

基于双基 ISAR 的空间高速目标成像分析

朱小鹏, 颜佳冰, 张 群, 李宏伟, 封同安

(空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要 讨论了空间高速运动目标在地基双基地逆合成孔径雷达(Bi-ISAR)系统下的成像算法。首先给出了地基双基 ISAR 的系统模型及其目标回波信号形式, 其次分析了空间目标运动对双基 ISAR 二维分辨率的影响, 在此基础上对回波信号进行分析和处理, 通过数学推导得出当目标高速运动时, 其回波信号中将产生距离展缩项以及不可忽略的残余视频相位项和脉内走动因子, 此后采用构造补偿函数的方法对这些影响成像质量的因素进行补偿, 并应用 Keystone 变换消除成像结果中的越距离单元徙动现象且给出了整个成像处理流程, 最后通过对卫星目标的成像仿真验证了文中所分析的距离展宽项和脉内走动因子对目标二维像的成像影响, 对补偿前后目标像的比较说明了文中补偿算法的有效性和实用性。

关键词 逆合成孔径雷达(ISAR); 分辨率; 解线频调处理; Keystone 变换

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.06.009

中图分类号 TN958 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)06-0044-06

在现代战争的复杂电磁环境对抗中, 鉴于在目标信息获取、识别、抗干扰性和隐蔽性等方面的优势, 双基地雷达正越来越受到人们的关注, 而基于双基地雷达体制构建的双基地逆合成孔径雷达(Bi-ISAR)系统也逐渐成为国内外学者研究的热点问题。Palmer 首先利用水面反射特性分析了伪双基 ISAR 系统的特性^[1]; 之后国内学者黄艺毅、张亚标等人以及高昭昭分别对双基地 ISAR 成像体制进行了详细讨论^[2-4], 分析了成像分辨率和波数域分布特性等问题; 而针对高速运动目标的成像问题, 南京电子技术研究所、国防科大和西电的一些学者分别从不同处理方法、不同信号体制下分析了高速运动目标成像存在的问题及其补偿算法^[5-8], 都取得了很好的效果。

本文在前人研究的基础上针对地基双基 ISAR 系统对空间高速运动目标的成像问题展开研究, 由于双基 ISAR 系统的成像能力和分辨率与双基雷达系统构建有关, 而当目标是高速运动时, 针对低速目标的一些近似条件不再满足。因此本文在构建双基 ISAR 系统模型的基础上, 首先分析了空间目标运动对双基 ISAR 成像系统二维分辨率的影响; 然后通过对回波信号的分析找出目标高速运动对双基 ISAR 成像的影响因素并予以补偿; 针对由于分辨率要求较高和目标高速运动产生的越距离单元徙动现象, 采用 Keystone 变换进行处理, 最终得出清晰的空间目标二维像, 并给出了实验仿真和分析。

1 双基 ISAR 系统模型

建立如图 1 所示的地基双基 ISAR 成像模型。在图 1 中, 以收发平台 T_x 和 R_x 的连线中点为坐标原点、以 T_x 和 R_x 的连线为 x 轴建立直角坐标系, 则 T_x 和 R_x 的坐标分别为 $\left[-\frac{L}{2}, 0\right]$ 和 $\left[\frac{L}{2}, 0\right]$ 。图中 P_{ref} 为目标区域成像参考点, P 为目标区域任一散射点, 目标以速度 v 沿图示方向运动。将目标参考点 P_{ref} 、 P 点与收发平

* 收稿日期: 2011-05-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60971100)

