

微小卫星雷达隐身性能的在轨逆合成孔径雷达成像分析

刘 斌¹ 张 翔² 廖文和²

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016; 2. 南京航空航天大学高新技术研究院, 南京, 210016)

摘要:成像雷达是空间目标监视系统中的重要组成部分。为深入评估某微小卫星的隐身性能,对卫星的逆合成孔径雷达(ISAR)成像效果进行预测,从雷达成像角度评估卫星的隐身效果。首先简述用于空间目标成像的ISAR成像的基本原理。然后构造卫星的散射点模型,散射系数采用微波暗室的实际测量值。依据仿真雷达系统参数和卫星实际在轨运行参数,计算卫星ISAR成像所需成像时间。对卫星3种飞行姿态,即卫星顶部指向地球表面的隐身姿态、卫星顶部与飞行方向一致和卫星底部指向地球表面两种非隐身姿态,以及不同信噪比情况,进行ISAR仿真,详细分析每种情况下的运动补偿效果和最终ISAR成像效果,说明了卫星隐身设计的有效性。

关键词:微小卫星;雷达隐身;逆合成孔径雷达(ISAR);成像

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-2615(2011)06-0816-06

Radar-Stealth Performance Evaluation of Minisatellite by In-Orbit
Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging

Liu Bin¹, Zhang Xiang², Liao Wenhe²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics
& Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. Academy of Frontier Science, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Imaging radar is an essential part of space surveillance system. The radar-stealth performance of a minisatellite is evaluated and verified from the perspective of radar imaging. Firstly, the principle of inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging is introduced, which is widely used in space object imaging. Then, a multi-scattering model is constructed with proper RCS obtained by practical testing in microwave dark room for the later numerical imaging simulation. Integration time required by the imaging is estimated from the simulated radar system parameters and trajectory parameters of the satellite. Imaging simulation is performed under three scenarios with different SNR levels: (1) The satellite top points to the earth surface, which is referred to as the stealth attitude; (2) The orientation of the satellite top is the same with the satellite flying direction; (3) The satellite bottom points to the earth surface. The effects of motion compensation and the reconstructed image under these scenarios are analyzed and compared, results show that the stealth design of minisatellite is effective.

Key words: minisatellite; radar stealth; inverse synthetic aperture radar (ISAR); imaging

目标雷达散射截面(Radar cross section, RCS)是评价雷达接收到的目标回波信号能量的主要指标之一。隐身飞行器的设计通常都是通过减小目标的RCS来实现,从而使其回波信号功率低

于雷达进行正常检测的门限。本文研究基于某微小卫星,其隐身设计也是以缩减RCS为目的,采用了特殊隐身结构,并结合了隐身天线罩的使用。

在空间监视系统中,雷达目标识别所利用的目

标特征信息,除了雷达回波的时域、频域响应、极化特性与散射特性,还会利用目标的图像特征信息。因此,有必要探讨对微小卫星的雷达成像,对可能获得的成像结果进行合理预测,从而对隐身微小卫星在空间飞行时的实际防御(或隐身)能力进行更全面的评价。

空间运动目标成像采用的是逆合成孔径雷达(Inverse synthetic aperture radar, ISAR)成像技术。该成像方法利用目标与雷达之间的相对运动,基于距离-多普勒(RD)原理^[1-6]进行成像。距离高分辨率通过发射宽带信号和脉冲压缩技术获得,而方位高分辨率通过对合成孔径时间内收到的不同方位角的目标回波进行相干处理获得。在实际应用中,ISAR 已经成功获取飞机、舰船、卫星、导弹,以及其他空间和地面运动目标的精细图像,成为战略防御系统中极为重要的一种目标识别手段。

