

中轨SAR海面运动舰船回波建模研究

李立^{1,2}, 李财品^{2*}, 何明一¹

(1. 西北工业大学电子信息学院 西安 710129; 2. 中国空间技术研究院西安分院 西安 710100)

【摘要】中轨SAR具有宽测绘带及重访时间短的优势,是低轨SAR与高轨SAR的重要补充。然而,相对于低轨SAR,中轨SAR具有合成孔径时间长,轨道特性复杂等特点,常规斜距模型不适用于中轨SAR。考虑了回波非“停-走-停”的情况,结合轨道及运动舰船特点,对中轨SAR舰船目标斜距模型进行定量化分析。得到舰船在静止、匀速运动、加速运动时四阶斜距模型能够满足成像要求,当受海浪影响时四阶斜距模型将失效的结论。最后实现中轨SAR海面舰船回波精确建模。

关键词 回波建模; 中轨SAR; 运动舰船; 斜距模型

中图分类号 TN98

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2019.06.006

Echo Modeling of Moving Ship Target for MEO SAR

LI Li^{1,2}, LI Cai-pin^{2*}, and HE Ming-yi¹

(1. School of Electrical and Information, Northwestern Polytechnic University Xi'an 710129;

2. China Academy of Space Technology(Xi'an) Xi'an 710100)

Abstract Medium-orbit SAR (MEO SAR) is an important complement to low-orbit SAR and geosynchronous orbit SAR because of its advantages of wide swath and short revisit time. However, compared with low-orbit SAR, MEO SAR has the characteristics of long synthetic aperture time, complex orbital characteristics. Conventional echo model is not suitable for the imaging of moving targets in MEO SAR. In this paper, the slant-range models of MEO SAR are quantitatively analyzed. It is concluded that the fourth-order slant-range model can meet the imaging requirements when the ship is in the case of static, uniform motion and acceleration. But it will be invalid when the ship is affected by ocean waves. Finally, the accurate echo model of medium-orbit SAR is realized.

Key words echo modeling; medium orbit SAR; moving ship; slanting distance model

目前在轨的SAR卫星一般处于低轨道上,其重访时间一般比较长,难以满足用户对特定区域重访观测的需求。而高轨SAR虽然时间重访比较短^[1-3],但是其合成孔径时间长,从而带来了一系列的成像难题。中轨SAR介于低轨与高轨SAR之间,轨道高度一般为2 000~20 000 km,兼顾了重访时间短的优势,合成孔径时间又不会太长,是低轨SAR与高轨SAR的重要补充^[4-6]。

对于中轨SAR的研究目前处于起步阶段,主要集中在对静止场景的成像算法。文献[7]提出了利用改进的双曲斜距模型对中轨SAR的斜距模型进行描述,推导了回波的二维频谱表达式。文献[8]提出了基于方位向二阶扰动函数的改进距离多普勒算法,主要解决中轨SAR成像方位向空变性的问题。文献[9]提出了基于运动补偿原理的中轨SAR标准双曲线

模型斜距表达方法,并基于该斜距模型与自适应等效速度模型改进了常规的OMEGA-K成像算法,使其适应于中轨SAR聚焦成像。文献[10]提出了一种基于时间-多普勒重采样改进的CS成像算法,主要用于解决距离向、方位向二维空变性以及方位向需要高阶多普勒参数估计的问题。然而,上述的算法及信号的回波建模方法均是静止场景和目标的情况。对于运动的目标,尤其是海上运动舰船的回波建模而言,常规静止场景建模方法并不适用。

本文从中轨SAR的回波特性出发,建立了中轨SAR长合成孔径时间下的海面运动舰船的回波模型,考虑了回波非停-走-停,复杂的轨道及目标运动特性等因素,定量分析了舰船在各种运动状态下的回波斜距模型,实现了中轨SAR海面舰船回波精确建模。

收稿日期: 2018-10-08; 修回日期: 2019-06-04

作者简介: 李立(1976-),男,博士生,主要从事遥感技术、数据传输、信号处理等方面的研究。

通信作者: 李财品, E-mail: licaipin2007@163.com

1 中轨SAR回波建模

与低轨SAR海面动目标回波建模相比较, 中轨SAR海面动目标回波建模具有以下特点:

- 1) 由于中轨SAR星地作用距离远, 信号传播时间延迟长, 回波“停-走-停”假设不再成立。
- 2) 中轨SAR长合成孔径时间下运动轨迹与目标的运动轨迹复杂, 常规的二阶斜距表达式不适合于对中轨SAR复杂运动轨迹斜距模型的精确描述。
- 3) 海面运动目标本身运动特性复杂, 加之受到海浪的影响, 出现摆动及晃动的特性。如何准确地描述海面动目标的运动特性也是其中难点。

因此, 中轨SAR海面运动目标的回波模型远比低轨SAR回波模型复杂。

1.1 非“停走停”回波特性

中轨SAR平台到目标距离远, 大约为低轨SAR的4~40倍, 回波时延大幅增加, 通常低轨SAR信号的回波时延只有几毫秒, 而中轨SAR达到上百毫秒。在此期间平台的移动不能忽略, 因此中轨SAR不再满足“停-走-停”假设。下图1描述了非“停-走-停”假设下舰船与平台的相对运动几何关系示意图。

