

基于距离徙动轨迹的空间目标 ISAR 联合运动补偿算法

俞翔^{1,2} 朱岱寅² 毛新华²

(1. 南京工程学院计算机工程学院, 南京, 211167; 2. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京, 210016)

摘要: 针对空间高速运动目标的运动特征, 分析目标距离徙动轨迹 (Range migration trajectory, RMT) 与等效运动模型, 提出了一种基于距离徙动轨迹的联合运动补偿算法。该算法依据距离像全局熵值最小化原则, 从 RMT 中估计出目标的平动参数, 根据平动参数分别补偿距离像偏移并校正一维距离像畸变, 从而实现对空间目标回波的距离对齐和脉内走动的联合平动补偿。仿真和实测数据处理结果表明该算法准确性较高, 更重要的是, 距离对齐步骤不会引入随机偏移误差和相位误差, 这也是应用高分辨成像方法的前提条件。

关键词: 逆合成孔径雷达; 距离徙动轨迹; 空间目标; 联合运动补偿

中图分类号: TN957.52 **文献标志码:** A

ISAR Joint Motion Compensation Algorithm Based on Range Migration Trajectory for Space Target

Yu Xiang^{1,2}, Zhu Daiyin², Mao Xinhua²

(1. Department of Computer Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, 211167, China; 2. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Aiming at the motion features of high speed moving target in space, by analyzing the range migration trajectory (RMT) and the equivalent motion model of the target, a RMT-based joint motion compensation algorithm is proposed in this paper. In the algorithm, the translational parameters of the target are estimated from RMT according to the global entropy minimization principle. Then the range profile offset is compensated and one dimensional range alignment distortion is corrected by using these translational parameters, which can realize the joint motion compensation of range alignment and intra pulse moving for the space target echo. Simulation and experimental results show that the proposed algorithm has high accuracy. What's more, range offset error and phase error cannot be introduced in the range alignment procedure, which is the precondition of high-resolution imaging method application.

Key words: inverse synthetic aperture radar (ISAR); range migration trajectory; space target; joint motion compensation

引 言

逆合成孔径雷达(Inverse synthetic aperture radar, ISAR)成像技术是一种主动探测手段,可不受气象条件的影响远距离获取非合作目标的高分辨图像。近年来,公开发表的文献中就不乏对多类目标的ISAR成像研究成果^[1-6]。本文针对空间高速运动目标,研究其脉内走动补偿和距离对齐即联合运动补偿问题。

高精度运动补偿是ISAR高分辨成像必须解决的关键问题。空间目标大多具有极高的运行速度,若目标在脉宽内的径向运动(脉内走动)距离与距离分辨率相比不能忽略,则经典的“停-跳”假设不再适用,而脉内走动会导致距离像散焦,降低图像的实际分辨率,因此,脉内走动必须加以补偿。现有脉内走动补偿算法主要利用单个脉冲估计瞬时多普勒^[7-8],而由于回波的个体差异,针对脉冲逐个校正的方法显然会引入随机误差,而且其算法精度和鲁棒性均受脉宽的限制。目标径向运动造成的距离像相对偏移也会导致图像方位向散焦,因此需要通过距离对齐算法校正。现有的距离对齐算法主要可以分为互相关对齐^[9-11]和全局对齐^[12-15]两类。前者在距离像相关性不强的情况下对齐效果不佳,而后者一般以某种全局优化准则作为代价函数,通过迭代的方法使代价达到最小值。虽然,通过插值可以在一定程度上提高现有距离对齐算法的精度,但距离偏移误差和低频相位误差的引入仍不可避免。这一方面导致了目标图像不同程度的散焦,另一方面,由于原始的回波相位历程被破坏,使得高分辨成像变得困难。

本质上,目标的距离像偏移和脉内走动都源于目标的距离徙动,即距离徙动相对于脉间和脉内是无差别的。据此,本文针对空间目标的运动特点,研究了目标的等效运动与距离徙动轨迹(Range migration trajectory, RMT),并提出了一种基于目标RMT的脉内和脉间联合运动补偿算法。该算法依据全局熵最小化原则,首先从RMT中估计出目标的平动参数即加速度和速度,再根据平动参数分别补偿距离像偏移和回波相位的高次项,从而实现空间目标回波的距离对齐和脉内走动的联合平动补偿。本算法不依赖于回波之间的相关性,且在距离对齐过程中不会引入距离偏移误差和低频相位误差。