本文对某隐身微小卫星在轨状态下的 ISAR 成像进行了仿真研究,预测了微小卫星的 ISAR 成像效果,验证了微小卫星隐身设计对于雷达目标识别系统的有效性。

1 ISAR 成像基本原理

本节首先以经典的转台成像为例,简述 ISAR 成像的基本原理^[1,4-6]。转台成像几何关系如图1所示,一个三维目标投影到二维雷达成像平面上,目标以均匀角速度绕 z 轴作旋转运动。雷达与目标旋转中心的距离为 R_0 ,目标绕 O 点旋转的角速率为 ω 。

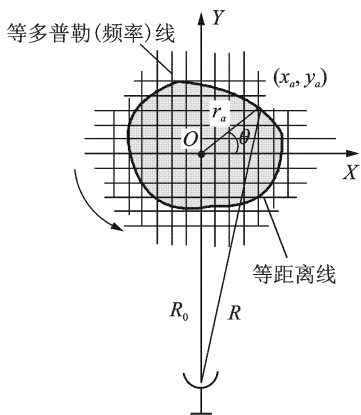


图1 转台成像示意图

在 $t=0$ 时刻,目标上某一散射点 (x_a, y_a, z_a) 与雷达之间的距离可表示为

$$r = \sqrt{R_0^2 + r_a^2 + 2R_0r_a\sin(\theta + \omega t)} \quad (1)$$

式中 $r_a = \sqrt{x_a^2 + y_a^2}$ 。通常,雷达与目标之间的距离

远大于目标的物理尺寸,即 $r_0 \gg r_a, z_a$,因此式(1)可近似表达为

$$r \approx R_0 + x_0\sin\omega t + y_0\cos\omega t \quad (2)$$

根据式(2),回波信号的多普勒频率为

$$f_d = \frac{2}{\lambda} \frac{dr}{dt} = \frac{2x_a\omega}{\lambda}\cos\omega t - \frac{2y_a\omega}{\lambda}\sin\omega t \quad (3)$$

式中 λ 为雷达波长。假设在 $t=0$ 附近一个较小时间段内对接收信号进行处理,由于目标相对雷达转过的角度很小,式(2,3)可近似写为

$$r = r_0 + y_a \quad (4)$$

$$f_d \approx \frac{2x_a\omega}{\lambda} \quad (5)$$

由式(4,5)可见,目标上任一散射点的位置 (x_a, y_a) 可通过分析回波信号的距离延时和多普勒频率来获得,这就是距离-多普勒(Range-time, RD)成像的基本原理。实际方位成像通过方位向快速傅里叶变换(Fast Fourier transform, FFT)就可实现。

ISAR 成像距离向分辨率 ρ_r 和方位向分辨率 ρ_a 分别为

$$\rho_r = \frac{c}{2B} \quad (6)$$

$$\rho_a = \frac{\lambda}{2\omega T} = \frac{\lambda}{2\Delta\theta} \quad (7)$$

式中: c 为电磁波传播速率; B 为雷达发射信号带宽; $\Delta\theta$ 为目标在成像时间 T 内转过的角度。可见,发射信号带宽越宽,距离分辨率越高,转角 $\Delta\theta$ 越大,等效天线孔径越大,方位向分辨率越高。

转台成像是 ISAR 的理想成像模式。ISAR 更普遍的是利用目标相对于雷达的等效转动分量进行成像,ISAR 对飞机,以及空间轨道目标的成像,主要利用的就是这种等效转动。在该模式下,目标与雷达间的相对运动不仅只有转动,而且伴随有平动分量存在。平动分量会造成同一散射点相邻两回波信号的延时变化和相位变化,导致无法成像,因此必须在成像前予以消除,即进行运动补偿。补偿过程一般分为距离对准和相位补偿两步,分别将相邻的回波信号在距离向对齐,和把目标平动造成的多普勒相位变化补偿掉。

本文对微小卫星的 ISAR 成像仿真中,采用基于平均距离像最小熵的全局对准方法完成距离对准^[7],采用改进秩一相位误差(Rank one phase error, ROPE)估计算法完成相位补偿^[8]。基于平均距离像最小熵的全局对准方法以目标所有距离像和的熵作为目标函数,推导出了熵达到最小时,各回波需要补偿的距离位移量的计算表达式。通过迭代,可以收敛到一个接近于全局最优的解。该方法

