

文章编号:1004-9037(2014)04-0562-08

# 机动目标双基地 ISAR 越距离单元徙动校正算法

郭宝锋<sup>1,2</sup> 尚朝轩<sup>1</sup> 高梅国<sup>2</sup> 王俊岭<sup>2</sup> 姜洪伟<sup>2</sup>

(1. 军械工程学院电子与光学工程系, 石家庄, 050003; 2. 北京理工大学雷达技术研究所, 北京, 100081)

**摘要:**逆合成孔径雷达(Inverse synthetic aperture radar, ISAR)使用距离多普勒算法成像时,当目标尺寸较大或转角过大,会发生越距离单元徙动(Migration through resolution cells, MTRC)现象,严重影响目标成像效果。基于双基地 ISAR 转台模型,针对成像的 MTRC 问题,对解线频调后的目标回波进行研究,分析了机动目标 MTRC 的产生机理,并将匹配傅里叶变换(Match Fourier transform, MFT)应用到 MTRC 的校正中,消除了快时间频率与慢时间的耦合项,有效解决了 MTRC 引起的 ISAR 图像散焦问题。仿真结果表明,基于 MFT 的双基地 ISAR MTRC 校正算法能够有效校正机动目标的距离徙动,提高 ISAR 成像质量。

**关键词:**逆合成孔径雷达;双基地;机动目标;越距离单元徙动;匹配傅里叶变换

中图分类号:TN957

文献标志码:A

## Correction Algorithm of Migration Through Resolution Cells in Bistatic ISAR of Maneuvering Target

Guo Baofeng<sup>1,2</sup>, Shang Chaoxuan<sup>1</sup>, Gao Meiguo<sup>2</sup>, Wang Junling<sup>2</sup>, Jiang Hongwei<sup>2</sup>

(1. Department of Electronic and Optical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, 050003, China;

2. Radar Technique Institute, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, China)

**Abstract:** When the size of target is big or the rotation angle is big, migration through resolution cells (MTRC) may occur when employing range-Doppler imaging algorithm in inverse synthetic aperture radar (ISAR), which can affect the imaging quality. Aiming at the problem of MTRC, the echo after dechirping is researched based on bistatic ISAR turntable model. And the cause of MTRC is analyzed. The match Fourier transform (MFT) is used to correct MTRC, which can eliminate the coupling of fast frequency, slow time and solve the image defocusing problem caused by MTRC. Simulation result shows that the correction algorithm based on MFT can correct the MTRC of maneuvering target and improve the image quality.

**Key words:** inverse synthetic aperture radar; bistatic; maneuvering target; migration through resolution cells; match Fourier transform

## 引 言

双基地雷达是发射机和接收机分开放置的雷达系统,该系统收发分置的工作方式使雷达在对抗“四大威胁”方面具有突出的优势<sup>[1]</sup>。双基地 ISAR 是基于双基地雷达平台的 ISAR 系统,在具备“四抗”特性的同时,它利用接收的目标非后向散射回波进行成像,能够较单基地雷达获取更加丰富

的目标信息。

双基地 ISAR 利用距离多普勒原理进行成像时,与单基地 ISAR 类似,经理想的运动补偿<sup>[2]</sup>后,就转化为转台模型<sup>[3]</sup>。由于目标相对收发双站雷达的转动,会引起散射点的 MTRC 现象,尤其是目标尺寸较大或目标转角较大时,距离目标相位中心较远的散射点会越过多个距离单元,难以实现对同一距离单元回波的相干累加,导致 ISAR 图像的模糊、错位,严重时使目标不能成像<sup>[4-6]</sup>。

单基地 ISAR 进行 MTRC 校正主要通过极坐标格式算法<sup>[7,8]</sup> (Polar format algorithm, PFA) 和 Keystone 变换<sup>[9,10]</sup> 实现。PFA 是聚束 SAR 成像中的常用算法,它采用极坐标方式录取回波数据,通过对极坐标的插值转换到直角坐标系下,然后通过二维 FFT 重建目标图像,该算法在小目标远场条件下能有效地精确消除 MTRC。双基地情况下,收发分置使得回波数据在频域发生偏转,回波不仅需要插值,还需要进行旋转处理,步骤复杂、运算量大,同时,该方法需要精确已知目标的转动参数,并且隐含了双基地雷达严格同步的假设<sup>[11]</sup>,因此,PFA 算法在双基地 ISAR 中的应用受到很大的限制。Keystone 变换是一种伸缩变换,通过对回波时频面的不均匀采样,补偿宽带信号距离频率域和方位慢时间域的线性距离走动。在双基地 ISAR 中,Keystone 变换只能补偿双基地角变化产生的等效转动速度<sup>[12-14]</sup>,而对机动目标的快时间频率和慢时间高次耦合项无法消除。

本文基于转台模型,针对解线频调后的回波信号,对机动目标的 MTRC 问题进行研究,分析了产生 MTRC 的原因,将 MFT 应用到机动目标双基地 ISAR 的 MTRC 校正中,仿真验证了方法的有效性。

### 1 双基地 ISAR 转台模型

图 1 为双基地 ISAR 转台模型, $T$  和  $R$  分别为发射站和接收站,双基地角为  $\beta$ , $O$  点为目标质心,以  $O$  为原点,以双基地角平分线为  $y$  轴建立直角坐标系。目标上的某散射点  $P(x_P, y_P)$  以旋转速度  $\omega$  绕  $O$  点转动, $OP$  长度为  $d$ ,起始时刻与  $x$  轴夹角为  $\theta$ 。