1 空间目标等效运动分析

首先,使用如图1所示的模型不失一般性地分析目标与雷达的相对运动,其中 $\epsilon o' \eta$ 坐标系固定在目标上, η 轴在 t_1 时刻与雷达视线(Radar line-of-sight, RLOS)重合, a 点和 o' 点分别为任意散射点和目标中心, XOY 坐标系随RLOS转动。

两坐标系的关系为

$$\begin{cases} X = \epsilon \cos \theta - \eta \sin \theta \\ Y = \eta \cos \theta + \epsilon \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ 为RLOS的转动角度, R_a 为 t_i 时刻的雷达相对目标中心的距离。雷达相对目标上任意点 $a(\epsilon_a, \eta_a)$ 的距离可表示为

$$r_a(t) = [X_a^2(t) + Y_a^2(t)]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

当 $Y_a^2(t) \gg X_a^2(t)$ 时

$$r_a(t) \approx Y_a(t) = R_o(t) + \eta_a \cos \theta(t) + \epsilon_a \sin \theta(t) \quad (3)$$

由式(3),可将 $r_a(t)$ 分解成等效转动和平动两个分量,即

$$r_a(t) = r_T(t) + r_R(t) \quad (4)$$

式中目标中心 o' 到雷达的径向距离 $r_T(t)$ 和目标上任意点 a 等效转动引入的距离变化 $r_R(t)$ 分别为

$$r_T(t) = \sqrt{R_{o1}^2 + (vt + \frac{1}{2}at^2)^2} \approx R_{o1} + \frac{(4vt + 2at^2)^2}{R_{o1}} \quad (5)$$

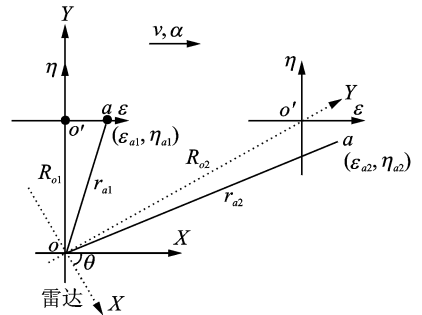


图1 目标相对雷达运动的几何模型
Fig. 1 Geometric model of relative motion between the target and radar

$$r_R(t) = \eta_a \cos\theta(t) + \epsilon_a \sin\theta(t) \approx \eta_a \left(1 - \frac{\theta(t)^2}{2}\right) + \epsilon_a \theta(t) \quad (6)$$

由于空间目标在空气十分稀薄的环境中运行,因此大气扰动对其运动的影响可忽略,且多数情况下目标都遵循圆或椭圆轨道匀速运行。因此,从地面观测空间目标,其加速度 α 可忽略不计,平动分量可近似为二次函数^[8,16],则式(5)可简化为

$$r_T(t) \approx R_{o1} + \frac{(4\tau t)^2}{R_{o1}} \quad (7)$$

进一步分析目标平动分量对回波信号的影响,可假设发射信号为

$$S_s(t) = A\left(\frac{t}{T}\right) \exp[j2\pi(f_c t + \frac{Kt^2}{2})] \quad (8)$$

式中: A 为信号包络, T 为脉宽, f_c 为载频, K 为调频斜率, t 为快时间。那么任意散射点回波可表示为

$$S_r(t) = A\left(\frac{t-\tau}{T}\right) \exp\{j2\pi[f_c(t-\tau) + \frac{K(t-\tau)^2}{2}]\} \quad (9)$$