避免了搜索,算法效率高,是目前距离对准的算法中较为实用的一个。改进的ROPE 相位补偿算法一定程度上消除了原ROPE 算法设置零多普勒频率的盲目性,改善了ROPE 算法直接用于ISAR 相位补偿的性能,并通过引入迭代进一步提高了ROPE 相位补偿算法估计平动相位分量的精度。

2 一种隐身卫星仿真模型构造

采用多散射点构造卫星成像模型,其外形示意图如图 2 所示。目标主要尺寸如图中标注(单位:mm)。图 2(a,b)分别是卫星模型的侧视图和顶视图。该模型共包含 140 个散射点,各散射点坐标间距为不大于 0.075 m。

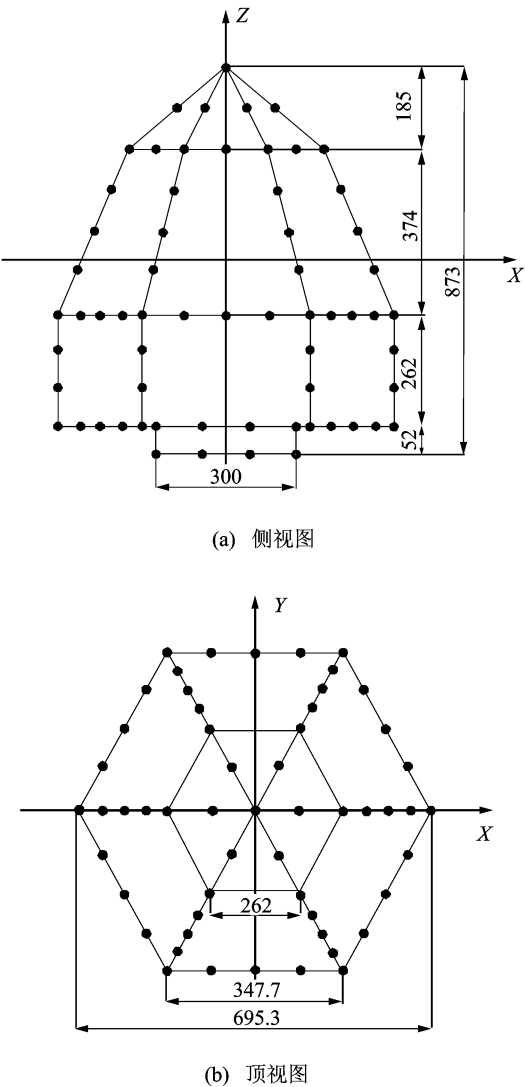


图 2 卫星散射点模型示意图

3 成像仿真参数设置

卫星运行图如图 3 所示。由于轨道近地点和远地点十分接近,可近似为圆形轨道,卫星可看做在

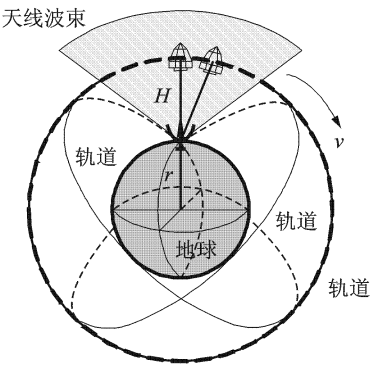


图 3 卫星运行示意图

该圆形道上绕地心匀速转动。图中阴影区域为雷达可观测范围。

轨道高度 $H=500$ km,地球半径 $r=6\,370$ km。卫星飞行速度为

$$v = \sqrt{\frac{\mu}{H + r}} = 6.99 \text{ km/s} \tag{8}$$

式中 $\mu=3.986\times10^5 \text{ km}^2/\text{s}^2$ 。

由于本文关注的是微小卫星的ISAR 成像效果,因此可简化分析,认为在成像积累时间内卫星沿直线飞行。该简化一方面会使卫星相对雷达的平动分量发生变化,但仍为平稳运动,不会影响运动补偿的效果;另一方面,由于未考虑轨道弯曲引入的等效转动,达到与真实运行情况下相同的方位向分辨率,所需的成像时间稍有增加。上述两方面均不影响最终的成像效果。