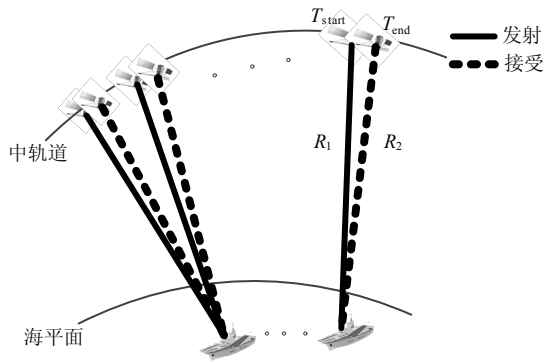


图1 舰船与平台相对运动几何关系示意图

其中, T_{start} 为发射信号时刻; T_{end} 为接收信号时刻; R_1 为发射脉冲到目标斜距标量; R_2 接收脉冲到目标斜距标量。由以上几何关系可建立如下等式:

$$R_1 + R_2 = (T_{end} - T_{start})c \tag{1}$$

式中, c 为光速。

在已知轨道参数下, R_1 可以根据时刻 T_{start} 确定; T_{end} 为所求得接收时刻, 计算 R_2 所需的参数都需由 T_{end} 确定。上式为超越方程, 没有解析解, 需要采用迭代的求解方法。

设起始值为 T_{end_0} , 表达式如下:

$$T_{end_0} = T_{start} + 2R_1 / c \tag{2}$$

$$R_{2_0} = R(T_{end_0}) \tag{3}$$

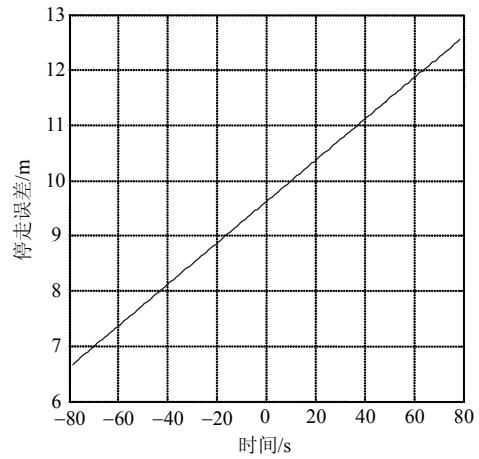
迭代过程如下:

$$T_{end_{n+1}} = T_{end_n} + \left[\frac{R_1 + R_{2_n}}{c} - (T_{end_n} - T_{start}) \right] \quad n=1,2,\dots \tag{4}$$

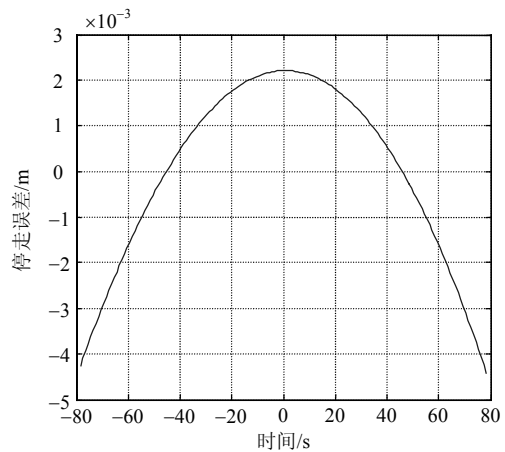
$$R_{2_{n+1}} = R(T_{end_{n+1}}) \quad n=1,2,\dots \tag{5}$$

若迭代误差 $\Delta R = R_1 + R_{2_n} - (T_{end} - T_{start})c$ 小于误差容限 $\lambda/8$, 则可认为迭代结果满足要求。因此, 本文可以假设在卫星收发位置之间存在某个位置使得其与目标的斜距 R_e 满足 $2R_e = R_1 + R_2$ 。从而将非“停-走-停”模型与“停-走-停”模型统一起来, 有利于回波模式的描述及算法的推导。

假设轨道高度10 000 km, 轨道倾角30°, 雷达视角13°, 合成孔径时间157 s, 雷达中心频率为5.4 GHz。图2为“停-走-停”模型和基于上述分析改进的等效非“停-走-停”模型引入的双程斜距误差:



a. “停-走-停”模型



b. 等效非“停-走-停”模型

图2 双程斜距误差比较

由此可见, 如果不考虑“停-走-停”模型, 其引起的双程斜距误差将达到12.5 m, 不满足成像的要求, 而考虑非“停-走-停”模型后其引起的双程斜距误差减少到 2.2×10^{-3} m, 小于成像所需求的 $\lambda/8 = 6.95 \times 10^{-3}$ m, 显然能够满足成像的需求。

1.2 斜距模型

建立与真实斜距历程相适应的高精度等效距离模型是信号二维频域解析表达式推导和后续成像算法设计的数学基础。传统机载SAR和低轨SAR等效斜距模型均是基于假设平台做匀速直线运动情况下推导的,不满足中轨SAR长合成孔径时间复杂运动轨迹斜距精度要求。此外,中轨SAR海面动目标斜距模型还必须考虑舰船自身平动和转动分量的贡献,因此其斜距的表达式十分复杂。