对式(9)去斜得到的基带信号可表示为

$$S_d(t) = A\left(\frac{t-\tau}{T}\right) \exp[-j2\pi\Phi(t)] \quad (10)$$

式中

$$\Phi(t) = f_c(\tau - t_0) + Kt f_c(\tau - t_0) - \frac{1}{2}K(\tau^2 - t_0^2) \quad (11)$$

$$\tau = 2r_T(t)/c \quad (12)$$

$$t_0 = 2R_0/c \quad (13)$$

由上述分析可知,空间目标的平动分量 $r_T(t)$ 为时间的二次函数,所以可用目标径向加速度 $\bar{\alpha}$ 、径向速度 \bar{v} 和起始距离 R_c 来表示,即

$$r_T(t) = R_c + \bar{v}t + \frac{1}{2}\bar{\alpha}t^2 \quad (14)$$

进一步将式(12,14)代入式(10),则式(10)中的幅度和相位分别表示为

$$A\left(\frac{t-\tau}{T}\right) = A\left[\frac{t(1-2\bar{v}/c) - 2R_c/c - \bar{\alpha}t^2}{T}\right] \quad (15)$$

$$\Phi(t) = \frac{2f_c(R_c - R_0)}{c} + \left[\frac{2\bar{v}}{c}f_c + K\frac{2(R_c - R_0)}{c}\right]t + \left[K\frac{2\bar{v}}{c} + \frac{f_c\bar{\alpha}}{c}\right]t^2 + \frac{K}{c}\bar{\alpha}t^3 \quad (16)$$

式中: c 为光在真空中的飞行速度。由式(16)可知,相位一次项包含了距离像的偏移信息,二次项和三次项则是由脉内走动引起的谱峰展宽和分裂。由此可见,距离像偏移和脉内走动均可用 $\bar{\alpha}$ 和 \bar{v} 表示,因此,估计出 $\bar{\alpha}$ 和 \bar{v} 就可以将距离像偏移和脉内走动问题一并解决。

2 基于全局熵的联合运动补偿方法

上述相对运动中的线性分量称为距离走动,非线性分量称为距离弯曲,距离徙动是两分量的叠加,而目标的 RMT 就是所有散射点的距离徙动曲线的集合。本节拟利用目标 RMT 估计目标的平动参数即加速度和速度,并据此解决脉间和脉内联合运动补偿问题。

2.1 基于 RMT 全局熵最小化的平动参数估计方法

假设有 M 个距离像 $p_i(r + \Delta r_i)$, $i=0, 1, \dots, M-1$; r 和 Δr_i 分别表示目标到雷达的径向距离和偏移量。用 M 个距离像的和包络定义平均距离像(Average range profile, ARP),即

$$p_{\text{ave}}(r, \Delta r_i) = \sum_{i=1}^M |p_i(r + \Delta r_i)| \quad (17)$$

其中

$$\Delta r_i = R_0 + \bar{v}t_i + \frac{1}{2}\bar{\alpha}t_i^2 \tag{18}$$

$$t_i = \frac{i}{\text{PRF}} \quad i = 0, 1, \dots, M-1 \tag{19}$$

式中:PRF 表示脉冲重复频率。那么,RMT 的全局熵值可以定义为

$$E_{\text{RMT}} = - \int_r \frac{\mathbf{p}_{\text{ave}}(r, \Delta \mathbf{r})}{S} \cdot \ln \frac{\mathbf{p}_{\text{ave}}(r, \Delta \mathbf{r})}{S} dr \tag{20}$$

其中 $\Delta \mathbf{r} = [\Delta r_1, \Delta r_2, \dots, \Delta r_M]$, $S = \int_r \mathbf{p}_{\text{ave}}(r, \Delta \mathbf{r}) dr$ 。

对于同一段回波数据,距离对齐精度越高,其 E_{RMT} 越小^[12]。据此本文采用最小化 E_{RMT} 作为距离对齐的准则,将平动参数 \bar{v} 和 $\bar{\alpha}$ 的估计问题归结为

$$\underset{\bar{v}, \bar{\alpha}}{\text{argmin}} [E_{\text{RMT}}] \quad \bar{v} \in [-\bar{v}_{\text{max}}, +\bar{v}_{\text{max}}], \bar{\alpha} \in [-\bar{\alpha}_{\text{max}}, +\bar{\alpha}_{\text{max}}] \tag{21}$$