图 4 给出了仿真采用的成像几何关系。考虑 3 种卫星飞行姿态:(1)卫星顶部指向地球表面;(2)卫星顶部与轨道飞行方向一致;(3)卫星底部指向地球表面。由前面分析可知,ISAR 成像的图像投影平面IPP 即为X-Y 平面。在每种姿态下,散射点模型中散射点的反射系数均参考在微波暗室中测定的平均RCS 值,分别为0.06,3.89,4 m²。仿真中暂不考虑电磁波照射的遮挡效应。

雷达工作频率 $f_0=5.45$ GHz,发射线性调频脉冲信号,带宽 $B=2$ GHz,脉冲宽度 $T_p=9.2 \mu\text{s}$,调频斜率 $k=2.17\times10^{14}$,数据采样频率 $f_s=2.2$ GHz;脉冲重复频率(Pulse repetition frequency, PRF)为10 Hz。PRF 的选择需要满足方位向不模糊成像宽度,由于卫星尺寸较小,所以这里选取的PRF 值较小。

由以上雷达信号参数和式(6)可知,成像距离分辨率为0.075 m。由式(7)可知,为使方位向分辨率与距离向分辨率一致,即0.075 m,卫星相对于

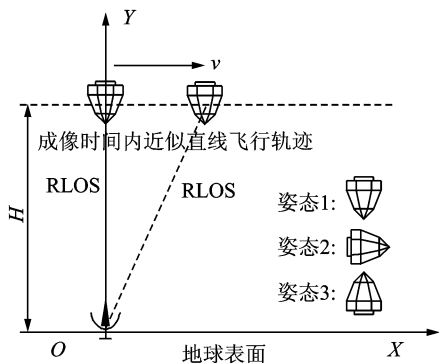


图4 仿真成像几何关系

雷达转过的角度必须达到 0.3667 rad (约 21°)。由于等效转速

$$\omega = v/H = 0.014 \quad (9)$$

可以确定成像所需积累时间为 $T \approx 27 \text{ s}$ 。根据脉冲重复频率可进一步确定采用的回波脉冲数为 270。

需要指出的是,空间目标的高速运动会使一维距离像发生畸变,在 ISAR 运动补偿之前需要进行速度补偿。而且由于空间目标基本处于电离层(约 $60 \sim 2\,000 \text{ km}$) 范围之内或之上,电磁波在电离层的传输会引起目标回波幅度和相位的起伏,对成像效果产生一定影响。由于本文研究的主要目的是探讨微小卫星的 ISAR 成像效果和 ISAR 图像特征,因此为简化分析,仿真中没有考虑上述两方面因素,这在已有空间目标 ISAR 成像研究中也是可行的。此外,仿真不考虑天线增益,在回波中添加高斯噪声模拟接收机噪声。

4 成像结果及分析

由于本文研究针对的微小卫星仅实现顶部隐身,考察卫星顶部指向地球表面姿态下的 ISAR 成像效果更为重要。因此,对于这种飞行姿态(对应图 4 中姿态 1),仿真两种不同噪声水平下的成像,噪声方差 σ^2 (平均功率) 分别为 0.09 W 和 0.04 W ,对应信噪比分别为 $0, -4 \text{ dB}$ 。对其余两种飞行姿态的成像,主要是为了与隐身姿态的成像进行比较,因此仅考虑一种较高的噪声水平 $\sigma^2 = 0.09 \text{ W}$,对应姿态 2 下的回波信噪比为 22.3 dB ,姿态 3 下的回波信噪比为 22.5 dB 。实际中,噪声水平未知,且环境因素和用于探测卫星的对方雷达系统参数,如发射功率、天线增益等均未知,因此回波信号信噪比并不确定,但通过比较相同噪声水平下卫星不同姿态的 ISAR 成像,可以验证卫星的隐身设计是否有效。

