## GEOSAR 舰船目标三维转动对检测信噪比影响分析

张升\* 孙光才 邢孟道

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

**摘 要:**回波信号信噪比(SNR)是决定地球同步轨道合成孔径雷达(GEOSAR)舰船目标检测性能的关键指标。该文 针对 GEOSAR 卫星与舰船目标超远作用距离导致的单脉冲回波低信噪比问题,具体分析了方位脉冲相干积累对舰 船目标检测信噪比的提升,以及信噪比提升受舰船目标3维转动的影响,并通过实测数据处理和仿真实验得出了相 关结论。

 关键词:地球同步轨道合成孔径雷达;舰船目标检测;信噪比;3维转动

 中图分类号:TN958
 文献标识码:A

 文章编号:1009-5896(2016)05-1261-05

 DOI: 10.11999/JEIT150821

# Analysis of the SNR for 3-D Rotating Sea Ship Detecting in Geosynchronous Synthetic Aperture Radar System

ZHANG Sheng SUN Guangcai XING Mengdao

(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract**: Signal to Noise Ratio (SNR) of the echo is critical for the detecting performance of sea ship in GEOsynchronous Synthetic Aperture Radar (GEOSAR) system. To address the low SNR problem of single pulse echo due to ultra-long distance between the satellite and sea ship, specific analysis of the improved SNR with coherent integration and its suffering from 3-D rotations of sea ship is carried out in this paper, corresponding conclusions are drew through processing of simulating and real data.

**Key words**: GEOsynchronous Synthetic Aperture Radar (GEOSAR); Sea ship detecting; Signal to Noise Ratio (SNR); 3-D rotating

## 1 引言

地球同步轨道合成孔径雷达(GEOsynchronous Synthetic Aperture Radar, GEOSAR)作为一种新 体制 SAR 是由文献[1,2]在 1978~1983 年首先提出。 2003 年美国 NASA 资助 JPL 实验室在全球地震卫 星预测系统(GESS)计划中进行了同步轨道 SAR 系 统论证、天线设计、空间辐射、信号处理等预先研 究<sup>[3]</sup>。相关研究成果表明,由于 GEOSAR 卫星与目 标之间的超远作用距离,单脉冲回波信号的信噪比 非常低,需要通过提高发射功率和增加发射天线面 积来保证回波信号最低信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)<sup>[4,5]</sup>。对于目标检测而言,为达到一定的 检测概率和虚警率,要求回波信号具有更高的信噪 比<sup>[6]</sup>。

GEOSAR 长合成孔径时间内的回波信号相干 积累可以显著提高信噪比,从而减小系统及天线设 计的压力<sup>[7]</sup>。静止目标的方位脉冲相干积累可以通过 GEOSAR 成像算法<sup>[8-10]</sup>补偿卫星沿轨道运动实现, 而运动目标回波信号的相干积累需要求解运动目标 的运动参数进行运动补偿<sup>[11]</sup>。海上舰船目标的运动 可以分解为线性航行运动和非线性3维转动,线性 航行运动的运动参数求解及运动补偿可以利用现有 的 SAR-GMTI 算法实现<sup>[12]</sup>,而舰船目标受海上风浪 影响进行的3维非线性转动,其运动参数的求解及 运动补偿难以实现,从而造成回波信号的非相干积 累,不能有效提高信噪比。

本文根据舰船目标回波信号信噪比积累与合成 孔径时间的关系,首先指出舰船目标在子孔径时间 的方位脉冲相干积累就能实现最优的检测信噪比; 同时,对子孔径时间内的舰船3维转动引起的斜距 变化进行分析,深入研究了不同海况下的舰船3维 转动对子孔径最优检测信噪比积累的影响。本文初 步探究了 GEOSAR 舰船目标检测的信噪比积累及 受舰船运动的影响问题,为开展 GEOSAR 海洋应 用研究工作提供了参考。

## 2 基于最优检测信噪比的子孔径时间分析

文献[7]以点目标为例,仿真分析了超长合成孔

收稿日期: 2015-07-08; 改回日期: 2016-01-15; 网络出版: 2016-03-11 \*通信作者: 张升 lenin1036@163.com

径时间的方位脉冲相干积累对于目标信噪比的显著 提升。然而长合成孔径时间对于目标检测而言不具 备时效性,而且长合成孔径时间的舰船运动特性复 杂,影响回波信号的相干积累。