海面动目标运动一般可以视为据有6个基本自由度的运动^[11],其中包括起伏、纵移、横摆3个平动分量和滚动、俯仰、偏航3个转动分量。

图3给出了舰船坐标系下6个自由度的示意图。

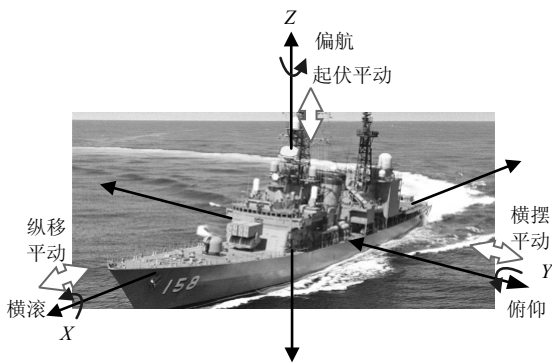


图3 舰船坐标系下6个自由度的示意图

1) 平动分量

在中轨SAR长合成孔径时间下舰船目标不仅表现为匀速运动,而且也可能具有一定加速度的运动。因此,需要综合考虑其运动状态的变化。

若舰船上某个位置点在舰船坐标系 $OXYZ$ 下的初始位置为 $[X_0 \ Y_0 \ Z_0]^T$,则 t 时刻该位置点在舰船坐标系 $OXYZ$ 下的位置 $[X'_0 \ Y'_0 \ Z'_0]^T$ 可以表示为:

$$\begin{bmatrix} X'_0(t) \\ Y'_0(t) \\ Z'_0(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 + X_{\text{surge}}(t) + \int_0^t v_x(t)dt + \int_0^t a_x(t)tdt \\ Y_0 + Y_{\text{sway}}(t) + \int_0^t v_y(t)dt + \int_0^t a_y(t)tdt \\ Z_0 + Z_{\text{heave}}(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $X_{\text{surge}}(t)$ 、 $Y_{\text{sway}}(t)$ 、 $Z_{\text{heave}}(t)$ 为慢时间采样时刻下海浪驱动船体目标沿三轴的平移量, $v_x(t)$ 、 $v_y(t)$ 为舰船航行引入的速度分量。 $a_x(t)$ 、 $a_y(t)$ 为舰船航行引入的加速度分量。

2) 转动分量

舰船目标受海面风浪影响,实际转动是比较复杂的运动。一般情况下可以把舰船的转动近似看成正弦运动,其周期取决于舰型,其幅度与海情、舰

型的航速和航向有关。

首先以舰船中心为原点建立舰船坐标系 $OXYZ$,3个转轴为坐标轴,滚动轴和俯仰轴所形成的平面 XOY 与海面平行,偏航轴 OZ 与海面垂直。

则舰船坐标系 $OXYZ$ 下的目标的位置可以表示为:

$$\begin{bmatrix} X''_0(t) \\ Y''_0(t) \\ Z''_0(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_r(t) & \sin\theta_r(t) \\ 0 & -\sin\theta_r(t) & \cos\theta_r(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_p(t) & 0 & \sin\theta_p(t) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_p(t) & 0 & \cos\theta_p(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta_y(t) & \sin\theta_y(t) & 0 \\ -\sin\theta_y(t) & \cos\theta_y(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X'_0(t) \\ Y'_0(t) \\ Z'_0(t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, θ_r 、 θ_p 和 θ_y 分别表示船体滚动、俯仰、偏航的转动角度。

假设卫星在地球固定坐标系下考虑非“停-走-停”模型后的等效坐标为 $(X_s(t), Y_s(t), Z_s(t))$,则卫星到目标的斜距可表示为:

$$R(t) = \sqrt{(X_s(t) - X''_0(t))^2 + (Y_s(t) - Y''_0(t))^2 + (Z_s(t) - Z''_0(t))^2} \quad (8)$$

根据斜距表达式,卫星到舰船的等效斜距模型 $R(t)$ 又可以表示为:

$$R(t) = \|\mathbf{r}_{\text{sat}} - \mathbf{r}_{\text{ship}}\| \quad (9)$$

式中, \mathbf{r}_{sat} 、 \mathbf{r}_{ship} 为卫星与舰船在地球固定坐标系的瞬时位置向量;利用泰勒级数展开可将 $R(t)$ 表示为:

$$R(t) \approx R_0 + k_1 t + k_2 t^2 + k_3 t^3 + k_4 t^4 \quad (10)$$

式中 k_1, k_2, k_3, k_4 分别为泰勒展开系数,可以通过对时间函数 t 的多项式展开得到,可参考文献[12]。

假设轨道高度10 000 km,轨道倾角 30° ,雷达视角 13° ,合成孔径时间为157 s,雷达系统中心频率为5.4 GHz,波长为0.055 6 m。下面分析基于泰勒级数展开的等效斜距模型下中轨SAR舰船目标二阶、三阶和四阶斜距模型引入的误差。

对于静止的目标,二阶、三阶斜距模型如图4a和图4b所示,最大误差分别为10 m和0.08 m,斜距误差均大于 $\Delta R(t) > N\delta = 6.95 \times 10^{-3}$ m。而如果采用四阶斜距模型,如图4c所示,最大误差为 5.12×10^{-4} m。对于运动速度为30 m/s,40 m/s的动目标,其四阶斜距模型误差分别为 5.41×10^{-4} m, 5.52×10^{-4} m,如图5a和图5b所示。上述的各种运动状态

