

# 双站 ISAR 越距离单元徙动分析与校正算法

朱小鹏, 张 群, 朱仁飞, 李宏伟

(空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

**摘 要:** 在逆合成孔径雷达(inverse synthetic aperture radar, ISAR)成像中,当雷达分辨率较高而目标体积较大时,会产生越距离单元徙动现象。在双站 ISAR 成像系统中同样存在类似的问题。在双站 ISAR 成像模式下,对产生越距离单元徙动的原因进行了详细分析及讨论。并与单站 ISAR 成像中的越距离单元徙动进行了分析比较。在此基础上,采用 Keystone 变换的方法对解线频调后的时域信号进行处理,消除了目标像的越距离单元徙动,最后对散射点模型进行了仿真验证。

**关键词:** 双站逆合成孔径雷达; 越距离单元徙动; Keystone 变换; 解线频调

**中图分类号:** TN 957

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1001-506X.2010.09.09

## Study on correction algorithm of migration through resolution cell in bistatic-ISAR

ZHU Xiao-peng, ZHANG Qun, ZHU Ren-fei, LI Hong-wei

(Inst. of Telecommunication Engineering, Air Force Engineering Univ., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** In normal inverse synthetic aperture radar (ISAR) system, it is liable to cause the migration through resolution cell (MTRC) while the requested resolution of a radar is high and the size of targets is large. There also exists the same problem in bistatic-ISAR systems. This paper analyzes the reason of causing MTRC detailly in the module of bistatic-ISAR and compares it with the situation in mono-ISAR systems. Then under this base, an algorithm called Keystone transformation is used to dispose the time domain signal by dechirp processing, and it eliminates the MTRC in the target imaging. Finally, a simulation of scattered points is given.

**Keywords:** bistatic-inverse synthetic aperture radar; migration through resolution cell (MTRC); Keystone transformation; dechirp processing

## 0 引 言

近年来,随着“四大威胁”的迅猛发展<sup>[1]</sup>,现代战争对军用雷达的要求越来越苛刻,单站雷达因此也面临着更多的挑战和威胁。由于在安全性和抗摧毁能力等方面的优势,双(多)基地雷达越来越受到人们的重视。而双站逆合成孔径雷达(inverse synthetic aperture radar, ISAR)作为一种新的成像雷达体制,正逐渐成为雷达成像领域的研究热点。目前,关于双站 ISAR 的研究并不多见。文献[2]利用发射特性分析了伪双站 ISAR 系统<sup>[1]</sup>的特性,而后文献[3-4]对双站 ISAR 系统成像进行了分析,研究了双站 ISAR 系统的一些基本问题。

在单站 ISAR 中,目标回波信号经平动补偿转化为转台目标后,一般可通过简单的距离-多普勒算法进行成像<sup>[5]</sup>。

目标相对雷达的转动正是图像横向分辨的依据,同时也是产生越距离单元徙动(migration through resolution cell, MTRC)的根源。目前,对单站 ISAR 成像中的 MTRC 校正主要有两种方法,一种是采用聚束 SAR 系统中的极坐标格式化算法(polar formation algorithm, PFA)来校正散射点的 MTRC<sup>[6-7]</sup>,但该算法的精确计算需要已知目标的转动信息;另一种则是采用 Keystone 变换的方法对 MTRC 进行校正<sup>[8-10]</sup>,此类校正算法是在对回波信号进行匹配滤波的基础上进行的。

本文通过建立双站 ISAR 系统模型,以转台目标为对象,详细分析了回波信号进行拉伸处理后的信号形式,研究讨论了双站 ISAR 系统中产生 MTRC 的原因,将 Keystone 变换运用到双站 ISAR 系统中,提出了基于双站 ISAR 系统的 MTRC 校正算法,并给出了仿真验证。