发射站雷达以脉冲重复周期 PRT 发射线性调频信号

$$s_t(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \exp\left(j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2}\mu\hat{t}^2\right)\right) \quad (1)$$

式中:  $\text{rect}(u) = \begin{cases} 1 & |u| \leq \frac{1}{2} \\ 0 & |u| > \frac{1}{2} \end{cases}$ ,  $\hat{t}$  为快时间,  $t_m = m\text{PRT}$  ( $m=0, 1, 2, \dots$ ) 为发射时刻,称作慢时间,  $t$  为全时间,三者之间的关系为:  $\hat{t} = t - m\text{PRT}$ ,  $f_c$  为载波频率,  $T_p$  为脉冲宽度,  $\mu$  为调频率。

设  $P$  点的散射系数为  $\sigma_P$ ,到收发双站的距离和为  $R_P$ ,即  $R_P = R_{TP} + R_{RP}$ ,则接收站雷达接收到

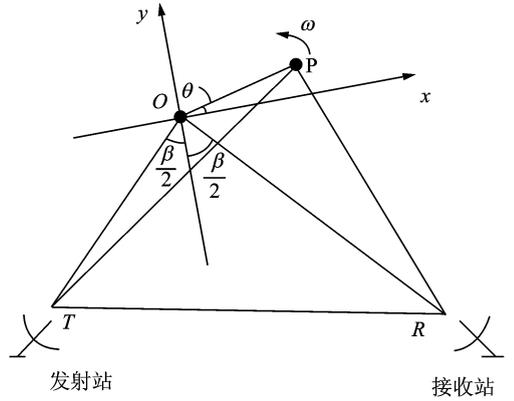


图 1 双基地 ISAR 转台模型

Fig. 1 Turntable model of bistatic ISAR

的回波信号为

$$s_r(\hat{t}, t_m) = \sigma_P \text{rect}\left[\frac{\hat{t} - \frac{R_P}{c}}{T_p}\right] \cdot \exp\left\{j2\pi\left[f_c\left(t - \frac{R_P}{c}\right) + \frac{1}{2}\mu\left(\hat{t} - \frac{R_P}{c}\right)^2\right]\right\} \quad (2)$$

假设双基地雷达理想同步,对回波信号解线频调处理,取参考距离  $R_{\text{ref}} = R_{TO} + R_{RO}$ ,参考信号为

$$s_{\text{ref}}(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left[\frac{\hat{t} - \frac{R_{\text{ref}}}{c}}{T_{\text{ref}}}\right] \cdot \exp\left\{j2\pi\left[f_c\left(t - \frac{R_{\text{ref}}}{c}\right) + \frac{1}{2}\mu\left(\hat{t} - \frac{R_{\text{ref}}}{c}\right)^2\right]\right\} \quad (3)$$

$T_{\text{ref}}$  为参考信号的脉宽,它比  $T_p$  要大一些。则解线频调后的差频输出为

$$s_{\text{if}}(\hat{t}, t_m) = s_r(\hat{t}, t_m) \cdot s_{\text{ref}}^*(\hat{t}, t_m) \sigma_P \text{rect}\left[\frac{\hat{t} - \frac{R_P}{c}}{T_p}\right] \cdot \exp\left(-j\frac{2\pi(f_c + \mu\hat{t} - \mu\tau)R_{\Delta}}{c}\right) \exp\left(j\frac{\pi\mu R_{\Delta}^2}{c^2}\right) \quad (4)$$

式中:  $\tau = R_{\text{ref}}/c$ ,  $R_{\Delta} = R_P - R_{\text{ref}}$ ,第一相位项的相位变化使回波产生多普勒,这是正常的。第二个相位项是解线频调方法所特有的,称为剩余视频相位 (Remaining video phase, RVP),它对多普勒的影响很小<sup>[8]</sup>,因此,差频输出可进一步表示为

$$s_{\text{if}}(\hat{t}, t_m) = \sigma_P \cdot \text{rect}\left[\frac{\hat{t} - \frac{R_P}{c}}{T_p}\right] \cdot \exp\left(-j\frac{2\pi(f_c + \mu\hat{t} - \mu\tau)R_{\Delta}}{c}\right) \quad (5)$$

式中:  $R_{\Delta}$  是慢时间的函数, RD 算法对转台模型成像时,分别对差频输出的快慢时间域作二维傅里叶

变换即可。

## 2 双基地 ISAR 的 MTRC 机理

对式(5)在快时间域作傅里叶变换

$$S_{if}(f, t_m) = \sigma_P T_p \cdot \text{sinc}\left(T_p\left(f + \frac{\mu}{c} R_\Delta\right)\right) \cdot \exp\left(-j2\pi \frac{f_c + f}{c} R_\Delta\right) \quad (6)$$

式(6)即双基地 ISAR 的一维距离像表示, sinc 函数的峰值位置对应着散射点相对雷达的距离信息。指数相位项是慢时间的函数,包含了散射点方位信息,对式(6)的每个距离单元在慢时间域作傅里叶变换即可得到目标二维像。