作者简介: 朱小鹏(1982-), 男, 江苏镇江人, 博士生, 主要从事雷达成像信号处理研究。

E-mail: zxpkongjun@126.com

台的初始距离设为 R_{T_0} 、 R_{R_0} 、 R_{TP} 和 R_{RP} , 目标参考点的初始坐标为 $[X_c, R_0]$, 将收发平台与目标连线的夹角定义为双基地角, $\beta(t)$ 则为双基地角的一半 (见图 1), 而 O' 为等效单基地雷达, 其位于双基地角平分线上。由于 ISAR 成像目标大小相对于目标与雷达的距离来说一般都很小, 因此收发平台与目标上所有散射点所构成的双基地角在同一脉冲内可认为是近似相等的。双基 ISAR 与常规 ISAR 成像系统类似, 也是利用距离-多普勒原理进行成像。假设发射平台发射的线性调频信号 (Linear Frequency Modulation, LFM) 为:

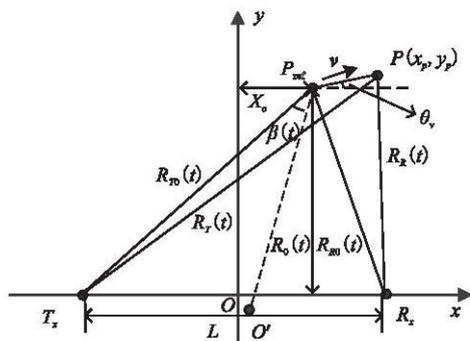


图 1 双基 ISAR 系统模型

Fig. 1 Bi-ISAR system model

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

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; μ 为调频率。脉冲信号以重复周期 T 依次发射, 即

发射时刻 $t_m = mT$ ($m=0, 1, 2, \dots, M$), M 为成像周期内发射脉冲数, t_m 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: $\hat{t} = t - t_m$ 。

设作解线频调处理 (Dechirp) 的参考 LFM 信号为 $s_{\text{ref}}(\hat{t}, t_m)$, 其参考距离为收发平台到参考点的距离和, 设为 $R_{\text{ref}}(t)$, $R_p(t)$ 为点目标 P 到收发平台的距离和。如图 1 所示: $R_{\text{ref}}(t) = R_{T_0}(t) + R_{R_0}(t)$, $R_p(t) = R_{TP}(t) + R_{RP}(t)$ 。则参考点 P_{ref} 、 P 点的回波分别记为 $s_{\text{ref}}(\hat{t}, t_m)$ 和 $s_p(\hat{t}, t_m)$ 。

2 高速目标二维分辨率分析

与单基 ISAR 成像类似, 双基 ISAR 系统也是通过发射宽带信号和相对转角来获得距离向和方位向的二维分辨率; 除此之外, 先前的研究表明: 双基 ISAR 系统的二维分辨率还与半双基地角 $\beta(t)$ 有关^[3-4]。在系统要求的成像时间内, 高速目标的运动状态所产生的 $\beta(t)$ 的变化会导致系统的二维分辨率发生较为剧烈的变化。因此有必要对双基 ISAR 下高速目标的分辨率进行分析。

双基 ISAR 系统中的距离分辨率 ρ_r 和方位分辨率 ρ_a 分别表示如下:

$$\rho_r = \frac{C}{2B} \frac{1}{\cos\beta(t)}, \quad \rho_a = \frac{\lambda}{2} \frac{1}{\Delta\theta \cos\beta(t)} \quad (2)$$

式中: C 为光速; B 为发射信号带宽; λ 为波长; $\Delta\theta$ 为成像时间内目标相对于等效单基雷达 (等效单基雷达位于双基地角平分线上, 与目标的距离为双基地雷达与目标距离和的一半) 的转角。从式 (2) 可以看出, 在确定系统参数后, 距离向的分辨率与 $\beta(t)$ 的余弦函数成反比, 方位向分辨率则与 $\beta(t)$ 的余弦函数和相对转角 $\Delta\theta$ 的乘积成反比。