### 1 双站 ISAR 系统模型

双站 ISAR 与单站 ISAR 一样,也是利用距离-多普勒原理进行成像。但其系统构成明显不同,本文建立的双基地雷达模型如图 1 所示,即以  $T_x$  和  $R_x$  的连线中点为坐标原点建立直角坐标系。设发射机与接收机之间的水平距离为  $L$ ,则发射机、接收机坐标分别为  $T_x(-L/2,0)$ 、 $R_x(L/2,0)$ , $O'$  为目标参考点, $P$  为目标区域一散射点。目标参考点、 $P$  点和发射机以及接收机的初始距离分别为  $R_{T0}$ 、 $R_{R0}$ 、 $R_{TP}$  和  $R_{RP}$ ,目标参考点与  $x$  轴的垂直距离为  $R_0$ ,目标以图 1 所示的速度  $v$  运动。

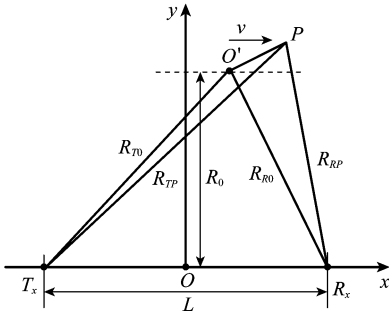


图 1 双站 ISAR 坐标系

为使信号具有好的相干性,发射信号的载频必须十分稳定。假设载频信号为  $\exp(j2\pi f_c t)$ ,脉冲信号以重复周期  $T$  依次发射。发射时刻  $t_m = mT (m = 0, 1, 2, \dots)$ ,称为慢时间;以发射时刻为起点的时间用  $\hat{t}$  表示,称为快时间;这两个时间与全时间  $t$  的关系为: $\hat{t} = t - t_m$ 。设发射的线性调频(linear frequency modulation, LFM)信号为

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

式中,  $\text{rect}(u) = \begin{cases} 1, & |u| \leq \frac{1}{2} \\ 0, & |u| > \frac{1}{2} \end{cases}$ ;  $f_c$  为中心频率; $T_p$  为脉宽; $\mu$  为调频率。

设作解线频调处理的参考 LFM 信号为  $s_{\text{ref}}(\hat{t}, t_m)$ ,其参考距离为双站到参考点的距离和,设为  $R_{\text{ref}}$ ;点目标  $P$  的距离为双站到  $P$  点的距离和,设为  $R_p$ 。在图 1 中, $R_{\text{ref}} = R_{T0} + R_{R0}$ , $R_p = R_{TP} + R_{RP}$ 。设  $P$  点的回波信号为  $s_p(\hat{t}, t_m)$ ,则

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

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

式中, $T_{\text{ref}}$  为参考信号的脉宽,比  $T_p$  大一些。若设  $\Delta R = R_p - R_{\text{ref}}$ ,则解线频调后的差频输出为

$$s_{P\text{ref}}(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - R_p/c}{T_p}\right) \exp\left(-j2\pi f_c \frac{\Delta R}{c}\right) \cdot \exp\left(-j2\pi\mu\left(\hat{t} - \frac{R_{\text{ref}}}{c}\right) \frac{\Delta R}{c} + j\pi\mu \frac{\Delta R^2}{c^2}\right) \quad (4)$$

将式(4)按快时间(以参考点的时间为基准)作傅里叶变换,由此得到其在差频域的代表式为

$$s_{P\text{ref}}(f_i, t_m) = T_p \text{sinc}\left[T_p\left(f_i + \frac{\mu}{c}\Delta R\right)\right] \cdot \exp\left(-j2\pi f_c \frac{\Delta R}{c} + j\pi\mu \frac{\Delta R^2}{c^2} - j2\pi f_i \frac{\Delta R}{c}\right) \quad (5)$$

式中,  $\text{sinc}(a) = \frac{\sin(\pi a)}{\pi a}$ 。

对式(5)作去剩余视频相位(residual video phase, RVP)处理后的结果为

$$s_{P\text{ref}}(f_i, t_m) = T_p \text{sinc}\left[T_p\left(f_i + \frac{\mu}{c}\Delta R\right)\right] \cdot \exp\left(-j2\pi f_c \frac{\Delta R}{c}\right) \quad (6)$$