下四阶斜距误差均小于 $\Delta R(t) < \lambda/8 = 6.95 \times 10^{-3} \text{ m}$, 满足成像的需求。对于在运动速度为30 m/s, 加速度分别 0.5 m/s^2 与 1 m/s^2 的情况下, 其四阶斜距模型误差分别为 $2.53 \times 10^{-4} \text{ m}$, $5.40 \times 10^{-3} \text{ m}$, 如图6a和图6b所示。实际上对于舰船来说在合成孔径时间内其加速度 0.5 m/s^2 已经是考虑到舰船的极限运动条件下的情况, 此时仍然满足成像的需求, 但是也可以看出加速度相对于匀速运动对斜距模型误差较为敏感。对于受2级, 6级海况影响下四阶斜距模型误差分别为 0.206 m , 4.06 m , 如图7a和图7b所示, 该斜距模型误差已不满足成像要求。

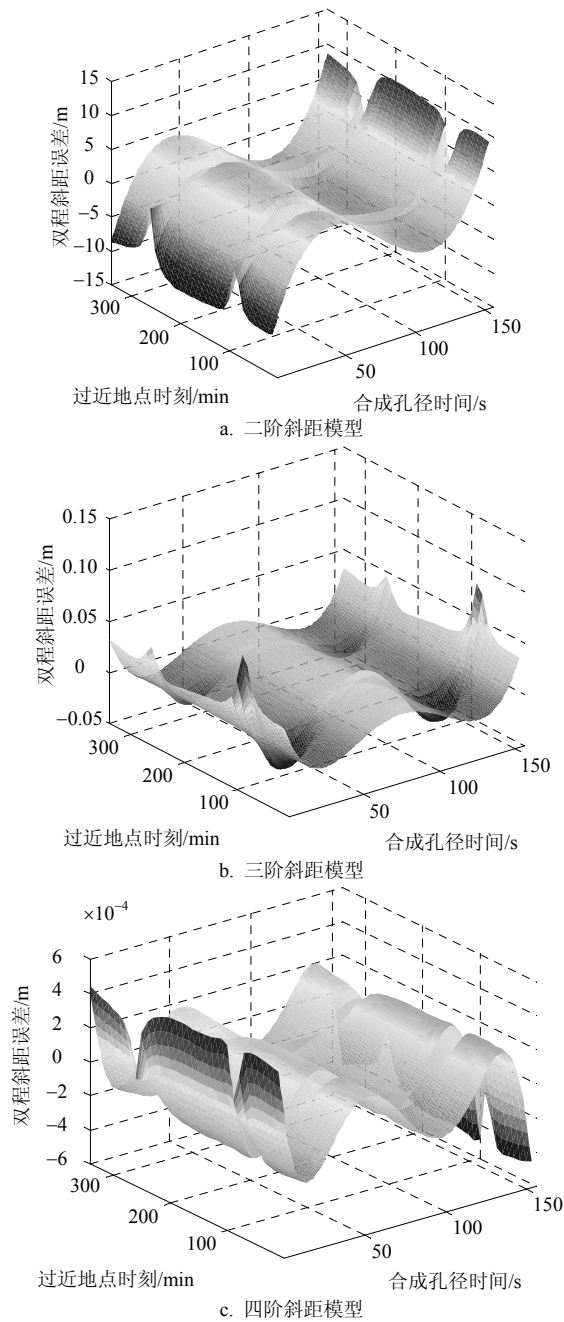


图4 舰船静止时中轨SAR各阶斜距模型的斜距误差

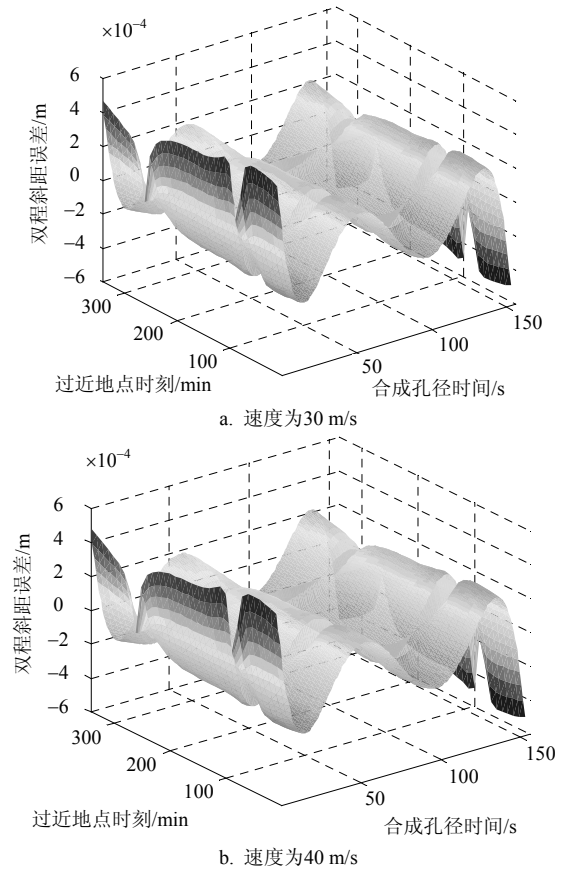


图5 舰船匀速运动时中轨SAR四阶斜距模型的斜距误差

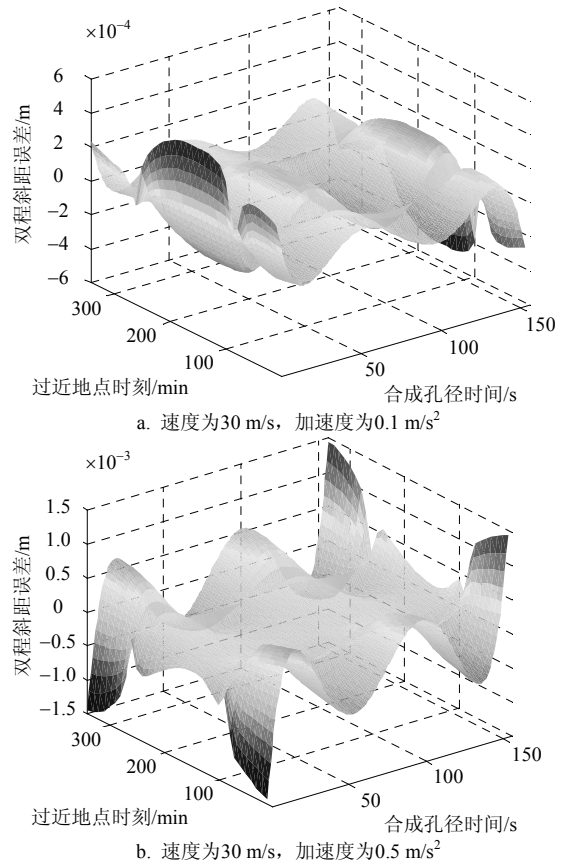


图6 舰船具有加速度运动时中轨SAR四阶斜距模型的斜距误差

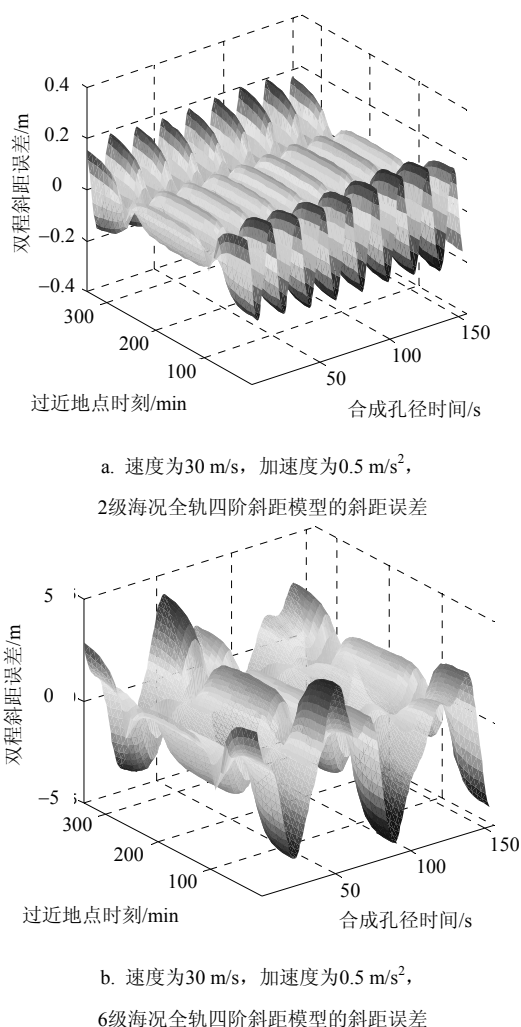


图7 舰船在不同海况(见表1)下中轨SAR四阶斜距模型的斜距误差

因此可以得到,当舰船静止的情况及匀速运动的情况下,如图4和图5所示,四阶斜距模型就能对中轨SAR斜距进行精确描述,当合成孔径时间内具有一定加速度时,四阶斜距模型的精度将下降但还是能够满足成像需求,如图6所示。而当存在受海浪影响时基于四阶斜距模型将失效,并且海况越大斜距模型误差越大,如图7所示。