## 2.1 舰船目标回波信号信噪比积累与合成孔径时间 的关系

根据雷达方程,单脉冲回波信号的信噪比可表 示为

$$\mathrm{SNR} = \frac{P_{\mathrm{t}}G_{\mathrm{t}}G_{\mathrm{r}}F_{\mathrm{t}}^{2}F_{\mathrm{r}}^{2}\lambda^{2}\sigma}{(4\pi)^{3}R^{4}KT_{\mathrm{r}}B_{\mathrm{r}}\eta}$$
(1)

其中,  $P_t$  为发射信号峰值功率,  $G_t$  为发射天线功率 增益,  $G_r$  为接收天线功率增益,  $F_t$  为从发射天线到 目标的方向图传播因子,  $F_r$  为从目标到接收天线的 方向图传播因子,  $\lambda$ 为信号波长,  $\sigma$  为分辨单元对 应的雷达截面积, R 为雷达到目标作用距离, K 为 波尔兹曼常数,  $T_s$  为系统噪声温度,  $\eta$  为系统损耗, 包括发射损耗、天线方向图损耗和大气传播损耗等。 SAR 依靠合成孔径技术可以实现方位脉冲的相干积 累, 在合成孔径时间 $T_a$  内, 方位积累的脉冲数 N 可 以表示为

$$N = T_{\rm a} \cdot \text{PRF} \tag{2}$$

其中,PRF为脉冲重复频率。合成孔径时间越长, 方位积累脉冲数越多,从而提高积累后的目标信噪 比。但是当合成孔径时间增加到使 SAR 方位分辨率 小于舰船方位尺寸时,分辨单元对应的雷达截面积 是随着合成孔径时间的增加而减小的。

$$\sigma = \sigma^0 \rho_{\rm a} \rho_{\rm gr} = \sigma^0 \frac{1}{2} \left( \frac{\lambda}{T_{\rm a} v_{\rm s}} \right) R \cdot \rho_{\rm gr} \tag{3}$$

其中, $\sigma^0$ 为目标的归一化后向散射系数, $\rho_a$ 为SAR 方位分辨率, $\rho_{gr}$ 是SAR 地距分辨率, $v_s$ 为平台飞 行速度。此时,增加合成孔径时间并不能提升舰船 目标积累信噪比。

#### 2.2 低轨 SAR 卫星实测数据验证

由于缺少 GEOSAR 实测数据,而低轨 SAR 回 波信号信噪比积累同样满足合成孔径雷达原理并可 以利用 SAR 雷达方程计算。通过逐步增加子孔径时 间对 RADARSAT-1 海岸舰船数据进行成像处理, 实现舰船目标的信噪比积累。成像后的舰船目标某 距离检测单元的方位切片如图 1 所示,选取该距离 检测单元的峰值能量作为信号能量计算各个子孔径 时间内的积累信噪比,可以得到如图 1(f)所示结果。 图 1(f)所示的信噪比随合成孔径时间变化与雷达方 程的分析结果一致:方位分辨率等于舰船方位尺寸 (1/4 全孔径时间)时,信噪比基本不变,即在 1/4 全 孔径时间时信噪比已经达到最优。

## 3 子孔径最优检测信噪比提升受舰船目标 3 维转动影响分析

海面航行的舰船目标是运动的,舰船目标运动 将造成回波信号的非相干积累。本文将主要分析难 以补偿的非线性3维转动对舰船目标回波信号相干 积累和信噪比提升的影响。

#### 3.13 维转动影响仿真分析

3.1.1 参数准备 仿真实验的 GEOSAR 系统参数、



图 1 舰船目标某一距离单元方位切片图

轨道参数及舰船转动参数如表 1 所示,组成舰船目标的 15 个散射点以相同的经纬度间隔组成一个平面,平面尺寸转换到直角坐标约为长×宽=301.8m×44.5m,舰船 3 维转动以 15 个散射点的中心散射点为转动原点, *X* 轴指向舰船航行方向, *Y* 轴在船体平面内与 *X* 轴垂直, *Z* 轴与 *X* 轴和*Y* 轴组成的船体平面垂直, *Z* 指向由右手法则确定。

**3.1.2 仿真过程及结果** 仿真实验首先在未添加转动时以 400 s 的全孔径时间对舰船散射点目标进行成像,成像算法选择后向投影算法<sup>[13]</sup>,成像结果如 图 2(a)所示。400 s 全孔径时间对应的方位分辨率约为 20 m。根据图 2(b)的 GEOSAR 分辨率仿真结果可以看到,在表 1 所示系统及轨道参数下,方位分辨率等于舰船方位尺寸的子孔径时间约为 25 s。25 s 的子孔径时间内,未添加转动时的成像结果如图 2(c) 所示,添加转动后的成像结果如图 2(d)所示,可以 看到舰船散射点受转动影响完全散焦。