对机动目标,经运动补偿后的等效旋转速度是慢时间的函数,可设旋转角速度  $\omega = \omega_0 + at_m + bt_m^2 + \dots$ ,其中  $\omega_0$  是初始角速度,  $a$  为角加速度,  $b$  为角加加速度,为下文分析方便,这里取前三项,即  $\omega = \omega_0 + at_m + bt_m^2$ ,则在  $t_m$  时刻,  $OP$  旋转角度  $\Delta\theta$  为

$$\Delta\theta = \omega_0 t_m + \frac{1}{2} at_m^2 + \frac{1}{3} bt_m^3 \quad (7)$$

双基地雷达系统中,目标尺寸远小于收发双站距离,即  $d \ll R_{TO}, R_{RO}$ ,  $P$  到收发双站的距离分别为  $R_{TP}, R_{RP}$ , 则

$$R_{TP} = R_{TO} + d \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\beta}{2} - (\theta + \Delta\theta)\right) \quad (8)$$

$$R_{RP} = R_{RO} + d \cos\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\beta}{2} - (\theta + \Delta\theta)\right) \quad (9)$$

则  $P$  到收发双站距离与参考距离之差为

$$R_\Delta = (R_{TP} + R_{RP}) - (R_{TO} + R_{RO}) = 2(x_P \sin\Delta\theta + y_P \cos\Delta\theta) \cos \frac{\beta}{2} \quad (10)$$

考虑到 ISAR 成像时,成像时间一般很短,此时  $\Delta\theta \ll 1$ , 故

$$R_\Delta = (2x_P \Delta\theta + 2y_P) \cos \frac{\beta}{2} \quad (11)$$

将式(11)代入(6)式,得

$$S_{if}(f, t_m) = \sigma_P T_p \text{sinc}\left(T_p\left(f + \frac{\mu}{c} (2x_P \Delta\theta + 2y_P) \cos \frac{\beta}{2}\right)\right) \exp\left(-j2\pi \frac{f_c + f}{c} R_\Delta\right) \quad (12)$$

从式(12)可以看出,每次脉冲回波的峰值出现在  $f = -\frac{\mu}{c} (2x_P \Delta\theta + 2y_P) \cos \frac{\beta}{2}$  处,该函数是慢时间  $t_m$  的函数,随着信号发射时刻  $t_m$  的变化,峰值位置也在变化。整个成像过程中,设共积累了  $M$  次雷达回波脉冲,令  $t_{M-1} = (M-1)PRT$ ,  $\Delta\theta_{M-1} = \omega_0 t_{M-1} + \frac{1}{2} at_{M-1}^2 + \frac{1}{3} bt_{M-1}^3$ , 则  $f$  的变化量

$$\Delta f = -2 \frac{\mu}{c} x_P \Delta\theta_{M-1} \cos \frac{\beta}{2} \quad (13)$$

可见,该变化量正比于目标方位尺寸和成像的转角。由于发射脉冲宽度为  $T_p$ ,变换到频域的分辨率为  $1/T_p$ ,若  $|\Delta f| \leq 1/T_p$ ,则散射点未发生 MTRC。结合式(13),得

$$x_P \Delta\theta_{M-1} \leq \frac{c}{2B \cos \frac{\beta}{2}} \quad (14)$$

上式右端即是双基地雷达的距离分辨率,左端是散射点在距离方向转动产生的位移。即,散射点转动转过的距离不超过双基地雷达的一个分辨单元,就不会产生 MTRC。对于尺寸较小的目标容易满足式(14)的要求,但对于大型飞机、国际空间站、卫星碎片等目标,尺寸在数十米量级,尤其是现在成像雷达发射信号带宽较宽,距离分辨率在分米甚至厘米量级,成像时很难满足式(14)的条件,这种情况下,散射点很可能不止越一个距离单元,直接影响方位分辨时的相参积累效果。

从以上分析可知,目标相对雷达的转动既是实现方位分辨的条件,又是产生 MTRC 的根本原因。

## 3 基于 MFT 的 MTRC 校正

### 3.1 匹配傅里叶变换

匹配傅里叶变换,是近年来由王盛利等人提出的一种信号检测与参数估计分析工具<sup>[15,16]</sup>,它是变采样处理技术的基础,它可将对应信号在匹配傅里叶频域最大限度的集中。任一形式的信号在经不同基的匹配傅里叶变换后,其匹配傅里叶谱是不一样的,这样可以通过 MFT,使有用信号得到集中。匹配傅里叶变换的一般形式是

$$F(\omega) = \int_0^T f(t) e^{-j\omega\varphi(t)} d\varphi(t) \quad (15)$$

该变换通过选择与原信号匹配的基函数,实现最佳频谱输出。以某一线性调频信号  $s(t) = \exp(j2\pi 50(t+t^2))$  为例,取  $\varphi(t) = t + t^2$ ,其 FFT 及 MFT 如图 2 所示。可以看出,直接对线性调频信号进行 FFT,频谱能量发散,而 MFT 有单一峰值出现在 50 Hz 处,并且对应信号的能量在匹配傅里叶谱中集中。