这主要因为舰船匀速运动或者加速度运动时,其位置还是在平面内,而当舰船目标受海浪影响时,其在高度向上也具有距离分量,从而造成了多阶斜距模型不能对中轨SAR的斜距进行精确的描述。因此,对于SAR频域算法,其算法推导的基础在于斜距模型的准确描述,如果斜距模型不能进行精确描述,频域算法将失效。因此对于受海况影响的运动目标,其成像算法不能采用SAR频域算法,而应该考虑基于ISAR的瞬时成像算法^[13]。

在一定的合成孔径时间内,对于不同海况下不

同类型的舰船摆动幅度、周期不一样,一般来说,海况越小,舰船越大,其摆动幅度越小。参考国外海军船体的设计数据,结合海情变化给出了某驱逐舰的周期摆动参数,给出了海情2、6级的舰船三维摆动参数如表1所示。

表1 海情2、6级的驱逐舰三维摆动参数

海情等级	摆动双幅度 $a/(^\circ)$	平均周期 T/s
2	俯仰0.31	4.7
	偏航0.35	10.0
	滚动3.50	8.6
6	俯仰5.20	8.6
	偏航5.80	18.2
	滚动59.10	15.6

1.3 回波信号模型

根据中轨SAR的斜距模型,假设雷达发射线性调频信号,回波经过解调后的信号模型可以表示为:

$$s_0(t_r, t) = w_r \left(t_r - \frac{2R(t)}{c} \right) w_a(t) \times \exp \left(-j \frac{4\pi f_0 R(t)}{c} \right) \exp \left(j\pi K_r \left(t_r - \frac{2R(t)}{c} \right)^2 \right) \quad (11)$$

式中, t_r 为距离向时间; t 为方位向时间; w_r 为距离向包络; w_a 为方位向包络; f_0 为雷达中心频率; K_r 为距离Chirp调频率; c 为光速; $R(t)$ 为考虑非“停-走-停”后对应的单程等效斜距。