### 2 双站 ISAR 中的 MTRC

假设目标相对雷达的平动分量已被精确补偿,则可以按照图 2 所示的转台目标来描述双站 ISAR 的成像原理。

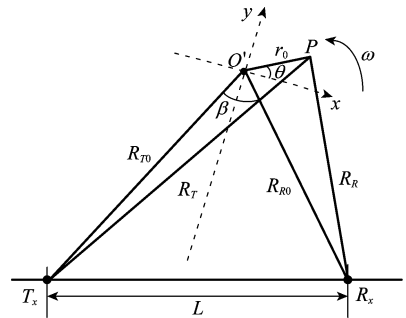


图 2 双站 ISAR 转台目标结构

图 2 中,以目标参考点  $O'$  为原点,角平分线为  $y$  轴建立坐标系,目标以均匀角速度  $\omega$  绕坐标原点旋转,目标上任一点  $P$  在起始时刻( $t_m = 0$ )的坐标用极坐标表示为  $(r_0, \theta)$ ,则  $t_m$  时刻该点到双站的距离分别为<sup>[11]</sup>

$$R_T = \sqrt{R_{T0}^2 + r_0^2 + 2R_{T0}r_0 \sin(\theta + \beta + \omega t_m)} \quad (7)$$

$$R_R = \sqrt{R_{R0}^2 + r_0^2 + 2R_{R0}r_0 \sin(\theta - \beta + \omega t_m)} \quad (8)$$

一般情况下,目标与雷达之间的距离远大于目标的几何尺寸,因此,可得到如下近似

$$R_T \approx R_{T0} + x_0 \sin(\beta + \omega t_m) + y_0 \cos(\beta + \omega t_m) \quad (9)$$

$$R_R \approx R_{R0} + x_0 \sin(-\beta + \omega t_m) + y_0 \cos(-\beta + \omega t_m) \quad (10)$$

式中

$$\begin{cases} x_0 = r_0 \cos \theta \\ y_0 = r_0 \sin \theta \end{cases} \quad (11)$$

联合式(9)和式(10)可得

$$\Delta R = 2x_0 \cos \beta \sin(\omega t_m) + 2y_0 \cos \beta \cos(\omega t_m) \quad (12)$$

在 ISAR 成像中,一般假设成像时间很短,则式(12)可简化为

$$\Delta R = 2x_0 \cos \beta \cdot \omega t_m + 2y_0 \cos \beta \quad (13)$$

将式(13)代入式(6)可得

$$s_{\text{Pref}}(f_i, t_m) = T_p \text{sinc} \left\{ T_p \left[ f_i + \frac{\mu}{c} (2x_0 \cos \beta \cdot \omega t_m + 2y_0 \cos \beta) \right] \right\} \exp \left( -j2\pi f_c \frac{\Delta R}{c} \right) \quad (14)$$

从式(14)可以看出,快时间频域的峰值将出现在  $f_i = -2\mu \cos \beta (x_0 \omega t_m + y_0) / c$  处。若假设  $x_0 \omega t_m \ll \rho_r$  ( $\rho_r$  为纵向分辨率),则可得到在不发生 MTRC 的情况下,目标的距离像为  $y_0 = -f_i c / 2\mu \cos \beta$ 。但当  $x_0 \omega t_m$  的大小与  $\rho_r$  可比拟时,就不能采用上述的近似。以  $\lambda = 3 \text{ cm}$  ( $\lambda$  为波长)为例,在双站 ISAR 中,若  $\beta = 30^\circ$ ,要想得到 0.5 m 的横向分辨率,并假设要求纵向分辨率与横向分辨率相同,则  $\omega t_m \approx 0.035 \text{ rad}$ ;若  $x_0 = 50 \text{ m}$ ,则纵向走动约为 1.75 m,横跨了 4 个距离分辨单元。因此,当目标的横向尺寸较大时,对于目标两侧的散射点,会在纵向穿过多个距离单元,难以实现同一距离单元的相干积累。