### 3.2 双基地 ISAR 的 MTRC 校正机理

大尺寸目标或大转角情况下,式(6)的时频平面已经发生了 MTRC,欲消除 MTRC,需返回到式(5)表示的时域中,并将式(11)代入得

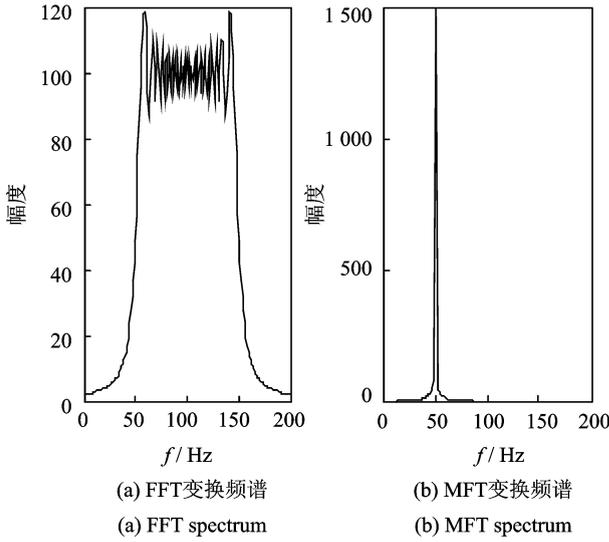


图 2 线性调频信号的 FFT 和 MFT 频谱  
Fig. 2 FFT and MFT spectrum of LFM

$$s_{if}(\hat{t}, t_m) = \sigma_P \cdot \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - R_P}{T_P}\right) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi(f_c + \mu\hat{t} - \mu\tau)x_P}{c} \cos \frac{\beta}{2} \left(\omega_0 t_m + \frac{1}{2} a t_m^2 + \frac{1}{3} b t_m^3\right)\right) \exp\left(-j \frac{4\pi\mu y_P}{c} \cos \frac{\beta}{2} \hat{t}\right) \exp\left(-j \frac{4\pi(f_c - \mu\tau)y_P}{c} \cos \frac{\beta}{2}\right) \quad (16)$$

式(16)中,第一个指数相位项既有慢时间项,又包含了快时间与慢时间一次、二次及高次的耦合项,该耦合项是式(12)sinc 函数的频率与慢时间产生耦合的原因,即产生 MTRC 的原因,消除该项的耦合作用就能解决 MTRC。第二个指数相位项是快时间的单一函数,是散射点纵坐标的函数,用于实现距离的分辨。最后的指数项为初始相位,不影响成像效果。

### 3.3 基于 MFT 的 MTRC 校正

式(16)中与产生 MTRC 有关的指数项记为

$$s_1(\hat{t}, t_m) = \exp\left(-j \frac{4\pi x_P \omega_0 f_c}{c} \cos \frac{\beta}{2} \left(1 + \frac{\mu\hat{t} - \mu\tau}{f_c}\right) \left(t_m + \frac{a}{2\omega_0} t_m^2 + \frac{b}{3\omega_0} t_m^3\right)\right) \quad (17)$$

令:

$$\varphi_1(t_m) = \left(1 + \frac{\mu\hat{t} - \mu\tau}{f_c}\right) \left(t_m + \frac{a}{2\omega_0} t_m^2 + \frac{b}{3\omega_0} t_m^3\right) \quad (18)$$

对式(16)每个距离单元作 MFT,基函数为

$$\varphi_1(t_m), \text{这里忽略慢时间窗长度的影响,可得} \\ S_{if\_MFT}(f, \hat{t}) = \int s_{if}(\hat{t}, t_m) e^{-j2\pi\varphi_1(t_m)} d\varphi_1(t_m) =$$

$$\sigma_P \cdot \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - R_P}{T_P}\right) \delta\left(f + \frac{2x_P \omega_0 f_c}{c} \cos \frac{\beta}{2}\right) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi\mu y_P}{c} \cos \frac{\beta}{2} \hat{t}\right) \exp\left(-j \frac{4\pi(f_c - \mu\tau)y_P}{c} \cos \frac{\beta}{2}\right) \quad (19)$$

上式可看出,通过选择合适的基函数,对慢时间作 MFT,输出多普勒频谱的峰值始终在  $f = -\frac{2x_P \omega_0 f_c}{c} \cos \frac{\beta}{2}$  处,消除了快慢时间之间的耦合。对式(19)做 IFFT,返回到时域,即

$$s_{if\_return}(\hat{t}, t_m) = \sigma_P \cdot \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - R_P}{T_P}\right) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi x_P \omega_0 f_c}{c} \cos \frac{\beta}{2} t_m\right) \exp\left(-j \frac{4\pi\mu y_P}{c} \cos \frac{\beta}{2} \hat{t}\right) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi(f_c - \mu\tau)y_P}{c} \cos \frac{\beta}{2}\right) \quad (20)$$

对式(20)在快时间域做 FFT,得一维距离像

$$S_{if\_return}(f, t_m) = \sigma_P T_P \text{sinc}\left(T_P \left(f + \frac{2\mu y_P}{c} \cos \frac{\beta}{2}\right)\right) \exp\left(-j2\pi f \frac{R_P}{c}\right) \exp\left(-j \frac{4\pi x_P \omega_0 f_c}{c} \cos \frac{\beta}{2} t_m\right) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi(f_c - \mu\tau)y_P}{c} \cos \frac{\beta}{2}\right) \quad (21)$$

对比式(12,21)中快时间频率  $f = -\frac{2\mu y_P}{c} \cos \frac{\beta}{2}$ ,只与散射点距离向坐标有关,不再含有快时间频率与慢时间的耦合项,也就消除了 MTRC。基于 MFT 的机动目标双基地 ISAR MTRC 校正流程如图 3 所示。该方法通过对解线频调后的回波在快频率-慢时间域进行平动补偿和相位校正,将