为分析方便, 这里将图 1 中点目标 P 的运动模型重建见图 2。在图 2 中, 点目标 P 在 $t_m=0$ 时刻位于 A 点, 经过 t_m 时刻运动到图示的 B 点, 在该时间内 P 点运动距离为 $X_p = vt_m$; 等效单基雷达用 O' 表示, $\Delta\theta$ 为成像时间内的相对转角, $\theta_r(t_m)$ 和 $\theta_x(t_m)$ 分别为目标垂线与收发雷达的夹角, c 点为目标垂线与 x 轴的交点, 其余系统参数同图 1。

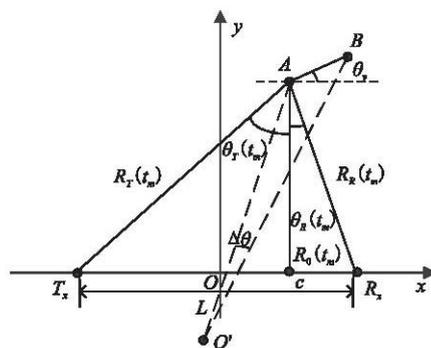


图 2 运动模型

Fig. 2 Moving model

由图 1 和图 2 可得瞬时半双基地角 $\beta(t_m)$ 为:

$$\beta(t_m) = \frac{\theta_T(t_m) + \theta_R(t_m)}{2} \quad (3)$$

而 $\theta_T(t_m)$ 和 $\theta_R(t_m)$ 分别为:

$$\theta_T(t_m) = \arccos[R_0(t_m)/R_T(t_m)] \quad (4)$$

$$\theta_R(t_m) = \arccos[R_0(t_m)/R_R(t_m)] \quad (5)$$

式中:

$$R_T(t_m) = \sqrt{L_{T,c}^2 + R_0^2(t_m)} = \sqrt{(L/2 + X_c + x_p + vt_m \cos\theta_v)^2 + (R_0 + y_p + vt_m \sin\theta_v)^2} \quad (6)$$

$$R_R(t_m) = \sqrt{L_{R,c}^2 + R_0^2(t_m)} = \sqrt{(L/2 - X_c - x_p - vt_m \cos\theta_v)^2 + (R_0 + y_p + vt_m \sin\theta_v)^2} \quad (7)$$

式(6)和式(7)中,符号 L 取距离。

联立式(3) - (7)便可得出瞬时空基角 $\beta(t_m)$ 与目标运动速度 v 和角度 θ_v 的关系。同时,由余弦定理可得:

$$\Delta\theta = \arccos[(L_{AO'}^2 + L_{BO'}^2 - X_p^2)/(2L_{AO'}L_{BO'})] \quad (8)$$

式中 $L_{AO'}$ 和 $L_{BO'}$ 分别表示等效单基雷达在 A 点和 B 点与目标的距离,其值为目标到双基地雷达距离和的一半。

由上述的分析并结合式(2)、(3)和式(8),就可以得到双基 ISAR 系统中高速目标的二维分辨率与目标运动速度和方向的关系。图 3 和图 4 分别给出了在 $R_0 = L = 200$ km、带宽 $B = 1$ GHz 和 $X_c = 20$ km 的条件下,2 种不同的成像时间内目标方位向分辨率 ρ_a 与运动速度 v 和角度 θ_v 的关系图(对于距离向分辨率,读者可以此类似分析)。

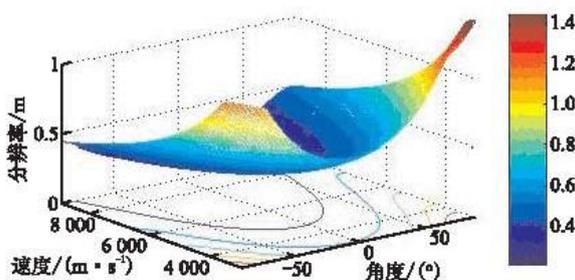


图 3 $\rho_a - v - \theta_v$ 关系图(成像时间 $T=2$ s)

Fig. 3 $\rho_a - v - \theta_v$ relation(imaging time $T=2$ s)