即分别在闭区间 $[-\bar{v}_{\text{max}}, +\bar{v}_{\text{max}}]$ 和 $[-\bar{\alpha}_{\text{max}}, +\bar{\alpha}_{\text{max}}]$ 内,期望估计出精确的速度 \bar{v} 和加速度 $\bar{\alpha}$,使得 E_{RMT} 达到最小值。然而,在上述区间内对速度和加速度进行二维搜索十分复杂。考虑到 \bar{v} 和 $\bar{\alpha}$ 相互独立,因此双一维搜索是解决上述最优化问题的有效方法之一,即分别对 \bar{v} 和 $\bar{\alpha}$ 进行一维搜索让 E_{RMT} 达到最小值。本文采用了文献[15]的搜索算法以加快算法收敛速度,该算法除了第一次迭代,每次迭代只要计算一个函数值,因此效率较高。

2.2 距离对齐与脉内走动补偿算法

将速度和加速度的估计值 \bar{v}_e 和 $\bar{\alpha}_e$ 代入式(14),得到每一个距离像的偏移量估值 Δr_{ie} 为

$$\Delta r_{ie} = R_c + \bar{v}_e t_i + \frac{1}{2}\bar{\alpha}_e t_i^2 \tag{22}$$

由于 Δr_{ie} 不一定是距离单元的整数倍,若直接采用 Δr_{ie} 距离对齐将会引入较大的量化误差。因此,利用傅氏变换的时频移位对称性质对一维距离像 $p_i(r)$ 距离对齐,具体为

$$p_i(r) \xrightarrow{\text{DFT}} p_i(f_r) \tag{23}$$

$$p_i(f_r) = p_i(f_r) \cdot \exp(j4\pi\Delta r_{ie} f_r / c) \cdot \exp(j4\pi\Delta r_{ie} / \lambda) \tag{24}$$

$$p_i(f_r) \xrightarrow{\text{IDFT}} p_i(r) \tag{25}$$

式中 λ 为波长,式(24,25)分别表示线性相位项和距离偏移的相位补偿项。

另一方面,脉内走动造成的频谱展宽和分裂同样可以用平动参数估计值 \bar{v}_e 和 $\bar{\alpha}_e$ 来补偿。由第 2.1 节分析可知,为补偿式(16)中的二次项和三次项,可令

$$\bar{\Phi}_e(t) = [K \frac{2\bar{v}_e}{c} + \frac{f_c}{c} \bar{\alpha}_e] t^2 + \frac{K}{c} \bar{\alpha}_e t^3 \tag{26}$$

则脉内走动补偿后的回波信号可表示为

$$S_c(t) = S_d(t) \cdot \exp[j2\pi\bar{\Phi}_e(t)] \tag{27}$$

至此,距离像偏移和脉内走动根据平动参数均得到了补偿。上述算法的步骤流程图如图 2 所示。

3 实验验证与分析

实验搜集了“长曲棍球”卫星的外形和尺寸,构建了如图 3 所示的该目标的 3 维模型(960 个标准散射点)。利用卫星工

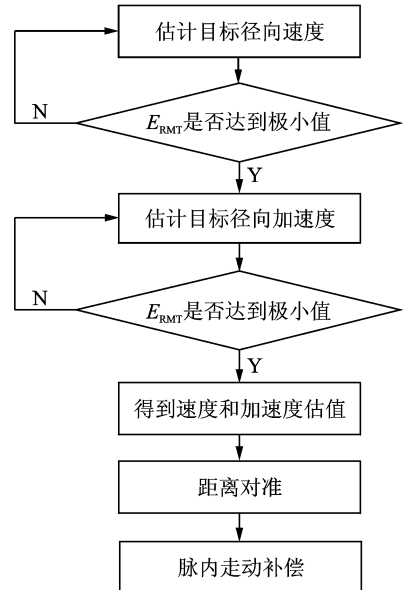


图 2 算法流程

Fig. 2 Algorithm flow chart

具包软件仿真目标过轨时的相对雷达位置和其自身的姿态,并据此构建了目标的标准散射点运动模型。图 4 为仿真该卫星运行到某个弧段时,对其遥测得到的回波。为了更加接近真实情况,在回波信号中加入了白噪声,使得脉压后的信噪比为 3 dB。