**3.1.3 仿真结果分析** SAR 成像中相干积累条件为 相位变化不超过 π/4, 根据表 1 中的参数将其等效

到对应的斜距变化,即瞬时斜距变化不超过 0.015 m。添加转动后,得到离转动中心较远的某一边缘 散射点的瞬时斜距变化如图 3(a)所示,可以看到, 转动引起的瞬时斜距变化比 0.015 m 大很多,从而 导致回波信号的方位非相干积累。

在图 3(a)中选取 332 ~347 s 的 15 s 子孔径时间 内,线性拟合后的剩余斜距变化小于 0.015 m(如图 3(b)所示),在此子孔径时间对舰船目标进行成像积 累,得到如图 3(d)所示的成像结果,舰船目标散射 点实现了聚焦,然而由于线性斜距变化等效的速度 影响,散射点目标在方位上产生了较大的位置偏移。 从文献[14]可知,动目标径向速度会引起动目标方位 成像位置的偏移,位置偏移大小Δa<sub>z</sub>与径向速度 v<sub>r</sub> 的关系可以表示为

$$\Delta a_z = \left(v_r \,/\, V\right) R_s \tag{4}$$

其中, V 为雷达载体运行速度, R<sub>s</sub>为雷达到动目标 斜距。舰船转动等效的径向速度虽然很小, 卫星到 舰船目标的作用距离却非常远, 从而导致舰船散射

系统参数		工作频率	信号带宽	脉冲重复频率	天线尺寸	
		1.25 GHz 20 MHz		100  Hz	$26~\mathrm{m}{\times}23~\mathrm{m}$	
—————————————————————————————————————		偏心率	轨道倾角	天线视角	升交点赤经	
机坦参数		0.05	$16^{\circ}$	3°(左视)	$106^{\circ}$	
	幅度(°)			平均周期(s)		
村切砂奴 —	俯仰	偏航	横滚	俯仰	偏航	横滚
低海况	0.2	0.28	1	56	165	132
高海况	0.5	0.80	3	19	55	44





图 2 舰船目标添加转动前后成像结果



图 3 转动引起的斜距变化对于成像的影响

点非常大的方位位置偏移。可见,线性斜距变化的 子孔径时间内虽然可以实现散射点目标能量的聚 焦,但是舰船转动速度引起的方位位置偏移导致分 辨单元内散射点减少,相当于减小了分辨单元内的 舰船目标雷达截面积,导致信噪比的降低。

另选取图 3(a)中 13~23 s 所示的 10 s 子孔径时 间,此时的斜距变化可近似拟合为二次非线性变化, 如图 3(c)所示。在此子孔径时间内对舰船散射点目 标进行成像的结果如图 3(e)所示,可以看到此时的 散射点目标虽然没有位置偏移,分辨单元内的舰船 目标雷达截面积没有减小,但是由于回波信号的非 相干积累,散射点目标能量散焦,散射能量减小, 同样导致信噪比的降低。

#### 3.2 不同海况下的舰船目标信噪比积累

总结本文的分析结果,可以得到如图 4 所示的 不同海况下舰船目标信噪比积累示意图。检测信噪 比的起点为单脉冲回波信号信噪比 SNR<sub>0</sub>,在 0 级海 况下,舰船目标静止,在方位分辨率等于舰船方位 尺寸的子孔径时间 T<sub>3</sub>内可以实现相干积累,检测信 噪比近似线性提升到最优检测信噪比 SNR<sub>opt</sub>,之后 由于脉冲积累的同时分辨单元面积减小,信噪比基 本不变;在低海况下,合成孔径时间增加到 T<sub>2</sub>之前, 转动影响导致的信噪比降低作用比方位脉冲积累对 于信噪比的提升作用弱,检测信噪比提升缓慢,最 终能够达到 SNR<sub>2</sub>,此后转动影响导致的信噪比降低 作用加强,信噪比有下降的趋势;高海况下,转动 影响的作用更强,舰船目标在更短的子孔径时间 T<sub>1</sub> 内可以达到的检测信噪比SNR<sub>1</sub>更低,此后的信噪比降低也更加严重。