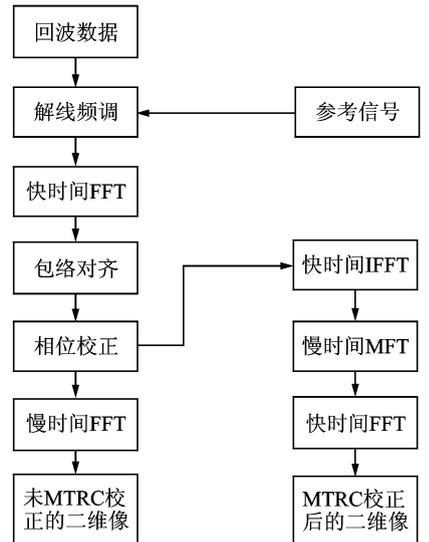


图 3 基于 MFT 的 MTRC 校正流程

Fig. 3 Flow chart of MTRC correction based on MFT

机动目标模型转化为非匀速转台模型,然后返回到时域,对慢时间作 MFT,消除快慢时间之间的耦合,再在快时间作 FFT,即可得到 MTRC 校正后 ISAR 二维像。

## 4 仿真实验及结果分析

用本文的基于 MFT 的双基地 ISAR MTRC 校正方法,分别对匀加速旋转目标和匀加速直线运动目标进行仿真实验。双基地雷达与目标的空间结构如图 4 所示,目标散射点模型如图 5 所示。

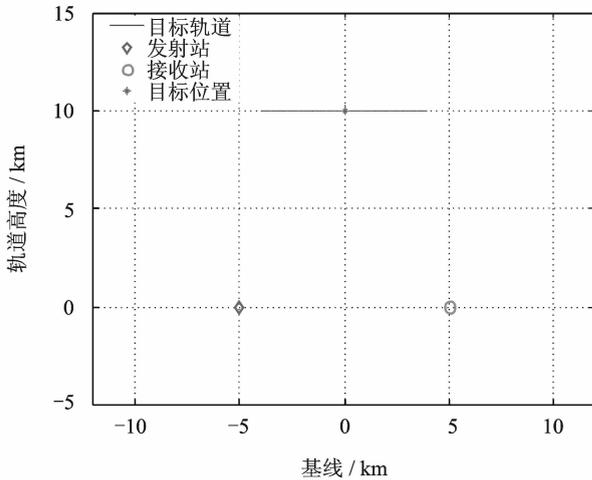


图 4 双基地 ISAR 仿真场景

Fig. 4 Simulation scene of bistatic ISAR

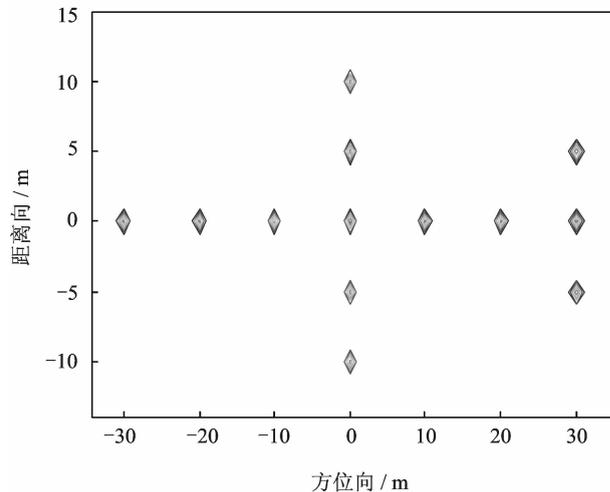


图 5 目标散射点模型

Fig. 5 Target scatters model

### 4.1 加速旋转目标的 MTRC 校正仿真

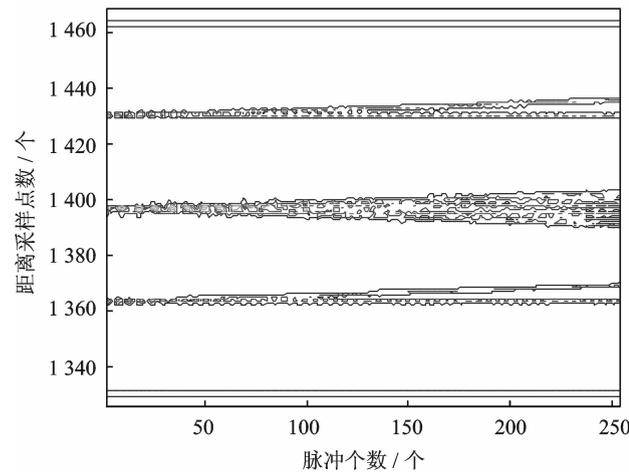
仿真时,目标位于雷达基线的中垂线上距雷达基线的垂直高度 10 km,目标绕质心匀加速旋转,仿真具体参数如表 1 所示。

表 1 双基地 ISAR 匀加速旋转目标仿真参数

Table 1 Bistatic ISAR simulation parameters of uniformly accelerated rotation target