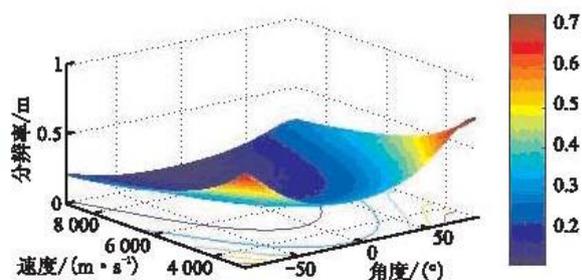


图 4 $\rho_a - v - \theta_v$ 关系图(成像时间 $T=4$ s)

Fig. 4 $\rho_a - v - \theta_v$ relation(imaging time $T=4$ s)

由上述 2 种不同成像时间内分辨率的关系图分析得出:针对不同系统的分辨率要求,应根据获知的目标运动状态进行成像时间选择;而在一些对成像时间要求比较高的情况下,当目标的运动状态不能满足分辨率要求时,则应采用其他的目标识别和检测方法。

3 高速目标相位特性分析及其补偿

在双基 ISAR 系统中,当目标与等效单基雷达的径向速度 v_r 较小时,可以近似认为在一个脉冲周期内,目标与雷达的距离保持不变,即可以采用“走-停”模式进行距离-多普勒成像。但当 v_r 较高时,上述近似不再成立,距离回波包络将会产生展宽或压缩,影响后续的距离向分辨。

假设接收机采用发射宽窄交替脉冲的工作方式,即利用窄脉冲对参考点进行精确跟踪,利用宽脉冲回波进行混频处理。当目标高速运动时,点目标 P 的距离变为 $R'_p(t) = R_p(t) + 2v_r t$,仍采用 τ_0 作参考时延,将 $R'_p(t)$ 代入式(2)并结合式(1),图 1 中 P 点回波信号混频后的输出为:

$$S_{\text{pref}}(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left[\frac{\hat{t} - \tau'}{T_p}\right] \exp(-j2\pi f_c(\tau' - \tau_0) - j2\pi r(\tau' - \tau_0)\hat{t} + j\pi r(\tau'^2 - \tau_0^2)) \quad (9)$$

式中 $\tau' = \tau + 2v_r t/c$ 。

令 $\Delta R = R_p(t) - R_{\text{ref}}(t)$,并以 $\bar{t} = \hat{t} - \tau_0$ 为时间基准重写式(9)如下:

$$S_{\text{pref}}(t, t_m) = \text{rect}\left[\frac{t - \left(\frac{\Delta R}{c} + \frac{2v_r}{c}\tau_0\right)}{T_p}\right] \exp[-j2\pi(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 t + \varphi_4 t^2)] \quad (10)$$

上式中,因为 $v_r \ll c$, $\text{rect}[\]$ 项中取近似 $1 - \frac{2v_r}{c} \approx 1$, 且:

$$\begin{cases} \varphi_1 = f_c \left(\frac{\Delta R}{c} + \frac{2v_r}{c}\tau_0 \right) \\ \varphi_2 = -\frac{1}{2}r \left(\frac{\Delta R}{c} + \frac{2v_r}{c}\tau_0 \right)^2 \\ \varphi_3 = f_c \frac{2v_r}{c} + r \left(\frac{\Delta R}{c} + \frac{2v_r}{c}\tau_0 \right) \\ \varphi_4 = r \frac{2v_r}{c} \end{cases} \quad (11)$$