### 3 双站 ISAR 的 MTRC 校正

为消除上述分析的 MTRC,将式(6)变换回快时间-慢时间域,有

$$s_{\text{Pref}}(t', t_m) = \text{rect} \left[ \frac{t'}{T_p} \right] \cdot \exp \left( -j2\pi \mu t' \frac{\Delta R}{c} - j2\pi f_c \frac{\Delta R}{c} \right) \quad (15)$$

式中,  $t' = \hat{t} - R_{\text{ref}} / c$ , 表示以参考点的时间为基准的快时间域。为分析方便,设  $a = 2x_0 \cos \beta \cdot \omega$ ,  $b = 2y_0 \cos \beta$ , 则式(13)可化为

$$\Delta R = at_m + b \quad (16)$$

将式(16)代入式(15)可得

$$s_{\text{Pref}}(t', t_m) = \text{rect} \left[ \frac{t'}{T_p} \right] \exp \left( -j \frac{2\pi a}{c} (\mu t' + f_c) t_m \right) \cdot \exp \left( -j \frac{2\pi b}{c} \mu t' \right) \exp \left( -j \frac{2\pi b}{c} f_c \right) \quad (17)$$

式(17)中第 2 个指数项是纵向成像的依据,第 3 个指数项为固定相位项,对成像的影响可以忽略,关键在第 1 个指数项。第 1 个指数项为快时间  $t'$  与慢时间  $t_m$  的耦合项, MTRC 正是由该耦合项产生的。

在单站 ISAR 系统的 MTRC 校正中,对回波信号进行快时间域匹配滤波后的信号形式为<sup>[10]</sup>

$$s(f_i, t_m) = |P(f_i)|^2 \sum_i \tilde{A}_i \exp \left( -j \frac{4\pi}{c} f_i R_{i0} \right) \cdot \exp \left( -j \frac{4\pi}{c} (f_c + f_i) v_i t_m \right) \quad (18)$$

式中,  $P(f_i)$  为  $p(\hat{t})$  的傅里叶变换,  $p(\hat{t})$  为回波包络;  $\tilde{A}_i = A_i \exp(-j4\pi f_i R_{i0} / c)$ ,  $A_i$  是第  $i$  个点目标回波的幅度,  $R_{i0}$  为第  $i$  个点目标的初始距离,  $v_i$  是点目标的径向速度。

从式(18)的第 2 个指数项可以看出,不同频率分量具有不同的多普勒频率,即  $f_{di} = -2v_i (f_c + f_i) / c$ 。由于多普勒随  $f_i + f_c$  变化,当  $f_i$  越高,相位随慢时间  $t_m$  的变化越快。所以,逐次回波的频谱里会增加一线性相位因子,则波形的包络会有平移,从而产生越距离单元徙动。

在双站 ISAR 系统中,将快时间频率  $f_i = \mu t'$  代入式(17)得

$$s_{\text{Pref}}(t', t_m) = \text{rect} \left[ \frac{t'}{T_p} \right] \exp \left[ -j \frac{2\pi a}{c} (f_i + f_c) t_m \right] \cdot \exp \left( -j \frac{2\pi b}{c} \mu t' \right) \exp \left( -j \frac{2\pi b}{c} f_c \right) \quad (19)$$

此时,多普勒频率  $f_d = a(f_i + f_c) / c$ , 也随  $f_i + f_c$  变化。当  $f_i$  越高,相位随慢时间  $t_m$  的变化就越快。比较双站 ISAR 中的  $f_d$  和单站 ISAR 中的  $f_{di}$  可知,双站 ISAR 和单站 ISAR 中产生 MTRC 的原因是一致的。

正如文献[10]中所分析的,对回波信号作解线频调并作去斜处理后,时域信号就具有了频域信号所具有的性质。而快时间频率  $f_i = \mu t'$ , 因此式(19)中的第 1 个指数项也可看作快时间频率  $f_i$  与慢时间  $t_m$  的耦合项。