### 4 结束语

目前针对 GEOSAR 运动目标处理的研究成果 较少,研究成果较多集中在静止场景成像领域。本 文通过分析舰船目标信噪比与合成孔径时间的关 系,首先得到了舰船静止时可以实现最优检测信噪 比的子孔径时间,而针对舰船在海面的运动,本文 分析了不同海况下转动引起的方位位置偏移和散焦 对信噪比积累的影响,得到了相应的结论。本文对 GEOSAR 舰船目标检测信噪比进行了初步研究,后 续将结合长合成孔径时间海面舰船回波实测数据对 舰船及海杂波复杂散射特性进行具体分析,更加深 入地研究 GEOSAR 舰船目标检测的可行性及检测 实现方案。



图 4 舰船目标添加转动前后成像结果

### 参考文献

- TOMIYASU K. Synthetic aperture radar in geosynchronous orbit[C]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 1978, 2(1115): 42–45. doi: 10.1109/ APS.1978.1147948.
- [2] TOMIYASU K and PACELLI J L. Synthetic aperture radar imaging from an inclined geosynchronous orbit[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1983, 21(3): 324–329. doi: 10.1109/TGRS.1983.350561.
- [3] NASA and JPL. Global earthquake satellite system: a 20-year plan to enable earthquake prediction[OL]. http:// solidearth.jpl.nasa.gov/GESS/3123\_GESS\_Rep\_2003.pdf, March, 2003.
- [4] EDELSTEIN W, MADSEN S, MOOUSSESSIAN A, et al. Concepts and technologies for synthetic aperture radar from MEO and geosynchronous orbits[C]. Proceedings of the International Society for Optical Engineering, Bellingham, WA, 2005: 195–203.
- [5] MOOUSSESSIAN A, CHEN C, EDELSTEIN W, et al. System concepts and technologies for high orbit SAR[C]. Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International, Long Beach, 2005: 1623–1626. doi: 10.1109/MWSYM. 2005.1517017.
- [6] SKOLNIK M I. 雷达手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 39-37.
- [7] RODON J R, BROQUETAS A, GUARNIERI A M, et al. A Ku-bandgeosynchronous synthetic aperture radar analysis with medium transmitted power and medium-sized antenna
   [C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Sydney, 2001: 2456–2459. doi: 10.1109/IGARSS.
   2011.6049708.
- [8] HU Cheng, LIU Zhipeng, and LONG Teng. An improved CS algorithm based on the curved trajectory in geosynchronous SAR[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2012, 5(3): 795–808. doi: 10.1109/JSTARS.2012.2188096.
- [9] 洪文,林赟,谭维贤,等.地球同步轨道圆迹 SAR 研究[J]. 雷达学报, 2015, 4(8): 241-253. doi: 10.12000/JR15062.

HONG Wen, LIN Yun, TAN Weixian, et al. Study on geosynchronous circular SAR[J]. Journal of Radars, 2015, 4(8): 241–253. doi: 10.12000/JR15062.

- BAO Min, XING Mengdao, and LI Yachao. Chirp scaling algorithm for GEO SAR basedon fourth-order range equation
   [J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(1): doi: 10.1049/el.2011. 1892.
- [11] 邢孟道,孙光才,李学仕.用于高分辨率宽测绘带 SAR 系统的 SAR/GMTI 处理方法研究[J]. 雷达学报, 2015, 4(4): 375-385. doi: 10.12000/JR15062.
  XING Mengdao, SUN Guangcai and LI Xueshi. Study on SAR/GMTI processing for high-resolution wide-swath[J]. Journal of Radars, 2015, 4(4): 375-385. doi: 10.12000/JR15062.
- [12] 张升,孙光才,李学仕,等. 一种新的基于瞬时干涉的 SAR-GMTI 精聚焦和定位方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(7): 1729-1735. doi: 10.1199/JEIT141245.
  ZHANG Sheng, SUN Guangcai, LI Xueshi, et al. Multi-channel synthetic aperture radar-ground moving target indication high-accuracy focusing and positioning using instantaneous[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(7): 1729-1735. doi: 10.1199/JEIT141245.
- [13] DESAI M D and JENKINS W K. Convolution backprojection image reconstruction spotlight mode synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 1(4): 505–517. doi: 10.1109/83.199920.
- [14] LIU Baochang, WANG Tong, LI Yongkang, et al. Effects of doppler aliasing on baseline estimation in multichannel SAR-GMTI and solutions to address these effects[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(10): 6471–6487. doi: 10.1109/TGRS.2013.2296660.
- 张 升: 男, 1987 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 成像、动目 标检测.
- 孙光才: 男,1984年生,博士、讲师,研究方向为雷达成像和目标识别.
- 邢孟道: 男,1975年生,博士、教授,博士生导师,主要研究方向为雷达成像和目标识别.