2 仿真验证

针对上述的理论分析,结合中轨SAR的轨道参数,进行中轨SAR海面舰船回波建模的仿真,仿真参数如表2所示。

表2 仿真参数

参数	值	参数	值
轨道高度/km	10 000	下视角/ $^\circ$	13
倾角/ $^\circ$	30	载波/GHz	5.4
偏心率	0	带宽/MHz	150
升交点赤经/ $^\circ$	0	方位向分辨率/m	1

根据分辨率与合成孔径时间关系可求得轨道周期内达到1 m分辨率所需合成孔径时间,如图8所示。

可见在1 m分辨率情况下,全轨道周期内需要的平均合成孔径时间为157 s。

下面利用点目标建立起驱逐舰形状如图9所示的一组散射点,目标尺寸为130 m(长)×40 m(宽)×10 m(高),主桅杆高度为50 m,两侧桅杆高度分别为20 m和30 m,散射点间隔为10 m。为了便于分析,

此模型没有考虑遮挡的问题, 所有的散射点都可以接收到雷达信号, 设所有散射点的散射系数为1。

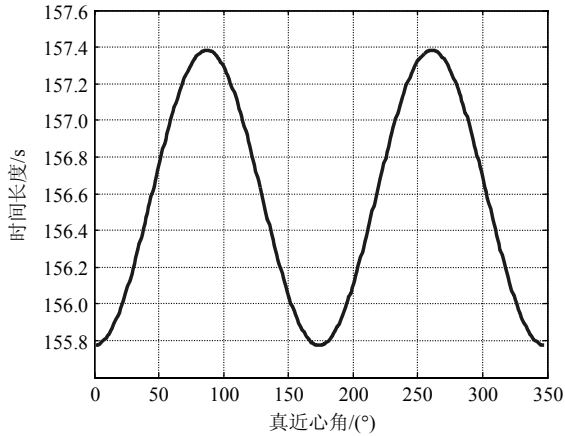
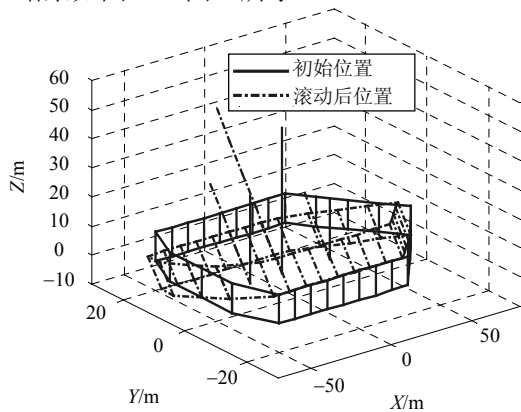


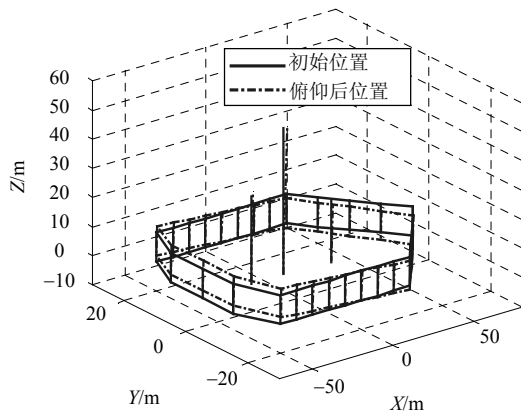
图8 全轨到达方位向1 m分辨率所需合成孔径时间

图9分别为舰船初始位置和6级海况下受滚动、俯仰、偏航和三轴转动影响的位置演示图。

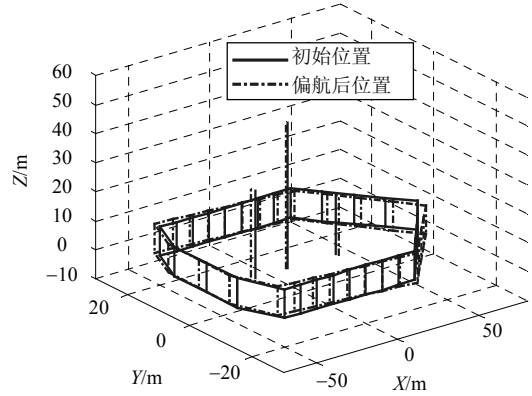
根据舰船在不同海况下的运动状态, 假设舰船运动速度30 m/s, 加速度为0.1 m/s², 结合表2卫星的轨道参数及雷达参数, 对中轨SAR回波建模进行仿真, 结果如图10~图12所示。