为消除上述所分析的快时间-慢时间耦合项,作如下的变量代换,令

$$\tau_m = \frac{\mu t' + f_c t_m}{f_c} \quad (20)$$

将式(20)代入式(17),得

$$s_{\text{Pref}}(t', t_m) = \text{rect} \left[ \frac{t'}{T_p} \right] \exp \left( -j \frac{2\pi a}{c} f_c \tau_m \right) \cdot \exp \left( -j \frac{2\pi b}{c} \mu t' \right) \exp \left( -j \frac{2\pi b}{c} f_c \right) \quad (21)$$

式(21)表明,对新的变量  $\tau_m$ , 已经消除了快时间  $t'$  和慢时间  $t_m$  之间的耦合项。在  $t' - t_m$  平面,信号采样点是以矩形格式采样的,但经过式(20)的变换后,在  $t' - \tau_m$  平面里原来的采样点变成了梯形格式,因此不能由式(21)直接作二维傅里叶变换得到目标的二维像,需要将  $t' - \tau_m$  平面里的采样点由梯形格式插值成矩形格式。这里采用文献[8]中的 Keystone 变换来实现,完成上述的 MTRC 校正。

所谓 Keystone 变换实际上是一种对  $\tau_m$  轴的伸缩变换,伸缩的幅度和快时间  $t'$  有关。从式(15)可以看出,数据采样点在  $t' - t_m$  平面里是按矩形格式排列。但经式(20)的变量代换后,数据点在  $t' - \tau_m$  平面转换成梯形格式,如图 3 所示。Keystone 变换就是对快时间  $t'$  上的每一个采样点,将其对应的慢时间  $\tau_m$  上的采样点的位置进行重排,将梯形格式数据重新变换成矩形格式来进行二维成像。

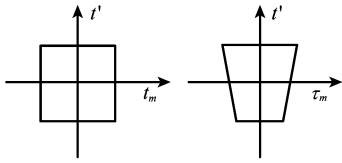


图 3  $t'-t_m$  平面到  $t'-\tau_m$  平面的转换

通过上述分析,双站 ISAR 中的 MTRC 校正过程可用图 4 的流程图表示。

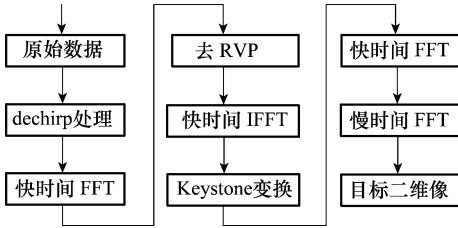


图 4 越距离徙动校正流程图

### 4 双站 ISAR 中的 MTRC 校正仿真

仿真数据中雷达中心频率设为 10 GHz,带宽为 300 MHz。双站成像雷达的空间构造见图 1,其中  $L=R_0=10$  km,则  $T_r O=R_r O=L/2=5$  km,目标的散射点模型如图 5 所示,并以速度  $v=150$  m/s 沿  $x$  轴正向运动。

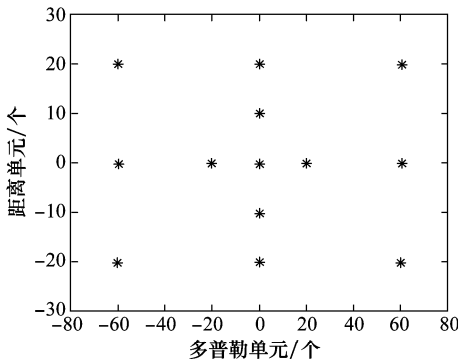
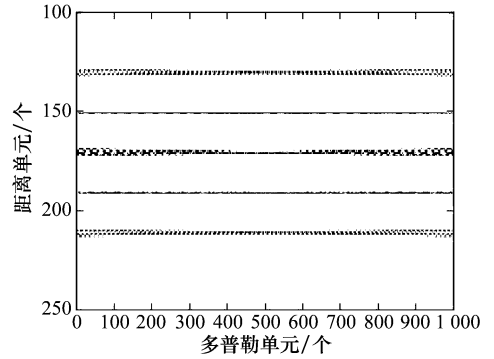


