用包络对齐补偿)

图6 不同速度及不同残余相位补偿方法下的 ISAR 成像结果

从图 6 可以看出, 当目标速度很高时, 不进行残余相位补偿将使得横向压缩时产生严重的散焦现象, 难以再现目标图像。对比两种残余相位补偿方法可以发现, 本节提出的新方法补偿效果更为理想。另外从图 6(c)还可看出, 散射点距相位聚焦点(尖顶点)越远, 则其散焦现象越严重, 这与本文的理论分析是一致的。

## 6 结束语

目标的高速运动不仅会导致一维像的展宽, 还会导致相位的畸变。在解调频处理方式下, 由于处理方法和目标运动带来的残余相位扰乱了各距离单元的相位变化, 为进行二维成像, 必须补偿。本文从理论上推导了高速运动目标在解调频处理方式下回波相位的特点, 分析了影响残余相位补偿精度的因素, 并提出了一种利用包络对齐提高补偿精度的方法, 进行了相应的仿真试验, 结果表明了本文理论和方法的

正确性。本文的结果将有助于对高速目标的二维成像。

### 参考文献

- [1] Caputi W J. Stretch: a time-transformation technique. *IEEE Trans on AES*, 1971, 7(2): 269-278.
- [2] Wehner D R. High resolution radar. London: Artech House, 1995: 98-143.
- [3] Welsh B M and Hawley R W. Linear FM radar effects on moving target signatures. *Proceeding of SPIE*, 2001, 4382: 164-173.
- [4] Wahl D E, Eichel P H, and Chiglia D C. Phase gradient autofocus robust tool for high resolution SAR phase correction. *IEEE Trans on AES*, 1994, 30(3): 827-834.
- [5] Chen C C and Andrews H C. Target-motion-induced radar imaging. *IEEE Trans. on AES*, 1980, 16(1): 2-14.
- [6] Steinberg B D. Radar imaging from a distorted array: the radio camera algorithm and experiment. *IEEE Trans on AP*, 1981, 29(5): 740-748.
- [7] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术. 北京: 电子工业出版社, 2005: 20-30.  
Bao Z, Xing M D, and Wang T. Radar Imaging Technique. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 20-30.
- [8] 黄小红, 邱兆坤, 王伟. 目标高速运动对宽带一维距离像的影响及补偿方法研究 [J]. 信号处理, 2001, 18(6): 487-490.  
Hung X H, Qiu Z K, and Wang W. Research on effect of wideband range profile imaging and compensation method for target moving with high velocity. *Signal Processing*, 2001, 18(6): 487-490.
- [9] 冯德军, 王雪松, 肖顺平等. 基于单个宽带脉冲的空间目标测距和测速方法[J]. 信号处理, 2006, 22(1): 73-77.  
Feng D J, Wang X S, and Xiao S P, *et al.* Method of measuring range and velocity of space target based on single wideband pulse. *Signal Processing*, 2006, 22(1): 73-77.
- [10] Li J, Wu R B, and Chen V C. Robust autofocus algorithm for ISAR imaging of moving targets. *IEEE Trans. on AES*, 2001, 37(3): 1056-1068.
- [11] 王国林, 许荣庆, 刘永坦. ISAR 运动补偿的快速方法[J]. 系统工程与电子技术, 1996, 16(5): 63-69.  
Wang G L, Xu R Q, and Liu Y T. A fast method for ISAR motion compensation. *Systems Engineering and Electronics*, 1996, 16(5): 63-69.
- 冯德军: 男, 1972年生, 讲师, 博士, 研究方向为雷达信号处理与电子战建模仿真.
- 王雪松: 男, 1972年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理和电子战建模仿真.
- 肖顺平: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达目标识别与综合电子战.
- 王国玉: 男, 1962年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为电子战仿真与评估.