噪声水平 $\sigma^2 = 0.09 \text{ W}$ 时,卫星在两种非隐身姿态(姿态 2, 3)下的 ISAR 成像仿真如图 5, 6 所示。其中图 5(a, b) 分别是姿态 2 情况下,回波脉冲距离压缩后的结果,以及采用平均距离像最小熵全局对准法^[7]对回波脉冲进行距离对准后的结果。姿态 3 情况下,距离压缩后和距离对准后的结果与图 5(a, b) 类似,限于篇幅,本文不再给出。

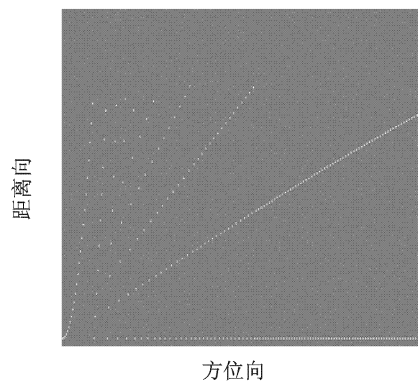
由于卫星飞行速度较大,相邻回波脉冲间的距离走动量较大,可以是数十、上百个距离单元。为充分利用存储空间,降低对存储空间的要求,对回波脉冲的到达时刻进行自动调整,使所有回波脉冲都能够存储在一个指定大小的存储空间内,而不会发生越界,这也是实际 ISAR 系统采用的数据录取方式,因此出现了如图 5(a) 所示的距离像分布。图 5(b) 中近似水平的“亮条”表明,卫星在非隐身姿态下,相对于雷达平动分量引起的距离偏移可被有效补偿。“亮条”沿距离向的宽度可认为是成像时间段中心时刻,卫星向雷达视线方向投影的尺寸。因此,由“亮条”在距离向包含的像素个数和像素距离向尺寸,可对卫星整体尺寸进行粗略估计。对于图 5(b),“亮度”大致占据 13 个像素,而像素距离向尺寸为

$$\frac{c}{2f_s} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2.2 \times 10^9} \approx 0.068 \quad (10)$$

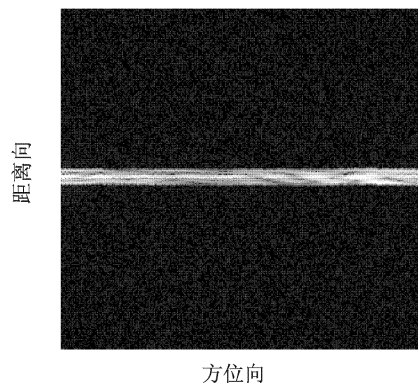
计算可得卫星尺寸估计值为 0.884 m , 接近真实值 0.873 m 。

采用改进 ROPE 算法^[8]对距离对准后的回波脉冲进行相位补偿,然后通过方位向 FFT 进行 RD 成像,结果如图 5(c) 和图 6 所示。比较图 5(c) 和图 6, 可以明显看出卫星姿态的变化。此外,可以发现图 5(c) 中卫星顶部指向与卫星运行方向正好相反,这是由于等效转动矢量方向穿出纸面(参考图 4),卫星以其自身质心为旋转中心,做逆时针转动,因此卫星顶部朝远离雷达的方向运动,多普勒频率为负(方位向中心为多普勒频率零点)。