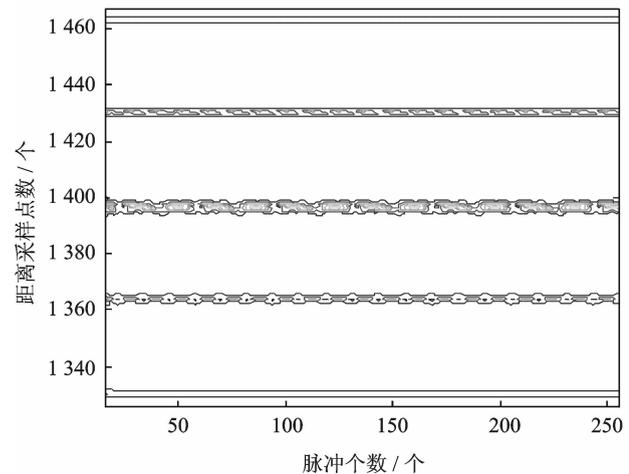
参数名称	参数值	参数名称	参数值
载频/GHz	10	旋转速度/(rad · s <sup>-1</sup> )	0.04
带宽/GHz	1	旋转加速度/(rad · s <sup>-2</sup> )	0.01
脉冲频率/Hz	400	累积转角/rad	0.028
脉冲积累数/个	256	距离分辨率/m	0.17
双基地角/(°)	53.13	方位分辨率/m	0.61

图 6 为 MTRC 校正前后的一维距离像结果,图 6(a) 未进行 MTRC 校正,可以看出,随着脉冲个数的增加,距离像不再在同一个距离单元内,出



(a) 未进行MTRC校正的ISAR一维距离像

(a) ISAR range profile without MTRC correction



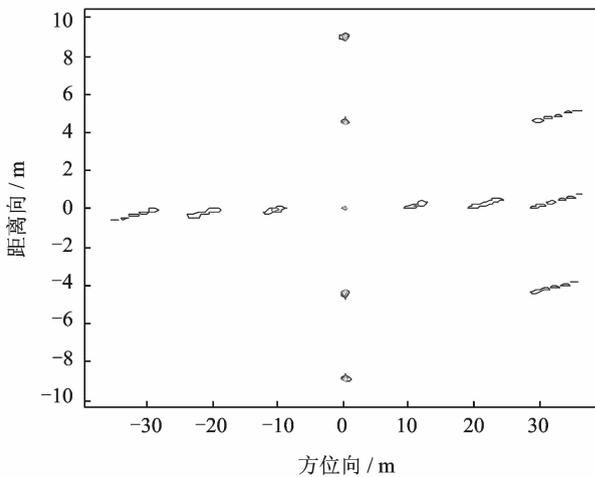
(b) MTRC校正后的ISAR一维距离像

(b) ISAR range profile after MTRC correction

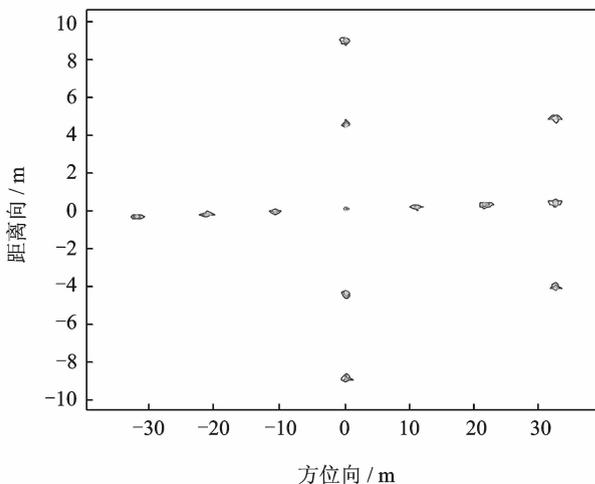
图 6 加速旋转目标 MTRC 校正前后 ISAR 一维距离像

Fig. 6 ISAR range profile before and after MTRC correction of accelerated rotation target

现向两边距离单元扩散的现象,发生了 MTRC。图 6(b)为 MTRC 校正后的一维距离像,包络没有随着慢时间的改变而出现走动现象。图 7 是基于 RD 成像算法,对匀加速旋转目标的二维成像结果。其中,图 7(a)未经过 MTRC 校正,图像在方位向上出现散焦现象,并且距离质心越远,散焦越严重,有些散射点已无法辨别。图 7(b)为采用本文方法,对回波数据 MTRC 校正后的双基地 ISAR 二维像,对比容易发现,该 ISAR 二维像较图 (a)明显聚焦。通过计算,MTRC 校正前后,两幅 ISAR 像的图像对比度分别为 16.336 3,21.304 7,数字对比从量上也说明了 MTRC 校正的效果。



(a) 未进行MTRC校正的ISAR二维像  
(a) ISAR images without MTRC correction



(b) MTRC校正后的ISAR二维像  
(b) ISAR images after MTRC correction

图 7 加速旋转目标 MTRC 校正前后 ISAR 二维像  
Fig. 7 ISAR images before and after MTRC correction of accelerated rotation target

## 4.2 加速直线运动目标的 MTRC 校正仿真

仿真时,设定目标在雷达基线中垂线沿基线方向做匀加速直线运动,仿真参数如表 2 所示。

表 2 双基地 ISAR 匀加速直线运动目标仿真参数  
Table 2 Bistatic ISAR simulation parameters of uniformly accelerated linear motion target

参数名称	参数值	参数名称	参数值
载频/GHz	10	目标速度/( $m \cdot s^{-1}$ )	500
带宽/GHz	1	目标加速度/( $m \cdot s^{-2}$ )	30
脉冲频率/Hz	400	累积转角/rad	0.026
脉冲积累数/个	256	距离分辨率/m	0.17
双基地角/( $^{\circ}$ )	53.12	方位分辨率/m	0.65