图 5 散射点模型

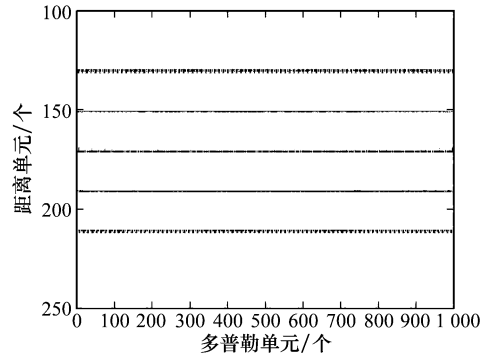
图 6(a)是图 5 散射点模型的一维距离像。结合图 5 来看:散射点模型在纵向分布在 5 个不同的距离上,则其一维距离像在纵向也应分布在 5 个不同的距离单元上。但由于散射点模型的横向尺寸较大,位于模型两侧的散射点的一维距离像在纵向上有所弯曲,横跨了多个距离单元,产生了 MTRC。图 6(b)是采用 Keystone 变换校正 MTRC 后目标的一维距离像,与图 6(a)相比,可以看出图 6(b)明显对产生 MTRC 的散射点的一维距离像进行了校正,便于其在横向上的相干积累。

图 7 给出了 MTRC 校正前后目标的二维像比较。图 7(a)是对图 5 的直接成像结果,从图中可以看出,目标两侧的散射点产生了明显的 MTRC,目标的二维像在纵向上产生模糊。而图 7(b)是校正 MTRC 后目标的二维像。两

幅图相比较,图 7(b)明显消除了 MTRC,对于目标两侧的散射点,与图 7(a)相比,可以得到其清晰的二维像。

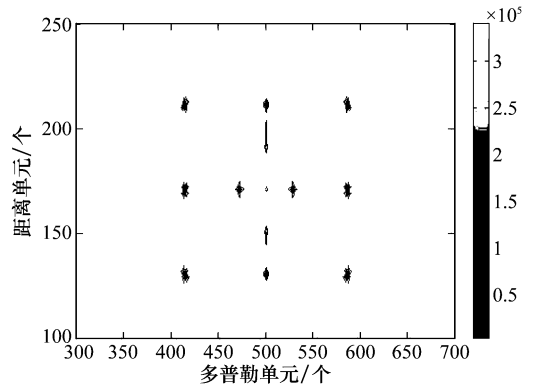


(a) 校正前一维距离像

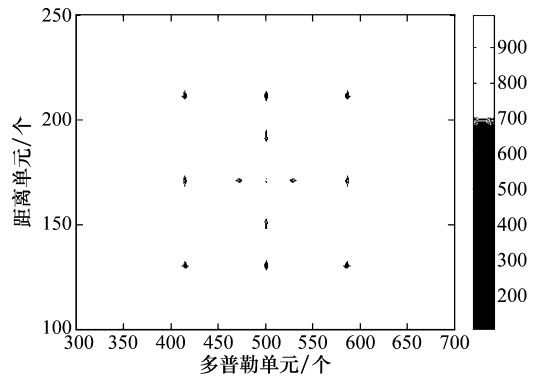


(b) 校正后一维距离像

图 6 一维距离像



(a) 目标直接成像



(b) MTRC校正后二维像

图 7 二维距离像

以上分析是针对双站模式下匀速运动目标而言,而对于机动目标,在采用 Keystone 变换消除 MTRC 后,目标横向的多普勒走动也很严重,这可以采用时频分析的方法来解决,这在以后的研究中将进行详细分析。