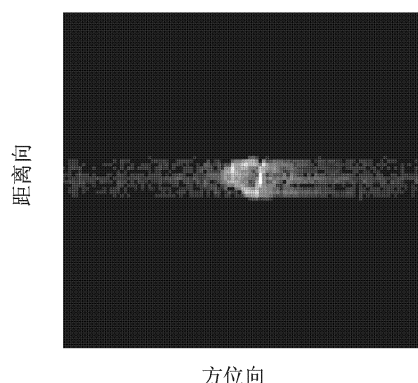
图 7 给出了相同噪声水平下,卫星处于隐身姿态,即卫星顶部指向地球表面时,对卫星的 ISAR 成像仿真结果。图 7(a) 是距离压缩后、距离对准前的卫星 270 次一维距离像。可见,由于雷达发射信号从卫星顶部入射,反射回波较弱,导致回波信噪比过低,目标信息被淹没在噪声中,难以发现任何目标。对该数据用上述相同方法实施距离对准后,从图 7(b) 可以观察到少量的目标回波信息,如白色圆圈内区域,但由于信噪比低,无法实现有效对准。运动补偿是 ISAR 成像的前提,而距离对准是



(a) 距离对准前各次距离像



(b) 距离对准后各次距离像



(c) 相位补偿后RD成像结果

图5 噪声水平 $\sigma^2=0.09\text{ W}$,卫星在姿态2下的ISAR 成像仿真

运动补偿的第一步,目的是保证能够进行后续方位向处理。显然,基于图 7(b)的距离对准结果,根本无法成像。

将图7 与图5,6 相比,可以看出,在同一噪声水平下,ISAR 可以得到卫星非隐身姿态下的较清晰的成像结果,并可辨别目标大致尺寸和飞行姿态,但卫星以隐身姿态飞行时,ISAR 无法完成运动补偿,可以证明微小卫星顶部隐身设计的有效性。虽然 ISAR 成像利用多脉冲的相干积累,原理上可以

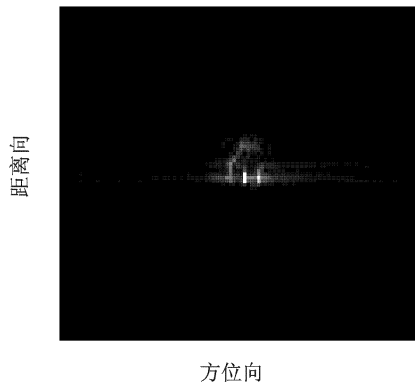
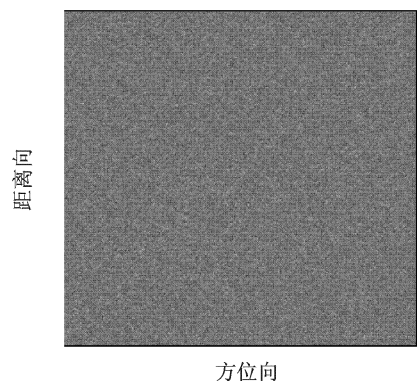
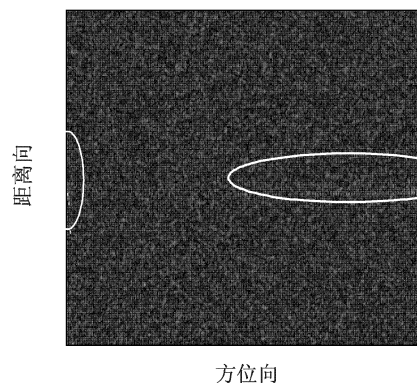


图6 噪声水平 $\sigma^2=0.09\text{ W}$,卫星在姿态3下的ISAR RD 成像结果



(a) 距离对准前各次距离像



(b) 距离对准后各次距离像

图7 噪声水平 $\sigma^2=0.09\text{ W}$,卫星在姿态1下的270次距离像(距离压缩后的回波)

提高信噪比,增加对目标的检测概率,据此曾有学者提出 ISAR 具有反隐身能力,但是 ISAR 脉冲相干积累的前提是完成运动补偿。在目标回波信噪比较低时,无法保证运动补偿的精度,甚至无法完成,根本不能进行下一步的相干成像处理,以上对隐身微小卫星的 ISAR 成像仿真也说明了这一点。