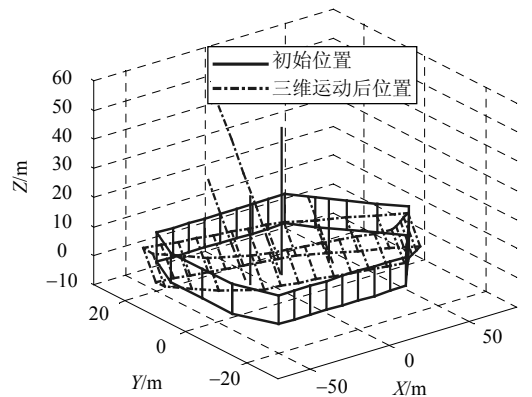
a. 舰船滚动运动演示图



b. 舰船俯仰运动演示图

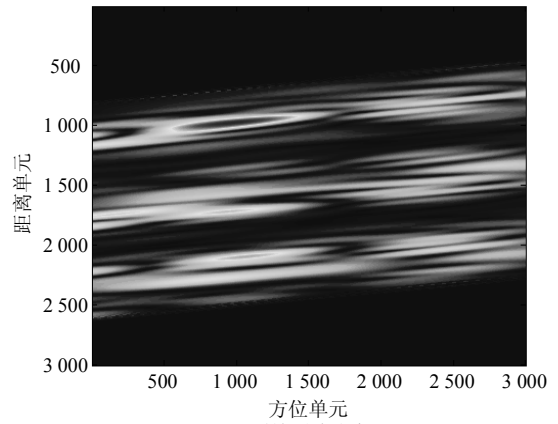


c. 舰船偏航运动演示图

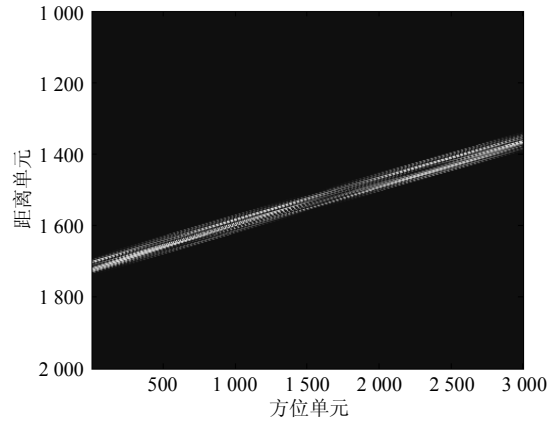


d. 舰船三维运动演示图

图9 舰船受滚动、俯仰、偏航三轴转动演示图

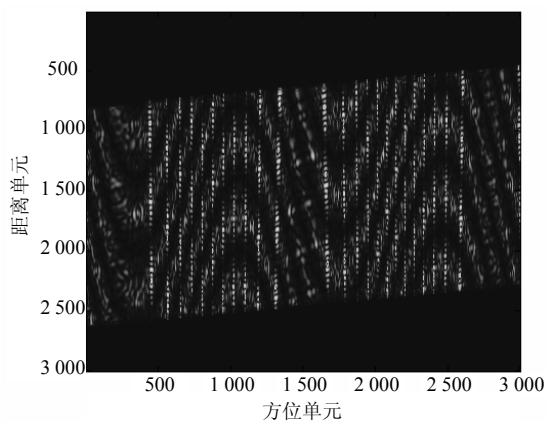


a. 原始回波仿真图

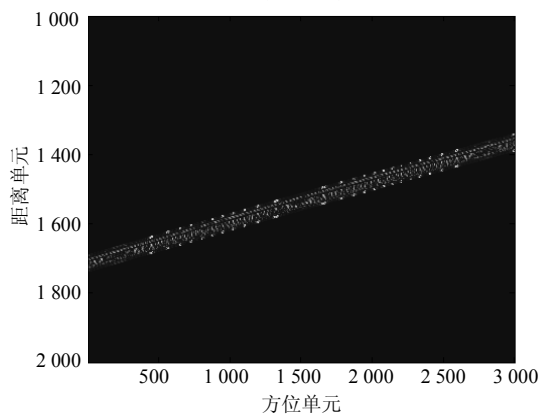


b. 一维距离压缩后

图10 0级海况中轨SAR回波仿真结果

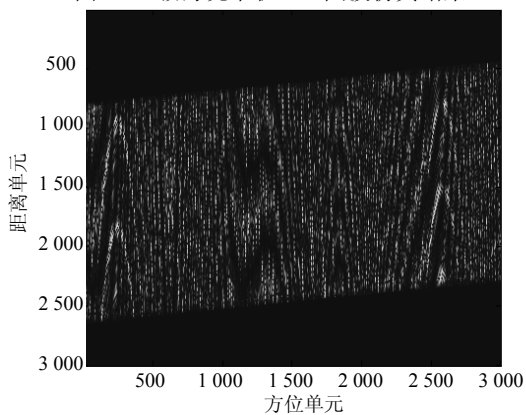


a. 原始回波仿真图

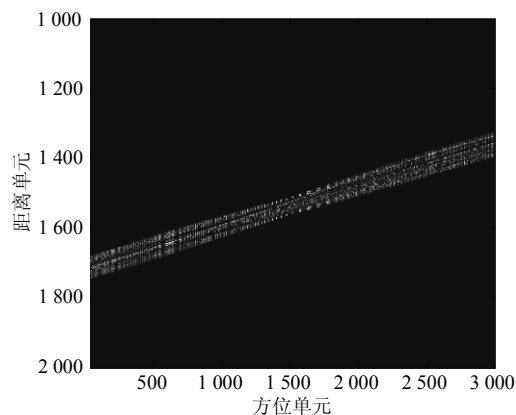


b. 一维距离压缩后

图11 2级海况中轨SAR回波仿真结果



a. 原始回波仿真图



b. 一维距离压缩后

图12 6级海况中轨SAR回波仿真结果

从上述的回波仿真可以看出,在不同的海况下原始的数据回波呈现出不同的形式,这主要是由于受目标的运动特性及海浪的影响。在2级及6级海况的情况下,原始数据经过距离向一维压缩后并非表现出平行状,而是出现了多条距离线相互交织,这也说明了随着海况的出现,回波数据的空变性越来越严重。