从式(10)可以得知,经混频处理后高速目标回波信号共包含 4 个相位项。其中 φ_1 为线性相位项, φ_1 中的 $f_c \Delta R/c$ 项产生线性的多普勒频率,是横向分辨的关键因子,而由于目标在各次脉冲内运动产生的相位变化 $2f_c v_r \tau_0/c$ 对各距离分辨单元的影响相同,可通过后续的相位补偿消除其影响;将 φ_2 展开并忽略 v_r/c 的平方项可以发现, φ_2 中包含由于采用 Dechirp 处理而产生的 RVP 项和脉内距离走动因子 $-2r\Delta R v_r \tau_0/c^2$, 该因子和 RVP 项在脉内对各距离分辨单元的影响是不同的,需要在一维距离项中补偿; φ_3 是 t 的一次项,其中的 $r\Delta R/c$ 是一维成像的关键,而因子 $2f_c v_r/c$ 和 $2r v_r \tau_0/c$ 会产生一维距离像包络的偏移,可通过一般的包络对齐算法消除其影响; φ_4 是 t 的二次项,该项因子是距离项的展缩项,根据 v_r 的方向不同,该项因子会引起一维距离项的展宽或缩小。综合以上分析得出:首先应补偿 t 的平方项,即 φ_4 ,其次对各距离分辨单元产生影响 φ_2 进行补偿,而后进行包络对齐,补偿掉 φ_3 中产生包络飘移因子;最后补偿 φ_1 中的干扰项。

将式(10)乘以 $\exp(j2\pi\varphi_4 t^2)$, 补偿掉距离展缩因子后,式(10)变为:

$$S'_{\text{pref}}(t, t_m) = \text{rect}\left[\frac{t - \left(\frac{\Delta R}{c} + \frac{2v_r}{c}\tau_0\right)}{T_p}\right] \exp[-j2\pi(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 t)] \quad (12)$$

对式(12)在快时间域作傅里叶变换,则式(14)变换到快时间频域后可表示成:

$$S'_{\text{pref}}(f_i, t_m) = T_p \text{sinc}[T_p(f_i + \varphi_3)] \exp[-j2\pi(\varphi_1 + \varphi_2)] \exp[-j2\pi f_i \left(\frac{\Delta R}{c} + \frac{2v_r}{c}\tau_0\right)] \quad (13)$$

从式(13)可以看出,将回波信号变换到快时间频域后,其变成 sinc 函数,该函数的峰值位于 $f_i = -\varphi_3$ 处,根据上述的分析,需要对相位项中的 φ_2 进行补偿,因此,针对式(13),需要补偿的总的相位 $\Delta\varphi$ 为:

$$\Delta\varphi = 2\pi\varphi_2 + 2\pi f_i \left(\frac{\Delta R}{c} + \frac{2v_r}{c}\tau_0 \right) \quad (14)$$

将 $f_i = -\varphi_3$ 代入式(14)中,可得:

$$\Delta\varphi = 2\pi \left(-\frac{3f_i^2}{2r} - \frac{4f_i f_c v_r}{cr} - \frac{2f_c^2 v_r^2}{c^2 r} \right) \quad (15)$$

至此,只需要将式(13)乘以 $\exp(\Delta\varphi)$ 就可以补偿掉因采用 Dechirp 处理产生的 RVP 项和目标脉内运动产生的包络漂移和残余相位因子。

整个成像流程见图 5。

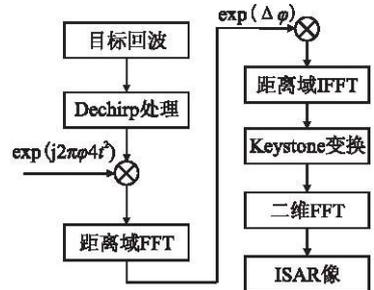


图 5 成像流程图

Fig. 5 Imaging flow

4 成像仿真与分析

采用图 1 所示的系统模型进行仿真,雷达中心频率为 10 GHz,带宽为 1 GHz, $R_0 = L = 200$ km,目标参考点初始位置为 $[X_c, R_0]$, $X_c = 20$ km,目标运动速度 $v = 5$ km/s, $\theta_v = 30^\circ$,成像时间 $T = 4$ s,根据第 2 部分的分析,此系统参数下, $\rho_r = 0.17$ m, $\rho_a = 0.275$ m。目标为一卫星仿真模型,其结构见图 6。图 7 是目标的一维距