图8 给出了噪声功率 $\sigma^2=0.04\text{ W}$ 时,卫星隐身姿态下的 ISAR 成像仿真结果。由于信噪比稍有提

高,由图8(a)可以看到部分回波脉冲的距离偏移量可以被补偿,但仍难以保证参与成像的所有回波脉冲被对准,最后也无法得到卫星在该姿态下的清晰图像。对于其余两种姿态,由于在 $\sigma^2=0.09$,较高噪声功率水平下可以得到较好的卫星 ISAR 图像,在噪声功率减小至 $\sigma^2=0.04$ W 时,可以预见仍然可以得到卫星清晰的 ISAR 图像,因此这里不再进行仿真实验。

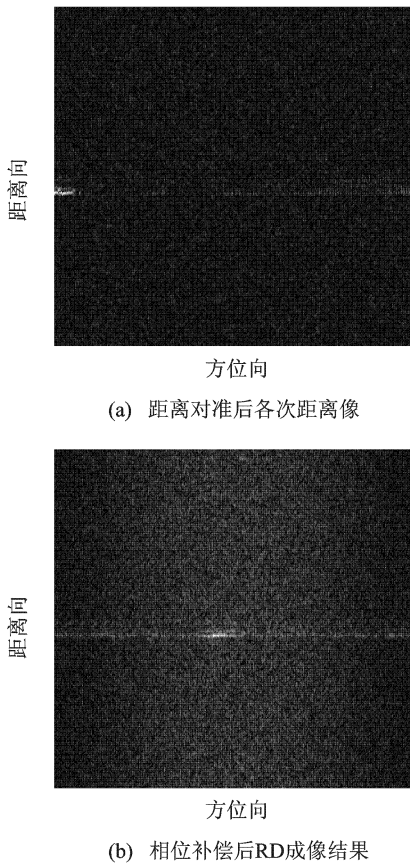


图8 噪声水平 $\sigma^2=0.04$ W,卫星在姿态1下的ISAR 成像仿真结果

以上仿真结果验证了该微小卫星的隐身设计的有效性,同时说明了实际在轨运行时,为获得良好的隐身效果,卫星应按顶向“隐身姿态”飞行,避免或减少以姿态2或3运行。

5 结束语

ISAR 是空间监视系统的重要组成部分,可提供比目标整体散射特性更为详尽的目标特征信息,而且 ISAR 采用脉冲相干积累进行成像, also 具有很强的抗干扰能力。本文从雷达成像的角度,分析了某微小卫星的隐身性能。通过对卫星的 ISAR 成像进行仿真,以及卫星不同姿态下的 ISAR 仿真成像结果的对比,说明了该微小卫星的隐身设计可有效降低 ISAR 的探测和识别性能。

参考文献:

- [1] Ausherman D D, Kozma A. Development in radar imaging[J]. IEEE Transactions on AES, 1984, 20 (4): 363-399.
- [2] Prickeet M J, Chen C C. Principle of inverse synthetic aperture radar [C]// IEEE Electronics & Aerospace Systems Conventions. Arlington, VA, USA: IEEE, 1980: 340-345.
- [3] Chen C C, Andrews H C. Target motion induced radar imaging [J]. IEEE Transactions on AES, 1980, 16(1): 2-14.
- [4] Walker J L. Range-Doppler imaging of rotating object[J]. IEEE Transactions on AES, 1980, 16(1): 23-52.
- [5] Brown W M, Fredericks R J. Range-Doppler imaging with motion through resolution cells[J]. IEEE Transactions on AES, 1969, 15(1): 98-102.
- [6] Mensa D L. High resolution radar imaging [M]. Boston: Artech House, 1982.
- [7] Zhu D Y, Wang L, Tao Q N, et al. ISAR range alignment by minimizing the entropy of the average range profile [C]//2006 IEEE International Radar Conference. Verona, New York, USA: IEEE, 2006: 813-818.
- [8] Wang Ling, Zhu Zhaoda. ISAR motion compensation using ROPE[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 21(1): 65-68.