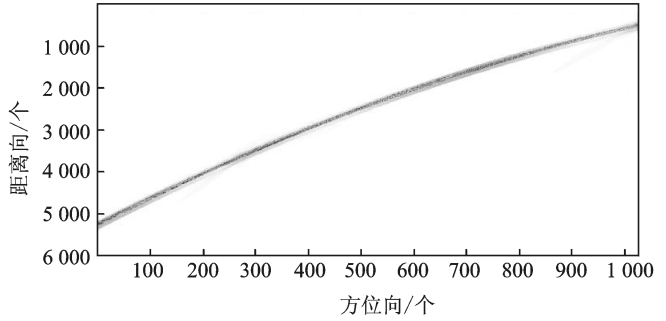
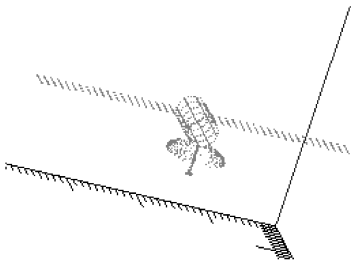


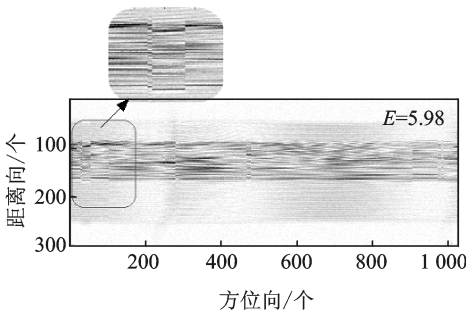
图 3 “长曲棍球”卫星散射点三维模型

Fig. 3 3D scatter point model of “Lacrosse” satellite

图 4 仿真卫星回波

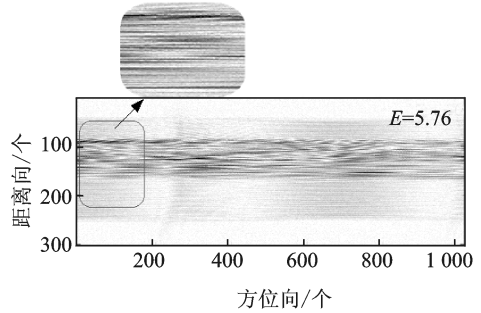
Fig. 4 Simulation of satellite raw echoes

采用该仿真数据,分析本文算法的性能并与积累互相关距离对齐算法比较。首先,运用本文算法估计出目标径向速度和径向加速度分别为 $\bar{v}_c = 231.4529 \text{ m/s}$ 和 $\bar{\alpha}_c = -69.7754 \text{ m}^2/\text{s}$; 积累互相关算法的距离对齐结果如图 5(a)所示,而基于上述运动参数的估值利用本文算法进行距离对齐的结果如图 5(b)所



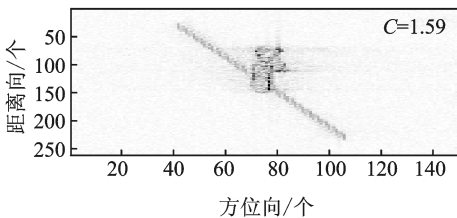
(a) 积累互相关算法距离对齐结果

(a) Range alignment result of cross-correlation accumulation algorithm



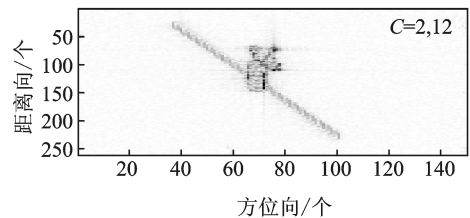
(b) 本文算法距离对齐结果

(b) Range alignment result of proposed algorithm



(c) 积累互相关算法处理之成像结果

(c) Imaging result of cross-correlation accumulation algorithm



(d) 本文算法处理之成像结果

(d) Imaging result of proposed algorithm

图 5 仿真卫星回波距离对齐及成像结果

Fig. 5 Range alignment and imaging results of satellite raw echoes simulation

示。需要说明的是,在运用前者时已经对回波距离向进行了4倍插值,而运用后者则不需要插值。通过比较图中的熵值(即 E_{RMT})可知,后者的全局对齐精度更高。将图5(a,b)中的圈出部分放大,可从图像上看出后者的纹理更平滑,这进一步说明后者具有较高的局部对齐精度。在上述距离对齐的基础上,经过相位补偿最终成像的结果如图5(c,d)所示,后者图像对比度 C 更高,由此可知后者的聚焦效果更好。