3 结束语

结合中轨SAR长合成孔径时间复杂运动轨迹特性以及海面运动目标运动特性,考虑了非“停-走-停”的实际情况,对中轨SAR海面运动舰船的斜距模型及信号回波进行了建模与分析。通过研究发现,当舰船静止、匀速运动以及加速度运动情况下,四阶斜距模型就能对中轨SAR斜距进行精确的描述。当存在受海浪影响时,基于四阶斜距模型将失效。根据SAR成像的原理,如果不能用斜距模型进行精确描述,则基于频率域的算法将失效,进一步可以得到中轨SAR对于受海浪影响的运动目标采用基于频率域的SAR成像算法将失效。上述的相关分析结果将为中轨SAR海面运动目标成像算法提供一定的参考。

参 考 文 献

- [1] ZHANG Tian-yi, DING Ze-gang, TIAN Wei-ming, et al. A 2-D Nonlinear chirp scaling algorithm for high squint GEO SAR imaging based on optimal azimuth polynomial compensation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2017, 99: 1-12.
- [2] GUARNIERI A M, BROQUETAS A, RECCHIA A, et al. Advanced radar geosynchronous observation system: ARGOS[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(7): 1406-1410.
- [3] LI Yuan-hao, MONTI G A, HU Cheng, et al. Performance and requirements of GEO-SAR systems in the presence of radio frequency interferences[J]. Remote Sensing, 2018, 10(1): 82.
- [4] MATAR J, LOPEZ-DEKKER P, KRIEGER G. Potentials and limitations of MEO SAR[C]//Proceedings of EUSAR 2016: 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Hamburg, Germany: VDE, 2016.
- [5] HUANG Li-jia, QIU Xiao-lan, HU Dong-hui, et al. An advanced 2-D spectrum for high-resolution and MEO spaceborne SAR[C]//2009. Apsar 2009. Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar. [S.l.]: IEEE, 2010: 447-450.

(下转第857页)

- [15] RASHIDINIA J, MAHMOODI Z. Non-polynomial spline solution of a singularly-perturbed boundary-value problems[J]. *Int J Contemp Math Sciences*, 2007, 2(32): 1581-1586.
- [16] KHAN A, NOOR M A, AZIZ T. Parametric quintic-spline approach to the solution of a system of fourth-order boundary-value problems[J]. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 2004, 122(2): 309-322.
- [17] SIDDIQI S S, AKRAM G. Solution of the system of fourth-order boundary value problems using non-polynomial spline technique[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2007, 185(1): 128-135.
- [18] XIA L T, ZHU Y S. The Application of weighted Markov chain to the prediction of plum rains intensity of down and middle streams of Yangtze river basin[J]. *Journal of Management Science and Statistical Decision*, 2004, 1(1): 75-84.
- [19] RABINER L, JUANG B. An introduction to hidden Markov models[J]. *IEEE Assp Magazine*, 1986, 3(1): 4-16.
- [20] KENNEDY J. Particle swarm optimization[M]// *Encyclopedia of Machine Learning*. [S.l.]: Springer, 2011: 760-766.
- [21] AZIZ T, KHAN A. A spline method for second-order singularly perturbed boundary-value problems[J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2002, 147(2): 445-452.
- [22] GEBRAEEL N Z, LAWLEY M A, LI R, et al. Residual-life distributions from component degradation signals: a Bayesian approach[J]. *IIE Transactions*, 2005, 37(6): 543-557.
- [23] LIU Z, ZENG X, CHENG Y, et al. Spline cell-based hidden Markov approach for singular time series forecasting in performance degradation trend analysis[C]// *Instrumentation and Measurement Technology Conference*. [S.l.]: IEEE, 2016: 1-6.

编辑 漆蓉

(上接第844页)

- [6] MATAR J, CASSOLA M R. Mission considerations for future MEO SAR systems[C]// *Proceedings of EUSAR 2018: 12th European Conference on Synthetic Aperture Radar*. Aachen, Germany: VDE, 2018.
- [7] BAO Min, XING Meng-dao, LI Y C, et al. Two-dimensional spectrum for MEO SAR processing using a modified advanced hyperbolic range equation[J]. *Electronics Letters*, 2011, 47(18): 1043-1045.
- [8] HUANG Li-jia, QIU Xiao-lan, HU Dong-hui, et al. Medium-Earth-Orbit SAR focusing using range doppler algorithm with integrated two-step azimuth perturbation[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2014, 12(3): 626-630.
- [9] CHEN Jian-lai, XING Meng-dao, SUN Guang-cai, et al. Focusing of medium-earth-orbit SAR using an ASE-Velocity model based on MOCO principle[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2018, 56(7): 3963-3975.
- [10] LIU Wen-kang, SUN Guang-cai, XIA Xiang-gen, et al. A modified CSA based on joint time-doppler resampling for MEO SAR stripmap mode[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2018, 56(6): 3573-3586.
- [11] 杨传安, 齐向阳, 李宁. 一种基于参数估计的运动舰船 SAR 成像方法[J]. *国外电子测量技术*, 2017, 36(5): 30-36.
YANG Chuan-an, QI Xiang-yang, LI Ning. A method for moving ship SAR imaging based on parameter estimation[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2017, 36(5): 30-36.
- [12] HU Cheng, LONG Teng, LIU Zhi-peng, et al. An improved frequency domain focusing method in geosynchronous SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2012, 52(9): 5514-5528.
- [13] JIANG Yi-cheng, WANG Han-yun. Hybrid SAR/ISAR imaging of ship targets based on parameter estimation[J]. *Remote Sensing Letters*, 2017, 8(7): 657-666.

编辑 税红