## 5 结 论

本文在双站模式下,针对目标尺寸较大导致最终成像结果产生 MTRC 的问题,对 dechrip 处理后的时域信号进行分析,并采用 Keystone 变换的方法消除了目标像的 MTRC。最后,利用点散射目标模型进行了仿真验证,结果表明,Keystone 变换能有效地消除双站 ISAR 中的 MTRC。

## 参考文献:

- [1] 杨振起,张永顺. 双(多)基地雷达系统[M]. 北京:国防工业出版社,1998.
- [2] Palmer J E, Martorella M, Longstaff I D, et al. Aribome ISAR imaging using the emulated bistatic radar system [C]//*Proc. of the Fifth European Conference on Synthetic Aperture Radar*, 2004:375-378.
- [3] 黄艺毅,王军锋,刘兴钊,等. 双站 ISAR 成像算法的研究[J]. 信号处理,2007,23(4):514-517.
- [4] 张亚标,朱振波,汤子跃,等. 双站逆合成孔径雷达成像理论研究

(上接第 1818 页)

## 8 结 论

本文提出了一种新的多目标 DOA 跟踪方法。该方法利用可靠且低复杂度的 FDPM 自适应更新阵列接收信号的时变信号子空间,再采用高斯-牛顿法在更新后的信号子空间中估计多个目标实时变化的 DOA 观测值,最后采用卡尔曼滤波获得当前时刻多个目标的最优 DOA 估计值。该方法有效解决了多个交叉运动目标的跟踪和互联,具有复杂度低、性能较高的特点。

## 参考文献:

- [1] Sword C K, Simaan M, Kamen W W. Multiple target angle tracking using sensor array outputs[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1990,26(2):367-373.
- [2] Park S B. Multiple target angle tracking algorithm using predicted angles[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1994,30(2):643-647.
- [3] 张怀根,吴顺君,张林让,等. 基于 L 型阵列的多目标二维角跟踪算法[J]. 系统工程与电子技术,2008,30(3):459-480. (Zhang Huaigen, Wu Shunjun, Zhang Linrang, et al. New 2-D multi-target angle tracking algorithm based on L-shape arrays [J].

究[J]. 电子与信息学报,2006,28(6):969-972.

- [5] Chen C C, Andrews H C. Targer-motion induced radar imaging [J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1980,16(1), 2-14.
- [6] Carrara W G, Goodman R S, Majewski R M. *Spotlight synthetic radar signal processing algorithms* [M]. Baston/London: Artech House, 1995.
- [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] Perry R P, Dipietro R C, Fante R L. SAR imaging of moving targets [J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1999,35(1):155-159.
- [9] 姜正林,刑孟道,保铮. ISAR 成像的越距离单元走动校正[J]. 电子与信息学报,2002,23(5):577-583.
- [10] 保铮,刑孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- [11] Giovanni C, Anna V. The resolution capabilities in inverse synthetic aperture radar [J]. *Alta Frequenza*, 1989, 58(2): 195-203.

*Systems Engineering and Electronics*, 2008,30(3):459-480.)

- [4] Javier S A, Sylvie M. An efficient PASTd-algorithm implementation for multiple direction of arrival tracking[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1999,47(8):2321-2324.
- [5] Yang J F, Kaveh M. Adaptive eigensubspace algorithms for direction or frequency estimation and tracking[J]. *IEEE Trans. on Acoustics, Speech, Signal Processing*, 1988,36(2):241-251.
- [6] Yang B. Projection approximation subspace tracking[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1995,43(1):95-107.
- [7] Badeau R, Abed-Meraim K, Richard G, et al. Sliding window orthonormal PAST algorithm [C]//*Proc. of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2003: 261-264.
- [8] Valizadeh A, Karimi M. Fast subspace tracking algorithm based on the constrained projection approximation [J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2009(9):1-16.
- [9] Xenofon G D, George V M. Fast and stable subspace tracking[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2008,56(4):1452-1464.
- [10] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [11] Eriksson A, Stoica P, Soderstorm T. On-line subspace algorithms for tracking moving sources[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1994,42(5):2319-2330.