以下是基于实测数据的验证实验,基于 Yak-42 飞机实测回波构建了满足本文算法工作条件的数据,构建步骤为:(1)对 Yak-42 飞机实测数据使用全局最小熵算法距离对齐;(2)用二次函数扰动已对齐的距离像得到处理后的回波数据。图6 积累互相关算法与本文算法的对比试验结果,比较图6(c,d)可知,由本文算法处理得到的图像质量较好。

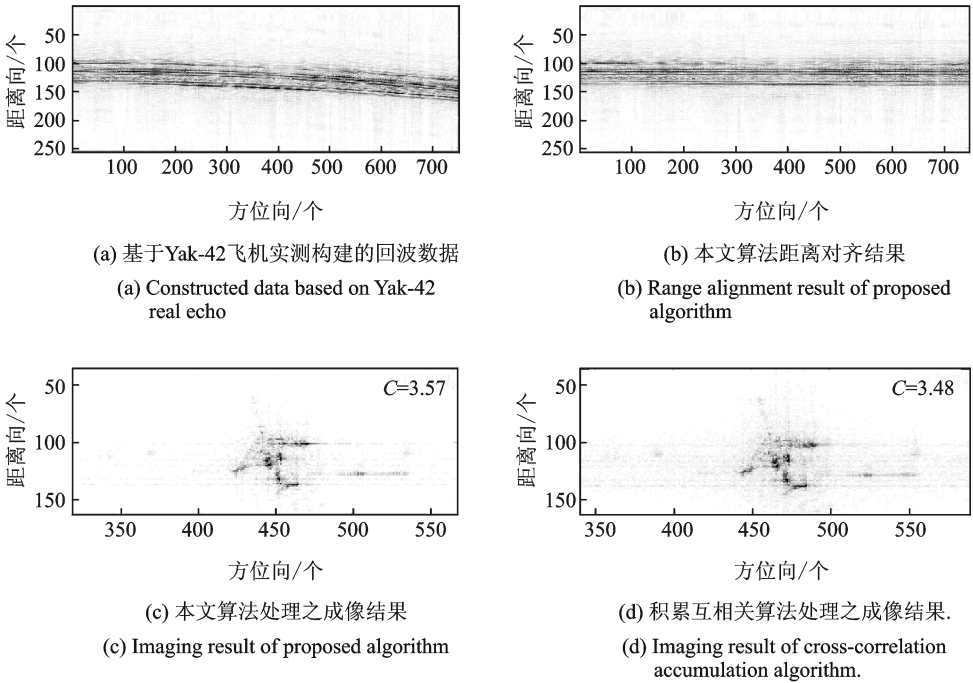
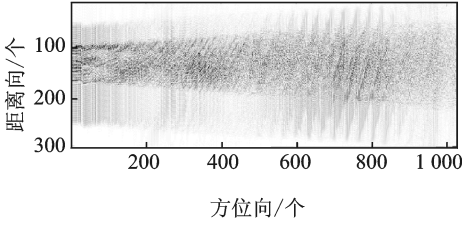


图6 实测数据距离对齐与成像结果

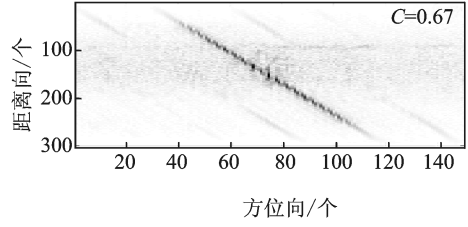
Fig. 6 Range alignment and imaging results of real echo

为实现高分辨率成像,需要采用大转角成像算法或者 MTRC 算法校正散射点的越分辨率单元走动。而运用上述两种方法的必要条件是回波具备完整和正确的相位历程。图5(a,b)经 Keystone 变换之后的结果分别如图7(a,c)所示,Keystone 变换之后的成像结果分别如图7(b,d)所示。由于积累互相关算法在距离对齐过程引入了相位误差和距离偏移误差,不能满足 Keystone 变换的必要前提条件,使其失效,因此无法实现高分辨率成像。