离像,因为目标的高速运动,其一维距离像中产生严重的脉内距离走动现象,如图中圈出部分所示;经相位补偿消除脉内走动后,其一维距离像如图 8 所示;图 8 虽然消除了脉冲内的距离走动,但由于目标尺寸相对较大,因此图 8 中存在比较明显的越距离单元徙动现象,采用 Keystone 变换消除越距离单元徙动后就得到清晰的目标一维像,见图 9。图 10 是对回波信号直接作二维 FFT 变换所得到的目标二维像,其成像质量非常差,卫星目标电池板部分严重散焦,影响目标的正常检测和识别;而图 11 则是经过相位补偿和越距离单元徙动校正后的目标像,与图 10 比较来看,得到了清晰的目标二维像。

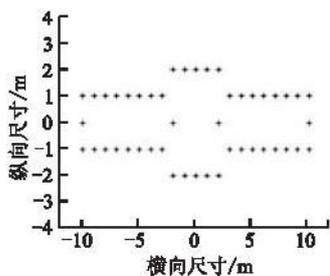


图 6 目标模型

Fig. 6 Target model

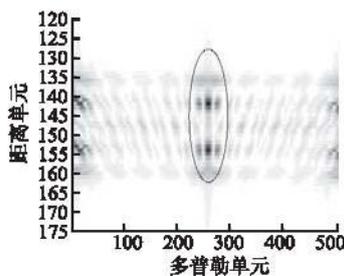


图 7 标一维像

Fig. 7 Profile imaging

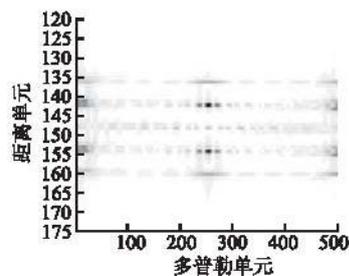


图 8 补偿脉内距离走动后

Fig. 8 After compensation

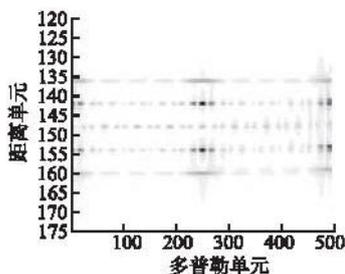


图 9 Keystone 变换后

Fig. 9 After Keystone transformation

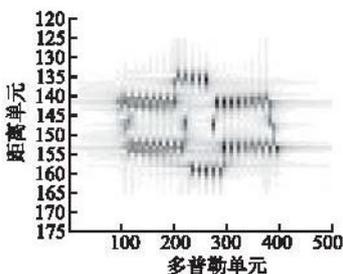


图 10 直接二维 FFT 变换

Fig. 10 Imaging after direct FFT

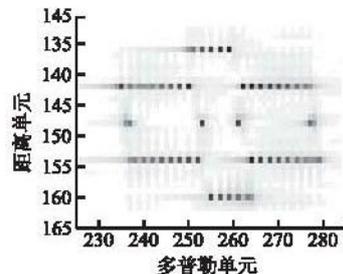


图 11 最终目标像

Fig. 11 Final imaging

5 结束语

本文在双基 ISAR 体制下对空间高速目标成像展开了讨论研究,通过对回波信号相位特性进行分析得出影响成像质量的相位因子,在后续的处理中对其实施补偿,再采用 Keystone 变换对目标一维项进行处理消除越距离单元现象,并最终获得清晰的目标二维像。但在本文的分析中,精确的参考点跟踪和目标径向速度已知是分析的前提条件,而这些量在实际应用中也是存在误差或需要估计的,因此对这些问题需更进一步的研究。

参考文献:

- [1] Palmer J E, Martorella M, Longstaff I D. Airborne ISAR imaging using the emulated bistatic radar system[C]//Proceedings of the 5th European conference on synthetic aperture radar. Berlin: VDE verlag, 2004: 25 - 29.
- [2] 黄艺毅, 王军锋. 双站 ISAR 成像算法的研究[J]. 信号处理, 2007, 23(4): 514 - 517.
HUANG Yiyi, WANG Junfeng. Study of imaging algorithm in bistatic ISAR[J]. Signal processing, 2007, 23(4): 514 - 517. (in Chinese)
- [3] 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[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(6): 969 - 972.
ZHANG Yabiao, ZHU Zhenbo, TANG Ziyue, et al. Bistatic ISAR imaging formation[J]. Journal of electronics & information technology, 2006, 28(6): 969 - 972. (in Chinese)
- [4] 高昭昭, 梁毅, 邢孟道, 等. 双基地逆合成孔径雷达成像分析[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(5): 1055 - 1059.
GAO Zhaozhao, LIANG Yi, XING Mengdao, et al. Analysis of ISAR imagery for bistatic radar[J]. Systems engineering and electronics, 2009, 31(5): 1055 - 1059. (in Chinese)
- [5] 高昭昭, 邢孟道, 张守宏, 等. 基于线性调频步进信号的高速目标 ISAR 成像[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(12): 2813 -

2817.

GAO Zhaozhao, XING Mengdao, ZHANG Shouhong, et al. ISAR imaging of high speed targets based on LMSF signal [J]. Journal of electronics & information technology, 2008,30(12):2813-2817. (in Chinese)

- [6] 刘爱芳,朱晓华,刘中. 基于修正离散 Chirp - Fourier 变换的高速目标 ISAR 距离像补偿[J]. 航空学报,2004,25(5):495-498.

LIU Aifang, ZHU Xiaohua, LIU Zhong. ISAR range profile compensation of fast - moving target using modified discrete chirp - fourier transform[J]. Acta aeronautica & astronautica sinica, 2004,25(5):495-498. (in Chinese)

- [7] 冯德军,王雪松,肖顺平,等. 高速目标解线频调处理的相位特性及其补偿[J]. 电子与信息学报,2008,30(4):916-920.

FENG Dejun, WANG Xuesong, XIAO Shunping, et al. Phase signatures and compensating approach to moving target echoes by dechirping processing[J]. Journal of electronics & information technology, 2008,30(4):916-920. (in Chinese)

- [8] 张义安,尹治平,王东进,等. 高速运动目标的瞬时距离 - 多普勒成像[J]. 中国科学技术大学学报,2009,39(9):954-960.

ZHANG Yian, YIN Zhiping, WANG Dongjin, et al. Instant range - doppler imaging of high speed targets[J]. Journal of university of science and technology of China, 2009,39(9):954-960. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)

The Imaging Analysis of High Speed Space Targets in Bi - ISAR System

ZHU Xiao - peng, YAN Jia - bing, ZHANG Qun, LI Hong - wei, FENG Tong - an

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: This paper discusses the imaging algorithm of high speed space targets in ground based bistatic Inverse Synthesize Aperture Radar (Bi - ISAR) system. Firstly, the system model and the target echo signal form are given; secondly, the influence of space target moving on two dimension resolution is analyzed. Based on the above, the echo signal is analyzed and disposed, when the targets moves in high speed, it will induce the Residual Video Phase (RVP) and ambulating factor pulse inner, then the compensation function is constructed to compensate the influence, furthermore, the Keystone transformation is used to eliminate the MTRC and the whole imaging flow is given. Finally, the simulation imaging of satellite target is given to validate that the infection of the RVP and ambulating factor pulse inner can't be ignored. The comparison between the before and after compensation images shows the effectiveness and practicability of the proposed algorithm.

Key words: inverse synthesize aperture radar (ISAR); resolution; dechirp; Keystone transformation