成像过程中,可根据收发双站雷达与目标中心的距离,求出目标的等效旋转角速度、旋转角加速度,如图 8 所示。可以看出,旋转角速度接近匀速变化,角加速度虽有变化,但范围很小,因此,可把双基地 ISAR 匀加速运动目标经运动补偿后的模型等效为匀加速转台模型。

仿真成像结果如图所 9 示,可明显看出,本文的校正方法有效消除了散射点的 MTRC 问题,MTRC 校正前后,两幅 ISAR 像的图像对比度分别为 17.3063,19.4570,经过校正,图像质量得到很大的提高。

两次仿真实验,累积转角基本相同,但匀加速直线运动目标的成像效果没有理想转台模型的好,

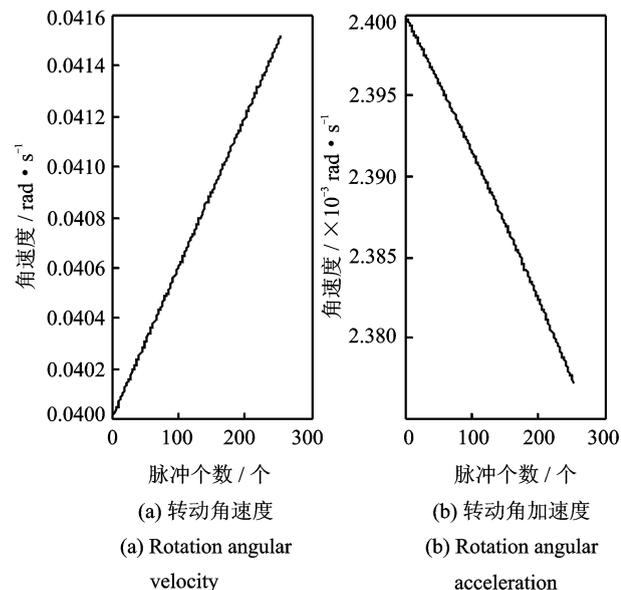
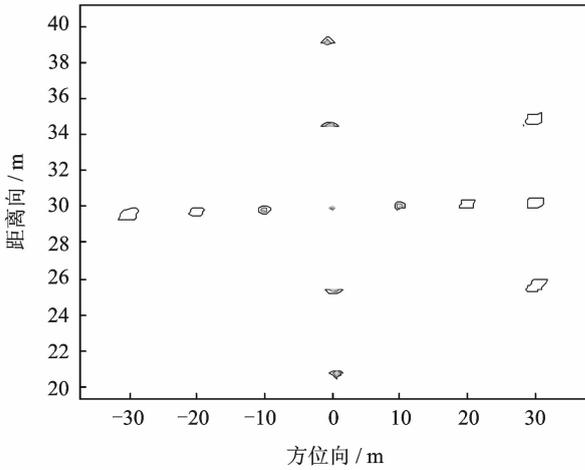
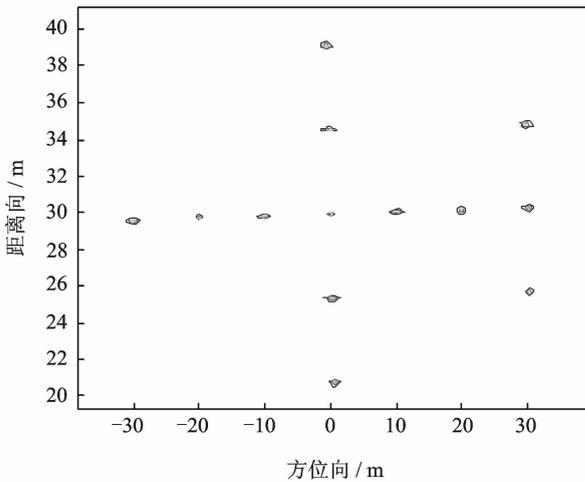


图 8 成像过程中目标等效转动角速度和角加速度  
Fig. 8 Target equivalent rotation angular velocity and angular acceleration during imaging



(a) 未进行MTRC校正的ISAR二维像  
(a) ISAR image without MTRC correction



(b) MTRC校正后的ISAR二维像  
(b) ISAR images after MTRC correction

图 9 加速直线运动目标 MTRC 校正前后 ISAR 二维像

Fig. 9 ISAR images before and after MTRC correction of uniformly accelerated linear motion target

主要原因在于,匀加速直线运动经过平动补偿及相位校正才转化为转台模型,运动补偿精度与选择的补偿算法关系密切,正常情况下,不可能达到完全补偿的理想效果。此外,由图 8 可知,运动补偿后的模型是近似等效为理想的匀加速转台模型,该近似过程对成像效果也会有小的影响。

## 5 结束语

本文针对双基地 ISAR 机动目标的 MTRC 问题,基于转台模型,对解线频调后的目标回波信号进行深入研究,分析了 MTRC 产生机理,并将 MFT 应用于 MTRC 的校正中,有效消除了快时间

频率与慢时间的耦合,解决了 MTRC 问题。最后分别对匀加速旋转目标和直线运动的机动目标进行仿真实验,结果表明,基于 MFT 的 MTRC 校正方法能有效解决机动目标的距离徙动问题,提高双基地 ISAR 二维像的图像质量。