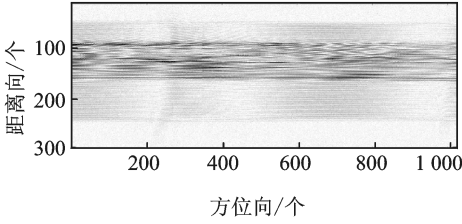
固定雷达参数,脉内走动现象会随着目标径向速度增大而变得显著。如下实验中目标的径向速度为 2000 m/s ,加速度为 200 m/s^2 ,其对成像的影响主要体现为目标点距离向的展宽,当然也会造成方位向散焦,结果如图8(a,c)所示。利用本文算法估计出的运动参数对回波校正和成像的结果如图8(b,d)所示,可见图像聚焦效果明显改善。



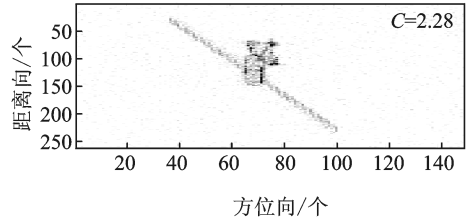
(a) 图5(a)的Keystone变换结果
(a) Keystone transform result of Fig.5(a)



(b) 图7(a)的成像结果
(b) Imaging result of Fig.7(a)



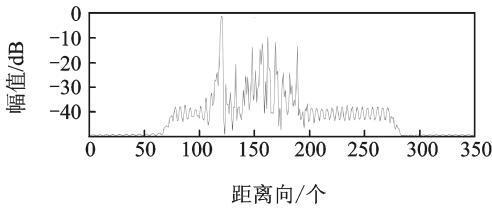
(c) 图5(b)的Keystone变换结果
(c) Keystone transform result of Fig.5(b)



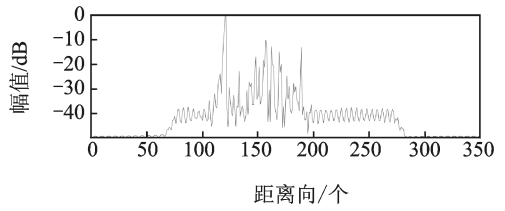
(d) 图7(c)的成像结果
(d) Imaging result of Fig.7(c)

图7 MTRC 校正及成像结果

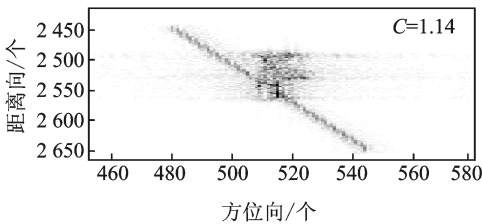
Fig.7 MTRC correction and imaging results



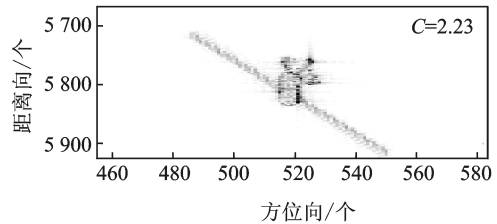
(a) 脉内走动补偿之前脉压结果
(a) Pulse compression result before intra-pulse motion compensation



(b) 脉内走动补偿之后脉压结果
(b) Pulse compression result after intra-pulse motion compensation



(c) 脉内走动补偿之前成像结果
(c) Imaging result before intra-pulse motion compensation



(d) 脉内走动补偿之后成像结果
(d) Imaging result after intra-pulse motion compensation

图8 脉内走动补偿结果

Fig.8 Results of intra-pulse motion compensation

4 结束语

本文通过研究空间目标的运动特征,分析了目标等效运动模型与 RMT 的关系,并基于距离像全局熵值最小化原则,提出了一种距离对齐和脉内走动的联合平动补偿算法。实验结果表明,该算法准确性较高且不会引入相位误差和偏移误差,以后的工作将基于本文的研究成果,进一步研究空间目标大转角高分辨成像方法和方位向定标方法,最终提出空间目标的高分辨成像方案。

参考文献:

- [1] Jurgens Raymond F. Earth-based radar studies of planetary surfaces and atmospheres[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1982, 20(3): 293-305.
- [2] Ausherman Dale A, Kozma J, Walker J L, et al. Developments in radar imaging[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1984, 20(4): 363-399.
- [3] Chen C C, Andrews H C. Target motion induced radar imaging[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1980, 16(1): 2-14.
- [4] 王天云, 陆新飞, 孙麟. 基于贝叶斯压缩感知的 ISAR 自聚焦成像[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(11): 2719-2726.
Wang Tianyun, Lu Xinfei, Sun Lin. An autofocus imaging method for ISAR based on Bayesian compressive sensing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(11): 2719-2726.
- [5] 吴称光, 邓彬, 苏伍各. 基于块稀疏贝叶斯模型的 ISAR 成像方法[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(12): 2941-2947.
Wu Chengguang, Deng Bin, Su Wuge. ISAR imaging method based on the Bayesian group-sparse modeling[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(12): 2941-2947.
- [6] 朱江, 廖桂生, 朱圣棋. 空间目标成像中基于 FrFT 的高精度距离压缩方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2015, 37(2): 271-277.
Zhu Jiang, Liao Guisheng, Zhu Shengqi. High precision range compression based on FrFT for space target imaging[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2015, 37(2): 271-277.
- [7] 许人灿, 杜琳琳, 陈曾平. 一种改进的空间目标高速运动补偿方法[J]. *宇航学报*, 2010, 31(4): 1118-1124.
Xu Rencan, Du Linlin, Chen Zengping. An improved method for high speed motion compensation of space target[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(4): 1118-1124.
- [8] 黄小红, 邱兆坤, 许人灿. 空间轨道目标 ISAR 成像方法[J]. *数据采集与处理*, 2005, 20(2): 203-207.
Huang Xiaohong, Qiu Zhaokun, Xu Rencan. ISAR imaging of space object in orbit[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2005, 20(2): 203-207.
- [9] 王根原, 保铮. 逆合成孔径雷达运动补偿中包络对齐的新方法[J]. *电子学报*, 1998, 26(6): 5-8.
Wang Genyuan, Bao Zheng. A new algorithm of range alignment in ISAR motion compensation[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1998, 26(6): 5-8.
- [10] 汪玲, 朱兆达. 一种基于最大修正峰度的 ISAR 距离对齐算法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2006, 38(6): 722-726.
Wang Ling, Zhu Zhaoda. New range alignment algorithm for ISAR based on maximum modified kurtosis[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, 38(6): 722-726.
- [11] Wang J F, Liu X Z. Improved global range alignment for ISAR[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43(3): 1070-1075.
- [12] Zhu D Y, Wang L. Robust ISAR range alignment via minimizing the entropy of the average range profile[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(2): 204-208.
- [13] Yu Xiang, Zhu Daiyin, Zhang Jingdong, et al. Motion compensation algorithm based on the designing structured gram matrices method[J]. *IET Radar Sonar and Navigation*, 2014, 8(3): 209-219.
- [14] 董祺, 张磊, 徐刚. 采用子孔径分割的逆合成孔径雷达成像包络对齐方法[J]. *西安交通大学学报*, 2014, 48(12): 107-113.

Dong Qi, Zhang Lei, Xu Gang. Envelope alignment algorithm for inverse synthetic aperture radar imaging based on splitting sub-apertures[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014,48(12):107-113.

[15] 俞翔, 朱岱寅. 一种改进型全局最小熵 ISAR 距离对齐算法[J]. 数据采集与处理, 2012,27(5):535-540.

Yu Xiang, Zhu Daiyin. Improved global minimum entropy range alignment algorithm for ISAR[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2012,27(5):535-540.

[16] 刘林. 人造地球卫星轨道力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992: 164-171.

Liu Lin. Orbital mechanics of artificial satellite[M]. Beijing: Higher Education Press, 1992:164-171.

作者简介:



俞翔(1982-),男,博士研究生,研究方向:逆合成孔径雷达成像技术,E-mail:cw-al20@163.com。



朱岱寅(1974-),男,教授,博士生导师,研究方向:雷达成像和信号处理,E-mail:zhudy@nuaa.edu.cn。



毛新华(1979-),男,副教授,硕士生导师,研究方向:合成孔径雷达信号处理,E-mail:xinhua@nuaa.edu.cn。

(编辑:王静)