### 参考文献:

- [1] 杨振起,张永顺,骆永军. 双(多)基地雷达系统[M]. 北京:国防工业出版社,1998: 14-15.  
Yang Zhenqi, Zhang Yongshun, Luo Yongjun. Bi-static (multistatic) radar system[M]. Beijing: Defense Industry Press, 1998: 14-15.
- [2] Zhu Daiyin, Zhang Wei, Zhu Zhaoda. Phase autofocusing algorithm for compressed inverse synthetic aperture radar imaging[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 29(3): 245-253.
- [3] 朱仁飞,罗迎,张群,等. 双基地 ISAR 成像分析[J]. 现代雷达,2011, 33(8): 34-38.  
Zhu Renfei, Luo Ying, Zhang Qun, et al. Analysis of bistatic inverse synthetic aperture radar imaging [J]. Modern Radar, 2011, 33(8): 34-38.
- [4] Jiang Zhenglin, Xing Mengdao, Bao Zheng. Correction of migration through resolution cell in ISAR imaging[C]//2001 CIE International Conference on Radar Proceedings. Beijing: IEEE, 2001: 933-937.
- [5] Xing Mengdao, Wu R, Bao Zheng. High resolution imaging of high speed moving targets[J]. IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 2005, 152(2): 58-67.
- [6] 朱仁飞,朱小鹏,张群. 基于调频连续波信号的双基地 ISAR 成像研究[J]. 宇航学报,2012, 33(2): 222-227.  
Zhu Renfei, Zhu Xiaopeng, Zhang Qun. Imaging study on bi-static ISAR based on frequency modulation continuous wave[J]. Journal of Astronautics, 2012, (2): 222-227.
- [7] 韩兴斌,胡卫东,郁文贤. ISAR 越距离单元走动校正的近似极坐标算法[J]. 系统工程与电子技术,2007, 29(3): 346-349.  
Han Xingbin, Hu Weidong, Yu Wenxian. Approximately polar formatting algorithm to compensate migration through resolution cells in ISAR imaging[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(3): 346-349.
- [8] 保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社,2010: 177-181.  
Bao Zheng, Xing Mengdao, Wang Tong. Radar imaging technology[M]. Beijing: Publishing House of

- Electronics Industry, 2010; 177-181.
- [9] Wang Baoping, Gao Junjie, Sun Chao, et al. An MTRC compensated algorithm based on keystone transform and weighted orientation[C]//International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks. Xianning, China; IEEE, 2011; 85-89.
- [10] Jiang Zhenglin, Xing Mengdao, Bao Zheng. Correction of migration through resolution cell in ISAR imaging[J]. Chinese Journal of Electronics, 2004, 13(2): 210-213.
- [11] 董健,尚朝轩,高梅国,等. 间接同步连续采样模式双基地 ISAR 时间同步仿真[J]. 数据采集与处理, 2011, 26(3): 347-355.  
Dong Jian, Shang Chaoxuan, Gao Meiguo, et al. Modeling and simulation on time synchronization of indirect synchronization continuous sampling mode bistatic ISAR[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2011, 26(3):347-355.
- [12] 朱小鹏,张群,朱仁飞,等. 双站 ISAR 越距离单元徙动分析与校正算法[J]. 系统工程与电子技术,2010, 32(9): 1828-1832.  
Zhu Xiaopeng, Zhang Qun, Zhu Renfei, et al. Study on correction algorithm of migration through resolution cell in bistatic-ISAR[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(9): 1828-1832.
- [13] 韩宁,尚朝轩,何强,等. 双基地 ISAR 越距离单元徙动分析与校正方法[J]. 火力与指挥控制,2013, 38(3): 49-52, 57.  
Han Ning, Shang Chaoxuan, He Qiang, et al. Study on correction method of bistatic ISAR migration through resolution cell for space target[J]. Fire Control & Command Control, 2013, 38(3): 49-52, 57.
- [14] Zhu Xiaopeng, Zhang Qun, Zhu Renfei, et al. A MTRC correction algorithm in bistatic ISAR[C]//2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar. Xi'an, China; IEEE, 2009; 977-980.
- [15] 王盛利,李士国,倪晋麟,等. 一种新的变换——匹配傅里叶变换[J]. 电子学报,2001, 29(3): 403-405.  
Wang Shengli, Li Shiguo, Ni Jinlin, et al. A new transform — Match Fourier transform [J]. ACTA Electronica Sinica, 2001, 29(3): 403-405.
- [16] Chen Jianjun, Chen Juan, Wang Shengli. Detection of ultre-high speed moving target based on matched Fourier transform[C]//2006 CIE International Conference on Radar. Shanghai; IEEE, 2006: 1240-1244.

**作者简介:**郭宝锋(1987-),男,博士研究生,研究方向:雷达信号处理,雷达成像技术,E-mail: guobao\_feng870714@126.com。尚朝轩(1964-),男,教授,博士生导师,研究方向:电子装备性能检测与故障诊断、雷达信号处理;高梅国(1965-),男,教授,博士生导师,研究方向:雷达电子对抗与反对抗,高速实时信号处理,雷达成像技术等;王俊岭(1982-),男,博士,讲师,研究方向:实时信号处理、雷达成像技术;姜洪伟(1986-),女,硕士研究生,研究方向:雷达成像技术、航天测控技术。